

骨材の影響に着目したコンクリートの乾燥収縮特性評価と

RC はりのせん断耐荷挙動へ及ぼす収縮の影響に関する研究

(Study on evaluation of drying shrinkage of concrete focusing on aggregate properties and shrinkage effect on shear strength of reinforced concrete beams)

2015 年 3 月

兵頭 彦次

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 コンクリートの収縮に関する経緯・動向	1
1.1.3 現状の技術的課題	3
1.2 本研究の目的	5
1.3 本論文の構成	5
第1章の参考文献	7

第2章 既往の研究

2.1 はじめに	9
2.2 コンクリートの乾燥収縮に関する研究	9
2.2.1 乾燥収縮のメカニズム	9
2.2.2 乾燥収縮の定義	10
2.2.3 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす使用材料の影響	12
2.3 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材物性の影響に関する研究	19
2.3.1 骨材物性の影響	19
2.3.2 骨材の品質評価指標	21
2.4 コンクリートの乾燥収縮予測に関する研究	22
2.4.1 土木学会コンクリート標準示方書における乾燥収縮の経緯	22
2.4.2 国内外の規準式	23
2.4.3 複合モデル	26
2.5 RCはり部材に及ぼす収縮の影響に関する研究	31
2.5.1 RCはり部材の曲げひび割れ・変形・耐荷力に及ぼす収縮の影響	31
2.5.2 せん断補強筋のないRCはり部材のせん断耐荷挙動	31
2.5.3 収縮がRCはり部材のせん断耐荷力に及ぼす影響	35
2.6 第2章のまとめ	39
第2章の参考文献	40

第3章 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす使用材料の影響と

収縮抑制材料の効果

3.1 はじめに	46
3.2 実験概要	46

3.2.1	使用材料	46
3.2.2	実験水準	48
3.2.3	コンクリートの配合	50
3.2.4	試験項目および試験方法	63
3.2.5	フレッシュコンクリートの性状	63
3.2.6	強度特性	63
3.3	実験結果	64
3.3.1	セメント種類の影響	64
3.3.2	骨材の影響	71
3.3.3	石灰石骨材の効果	77
3.3.4	膨張材の効果	80
3.3.5	収縮低減剤の効果	85
3.4	材料による収縮抑制効果	89
3.5	第3章のまとめ	90
	第3章の参考文献	91

第4章 骨材の物性がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

4.1	はじめに	92
4.2	実験概要	92
4.2.1	使用材料	92
4.2.2	実験方法	94
4.3	実験結果	99
4.3.1	コンクリートの乾燥収縮ひずみ	99
4.3.2	骨材物性と乾燥収縮ひずみの関係	100
4.3.3	相関分析・重回帰分析	114
4.3.4	粗骨材粒の乾燥収縮測定方法に関する検討	118
4.4	第4章のまとめ	123
	第4章の参考文献	124

第5章 複合モデルによるコンクリートの乾燥収縮予測方法の検討

5.1	はじめに	126
5.2	骨材物性のモデル化と予測精度の検証	126
5.2.1	3相複合モデル	126
5.2.2	セメントペーストの乾燥収縮	127
5.2.3	骨材物性のモデル化	129
5.2.4	骨材物性モデルの適用性の検証	133

5.2.5	レディーミクストコンクリートの収縮試験データによる精度検証	137
5.3	ケーススタディによる複合モデルと土木学会式の比較	142
5.4	第5章のまとめ	146
	第5章の参考文献	147
第6章	コンクリートの収縮がRCはりのせん断耐荷挙動に及ぼす影響	
6.1	はじめに	149
6.2	実験概要	149
6.2.1	使用材料およびコンクリートの配合	149
6.2.2	供試体概要	150
6.2.3	試験方法	152
6.3	実験結果および考察	153
6.3.1	コンクリートの強度・収縮特性	153
6.3.2	RCはりのせん断強度に及ぼす乾燥の影響	157
6.3.3	コンクリートの収縮がRCはりのひび割れ・変形に及ぼす影響	161
6.4	コンクリートの収縮を考慮したせん断強度評価法	169
6.4.1	既往のせん断強度式による評価	169
6.4.2	コンクリートの収縮を考慮したせん断強度評価法	172
6.5	第6章のまとめ	177
	第6章の参考文献	179
第7章	結論	181
7.1	はじめに	181
7.2	本研究で得られた知見と課題	181
7.2.1	本研究で得られた知見	181
7.2.2	今後の課題	187
7.3	おわりに	191
	第7章の参考文献	191
	本論文に関連のある研究報告	192

謝辞

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 はじめに

コンクリートの収縮は、内部に配置された鉄筋等によって拘束されることで断面内に引張応力を生じ構造物にひび割れを誘発させる。ひび割れは、構造物の美観や水密性、鉄筋の腐食にともなう耐久性能の低下に繋がる。そのため、コンクリートの乾燥収縮挙動やそれにともなうひび割れ発生を予測し、適切に対策を講じることは、構造物の高品質化、高耐久化、長寿命化につながる重要な工学的課題のひとつである。これまでの精力的な研究によって、コンクリート構造物の設計プロセスの中で、コンクリートの乾燥収縮は材料設計値として組み込まれ、また近年、高強度コンクリートで顕在化する自己収縮についても考慮できるよう、設計の体系化が図られてきた。ところが最近、コンクリートの収縮によって構造物に過大なひび割れや想定外のたわみが生じた問題に端を発し、コンクリートの収縮の取扱い、設計方法を見直す必要性が生じてきた。事態の重要性や業界への影響度の高さから、学協会の取り組みとして、精力的な研究活動が進められてきた。以下に、コンクリートの収縮に関する学協会の取扱いの経緯や最近の動向等の背景を概説するとともに、本研究の目的および論文の構成を示す。

1.1.2 コンクリートの収縮に関する経緯・動向

コンクリートの乾燥収縮は古くからの研究課題であり、これまでも、メカニズムの解明、モデル構築、予測手法の提案などがなされてきてきた。また研究成果は、実際に設計基準類に反映されてきている。昭和6年制定鉄筋コンクリート標準示方書¹⁾では「硬化収縮の影響と考慮する必要がある場合には、之を温度低下 15°Cに相当する影響あるものと仮定すべし。」と記述されており、鉄筋コンクリートとしての収縮量を 150 μ (温度膨張係数 10 μ /°Cとして)と設定することが既に示されていた。また、同解説²⁾では無筋コンクリートの場合の収縮量を 250 μ (温度低下 25°C相当)としていた。昭和61年制定示方書³⁾から、CEB-FIP 設計施工指針に示される Rüschi の提案⁴⁾を採用し、部材寸法、相対湿度、温度の影響を考慮できる形が示された。平成8年制定示方書⁵⁾では、わが国独自の収縮予測式が示された。また、高強度コンクリートの実用化にともなって顕在化してきた自己収縮についても新たに考慮された。これにともなって、表記を「乾燥収縮」から「収縮」に改めた。2002年制定示方書[構造性能照査編]⁶⁾より、新たに高強度域(圧縮強度 80N/mm² まで)に適用可能な予測式を掲載し、自己収縮と乾燥収縮の予測値を重ね合わせる方法を採用した。

このような変遷を経る中、2002年に竣工した高架橋において、わずか一年半経過時点でコンクリートの収縮による過大な収縮ひび割れや想定外のたわみが生じるという事例が発生した。土

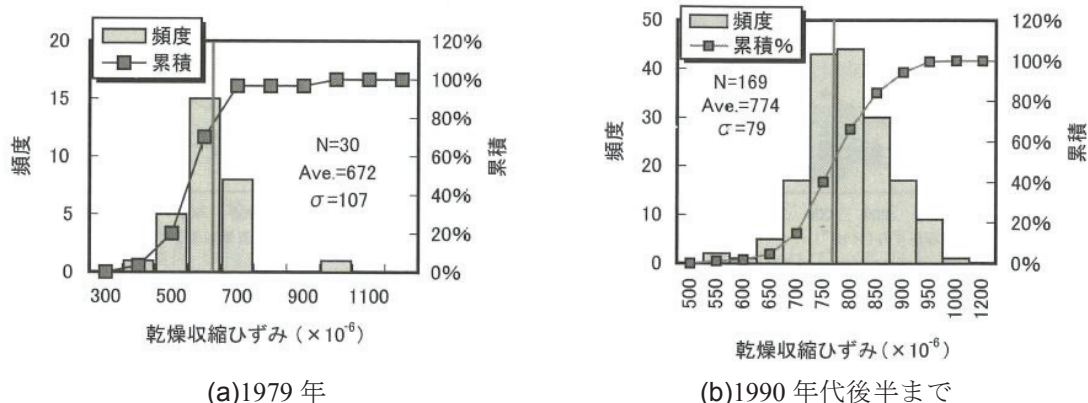


図-1.1 乾燥収縮ひずみ調査データ⁹⁾

木学会では、「垂井高架橋損傷対策特別委員会」(委員長:長岡技術科学大学 丸山久一教授)が設置され、過大な収縮ひび割れの原因究明、健全性評価、補修・補強、維持管理の観点から報告書⁷⁾が取りまとめられた。その中で、骨材の品質によってコンクリートの収縮が想定外に大きかったことが構造物の変状の主たる原因であることが報告された。これを受けて、2007年版示方書⁸⁾では、収縮の設計値は試験値や実績を原則とすること、設計式によって収縮量を予測する場合、予測値を1.5倍割り増すことを定めた。これは、レディーミクストコンクリートの実態として、ほとんどが満足する収縮ひずみ(JIS A 1129試験で水中7日養生後、6か月乾燥条件)が1000 μ であり、これに材齢7日以前の自己収縮と6か月以降の収縮分である200 μ を見込んで、設計における収縮ひずみの最終値を1200 μ 程度と想定したものである。

時をほぼ同じくして、建築分野においても鉄筋コンクリート構造物に生じるひび割れが注目されるようになった。これは、1999年に「住宅の品質確保の促進等に関する法律」が制定され、ひび割れの瑕疵の可能性の判断基準が示されたためである。日本建築学会では、建築分野における主なひび割れ原因であるコンクリートの乾燥収縮について調査し、図-1.1に示すように、1979年にセメント協会が実施した全国的な実験結果よりも1990年代後半までの全国的な乾燥収縮データのほうが100 μ 程度増大していることを報告⁹⁾した。構造物の品質確保の観点から、同学会は「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009」において、コンクリートの乾燥収縮の基準値を「 8×10^{-4} 以下」(850 μ 未満)と設定した¹⁰⁾。

これら両学会の動向にともない、業界ではコンクリートの乾燥収縮に関する調査研究が集中的に行なわれた。日本コンクリート工学会(当時、工学協会)においては、会長特別委員会「コンクリートの収縮問題検討委員会」(委員長:大林組 十河茂幸(現 広島工業大学教授))が設置され、現状調査や試験結果の評価方法の検討などが行なわれた¹¹⁾。引き続き、収縮メカニズムや構成材料ごとの評価方法の検討などを継続するために、「コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会」(委員長:京都大学 河野広隆教授)が設置された¹²⁾。土木学会では、「示方書改訂小委員会 収縮ケーススタディー作業部会」(主査:長岡技術科学大学 下村匠教授)が立ち上げられ、示方書の正しい運用を目的として、構造計算における収縮の取扱

方法について取りまとめた¹³⁾。これらの調査研究によって、コンクリートの収縮に及ぼす骨材の影響が改めて注目されるとともに、適切な収縮設計値を定められる実用的な手法の構築が求められた。

一方、コンクリートの収縮が構造物に及ぼす作用や性能に及ぼす影響について、材料から構造を連成した体系的な検討の必要性を鑑み、日本コンクリート工学会において、「耐久性力学に基づく収縮影響評価研究委員会」(委員長: 広島大学 佐藤良一教授)が設置された。同委員会では、Ulm ら¹⁴⁾が提唱した「Durability Mechanics」の概念を発展させて再構築した「耐久性力学」に基づき、コンクリートの体積変化と構造性能の連成問題を体系的に取り扱い、今後の研究の方向性や設計法の再構築に資することを目的に調査研究が行われた¹⁵⁾。その中では、コンクリートの収縮が、設計上用いられている耐力算定式において、どの程度反映されていて、どの程度影響を及ぼすかについて調査され、コンクリートの収縮の影響を、従来と整合が取れた形で設計に合理的に取り込むことが今後の課題とされた。

これら研究成果を反映する形で、2012年制定示方書[設計編]¹⁶⁾ではコンクリートの収縮に関する設計式が改良され、骨材の品質、吸水率がパラメータとして組み込まれることとなった。また、レディーミクストコンクリート工場が各自あるいは組織的な取り組みによってコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験データを取得・把握したり、例えば石灰石骨材といった収縮が小さくなる骨材に変更したりといった材料側の対応によって問題が顕在化することは無くなっていった。

1.1.3 現状の技術的課題

コンクリートの収縮量が変化した場合、特に問題となるのは想定しているよりも大きな収縮を生じる場合であるが、図-1.2に示すような二つの技術的対応が考えられる。ひとつは材料的な対応で収縮量をコントロールすること、もうひとつは設計によって構造物の諸性能が担保されていることを確認することである。しかしながら、現状では、以下に記す技術的課題があるため、必ずしも合理的な対応がなされているとは言えない。

材料的な対応としては、石灰石骨材の使用や膨張材、収縮低減剤といった混和材・剤の活用が挙げられる。石灰石骨材は効果的であることが報告されているが、地域によっては入手が難しいところもある。また、混和材・剤の効果は、ほとんどが標準的な収縮量のコンクリートを用いた場合の性能評価結果であり、収縮量が大幅に異なる骨材を用いた場合やセメント種類が異なる場合にどのような影響を及ぼすか包括的に確認し整理した研究は少ない。材料供給側からの対応として、今後、コンクリートの収縮性能を保証する体制を構築¹²⁾していくためには、さまざまな条件に対応できるよう広範なデータの蓄積が必要であると考えられる。

設計上の対応として、現行示方書では、コンクリートの収縮が構造物の構造性能に及ぼす影響を考慮する方法が示されている。代表的なものとしては、ひび割れ幅、長期変形、プレストレスロス、不静定力など構造物の使用性能に関するものがある。一方、構造物の安全性に関する設計方法については示されておらず、コンクリートの収縮が耐荷力に及ぼす影響については明らかにされていない。これは、構造物の終局状態における変形量、例えば引張鉄筋の降伏が先行する軸

引張や曲げ終局時の鉄筋ひずみに比べてコンクリートの収縮量は小さいため、ほとんど影響を及ぼさないと考えられてきたためである。しかしながら、鉄筋が降伏する前の弾性範囲内で生じることが多いせん断破壊については、収縮の影響が相対的に大きくなることが考えられる。最近では、高強度コンクリートで顕在化する自己収縮によって RC はりのせん断耐荷力を低下させることが実験^{17),18)}、解析¹⁹⁾の両面から検証されつつある。普通コンクリートで卓越する乾燥収縮についても、せん断耐荷力に及ぼす影響について評価を進め、設計に組み込む方法を提示していく必要があると考えられる。

本来、コンクリートの収縮への対応は、収縮量に応じて材料・構造設計の両面から照査が行なわれることが望ましく合理的であると考えられる。しかしながら、現状では、骨材の選別といった比較的容易に対応できる材料からの対策に傾倒しているといわざるを得ない。コンクリートの収縮を考慮できる設計を可能とすることによって、安易な骨材の選別を回避し、低品質骨材の活用を促すものと考えられる。また、収縮抑制を図ることの意義の明確にもつながるため、構造的な性能に限らず、材料設計にも密接に関係するものである。

材料・構造設計の両者に関係する課題として、コンクリートの乾燥収縮ひずみの評価手法の構築が挙げられる。コンクリートの乾燥収縮ひずみの評価は、通常、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」および附属書 A(参考)「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準じて実施される。その評価には6か月程度の期間を必要とし、多大な労力を要する。そのため、乾燥収縮に及ぼす骨材の影響を簡易に評価できる指標・方法の提案が求められている。また、規準類における設計式は、膨大なコンクリートデータベースに基づいて構築された平均値を求める確率論モデルであるため、骨材の影響の取り扱いに物理的な意味があいまいであることや、今後、骨材品質が変化した場合、改めてコンクリートデータベースを更新せざるを得ず、膨大な労力がかかるといった課題がある。骨材品質の影響を直接考慮できる予測式として複合モデルが提案されているが、この場合、入力値となる骨材物性を実験で求める必要があるため、設計段階での運用が難しいといった問題がある。

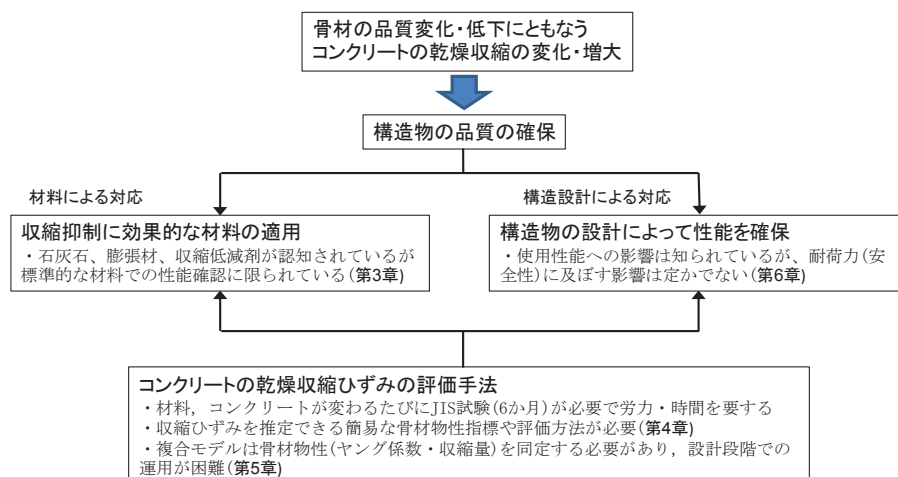


図-1.2 コンクリートの乾燥収縮変化・増大による構造物の品質確保の対応方法と技術的課題

1.2 本研究の目的

本研究では、「1.1.3 現状の技術的課題」に基づき以下の課題について検討を行なうこととした。

- ① 乾燥収縮を抑制する材料として認知されている石灰石骨材および膨張材、収縮低減剤の収縮抑制効果が、骨材の組合せやセメント種類が異なる場合にどのように変化するか、系統的な検討により特性評価を行い、収縮保証体制の構築に資する基礎的なデータ蓄積を図る。
- ② コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす骨材物性とされる、粗骨材の密度、吸水率、吸湿率、細孔径分布、ヤング係数、乾燥収縮率を取り上げ、コンクリートの乾燥収縮の評価指標としての適用性を検証する。
- ③ 骨材物性を考慮できるコンクリートの乾燥収縮予測式として3相複合モデルを取り上げ、予測手法の整備および精度の検証を行う。複合モデルは、入力値として骨材のヤング係数と乾燥収縮率のデータが必要なため、設計段階で利用することは一般に難しい。そこで、入力値として必要となる骨材物性を簡易な指標によってモデル化を図る。また、既存の予測式との比較検証を行う。
- ④ RC はりのせん断耐荷力に及ぼすコンクリートの収縮の影響について、実験的に評価を行い、耐荷力や寸法効果に及ぼす影響について検討する。また、近年提案された収縮の影響を考慮できる評価手法である等価引張鉄筋比の概念を用い、せん断耐荷力の定量的な評価手法の構築を図る。

これによって、材料物性から構造性能までを包含した体系的設計方法の構築に資することを最終的な目的とした。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図-1.3 に示す。本論文は、全7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的および本論文の構成を記した。

第2章では、本研究に関連した既往の研究を調査・整理し、現状の問題点や課題の抽出を行なった。

第3章では、コンクリートの乾燥収縮の抑制材料として認知されている膨張材、収縮低減剤さらには石灰石骨材の効果が、骨材およびセメントの種類によってどのように変化するか、標準的な試験(JIS A 1129 および JIS A 6202 試験)によって系統的な検討を行い、データの拡充を図った。膨張材、収縮低減剤は、骨材種類によって大幅に収縮量が異なるコンクリートにおいても指針類に示される所要の収縮抑制効果を確保できることを確認した。また、これら収縮抑制効果には、骨材種類よりもセメント種類が異なる影響のほうが大きいことを確認した。石灰石骨材を含む各材料の収縮抑制効果を包括的に整理した。

第4章では、コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす骨材物性とされる、粗骨材の密度、吸水率、吸湿率、細孔径分布、ヤング係数、乾燥収縮率を取り上げ、コンクリートの乾燥収縮の評価指標としての適用性を検証した。コンクリートの乾燥収縮との相関性は、粗骨材の乾燥収縮率が最も高く($R^2=0.898$)、単独物性でありながら複数の物性から構成される重回帰式の相関性($R^2=0.922$)とほぼ同程度に評価できることが確認された。そのほかの物性が乾燥収縮率よりも相関性が低い($R^2=0.190\sim 0.683$)のは、コンクリートの乾燥収縮との関係性が岩種によって異なるためと考えられた。骨材がコンクリートの乾燥収縮へ与える影響を簡易に評価する指標として、粗骨材の乾燥収縮率が有効であると判断し、サンプル数や試料サイズなど測定条件に関する検討を行い実用性向上を図った。

第5章では、骨材物性を考慮できるコンクリートの乾燥収縮予測式として複合モデルを取り上げ、手法の整備および予測精度の検証を行った。複合モデルは、入力値として骨材の弾性係数と乾燥収縮率のデータが必要なため、設計段階で利用することが難しかった。そこで「第4章」の粗骨材の物性評価結果および既往の研究結果に基づき、吸水率と関連付けた物性モデルを構築した。モデル化した骨材物性を用いた場合の予測値は、レディーミクストコンクリート工場から収集した実験データに対し、2012年土木学会示方書式と遜色ない精度で予測できることを確認し、設計段階での利用の可能性を示した。

第6章では、せん断補強筋のない普通強度 RC はりのせん断耐荷挙動に及ぼす収縮の影響を明らかにするため、乾燥収縮が 1000μ を超える高収縮コンクリートおよび養生方法・膨張材の使用によって収縮を抑制した低収縮コンクリートを用いて、水結合材比(50%, 35%)、有効高さ(250mm, 500mm, 1000mm)をパラメータとした曲げせん断載荷実験を行った。その結果、高収縮コンクリートは低収縮コンクリートよりも最大で 17%せん断強度が低下することと寸法効果が大きくなることを実験的に確認した。コンクリートの収縮によるせん断強度低下および寸法効果増大のメカニズムについて、引張鉄筋ひずみの変化量、ひび割れ幅およびその進展挙動、中立軸位置、せん断変位等の変形挙動から考察した。さらに、収縮の影響を考慮できる等価引張鉄筋比を既存のせん断強度式の鉄筋比の項に組み込むことによって収縮の大小によらずせん断強度を統一的に評価できることを明らかとした。

第7章では、本研究の範囲内で得られた主な知見を取りまとめるとともに、今後の課題に言及し結論とした。

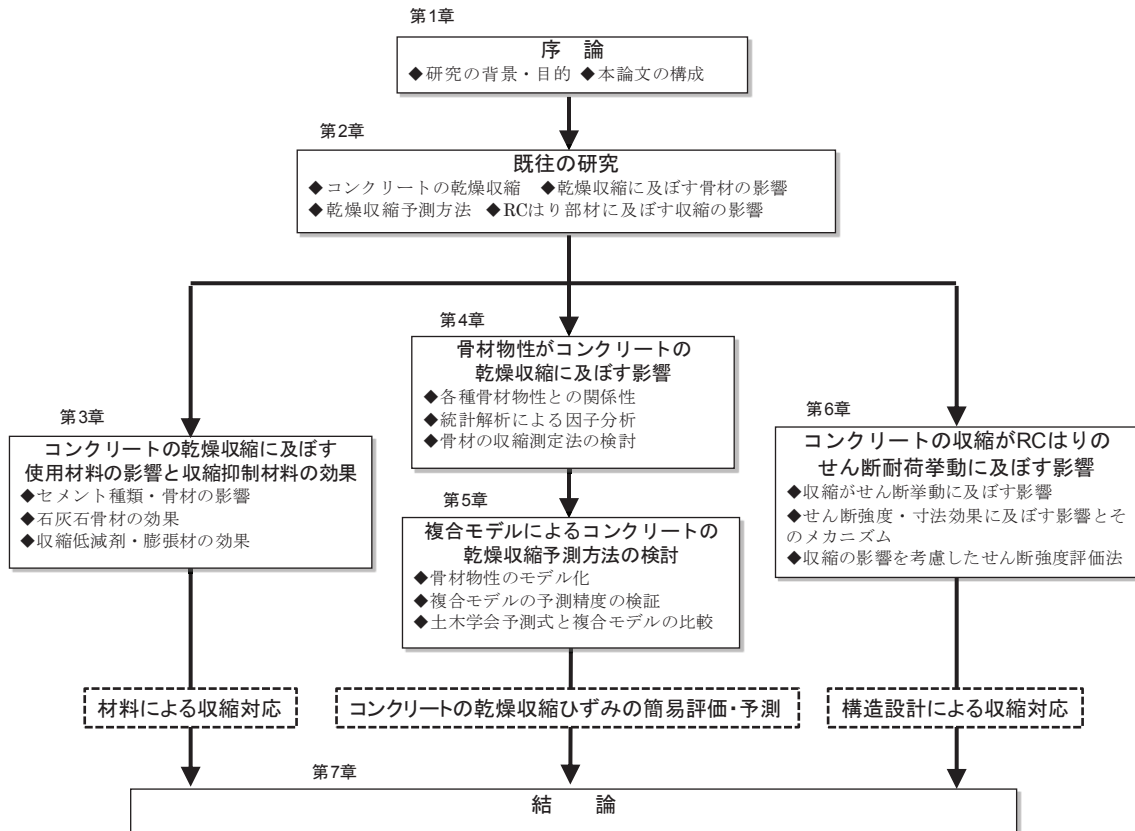


図-1.3 本論文の構成

第1章の参考文献

- 1) 土木学会: 昭和6年制定鉄筋コンクリート標準示方書, 1931.9
- 2) 土木学会: 昭和6年制定鉄筋コンクリート標準示方書 解説, 1931.10
- 3) 土木学会: 昭和61年制定コンクリート標準示方書[設計編], 1986.10
- 4) H.リュッシュ, D.ユンクビルト(著), 百島祐信(訳): コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1976.11
- 5) 土木学会: 平成8年制定コンクリート標準示方書[設計編], 1996.3
- 6) 土木学会: 2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.3
- 7) 土木学会: 垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書, 2008.3
- 8) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2008.3
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 10) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009, 2009.2
- 11) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの収縮問題検討委員会報告書, 2010.3

- 12) 日本コンクリート工学会: コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会報告書, 2012.8
- 13) 土木学会: 構造物の設計におけるコンクリートの収縮の考慮, コンクリート技術シリーズ 93, 2010.12
- 14) O. Coussy, and F. -J. Ulm: Elements of Durability Mechanics of Concrete Structures, Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, edited by F. -J. Ulm, Z. P. Bazant, and F. H. Wittmann, Elsevier Science Ltd., pp. 393-409, 2001
- 15) 日本コンクリート工学会: 耐久性力学に基づく収縮影響評価研究委員会報告書, 2012.10
- 16) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 17) Sato, R., Kawakane, H.: A New Concept for the Early Age Shrinkage Effect on Diagonal Cracking Strength of Reinforced HSC Beams, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.6, No.1, pp.45-67, 2008. (Invited paper)
- 18) 河金甲, 佐藤良一: 高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価, 土木学会論文集 E, Vol.65 No.2, pp.178-197, 2009.
- 19) Gebeyouhannes, E., Maekawa, K.: Numerical Simulation on Shear Capacity and Post-Peak Ductility of Reinforced High-Strength Concrete Coupled with Autogenous Shrinkage, *Journal of Advanced Concrete*, Vol.9, No.1, pp.73-88, 2011.

第2章 既往の研究

2.1 はじめに

コンクリートが乾燥によって収縮することは古くから知られており、これまで多くの研究成果が報告されている。しかし、乾燥収縮はさまざまな因子の影響を受ける複雑な現象であることから、収縮挙動やそれにもなうひび割れの発生を適切に評価・予測することは未だ重要な工学的課題のひとつである。これまで、コンクリートの乾燥収縮の機構解明であったり、混和材・剤を使用した場合の検討であったり、乾燥収縮の駆動力であるセメントペーストを対象とした研究が多かったが、近年、骨材品質にもなう過大収縮によって構造物に問題が生じたことから、骨材の影響に関する研究が見直されてきている。

コンクリートの収縮が構造性能に及ぼす影響については、ひび割れ幅や長期たわみ、不静定構造物の断面力やプレストレスロス等の使用性能に関する研究が古くから行われており、規準類でもこれらを設計段階から考慮できるようになっている。しかしながら、構造物の耐荷力に及ぼす収縮の影響について検討した事例はほとんどない。

本章では、2.2 節でコンクリートの乾燥収縮に関する研究として、収縮のメカニズム、使用材料、混和材料の影響に関する既往の研究を取り上げる。2.3 節では、本研究で着目したコンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響に関する研究について整理する。2.4 節では、コンクリートの乾燥収縮予測に関する研究として、国内外の規準式と複合モデルを取り上げ、技術的課題の抽出を試みる。2.5 節では、コンクリートの収縮と構造性能についての研究を取り上げ、特に RC はり部材のせん断耐荷力に関する研究について整理する。

2.2 コンクリートの乾燥収縮に関する研究

2.2.1 乾燥収縮のメカニズム

コンクリートの乾燥収縮の主体は、一般にセメントペーストであり、骨材はそれを拘束する効果を担っている。セメントペーストは、水和物および未水和物からなる固体部と細孔からなる空間部で構成されている。常温常圧下では、細孔中には水が存在しており、固体部との間に物理的な相互作用が働いている。乾燥によって細孔中の水が逸散すると、相互作用に変化が生じ、セメントペーストが収縮すると考えられている。

図-2.1 は、セメントペーストに微粉碎シリカを内割で添加していったときの乾燥収縮と水の減少量との関係¹⁾である。100%のセメントペーストの場合、水の減少量と乾燥収縮の間にほぼ比例関係があることがわかる。一方、微粉碎シリカの添加率が増加(図中：セメントの割合が低下)すると、収縮にほとんど関与しない水の減少が確認される。これは、セメント水和物(固体部)と

の間に何かしらの作用が生じている水と、ほとんど相互作用がない水(自由水)があるためと考えられている。その他、水和物の一部となり乾燥によって逸散しない化学的結合水があるため、セメントペースト内の水は大きく3つに分類され、乾燥収縮に関与する水は、自由水、化学的結合水以外の水であると考えられる。

乾燥収縮に関与する水的作用については、自然科学に立脚した諸説がある。主要なものとして、①毛細管張力説^{2), 3), 4)}、②分離圧説^{3), 5), 6)}、③表面張力説^{3), 7), 8)}、④層間水移動説^{9), 10)}が挙げられている。

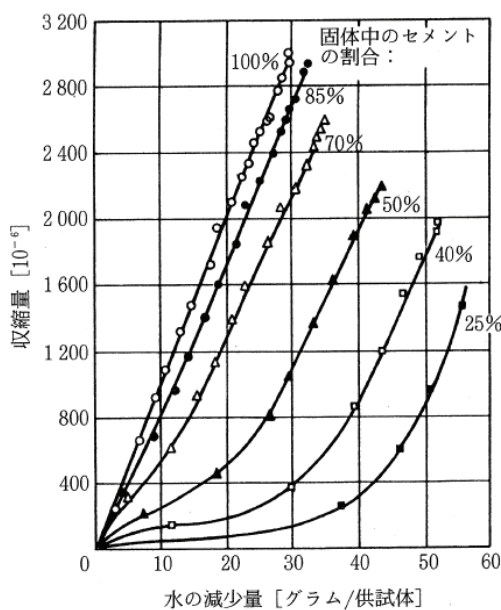


図-2.1 セメント・微粉碎シリカペースト供試体における収縮量と水の減少量¹⁾

実際のセメント硬化体と理想状態とに違いがあることや、それぞれのメカニズムには適用範囲があることから、全湿度域にわたり様々な挙動を単独の説で説明できるには至っていない。一般には、中・高湿度域では毛細管張力説と分離圧説が、低湿度域では表面張力説と層間水移動説が有力とされている。

複数のメカニズムを用いて乾燥収縮を統一的に説明する考え方も示されており、ミュンヘンモデル¹¹⁾では、相対湿度42%以下で表面エネルギー説を、それ以上では分離圧説を用いている。石田ら¹²⁾は、空隙の閾径を設け、それよりも小さい寸法の空隙では分離圧説を、大きい寸法の空隙では毛細管張力説を用いて収縮駆動力のモデル化を行っている。これによって収縮挙動を良好に再現できるとしている。

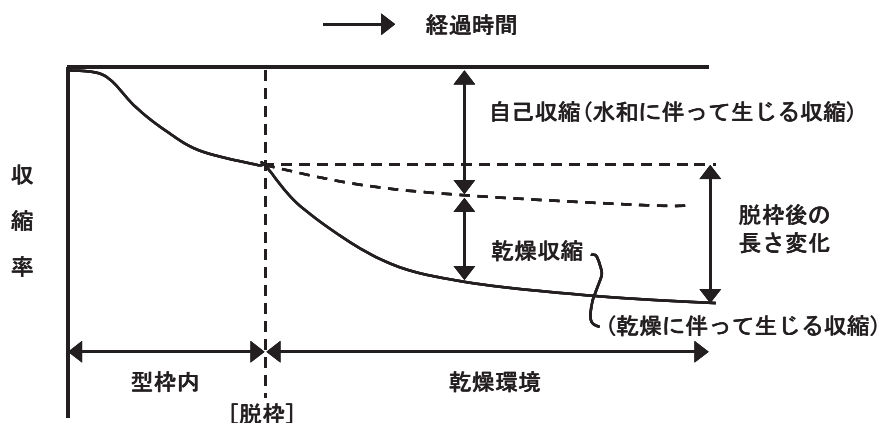
2.2.2 乾燥収縮の定義

図-2.2 に、コンクリートの収縮の経時変化の概念図¹³⁾を示す。乾燥収縮は、硬化コンクリート中の水が外部に逸散することによって生じる現象である。一方、セメントの水和にともなって、

コンクリート内部が乾燥することによって生じるとされる自己収縮がある。乾燥収縮は長期的に発現し、自己収縮は比較的短期に発現する現象であるが、コンクリートの変形を計測する中で、両者を明確に分離することは難しい。2007年制定土木学会コンクリート標準示方書¹⁴⁾では、「コンクリートの収縮」を「乾燥収縮、自己収縮、炭酸化収縮を含み、構造物の周辺の温度・湿度、部材断面の形状・寸法、コンクリートの配合のほか、骨材の性質、セメントの種類、コンクリートの締固め、養生条件等の種々の要因によって影響を受ける。」としており、さまざまな影響を包含した現象であることを示している。

コンクリートの乾燥収縮を測定する場合、通常、JIS A 1129-1～3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に従って行なわれる。従来、この試験方法には温度・湿度といった供試体の保存条件や養生期間等についての記載はなかったが、2010年制定版より、附属書A（参考）「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」が追加され、詳細が示されることになった。附属書には、①供試体の成形・養生は、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、成形後24時間で脱型、材齢7日まで水中養生し、②供試体の保存は、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ で6か月まで測定することが記載されている。2012年制定土木学会コンクリート標準示方書¹⁵⁾の「収縮の特性値」や日本建築学会・建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009¹⁶⁾の「乾燥収縮率」には、同試験方法および附属書に従って測定した乾燥期間6か月の値を用いることとしている。

本論文においては、特段の記載が無い限り、上記方法による測定結果を対象とする。乾燥開始材齢である7日では、セメントの水和が完了していないため、乾燥収縮と自己収縮を含んでいると考えられるが、ここでは便宜的に、「乾燥収縮ひずみ」あるいは「乾燥収縮」と称することとする。



材齢7日程度では水和が完了していないため、脱枠あるいは水中養生終了後の長さ変化試験では、乾燥収縮と自己収縮の両方が測定値となる。

図-2.2 コンクリートの収縮の経時変化¹⁴⁾

2.2.3 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす使用材料の影響

(1)セメント種類

コンクリートの乾燥収縮に及ぼすセメント種類の影響について、セメント協会の研究結果¹⁷⁾を、**図-2.3**に示す。同図は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートを基準としたときの各種セメント別の長さ変化比を乾燥期間 52 週まで示したものである。乾燥初期に、セメント種類によって長さ変化比に比較的大きな違いが生じており、徐々に収束していく傾向が認められる。これは、セメント種類に応じて乾燥収縮の発現速度が異なることを示すものと考えられる。乾燥期間 13 週以降は、長さ変化比はほぼ横ばいとなっている。乾燥期間 26 週における長さ変化比は、耐硫酸塩ポルトランドセメントがもっとも小さく 90%、高炉セメント C 種がもっとも大きく 110%であった。耐硫酸塩ポルトランドセメントの乾燥収縮がその他のセメントより小さい理由は、 C_3A 含有量が少ないため¹⁸⁾とされている。

近年、セメント協会において、改めてセメント種類が乾燥収縮に及ぼす影響を検討した結果¹⁹⁾によれば、早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートの乾燥収縮は、普通、中庸熱、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種よりも小さいことが統計的に確認されている。しかしながら、早強ポルトランドセメントの鉱物組成は、 C_3A がその他のセメントよりも相対的に多く、上述の結果とは矛盾する結果となっている。

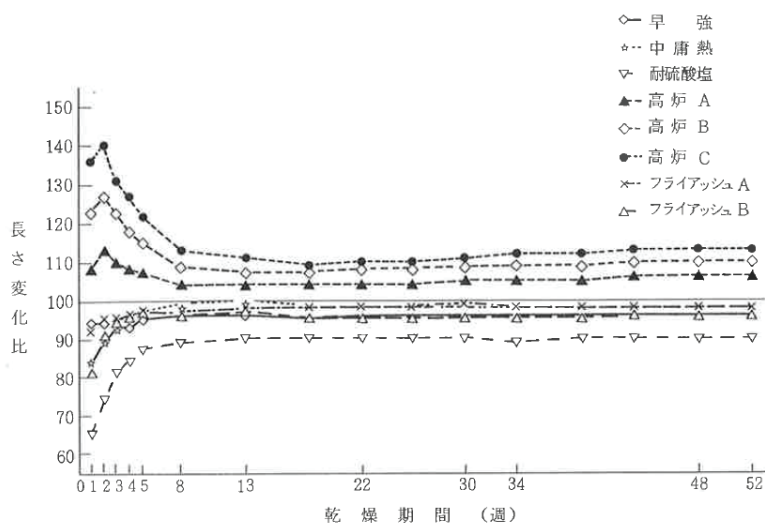


図-2.3 各種セメントの長さ変化比¹⁷⁾

(2)骨材

骨材は、コンクリート中の6~7割程度の容積を占め、セメントペースト単独の場合と比べて乾燥収縮を小さくする。骨材の役割は、①セメントペーストの収縮に対し応力を負担する拘束効果と②セメントペーストを体積希釈する効果に分類される。

図-2.4 は、コンクリート中の骨材含有率と収縮比(コンクリートの収縮/セメントペーストの収縮)との関係を示した Pickett の研究結果²⁰⁾である。図中の曲線は、骨材の容積の影響を示す式(2.1)に、拘束の影響を表す変数 n に標準的な値として 1.7 を用いたものである。ここで、仮に $n=1$ を用いると、収縮比と骨材の体積含有率の関係は、図中に加筆したように左上端と右下端を結ぶ直線となる。これは、骨材の体積希釈効果のみを表した式となる。実際には、骨材のヤング係数はセメントペーストのヤング係数よりも大きいため、収縮比と骨材の体積含有率の関係は、体積希釈効果のみの場合より下方に位置することになる。

一般的な骨材を使用している場合($n=1.7$)の収縮への影響程度は、図-2.4 からわかるように、骨材の体積希釈効果のほうが拘束効果よりも卓越する。したがって、コンクリートの配合設計では、単位水量を減じ、単位骨材量を増やすことが収縮を抑制する基本的な手段となることが理解できる。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_p (1 - V_a)^n \tag{2.1}$$

$$n = \frac{3(1 - \mu_c)}{1 + \mu_c + \{2(1 - \mu_g)E_c/E_g\}} \tag{2.2}$$

ここで、 $\varepsilon_{c,p}$: コンクリート、セメントペーストの乾燥収縮、 V_a : 骨材の体積含有率、 μ_c, μ_g : コンクリートおよび骨材のポアソン比、 E_c, E_g : コンクリートおよび骨材のヤング係数

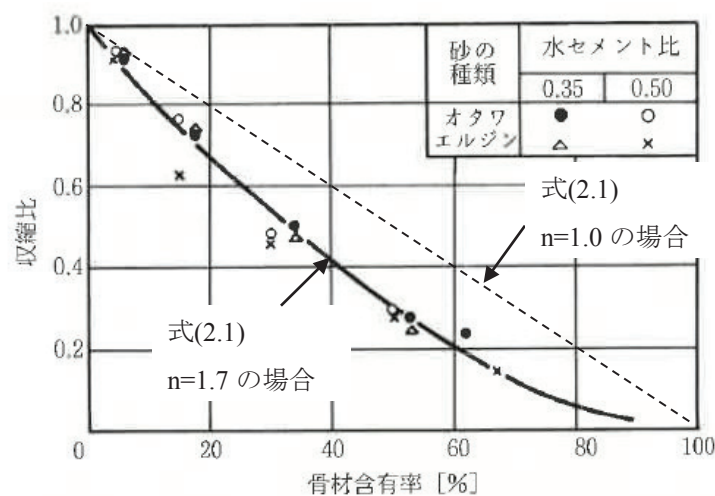


図-2.4 コンクリート中の骨材含有率が収縮比に及ぼす影響¹⁾

図-2.5 は、123 配合のコンクリートの乾燥収縮データに基づき、統計解析手法の一つである数量化 I 類を用いて、各要因分析を行った結果である²¹⁾。分析における説明変数には、単位水量、粗骨材種類、混和剤種類を採用している。説明変数のなかで最も影響が大きいのは粗骨材種類であり、単位水量の影響は、必ずしも大きくない。前述したように、骨材の含有率が大幅に変化する配合条件では、骨材の体積希釈効果がコンクリートの乾燥収縮に支配的な影響を及ぼす。しかしながら、一般的に使用されるレディーミクストコンクリートでは、それほど大幅に骨材含有率が変化することは稀である。そのため、一般には、骨材の希釈効果よりも拘束効果の影響のほうが相対的に大きくなる可能性が示唆される。

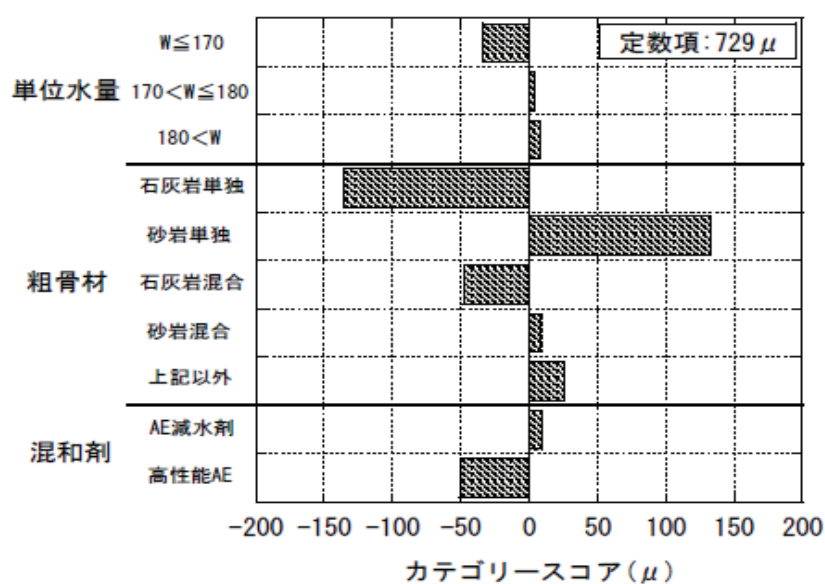


図-2.5 数量化 I 類によるコンクリートの乾燥収縮の要因分析結果²¹⁾

(3)収縮抑制材料

日本建築学会より発刊された鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説²²⁾では、コンクリートの乾燥収縮を低減するための手法として、単位水量等の配合による対策に加え、石灰石骨材、膨張材、収縮低減剤を材料による対策として挙げている(表-2.1)。これによれば、期待される効果は、ある程度の幅をもった値であり、コンクリートの配合やその他の使用材料の組合せ等によって変化するものと考えられる。

表-2.1 乾燥収縮ひずみを低減する目的で使用する材料の使用効果の例²²⁾

使用する材料	対策の具体的内容	期待される効果
石灰石骨材	石灰石骨材への骨材置換	600~700×10 ⁻⁶ の実現
膨張材	膨張材を標準量使用	膨張材を使用しない場合より150×10 ⁻⁶ 以上の低減
収縮低減剤	収縮低減剤を標準量使用	収縮低減剤を使用しない場合より15%~30%の低減

(4)石灰石骨材

セメント協会¹⁷⁾では、粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を把握する目的で、国内で使用されている骨材の代表として硬質砂岩、石灰岩、安山岩を対象とした検討を行なっている。図-2.6より、石灰岩を用いたコンクリートの乾燥収縮は、産地が異なっても硬質砂岩、安山岩よりも小さな値をとっていることがわかる。この理由として、セメント鉱物と石灰岩との反応によるカルシウム・カルボアルミネート(C₃A・mCaCO₃・nH₂O)の生成によって、結晶水あるいは間隙水として水和生成物に水分が取り込まれたことが考えられるとしている。

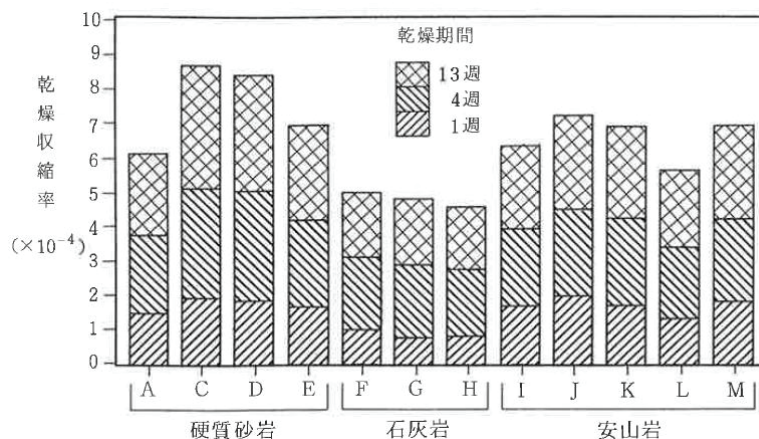


図-2.6 粗骨材の種類とコンクリートの乾燥収縮率¹⁷⁾

図-2.7は、国内のレディーミクストコンクリートを対象に乾燥期間6か月の乾燥収縮ひずみを調査し骨材の岩種で分類した結果²³⁾である。石灰石粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は平均的にはその他の岩種の粗骨材を用いた場合よりも小さいことがわかる。ただし、データのば

らつきも大きく、岩種だけでは収縮量の大小を判断できないとしている。

石灰石細骨材の影響については、粗骨材とほぼ同程度の効果があるとする結果²⁴⁾と、粗骨材と比べて小さい²⁵⁾とする報告があり、その効果は十分に明らかになっていない。

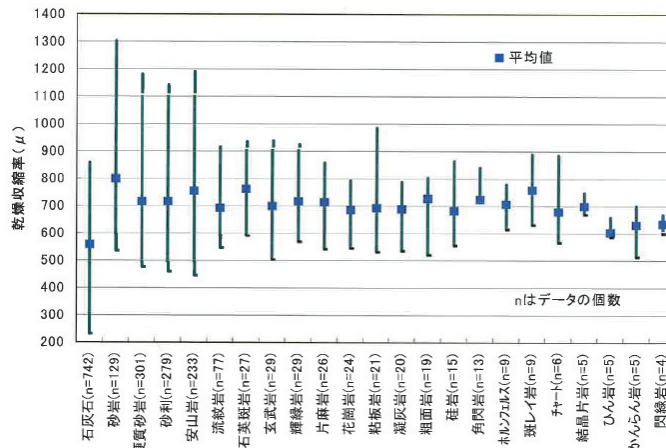


図-2.7 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率

(5) 膨張材

膨張材は、硬化過程において膨張性の水和物を形成する混和材である。初期膨張が拘束されることで部材断面に圧縮応力が蓄積され、温度低下や乾燥等による収縮で生じた引張応力を補償し、ひび割れを防止する目的で用いられる。日本国内では、水和反応時にエトリングサイトを生成するカルシウムサルフォアルミネート系、水酸化カルシウムを生成する生石灰系に加え、最近では両者の複合タイプがある。

膨張材は、JIS A 6202(コンクリート用膨張材)として規格化されるとともに、土木学会から指針²⁶⁾が、日本建築学会からも指針案²⁷⁾が刊行されており、収縮を抑制することを目的とした混和材として広く認知されている。膨張材の効果は、JIS A 6202 附属書 2 (参考) (膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法) に規定される A 法または B 法によって評価される。A 法は、初期の膨張挙動を、B 法は材齢 7 日までの水中養生下での膨張挙動に加え、それ以降の乾燥下における収縮挙動まで測定する方法であり、A 法は「拘束膨張ひずみ」、B 法は「拘束膨張・収縮ひずみ」として表される。

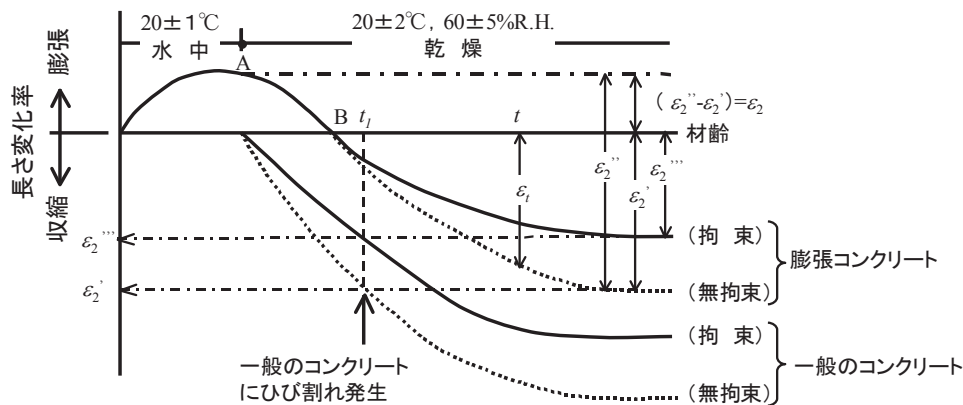
乾燥収縮ひび割れの制御を目的とした場合の「拘束膨張ひずみ」および「拘束膨張・収縮ひずみ」の標準値が、日本建築学会「膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案・同解説」²⁷⁾ (表-2.2, 図-2.8), 土木学会「膨張コンクリートの設計施工指針」²⁶⁾および土木学会「コンクリート標準示方書 [施工編]: 特殊コンクリート」²⁸⁾ (表-2.3) では示されている。ここでは、標準的な材料を用いた場合の値を示したものであり、セメント種類や骨材の品質などが異なる場合については考慮されていない。

表-2.2 目標とする膨張率ならびに収縮率の標準(日本建築学会)²⁷⁾

膨張率	150×10^{-6} 以上	JIS A 6202 「コンクリート用膨張材」 附属書 2 (参考) (膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法) に規定する A 法または B 法による材齢 7 日における試験値
収縮率	450×10^{-6} 以下	JIS A 6202 「コンクリート用膨張材」 附属書 2 (参考) (膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法) に規定する B 法による材齢 7 日まで $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 水中、その後相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、保存期間 6 か月における試験値

表-2.3 膨張率の範囲の標準(土木学会)²⁸⁾

収縮補償用 コンクリート	150×10^{-6} 以上, 250×10^{-6} 以下	JIS A 6202 「コンクリート用膨張材」 附属書 2 (参考) (膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法) に規定する A 法または B 法による材齢 7 日における試験値
-----------------	---	---



- ϵ_2 : 膨張コンクリートの拘束膨張率 ($=\epsilon_2'' - \epsilon_2'$) (表-2.2 の膨張率に対応)
- ϵ_2' : ひび割れの発生しない無拘束収縮率の限度値
- ϵ_2'' : 膨張コンクリートの無拘束絶対収縮率
- ϵ_2''' : ひび割れの発生しない拘束収縮率の限度値 (表-2.2 の収縮率に対応)
- ϵ_i : 材齢 t における膨張コンクリートの無拘束収縮率

図-2.8 コンクリートの拘束膨張・収縮性状モデル(日本建築学会)²⁷⁾

(6)収縮低減剤

収縮低減剤は、収縮低減機能を有する有機混和剤である。アルコール系をはじめ主成分の異なるものがいくつか市販されている(表-2.4)。その効果は、図-2.9 に示すように、無添加のコンクリートと比べて少なくとも 15%程度以上は乾燥収縮が小さくなる²²⁾とされている。

収縮低減剤の作用機構については、毛細管張力機構を基礎とした検討^{30) 31)}が行われている。また、最近では、収縮低減剤がセメント硬化体の表面エネルギーを変化させ水分の表面吸着厚を変化させるとする分離圧の観点からの研究³²⁾もある。

収縮低減剤は、現時点では JIS 規格化されていないが、日本建築学会・建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009¹⁶⁾では、附属規格として最近 JASS5 M-402: 2009「コンクリート用収縮低減剤の性能判定基準」を設定し、表-2.5 に示すように、モルタル試験による収縮低減剤の品質基準が示されている。

表-2.4 市販収縮低減剤の特徴²⁹⁾

記号	主成分	フロー 値比 (%)	凝結時間の 差(分)		圧縮強度比 (%)		長さ変化比 (%)	
			始発	終結	7日	28日	7日	28日
A	ポリエーテル誘導体	96	25	20	91	92	40	49
B	ポリエーテル系	98	42	48	89	95	65	72
C	グリコールエーテル系	92	-23	-27	109	115	60	68
D	疎水基・吸着基含有水溶性ポリマー	103	70	125	95	124	54	74
E	低級アルコールのアルキレンオキサイド付加物	88	41	56	87	94	59	58
F	低級アルコール系	95	35	58	90	90	43	59
G	低級アルコールのアルキレンオキサイド付加物	102	25	40	93	103	57	57
H	ポリプロピレングリコール系	97	15	10	89	96	46	63
I	ポリエーテル系	99	50	50	104	97	38	61
J	炭化水素系化合物とグリコールエーテル系誘導体	103	25	30	105	101	43	51
K	特殊ポリオキシアルキレングリコール	98	35	35	91	91	65	72
JASS5M-402 規定値		85 以上	120 以上	180 以下	80 以上	85 以上	70 以下	75 以下

※記号 A~I : アルコール系(ポリエーテル系, グリコールエーテル系等を含む), 記号 J : 鉱物油系, 記号 K : 保水系

表-2.5 収縮低減剤の品質¹⁶⁾

項目	品質基準	
フロー値比(%)	85 以上	
凝結時間の差 (分)	始発	120 以下
	終結	180 以下
圧縮強さの比(%)	材齢 7 日	80 以上
	材齢 28 日	85 以上
長さ変化比(%)	乾燥期間 7 日	70 以下
	乾燥期間 28 日	75 以下

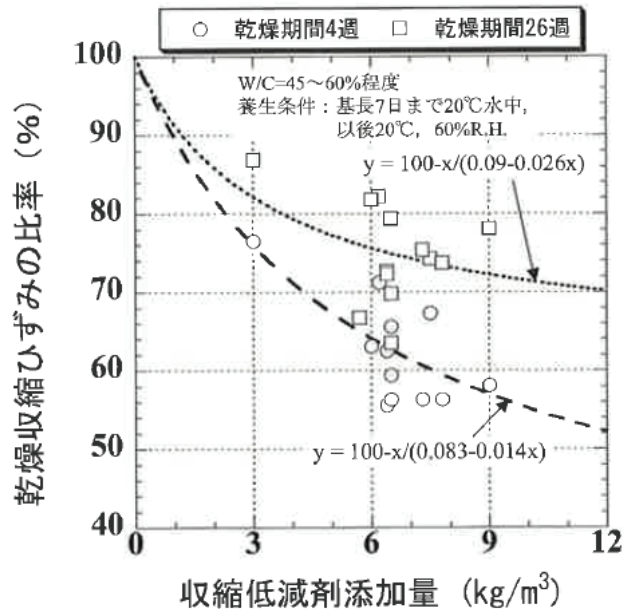


図-2.9 収縮低減剤による乾燥収縮ひずみの低減効果²²⁾

2.3 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材物性の影響に関する研究

2.3.1 骨材物性の影響

(1) ヤング係数

骨材の収縮拘束効果に影響する物性としては、骨材自体のヤング係数が影響因子として取り上げられることが多い。図-2.10は、コンクリートの乾燥収縮ひずみと骨材のヤング係数との関係³⁴⁾であり、骨材のヤング係数が大きくなるとともにコンクリートの乾燥収縮ひずみは小さくなっていることがわかる。セメントペーストのヤング係数は、普通コンクリートの強度レベルの場合、10~20kN/mm²程度であり、通常、骨材のヤング係数よりも小さい値となる。

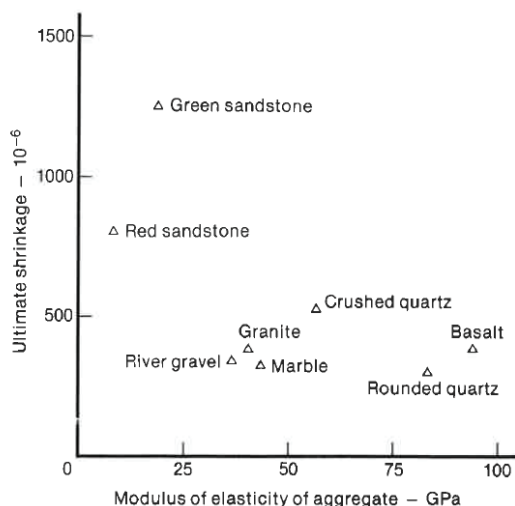


図-2.10 骨材のヤング係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみ³⁵⁾

(2) 乾燥収縮率

骨材の中には水分逸散にともなって収縮性を有するものがあり、このような骨材を用いるとセメントペーストの収縮拘束効果が著しく低下するとされている。骨材自体が収縮するメカニズムは必ずしも明らかにされていないが、Roper は、収縮が大きい骨材の内部比表面積が大きい³⁶⁾ことを報告した。骨材に粘土鉱物が含まれることによって収縮する³⁷⁾とする報告もある。粘土自体が収縮性を有することは良く知られているが、粘土鉱物の存在は骨材の収縮の十分条件ではない^{38),39)}とする結果もある。現状では、骨材の鉱物組成と物理的な空隙構造の両者が重要な因子である³⁵⁾と考えられている。

大野⁴⁰⁾は、モルタルの乾燥収縮ひずみを複合モデル(並列)で予測する上で、骨材の乾燥収縮率を既往の実験値に基づいて200 μ と仮定し、実測値と計算値が良く一致することを報告している。

後藤・藤原⁴¹⁾は、軽量骨材のヤング係数は普通骨材よりも明らかに小さいにもかかわらず、軽量コンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートより必ずしも小さくないことから、骨材のヤング係数だけで収縮拘束効果を説明することは難しいとした。それに代わる因子としては、乾湿に

ともなう骨材の体積変化が影響しているとした。図-2.11 に示すように、水中および乾燥下における体積変化が、軽量骨材よりも普通骨材のほうが大きいことがわかる。乾燥によって骨材が収縮するメカニズムは、表面エネルギーの変化であるとしている。骨材の窒素吸着量から B.E.T 理論により骨材内部の比表面積を求め、比表面積が大きくなるほど骨材の収縮量は大きくなるとしている。

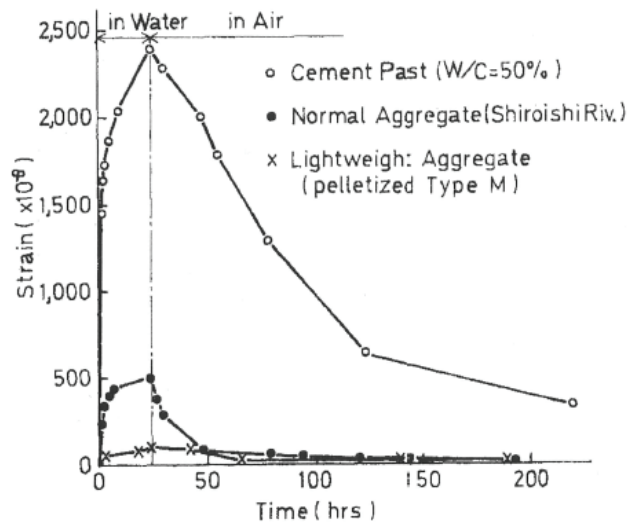


図-2.11 セメントペースト、普通骨材および軽量骨材の体積変化

浅本ら⁴²⁾は、マルチスケール複合構成モデルを用いて、使用骨材の影響によって増大するコンクリートの収縮が、骨材のヤング係数だけでは現象を説明できないことを解析的に示した。図-2.12 は、コンクリートの自己収縮および乾燥収縮ひずみの実験結果と、骨材の収縮を考慮した場合としない場合の解析結果とを比較したものである。同図より、骨材の収縮を考慮することで実験値と解析値は良い一致を示していることがわかる。

これらの既往の研究から、コンクリートの乾燥収縮には骨材自体のヤング係数だけでなく、乾燥収縮率を考慮する必要性が示されている。

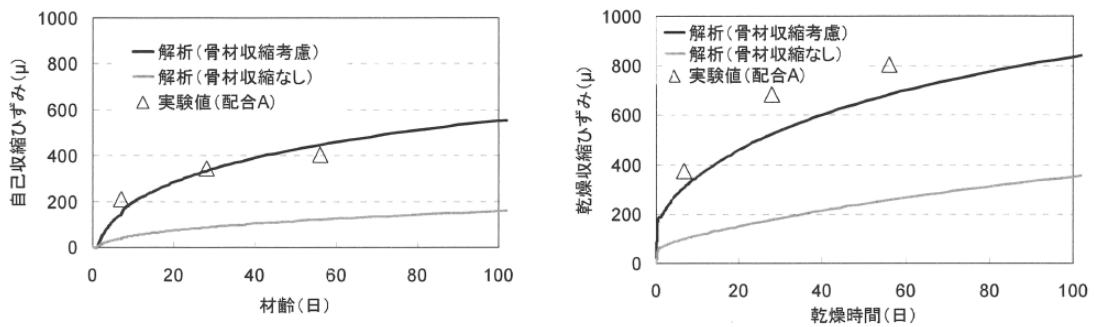


図-2.12 骨材の収縮を考慮した場合の解析結果と実験結果の比較⁴²⁾

2.3.2 骨材の品質評価指標

骨材の収縮拘束効果として、骨材自体のヤング係数および乾燥収縮が関与していることが明らかとされてきている。一方、これらを直接測定する以外に、コンクリートの乾燥収縮に関係するとされるさまざまな骨材の指標が提案されている。ここでは物理的な指標について記す。

密度、吸水率は、骨材の品質を表す上で最も代表的な値であり、古くからコンクリートの乾燥収縮との関係性が指摘されている^{35),43)}が、十分に説明ができないとする報告^{38),44)}もある。

安定性は、硫酸ナトリウムの結晶生成圧を利用して骨材の強度、脆さ等を測る方法である。通常、骨材の耐凍害性を判定する場合に用いられるが、安定性損失質量分率が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮が大きくなる関係が報告されている⁴⁵⁾。

細孔構造は、セメントペーストの収縮機構を説明する上でよく用いられる物性であり、骨材の細孔構造も骨材自体あるいはコンクリートの収縮に対して相関性があるとされる^{44),46)}。

60%質量減少率⁴⁷⁾および気乾含水率²⁵⁾は、いずれも20°C-60%R.H.における骨材の平衡含水率を指標としたものである。平衡含水率を用いることで、骨材の細孔構造等の影響を反映することができるため、飽水状態の物性である吸水率よりもコンクリートの乾燥収縮と関係性が高いとされる。

骨材の窒素⁴¹⁾や水蒸気⁴⁸⁾吸着量を計測し、B.E.T理論に基づいて算出された内部比表面積は、コンクリートの乾燥収縮ひずみと良い相関性があることが報告されている。

吸湿率⁴⁹⁾は、骨材の内部比表面積をより簡易に求めようとするものであり、絶乾状態の骨材を20°Cの湿気箱に24時間保管したときの含水率である。

表-2.6は、上記骨材品質を一覧し、まとめたものである。これらの評価指標は、いずれも骨材の多孔性と実体部の強度特性に由来するものと考えられる。骨材の多孔性と強度特性は、吸水率と密度のように表裏一体の関係であるため、明確に独立した指標とはいえないが、表中に示すようにそれぞれ骨材のヤング係数と乾燥収縮に関連付けられると考えられる。

以上に示したように、コンクリートの乾燥収縮を評価できるとする指標が多数提案されている。前述したとおり、コンクリートの乾燥収縮ひずみ特性の評価には通常6か月を要するため、簡易な骨材指標によってコンクリートの乾燥収縮ひずみを評価できれば有益と考えられる。しかしながら、現状では、さまざまな指標を各研究者が提案している段階であり、それぞれの精度の比較検証が十分でない。

表-2.6 コンクリートの乾燥収縮に係る品質指標

評価指標	乾燥収縮への影響	関与すると考えられる骨材物性
吸水率	強度・剛性 (収縮抵抗性)	ヤング係数
密度		
安定性		
細孔径分布	空隙構造 (収縮駆動力)	乾燥収縮
気乾含水率・60%質量減少率		
窒素・水蒸気吸着量	内部比表面積 (収縮駆動力)	
吸湿率		

2.4 コンクリートの乾燥収縮予測に関する研究

2.4.1 土木学会コンクリート標準示方書における乾燥収縮の経緯

土木学会コンクリート標準示方書(以下、示方書)におけるコンクリートの収縮に関する取り扱いの変遷を示したものが、表-2.7である。昭和6年制定鉄筋コンクリート標準示方書⁵⁰⁾では「硬化収縮の影響と考慮する必要がある場合には、之を温度低下 15℃に相当する影響あるものと仮定すべし。」と記述されており、鉄筋コンクリートとしての収縮量を 150μ (線膨張係数 $10\mu/^\circ\text{C}$ として)と設定することが既に示されていた。また、同解説⁵¹⁾では無筋コンクリートの場合の収縮量を 250μ (温度低下 25℃相当)としていた。これ以降、一般大気中のコンクリートの乾燥収縮量としておおむね 250μ が継続採用された。昭和42年制定示方書⁵²⁾から、温度による表記がひずみ表記に変更された。なお、これらの収縮量は、無筋コンクリート構造物のための設計値であり、必ずしも供試体レベルでの収縮量を表すものではないことに注意が必要である。

昭和61年制定示方書⁵³⁾から、乾燥開始材齢に応じてコンクリートの乾燥収縮ひずみを変化させる方法が採用された。屋内の場合の最大値は 400μ 、屋外の場合の最大値は 250μ が継続して用いられた。また Rüschi の提案式⁵⁴⁾を採用し、部材寸法、相対湿度、温度の影響を考慮できる形が示された。平成8年制定示方書⁵⁵⁾では、わが国独自の収縮予測式⁵⁶⁾が示された。また、高強度コンクリートの実用化にともなって顕在化してきた自己収縮についても新たに記述された。これにともなって、材料物性を「乾燥収縮」から「収縮」に表記を改めた。2002年制定示方

表-2.7 示方書における収縮の取扱いの変遷

制定年	コンクリートの収縮ひずみ	備考
昭和6年	250μ	・ 温度低下 25℃相当と記載
昭和15年	250μ	同上
昭和24年	200μ	・ 温度低下 20℃相当と記載
昭和31年	250μ	・ 温度低下 25℃相当との記載
昭和42年	250μ	・ 25×10^{-5} を標準と記載
昭和49年 (49～55年度版)	250μ	同上
昭和61年[設計編]	[屋内] $120\mu \sim 400\mu$ [屋外] $120\mu \sim 250\mu$	・ CEB-FIP(1976)に示される Rüschi の提案式を採用し、部材寸法、相対湿度、温度の影響を考慮できる形
平成3年[設計編]	[屋内] $120\mu \sim 400\mu$ [屋外] $120\mu \sim 250\mu$	同上
平成8年[設計編]	[屋内] $130\mu \sim 730\mu$ [屋外] $120\mu \sim 400\mu$	・ わが国独自の収縮予測式の設定 ・ 自己収縮ひずみに関する記述と一般的な値の記載 ・ 「乾燥収縮」から「収縮」に変更
2002年 [構造性能照査編]	[屋内] $130\mu \sim 730\mu$ [屋外] $120\mu \sim 400\mu$	同上
2007年[設計編]	最大 1200μ 程度を想定	・ 試験値や既往の資料・実績をもとに定めることを原則 ・ 設計式によって算出された値(最大 800μ 程度)を用いる場合、これを 1.5 倍に割り増す

書[構造性能照査編]⁵⁷⁾より、新たに高強度域(圧縮強度 80N/mm² まで)に適用可能な予測式を掲載し、自己収縮と乾燥収縮の予測値を重ね合わせる方法を採用した。

このような変遷を経る中、2002 年に竣工した高架橋において、わずか一年半経過時点でコンクリートの収縮による過大な収縮ひび割れや想定外のたわみが生じるという事例が発生した。これを受けて、2007 年版示方書¹⁴⁾では、収縮の設計値は試験値や実績を原則とすること、設計式によって収縮量を予測する場合、予測値を 1.5 倍割り増すことを定めた。これは、レディーミクストコンクリートの実態として、ほとんどが満足する収縮ひずみ(JIS A 1129 試験で水中 7 日養生後、6 か月乾燥条件)が 1000 μ であり、これに材齢 7 日以前の自己収縮と 6 か月以降の収縮分である 200 μ を見込んで、設計における収縮ひずみの最終値を 1200 μ 程度と想定したものである。

2.4.2 国内外の規準式

コンクリートの乾燥収縮予測式は、これまで多くの研究者によって提案されているが、学協会の規準式に採用されているものは、使用材料・配合・強度といった設計段階で比較的容易に入手できる情報を元に乾燥収縮を予測できるように構築されている。ここでは、国内外の規準式を示す。なお、式の記載にあたっては、極力記号の表記法を統一した。

(1) 土木学会式(2012 年版)^{15), 58)}

$$\text{(収縮予測式)} \quad \varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \beta_h \beta_s \quad (2.3)$$

$$\text{(最終収縮量)} \quad \varepsilon_{sh\infty} = \left(1 + \frac{\beta}{182}\right) \cdot \varepsilon_{182}$$

$$\beta = \frac{30}{\rho} \left(\frac{120}{-14 + 21C/W} - 0.70 \right) \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{182} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20 + 30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \right)$$

$$\text{(湿度依存性)} \quad \beta_h = \frac{1 - h/100}{1 - 60/100} \quad (2.5)$$

$$\text{(時間・寸法依存性)} \quad \beta_s = \frac{(t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)} \quad (2.6)$$

ここで、 ε_{182} : JIS A 1129 試験値(100×100×400mm 供試体、水中養生 7 日後、温度 20℃、相対湿度 60%の環境下で 6 ヶ月後の収縮ひずみ)、 C/W : セメント水比、 ρ : コンクリートの単位容積質量、 α : 骨材の品質を表す係数($\alpha=4\sim 6$ 、標準的な骨材の場合には 4)、 $\Delta\omega$: 骨材中に含まれる水分量、 d : 有効部材厚、である。

(2) 日本建築学会式²²⁾

$$\text{(収縮予測式)} \quad \varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \beta_h \beta_s \quad (2.7)$$

$$\text{(最終収縮量)} \quad \varepsilon_{sh\infty} = (1W - 1.0C - 0.82G + 404) \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \cdot t_0^{-0.08} \quad (2.8)$$

表-2.8 修正係数

γ_1		γ_2		γ_3	
石灰石砕石	0.7	フライアッシュセメント	0.9	収縮低減剤	0.7
天然骨材	1.0	早強セメント		シリカフューム	0.8
軽量骨材	1.2	普通セメント	1.0	フライアッシュ	0.9
再生骨材	1.4	高炉セメント		無混入	1.0
—	—	—	—	高炉スラグ微粉末	

$$\text{(湿度依存性)} \quad \beta_h = 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \quad (2.9)$$

$$\text{(時間・寸法依存性)} \quad \beta_s = \left\{ \frac{(t - t_0)}{0.16(V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right\}^{1.4(V/S)^{0.18}} \quad (2.10)$$

(3) CEB-FIP MC90 式⁵⁹⁾

$$\text{(収縮予測式)} \quad \varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \cdot \beta_s \quad (2.11)$$

$$\text{(最終収縮量)} \quad \varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{sh}(f_{28}) \cdot \beta_h$$

$$\varepsilon_s(f_{28}) = \left\{ 160 + 10\alpha \left(9 - \frac{f_{28}}{10} \right) \right\} \times 10^{-6} \quad (2.12)$$

$$\text{(湿度依存性)} \quad \beta_h = 1.55 \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \quad (2.13)$$

$$\text{(寸法・時間依存性)} \quad \beta_s(t - t_0) = \left\{ \frac{(t - t_0)}{0.03 \{ 2A_c/u \}^2 + (t - t_0)} \right\}^{0.5} \quad (2.14)$$

ここで、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ ：乾燥開始材齢 t_0 日における材齢 t 日での乾燥収縮ひずみ、 $\varepsilon_{sh\infty}$ ：最終収縮ひずみ、 f_{28} ：材齢 28 日圧縮強度、 α ：セメント種類の係数(低熱セメント：4、普通あるいは早強セメント：5、早強型高強度セメント：8)、 h ：相対湿度、 A_c ：部材の断面積、 u ：外気に接する部分の周長、である。

(4) Bazant & Baweja 式⁶⁰⁾

$$\text{(収縮予測式)} \quad \varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh0\infty} \beta_h \beta_s \quad (2.15)$$

$$\text{(最終収縮量)} \quad \varepsilon_{sh0\infty} = \varepsilon_{sh\infty} \frac{E_{607}}{E(t_0 + \tau_{sh})} \quad E(t) = E_{28} \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right)^{1/2} \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = \alpha_1 \alpha_2 \left(1.9 \times 10^{-2} W^{2.1} f_{28}^{-0.28} + 270 \right)$$

$$k_t = 8.5 t_0^{-0.08} f_{28}^{-0.25}$$

$$\text{(時間依存性)} \quad \beta_s = \tanh \left(\frac{t - t_0}{\tau_{sh}} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

$$\text{(湿度依存性)} \quad \beta_h = \begin{cases} 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 & \text{for } h \leq 98 \\ -0.2 & \text{for } h = 100 \text{ (swelling in water)} \\ \text{linear interpolation} & \text{for } 98 \leq h \leq 100 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\text{(寸法・時間依存性)} \quad \tau_{sh} = k_t (k_s \cdot 2V/S)^2 \quad (2.19)$$

ここで、 $\varepsilon_{sh0\infty}$ ：相対湿度 0%における最終収縮ひずみ、 $E(t)$ 、 E_{607} 、 E_{28} ：材齢 t 日、607 日、28 日におけるヤング係数、 α_1 ：セメント種類の係数(Type I セメント：1.0, Type II セメント：0.85, Type III セメント：1.1)、 α_2 ：養生方法による係数(蒸気養生：0.75, 水中/湿潤養生：1.0, 封緘養生：1.2)、 W ：単位水量、 V ：体積、 S ：表面積、 k_s ：断面形状に関する係数(無限大スラブ：1.00, 無限大円筒：1.15, 無限大長柱：1.25, 球：1.30, 直方体：1.55)である。

表-2.9 に、各予測式が考慮しているパラメータや適用範囲、式の特徴を整理したものを示す。いずれの予測式も、収縮ひずみの最終値に湿度の影響項と進行速度の項を乗じる形となっている。現行土木学会式以外は、すべてセメント種類の影響を考慮できる。海外の予測式では、低発熱系セメント(低熱, Type II)のほうが、普通セメントよりも収縮が小さくなるとしている。

骨材の品質や岩種の影響を考慮できるのは、比較的最近に提案された日本建築学会式と 2012 年土木学会式である。ただし、日本建築学会式では、石灰石碎石のみ別の係数を用いており、それ以外の骨材の影響を考慮する手法が提示されていない。2012 年土木学会式は品質を表す係数 α を 4~6 とすることで骨材の影響を考慮できるようになっているが、コンクリートの乾燥収縮データベースにフィットするように定められた値であるため、物理的な意味があいまいである。また、これらの係数を、どのように設定すればよいか判断基準が示されていない。

これら膨大なデータに基づく確率論モデルの共通した課題であるが、今後、骨材品質が変化し

た場合,改めてデータベースを再構築する必要があり,労力の面で合理的な手法とは言いがたい.

表-2.9 各予測式のパラメータ

予測式	CEB/FIP MC90	Bazant & Baweja 式	日本建築学会式	土木学会式(2012年)
予測式の基本形	$\varepsilon_{sh\infty} \cdot \beta_s \cdot \beta_h$	$\varepsilon_{sh0\infty} \cdot \beta_s \cdot \beta_h$	$\varepsilon_{sh\infty} \cdot \beta_s \cdot \beta_h$	$\varepsilon_{sh\infty} \cdot \beta_s \cdot \beta_h$
セメントの種類	○(普通, 低熱, 早強高強度)	○(Type I, II, III)	○(N, H, BB, FA)	
骨材の影響			○(石灰石, 天然, 軽量, 再生)	○ (品質係数 α , 水分量 $\Delta\omega$)
水セメント比		(30-85%)		○
単位水量		○	○	○($\leq 175\text{kg/m}^3$)
単位セメント量		(160-720 kg/m^3)	○	
単位粗骨材量			○	
28日圧縮強度	○(20-90 N/mm^2)	◎(17-69 N/mm^2)		
養生条件		○(蒸気, 水中, 封緘)		
部材寸法	$(2A/u)^2$	$(2V/S)^2$	$(V/S)^{1.8}$	$(d/100)^2$
乾燥開始材齢		○	○	(3日 \leq)

2.4.3 複合モデル

複合モデルは,コンクリートをセメントペーストあるいはモルタルと骨材の複合体であるとみなし,各相の相互作用からコンクリートの乾燥収縮を導き出そうとする理論モデルであり,元来,複合材料のヤング係数の推定を目的としたものを応用したものである.

(1) 直列モデル

骨材の体積希釈効果を表すモデルであり,下式(2.20)で表される.式の形からわかるように,コンクリートの収縮ひずみは骨材の単位容積比に比例する.

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = 1 - V_a \quad (2.20)$$

ここで, $\varepsilon_c, \varepsilon_p$: コンクリート, セメントペーストの収縮ひずみ, V_a : 骨材の単位容積比である.

(2) 並列モデル

骨材がセメントペーストの収縮を拘束する効果は,並列モデルで表される.力の釣り合いと変位の適合条件を用いると式(2.21)で表される.

$$E_a \varepsilon_a V_a = E_p (\varepsilon_p - \varepsilon_c) (1 - V_a) \quad (2.21)$$

ここで、 E_a, E_p : 骨材, セメントペーストのヤング係数, ε_a : 骨材のひずみ, である. 並列モデルであるため, 骨材のひずみとコンクリートの収縮ひずみは等しい. したがって, 式 (2.21) は式 (2.22) に書き換えられる. セメントペーストと骨材のヤング係数が等しい($E_a=E_p$)場合, 下式はただちに骨材の体積希釈効果を表す直列モデル式 (2.20) となる.

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1-V_a}{1+(E_a/E_p-1)V_a} \quad (2.22)$$

(3) 並列(大野)モデル

大野は, 骨材自体が収縮することを考慮した並列モデルを提案⁴⁰⁾した. 式 (2.23) に示す.

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1+(\varepsilon_a/\varepsilon_p \cdot E_a/E_p - 1)V_a}{1+(E_a/E_p - 1)V_a} \quad (2.23)$$

ここで, ε_a : 骨材の収縮ひずみ, である.

(4) 球殻モデル

セメントペーストと骨材の形態をより現実的に表すものとして, 球殻モデルが提案^{20), 61), 63)}されている. 代表的なものとして Pickett のモデル²⁰⁾がある.

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = (1-V_a)^n + \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_p} \quad (2.24)$$

$$n = \frac{3(1-\mu_c)}{1+\mu_c + \{2(1-\mu_a)E_c/E_a\}} \quad (2.25)$$

ここで, μ_c, μ_a : コンクリート, 骨材のポアソン比, E_c : コンクリートのヤング係数である.

(5) 球殻モデル(毛細管張力モデル)

これまでのモデルでは, 各相を弾性体として取り扱っているが, 実際にはセメントペーストのような非弾性材料では, 骨材の拘束によって引張クリープが生じる. 岸谷・馬場⁶³⁾は, 上記 Pickett モデルを発展させ, 乾燥収縮ひずみを乾燥収縮応力による弾塑性変形と考える毛細管張力モデル式(2.26)を提案した. また, Pickett 式(2.24)でも認められるように, コンクリートの乾燥収縮を予測するためにコンクリートのヤング係数が必要となる不完全な形を, Hashin-Hansen モデル⁶⁴⁾を用いることで解消している(式(2.27)).

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - (1 - \varepsilon_a / \varepsilon_p \cdot E_a / E_p) V_a}{E_c / E_p} \quad (2.26)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{\{1 - (1 - m \cdot n) V_a\} \{n + 1 - (n - 1) V_a\}}{n + 1 + (n - 1) V_a} \quad (2.27)$$

ここで、 $m = \varepsilon_a / \varepsilon_p$ 、 $n = E_a / E_p$ である。

(6) 球殻モデル(細・粗骨材を考慮したモデル)

江口・寺西⁶⁵⁾は、2相材料を対象とした式(2.27)をモルタル(セメントペースト+細骨材)とコンクリート(モルタル+粗骨材)に段階的に適用することで、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす細・粗骨材の物性の影響を考慮できるよう拡張した。

寺西・佐藤は、上記の2相モデルを段階的に適用する場合、モルタルのヤング係数が必要となることから、Hashin-Hansen式⁶⁶⁾の原形式⁶⁶⁾を用いることで、式(2.28)に示す3相モデルに拡張を図った⁶⁷⁾。また、乾燥収縮の起源であるセメントペーストの乾燥収縮とヤング係数を、普通ポルトランドセメント、フライアッシュセメント、高炉セメントB種について定式化し、水セメント比から容易に結果を算出できるよう整備されている(表-2.10)。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sc}(t) &= \varepsilon_{sp}(t) \frac{1 - (1 - m_s n_s) V_s - (1 - m_g n_g) V_g}{n_c} \\ n_c &= 1 + \frac{2(n_s - 1) V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1) V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1)(V_s + V_g)} \\ \varepsilon_{sp}(t) &= \frac{t}{R_s(\alpha W/C + \beta) + t} R_h(\lambda W/C + \delta) \\ R_s &= 3.29 \log(V/S) + 1.17 \quad R_h = 1.28 \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta$$

$$n_s = E_s / E_p, \quad n_g = E_g / E_p, \quad m_s = \varepsilon_{ss}(t) / \varepsilon_{sp}(t), \quad m_g = \varepsilon_{sg}(t) / \varepsilon_{sp}(t)$$

$$\varepsilon_{ss}(t) = \frac{t}{R_a \cdot R_s(\alpha W/C + \beta) + t} \varepsilon_{ss\infty} \quad \varepsilon_{sg}(t) = \frac{t}{R_a \cdot R_s(\alpha W/C + \beta) + t} \varepsilon_{sg\infty}$$

ここで、 ε_s ：乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)、 E ：ヤング係数(kN/mm²)、 V ：骨材体積比、 t ：乾燥期間(日)、 W/C ：水セメント比(%)、 V/S ：体積表面積比(cm)、 h ：相対湿度(%)、 R_a ：コンクリート中にある骨材とセメントペースト成分おのおのの乾燥収縮の進行速度の比率を表す定数、 $\varepsilon_{s\infty}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値($\times 10^{-6}$)、 $\alpha, \beta, \lambda, \delta, \gamma, \eta$ ：セメントの種類に関わ

る定数，である．また，添字 c, p, s, g は，それぞれコンクリート，セメントペースト，細骨材，粗骨材を表す．

表-2.10 セメントの種類に応じた諸係数

セメント種類	α	β	λ	δ	γ	η
普通ポルトランドセメント	0.322	4.77	86.3	54	5.9	4.2
フライアッシュセメント	0.518	-4.72	67.8	581	6.9	0.2
高炉セメント B 種	0.608	-10.77	143.7	-1408	6.9	-0.9

図-2.13 は，上式 (2.28) の 3 相複合モデルを用い，粗骨材の乾燥収縮率 ε_{sg} が得られている場合と，得られていない場合について予測精度の比較²²⁾を行なったものである．同図より，粗骨材の乾燥収縮率を入力することで予測精度の向上が認められる．また，それ以外の各相の物性値が明らかになることで更なる予測精度の向上が期待できると考えられている．

表-2.11 に，本節で説明したモデルを一覧して示す．これらモデル式は，力のつりあいや変形適合則から導き出された理論式であるため，乾燥収縮ひずみの予測精度を向上させるためのパラメータ修正や，各相の物性値を実際に計測しモデルの精度検証^{25), 68), 69), 70), 71)}などが行われている．しかしながら，現状では，各研究者レベルで方法論を提案している段階といえ，実際の設計式に用いるためには，広範な精度検証や入力値として必要となる骨材物性の整備が不可欠といえる．

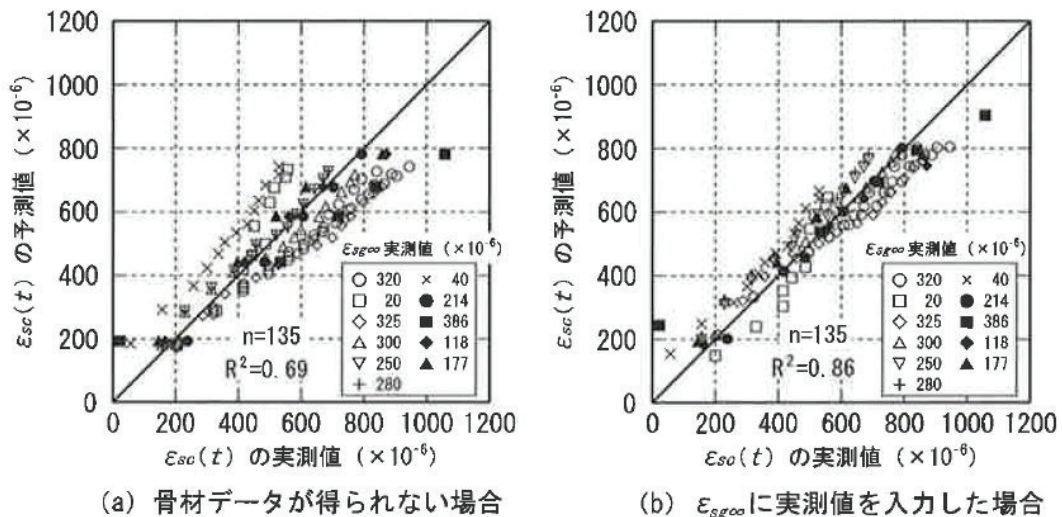


図-2.13 粗骨材の乾燥収縮率の有無が 3 相複合モデルの予測精度に及ぼす影響

2.5 RC はり部材に及ぼす収縮の影響に関する研究

2.5.1 RC はり部材の曲げひび割れ・変形・耐荷力に及ぼす収縮の影響

コンクリートの乾燥収縮は、材料や強度レベルによって異なるものの一般に数百 μ オーダーであり、RC はり部材に及ぼす影響としては、長期的な曲げひび割れ幅の変化や、それにとまなう変形性状等、使用限界に係る性能に及ぼす影響が大きいとの見方が一般的である。ひび割れに及ぼす収縮の影響に関する研究では、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]のひび割れ算定式の基本式となる角田の研究⁷²⁾をはじめ、多くの報告^{73), 74), 75), 76), 77), 78), 79)}がある。また、近年、高強度コンクリートで顕在化した若材齢時の自己収縮によるひび割れ・変形の評価方法を、谷村らが提案^{80), 81), 82)}した。

一方、終局曲げ耐力へ及ぼす収縮の影響は、使用時に及ぼす影響と比べ小さいと考えられている。これは、終局時の鉄筋ひずみのオーダーと比べコンクリートの収縮ひずみが小さいためである。長谷川・関⁸³⁾は、乾燥収縮によるRC はり部材の軸方向変形をジャッキによって完全拘束することでひび割れを生じさせ、RC はりの曲げ変形性状や終局曲げ耐力及ぼす乾燥収縮の影響について実験的に検討した。その結果、降伏耐力、終局耐力ともに、収縮の影響を無視した通常の断面解析結果と一致し、同手法によって評価可能であるとしている。

2.5.2 せん断補強筋のない RC はり部材のせん断耐荷挙動

(1) せん断破壊の形態

せん断補強筋のないRC はりの破壊形態は、**図-2.14**に示すように斜めひび割れが発生すると同時に急激に破壊する場合と、斜めひび割れが発生しても直ちに破壊することなく、さらに大きな耐荷力を有する場合がある。前者は、せん断スパン有効高さ比(以下、 a/d)が2.5程度以上の細長いはりの場合の破壊形態であり、斜め引張破壊と呼ばれる。 a/d が比較的小さいRC はりは、ディープビームと呼ばれ、すでに発生している斜めひび割れの延長として、徐々に斜めひび割れが発達する。斜めひび割れが発生しても、部材の抵抗機構がはり機構からタイドアーチ機構に移行するため、斜めひび割れの発生によって直ちに破壊することはない。最終的に載荷点近傍のコンクリートが圧縮破壊することで耐荷力を失うため、せん断圧縮破壊と呼ばれている。

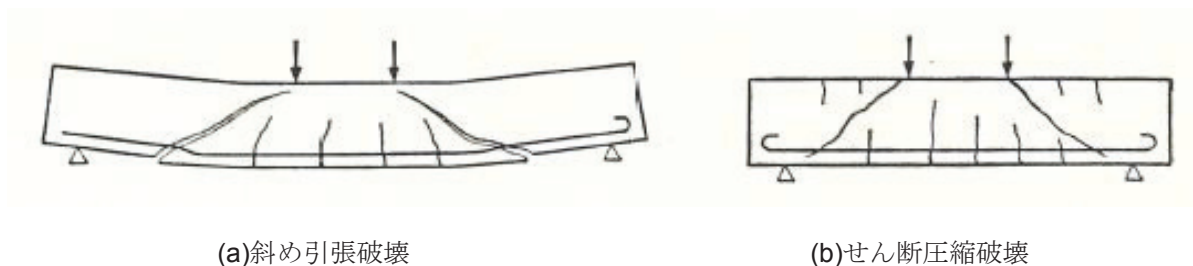


図-2.14 せん断破壊の形態⁸⁴⁾

(2) RC はりのせん断抵抗メカニズム

斜め引張破壊するせん断補強筋のない RC はりのせん断抵抗要素は，**図-2.15** に示すとおり，圧縮部のコンクリート(V_{con})，ひび割れ面のかみ合い(V_a)，軸方向鉄筋のダウエル作用(V_d)であると考えられている．

$$V = V_{con} + V_a + V_d \quad (2.29)$$

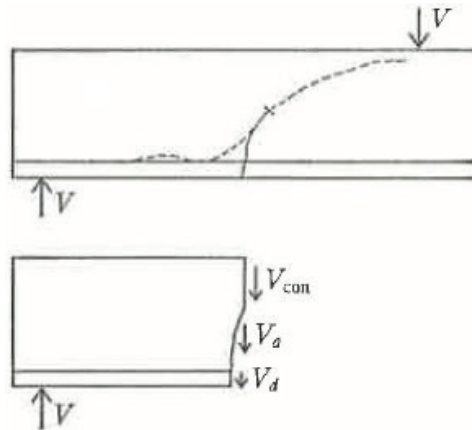


図-2.15 RC はりのせん断抵抗要素 ⁸⁴⁾

圧縮部コンクリートのせん断抵抗(V_{con})の大きさは，圧縮部の断面積に関係するため，中立軸位置を変化させる鉄筋比の影響を受ける．また，ひび割れ面のかみ合い(V_a)の大きさは，ひび割れ幅の大きさやひび割れ面の凹凸の大きさに依存する．ひび割れ幅は鉄筋比と作用モーメントの影響を受け，ひび割れ面の凹凸は骨材の最大寸法に支配されると考えられる．ダウエル作用(V_d)の大きさは，鉄筋の曲げ剛性，ひび割れ幅の影響を受ける．いずれの抵抗要素にも鉄筋比が関与しており，鉄筋比が大きくなるほど抵抗力が高くなることになる．なお，コンクリートの圧縮強度もすべての抵抗要素に関連する．

この中で，斜めひび割れの発生に影響を及ぼす主要因を，コンクリートの圧縮強度，引張鉄筋比，せん断スパン比，断面の有効高さとし，Okamura と Higai は国内外の既往の 288 体の実験データを総合的に整理して，以下の斜めひび割れ耐力式を提案 ⁸⁵⁾した．

$$\begin{aligned} V_c &= 0.2f_c^{1/3} \cdot (1 + \beta_p + \beta_d)\beta_a \cdot bd \\ \beta_d &= (d/1000)^{-1/4} \\ \beta_p &= (100p_s)^{1/3} \\ \beta_a &= (0.75 + 1.4/(a/d)) \end{aligned} \quad (2.30)$$

ここで， V_c ：斜めひび割れ耐力(kN)， f_c ：コンクリートの圧縮強度， b ：はり幅(mm)， d ：有効高

さ(mm), p_s : 鉄筋比(= A_s/bd), A_s : 軸方向鉄筋の断面積(mm²)

さらに, 二羽ら⁸⁶⁾は, データが不足していた大型断面で鉄筋比の小さい供試体による実験結果に基づき, 式(2.31)を下式のように修整した.

$$\begin{aligned}
 V_c &= f_{vcd} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot bd \\
 f_{vcd} &= 0.2f_c^{1/3} \\
 \beta_d &= (d/1000)^{-1/4} \\
 \beta_p &= (100p_s)^{1/3} \\
 \beta_a &= (0.75 + 1.4/(a/d))
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

現行のコンクリート標準示方書¹⁵⁾では, 上記式(2.31)の a/d の項を省略し, 安全側の評価が得られるような形とした上でせん断耐力式として採用している.

(3) せん断強度の寸法効果

斜めひび割れ発生時のせん断強度は寸法の影響を受け, 断面寸法が大きいものほどせん断強度は小さくなることが知られている. この原因としては, 粗骨材の寸法が供試体の大きさに相似とになっていないことによると考えられている. すなわち, 小さい寸法のはりで発生した斜めひび割れが, 粗骨材の位置に達すると粗骨材のかみ合わせによって成長が抑えられやすいのに対して, 大寸法のはりでは粗骨材の寸法が相対的に小さくなるので, かみ合わせの影響が小さくなる. Taylor は, 粗骨材の寸法についても断面寸法に比例させた相似な断面(図-2.16 中, 縮小供試体), とすると, 有効高さがはりの斜めひび割れせん断強度に及ぼす影響は非常に小さい⁸⁷⁾ことを実験的に示した.

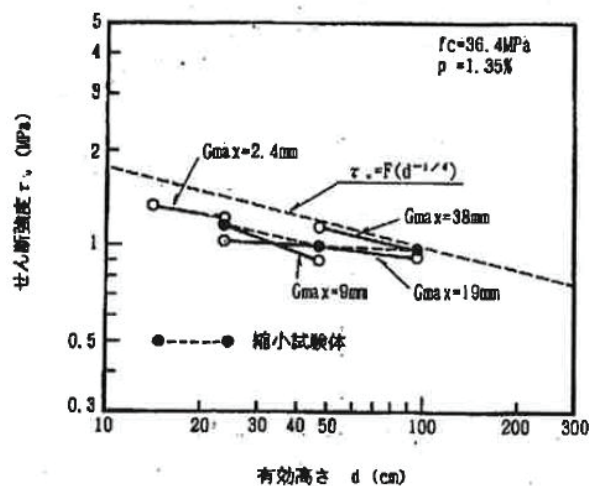


図-2.16 Taylor の実験結果

最近では、寸法効果について破壊力学的な説明もなされている。Walraven⁸⁸⁾は普通骨材と軽量骨材を用いた RC はりのせん断強度を実験的に調べ、軽量骨材は普通骨材よりも骨材強度(剛性)が小さいにもかかわらず、両者のせん断強度が寸法増大とともに平行に低下していることから、寸法効果はコンクリートの引張軟化特性の影響が大きいとした(図-2.17)。Hillerborg⁸⁹⁾はひび割れ先端部の破壊進行領域の長さは近似的に特性長さに比例し、その長さが $0.3-0.5l_{ch}$ であるとした。その結果に基づき、Zink⁹⁰⁾は、破壊進行領域の長さがはり高さに依存しないことが寸法効果の主たる要因であるとし、寸法効果と破壊力学パラメータを結び付けた考察を行った。これら3編の報告はいずれも寸法効果とひび割れ先端部の破壊進行領域における引張軟化特性が深く関係していることを指摘したものである。

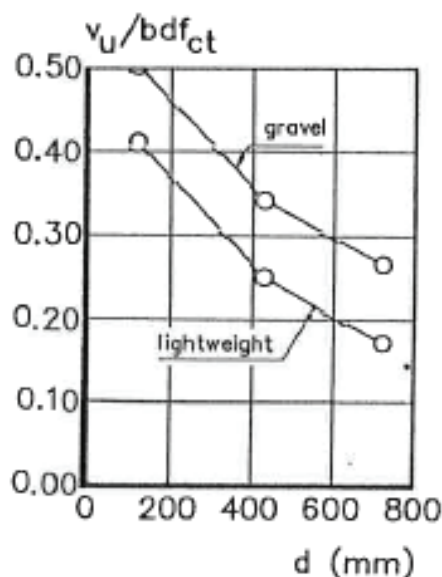


図-2.17 普通および軽量骨材を用いた RC はりのせん断強度と有効高さの関係⁸⁸⁾

(4) 軸方向力の影響

RC はり部材に軸方向圧縮力が生じている場合、曲げひび割れが遅れて発生するため、斜めひび割れの発生が遅れて発生する。逆に軸方向引張力が生じている場合、斜めひび割れの発生が容易となるためせん断強度は低下する。その影響を考慮する方法のひとつとして、デコンプレッションモーメント法があり、現行の示方書¹⁵⁾においても採用されている。これは、軸方向力によるせん断強度の増大あるいは低下の程度が、引張縁において、軸方向力によって導入された応力が打ち消される大きさのモーメントによって決まるとする考え方である。これらの影響は、下式で表される。

$$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} \quad (N'_d \geq 0 \text{ の場合}) \quad \text{ただし, } \beta_n > 2 \text{ の場合は } 2 \text{ とする。} \quad (2.32)$$

$$\beta_n = 1 + 4M_0 / M_{ud} \quad (N'_d \leq 0 \text{ の場合}) \quad \text{ただし, } \beta_n < 0 \text{ の場合は } 0 \text{ とする。} \quad (2.33)$$

ここで、 N'_d : 設計軸圧縮力, M_{ud} : 軸方向力を考慮しない純曲げ耐力, M_0 : 設計曲げモーメント M_d に対する引張縁において、軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント, である。

軸方向圧縮力の場合と比べると少ないものの、引張力が断面に生じた場合の研究事例^{91), 92)}が報告されており、いずれも引張力がない場合よりもせん断耐荷力が低下することが報告されている。また、解析的な検討も行われている。図-2.18 は、斜めひび割れ面に垂直および平行に方向にロード要素を用いてコンクリートの軟化特性とすべり特性を考慮し、軸方向引張力を受けた場合のせん断強度と寸法効果について解析的に検討した結果⁹³⁾である。同図より、軸方向引張力が大きくなるとともにせん断強度が低下していることがわかる。

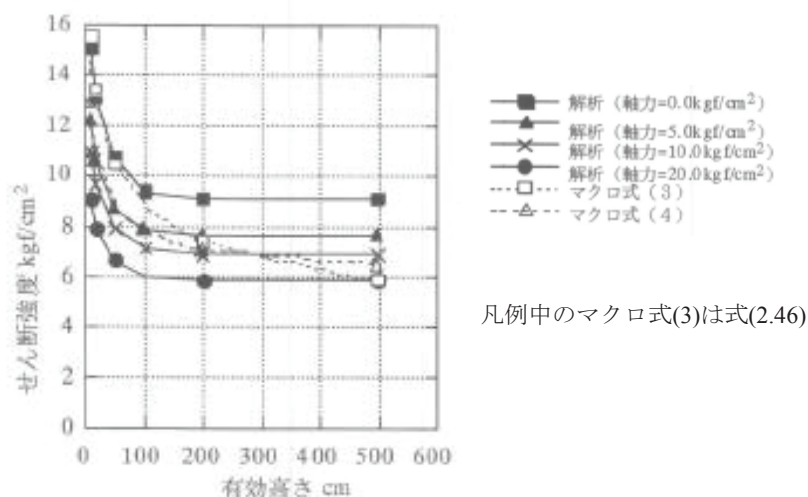


図-2.18 軸方向引張力を受けた場合のせん断強度と寸法効果の解析結果⁹³⁾

2.5.3 収縮が RC はり部材のせん断耐荷力に及ぼす影響

軸方向引張力によってせん断耐荷力が低下することは実験的研究および解析結果から得られているものの、実際にコンクリートの収縮によって部材断面に引張力が生じた場合、せん断耐荷力がどの程度変化するかを検討した事例は極めて少ない。そのなかで、自己収縮が卓越する高強度コンクリートを対象に検討がなされている^{94), 95), 96), 97)}。佐藤・河金らは^{98), 99)}、自己収縮の大きさが異なる2種類(高収縮: HAS, 低収縮: LAS)の高強度コンクリート(W/B: 23%, 圧縮強度: 101~128N/mm²)を用いた RC はりのせん断挙動について実験検討を行った。図-2.19 は、斜めひび割れ発生時のせん断強度 $\tau_{c,cr}$ について、LAS と HAS との比を有効高さ d ごとに示したものである。HAS の斜めひび割れ発生強度は LAS よりも小さくなり、その低下割合は有効高さ 250mm で 6%, 500mm で 13%, 1000mm で 18%と有効高さにとまって大きくなっている。自己収縮によって斜めひび割れ発生強度が低下する理由は、収縮量の増大が曲げひび割れ発生前後の引張鉄

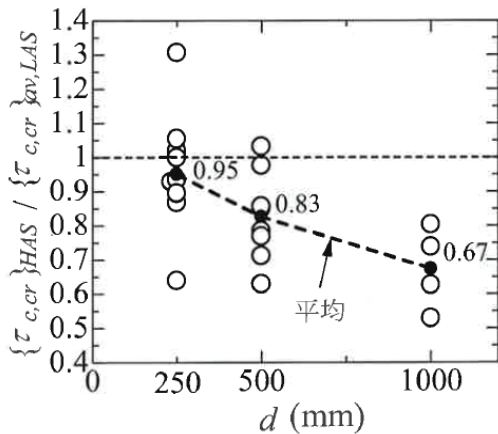


図-2.19 収縮による斜めひび割れ発生強度の低下

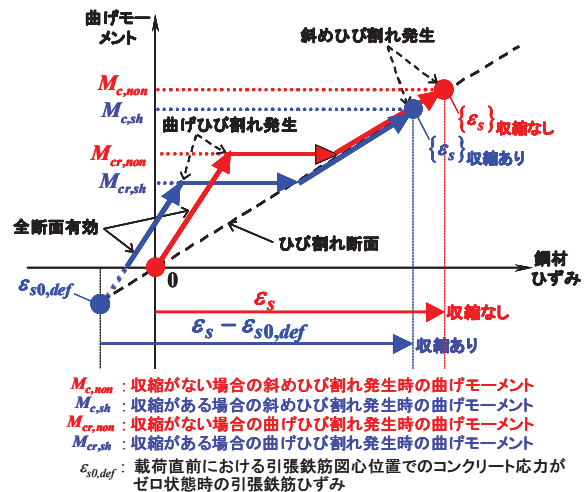


図-2.20 等価引張鉄筋比の概念

筋ひずみの変化量を増大させることで、同一荷重時のひび割れ幅が拡大し、それにもなって圧縮部コンクリートのせん断抵抗、ひび割れ面での噛み合いおよびダウエル作用が低下するためとされている。

これらの影響を評価する方法として、等価引張鉄筋比の概念が提案されている(図-2.20)。収縮によって引張鉄筋に蓄積された圧縮ひずみは、ひび割れ発生によって解放されるため、同一曲げモーメント時に、収縮がない場合よりもひび割れ幅が大きくなる。このひび割れ幅の相対的な増加を、機能的に引張鉄筋の減少と等価と捉える概念であり、式(2.34)で表現されている。

$$p_{s,e} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s - \epsilon_{s0,def}} p_s \quad (2.34)$$

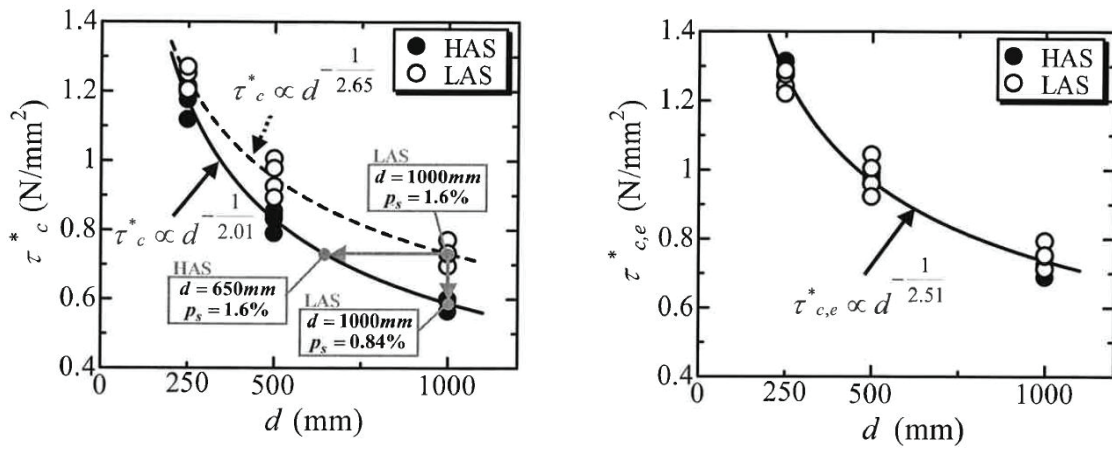
ここで、 $p_{s,e}$ ：等価引張鉄筋比、 p_s ：実際の引張鉄筋比、 ϵ_s ：曲げせん断スパン中央での斜めひび割れ発生時の引張鉄筋ひずみ、 $\epsilon_{s0,def}$ ：コンクリート応力ゼロ状態時の鉄筋ひずみ

図-2.21 は、正規化した斜めひび割れ発生強度 $\tau_c^* (= \tau_c / \{(100p_s)^{1/3} (0.75 + 1.4/(a/d))\})$ と有効高さとの関係を、式中の p_s に実際の引張鉄筋比を用いた場合(a)と、等価引張鉄筋比を用いた場合(b)についてそれぞれ示したものである。実鉄筋比を用いた τ_c^* は、HAS と LAS で寸法依存性が異なるが、等価引張鉄筋比を用いることで自己収縮の差異にかかわらず有効高さの影響を-2/5 乗則で統一的に評価可能となっている。

さらに、Gustafsson ら¹⁰⁰⁾による τ_c/f_t と d/l_{ch} の両対数に線形関係があるという FEM 解析結果およびこれを利用した藤田らの手法¹⁰¹⁾に準じ、コンクリートの力学特性および自己収縮の影響を考慮した高強度 RC はりの斜めひび割れ発生時のせん断強度式(2.35)を提案している。図-2.22 に示すように、提案式による計算値は収縮の大小によらず実測値を高精度に評価できていることがわかる。

$$\tau_c = 0.11E_c^{2/5}f_t^{1/5}(100p_{s,e})^{1/3}d^{-2/5}(0.75+1.4/(a/d)) \quad (2.35)$$

ここで、 E_c : コンクリートのヤング係数(kN/mm²), f_t : コンクリートの引張強度(N/mm²), a : セン断スパン(mm)



(a)実鉄筋比

(b)等価引張鉄筋比

図-2.21 セン断強度の寸法効果に及ぼす収縮の影響

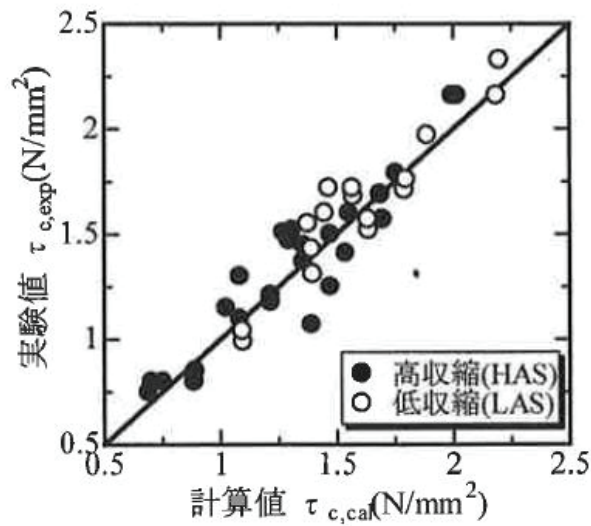


図-2.22 提案式と実測値の比較

最近では、数値解析的な検討¹⁰²⁾も進められている。図-2.23は、Sato and Kawakaneの実験結果⁹⁸⁾を2次元非線形FEMによって再現した荷重-たわみ関係、斜めひび割れ時および終局時の主ひずみ分布を示したものである。同図より、解析結果は荷重たわみ関係を良く予測できており、コンクリートの自己収縮による斜めひび割れ発生時およびせん断耐荷力の低下についても再現されている。また、主ひずみの分布状況から、自己収縮の有無によって斜めひび割れ発生位置が変化し、破壊モードの変化をもたらすことも報告されている。

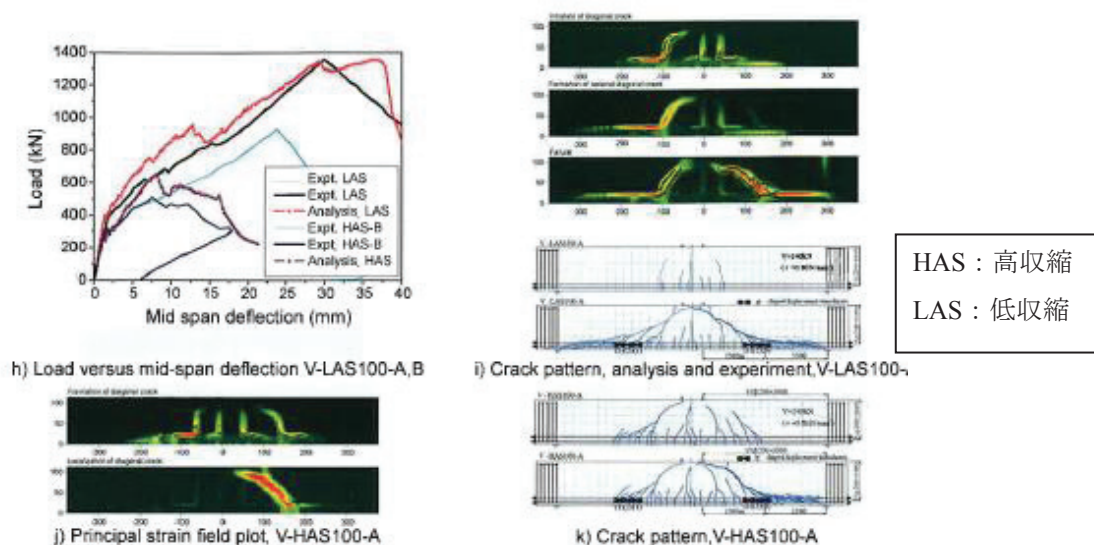


図-2.23 2次元FEMによるRCはりの解析結果と実測値との比較

2.6 第2章のまとめ

「第2章」では、本研究に関係した研究を調査・整理した。得られた知見と現状の課題を以下に記述する。

- (1) コンクリート中の骨材量が大幅に変化する配合では、骨材がセメントペーストを希釈する効果がコンクリートの乾燥収縮に支配的な影響を及ぼす。しかしながら、一般的に使用されるコンクリートの骨材含有率の範囲では、骨材がセメントペーストを拘束する影響のほうが大きい。そのため、コンクリートの乾燥収縮を評価する上では、骨材物性を検討することが重要となる。
- (2) コンクリートの乾燥収縮を抑制する材料として、石灰石骨材、膨張材、収縮低減剤といった材料が広く認知されている。しかしながら、これら材料の収縮抑制効果は、標準的な材料を用いた場合について示されたものであり、セメントや骨材の種類など材料の組み合わせが異なる場合について考慮した検討はほとんどない。また、コンクリートの乾燥収縮に及ぼすセメント種類や石灰石骨材の影響については、研究によって意見が異なる。
- (3) 骨材の収縮拘束効果として、骨材自体のヤング係数および乾燥収縮が関与していることが明らかとされてきている。また、これらを直接測定する以外にも、コンクリートの乾燥収縮を評価できるとする指標が多数提案されている。コンクリートの乾燥収縮ひずみの計測には通常6か月を要するため、簡易な骨材指標によってコンクリートの乾燥収縮ひずみを評価できれば有用である。しかしながら、現状では、さまざまな指標を各研究者が提案している段階であり、それぞれの精度の比較検証が十分でない。
- (4) 近年構築された規準類の乾燥収縮予測式は、骨材の影響を考慮できる形になっている。ただし、これらは膨大なコンクリートデータベースに基づいて構築された平均値を求める確率論モデルであるため、骨材の影響の取り扱いについて物理的な意味があいまいであることや、今後、骨材品質が変化した場合、改めてコンクリートデータベースを更新せざるを得ず、労力がかかるといった課題がある。一方、骨材物性の影響を直接考慮できる予測式である複合モデルは、理論が明快であるものの、入力値となる骨材物性を実験で求める必要があるため、設計段階での運用が難しいといった問題がある。
- (5) RC はりのせん断挙動を、機械的に断面に引張力を導入して検討した事例や、解析的に軸方向引張力を与え、斜めひび割れ面にロッド要素でコンクリートの引張軟化特性や組み合わせ効果を組み込んで検証した事例などがあり、いずれも断面に引張力が生じるこ

とでせん断強度が低下することが確認されている。一方、実際にコンクリートの収縮によって部材断面に引張応力が生じた場合のせん断強度の低下について検討した事例はほとんどない。

- (6) コンクリートの自己収縮が高強度 RC はりのせん断挙動に及ぼす影響について検討されており、収縮によってせん断強度が低下すること、寸法効果が増大することが実験的に確認されている。2次元非線形 FEM による解析結果からも現象の妥当性が再現されている。一方、普通強度レベルで卓越するコンクリートの乾燥収縮については、RC はりのせん断挙動に影響を及ぼすが明らかにされていない。

第2章の参考文献

- 1) Neville, A.M.(著), 三浦 尚(訳): ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版, 2004.6
- 2) 近藤実: 硬化セメントペースト中の水の形態と水分の拡散を考慮した乾燥収縮の関係, セメント技術年報, No.12, pp.136-149, 1958.
- 3) Powers, T.C.: The thermodynamics of volume change and creep, *Materials and Structures*, Vol.1, pp.487-507, 1968.
- 4) Bazant, Z.P. and Raftshol, W.J.: Effect of cracking in drying and shrinkage specimens, *Cement and Concrete Research*, Vol.12, pp.209-226, 1982.
- 5) Ferraris, C. F. and Wittmann, F. H.: Shrinkage mechanisms of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol.17, pp.453-464, 1987.
- 6) Maruyama, I.: Origin of drying shrinkage of hardened cement paste: hydration pressure, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.8, pp.187-200, 2010.
- 7) Wittmann, F.H.: Surface tension shrinkage and strength of hardened cement paste, *Materials and Structures*, Vol.1, pp.547-552, 1968.
- 8) Wittmann, F. H. : Creep and shrinkage mechanics, *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, Edited by Bazant, Z. P. and Wittmann, F. H., JOHN WILEY & SONS Ltd., pp.129-161, 1982.
- 9) Feldman, R. F., Sereda, P. J.: A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties, *Materials and Structures*, Vol.1, No.6, pp.509-520, 1968.
- 10) Uchikawa H., Hanehara S., Sawaki D.: Structure change of hardened mortar drying, *3rd NCB International Seminar*, Vol.4, pp.1-12, 1991.
- 11) ウィットマン F.H.(著), 三橋博三(訳): コンクリートの内部構造と力学特性, コンクリート工学, Vol.21, No.3, pp.19-30, 1983.
- 12) 石田哲也, Yao Luan: 水和収縮と細孔内水分の形態に立脚した収縮駆動モデルの再構築, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.422-436, 2012.

- 13) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの収縮問題検討委員会報告書, 2010.3
- 14) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2008.3
- 15) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 16) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009, 2009.2
- 17) セメント協会: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討, 耐久性専門委員会ひびわれ分科会報告, H-23, 1992.
- 18) 岡田 清, 六車 熙: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.477-478, 1991.
- 19) セメント協会: 各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究(コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果), コンクリート専門委員会報告, F-55, 2011.
- 20) Pickett, G.: Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage, *Journal of the ACI*, Vol.52, No.5, pp.581-590, 1965.
- 21) 閑田徹志, 百瀬晴基, 今本啓一, 三橋博三: 全国のレディーミクストコンクリート工場を対象としたコンクリートの乾燥収縮に関する調査研究(その2統計解析結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.293-294, 2007.
- 22) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.
- 23) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会: 平成24年度 乾燥収縮に関する実態調査結果報告書, 新技術開発報告, No.42, 2013.3
- 24) セメント協会: コンクリート専門委員会報告, F-46, 石灰石骨材コンクリートの研究, 1992.10
- 25) 田中博一, 橋田 浩: 骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.553-558, 2009.7
- 26) 土木学会: 膨張コンクリート設計施工指針, コンクリートライブラリー75, 1993.
- 27) 日本建築学会: 膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案・同解説, 1978.
- 28) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2013.3
- 29) 日本建築学会: 膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状, p187, 2013.
- 30) 富田六郎: コンクリート用有機系収縮低減剤の作用機構およびその効果に関する実証的研究, 東京工業大学博士論文, p.8, 1994.
- 31) 後藤孝治, 酒井公式, 佐藤 健: セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤, セメント・コンクリート, No.442, pp.9-15, 1984.
- 32) 丸山一平, 岸 直哉: 収縮低減剤の作用機構, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 645, pp. 1895-1903, 2009.
- 33) セメント協会: ひび割れ抵抗性に及ぼす各種要因の検討(その三)骨材種類の影響, 耐久性専門委員会ひび割れ分科会報告, H-21, 1988.
- 34) Kordina, K.: Experiments on the influence of the mineralogical character of aggregates on the creep

- of concrete, *RILEM Bulletin*, Paris, No.6, pp.7-22, 1960.
- 35) Neville A. M., Dilger W. H., Brooks J. J.: Creep of plain and structural concrete, *Construction Press*, London and New York, 1983.
 - 36) Roper, H.: Study of shrinking aggregates in concrete, *National Building Research Institute Special Technical Report*, No.502, Council for scientific and industrial research, Pretoria, South Africa, pp.136, 1959.
 - 37) Rhoades, R., Mielenz, R. C.: Petrographic and mineralogic characteristics of aggregates, Symposium on Mineral Aggregates, *ASTM Special Technical Publication*, No.83, pp.20-48, 1948.
 - 38) Snowdon, L. C., Edwards, A. G.: The moisture movement of natural aggregate and its effect on concrete, *Magazine of Concrete Research*, 14, No.41, pp.109-116, 1962.
 - 39) Nipper-Christensen, P.: Shrinkage and swelling of rocks due to moisture movements, *Dansk Geol. Forening*, 15, pp.548-555, 1965.
 - 40) 大野和男: モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究, 北海道大学工学部研究報告, No.9, 1953.
 - 41) 後藤幸正, 藤原忠志: 乾湿に伴う骨材の体積変化, 土木学会論文報告集, No.247, pp.97-108, 1976.
 - 42) 浅本晋吾, 石田哲也, 前川宏一: 骨材特性との連関を考慮した複合構成モデルによるコンクリートの収縮解析, 土木学会論文集E, Vol.63, No.2, pp.327-340, 2007.
 - 43) 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, 第 286 号, pp.125-137, 1979.
 - 44) 立松和彦, 荒井正直, 岩清水隆, 木村芳幹, 浦野英男, 今本啓一, 元木 亮: 関西地区における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 549 号, pp.1-6, 2001.
 - 45) 片平 博, 渡辺博志: 簡易な評価指標によるコンクリートの乾燥収縮量推定のための基礎的研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, V 部門, pp.843-844, 2008.
 - 46) 後藤貴弘, 中村俊彦, 高尾 昇, 鳴瀬浩康: コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす骨材の物性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.89-94, 2010.
 - 47) 中村秀三, 酒井英司: 各種砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-1 材料施工, pp.431-432, 2006.
 - 48) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直: 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会論文集構造系論文集, No.606, pp.9-14, 2006.
 - 49) 藤原忠司: 低品質の粗骨材を用いたコンクリートの諸性質, セメント・コンクリート, No.481, pp.8-15, 1987.
 - 50) 土木学会: 昭和 6 年制定鉄筋コンクリート標準示方書, 1931.9
 - 51) 土木学会: 昭和 6 年制定鉄筋コンクリート標準示方書 解説, 1931.10
 - 52) 土木学会: 昭和 42 年制定コンクリート標準示方書, 1967.5

- 53) 土木学会: 昭和 61 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 1986.10
- 54) H.リュッシュ, D.ユンクビルト(著), 百島祐信(訳): コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1976.11
- 55) 土木学会: 平成 8 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 1996.3
- 56) 阪田憲次: コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測, コンクリート工学, Vol.31, No.2, pp.5-14, 1993.
- 57) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.3
- 58) 綾野克紀, 藤井隆史, 平 喜彦: コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.421-437, 2013.
- 59) CEB-FIP: Model Code 1990, *Comite Euro-International du Beton*, 1990.
- 60) Bzant Z. P. and Baweja S.: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures – Model B3, *Materials and Structures*, Vol.28, pp.357-365, 1995.
- 61) Hansen T. C. and Nielsen K. E. C.: Influence of aggregate properties on concrete shrinkage, *Journal of the ACI*, Vol.62, pp.783-794, 1965.
- 62) 仕入豊和: セメントペースト量とコンクリートの乾燥収縮量の関係に関する実験研究, 日本建築学会研究報告, No.58, pp.13-16, 1961.
- 63) 岸谷孝一, 馬場明生: 建築材料の乾燥収縮機構, セメント・コンクリート, No.346, pp.30-40, 1975.
- 64) Hansen, T. C.: Influence of Aggregate and Voids on the Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, *Journal of the ACI*, Vol. 62, pp. 193'-216, 1965.
- 65) 江口 清, 寺西浩司: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.15-22, 2002.
- 66) Hashin, Z.: The elastic moduli of heterogeneous materials, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.29, No 1, pp 143-150, 1962.
- 67) 寺西浩司, 佐藤嘉昭: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式—3 相モデルへの展開および外的要因の影響の考慮—, 日本建築学会構造系論文集, No.602, pp.21-28, 2006.
- 68) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 三橋博三: 複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式-終局乾燥収縮ひずみの評価方法-. 日本建築学会構造系論文集, 第 590 号, pp.9-16, 2005.
- 69) 都築正則, 友澤史紀, 千歩 修, 浜 幸雄: 各種の粗骨材を用いたコンクリートにおける乾燥収縮低減剤の効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.423-428, 2002.
- 70) 小山田哲也, 小田島悠弥, 越谷 信, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に対する石灰石骨材の有効性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.377-382, 2010.
- 71) 田中希枝, 島 弘: 骨材の乾燥収縮とヤング係数を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する複合モデルの検証, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.1, pp.72-82, 2012.

- 72) 角田與史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970.
- 73) 尾坂芳夫, 大塚浩司, 松本英信: 乾燥の影響を受ける引張 RC 供試体のひび割れ性状, コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.109-119, 1985.
- 74) 尾坂芳夫, 大塚浩司, 松本英信: RC 桁橋の部材引張部におけるひび割れ性状, 土木学会論文集, 第 390 号/V-8, pp.77-86, 1988.
- 75) 石橋忠良, 斉藤啓一, 津吉 毅, 大庭光商, 末弘 保: RC 梁の曲げひび割れ性状に及ぼすひび割れ発生材令の影響, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1309-1318, 1991.
- 76) 石橋忠良, 津吉毅: コンクリート桁の表面の曲げひび割れ幅の算定法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.22, No.484, pp.33-40, 1994.
- 77) 北條泰秀, 佐藤良一, 氏家 勲: RC 部材の長期変形・ひび割れ幅に及ぼす環境条件の影響の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.359-364, 1993.
- 78) 阿部 司, 佐藤良一, 氏家勲, 鳥取誠一: 乾湿繰り返しを受ける RC 部材の長期曲げひび割れ幅について, コンクリート工学論文報告集, Vol.17, No.2, pp.1025-1030, 1995.
- 79) 関 友則, 櫻井哲哉, 下村 匠: 鉄筋コンクリートのひび割れ幅の経時変化における乾燥収縮の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.211-216, 2010.
- 80) 平松洋一, 谷村 充, 正木 聡, 佐藤良一: 自己及び乾燥収縮を考慮した RC 部材の変形・ひび割れ幅の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.745-750, 2002.
- 81) 平松洋一, 谷村 充, 楊 楊, 佐藤良一: 高強度コンクリートの低収縮化による RC 部材の時間依存性曲げ挙動の改善, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.835-840, 2003.
- 82) 谷村 充, 佐藤良一, 平松洋一, 兵頭彦次: 若材齢時長さ変化を考慮した RC はり部材のひび割れ・変形の一般化評価方法, 土木学会論文集, 第 760 号, V-63, pp.181-195, 2004.
- 83) 長谷川俊昭, 関 博: 乾燥収縮ひび割れが鉄筋コンクリート部材に及ぼす影響. 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.617-620, 1984.
- 84) 池田尚治, 小柳 洽, 角田與史雄: 鉄筋コンクリートの力学, 土木学会(編) 新体系土木工学 32, 技報堂出版, 1982.11
- 85) Okamura, H., Higai, T.: Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement, *Proceedings of JSCE*, No.300, pp.131-141, 1980.
- 86) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, V-5, pp.167-176, 1986.
- 87) Taylor, H. P. J.: Shear strength of large beams, *Journal of the structural division, Proceedings of the ASCE*, ST11, pp.2473-2490, 1972.
- 88) Walraven, J. C.: Size effect: their nature and their recognition in building code, *JCI international workshop on size effect in concrete structures*, pp.295-314, 1993.
- 89) Gustafsson, P. J., Hillerborg, A.: Sensitivity shear strength of longitudinally reinforced concrete

- beams to fracture energy of concrete, *Journal of ACI*, pp.286-294. 1988.
- 90) Zink, M.: Diagonal shear cracking in slender concrete beams, *Lacer No.5*, University of Leipzig, pp.305-332, 2000.
 - 91) 田村隆弘, 重松恒美, 原 隆, 丸山 久一: 軸方向引張力を受ける RC 梁のせん断耐力算定式に関する一考察, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.225-234, 1995.8
 - 92) 山谷 敦, 檜貝 勇, 中村 光: 軸方向圧縮力を受ける RC 梁のせん断挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.697/V-54, pp.143-160, 2002.2
 - 93) 平井友紀, 二羽淳一郎: 軸方向引張力を受けるコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.797-802, 1995.7
 - 94) 崔 益暢, 田澤栄一, 林 少容: 鉄筋コンクリートはりにおける自己収縮による自己応力が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響, コンクリート工学論文報告集, Vol.20, No.2, 1998.
 - 95) 早川智浩, 藤田 学, 三瀬あゆこ, 佐藤良一: 高強度コンクリートの収縮がせん断補強筋のひずみ挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.589-594, 2000.
 - 96) 伊藤友司, 藤田 学, 淵脇秀晃, 佐藤良一: 高強度コンクリートを用いた RC はりのせん断挙動に及ぼす収縮の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.763-768, 2001.
 - 97) 牛尾亮太, 河金 甲, 丸山一平, 佐藤良一: 高強度 RC はりのせん断挙動に及ぼす体積変化の影響に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.769-774, 2006.
 - 98) Sato R., Kawakane, H.: A New Concept for the Early Age Shrinkage Effect on Diagonal Cracking Strength of Reinforced HSC Beams, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.6, No.1, pp.45-67, 2008.
 - 99) 河金 甲, 佐藤良一: 高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.2, pp.178-197, 2009.
 - 100) Gustafsson, P.J. and Hillerborg, A.: Sensitivity in shear strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, *ACI Structural Journal*, Vo.85, Issue3, pp.286-294, 1988.
 - 101) 藤田 学, 佐藤良一, 松元香保里, 高木康宏: 高強度コンクリートを用いた RC はりのせん断強度と寸法効果, 土木学会論文集, No.711, V-56, pp.161-172, 2002.
 - 102) Gebreyouhannes, E., Maekawa, K.: Numerical simulation on shear capacity and post-peak ductility of reinforced high-strength concrete coupled with autogenous shrinkage, *Journal of advanced concrete technology*, Vol.9, No.1, pp.73-88, 2011.2

第3章 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす

使用材料の影響と収縮抑制材料の効果

3.1 はじめに

本章では、コンクリートの乾燥収縮の抑制材料として認知されている石灰石骨材^{1),2)}、膨張材^{3),4)}、収縮低減剤⁵⁾の効果が、組み合わせる骨材やセメントの種類によってどのように変化するか、標準的な試験(JIS A 1129 および JIS A 6202 試験)によって系統的な検討を行い、広範なデータの蓄積を図った。

3.2 実験概要

3.2.1 使用材料

(1)コンクリートの使用材料

表-3.1 に、本研究で使用した材料をまとめて示す。セメントには普通、中庸熟、早強、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の5種類を使用した。収縮抑制を目的とした混和材(剤)として、石灰系の低添加型膨張材と低級アルコール系の収縮低減剤を用いた。その他、化学混和剤として高性能 AE 減水剤、AE 剤、消泡剤を用いた。

表-3.1 コンクリートの使用材料

材料	種類	備考	
練混ぜ水(W)	上水道水	千葉県佐倉市	
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(N)	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3310cm ² /g	
	中庸熟ポルトランドセメント(M)	密度：3.21g/cm ³ ，比表面積：3160cm ² /g	
	早強ポルトランドセメント(H)	密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：4460cm ² /g	
	低熱ポルトランドセメント(L)	密度：3.22g/cm ³ ，比表面積：3380cm ² /g	
	高炉セメントB種(BB)	密度：3.04g/cm ³ ，比表面積：3880cm ² /g	
細骨材(S)	硬質砂岩砕砂(SS1)	表-3.2 参照	
	硬質砂岩砕砂(SS2)		
	山砂(MS)		
	石灰石砕砂(LS)		
粗骨材(G)	石灰石・碎石 2005(GL)		
	硬質砂岩・碎石 2005(GS1-GS5)		
混和材	膨張材 (EX)		低添加型石灰系，密度 3.16g/cm ³
混和剤	収縮低減剤 (SRA)		低級アルコールアルキレンオキシド 付加物
	高性能 AE 減水剤 (SP)		ポリカルボン酸系
	空気量調整剤		AE 助剤 (AE)
		消泡剤 (AF)	ポリアルキレングリコール誘導体

(2)骨材物性

表-3.2 に、コンクリートに使用した細骨材および粗骨材の物理的性質を一覧して示す。細骨材には、3種類の砕砂と2種類の山砂を用意した。砕砂の岩種は、産地の異なる2種類の硬質砂岩と石灰

石である。粗骨材には、6種類の砕石 2005 を用意した。岩種は、石灰石と産地の異なる5種類の硬質砂岩である。なお、骨材の種類とは、一般に天然骨材、砕石・砕砂、人工軽量骨材などを分類するものであるが、本研究では、産地が異なる同一種類の骨材を複数使用しているため、便宜的に産地の異なることを指す用語として用いることとする。

表-3.2(a) 細骨材の物理的性質

記号	岩種等	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (F.M.)	実積率 (%)
SS1	硬質砂岩	2.62	2.59	1.34	2.99	65.5
SS2	硬質砂岩	2.64	2.59	2.26	2.89	64.5
MS1	山砂	2.58	2.50	3.17	2.15	68.2
MS2	山砂	2.56	2.50	2.56	2.67	66.6
LS	石灰石	2.67	2.63	1.55	3.06	69.0

表-3.2(b) 粗骨材の物理的性質

記号	岩種	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)	安定性 (%)
GL	石灰石	2.70	2.69	0.44	6.70	64.1	1.7
GS1	硬質砂岩	2.66	2.64	0.74	6.26	60.8	2.5
GS2	硬質砂岩	2.61	2.56	1.77	6.56	61.1	18.7
GS3	硬質砂岩	2.67	2.64	0.95	6.71	63.1	12.5
GS4	硬質砂岩	2.73	2.72	0.55	6.58	60.1	1.0
GS5	硬質砂岩	2.72	2.69	0.94	6.67	58.7	11.5

3.2.2 実験水準

表-3.3 に、使用材料の組合せおよび実験水準を示す。実験は、骨材種類を変化させた上で、①セメント種類、②石灰石骨材、③膨張材、④収縮低減剤の影響・効果を確認した。なお、石灰石細・粗骨材の置換率は容積によるものとし、膨張材はセメントの一部、収縮低減剤は単位水量の一部として内割で使用した。

表-3.3(a) 使用材料の組合せと実験水準(セメント種類・石灰石骨材の影響)

粗骨材の種類	細骨材の種類	W/C (%)	セメント種類	石灰石骨材置換率(%)**	
				細骨材	粗骨材
GL	SS1+MS1*	50	N, M, H, L, BB	0	100
			N	25	
			N	50	
GS1			N	0	0
			M, H, L, BB	0	
			N	25	
			N	50	
			N	0	33
			N	25	
			N	50	
			N	0	
GS2			N	25	67
			N	50	
			N	0	
GS3			N	0	0
	N, M, BB	0	0		
GS4	N	0	0		
	N, M, BB	0	0		
GS5	MS2	N	0	0	
		N, M, BB	0	0	
	SS2	N	0	0	
		N, M, H, L, BB	0	0	

* SS1 と MS1 を容積比 6 : 4 で混合した細骨材

**容積置換率

表-3.3(b) 使用材料の組合せと実験水準(膨張材・収縮低減剤の影響)

粗骨材の種類	細骨材の種類	W/C (%)	セメント種類	使用量* (kg/m ³)									
				SRA	EX								
GL	SS1+MS1	50	N	3, 6, 9	0								
			N	0	20								
			N	6	20								
			M, H, L, BB	6	0								
			M, H, L, BB	0	20								
GS1			SS1+MS1	50	N	3, 6, 9	0						
					N	0	20						
					N	6	20						
					M, H, L, BB	6	0						
					M, H, L, BB	0	20						
GS2					SS1+MS1	50	N	3, 6, 9	0				
							N	0	20				
							N	6	20				
GS3							SS1+MS1	50	N	6	0		
									N	0	20		
									N	6	20		
GS4									SS1+MS1	50	N	6	0
											N	0	20
											N	6	20
GS5											SS1+MS1	50	N
	N	0											20
	N	6											20
	N, M, H, L, BB	6											0
	N, M, H, L, BB	0											20
	SS2												N, M, H, L, BB
			N, M, H, L, BB	0									20

* 収縮低減剤は水の一部として添加、膨張材はセメントの内割で混和

3.2.3 コンクリートの配合

(1) コンクリートの配合条件

表-3.4 に、コンクリートの配合条件を示す。使用材料によらず、単位水量は 170kg/m^3 、単位粗骨材かさ容積は $0.57\text{m}^3/\text{m}^3$ で一定とした。目標スランプは $18\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5\pm 1.5\%$ として、それぞれ高性能 AE 減水剤および AE 助剤、消泡剤の添加量を増減することによって目標値を満足するようにした。

表-3.4 コンクリートの配合条件

単位水量 (kg/m^3)	単位粗骨材かさ容積 (m^3/m^3)	スランプ (cm)	空気量 (%)
170	0.57	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5

(2) コンクリートの配合

コンクリートの配合を、表-3.5～表-3.9 に示す。なお、それぞれの表は、検討内容別(セメント種類、骨材、石灰石骨材、膨張材、収縮低減剤の影響)に示しているのので、基準となる配合は、各表に繰り返し掲載されている場合がある。

(3) コンクリートの練混ぜ方法

図-3.1 に、コンクリートの練混ぜ方法を示す。なお、練混ぜに用いたミキサは公称容量 55L の強制パン形である。

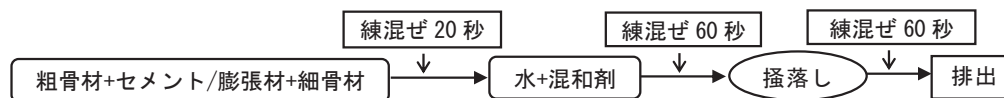


図-3.1 コンクリートの練混ぜ方法

表-3.5(a) コンクリートの配合およびフレッシュシユ性・強度特性 (セメント種類の影響)

粗骨材 種類	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				SP* (%)	AE** (A)	AF*** (T)	フレッシュコンクリートの性状			強度特性			
				W	C	S					空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)		
						SS1+MS1	SS2						7d	28d	7d	28d	
GL	N	50	46.1	170	340	813	—	0.80	—	—	20.0	4.9	21.5	37.3	46.6	31.8	33.5
	M	50	46.2	170	340	817	—	0.75	—	—	19.5	4.8	21.5	27.1	45.8	27.6	34.0
	H	50	46.1	170	340	812	—	0.80	—	—	20.5	4.5	21.4	49.1	55.0	33.4	35.6
	L	50	46.2	170	340	818	—	0.80	—	—	19.0	3.5	21.1	11.9	41.0	23.6	34.9
	BB	50	45.8	170	340	802	—	0.75	—	—	20.5	3.2	21.7	30.6	50.1	28.8	35.0
GS1	N	50	48.8	170	340	861	—	0.80	—	—	17.0	5.2	21.8	38.1	49.6	27.3	30.1
	M	50	49.0	170	340	866	—	0.80	—	1.0	17.0	5.1	21.6	24.6	49.4	24.2	30.1
	H	50	48.8	170	340	860	—	0.80	—	—	19.5	5.3	21.6	46.8	52.9	28.8	30.4
	L	50	49.0	170	340	866	—	0.80	1.0	—	19.0	5.0	21.1	8.1	35.9	17.3	27.8
	BB	50	48.5	170	340	850	—	0.80	—	—	18.5	4.3	21.3	23.7	42.2	22.1	28.5
GS2	N	50	48.6	170	340	857	—	0.90	—	2.0	18.5	5.5	21.6	33.9	45.9	20.4	24.4
	M	50	48.7	170	340	861	—	0.75	—	—	19.5	4.0	20.3	22.1	49.0	20.0	25.8
	BB	50	48.3	170	340	846	—	0.75	—	—	20.0	3.8	21.0	24.2	42.5	17.5	24.3
GS3	N	50	46.9	170	340	827	—	0.80	—	1.0	19.5	3.7	21.7	35.4	47.8	28.1	30.8
	M	50	47.0	170	340	832	—	0.60	—	0.5	19.5	3.4	22.0	23.2	47.1	24.8	31.1
	BB	50	46.6	170	340	816	—	0.70	—	—	20.0	4.0	22.1	24.1	41.4	22.1	29.8
GS4	N	50	49.4	170	340	872	—	0.90	—	0.5	18.5	5.0	22.0	33.7	45.6	28.4	31.9
	M	50	49.6	170	340	876	—	0.70	—	0.5	18.0	4.1	21.7	22.6	47.5	27.5	33.4
	BB	50	49.1	170	340	861	—	0.80	—	0.5	20.5	3.5	22.1	24.9	44.1	24.4	32.0
GS5	N	50	48.6	170	340	—	872	1.15	2.0	—	16.0	5.4	22.0	34.8	45.9	21.6	25.6
	M	50	48.7	170	340	—	876	1.10	2.0	—	16.0	5.5	21.7	26.0	46.0	20.5	24.4
	H	50	48.6	170	340	—	871	1.15	2.0	—	15.5	5.1	22.1	43.7	50.4	23.0	25.8
	L	50	48.7	170	340	—	877	1.10	2.0	—	18.0	5.5	21.4	12.2	40.2	17.6	24.6
	BB	50	48.3	170	340	—	860	1.10	2.0	—	16.0	5.1	21.7	26.5	43.5	18.8	24.3

SP*: C(セメント質量)×%, AE**: IA=C(セメント質量)×0.001%, AF***: IT=C(セメント質量)×0.002%

表-3.5(b) 乾燥収縮ひずみ（セメント種類の影響）

粗骨材 種類	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				収縮特性											
				W	C	S		乾燥収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)						質量減少率 (%)					
						SS1+MS1	SS2	G	7d	28d	56d	91d	182d	7d	28d	56d	91d	182d	
GL	N	50	46.1	170	340	813	—	986	-159	-339	-418	-464	-517	-1.32	-1.81	-2.03	-2.16	-2.34	
	M	50	46.2	170	340	817	—	986	-163	-349	-433	-482	-538	-1.76	-2.24	-2.45	-2.57	-2.74	
	H	50	46.1	170	340	812	—	986	-193	-351	-415	-455	-507	-0.87	-1.24	-1.45	-1.59	-1.80	
	L	50	46.2	170	340	818	—	986	-128	-315	-413	-461	-530	-3.03	-3.37	-3.42	-3.42	-3.38	
	BB	50	45.8	170	340	802	—	986	-191	-324	-393	-432	-493	-1.21	-1.56	-1.71	-1.79	-1.92	
GS1	N	50	48.8	170	340	861	—	922	-269	-519	-651	-722	-804	-1.39	-1.95	-2.20	-2.35	-2.58	
	M	50	49.0	170	340	866	—	922	-239	-511	-647	-722	-812	-2.05	-2.64	-2.87	-3.00	-3.18	
	H	50	48.8	170	340	860	—	922	-271	-485	-607	-672	-762	-0.95	-1.41	-1.65	-1.81	-2.05	
	L	50	49.0	170	340	866	—	922	-183	-499	-630	-701	-788	-3.54	-4.02	-4.05	-4.07	-3.99	
	BB	50	48.5	170	340	850	—	922	-265	-519	-637	-709	-813	-1.67	-2.22	-2.43	-2.54	-2.69	
GS2	N	50	48.6	170	340	857	—	909	-363	-703	-867	-955	-1036	-1.68	-2.32	-2.61	-2.81	-3.05	
	M	50	48.7	170	340	861	—	909	-380	-755	-931	-1025	-1022	-2.51	-3.08	-3.35	-3.51	-3.60	
	BB	50	48.3	170	340	846	—	909	-404	-739	-891	-997	-1030	-1.91	-2.54	-2.82	-2.99	-3.08	
GS3	N	50	46.9	170	340	827	—	960	-265	-549	-705	-788	-873	-1.56	-2.13	-2.39	-2.58	-2.81	
	M	50	47.0	170	340	832	—	960	-265	-582	-744	-827	-905	-2.15	-2.70	-2.93	-3.08	-3.26	
	BB	50	46.6	170	340	816	—	960	-273	-521	-651	-731	-827	-1.72	-2.29	-2.51	-2.66	-2.82	
GS4	N	50	49.4	170	340	872	—	935	-202	-413	-519	-573	-623	-1.51	-2.08	-2.33	-2.51	-2.73	
	M	50	49.6	170	340	876	—	935	-210	-450	-561	-614	-664	-2.26	-2.80	-3.01	-3.15	-3.32	
	BB	50	49.1	170	340	861	—	935	-225	-413	-505	-557	-618	-1.72	-2.28	-2.49	-2.63	-2.79	
GS5	N	50	48.6	170	340	—	872	934	-325	-667	-855	-972	-1057	-1.55	-2.15	-2.40	-2.57	-2.76	
	M	50	48.7	170	340	—	876	934	-325	-678	-871	-981	-1059	-1.93	-2.54	-2.76	-2.89	-3.03	
	H	50	48.6	170	340	—	871	934	-349	-637	-813	-920	-1015	-1.05	-1.56	-1.82	-2.01	-2.23	
	L	50	48.7	170	340	—	877	934	-264	-687	-878	-989	-1079	-3.16	-3.68	-3.77	-3.81	-3.78	
	BB	50	48.3	170	340	—	860	934	-349	-671	-824	-937	-1045	-1.48	-2.04	-2.25	-2.39	-2.54	

表-3.6(a) コンクリートの配合およびフレッシユ性・強度特性 (骨材の影響)

セメント種類	粗骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						7レッシュコンクリートの性状				強度特性					
				W	C	S			G	SP* (%)	AE** (A)	AF*** (T)	スラブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)	
						SS1+MS1	SS2	MS2								7d	28d	7d	28d
N	GL		46.1	170	340	813	—	—	986	0.80	—	20.0	4.9	21.5	37.3	46.6	31.8	33.5	
	GS1		48.8	170	340	861	—	—	922	0.80	—	17.0	5.2	21.8	38.1	49.6	27.3	30.1	
	GS2		48.6	170	340	857	—	—	909	0.90	—	18.5	5.5	21.6	33.9	45.9	20.4	24.4	
	GS3		46.9	170	340	827	—	—	960	0.80	—	19.5	3.7	21.7	35.4	47.8	28.1	30.8	
	GS4		49.4	170	340	872	—	—	935	0.90	—	18.5	5.0	22.0	33.7	45.6	28.4	31.9	
M	GS5		50.6	170	340	893	—	—	910	0.95	—	17.5	3.5	21.3	38.0	47.6	25.2	28.5	
	GL	50	48.6	170	340	—	872	—	934	1.15	2.0	16.0	5.4	22.0	34.8	45.9	21.6	25.6	
	GS1		47.8	170	340	—	—	829	958	0.60	1.0	18.5	4.0	21.5	—	48.7	—	29.4	
	GS2		46.2	170	340	493	—	—	986	0.75	—	19.5	4.8	21.5	27.1	45.8	27.6	34.0	
	GS3		49.0	170	340	523	—	—	922	0.80	—	17.0	5.1	21.6	24.6	49.4	24.2	30.1	
H	GS2		48.7	170	340	861	—	—	909	0.75	0.5	19.5	4.0	20.3	22.1	49.0	20.0	25.8	
	GS3		47.0	170	340	832	—	—	960	0.60	—	19.5	3.4	22.0	23.2	47.1	24.8	31.1	
	GS4		49.6	170	340	876	—	—	935	0.70	—	18.0	4.1	21.7	22.6	47.5	27.5	33.4	
	GS5		50.7	170	340	897	—	—	910	0.95	—	20.5	5.0	21.0	25.7	48.2	22.8	27.6	
	GL		46.1	170	340	490	—	—	986	0.80	—	20.5	4.5	21.4	49.1	55.0	33.4	35.6	
L	GS1		48.8	170	340	519	—	—	922	0.80	—	19.5	5.3	21.6	46.8	52.9	28.8	30.4	
	GL		46.2	170	340	494	—	—	986	0.80	—	19.0	3.5	21.1	11.9	41.0	23.6	34.9	
	GS1		49.0	170	340	523	—	—	922	0.80	1.0	19.0	5.0	21.1	8.1	35.9	17.3	27.8	
	GL		45.8	170	340	484	—	—	986	0.75	—	20.5	3.2	21.7	30.6	50.1	28.8	35.0	
	GS1		48.5	170	340	513	—	—	922	0.80	—	18.5	4.3	21.3	23.7	42.2	22.1	28.5	
BB	GS2		48.3	170	340	846	—	—	909	0.75	0.5	20.0	3.8	21.0	24.2	42.5	17.5	24.3	
	GS3		46.6	170	340	816	—	—	960	0.70	—	20.0	4.0	22.1	24.1	41.4	22.1	29.8	
	GS4		49.1	170	340	861	—	—	935	0.80	—	20.5	3.5	22.1	24.9	44.1	24.4	32.0	
	GS5		50.3	170	340	882	—	—	910	0.95	—	20.0	5.1	21.2	24.7	43.7	20.4	26.4	
	GL		46.1	170	340	490	—	—	986	0.80	—	20.5	4.5	21.4	49.1	55.0	33.4	35.6	

SP*: C(セメント質量)×%, AE**: 1A=C(セメント質量)×0.001%, AF***: 1T=C(セメント質量)×0.002%

表-3.6(b) 乾燥収縮ひずみ (骨材の影響)

セメント 種類	粗骨材 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				収縮特性											
				W	C	S			乾燥収縮ひずみ(μ)				質量減少率 (%)						
						SSI+MS1	SS2	MS2	G	7d	28d	56d	91d	182d	7d	28d	56d	91d	182d
N	GL		46.1	170	340	813	—	—	986	-159	-339	-418	-464	-517	-1.32	-1.81	-2.03	-2.16	-2.34
	GS1		48.8	170	340	861	—	—	922	-269	-519	-651	-722	-804	-1.39	-1.95	-2.20	-2.35	-2.58
	GS2		48.6	170	340	857	—	—	909	-363	-703	-867	-955	-1036	-1.68	-2.32	-2.61	-2.81	-3.05
	GS3		46.9	170	340	827	—	—	960	-265	-549	-705	-788	-873	-1.56	-2.13	-2.39	-2.58	-2.81
	GS4		49.4	170	340	872	—	—	935	-202	-413	-519	-573	-623	-1.51	-2.08	-2.33	-2.51	-2.73
M	GS5		50.6	170	340	893	—	—	910	-271	-565	-719	-790	-865	-1.42	-2.06	-2.35	-2.51	-2.71
	GL	50	48.6	170	340	—	872	—	934	-325	-667	-855	-972	-1057	-1.55	-2.15	-2.40	-2.57	-2.76
	GS1		47.8	170	340	—	—	829	958	-256	-548	-714	-790	-854	—	—	—	—	—
	GS2		46.2	170	340	493	—	—	986	-163	-349	-433	-482	-538	-1.76	-2.24	-2.45	-2.57	-2.74
	GS3		49.0	170	340	523	—	—	922	-239	-511	-647	-722	-812	-2.05	-2.64	-2.87	-3.00	-3.18
H	GS4		48.7	170	340	861	—	—	909	-380	-755	-931	-1025	-1022	-2.51	-3.08	-3.35	-3.51	-3.60
	GS5		47.0	170	340	832	—	—	960	-265	-582	-744	-827	-905	-2.15	-2.70	-2.93	-3.08	-3.26
	GL		49.6	170	340	876	—	—	935	-210	-450	-561	-614	-664	-2.26	-2.80	-3.01	-3.15	-3.32
	GS1		50.7	170	340	897	—	—	910	-283	-617	-778	-842	-901	-1.89	-2.54	-2.81	-2.94	-3.08
	GS2		46.1	170	340	490	—	—	986	-193	-351	-415	-455	-507	-0.87	-1.24	-1.45	-1.59	-1.80
L	GS3		48.8	170	340	519	—	—	922	-271	-485	-607	-672	-762	-0.95	-1.41	-1.65	-1.81	-2.05
	GS4		46.2	170	340	494	—	—	986	-128	-315	-413	-461	-530	-3.03	-3.37	-3.42	-3.42	-3.38
	GS5		49.0	170	340	523	—	—	922	-183	-499	-630	-701	-788	-3.54	-4.02	-4.05	-4.07	-3.99
	GL		45.8	170	340	484	—	—	986	-191	-324	-393	-432	-493	-1.21	-1.56	-1.71	-1.79	-1.92
	GS1		48.5	170	340	513	—	—	922	-265	-519	-637	-709	-813	-1.67	-2.22	-2.43	-2.54	-2.69
BB	GS2		48.3	170	340	846	—	—	909	-404	-739	-891	-997	-1030	-1.91	-2.54	-2.82	-2.99	-3.08
	GS3		46.6	170	340	816	—	—	960	-273	-521	-651	-731	-827	-1.72	-2.29	-2.51	-2.66	-2.82
	GS4		49.1	170	340	861	—	—	935	-225	-413	-505	-557	-618	-1.72	-2.28	-2.49	-2.63	-2.79
	GS5		50.3	170	340	882	—	—	910	-300	-575	-712	-778	-859	-1.59	-2.21	-2.47	-2.60	-2.72

表-3.7(a) コンクリートの配合およびフレッシュ性状・強度特性（石灰石骨材の効果）

セメント種類	粗骨材種類	石灰石置換率 (%)		W/C (%)	s/a (%)	W	C	単位量(kg/m ³)				SP* (%)	AE** (A)	フレッシュコンクリートの性状			強度特性			
		S	G					S		スランプ (cm)	空気量 (%)			温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)			
								SSI+MSI	SL						GS1	GS2	GL	7d	28d	7d
N	GS1	0	0	—	48.8	—	—	—	861	—	922	—	—	17.0	5.2	21.8	38.1	49.6	27.3	30.1
		25	0	221	48.8	646	922	—	—	—	—	—	—	20.5	4.9	21.5	39.9	49.4	31.3	30.7
		50	0	431	48.8	442	922	—	—	—	—	—	—	19.5	4.8	21.5	41.0	52.4	28.9	31.3
		0	—	857	48.6	—	621	—	310	—	—	—	—	19.0	4.0	21.0	41.9	51.4	29.2	31.4
	GS1 + GL	25	33	643	48.6	220	621	—	310	—	—	—	—	20.0	5.0	20.5	40.2	49.8	28.4	31.7
		50	—	429	48.6	439	621	—	310	—	—	—	—	20.5	5.1	21.0	39.4	51.2	30.8	33.6
		0	—	833	47.2	—	314	—	647	—	—	—	—	20.0	4.5	21.0	40.2	48.4	29.4	32.4
		25	67	625	47.2	214	314	—	647	—	—	—	—	20.5	5.2	21.0	38.8	48.4	30.1	33.0
	GL	50	—	417	47.2	427	314	—	647	—	—	—	—	20.5	5.0	21.0	38.0	49.8	30.7	33.2
		0	100	813	46.1	—	—	—	986	—	—	—	—	20.0	4.9	21.5	37.3	46.6	31.8	33.5
		25	100	609	46.1	208	—	—	986	—	—	—	—	20.5	5.3	21.0	37.6	47.2	31.4	34.5
		50	100	406	46.1	417	—	—	986	—	—	—	—	20.5	5.2	20.5	36.0	47.2	32.0	34.4
GS2	0	0	857	48.6	—	—	—	909	—	—	—	—	19.5	4.8	21.4	38.1	50.8	20.9	24.9	
	0	33	845	47.9	—	—	—	614	318	—	—	—	19.5	4.5	21.4	38.3	50.8	23.8	27.4	
GS2+GL	0	67	839	47.6	—	—	—	306	642	—	—	—	19.0	5.4	21.5	38.3	48.7	26.3	30.7	

SP*: C(セメント質量)×%, AE**: 1A=C(セメント質量)×0.001%

表-3.7(b) 乾燥収縮ひずみ（石灰石骨材の効果）

セメント種類	粗骨材種類	石灰石置換率 (%)		W/C (%)	s/a (%)	W	C	単位量(kg/m³)				収縮特性											
		S	G					S			乾燥収縮ひずみ (μ)			質量減少率 (%)									
								SSI+MSI	SL	GS1	GS2	GL	7d	28d	56d	91d	182d	7d	28d	56d	91d	182d	
N	GS1	0	0	48.8				861	—	922	—	—	-269	-519	-651	-722	-804	-1.39	-1.95	-2.20	-2.35	-2.58	
		25	0	48.8				646	221	922	—	—	-252	-544	-702	-743	-771	-1.42	-1.99	-2.28	-2.45	-2.64	
		50	0	48.8				431	442	922	—	—	-223	-462	-614	-673	-711	-1.37	-1.84	-2.09	-2.24	-2.43	
	GS1 + GL	0	0	48.6				857	—	621	—	310	-233	-475	-609	-688	-711	-1.34	-1.86	-2.13	-2.30	-2.51	
		25	33	48.6				643	220	621	—	310	-218	-486	-629	-667	-687	-1.42	-2.00	-2.29	-2.48	-2.68	
		50	0	48.6				429	439	621	—	310	-200	-417	-562	-609	-653	-1.41	-1.89	-2.15	-2.29	-2.50	
	GL	0	67	47.2		170	340		833	—	314	—	647	-211	-430	-542	-608	-631	-1.41	-1.92	-2.15	-2.31	-2.51
		25	0	47.2				625	214	314	—	647	-193	-433	-567	-599	-622	-644	-1.44	-2.01	-2.30	-2.49	-2.68
		50	0	47.2				417	427	314	—	647	-174	-367	-495	-547	-575	-611	-1.41	-1.86	-2.11	-2.25	-2.44
	GS2	0	100	46.1				813	—	—	—	986	-159	-339	-418	-464	-517	-612	-1.32	-1.81	-2.03	-2.16	-2.34
		25	100	46.1				609	208	—	—	986	-155	-362	-475	-506	-526	-613	-1.43	-2.00	-2.29	-2.47	-2.66
		50	100	46.1				406	417	—	—	986	-157	-341	-463	-519	-539	-614	-1.45	-1.97	-2.23	-2.41	-2.59
GS2+GL	0	0	48.6				857	—	—	909	—	-417	-791	-959	-1053	-1053	-1.68	-2.30	-2.61	-2.81	-2.87		
	0	33	47.9				845	—	—	614	318	-339	-655	-793	-869	-867	-1.59	-2.16	-2.45	-2.63	-2.77		
		0	67	47.6			839	—	—	306	642	-265	-512	-623	-682	-675	-1.56	-2.07	-2.34	-2.51	-2.54		

表-3.8(a) コンクリートの配合およびフレッシュ性・強度特性・強度特性 (膨張材の効果)

粗骨材 種類	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						フレッシュコンクリートの性状			強度特性						
				W	C	EX	S		G	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)				
							SS1+MS1	SS2					7d	28d	7d	28d			
GL	N	50	46.1	170	320	20	813	-	986	0.75	-	20.0	5.3	21.7	33.0	42.7	29.7	33.8	
	M		46.2	170	320	20	817	-	986	0.70	-	20.5	4.7	22.3	26.8	44.9	29.1	33.4	
	H		46.1	170	320	20	812	-	986	0.75	-	20.5	4.1	22.2	45.3	51.2	31.7	33.2	
	L		46.2	170	320	20	818	-	986	0.75	-	20.5	4.4	22.5	16.3	39.9	25.6	33.2	
	BB		45.8	170	320	20	802	-	986	0.70	1.0	20.5	4.0	21.9	27.8	45.9	28.1	34.4	
GS1	N	50	48.8	170	320	20	861	-	922	0.80	-	19.0	5.5	22.0	33.7	44.3	25.9	29.1	
	M		49.0	170	320	20	866	-	922	0.80	-	19.5	4.0	22.4	26.5	47.0	25.5	31.6	
	H		48.8	170	320	20	860	-	922	0.80	6.0	20.0	5.0	22.1	45.0	50.6	27.8	29.6	
	L		49.0	170	320	20	866	-	922	0.80	9.0	19.5	4.5	22.1	12.7	32.7	19.7	28.8	
	BB		48.5	170	320	20	850	-	922	0.80	-	20.5	5.0	21.9	23.9	41.7	22.8	30.0	
GS2	N	50	48.6	170	320	20	857	-	909	0.90	-	19.0	4.5	21.7	32.8	44.7	20.2	23.7	
GS3	N		46.9	170	320	20	827	-	960	0.80	-	20.5	5.2	22.6	31.3	40.8	25.8	29.9	
GS4	N		49.4	170	320	20	872	-	935	0.90	-	18.5	5.6	22.0	31.7	41.9	29.4	31.3	
GS5	N		48.6	170	320	20	-	872	-	934	1.15	1.0	18.0	5.2	22.7	30.9	40.8	21.5	25.3
	M		48.7	170	320	20	-	876	-	934	1.10	1.0	16.5	5.5	22.3	24.9	42.0	20.1	24.7
	H	48.6	170	320	20	-	871	-	934	1.15	1.0	16.0	5.4	22.3	38.7	45.8	22.2	24.9	
GS5	L	48.7	170	320	20	-	877	-	934	1.10	2.0	18.0	5.8	22.4	14.8	31.6	18.5	24.4	
	BB	48.3	170	320	20	-	861	-	934	1.10	2.0	19.0	6.0	21.8	23.8	41.7	18.8	23.8	

SP*: C(セメント質量)×%, AE**: 1A=C(セメント質量)×0.001%, AF***: 1T=C(セメント質量)×0.002%

表-3.8(b) 乾燥収縮ひずみ (膨張材の効果)

粗骨材 種類	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				収縮特性											
				W	C	EX	G	乾燥収縮ひずみ(μ)			質量減少率 (%)								
								SS1+MS1	SS2	SS	7d	28d	56d	91d	182d	7d	28d	56d	91d
GL	N		46.1	170	320	20	986	-147	-296	-365	-401	-455	-1.39	-1.87	-2.09	-2.22	-2.40		
	M		46.2	170	320	20	986	-139	-289	-367	-414	-472	-1.80	-2.28	-2.49	-2.62	-2.78		
	H		46.1	170	320	20	986	-181	-315	-371	-403	-454	-0.94	-1.32	-1.54	-1.67	-1.88		
	L		46.2	170	320	20	986	-105	-243	-337	-393	-468	-2.33	-2.80	-2.96	-3.02	-3.09		
	BB		45.8	170	320	20	986	-183	-309	-370	-403	-463	-1.21	-1.57	-1.72	-1.80	-1.95		
GS1	N		48.8	170	320	20	922	-245	-459	-568	-633	-706	-1.42	-1.94	-2.18	-2.33	-2.52		
	M		49.0	170	320	20	922	-222	-438	-556	-626	-721	-1.76	-2.29	-2.51	-2.64	-2.83		
	H		48.8	170	320	20	922	-264	-453	-549	-608	-691	-1.00	-1.44	-1.67	-1.84	-2.07		
	L	50	49.0	170	320	20	922	-123	-381	-531	-625	-733	-2.31	-3.01	-3.20	-3.29	-3.36		
	BB		48.5	170	320	20	922	-269	-472	-569	-636	-727	-1.42	-1.89	-2.07	-2.18	-2.32		
GS2	N		48.6	170	320	20	909	-329	-611	-766	-844	-929	-1.63	-2.21	-2.49	-2.68	-2.91		
	N		46.9	170	320	20	960	-245	-479	-611	-692	-775	-1.46	-1.98	-2.22	-2.40	-2.61		
	N		49.4	170	320	20	935	-201	-383	-479	-532	-581	-1.55	-2.08	-2.33	-2.50	-2.71		
	N		48.6	170	320	20	935	-310	-601	-759	-866	-955	-1.53	-2.08	-2.32	-2.48	-2.65		
GS5	M		48.7	170	320	20	934	-277	-575	-757	-876	-967	-1.97	-2.55	-2.77	-2.91	-3.04		
	H		48.6	170	320	20	934	-343	-593	-737	-825	-910	-1.10	-1.59	-1.85	-2.02	-2.22		
	L		48.7	170	320	20	934	-187	-454	-643	-782	-917	-2.21	-2.85	-3.07	-3.19	-3.27		
	BB		48.3	170	320	20	934	-359	-662	-802	-917	-1033	-1.46	-1.98	-2.20	-2.34	-2.49		

表-3.8(c) 拘束膨張・収縮ひずみ (膨張材の効果)

粗骨材 種類	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						拘束膨張・収縮ひずみ(μ)								
				W	C	EX	S		G	1d	2d	7d	14d	35d	56d	98d	189d	
							SS1+MSI	SS2										
GL	N		46.1	170	340	-	813			9	21	22	-94	-219	-260	-267	-279	
				170	320	20	813			103	151	199	76	-41	-99	-118	-149	
				170	320	20	813			138	186	229	-	-	-	-	-	
	BB	50		45.8	170	340	-	802			17	19	18	-105	-193	-234	-257	-274
					170	320	20	802			101	212	232	77	-27	-80	-115	-157
					170	340	-	817	-	986	15	21	22	-82	-215	-263	-280	-294
	M		46.2	46.2	170	320	20	817			97	164	197	94	-26	-94	-132	-167
					170	340	-	818			0	0	4	-66	-203	-244	-257	-273
					170	320	20	818			0	146	247	174	39	-41	-90	-144
	L		46.1	46.1	170	340	-	812			18	30	28	-111	-219	-256	-265	-280
					170	320	20	812			98	185	232	83	-23	-75	-94	-125
					170	340	-	861			12	14	16	-162	-324	-390	-414	-436
GS1	N		48.8	170	320	20	861			108	155	188	7	-150	-222	-267	-299	
				170	320	20	861			113	166	197	-	-	-	-	-	
				170	340	-	850			14	18	23	-145	-301	-366	-400	-428	
	BB	50		48.5	170	320	20	850			112	216	242	33	-122	-190	-244	-290
					170	340	-	866			16	18	18	-145	-308	-375	-403	-426
					170	320	20	866			104	163	188	26	-124	-217	-266	-304
	M		49.0	49.0	170	340	-	866			0	9	10	-93	-270	-316	-330	-350
					170	320	20	866			0	157	236	131	-63	-172	-230	-282
					170	340	-	860			21	25	10	-163	-301	-368	-409	-438
	L	50		48.8	170	320	20	860			112	197	223	22	-117	-185	-238	-284
					170	340	-	857			94	145	171	-	-	-	-	-
					170	320	20	827			95	144	165	-	-	-	-	-
H		49.4	49.4	170	320	20	872			98	136	179	-	-	-	-	-	
				170	320	20	872			935								
				170	320	20	872			935								
GS2	N	50	48.6	170	320	20	857			909								
GS3	N	50	46.9	170	320	20	827			960								
GS4	N	50	49.4	170	320	20	872			935								

表-3.8(c) 拘束膨張・収縮ひずみ (膨張材の効果)

粗骨材 種類	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						拘束膨張・収縮ひずみ(μ)									
				W	C	EX	S			G	1d	2d	7d	14d	35d	56d	98d	189d	
							SSI+MSI	SS2	SS2										
GS5	N		48.6	170	340	-	-	-	872	934	15	23	8	-209	-416	-497	-531	-556	
				170	320	20	-	-	872		106	168	188	-49	-253	-342	-391	-427	
				170	320	20	893	-	-		910	101	146	176	-	-	-	-	-
	BB		48.3	170	340	-	-	-	860	934	22	37	29	-204	-418	-505	-540	-566	
				170	320	20	-	-	861		100	245	248	-30	-250	-341	-390	-427	
				170	340	-	-	-	876		33	33	18	-192	-401	-479	-508	-524	
	M		48.7	170	320	20	-	-	876	934	98	190	205	-8	-222	-341	-397	-442	
				170	340	-	-	-	877		0	7	20	-147	-360	-419	-428	-431	
				170	320	20	-	-	877		0	128	263	112	-84	-218	-284	-354	
	L		48.7	170	340	-	-	-	871	934	-2	31	5	-229	-414	-507	-550	-580	
				170	340	-	-	-	871		88	203	211	-52	-235	-335	-389	-436	
				170	320	20	-	-	871										
H		48.6	170	340	-	-	-	871	934										
			170	340	-	-	-	871											
			170	320	20	-	-	871											

表-3.9(a) コンクリートの配合およびフレッシュ性状・強度特性 (収縮低減剤の効果)

粗骨材 種類	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						SP* (%)	AE** (A)	AF*** (T)	フレッシュコンクリートの性状			強度特性			
				W	C	SRA	S		G				スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)	
							SS1+MS1	SS2								7d	28d	7d	28d
GL	N	50	46.1	167	340	3	813	—	986	0.70	1.0	—	20.0	5.2	22.5	34.8	44.2	30.5	32.2
				164	340	6	813						20.5	3.9	21.6	36.0	46.7	30.3	35.1
				164	340	6	813						20.0	5.1	23.0	31.9	41.3	30.1	32.0
				161	340	9	813						20.0	4.0	23.2	35.3	45.2	31.3	34.1
				164	340	6	802						20.5	5.2	21.7	28.6	45.8	29.1	34.5
GS1	N	50	48.8	164	340	6	861	—	922	0.80	1.5	—	17.0	5.5	22.1	35.7	46.3	26.0	30.2
				164	340	6	862						19.5	6.0	22.6	34.0	46.0	26.6	30.3
				164	340	6	862						20.5	5.5	21.8	32.8	45.1	28.5	30.5
				161	340	9	862						20.0	4.9	22.1	32.8	45.5	26.6	30.5
				164	340	6	850						20.5	5.4	21.6	22.2	37.9	21.3	27.1
GS2	N	50	49.0	164	340	6	866	—	909	0.80	9.0	—	19.5	5.4	21.7	20.8	39.1	22.8	27.9
				164	340	6	866						19.5	3.4	21.7	8.8	33.8	17.9	27.3
				164	340	6	866						20.5	5.2	21.3	48.2	54.7	29.2	30.8
				167	340	3	857						19.5	5.2	21.9	34.9	47.0	21.4	23.8
				164	340	6	857						18.5	4.0	21.1	33.2	46.8	20.8	24.0
GS3	N	50	48.6	161	340	9	857	—	960	0.90	4.0	—	20.0	3.9	22.3	33.6	45.9	20.1	23.8
				164	340	6	827						20.0	5.5	22.1	32.5	43.8	27.2	30.7
				164	340	6	872						19.5	5.6	22.3	32.5	40.2	29.3	30.3
				164	340	6	893						18.0	3.9	21.8	35.2	45.0	25.6	28.2
				164	340	6	—						17.0	4.0	22.0	33.8	44.4	21.6	25.0
GS4	N	50	50.6	164	340	6	—	872	934	1.15	8.0	—	18.0	5.9	21.4	23.8	42.1	18.5	23.5
				164	340	6	—						18.0	6.0	21.7	24.2	42.1	19.9	24.3
				164	340	6	—						18.5	6.0	21.8	11.6	36.9	17.0	23.9
				164	340	6	—						16.0	3.5	21.8	42.5	48.5	22.8	24.8
				164	340	6	—						19.0	6.0	22.2	—	—	—	—

SP*: C(セメント質量)×%, AE**: 1A=C(セメント質量)×0.001%, AF***: 1T=C(セメント質量)×0.002%

表-3.9(b) 乾燥収縮ひずみ (収縮低減剤の効果)

粗骨材 種類	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						収縮特性											
				W	C	SRA	S		G	乾燥収縮ひずみ(μ)				質量減少率(%)							
							SSI+MSI	SS2		7d	28d	56d	91d	182d	7d	28d	56d	91d	182d		
GL	N	50	46.1	167	340	3	813				-125	-270	-349	-401	-453	-1.40	-1.94	-2.21	-2.38	-2.61	
				164	340	6	813				-117	-226	-303	-352	-419	-1.25	-1.66	-1.87	-2.01	-2.23	
				164	340	6	813				-106	-231	-303	-357	-411	-1.40	-1.92	-2.19	-2.36	-2.60	
				161	340	9	813			986	-93	-193	-257	-311	-369	-1.28	-1.76	-2.02	-2.18	-2.44	
				164	340	6	802				-127	-243	-323	-371	-443	-1.22	-1.58	-1.74	-1.82	-1.96	
GS1	N	50	48.8	164	340	6	817			-105	-241	-321	-378	-443	-1.95	-2.39	-2.59	-2.72	-2.91		
				164	340	6	818				-90	-246	-345	-401	-471	-3.23	-3.63	-3.71	-3.72	-3.71	
				164	340	6	812				-123	-240	-300	-345	-407	-0.85	-1.16	-1.35	-1.50	-1.72	
				167	340	3	862				-184	-377	-491	-573	-651	-1.41	-1.92	-2.18	-2.37	-2.63	
				164	340	6	861				-172	-345	-465	-554	-663	-1.25	-1.79	-2.05	-2.22	-2.46	
GS2	N	50	48.5	164	340	6	862			-159	-311	-418	-497	-573	-1.38	-1.88	-2.14	-2.32	-2.58		
				161	340	9	862			922	-148	-284	-380	-459	-541	-1.38	-1.86	-2.11	-2.29	-2.56	
				164	340	6	850				-179	-369	-485	-557	-657	-1.53	-2.04	-2.23	-2.35	-2.50	
				164	340	6	866				-157	-364	-497	-585	-693	-2.02	-2.62	-2.85	-2.99	-3.19	
				164	340	6	866				-96	-349	-499	-579	-675	-2.99	-3.68	-3.81	-3.85	-3.86	
GS3	N	50	48.8	164	340	6	860			-174	-329	-423	-497	-608	-0.88	-1.28	-1.52	-1.68	-1.96		
				167	340	3	857				-273	-540	-717	-822	-923	-1.55	-2.15	-2.45	-2.66	-2.92	
				164	340	6	857			909	-247	-482	-657	-763	-874	-1.55	-2.15	-2.46	-2.68	-2.95	
				161	340	9	857				-237	-433	-599	-700	-817	-1.51	-2.07	-2.37	-2.59	-2.87	
				164	340	6	827				-179	-361	-506	-605	-714	-1.37	-1.90	-2.18	-2.38	-2.64	
GS4	N	50	49.4	164	340	6	872			-134	-265	-364	-427	-496	-1.33	-1.84	-2.10	-2.29	-2.54		
				164	340	6	893			910	-176	-374	-530	-626	-731	-1.10	-1.74	-2.06	-2.26	-2.51	
				164	340	6	—				-221	-439	-607	-727	-836	-1.39	-1.92	-2.19	-2.35	-2.54	
				164	340	6	—			860	-250	-501	-662	-779	-892	-1.47	-1.98	-2.19	-2.34	-2.50	
				164	340	6	—			876	-219	-462	-652	-781	-885	-2.00	-2.58	-2.84	-2.98	-3.13	
GS5	N	50	48.7	164	340	6	—			-162	-457	-661	-786	-896	-2.89	-3.47	-3.63	-3.71	-3.76		
				164	340	6	—			877	-225	-410	-557	-667	-780	-1.00	-1.46	-1.73	-1.91	-2.13	
				164	340	6	—			871											
				164	340	6	—														
				164	340	6	—														

3.2.4 試験項目および試験方法

表-3.10に、実施した試験項目および試験方法を示す。

表-3.10 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
フレッシュ コンクリート	スランプ	JIS A 1101 ^{:2005} 「コンクリートのスランプ試験方法」
	空気量	JIS A 1128 ^{:2005} 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」
	温度	JIS A 1156 ^{:2006} 「フレッシュコンクリートの温度測定方法」
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108 ^{:2006} 「コンクリートの圧縮強度試験方法」
	ヤング係数	JIS A 1149 ^{:2010} 「コンクリートの静弾性係数試験方法」
	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-2 ^{:2010} 「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法—第2部：コンタクトゲージ方法」および附属書 A(参考)「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」*
	拘束膨張ひずみ	JIS A 6202 ^{:2008} 附属書 2(参考)「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」

*試験条件：①成形/養生条件：温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，成形後 24 時間で脱型，材齢 7 日まで水中養生、②保存条件：温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相対湿度 $60 \pm 5\%$ ，保存期間(以下、乾燥期間と表記)

3.2.5 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状に関する試験結果は、表-3.5～表-3.9に、検討内容毎に示す。

3.2.6 強度特性

コンクリートの強度特性に関する試験結果は、表-3.5～表-3.9に、検討内容毎に示す。

3.3 実験結果

3.3.1 セメント種類の影響

(1) コンクリートの乾燥収縮ひずみ

図-3.2 に、セメント種類別のコンクリートの乾燥収縮ひずみと乾燥期間との関係を、粗骨材種類毎に示す。セメント種類によって、乾燥収縮の進行度がやや異なる傾向を示すものも確認されたが、乾燥収縮の大きさに及ぼす影響は、骨材に比べて相対的に小さいことがわかる。

図-3.3 に、N を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみを基準とした場合の、その他の乾燥収縮ひずみの収縮比を示す。H, BB の収縮比は、骨材の種類によらず乾燥期間初期で大きく、長期的では小さくなる傾向を示した。これは、N と比べて収縮の進行度が初期に相対的に早く長期で遅くなることを示している。一方、M, L の収縮比は逆の傾向を示し、初期の収縮比が長期よりも小さくなり、N と比べて収縮の進行度が緩やかである傾向を示した。これは、強度発現性が緩慢な M, L は、乾燥期間初期においては空隙構造が比較的粗大であるため、水の逸散にともなう収縮駆動力が小さかったためと考えられる。特に強度発現の緩やかな L においてその傾向が顕著であった。一方、BB の初期強度は、通常、N よりも小さいにもかかわらず、GL を用いた場合に初期収縮比が顕著に大きい結果であった。BB は、石灰石微粉末と共存する場合、初期のセメントの水和反応率が促進されることが確認されている⁶⁾。本研究は粗骨材ではあるが、混在する微粒分等の影響により同様の水和促進が生じ、早期に緻密な空隙構造を形成した可能性が考えられる。

図-3.4 は、乾燥期間 6 か月における N の乾燥収縮ひずみとそれ以外の乾燥収縮ひずみを比較したものである。同図より、セメント間の乾燥収縮ひずみの差は小さいことがわかる。N に対するその他のセメントの乾燥収縮ひずみは、-5.3%~6.6%の範囲であった。セメント種類間の大小関係は骨材との組合せによって異なり、必ずしも一定ではなかった。ただし、H の乾燥収縮ひずみが、骨材によらずほかのセメントよりも幾分小さい(全セメントの平均値の-2%~4%)傾向は、近年のセメント協会の報告⁷⁾と同様であった。

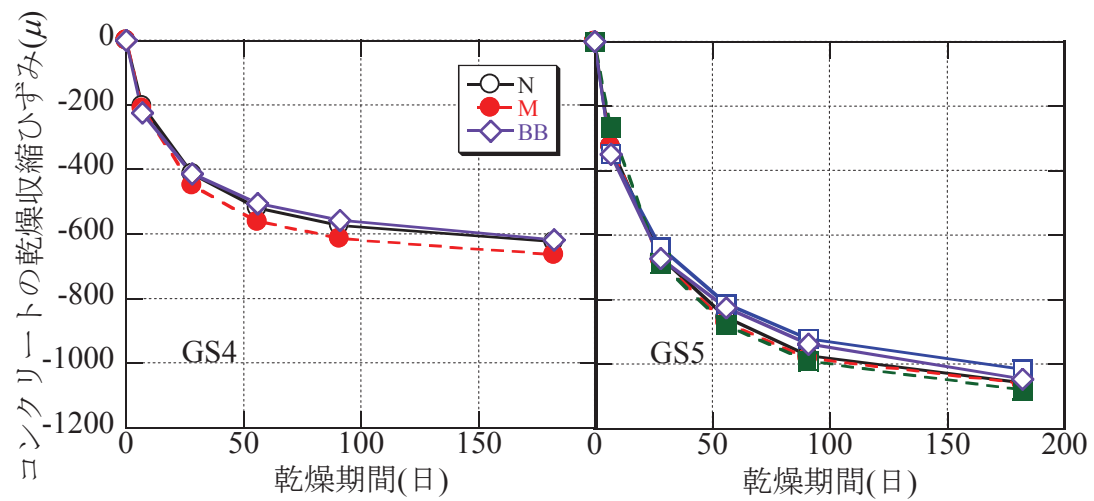
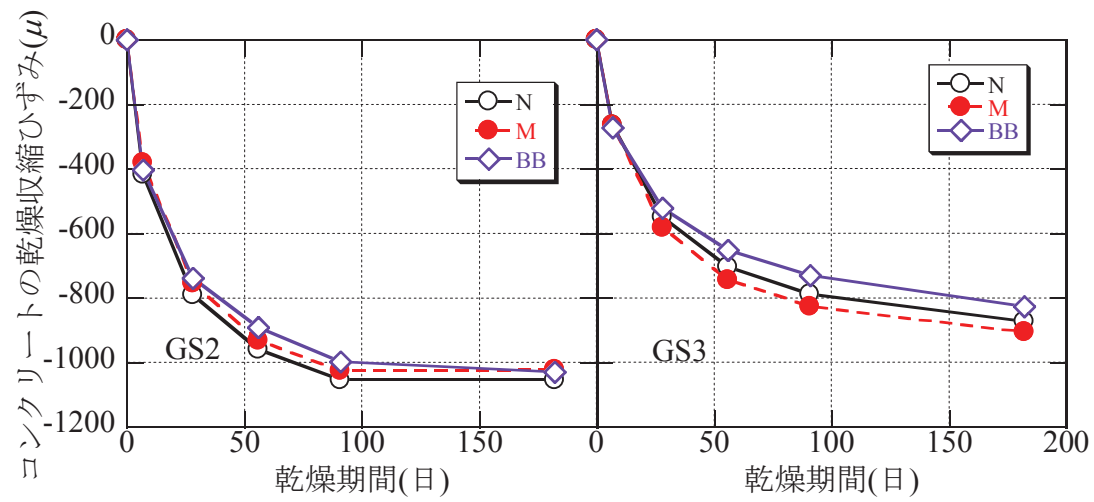
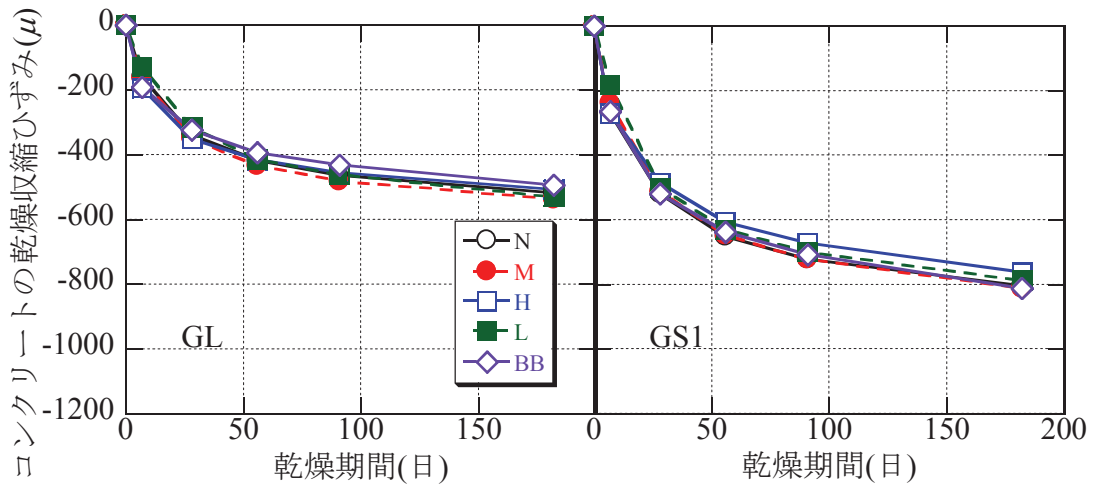


図-3.2 セメントおよび粗骨材の種類とコンクリートの乾燥収縮

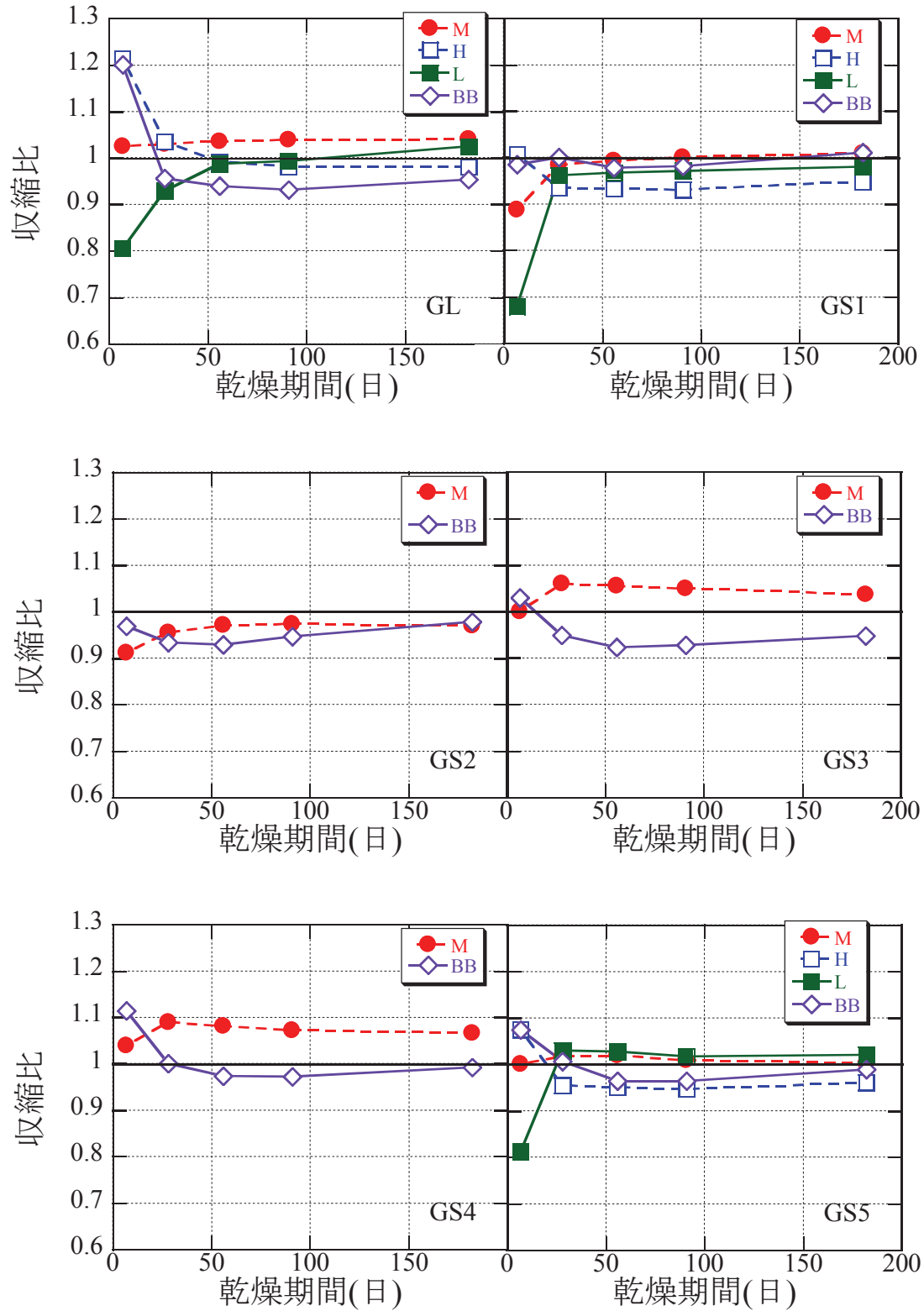


図-3.3 Nに対するコンクリートの乾燥収縮比と乾燥期間との関係

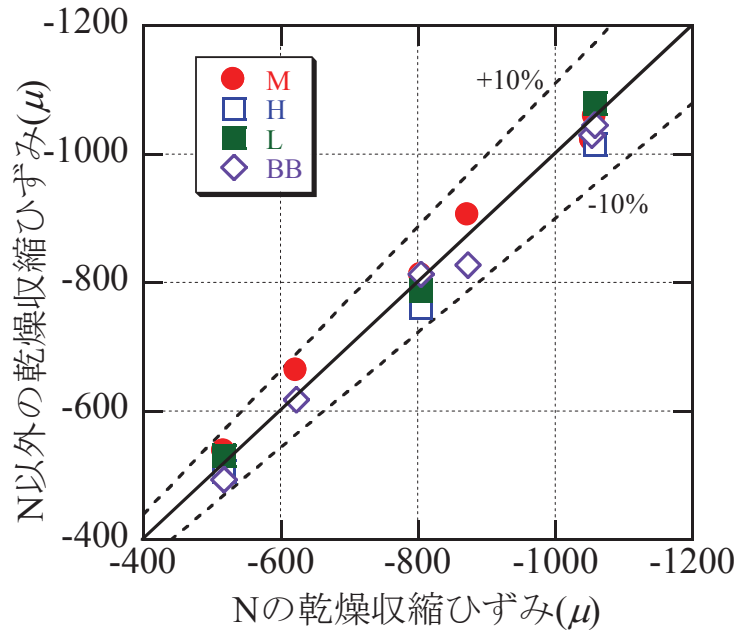


図-3.4 Nに対するその他セメントの乾燥期間6か月における乾燥収縮ひずみ

(2)コンクリートの力学特性

図-3.5に、材齢7日および28日におけるコンクリートの圧縮強度を粗骨材の種類別に示す。なお、図中の補助線は、骨材の種類によらずセメント種類毎に強度を平均したものである。同図より、骨材の違いによるコンクリートの圧縮強度の違いは小さく、セメント種類の影響が支配的であることがわかる。同一セメント間で強度を比較した場合の変動係数は、材齢7日の場合5.1~21.3%、材齢28日の場合3.1~7.2%であった。材齢7日の圧縮強度の変動係数が最も大きかったのは、Lの21.3%であるが、これは、材齢7日強度が10.7N/mm²と小さかったため(その他セメントは24.3~46.5N/mm²)、強度のばらつきの影響が大きく反映されたものである。

図-3.6に、材齢7日および28日におけるコンクリートの静弾性係数を粗骨材の種類別に示す。骨材の種類によらずセメント種類毎に平均した材齢7日の静弾性係数は、19.5~28.4kN/mm²であった。セメント種類別に見ると、Hがその他のセメントよりも静弾性係数が大きく、Lが小さい傾向が確認された。材齢28日における静弾性係数は29.1~30.6kN/mm²でありセメント種類の影響は認められなかった。材齢7日および28日の静弾性係数の変動係数は、それぞれ13.6~18.4%および12.3~18.1%であり、材齢の経過によらずほぼ一定であった。

一方、コンクリートの静弾性係数をセメント種類によらず骨材種類毎に平均した場合の変動係数は、材齢7日では10.6~19.0%、材齢28日では2.4~3.9%となった。材齢28日の変動係数はその他の場合よりも明らかに小さいことから、コンクリートの静弾性係数に及ぼす影響は、セメント種類よりも粗骨材の種類の方が支配的であることを示唆する結果といえる。

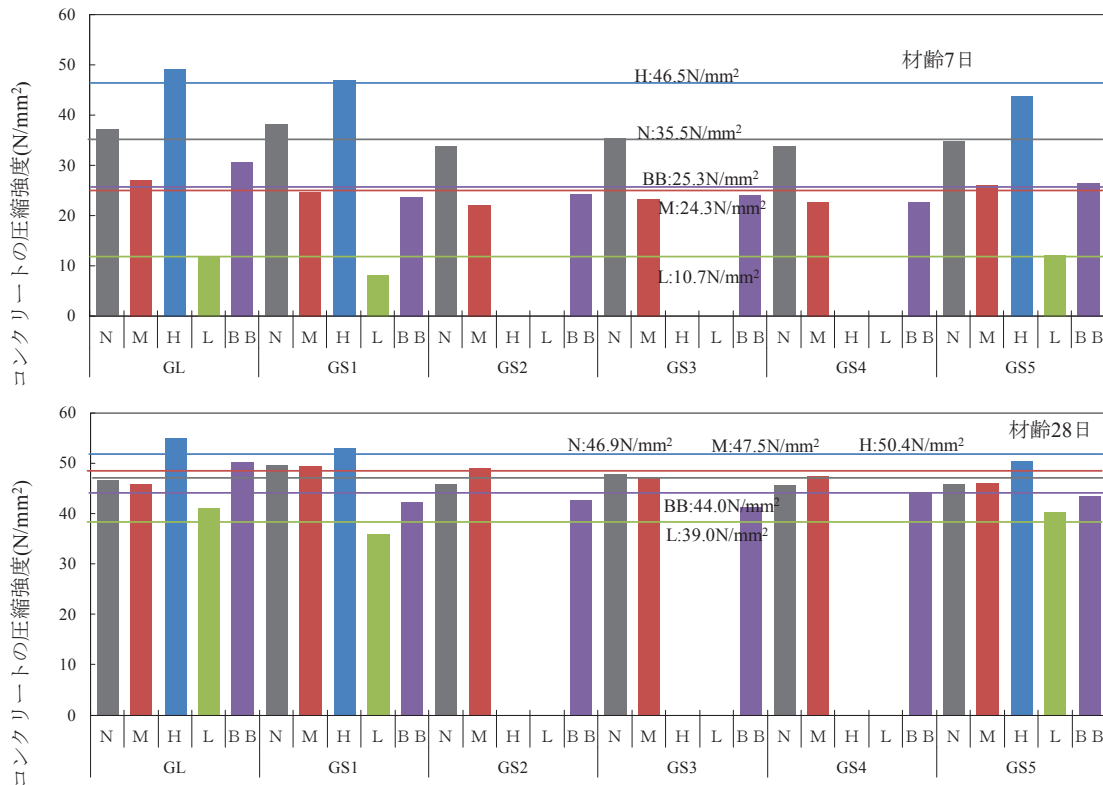


図-3.5 コンクリートの圧縮強度

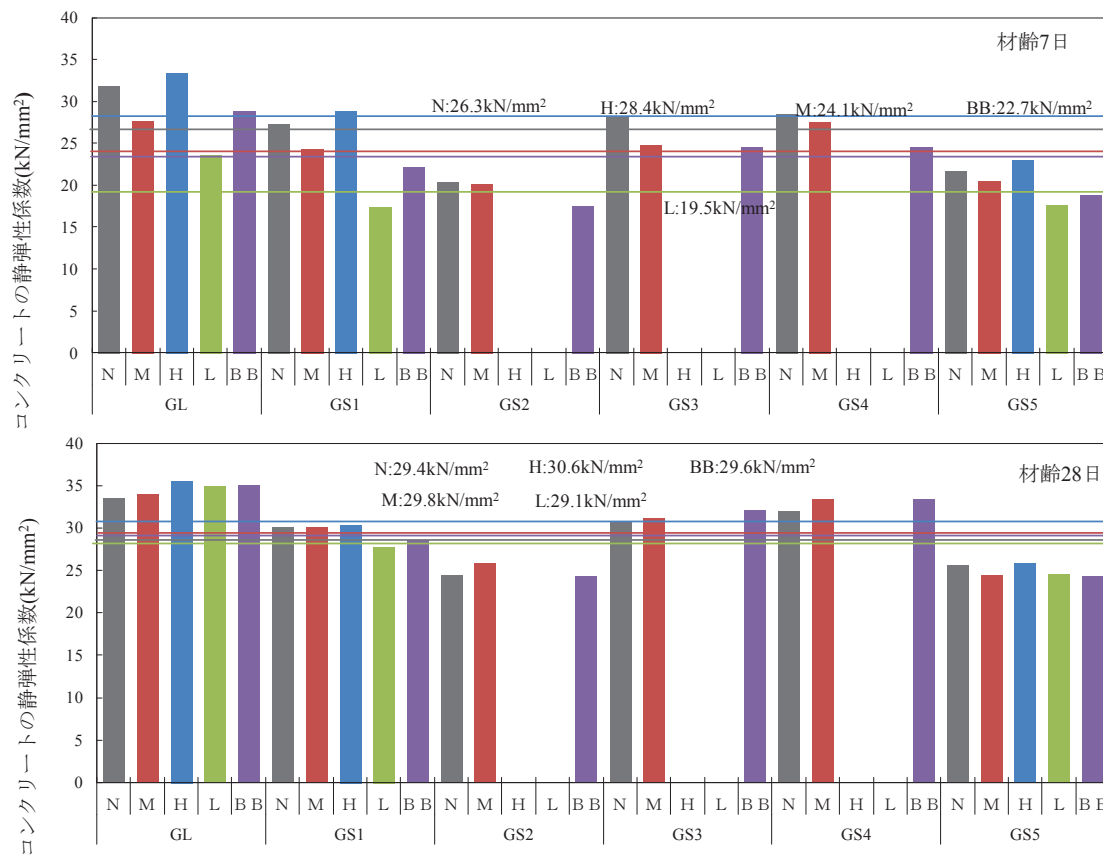


図-3.6 コンクリートの静弾性係数

図-3.7 に、コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係を示す。また、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]における設計値(図中、JSCE)を併記する。コンクリートの圧縮強度の増大にともなって静弾性係数は大きくなる傾向であった。しかしながら、同一セメント種類でほぼ同一圧縮強度であっても、骨材の種類が異なることで静弾性係数は大きなばらつきを示した。一部には、示方書の設計値を30%程度下回るものが確認された。

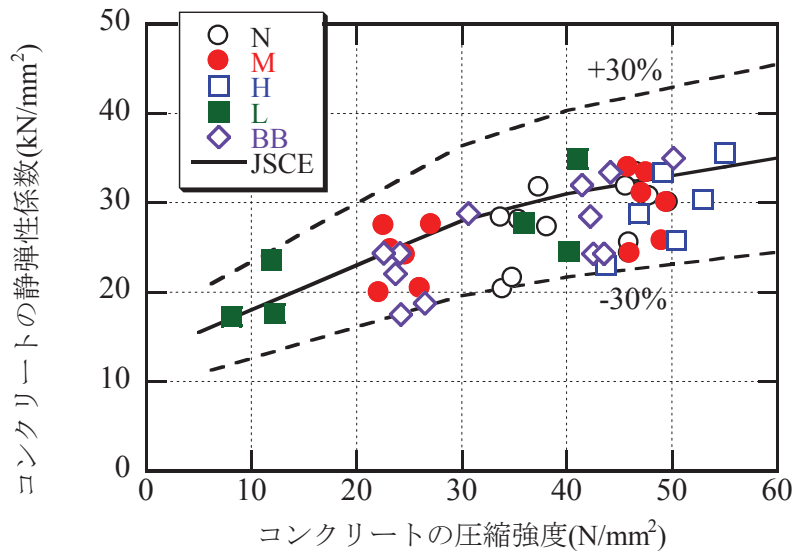


図-3.7 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係

(3)コンクリートの力学特性と乾燥収縮ひずみとの関係

図-3.8 に、コンクリートの圧縮強度と、乾燥期間 6 か月における乾燥収縮ひずみとの関係を示す。コンクリートの圧縮強度が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみがやや小さくなる傾向を示した。ただし決定係数は小さく、相関性は低い結果といえる。

図-3.9 に、コンクリートの静弾性係数と、乾燥期間 6 か月における乾燥収縮ひずみとの関係を示す。コンクリートの静弾性係数が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなる明確な傾向が認められた。材齢 7 日より材齢 28 日の静弾性係数との相関性が高く、決定係数は 0.891 であった。

前述したように、コンクリートの圧縮強度にはセメント種類の及ぼす影響が大きい。逆に、静弾性係数は、骨材の種類が支配因子となる。コンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性が、圧縮強度よりも明らかに静弾性係数のほうが高いことから、コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は、セメントよりも骨材のほうが相対的に大きいことを裏付ける結果といえる。

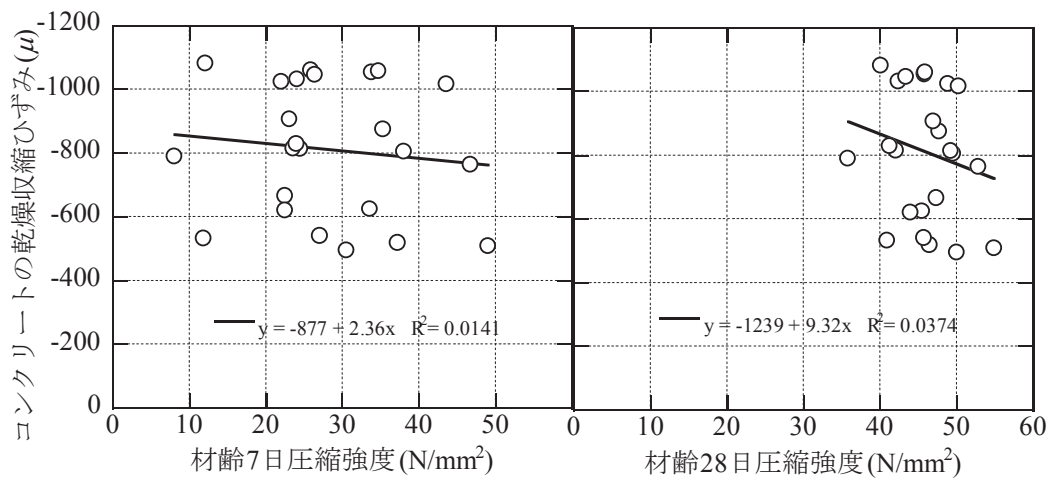


図-3.8 コンクリートの圧縮強度と乾燥収縮ひずみとの関係

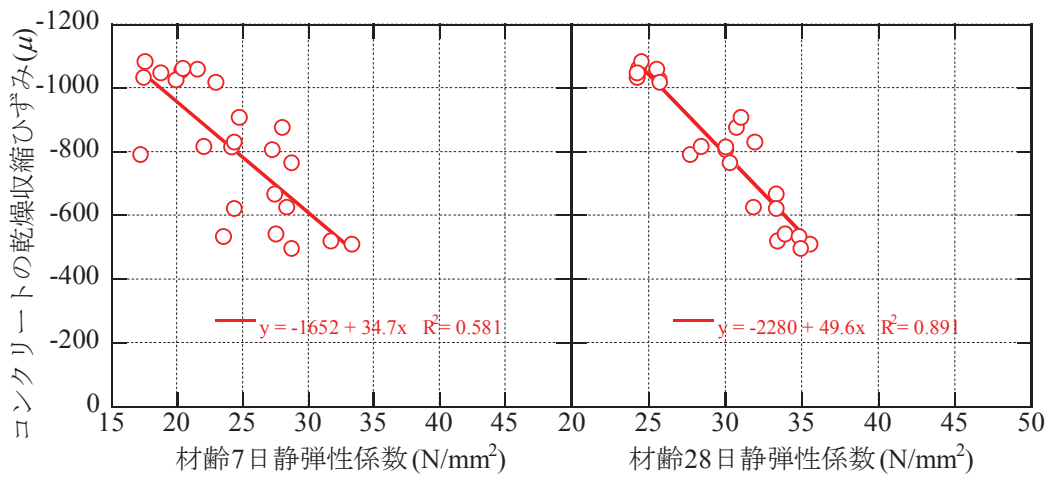


図-3.9 コンクリートの静弾性係数と乾燥収縮ひずみとの関係

3.3.2 骨材の影響

(1) 粗骨材の影響

図-3.10 に、粗骨材に GL, GS1, GS2, GS3, GS4, GS5 を用いた場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみをセメント種類別に示す。なお、細骨材はいずれも SS1+MS1(混合砂)を用いたものである。同図より、粗骨材が異なることによってコンクリートの乾燥収縮ひずみは大幅に変化していることがわかる。セメント種類によらず、乾燥収縮ひずみは GL を用いた場合が最も小さく、GS2 を用いた場合が最も大きくなった。硬質砂岩(GS1, GS2, GS3, GS4)であっても乾燥収縮ひずみが大きく異なることは、既往の報告⁸⁾示されるとおりであり、粗骨材の岩種のみで乾燥収縮の大小を判断することは難しいと考えられる。

乾燥収縮の発現速度に及ぼす粗骨材の影響を確認するため、乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみ ϵ_{182} に対する各乾燥期間のひずみ ϵ_t の比を図-3.11 に示す。同図より、粗骨材と収縮比の大小には一定の関係は認められないことがわかる。乾燥期間が短いと収縮比の差が大きくなる傾向であったが、乾燥期間が長くなるとともにその差が収束した。ただし、M, BB と GL, GS2 の組合せは、比較的長期までその他の粗骨材と比べ相対的に収縮比が大きい傾向が認められた。これは、試験実施時期が大きく異なってしまったため、湿度等の環境条件がその他の供試体とやや異なった可能性が考えられる。

図-3.12 に、粗骨材の物理的性質と乾燥期間 182 日におけるコンクリートの乾燥収縮との関係を示す。なお、セメント種類は N を用いた結果である。絶乾・表乾密度が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向であった。絶乾・表乾密度は、粗骨材の密実性や空隙量に関連する物性と考えられ、それらが大きくなるほど収縮を拘束する効果が大きくなったことが考えられる。一方、吸水率、安定性試験による損失質量分率が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなった。一般的に、吸水率は密度と反比例する関係にある。また、安定性試験は、硫酸ナトリウムによる骨材内部からの膨張圧による抵抗性を測定するものであり、空隙構造と強度に関連する物性と考えられる。したがって、これらの物性が大きくなることは収縮に対する抵抗性が低下することを反映した結果と考えられる。最小二乗回帰した直線によれば、コンクリートの乾燥収縮ひずみとは安定性試験、吸水率が高い相関性を示した。一方、粗粒率や実積率といった骨材の形状に関連する物性は、コンクリートの乾燥収縮ひずみとほとんど相関が認められなかった。

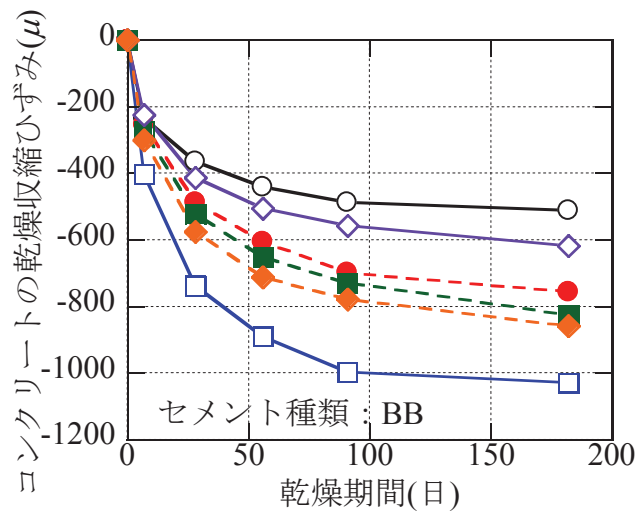
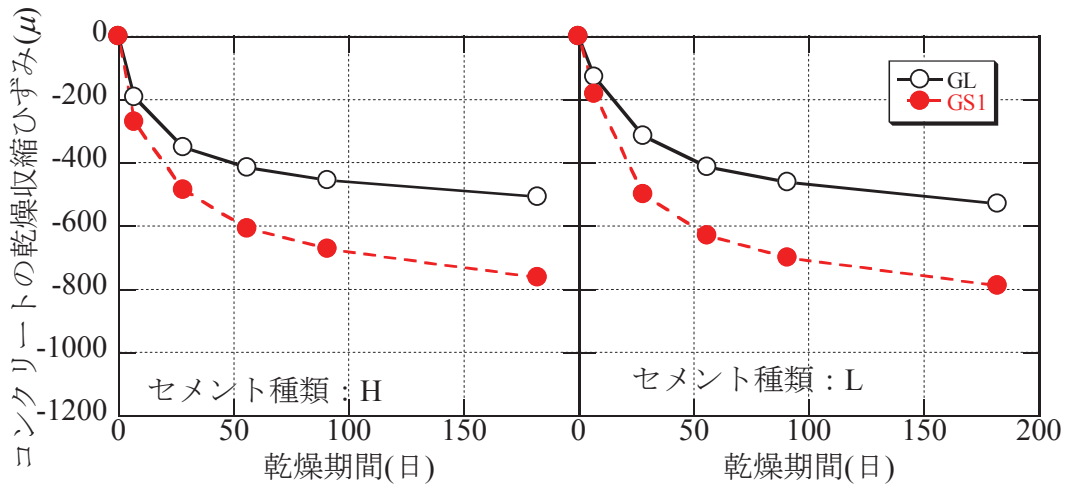
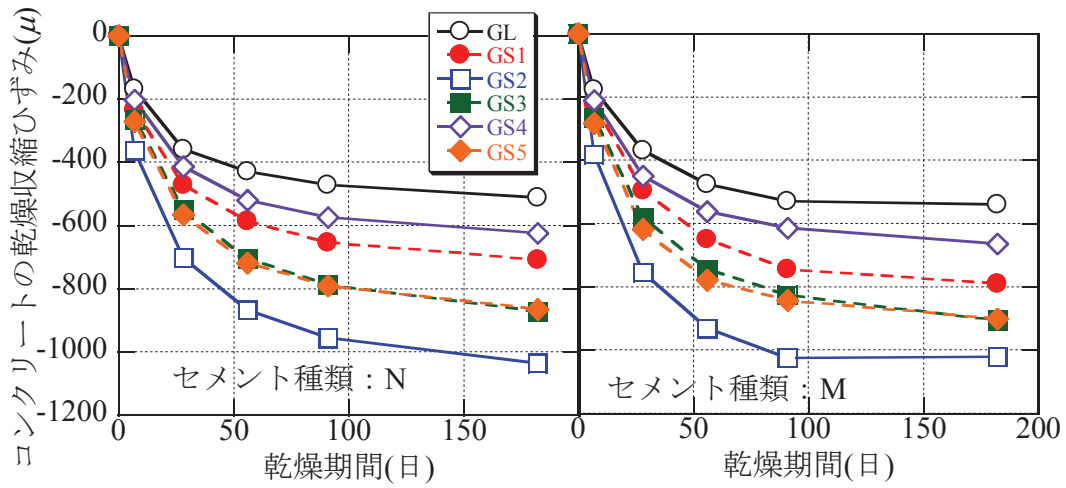


図-3.10 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす粗骨材の影響

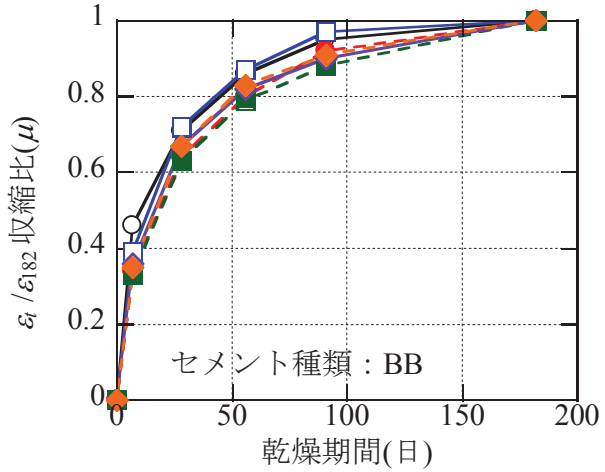
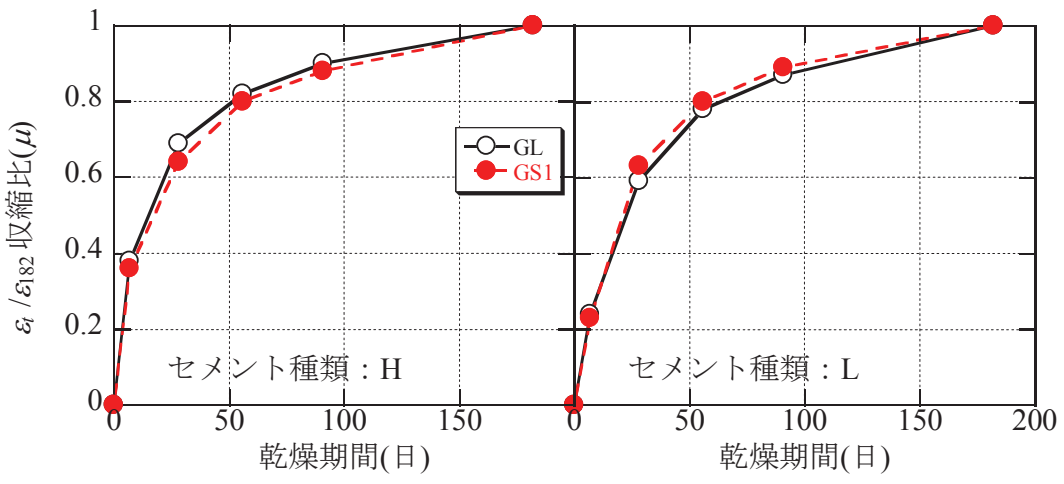
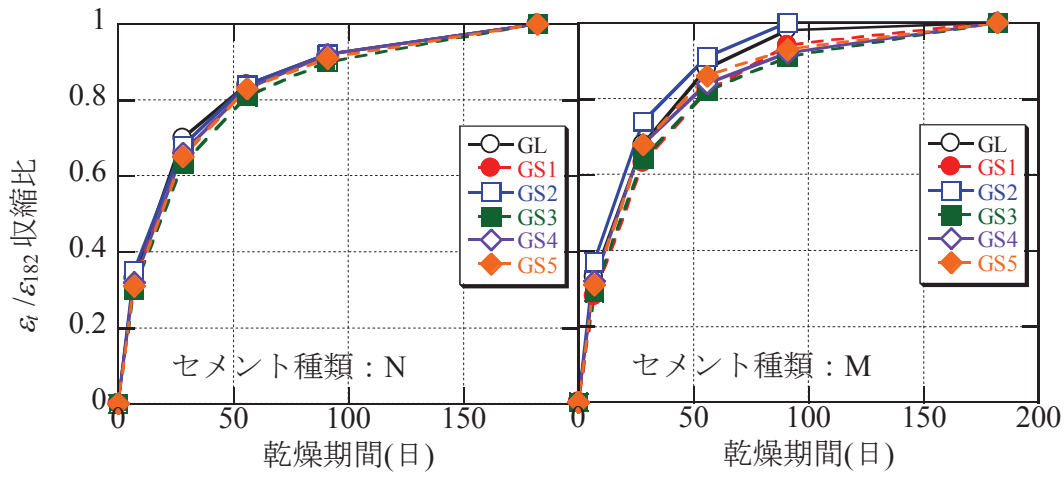


図-3.11 コンクリートの乾燥収縮発現に及ぼす粗骨材の影響

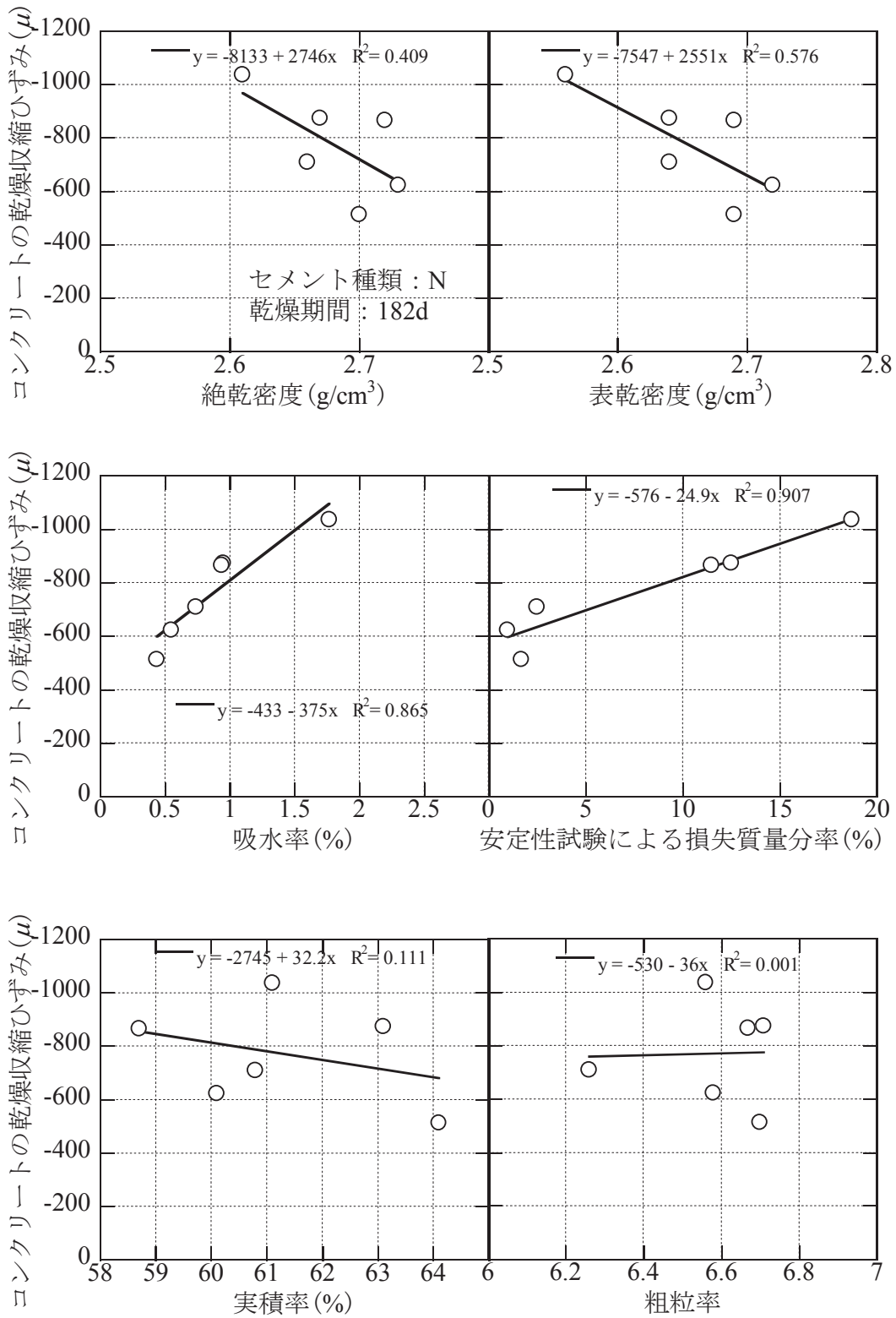


図-3.12 粗骨材の物理的性質とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係

(2) 細骨材の影響

図-3.13 に、粗骨材に GS5 を使用し、細骨材に混合砂 SS1+MS1、硬質砂岩砕砂 SS2、山砂 MS2 を用いた場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみを示す。同図より、細骨材の種類が異なることによっても乾燥収縮ひずみの大きさは異なってくる事わかる。硬質砂岩砕砂 SS2 を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみが最も大きく、乾燥期間 182 日において -1000μ 以上発現した。一方、最も乾燥収縮ひずみが小さかったのは混合砂 SS1+MS1 を使用したコンクリートであり、硬質砂岩砕砂 SS2 を使用した場合よりも、乾燥期間 182 日で 200μ 程度小さくなった。

図-3.14 に、乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみ ϵ_{182} に対する各乾燥期間のひずみ ϵ_i の比を示す。同図より、細骨材が異なることによる収縮発現性の違いはほとんどないことがわかる。

図-3.15 に、細骨材の物理的性質と乾燥期間 182 日におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す。なお、混合砂については混合前の細骨材の物理的性質を混合割合に応じて按分した。細骨材の密度とコンクリートの乾燥収縮の間に明確な関係は認められなかった。吸水率および実積率の増大とともにコンクリートの乾燥収縮ひずみがやや小さくなる傾向であった。粗粒率の増大とともに、コンクリートの乾燥収縮が大きくなる傾向であった。これらの傾向は、吸水率を除けば粗骨材の場合と異なった。これは、細骨材の種類が 3 種類と少なかったこと、コンクリートの乾燥収縮ひずみの最大最小差がそれほど大きくなかったことなどによって、明確な傾向が判断できなかった可能性があるため、今後、データを蓄積する必要がある。

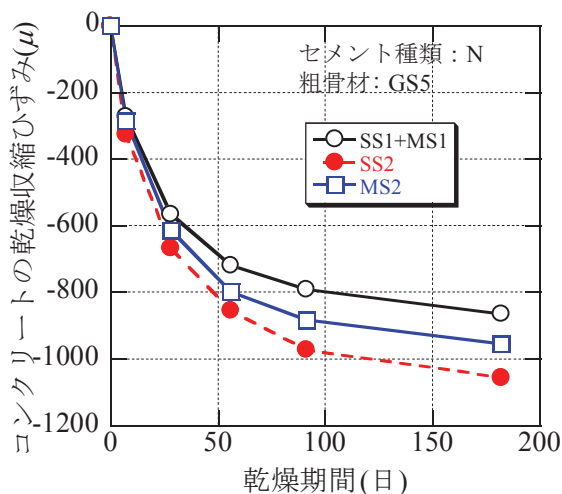


図-3.13 コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす細骨材の影響(粗骨材 GS5)

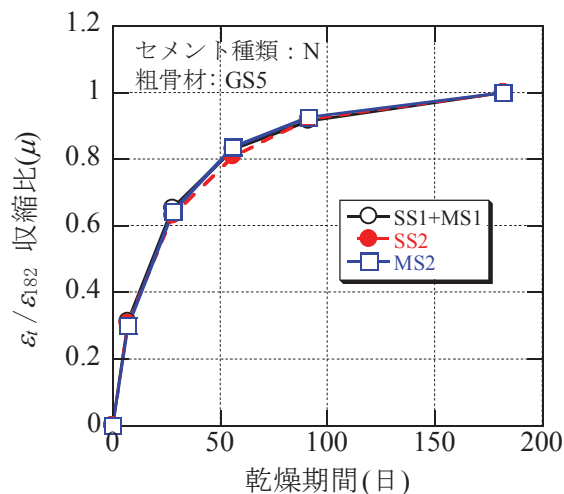


図-3.14 コンクリートの乾燥収縮発現に及ぼす細骨材の影響(粗骨材 GS5)

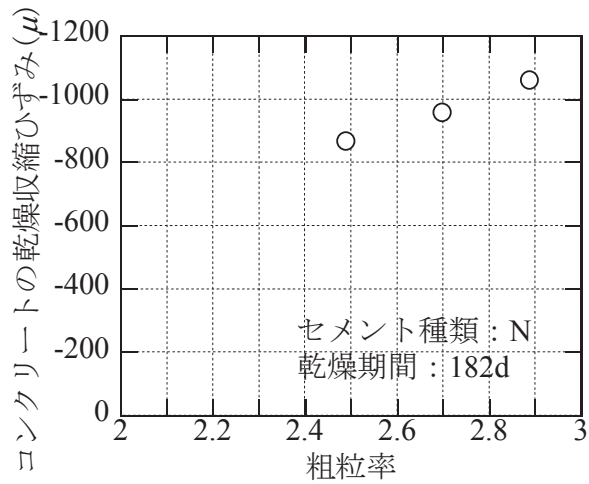
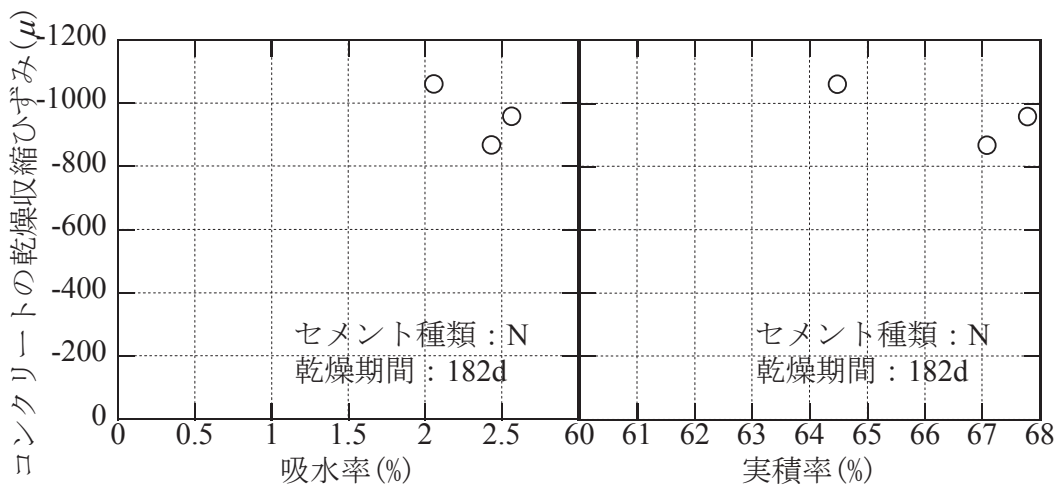
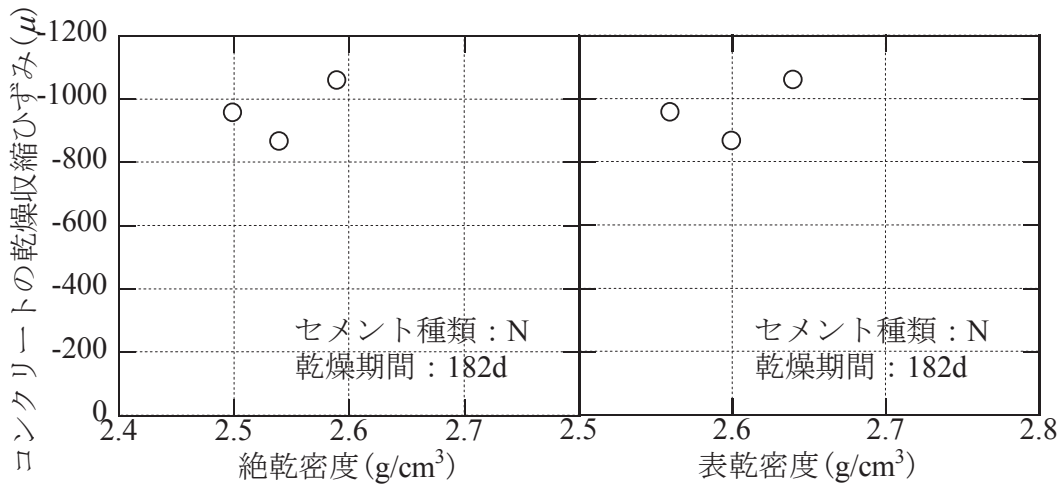


図-3.15 細骨材の物理的性質とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係

3.3.3 石灰石骨材の効果

(1) 石灰石碎石の影響

図-3.16 に、石灰石碎石 GL を硬質砂岩碎石 GS1 および GS2 に 0%, 33%, 67%, 100%置換した場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみを示す。いずれの硬質砂岩を用いた場合も、GL の置換率が大きくなるほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向であった。

図-3.17 は、石灰石碎石の置換率と乾燥期間 182 日におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示したものである。同図より、石灰石碎石の置換率にほぼ比例して乾燥収縮ひずみは小さくなっていることがわかる。これは、必ずしも石灰石碎石に限定されるものではなく、乾燥収縮が異なる粗骨材を組み合わせた場合においても同様の挙動を示すと考えられ、コンクリートの乾燥収縮をコントロールする上で、粗骨材の置換は単純かつ効果的な手段といえる。

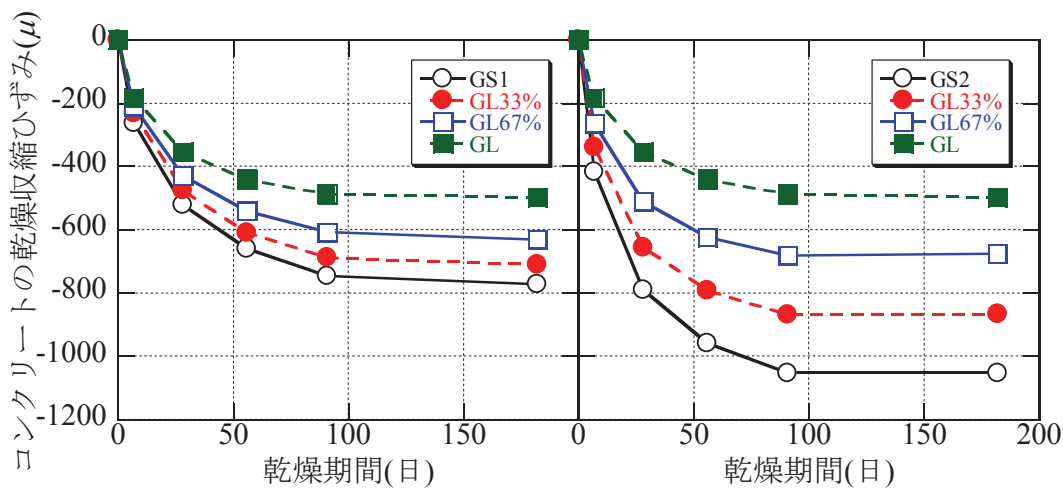


図-3.16 硬質砂岩碎石(GS1, GS2)に石灰石碎石を置換したときの乾燥収縮ひずみ

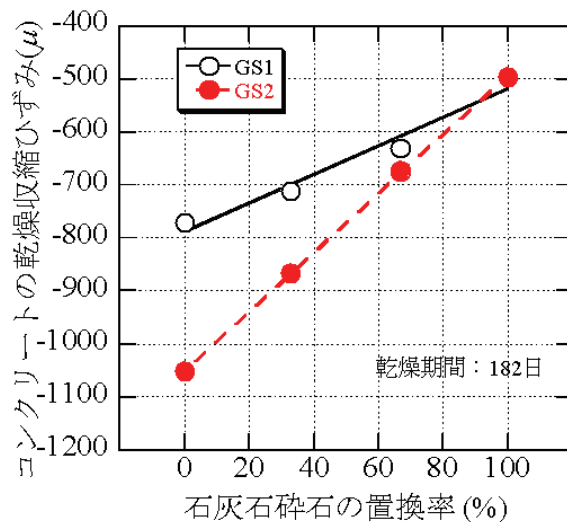


図-3.17 石灰石碎石の置換率と乾燥収縮ひずみとの関係

(2) 石灰石碎砂の影響

図-3.18 に、石灰石碎砂 SL を混合砂 SS1+MS1 に 0, 25, 50%置換していったときのコンクリートの乾燥収縮ひずみを示す。また、その際の粗骨材には、GS1 に GL を 0, 33, 67, 100%置換したものをを用いている。粗骨材の組合せによらず、おおむね SL 置換率に応じてコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向であった。粗骨材 GL 単独使用との組合せでは、SL 置換率が大きくなるとわずかではあるが乾燥収縮ひずみが大きくなるケースもあった。

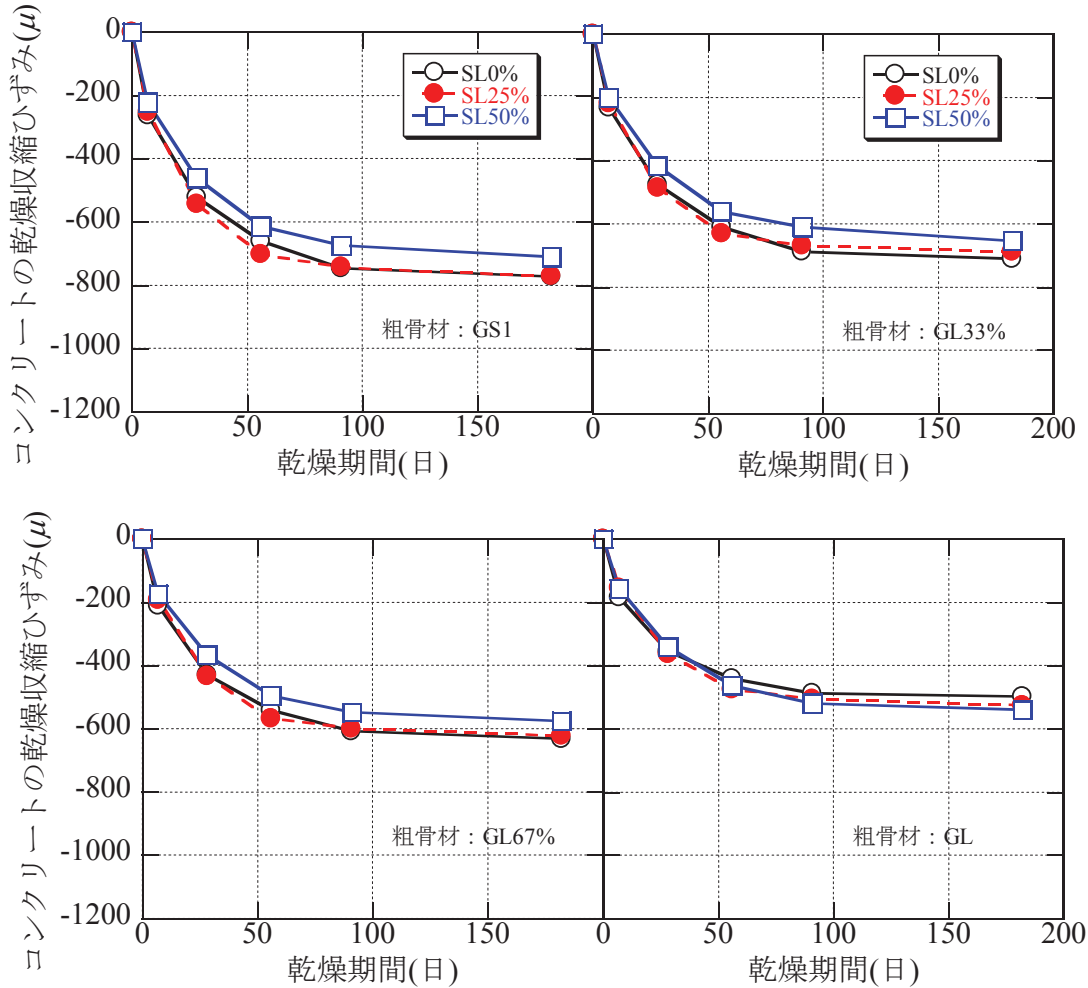


図-3.18 混合砂 SS1+MS1 に石灰石碎砂 SL を置換した場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみ

(3) 石灰石碎石・碎砂の収縮抑制効果

図-3.19 に、コンクリート中の石灰石細・粗骨材の絶対容積と乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみとの関係を示す。図中に併記した補助線は、粗骨材のみ GL で置換した場合について最小二乗回帰した直線である。石灰石骨材を同一量使用しても、乾燥収縮ひずみを低減する効果は、粗骨材のほうが細骨材よりも大きくなった。また、粗骨材 GL 置換率が高いものほど細骨材 SL を置換することによる乾燥収縮抑制効果が小さくなる傾向が認められた。

図-3.20 は、石灰石骨材の絶対容積とコンクリートの静弾性係数とを比較したものである。石灰石骨材の絶対容積が大きくなるほどコンクリートの静弾性係数が大きくなる傾向が認められた。ただし、

コンクリートの静弾性係数が大きくなると、SL 置換にともなう静弾性係数の増加割合が小さくなっていることがわかる。これは、定性的には乾燥収縮ひずみの場合と同様の傾向であった。

図-3.21 は、コンクリートの静弾性係数と乾燥収縮ひずみとの関係を示したものである。同図より、乾燥収縮と静弾性係数との関係は、細・粗骨材の区別なくおおむね良い線形関係が認められる。このことは、石灰石骨材の乾燥収縮低減効果はその量に依存するのではなく、どの程度静弾性係数の増減へ寄与したかが重要な因子であることを示していると考えられる。すなわち、石灰石粗骨材 GL 置換率が大きくなると石灰石細骨材 SL を増加しても収縮低減効果が小さいのは、細骨材 SL 置換による静弾性係数の増大効果が小さくなったためであると推察される。

石灰石粗骨材 GL 置換率が大きく静弾性係数が大きい範囲において、石灰石細骨材 SL の効果が小さい理由は、粗骨材のほうが細骨材よりも力の負担割合が大きい可能性が考えられる。したがって、細骨材の拘束効果は粗骨材の物性に従属している可能性を示唆する結果と考えられる。

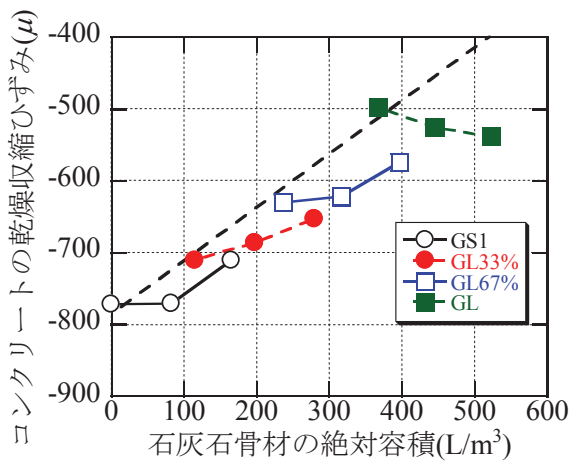


図-3.19 石灰石骨材の絶対容積と
コンクリートの乾燥収縮ひずみ

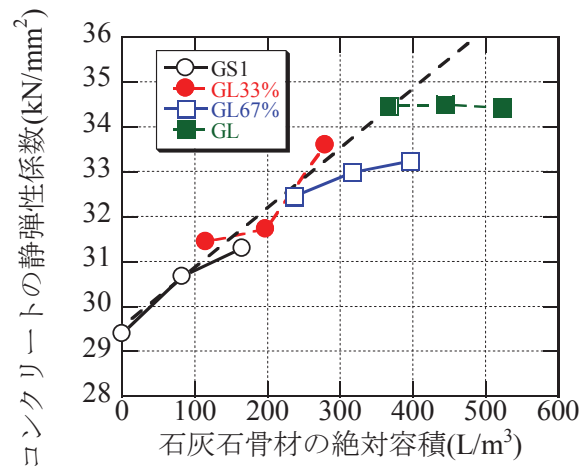


図-3.20 石灰石骨材の絶対容積と
コンクリートの静弾性係数

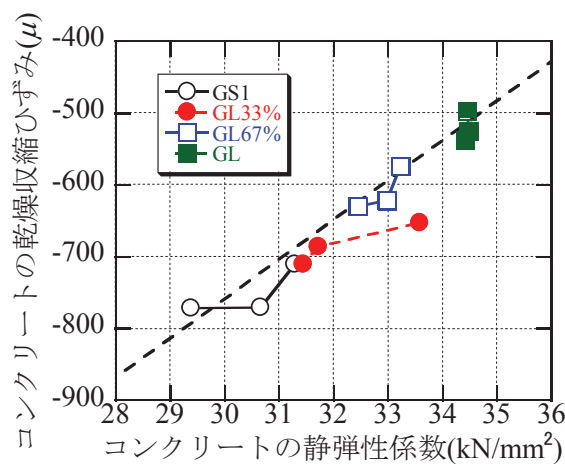


図-3.21 コンクリートの静弾性係数と乾燥収縮ひずみとの関係

3.3.4 膨張材の効果

(1) 拘束膨張ひずみに及ぼす骨材・セメント種類の影響

図-3.22 は、セメントに N を使用した場合の膨張コンクリートの拘束膨張ひずみ(JIS A 6202 附属書 2(参考))を粗骨材別に示したものである。材齢 7 日の拘束膨張ひずみは、粗骨材の種類が異なっても土木学会で示される収縮補償用コンクリートの範囲の標準である $150\sim 250\mu$ を満足する結果であった。

図-3.23 は、セメントの種類が N, M, H, L, BB, 細・粗骨材が混合砂 SS1+MS1 と GL, GS1 および硬質砂岩砕砂 SS2 と GS5 を組み合わせたコンクリートの拘束膨張ひずみを示したものである。なお、強度発現性の関係から、L は材齢 2 日で脱型した(その他はいずれも材齢 1 日で脱型)。材齢 7 日における拘束膨張ひずみはいずれも $200\sim 250\mu$ 程度の範囲であり、骨材が異なることによる明確な影響は認められなかった。膨張ひずみの発現性は、L がその他のセメントと比べ緩やかであった。この傾向は、SS2 と GS2 の骨材の組合せにおいて顕著であった。

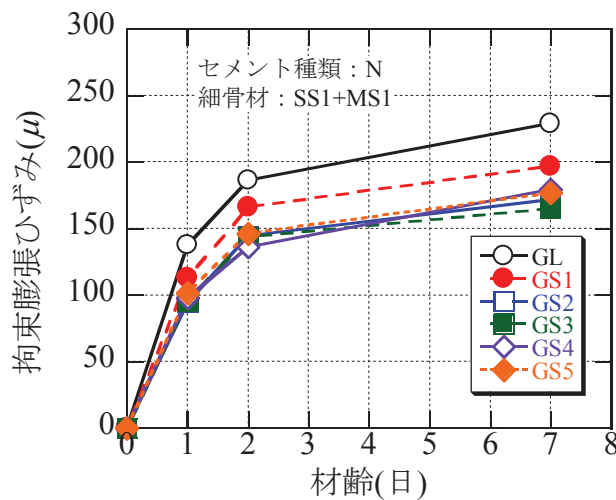


図-3.22 粗骨材が異なる膨張コンクリートの拘束膨張ひずみ

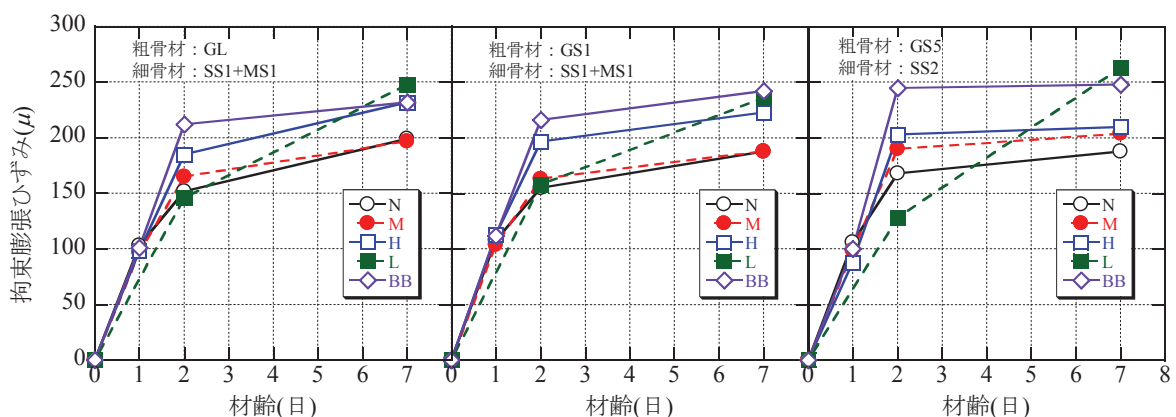


図-3.23 セメント・骨材種類が異なる膨張コンクリートの拘束膨張ひずみ

(2) 拘束膨張ひずみと力学物性との関係

図-3.21, 図-3.22 における材齢 7 日の拘束膨張ひずみと, コンクリートの圧縮強度との関係を図-3.23 に示す. コンクリートの圧縮強度が大きいほど拘束膨張ひずみが小さくなる傾向であり, 両者の相関性は, 材齢 28 日より材齢 7 日の圧縮強度のほうが高かった. 材齢 7 日の拘束膨張ひずみと材齢 7 日, 28 日のコンクリートの静弾性係数とを比較したのが, 図-3.24 である. 同図より, 材齢によらず両者の相関性が低いことがわかる. 前掲の図-3.5, 図-3.6 で示したように, コンクリートの圧縮強度にはセメント種類が, 静弾性係数には骨材が支配因子となっていることから推察すれば, 拘束膨張ひずみへの影響は骨材よりもセメント種類のほうが大きいと推察される. 骨材の種類によって膨張量が変わることが, 人工軽量骨材や砕石を対象とした検討によって報告されており, その影響因子として骨材自身の拘束力の違いが指摘¹⁰⁾されているが, 本検討で用いた骨材物性の範囲では, その影響は限定的であったと考えられる.

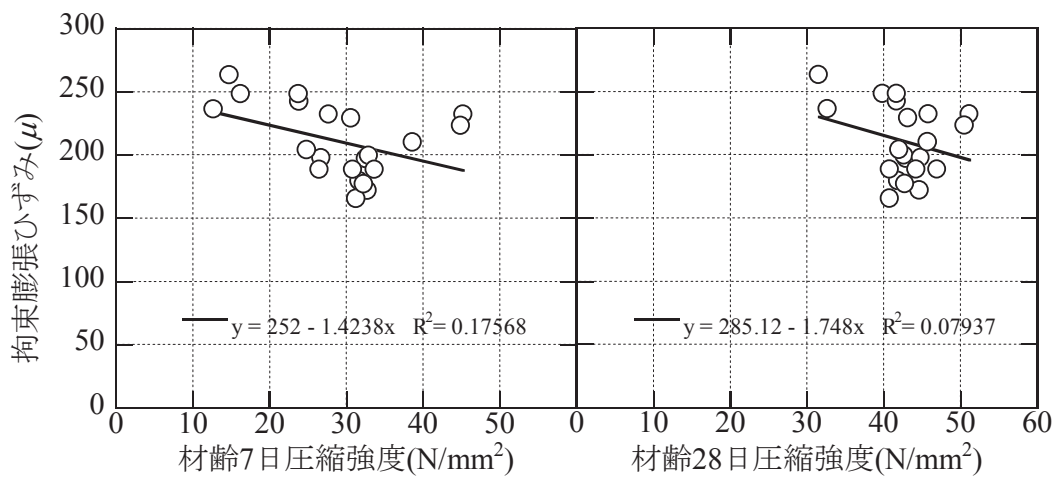


図-3.24 コンクリートの圧縮強度と拘束膨張ひずみとの関係

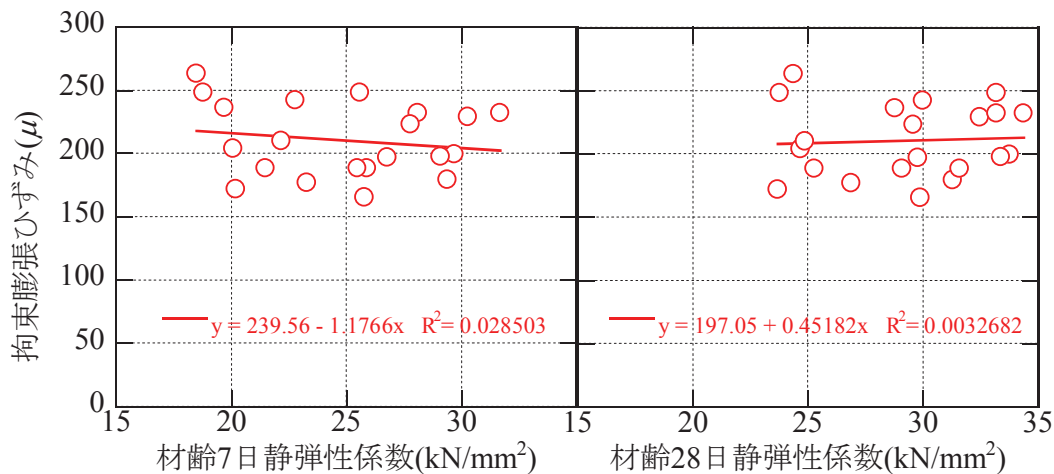


図-3.25 コンクリートの圧縮強度と拘束膨張ひずみとの関係

(3) 拘束膨張・収縮ひずみに及ぼすセメント種類・骨材の影響

図-3.26 に、膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみ(JIS A 1129 試験)を示す。セメント種類は N を、粗骨材種類として GL, GS1, GS5 を組み合わせた配合(GL-EX, GS1-EX, GS5-EX)の結果である。また、膨張材を使用していない配合(GL, GS1, GS5)についても併記する。骨材の組合せによらず、膨張材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、使用していないコンクリートよりも小さくなる傾向であった。

図-3.27 は、乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみを、普通コンクリート(N, M, H, L, BB)と膨張コンクリート(N-EX, M-EX, H-EX, L-EX, BB-EX)で比較した結果である。同図より、セメント種類が異なる場合も、膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみが普通コンクリートよりもやや小さい傾向は同様であった。回帰直線によれば膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみは普通コンクリートの乾燥収縮ひずみよりも約 10%低下した。

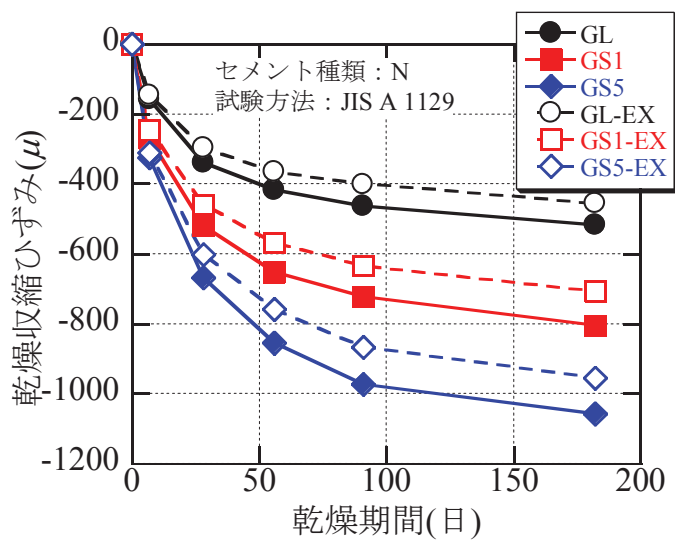


図-3.26 膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみ

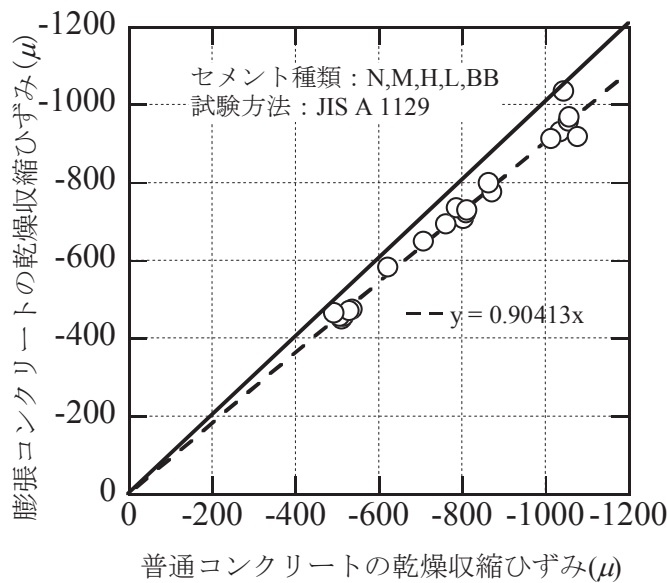


図-3.27 膨張コンクリートと普通コンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

図-3.28 に、普通コンクリート(N, M, H, L, BB)と膨張コンクリート(N-EX, M-EX, H-EX, L-EX, BB-EX)の拘束膨張・収縮ひずみと材齢の関係を示す。材齢7日以前の水中養生期間では、普通コンクリートにおいても、膨潤と考えられる4~29 μ の拘束膨張ひずみを生じた。材齢7日以降の乾燥条件下では、普通・膨張コンクリートともに収縮挙動に転じた。L-EXの拘束収縮ひずみの発現がその他のセメントよりも明らかに緩慢である傾向であった。これは、前掲の図-3.23に示したように、Lを使用した場合の膨張ひずみの発現は、その他のセメントを用いた場合よりも遅れる傾向が確認されていることから、乾燥条件下においても緩やかに膨張ひずみの発現を継続したのではないかと推測される。一方、普通コンクリートの収縮挙動は、骨材の種類によって異なる傾向を示した。すなわち、セメント種類間の差は、GLの場合、ほとんど認められなかったが、GS1の場合、拘束収縮ひずみが-300 μ を超えたあたりでLセメントと他のセメントとが乖離する傾向であった。さらにGS5の場合は、長期材齢でLに加えMもその他のセメントを用いた場合と乖離する傾向が確認された。供試体表面には、目視できるひび割れは確認されなかったことから、強度発現が緩やかであることと収縮量が大きいことが相まって、これらの供試体では、辻¹⁾が丸鋼の場合に指摘したコンクリートと鋼材間のすべりが、ねじ鋼においても生じていた可能性が考えられる。したがって、このような条件が重なる拘束膨張収縮供試体では、定着長を長くするなどの改良を施す必要性が考えられる。

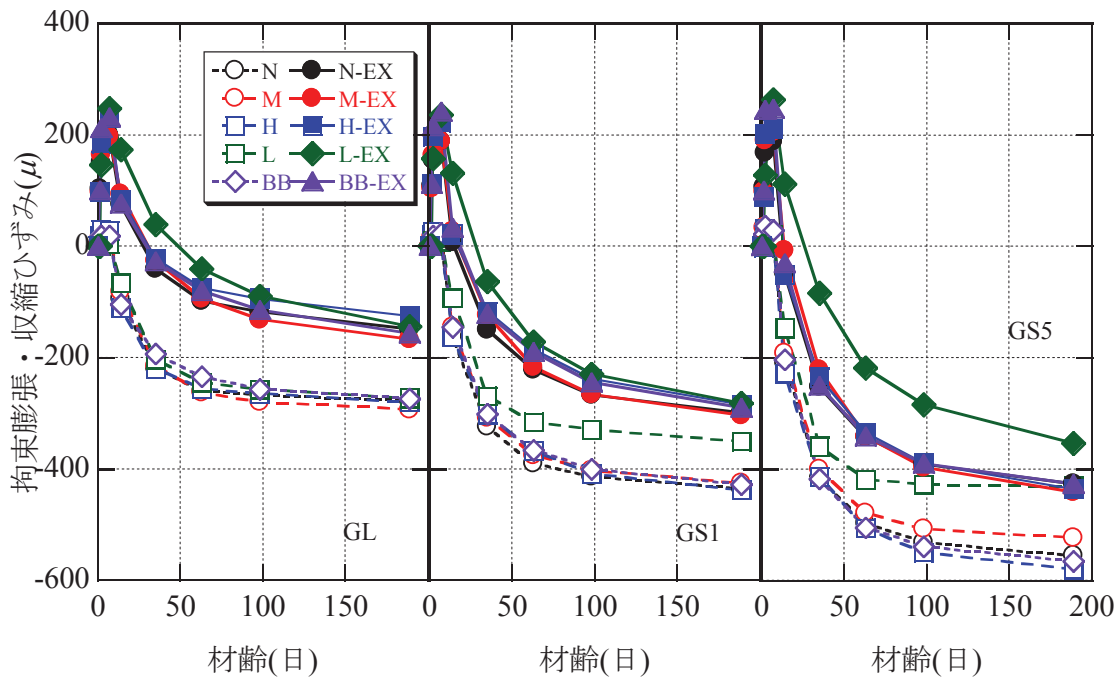


図-3.28 膨張コンクリートおよび普通コンクリートの拘束膨張・収縮ひずみ

図-3.29 に、材齢 189 日(乾燥期間 182 日)における収縮補償量(普通コンクリートと膨張コンクリートの拘束膨張・収縮ひずみの差分)を示す。前述したコンクリートと鋼材間ですべりが生じたと考えられる一部の配合を除けば、収縮補償量は $117\mu\sim 154\mu$ の範囲にあり、材料の組合せによる有意な差は認められなかった。

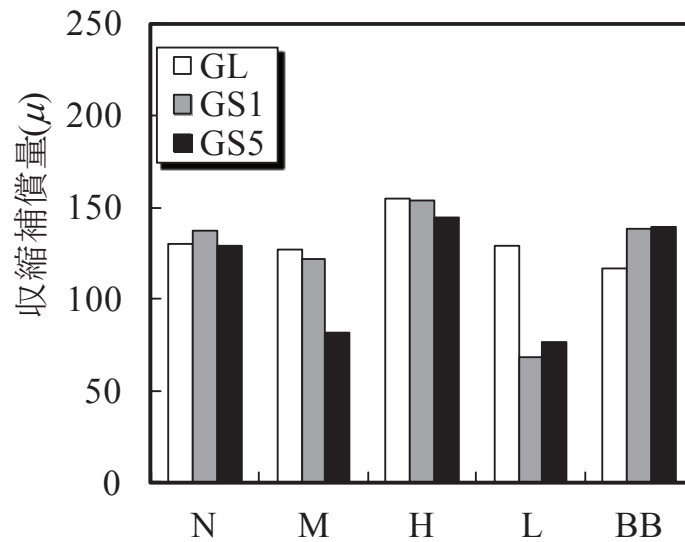


図-3.29 拘束膨張・収縮ひずみによる収縮補償量

3.3.5 収縮低減剤の効果

(1)収縮低減剤の効果に及ぼす骨材の影響

図-3.30 に、粗骨材の種類を用いた場合の普通コンクリートおよび収縮低減剤を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみを示す。いずれのコンクリートも収縮低減剤の使用量が多くなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみは小さくなった。収縮の発現挙動は、初期材齢では普通コンクリートよりも収縮低減剤使用コンクリートのほうが緩やかであったが、長期的には両者の挙動はほぼ平行となった。このことは、収縮低減剤の効果は、材齢によって変化しており、初期材齢ほどその効果が大きいことを示唆する結果と考えられる。

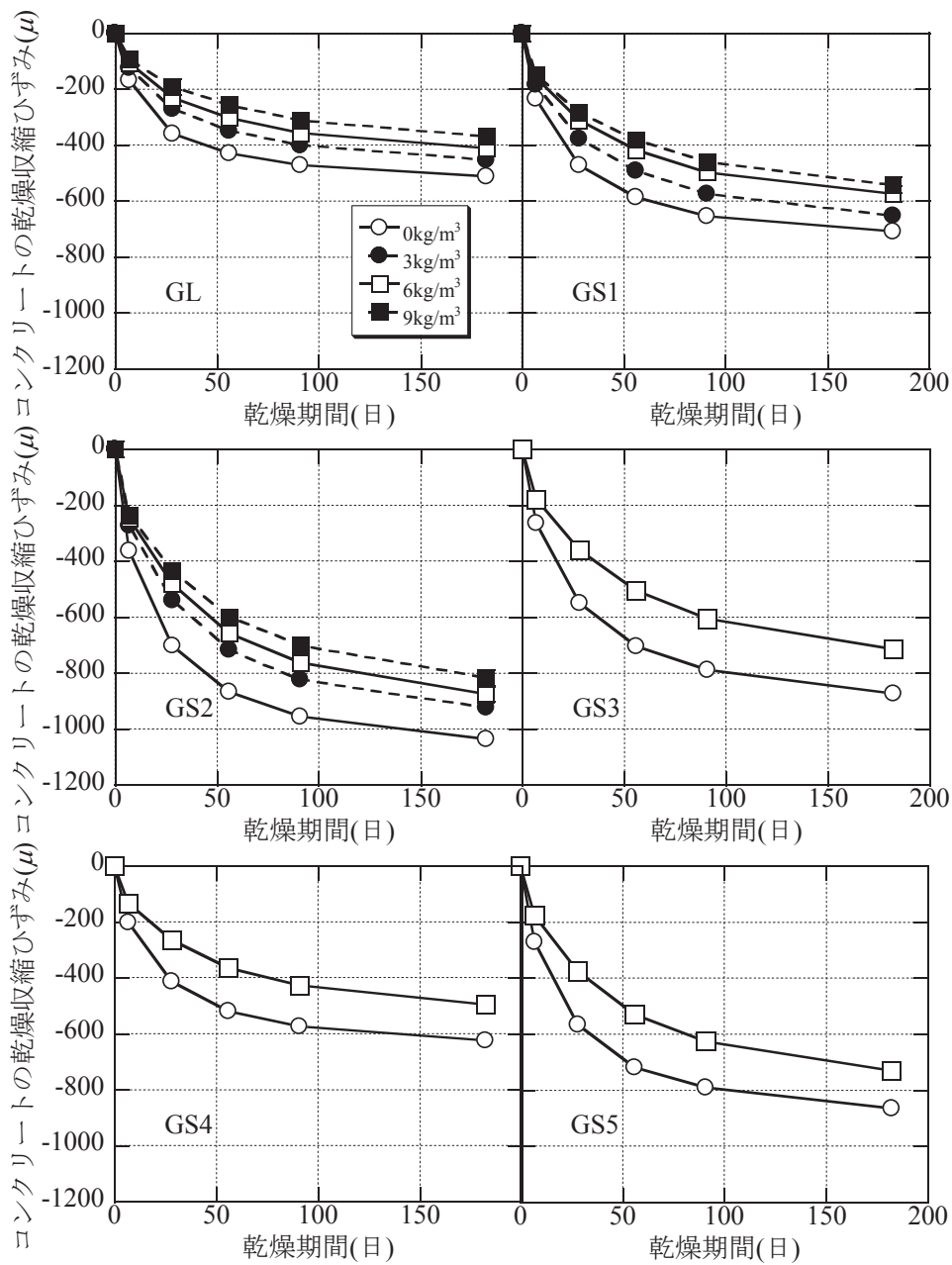


図-3.30 収縮低減剤を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみ

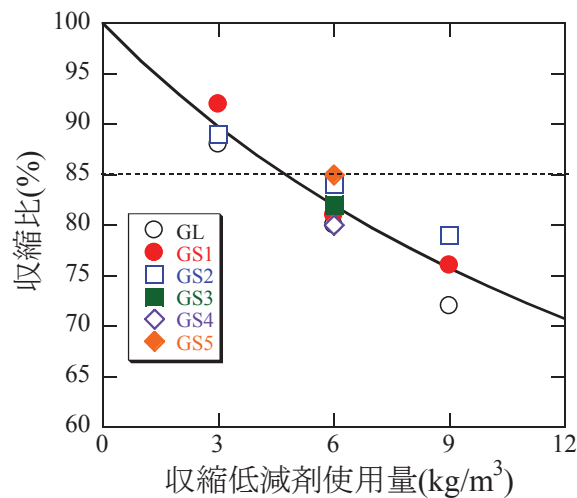


図-3.31 収縮低減剤添加量と収縮比の関係

図-3.31 に、乾燥期間 182 日における収縮比(普通コンクリートの乾燥収縮ひずみ/収縮低減剤使用コンクリートの乾燥収縮ひずみ)と収縮低減剤添加量の関係を示す。粗骨材が異なることで収縮比に差異は認められたが、収縮比の大小に一定の関係は認められなかった。本検討で使用した収縮低減剤の標準添加量である 6kg/m^3 において、収縮比は骨材の種類によらず 85%以下であり、規準類¹²⁾に示される所要性能を満足する結果であった。

(2)収縮低減剤の効果に及ぼすセメント種類の影響

図-3.32 は、普通コンクリート(N, M, H, L, BB)と収縮低減剤使用コンクリート(N-SRA, M-SRA, H-SRA, L-SRA, BB-SRA)のコンクリートの乾燥収縮ひずみを示したものである。いずれのセメント、骨材種類においても収縮低減剤を使用したコンクリートのほうが普通コンクリートよりも乾燥収縮ひずみが小さくなった。ただし、収縮低減効果はセメント種類によって異なる傾向を示した。

図-3.33 に、乾燥期間 182 日の収縮比と普通コンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す。普通コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなるとともに、収縮比が若干小さくなる傾向であった。収縮低減剤の効果は骨材の体積変化挙動にも及んだ可能性も考えられるが、収縮比への影響は 5%以内であり小さい。絶対値で見ると、収縮比はおおむね 85%以下であり、前述の結果と同様に、所要の性能¹²⁾が確認された。

図-3.34 は、乾燥期間 182 日の収縮比をセメント種類別に整理したものである。セメントの種類が H の収縮比は、相対的に他のセメントより小さい傾向が認められた。前述したように、収縮低減剤の効果は初期材齢のほうが長期よりも高い傾向にある一方で、水和物の空隙構造の観点からは、初期強度発現性の高いセメントである H の場合、初期に収縮駆動力が大きくなると考えられる。その両者の兼ね合いによって収縮抑制効果が大きくなったのではないかと考えられる。逆に、強度発現性の緩やかな L は相対的に収縮低減効果が小さくなっておりこれを裏付けるものと考えられる。ただし、M や BB については必ずしもこのような傾向が当てはまらず、検討が必要であると考えられる。

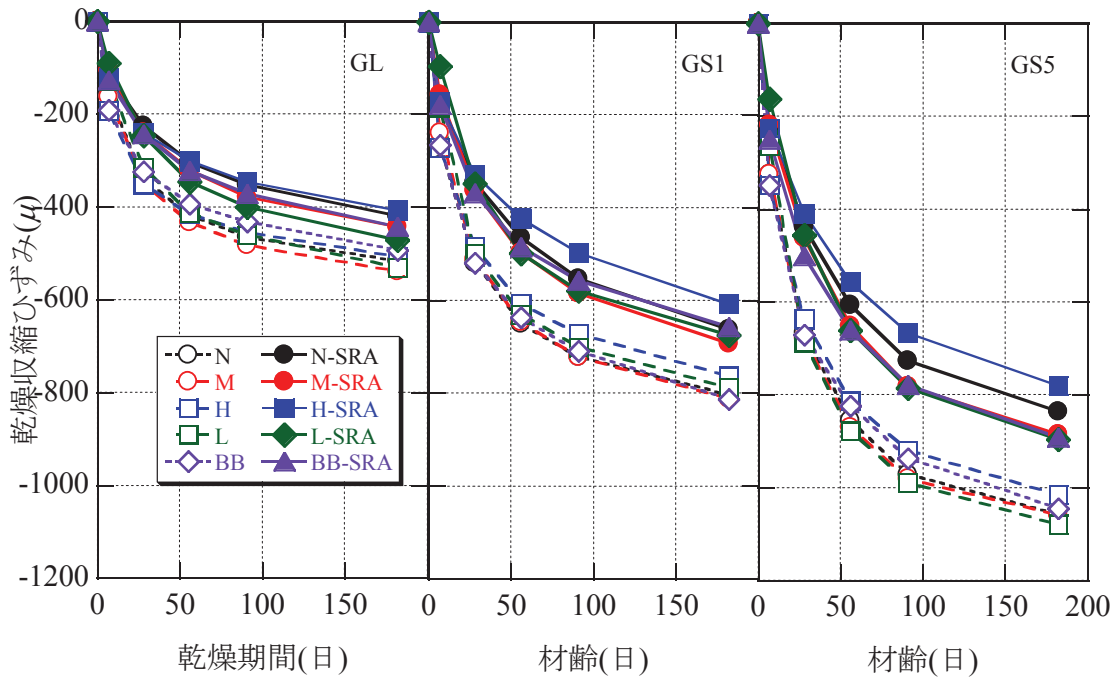


図-3.32 セメント種類・骨材が異なる普通コンクリートおよび収縮低減剤使用
コンクリートの乾燥収縮ひずみ

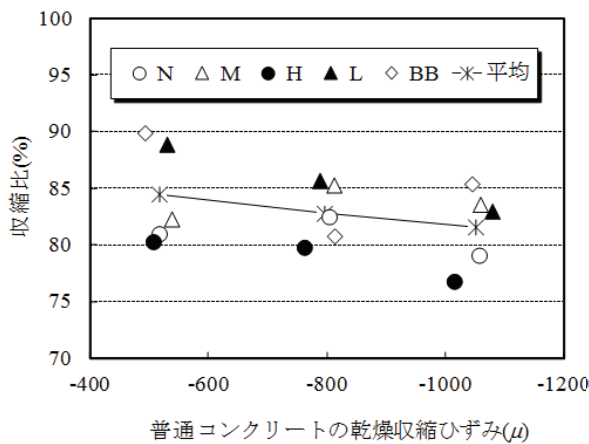


図-3.33 普通コンクリートの乾燥収縮
ひずみと収縮比の関係

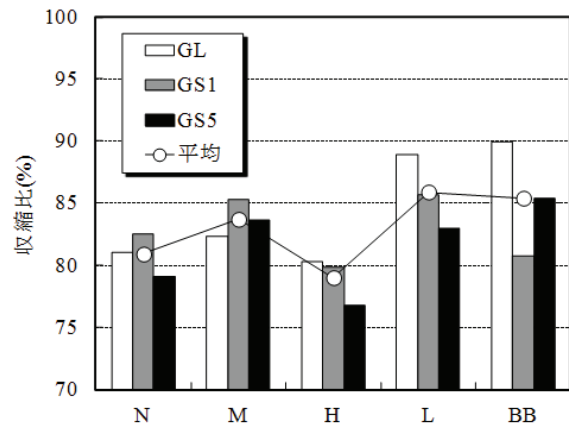


図-3.34 セメントの種類と収縮比の関係

(3)収縮比と力学物性との関係

図-3.35 に、図-3.31、図-3.34 で示した乾燥期間 182 日の収縮比とコンクリートの圧縮強度との関係を示す。同図より、圧縮強度が大きいほど収縮比が小さくなる傾向であることがわかる。収縮比は、材齢 28 日の圧縮強度と比べると材齢 7 日の圧縮強度とのほうがやや相関性が高かった。

同様に、コンクリートの静弾性係数と乾燥期間 182 日の収縮比の関係を示す。図-3.36 に示す。材齢 7 日

の静弾性係数が大きくなると、収縮比が小さくなる傾向が認められたが、材齢 28 日の場合は相関が認められなかった。材齢 7 日の静弾性係数の大小は、材齢 28 日の場合と比べ、初期強度発現性の影響を受けやすいため、間接的に強度発現性の違いを反映した結果であると考えられる。前述したように、コンクリートの圧縮強度にはセメント種類が、静弾性係数には骨材が支配因子となっていることから推察すれば、収縮低減剤の効果に及ぼす影響は、骨材よりもセメント種類のほうが大きいと考えられる。

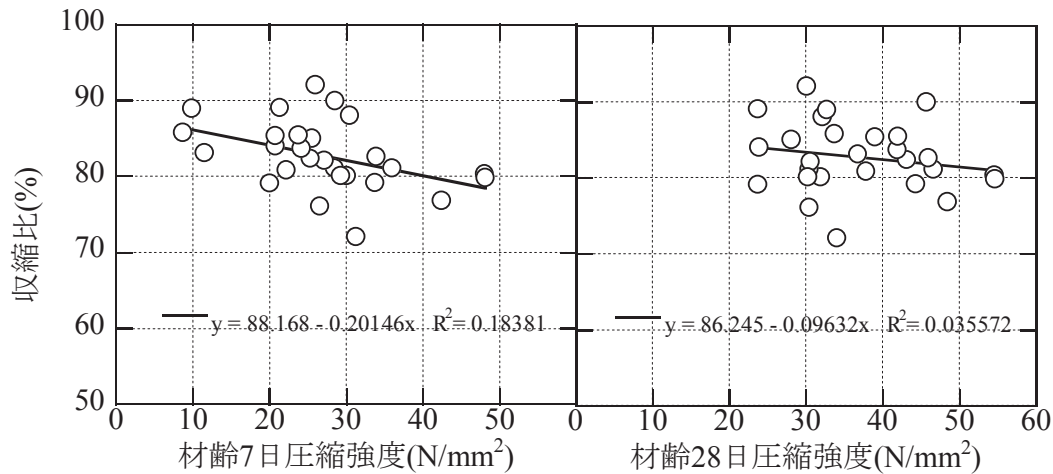


図-3.35 コンクリートの圧縮強度と収縮比との関係

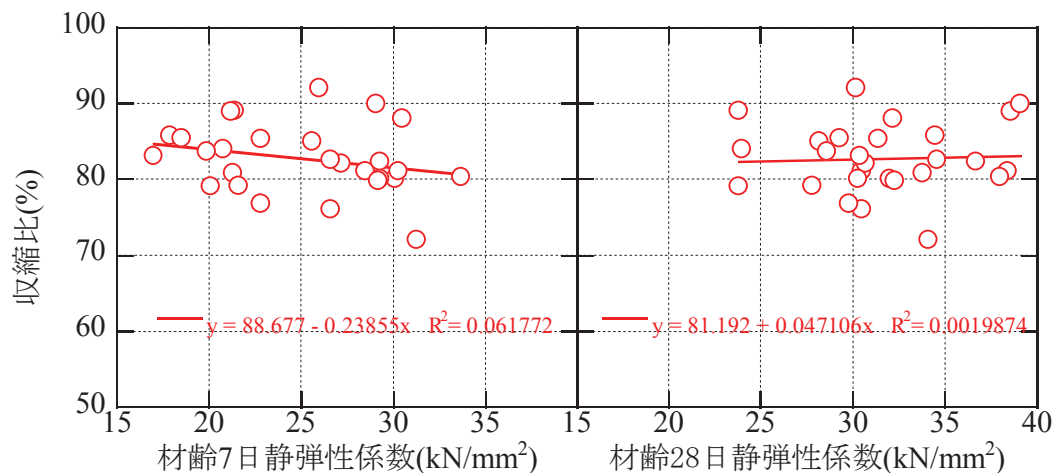


図-3.36 コンクリートの静弾性係数と収縮比との関係

3.4 材料による収縮抑制効果

本章での検討結果に基づき、乾燥期間 6 か月における膨張材および収縮低減剤を使用したコンクリートの収縮抑制効果を、これらを使用していない基準コンクリートの乾燥収縮ひずみに対応して示したのが図-3.37である。膨張材の収縮抑制効果は、膨張材使用コンクリートと普通コンクリートの拘束膨張・収縮ひずみの比率で表した。膨張材の効果は、骨材やセメントの種類によらず拘束膨張収縮ひずみで $120\sim 160\mu$ 程度であることから、コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなるほどその効果の割合は小さくなり、コンクリートの乾燥収縮ひずみが -600μ の場合で 55%程度、 -1100μ の場合で 80%程度となった。

収縮低減剤の効果は、収縮低減剤を使用したコンクリートと使用していないコンクリートの収縮比で表した。収縮低減剤の効果は 15~20%程度であり、基準となるコンクリートの乾燥収縮の大きさによらないことがわかる。

これらを比較すると、基準となるコンクリートの乾燥収縮ひずみが -1000μ 程度以下では、収縮抑制効果は膨張材のほうが収縮低減剤よりも大きくなり、 -1000μ 程度以上では、その効果が逆転することになる。

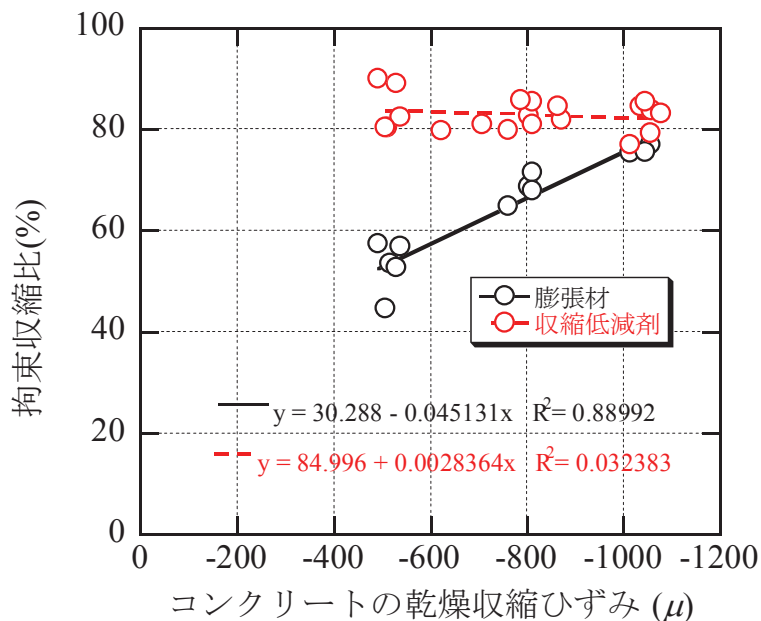


図-3.37 基準コンクリートの乾燥収縮ひずみと拘束収縮比の関係

3.5 第3章のまとめ

コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼすセメント種類、物性・産地の異なる骨材の影響を評価するとともに、収縮抑制材料として石灰石骨材、膨張材、収縮低減剤を用いて、骨材の組合せやセメント種類が異なる場合の効果について系統的な検討を行った。以下に得られた知見を記す。

- (1) 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみに対するその他のセメントの場合の乾燥収縮ひずみは、骨材が異なっても-5.3%~6.6%の範囲であり、セメント種類が乾燥収縮ひずみの大小に及ぼす影響は小さい。
- (2) 早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、その他のセメントを用いた場合の乾燥収縮ひずみよりも相対的に小さい傾向が認められ、全セメント平均値の-2%~4%であった。これは、近年の調査結果と一致した傾向であった。
- (3) コンクリートの圧縮強度に及ぼす骨材の影響は小さく、セメント種類の影響が支配的であった。一方、コンクリートの静弾性係数は、骨材の種類の影響が支配的であり、示方書のヤング係数の設計値を30%程度下回る場合も確認された。
- (4) 硬質砂岩碎石を石灰石碎石によって置換した場合、ほぼその置換率に比例してコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなった。一方、同量の石灰石砕砂を用いても、石灰石碎石を用いた場合よりも乾燥収縮ひずみの抑制効果が小さくなった。これは、コンクリートの静弾性係数に及ぼす影響が、粗骨材よりも細骨材のほうが小さかったためであると考えられた。
- (5) 収縮補償用として膨張材を使用したコンクリートの拘束膨張ひずみは、骨材が異なる場合においても所要の目標性能(150~250 μ)を確保した。膨張コンクリートの拘束膨張ひずみには、骨材の種類よりもセメント種類の影響が支配的であった。
- (6) 拘束膨張・収縮ひずみより求めた普通コンクリートに対する膨張コンクリートの収縮補償量は、コンクリートと鋼材間ですべりが生じたと考えられた一部の配合を除けば、材料の組合せによる有意な差は認められなかった。
- (7) 収縮低減剤の標準添加量をコンクリートに使用した場合、セメント種類、骨材の組合せによらず所要の目標性能を満足する結果であった。早強ポルトランドセメントの場合、その他のセメントを用いた場合と比べ、収縮低減剤の効果が大きい傾向が認められた。これは、収縮低減剤の効果が初期材齢で大きいことから、早期に強度が発現し収縮駆動力が大きくなると考えられる早強ポルトランドセメントにおいて、より大きな効果がもたらされたと推察された。
- (8) 膨張材の収縮抑制効果は、骨材やセメントの種類によらず拘束膨張収縮ひずみで120~160 μ 程度

であった。収縮低減剤の収縮抑制効果は、基準となるコンクリートの乾燥収縮の大きさによらず15～20%程度であった。これらの結果によれば、基準となるコンクリートの乾燥収縮ひずみが-1000 μ 程度以下では、収縮抑制効果は膨張材のほうが収縮低減剤よりも大きくなり、-1000 μ 程度以上では、その効果が逆転する。

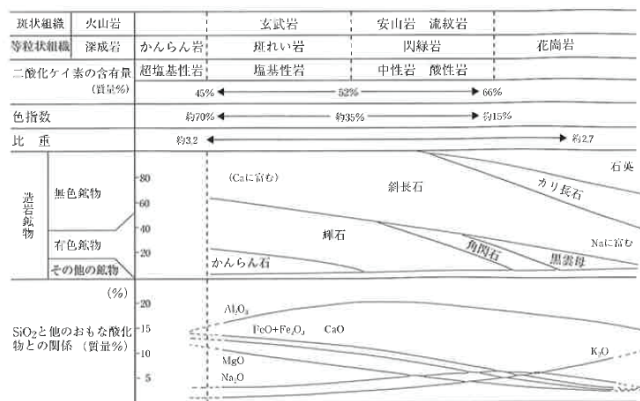
第3章の参考文献

- 1) セメント協会: 耐久性専門委員会ひびわれ分科会報告, H-23, コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討, 1992.
- 2) 石灰石鉱業協会: 石灰石骨材とコンクリート, 2005.3
- 3) 土木学会: 膨張コンクリート設計施工指針, コンクリートライブラリー75, 1993.
- 4) 日本建築学会: 膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案 同解説, 1978.
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案) 同解説, 2006.2
- 6) 佐川孝広, 名和豊春: 高炉セメントの水和反応に及ぼす石灰石微粉末の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.93-98, 2007.
- 7) セメント協会: 各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究(コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果), コンクリート専門委員会報告, F-55(追補), 2011.3
- 8) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会: 平成24年度 乾燥収縮に関する実態調査結果報告書, 新技術開発報告, No.42, 2013.3
- 9) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2013.3
- 10) 戸川一夫, 中本純次: 膨張コンクリートの拘束膨張, 収縮特性に及ぼす使用材料の影響, 土木学会論文集, 第326号, pp.129-140, 1982.10

第4章 骨材の物性がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

4.1 はじめに

本章では、コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼすとされる骨材の物性である、密度、吸水率、吸湿率、細孔径分布、静・動弾性係数、乾燥収縮率を取り上げ、コンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性について評価することで、簡易評価指標としての精度の比較を行う。また、これらの指標について、統計的手法である因子分析を行うことで、コンクリートの乾燥収縮ひずみを良く説明し得る指標を分析する。なお、本章では、骨材を岩種によって分類しており、岩石の地質学上の区分¹⁾を図-4.1に示す。



(a)火成岩

砕石	256	泥	粘土	続	泥岩	粘土岩	頁岩・粘板岩
		シルト	シルト岩			粘板岩	
屑岩	15	微粒	砂	続	砂岩	砂岩	砂岩
		細粒					
		中粒					
		粗粒					
岩物	1	極粗粒	礫	成	礫岩	礫岩	礫岩
		2					
火山噴出物	4	小礫	火山灰	作	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩
		64					
生物の遺がい	256	中礫	火山礫	用	石灰岩	石灰岩	石灰岩
		大礫					
化学的堆積物	粒徑(mm)	巨礫	火山岩塊	炭	チャート	チャート	チャート
		2					
岩	C, H, N, O...	火山灰	生物の遺がい	植物	石炭	石炭	石炭
		64					
化学的堆積物	CaCO ₃	火山礫	C, H, N, O...	植物	石炭	石炭	石炭
		2					
岩	SiO ₂	凝灰岩	SiO ₂ ...	放散虫, 珪藻の殻など	チャート	チャート	チャート
		64					
岩	CaCO ₃ ・MgCO ₃	凝灰岩	CaCO ₃ ...	貝殻, フズリナ, 有孔虫, シンゴなど	石灰岩	石灰岩	石灰岩
		2					
岩	CaCO ₃ ・KCl	凝灰岩	CaCO ₃ ・MgCO ₃	CaCO ₃ ...	石灰岩	石灰岩	石灰岩
		64					
岩	CaSO ₄ ・2H ₂ O	凝灰岩	CaSO ₄ ...	石膏	石膏	石膏	石膏
		2					

(b)堆積岩

図-4.1 岩石の地質学上の区分

4.2 実験概要

4.2.1 使用材料

(1)粗骨材

表-4.1 に、本検討に使用した粗骨材の岩種と物性の一覧を示す。いずれも実際のレディーマイクストコンクリート工場で使用されている砕石 2005 である。岩種の分類は、大別すると火成岩と堆積岩となる。火成岩の小分類は、玄武岩、安山岩、流紋岩、斑れい岩であり、堆積岩の小分類は、石灰岩、硬質砂岩、凝灰岩、粘板岩である。

(2)細骨材

表-4.2 に、コンクリートに使用した細骨材の物性を示す。細骨材には S1 および S2 の 2 種類を使用した。S1 は海砂と砕砂を、S2 は山砂と砕砂を混合したものである。なお、同一の粗骨材を用いた場合、いずれの細骨材を用いても乾燥収縮ひずみには大幅な差異は生じないことを確認している。

(3)セメント

コンクリート試験には、普通ポルトランドセメントを用いた。

(4)混和剤

ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤および AE 剤を用いてスランプおよび空気量を調整した。

表-4.1 粗骨材の岩種と物性一覧

記号	岩 種		記号	粗骨材の物性					乾燥収縮ひずみ* (μ)	
				絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	吸湿率 (%)	ヤング係数 (kN/mm^2)			乾燥収縮 (μ)
							静弾性	動弾性		
G1	火成岩	玄武岩	GB	2.79	1.42	0.93	77.2	49.2	-120	—
G2				2.66	1.99	0.85	53.6	46.1	-166	-701
G3				2.93	0.42	0.33	77.3	62.9	-101	—
G4		安山岩	GA	2.62	2.13	1.05	54.3	44.9	-224	-659
G5				2.54	2.47	1.10	42.7	33.0	-234	-820
G6				2.65	2.14	0.69	63.5	49.1	-133	—
G7				2.57	2.93	1.30	38.6	20.6	-262	—
G8		流紋岩	GR	2.58	1.10	0.52	76.5	47.6	-154	-626
G9				2.61	0.65	0.34	62.4	47.9	-74	-655
G10		斑レイ岩	GG	2.75	0.44	0.26	89.2	54.2	-50	-517
G11	堆積岩	石灰岩	GL	2.71	0.43	0.06	78.1	57.4	-17	-512
G12				2.70	0.41	0.16	79.3	62.2	4	-500
G13				2.69	0.63	0.19	82.1	56.8	1	-590
G14				2.69	0.60	0.17	84.4	55.8	-18	-542
G15		硬質砂岩	GS1	2.66	0.74	0.36	68.6	44.8	-237	-709
G16				2.61	1.88	1.10	44.7	37.9	-756	-1036
G17				2.67	0.96	0.54	66.0	33.3	-455	-873
G18				2.73	0.55	0.18	81.0	44.4	-142	-623
G19				2.72	0.88	0.48	64.5	42.8	-400	-865
G20				2.68	0.73	0.41	67.4	41.8	-174	-626
G21		2.59	1.84	1.14	67.6	38.6	-870	—		
G22		凝灰岩	GT	2.87	0.54	0.38	78.7	50.5	-154	—
G23		粘板岩	GS2	2.68	0.58	0.35	66.4	46.0	-180	-667

*乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみ

表-4.2 コンクリート試験に使用した細骨材の物性

記号	種類		混合割合 (%)	表乾密度 (g/cm ³)		吸水率 (%)		吸湿率 (%)	
	岩種			平均	平均	平均	平均		
S1	海砂		45	2.60	2.66	1.23	1.20	0.42	0.38
	砕砂	硬質砂岩	55	2.70		1.17		0.33	
S2	山砂		40	2.50	2.55	3.17	2.07	1.02	0.69
	砕砂	斑レイ岩	60	2.59		1.34		0.36	

4.2.2 実験方法

(1)コンクリート試験

粗骨材 23 種類のうち、17 種類を用いてコンクリートの乾燥収縮試験を行った。表-4.3 に、コンクリートの配合と材料の組合せを示す。単位水量は 170kg/m³、W/C は 50%で一定とした。乾燥収縮試験用供試体は、寸法 100×100×400mm の角柱を用いた。試験方法は、JIS A 1129-2(モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 2 部：コンタクトゲージ方法)および附属書 A(参考)に準じて 20°C-60%R.H.における長さ変化を測定した。符号は、収縮側を負とする。

表-4.3 コンクリートの配合および材料の組合せ

W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	セメント種類	細骨材種類	粗骨材の種類
50	170	N	S1	G2, G4, G5, G8~G10, G12~G14, G22, G23
			S2	G11, G15~G19

(2)骨材試験

① 骨材の基本物性値

「第 3 章」における結果から、コンクリートの乾燥収縮を代表する物性値として粗骨材の絶対乾密度と吸水率に着目した。いずれも骨材の品質に密接に関わる基本的な物性値であり、データ取得頻度も高いため、コンクリートの乾燥収縮を事前に判断する場合、実用であると考えられる。試験方法は、JIS A 1109「細骨材の密度及び吸水率試験方法」および JIS A 1110「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」に準じた。

② 骨材の吸湿率

コンクリートの乾燥収縮ひずみと良い相関関係にある骨材の物性値として、骨材の内部比表面積が報告²⁾³⁾されており、窒素あるいは水蒸気吸着量から B.E.T 理論によって求められる。これに代わる簡易な方法として吸湿率⁴⁾が提案されている。本検討では吸湿率を骨材の内部比表面積を表す物性として採用し、コンクリートの乾燥収縮との相関性を評価する。試験方法は、105°C-24 時間炉乾燥した絶乾状態の骨材を 20°C-99R.H.%の湿気箱で保管し、24 時間後の含水率を測定した。測定方法は、JIS A 1125「骨材の含水率試験方法及び含水率に基づく表面水率の試験方法」に準じ、含水率は以下の式で算出した。

$$Z = \frac{m_{ad} - m}{m} \quad (4.1)$$

ここで、 Z ：吸湿率(%), m ：吸湿前の試料の質量(g), m_{ad} ：吸湿後の試料の質量(g)

③ 細孔径分布

コンクリートの様々な物性が、セメントペーストの細孔構造と密接に関係していることは広く知られるところである。コンクリートの乾燥収縮もまた、骨材内部の空隙構造と関係して入るとの報告⁵⁾がある。そこで、粗骨材の細孔径分布を水銀圧入法によって測定し評価を行った。測定を実施した骨材を表-4.4に示す。測定には、micromeritics社製の水銀圧入式ポロシメータ(AutoPoreIV 9520)を用いた。ガラス製試料容器(試料室容器 15ml, キャピラリ容積 0.392ml)に、試料を約 12g 量りとり、ポロシメータにセットし、容器内に水銀を注入した。次いで容器ごと圧力を加え、水銀を試料の細孔に圧入しその量を測定した。圧力は段階的に増加させた。加える圧力と水銀が圧入される細孔の大きさには下式(4.2)の関係があるので、これにより各圧力に相当する細孔径を算出し、一方、各圧力における水銀の圧入量をその時点までに水銀が圧入された細孔の量とし、両者より細孔径分布を求めた。

$$d = -4\gamma \cos\theta / P \quad (4.2)$$

ここで、 d ：細孔直径(μm), θ ：水銀の表面張力(=0.484N/m), γ ：水銀と試料との接触角 130° , P ：圧入圧力(MPa)

表-4.4 細孔径分布を計測した粗骨材の種類

計測を実施した粗骨材
G1, G2, G5, G6, G8, G10, G11, G13~G23

④ 粗骨材のヤング係数

セメントペーストの収縮に対する骨材の抵抗性を直接的に表す物性として、骨材自体のヤング係数がある。骨材のヤング係数として、静弾性係数を、粗骨材の母岩から抜き取った3本の円筒コア供試体($\phi 32 \times 64\text{mm}$)を用いて測定した。測定方法は、コア供試体にひずみゲージ(ゲージ長：30mm)を載荷軸線方向に2枚貼り付け、圧縮荷重を行い、その時の応力-ひずみ曲線(図-4.2)から求めた割線弾性係数を静弾性係数とした(写真-4.1)。割線弾性係数は、破壊荷重の1/3相当応力と縦ひずみ 50μ 時の応力を直線で結んだ線分のこう配とした。

粗骨材のヤング係数として、超音波法を用いた動弾性係数を計測した。試料は粗骨材粒を用いた。測定する際、粗骨材粒は、なるべくサイズの大きいものを選んだ。これは、測定区間長が動弾性係数の算出値に及ぼす影響が大きく、測定区間が短い場合、誤差が大きくなりやすいためである。また、超音波の伝播には含水状態が影響するため、絶乾状態の粗骨材で測定を行



写真-4.1 粗骨材コアの載荷試験状況

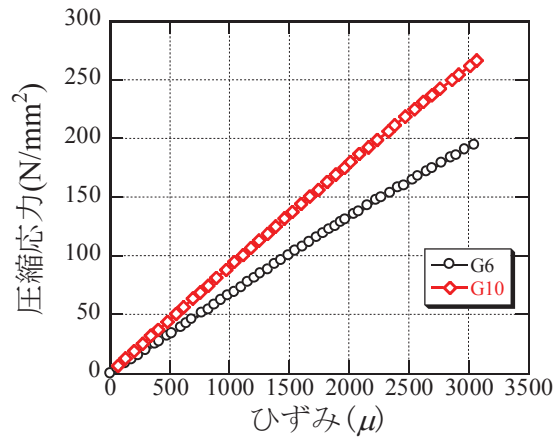


図-4.2 粗骨材コアの圧縮応力-ひずみ曲線例

った。測定機器には、超音波測定器(東横エルメス(株)製：エルソニック ESI/P-10)を用いた。発信子および受信子の外径はφ12mm、振動数は200kHzとした。発・受信子の中心のセンサー一部を粗骨材粒の最も距離の長い2点(測定区間)にあて、超音波伝播時間を測定した(図-4.3、写真-4.2)。測定回数は粗骨材粒あたり5回とし、その平均値を測定区間長で除した超音波伝播速度から式(4.3)⁹⁾を用いて動弾性係数を算出した。なお、同式で用いる密度 ρ については、骨材粒個々の値ではなく、既往の検討⁶⁾に準じてJIS A 1110(粗骨材の密度及び吸水率試験方法)による平均的な絶乾密度を用いた。

$$E_d = v^2 \cdot \rho = (L/T)^2 \cdot \rho \quad (4.3)$$

ここに、 E_d ：動弾性係数， v ：超音波伝播速度， ρ ：JIS A 1110による絶乾密度， L ：測定区間長， T ：超音波伝播時間

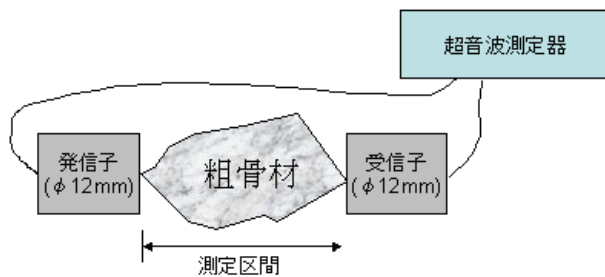


図-4.3 超音波法による動弾性係数計測方法



写真-4.2 粗骨材の超音波伝播時間の計測状況

⑤粗骨材の乾燥収縮

骨材自体が収縮すると、セメントペーストの収縮に対する拘束が小さくなる。これまで、骨材の収縮を測定する方法として、数個の粗骨材粒を連結しコンタクトゲージによって計測するもの²⁾、コア供試体⁷⁾による方法、粗骨材粒に直接ひずみゲージ²⁾を貼り付けるものなどが提案されている。ここでは、粗骨材粒の収縮をひずみゲージによって計測する方法を採用した。

試料には、ふるいわけ試験によって 15~20mm の範囲にとどまった粗骨材粒を用いた。ひずみゲージの貼付け手法を写真-4.3 に示す。まず①下地処理として粗骨材の一部を滑面処理し、②ポリエステル系接着剤を塗布した。その後、③ひずみゲージ(ゲージ長：2mm)を粗骨材粒に1枚貼り付け、さらに、④防水のためブチルゴム系のコーティング剤で被覆した。ひずみ測定時の環境条件は、7日間 20℃水中で保管、以後、7日以上 20℃-60R.H.%保管とした。本検討では、図-4.4 に示すように、水中保管7日時点を起点として、それ以降のひずみ変化量を骨材自体の乾燥収縮率と定義し、下式(4.4)で算出した。同様の条件で2サイクル計測を行い、その平均値を乾燥収縮率として用いた。なお、符号は、収縮側を負とする。



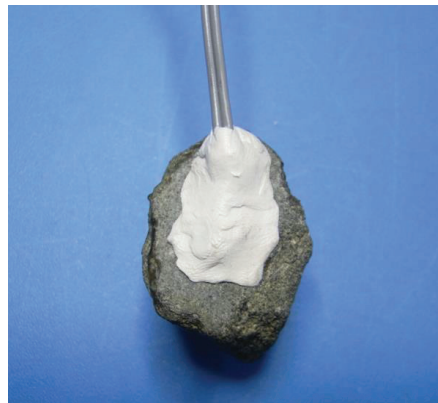
① ディスクグラインダによる研削



② 下地処理



③ ひずみゲージの貼付け



④ コーティング剤による防水処理

写真-4.3 ひずみゲージの貼付け例

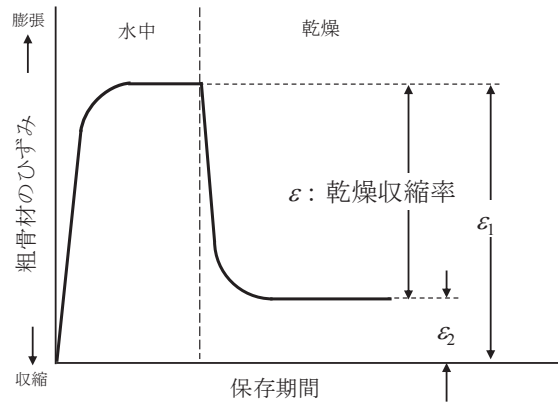


図-4.4 粗骨材の乾燥収縮率

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (4.4)$$

ここに、 ε ：粗骨材の乾燥収縮率(μ)， ε_1 ：水中での粗骨材のひずみ(μ)， ε_2 ：乾燥下での粗骨材のひずみ(μ)

4.3 実験結果

4.3.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

図-4.5に、コンクリートの乾燥収縮ひずみと乾燥期間との関係を岩種別に示す。乾燥収縮ひずみは粗骨材の種類によって大幅に異なり、乾燥期間182日で-501~-1036 μ の範囲に分布した。岩種別にみると、(a)火成岩を用いた場合の乾燥収縮ひずみは-509~-820 μ の範囲であり、最小が斑レイ岩、最大が安山岩を用いた配合であった。ただし、同じ安山岩であってもG4とG5では乾燥収縮ひずみが200 μ 程度異なった。堆積岩の中では、(b)石灰石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみが-501~-590 μ であり、その他の岩種よりも絶対値、分布範囲ともに小さかった。一方、(c)硬質砂岩を用いた場合の乾燥収縮ひずみは-623~-1036 μ であり、粗骨材の種類によって大きく異なる結果であった。乾燥期間182日の結果を一覧して示したのが、表-4.1、図-4.6である。本章の検討では、この乾燥期間182日におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみと骨材物性との関係の評価対象とする。

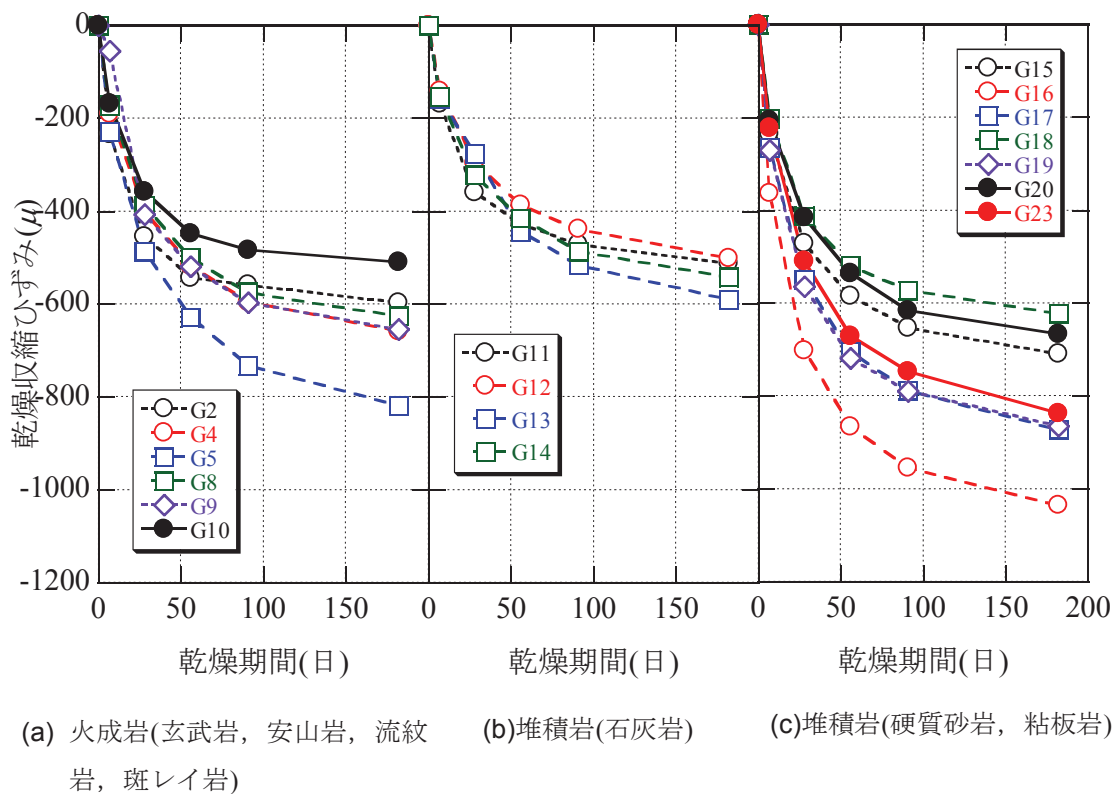


図-4.5 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

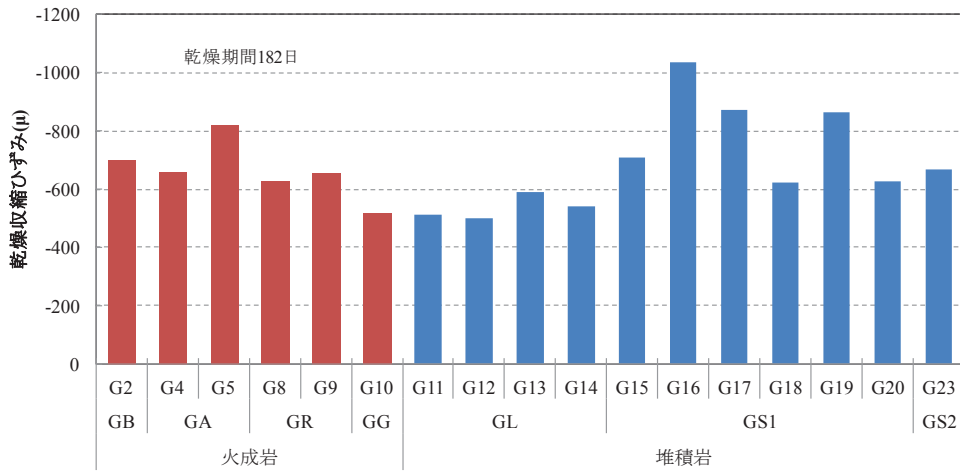


図-4.6 粗骨材種類別のコンクリートの乾燥収縮ひずみ(乾燥期間 182 日)

4.3.2 骨材物性と乾燥収縮ひずみの関係

(1) 絶乾密度・吸水率・吸湿率

表-4.1 に各粗骨材の絶乾密度，吸水率，吸湿率を示す．また，図-4.7 にこれら 3 物性値とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す．「第 3 章」での結果と同様に，絶乾密度が小さくなるほど，吸水率が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向であった．また，コンクリートの乾燥収縮ひずみは吸湿率が大きくなるほど大きくなる傾向であった．最小二乗法で線形回帰したときの決定係数は，3 物性値の中では吸湿率が最も大きくなった．ただし，いずれの決定係数も 0.5 を下回っており，コンクリートの乾燥収縮ひずみを説明する変数としては相関性が低かった．

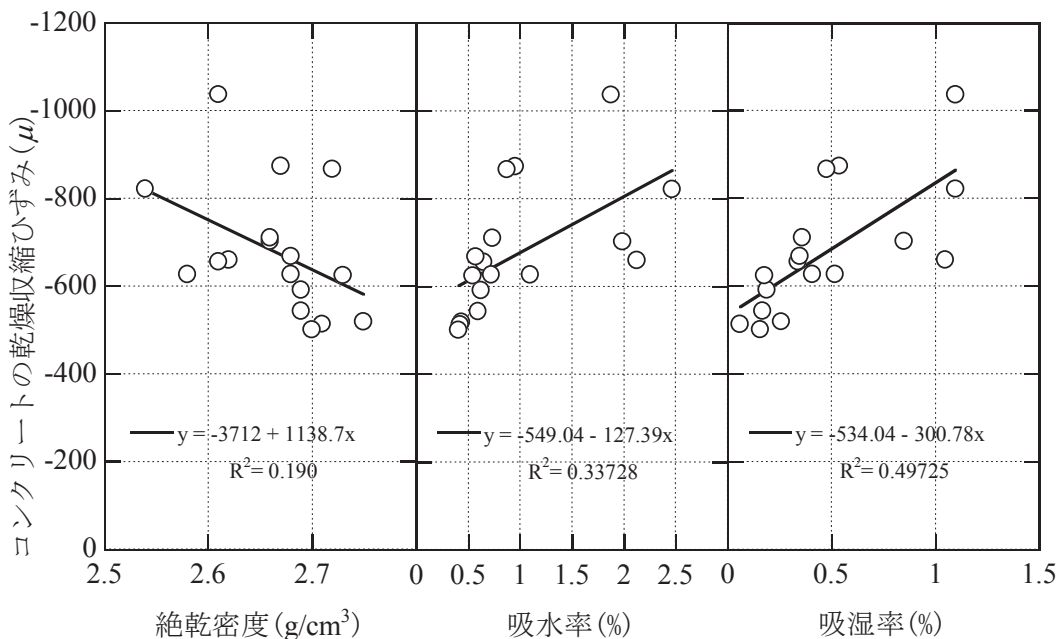


図-4.7 絶乾密度・吸水率・吸湿率とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係

(2)細孔径分布

図-4.8 に粗骨材の細孔径分布，図-4.9 に細孔径の大きいほうからの積算分布を示す．なお，詳細データは表-4.5 に示す．火成岩は， $1\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$ あたりからそれより小径の細孔量が急激に多くなる傾向であった．ただし，斑レイ岩(G10)のみ， $0.1\mu\text{m}$ 程度以下の細孔がほとんど認められない例外的な傾向であった．石灰岩(G11, G13, G14)は， $0.1\mu\text{m}$ 程度より小径の細孔がほとんど認められなかった．硬質砂岩は，細孔径の対数軸に対し全域にわたって比例する傾向であったが，G16, G21 のみ， $0.1\mu\text{m}$ 程度より小径の細孔が急増する傾向であった．凝灰岩(G22)，粘板岩(G23)ともに，硬質砂岩と比較的に似通った傾向を示し，乾燥収縮ひずみは細孔径の対数軸に概ね比例した．

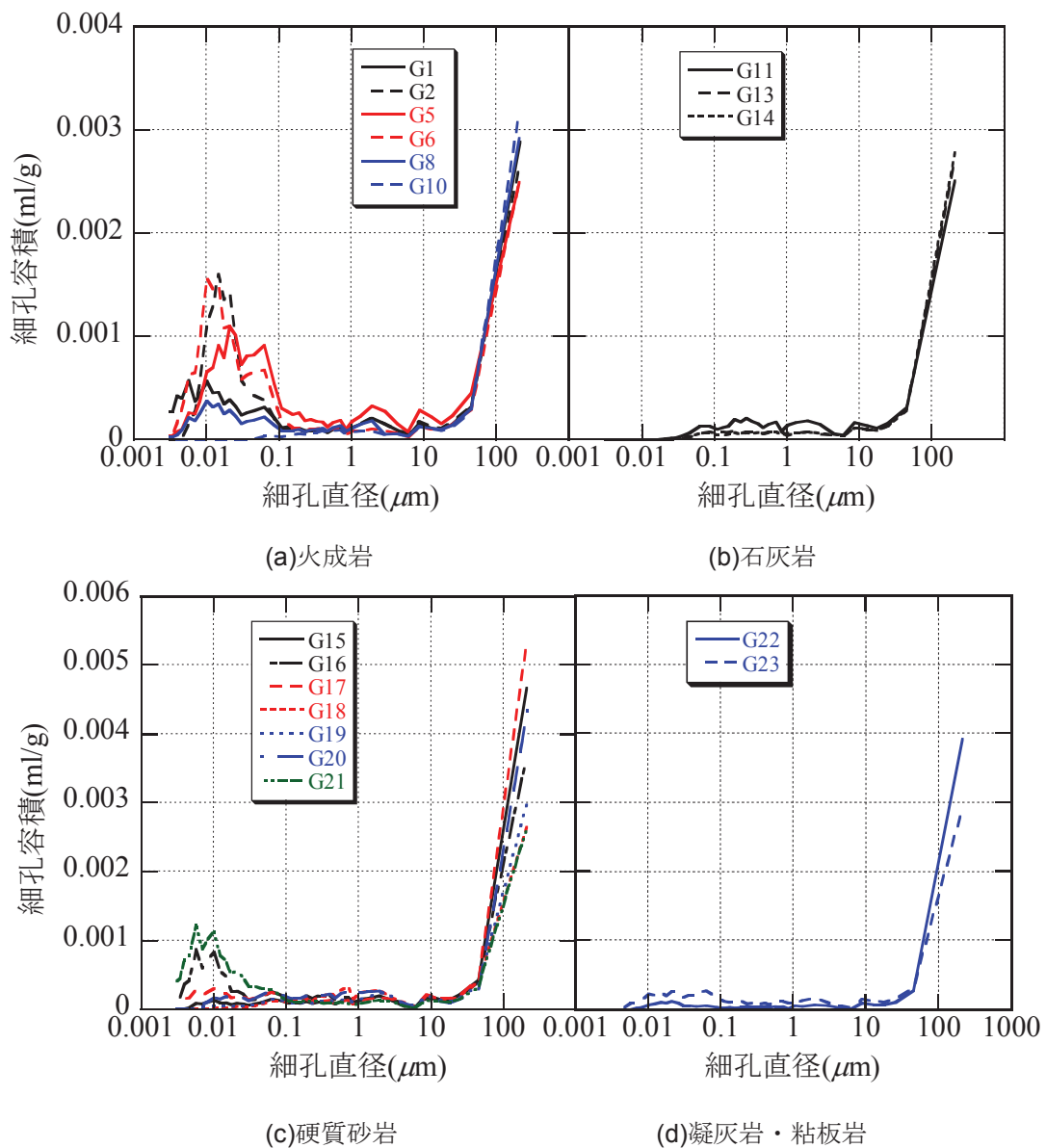


図-4.8 粗骨材の細孔径分布

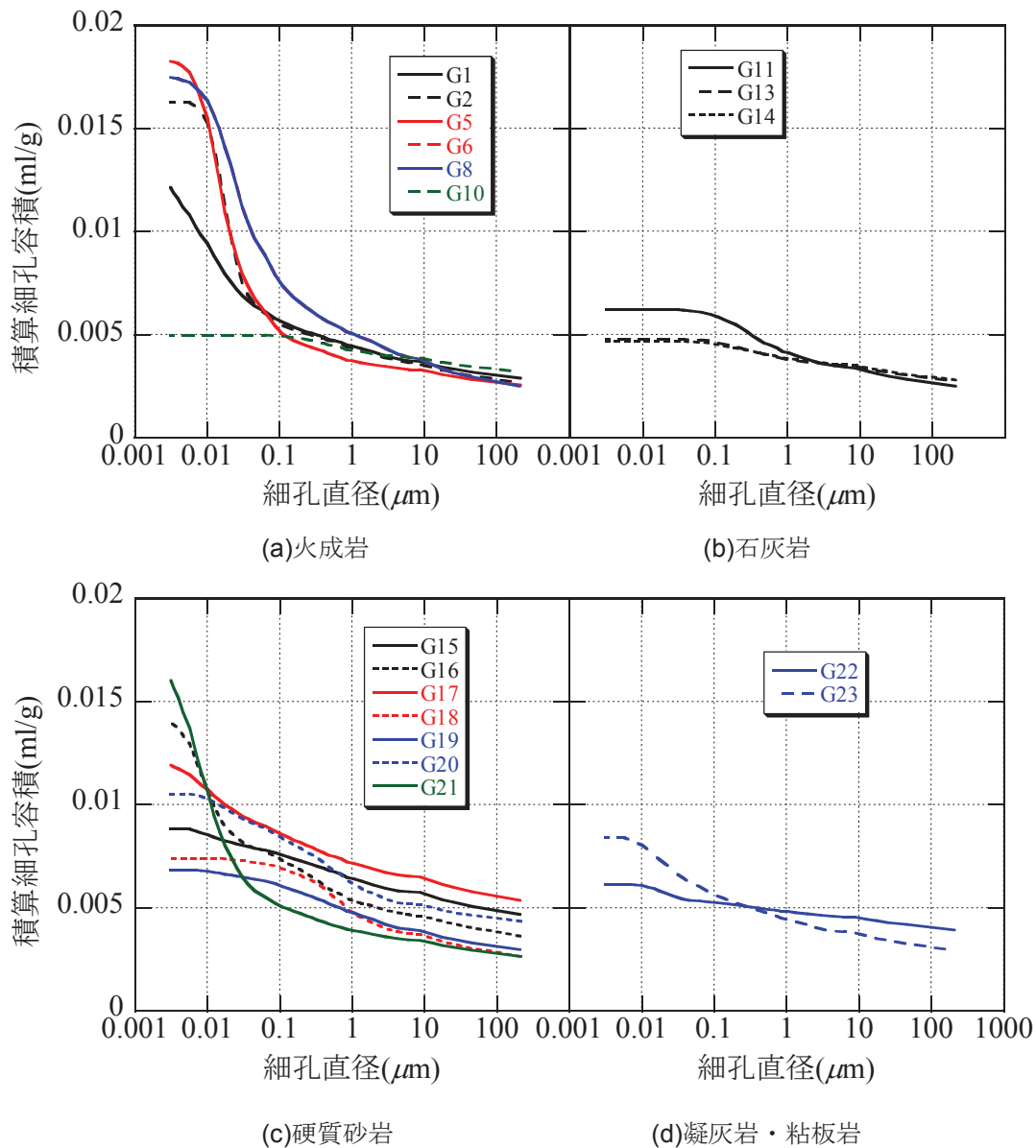


図-4.9 粗骨材の積算細孔分布

骨材の細孔構造がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を評価するため、細孔容積との関係性について検討した。図-4.10は、コンクリートの乾燥収縮ひずみと全細孔容積あるいは細孔径 $0.075\mu\text{m}$ 以下の容積との関係を示したものである。細孔径の閾値として $0.075\mu\text{m}$ を用いたのは、この径以下の細孔量の増大がコンクリートの乾燥収縮の増大をもたらす傾向にあるとの報告⁷⁾、および本検討結果において $0.1\mu\text{m}$ 前後で細孔径分布に特徴的な変化が認められたため、それに近い細孔径として選択したことによる。同図より、全細孔、細孔径 0.075mm 以下のいずれも、容積が増加するほど乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向であることがわかる。最小二乗法で線形回帰した結果によれば、細孔径 0.075mm 以下の容積よりも、全細孔容積のほうがコンクリー

トの乾燥収縮ひずみとの相関は高かった。

図-4.11 に、細孔径の範囲を 13 分割し、各範囲内の細孔容積とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を線形最小二乗回帰したときの決定的数を示す。同図より、細孔径の範囲が小さい場合と大きい場合にコンクリートの乾燥収縮ひずみと相関性が高くなる傾向であった。相関性が最も高くなったのは、細孔径の範囲が $0.015\sim 0.0075\mu\text{m}$ のときであった。ただし、決定係数は 0.46 程度であり、必ずしもコンクリートの乾燥収縮ひずみに対する説明度は高くなかった。

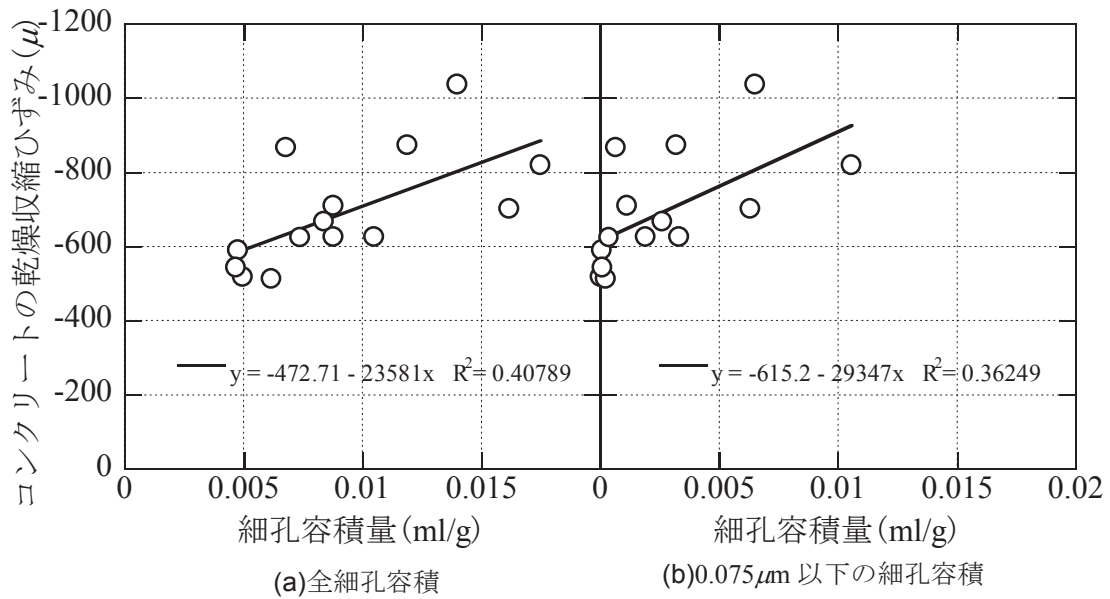


図-4.10 細孔容積とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係

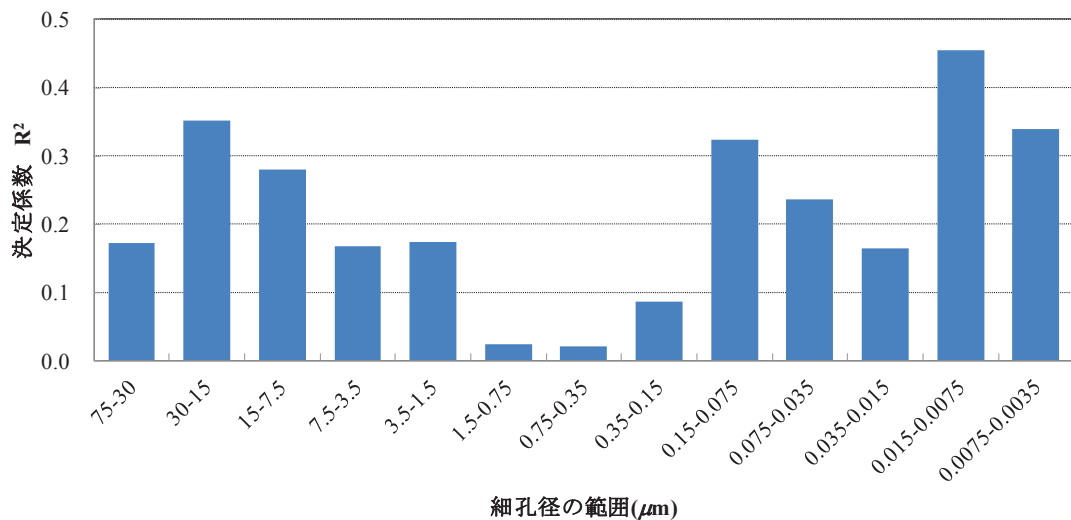


図-4.11 細孔径の各範囲の容積とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性

表-4.5(a) 粗骨材の細孔径分布測定結果

骨材種類 細孔径 (μm)	G1		G2		G5		G6		G7		C8		G10	
	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)
400.000~60.000	0.0035	0.0009	0.0009	0.0009	0.0012	0.0012	20.1142	20.1142	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60.000~30.000	0.0037	-0.0003	0.0006	0.0006	0.0013	0.0013	15.0834	15.0834	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30.000~20.000	0.0001	0.0000	0.0005	0.0005	0.0015	0.0015	10.6316	10.6316	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20.000~15.200	0.0001	0.0001	0.0006	0.0006	0.0011	0.0011	6.9536	6.9536	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15.200~10.600	0.0002	0.0005	0.0011	0.0005	0.0006	0.0006	5.4957	5.4957	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10.600~7.000	0.0002	0.0000	0.0011	0.0000	0.0012	0.0012	3.5035	3.5035	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7.000~5.000	0.0001	0.0004	0.0000	0.0004	0.0017	0.0017	2.3452	2.3452	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.000~3.400	0.0001	0.0044	0.0000	0.0044	0.0018	0.0018	1.5505	1.5505	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.400~2.200	0.0001	0.0045	0.0000	0.0045	0.0017	0.0017	1.1504	1.1504	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.200~1.480	0.0001	0.0046	0.0000	0.0046	0.0017	0.0017	0.9154	0.9154	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.480~1.120	0.0001	0.0047	-0.0001	0.0047	0.0017	0.0017	0.7960	0.7960	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.120~0.900	0.0001	0.0048	0.0000	0.0048	0.0018	0.0018	0.6281	0.6281	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.900~0.760	0.0001	0.0049	-0.0001	0.0049	0.0019	0.0019	0.5132	0.5132	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.760~0.600	0.0001	0.0050	0.0000	0.0050	0.0019	0.0019	0.4427	0.4427	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.600~0.480	0.0001	0.0051	0.0000	0.0051	0.0021	0.0021	0.3623	0.3623	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.480~0.440	0.0001	0.0051	0.0000	0.0051	0.0023	0.0023	0.3023	0.3023	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.440~0.360	0.0001	0.0052	0.0001	0.0052	0.0025	0.0025	0.2502	0.2502	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.360~0.300	0.0001	0.0054	0.0001	0.0054	0.0027	0.0027	0.2126	0.2126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.300~0.240	0.0001	0.0055	0.0001	0.0055	0.0030	0.0030	0.1724	0.1724	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.240~0.200	0.0001	0.0056	0.0002	0.0056	0.0033	0.0033	0.1448	0.1448	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.200~0.170	0.0002	0.0058	0.0005	0.0058	0.0036	0.0036	0.1206	0.1206	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.170~0.140	0.0003	0.0061	0.0012	0.0061	0.0040	0.0040	0.1005	0.1005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.140~0.120	0.0003	0.0064	0.0017	0.0064	0.0047	0.0047	0.0753	0.0753	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.120~0.100	0.0003	0.0066	0.0024	0.0066	0.0056	0.0056	0.0516	0.0516	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.100~0.080	0.0002	0.0069	0.0027	0.0069	0.0059	0.0059	0.0402	0.0402	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.080~0.050	0.0003	0.0072	0.0040	0.0072	0.0071	0.0071	0.0329	0.0329	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.050~0.040	0.0004	0.0076	0.0048	0.0076	0.0088	0.0088	0.0283	0.0283	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.040~0.032	0.0003	0.0079	0.0009	0.0079	0.0099	0.0099	0.0233	0.0233	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.032~0.028	0.0005	0.0084	-0.0019	0.0084	0.0123	0.0123	0.0191	0.0191	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.028~0.024	0.0005	0.0088	-0.0032	0.0088	0.0115	0.0115	0.0164	0.0164	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.024~0.019	0.0006	0.0094	-0.0057	0.0094	0.0098	0.0098	0.0135	0.0135	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.019~0.016	0.0004	0.0098	-0.0035	0.0098	0.0080	0.0080	0.0113	0.0113	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.016~0.013	0.0004	0.0102	-0.0024	0.0102	0.0056	0.0056	0.0090	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.013~0.011	0.0006	0.0108	-0.0023	0.0108	0.0041	0.0041	0.0075	0.0075	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.011~0.009	0.0004	0.0112	-0.0005	0.0112	0.0031	0.0031	0.0064	0.0064	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.009~0.008	0.0004	0.0116	-0.0001	0.0116	0.0018	0.0018	0.0050	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.008~0.006	0.0003	0.0119	0.0000	0.0119	0.0012	0.0012	0.0043	0.0043	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.006~0.005	0.0003	0.0121	0.0000	0.0121	0.0009	0.0009	0.0036	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.005~0.0044	-0.0121	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0010	0.0033	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0044~0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0010	0.0030	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0036~0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0010	-0.0010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0033~0.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表-4.5(b) 粗骨材の細孔径分布測定結果

骨材種類 細孔径 (μm)	G11		G13		G14		G15		G16		G17		G18	
	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)
400.000~60.000	0.0025	0.0025	0.0027	0.0027	0.0028	0.0028	0.0047	0.0047	0.0036	0.0036	0.0054	0.0054	0.0026	0.0026
60.000~30.000	0.0003	0.0028	0.0003	0.0030	0.0003	0.0031	0.0004	0.0034	0.0004	0.0040	0.0004	0.0058	0.0004	0.0030
30.000~20.000	0.0030	0.0030	0.0030	0.0032	0.0001	0.0032	0.0002	0.0034	0.0002	0.0042	0.0002	0.0060	0.0002	0.0033
20.000~15.200	0.0001	0.0031	0.0001	0.0032	0.0001	0.0033	0.0001	0.0034	0.0001	0.0043	0.0001	0.0061	0.0001	0.0034
15.200~10.600	0.0001	0.0032	0.0001	0.0033	0.0001	0.0034	0.0001	0.0035	0.0001	0.0045	0.0001	0.0063	0.0001	0.0035
10.600~7.000	0.0002	0.0034	0.0000	0.0035	0.0000	0.0035	0.0002	0.0037	0.0000	0.0046	0.0002	0.0065	0.0002	0.0037
7.000~5.000	0.0000	0.0034	0.0000	0.0035	0.0000	0.0035	0.0000	0.0035	0.0000	0.0047	0.0000	0.0065	0.0000	0.0037
5.000~3.400	0.0001	0.0035	0.0000	0.0035	0.0001	0.0036	0.0000	0.0036	0.0001	0.0048	0.0000	0.0066	0.0001	0.0038
3.400~2.200	0.0001	0.0036	0.0001	0.0036	0.0001	0.0036	0.0001	0.0036	0.0001	0.0049	0.0001	0.0067	0.0001	0.0040
2.200~1.480	0.0002	0.0038	0.0001	0.0037	0.0001	0.0037	0.0002	0.0037	0.0002	0.0051	0.0002	0.0069	0.0002	0.0043
1.480~1.120	0.0002	0.0040	0.0001	0.0038	0.0001	0.0038	0.0002	0.0038	0.0002	0.0052	0.0001	0.0070	0.0003	0.0045
1.120~0.900	0.0001	0.0041	0.0000	0.0038	0.0001	0.0038	0.0001	0.0038	0.0001	0.0053	0.0001	0.0072	0.0002	0.0048
0.900~0.760	0.0001	0.0042	0.0001	0.0038	0.0000	0.0039	0.0001	0.0039	0.0001	0.0055	0.0001	0.0072	0.0001	0.0049
0.760~0.600	0.0002	0.0043	0.0001	0.0039	0.0001	0.0039	0.0001	0.0040	0.0001	0.0056	0.0001	0.0074	0.0003	0.0053
0.600~0.480	0.0001	0.0045	0.0001	0.0040	0.0001	0.0040	0.0001	0.0040	0.0001	0.0058	0.0001	0.0075	0.0003	0.0055
0.480~0.440	0.0001	0.0046	0.0001	0.0040	0.0000	0.0041	0.0001	0.0041	0.0001	0.0059	0.0001	0.0076	0.0002	0.0057
0.440~0.360	0.0002	0.0047	0.0001	0.0041	0.0001	0.0041	0.0001	0.0041	0.0001	0.0061	0.0001	0.0077	0.0002	0.0060
0.360~0.300	0.0002	0.0049	0.0001	0.0042	0.0001	0.0042	0.0001	0.0042	0.0001	0.0063	0.0001	0.0078	0.0002	0.0061
0.300~0.240	0.0002	0.0051	0.0001	0.0043	0.0001	0.0042	0.0001	0.0042	0.0001	0.0065	0.0001	0.0079	0.0002	0.0063
0.240~0.200	0.0002	0.0053	0.0001	0.0043	0.0000	0.0043	0.0001	0.0043	0.0001	0.0067	0.0001	0.0080	0.0001	0.0064
0.200~0.170	0.0002	0.0055	0.0001	0.0044	0.0001	0.0044	0.0001	0.0044	0.0001	0.0069	0.0001	0.0082	0.0002	0.0066
0.170~0.140	0.0001	0.0056	0.0001	0.0044	0.0000	0.0044	0.0001	0.0044	0.0001	0.0070	0.0001	0.0083	0.0001	0.0067
0.140~0.120	0.0001	0.0057	0.0001	0.0045	0.0000	0.0044	0.0001	0.0044	0.0001	0.0071	0.0001	0.0084	0.0001	0.0068
0.120~0.100	0.0001	0.0058	0.0001	0.0046	0.0000	0.0045	0.0001	0.0045	0.0001	0.0073	0.0001	0.0085	0.0001	0.0069
0.100~0.080	0.0001	0.0060	0.0001	0.0047	0.0001	0.0046	0.0001	0.0046	0.0001	0.0075	0.0002	0.0087	0.0001	0.0070
0.080~0.050	0.0001	0.0061	0.0001	0.0047	0.0001	0.0046	0.0001	0.0046	0.0001	0.0077	0.0002	0.0089	0.0001	0.0071
0.050~0.040	0.0001	0.0061	0.0000	0.0047	0.0000	0.0046	0.0001	0.0046	0.0001	0.0079	0.0002	0.0091	0.0001	0.0072
0.040~0.032	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0080	0.0002	0.0093	0.0000	0.0072
0.032~0.028	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0082	0.0001	0.0094	0.0000	0.0073
0.028~0.024	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0084	0.0002	0.0096	0.0000	0.0073
0.024~0.019	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0086	0.0002	0.0098	0.0000	0.0074
0.019~0.016	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0089	0.0002	0.0100	0.0000	0.0074
0.016~0.013	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0094	0.0002	0.0102	0.0000	0.0074
0.013~0.011	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0099	0.0002	0.0104	0.0000	0.0074
0.011~0.009	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0108	0.0003	0.0107	0.0000	0.0074
0.009~0.008	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0115	0.0002	0.0110	0.0000	0.0074
0.008~0.006	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0121	0.0002	0.0112	0.0000	0.0074
0.006~0.005	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0129	0.0002	0.0115	0.0000	0.0074
0.005~0.0044	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0133	0.0001	0.0116	0.0000	0.0074
0.0044~0.0036	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0137	0.0001	0.0118	0.0000	0.0074
0.0036~0.0033	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0139	0.0002	0.0118	0.0000	0.0074
0.0033~0.0030	0.0000	0.0062	0.0000	0.0048	0.0000	0.0047	0.0001	0.0047	0.0001	0.0140	0.0008	0.0119	0.0000	0.0074

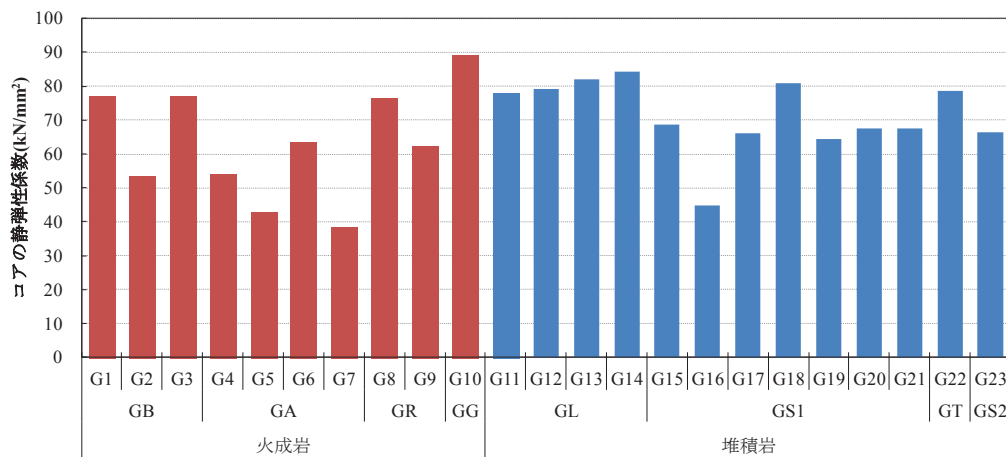
表-4.5(c) 粗骨材の細孔径分布測定結果

骨材種類 細孔径 (μm)	G19		G20		G21		G22		G23	
	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)	細孔容積 (ml/g)	積算細孔容積 (ml/g)
40000~60000	0.0030	0.0043	0.0030	0.0046	0.0026	0.0029	0.0039	0.0042	0.0029	0.0029
60000~30000	0.0003	0.0003	0.0003	0.0046	0.0003	0.0029	0.0003	0.0042	0.0003	0.0033
30000~20000	0.0035	0.0001	0.0001	0.0048	0.0001	0.0031	0.0001	0.0043	0.0002	0.0034
20000~15200	0.0036	0.0001	0.0001	0.0049	0.0001	0.0032	0.0001	0.0044	0.0001	0.0035
15200~10600	0.0037	0.0001	0.0001	0.0050	0.0001	0.0033	0.0001	0.0044	0.0001	0.0036
10600~7000	0.0039	0.0002	0.0002	0.0051	0.0001	0.0034	0.0001	0.0045	0.0002	0.0038
7000~5000	0.0039	0.0000	0.0000	0.0052	0.0000	0.0035	0.0000	0.0046	0.0000	0.0038
5000~3400	0.0001	0.0001	0.0001	0.0053	0.0000	0.0035	0.0000	0.0046	0.0001	0.0039
3400~2200	0.0002	0.0042	0.0002	0.0054	0.0001	0.0036	0.0001	0.0046	0.0001	0.0040
2200~1480	0.0002	0.0044	0.0003	0.0057	0.0001	0.0037	0.0001	0.0047	0.0002	0.0042
1480~1120	0.0002	0.0046	0.0003	0.0059	0.0001	0.0038	0.0001	0.0048	0.0001	0.0043
1120~900	0.0001	0.0048	0.0002	0.0062	0.0001	0.0039	0.0001	0.0048	0.0001	0.0044
900~760	0.0001	0.0048	0.0001	0.0063	0.0001	0.0040	0.0000	0.0048	0.0001	0.0045
760~600	0.0002	0.0050	0.0003	0.0066	0.0001	0.0040	0.0001	0.0049	0.0001	0.0046
600~480	0.0001	0.0051	0.0002	0.0068	0.0001	0.0041	0.0000	0.0049	0.0001	0.0047
480~440	0.0001	0.0052	0.0002	0.0070	0.0001	0.0042	0.0000	0.0050	0.0001	0.0048
440~360	0.0001	0.0053	0.0002	0.0072	0.0001	0.0043	0.0000	0.0050	0.0001	0.0049
360~300	0.0001	0.0054	0.0002	0.0074	0.0001	0.0044	0.0000	0.0050	0.0001	0.0050
300~240	0.0001	0.0055	0.0002	0.0076	0.0001	0.0045	0.0000	0.0051	0.0001	0.0051
240~200	0.0001	0.0056	0.0001	0.0077	0.0001	0.0046	0.0000	0.0051	0.0001	0.0051
200~170	0.0001	0.0058	0.0002	0.0079	0.0001	0.0047	0.0000	0.0051	0.0001	0.0053
170~140	0.0001	0.0058	0.0002	0.0080	0.0001	0.0048	0.0000	0.0052	0.0001	0.0054
140~120	0.0001	0.0059	0.0002	0.0082	0.0001	0.0049	0.0000	0.0052	0.0001	0.0055
120~100	0.0001	0.0060	0.0002	0.0084	0.0001	0.0050	0.0000	0.0052	0.0001	0.0056
100~080	0.0001	0.0062	0.0002	0.0086	0.0002	0.0052	0.0000	0.0053	0.0002	0.0058
080~050	0.0001	0.0063	0.0003	0.0088	0.0003	0.0055	0.0001	0.0053	0.0003	0.0060
050~040	0.0001	0.0064	0.0002	0.0090	0.0003	0.0058	0.0001	0.0054	0.0002	0.0063
040~032	0.0001	0.0065	0.0002	0.0092	0.0003	0.0061	0.0001	0.0054	0.0002	0.0065
032~028	0.0000	0.0065	0.0001	0.0093	0.0003	0.0065	0.0001	0.0055	0.0002	0.0066
028~024	0.0000	0.0065	0.0002	0.0095	0.0005	0.0069	0.0001	0.0056	0.0002	0.0069
024~019	0.0001	0.0066	0.0002	0.0097	0.0006	0.0075	0.0001	0.0057	0.0003	0.0071
019~016	0.0000	0.0066	0.0001	0.0098	0.0005	0.0080	0.0001	0.0058	0.0002	0.0073
016~013	0.0000	0.0067	0.0002	0.0100	0.0007	0.0087	0.0001	0.0059	0.0002	0.0076
013~011	0.0000	0.0067	0.0001	0.0101	0.0008	0.0095	0.0001	0.0060	0.0002	0.0078
011~009	0.0000	0.0068	0.0002	0.0103	0.0011	0.0106	0.0001	0.0061	0.0002	0.0080
009~008	0.0000	0.0068	0.0001	0.0104	0.0010	0.0116	0.0000	0.0061	0.0001	0.0082
008~006	0.0000	0.0068	0.0001	0.0105	0.0009	0.0125	0.0000	0.0061	0.0001	0.0083
006~005	0.0000	0.0068	0.0001	0.0105	0.0012	0.0137	0.0000	0.0061	0.0001	0.0084
005~0044	0.0000	0.0068	0.0000	0.0105	0.0008	0.0145	0.0000	0.0061	0.0000	0.0084
0044~0036	0.0000	0.0068	0.0000	0.0105	0.0007	0.0152	0.0000	0.0061	0.0000	0.0084
0036~0033	0.0000	0.0068	0.0000	0.0105	0.0004	0.0156	0.0000	0.0061	0.0000	0.0084
0033~0030	0.0000	0.0068	0.0000	0.0105	0.0004	0.0160	0.0000	0.0061	0.0000	0.0084

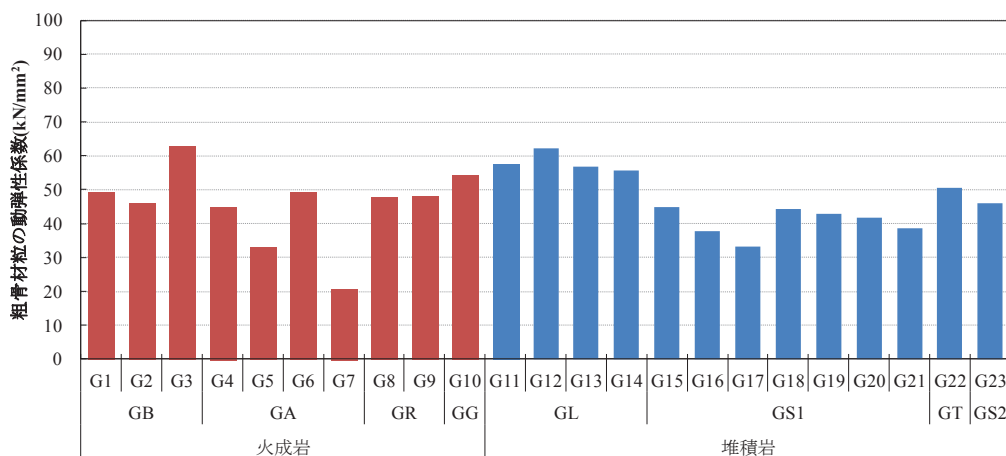
(3)ヤング係数

表-4.1 および図-4.12 に各粗骨材のコア供試体の静弾性係数および粗骨材粒の動弾性係数を示す。また、図-4.13 に、同一種類の粗骨材の静弾性係数と動弾性係数を比較した結果を示す。コア供試体の静弾性係数は、38.6～89.2kN/mm²の範囲に分布した。岩種別に見ると、火成岩は38.6～89.2kN/mm²、堆積岩は44.7～84.4kN/mm²であり、両者の分布範囲に大幅な違いは認められなかった。岩種の小分類でみると、石灰岩の静弾性係数は79.3～84.4kN/mm²であり、その他の岩種の静弾性係数と比べて平均的に大きい傾向が認められた。

一方、粗骨材粒の動弾性係数は、20.6～62.9kN/mm²の範囲に分布した。図-4.13にも示すとおり、同一の粗骨材であっても粗骨材粒の動弾性係数は、コア供試体の静弾性係数よりも30%程度小さい値を示した。一般に、動弾性係数は静弾性係数よりも大きな値を示すとされているにもかかわらず、このような測定結果が得られたのは、発・受信子と粗骨材粒の接触面積が、振動素子の面積よりも小さく、粗骨材粒内へ伝達される超音波振動の割合が低下したためと考えられる。



(a)コア供試体の静弾性係数



(b)粗骨材粒の動弾性係数

図-4.12 粗骨材の静・動弾性係数

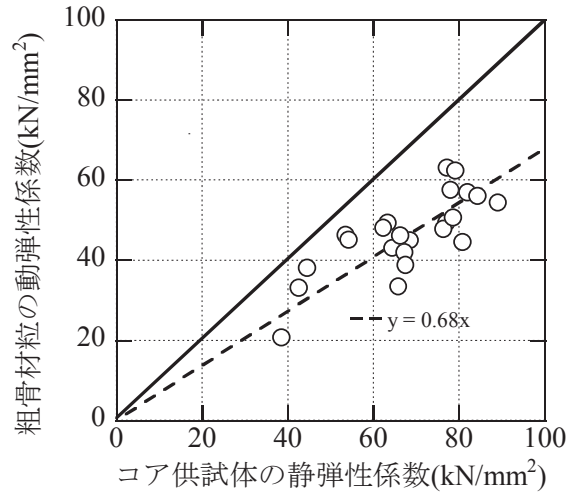


図-4.13 コア供試体の静弾性係数と粗骨材粒の動弾性係数の関係

図-4.14(a)は、発・受信子の接触部を研磨版によって平面加工した場合の動弾性係数を G10, G18, G19, G23 について測定し、平面加工しなかった場合の結果と比較したものである。また、図-4.14(b)は、同一試料で測定を 5 回繰り返した際の変動係数について示したものである。図-4.14(a)より、平面加工することによって平面加工しない場合よりも、動弾性係数が 30%程度大きくなっていることがわかる。一方、図-4.14(b)より、測定結果の変動係数は、平面加工の有無にかかわらず概ね 3%以下であった。一般に、超音波法の測定値の精度には、試料表面の平面性が影響するとされるが、評価指標という観点からは、測定値が相対値であっても再現性があれば良く、試料の発・受信子との接触部が必ずしも平面性を有していなくても適用できると考えられる。これらの検討から、本研究では発・受信子との接触部を平面加工しないで超音波伝播時間の計測を行った。

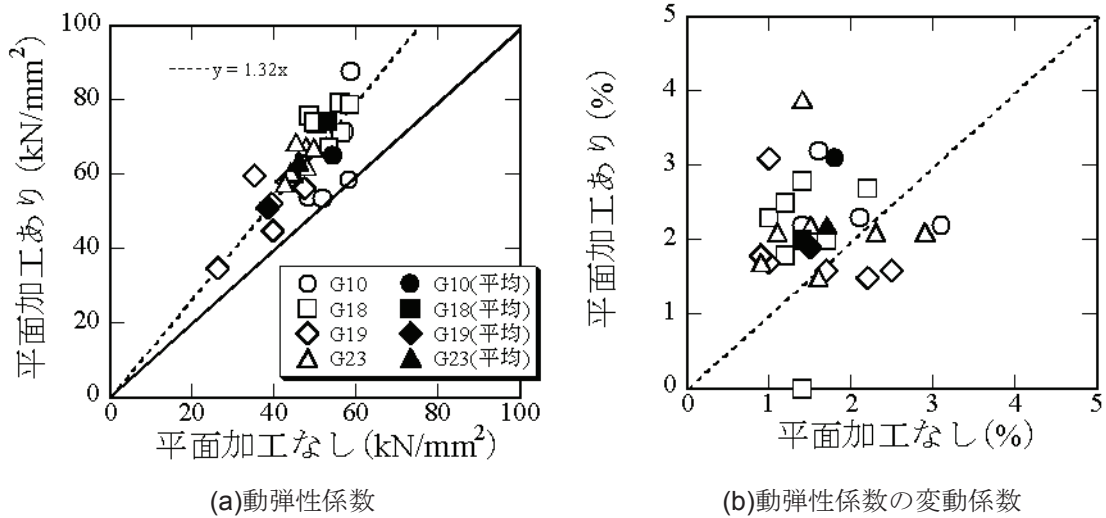


図-4.14 発・受信子接触部の平面加工の有無が動弾性係数の測定結果に与える影響

図-4.15 に、粗骨材コアの静弾性係数および粗骨材粒の動弾性係数と乾燥期間 182 日におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す。同図より、粗骨材のヤング係数が大きくなるとともにコンクリートの乾燥収縮ひずみは小さくなっていることがわかる。決定係数は、粗骨材コアの静弾性係数が約 0.58、粗骨材粒の動弾性係数が約 0.68 であり、前掲の吸水率、密度、吸湿率、細孔径分布に基づく決定係数よりも高くなった。

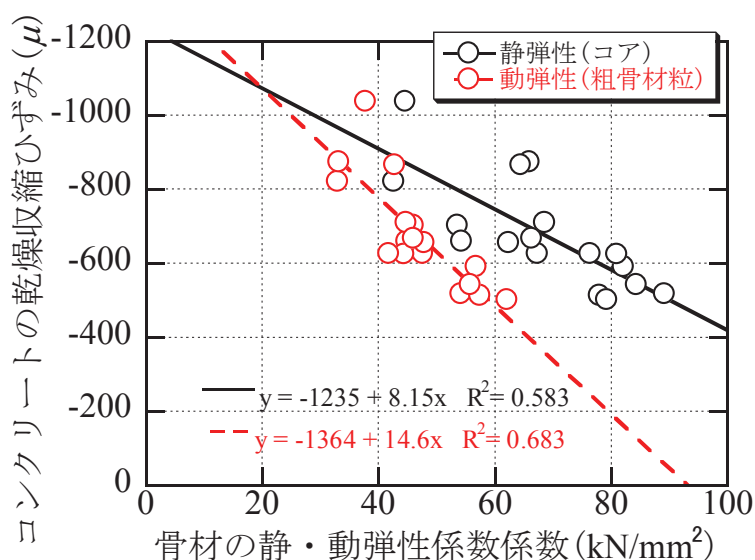


図-4.15 粗骨材の静・動弾性係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみ

(4)乾燥収縮

表-4.1 および図-4.16 に、水中および乾燥下における粗骨材粒毎のひずみ変化を示す。ほとんどの骨材粒は、水中では膨張ひずみ、乾燥下では収縮ひずみ挙動を示した。水中膨張量が大きいものほど、乾燥下で速やかに収縮が進行したが、いずれの骨材も乾燥 10 日程度でほぼ収縮挙動が収束した。同一種類の粗骨材であっても粒によっては比較的大きなひずみ差を生じた。一部の骨材粒では、一時的に水中で収縮を生じたり、乾燥下で若干の膨張を生じたりしたものがあつた。これは、後藤ら¹⁾が指摘したように、毛細管張力現象によるものと思われる。すなわち、毛細管張力はメニスカスが発生することによって生じるため、メニスカスがない絶乾状態と飽水状態が最も体積が大きな状態となり、ある含水状態において体積が最も小さくなることになる。水中で収縮を生じた骨材は、試験開始前の含水量が体積を最小にする含水量に対し少なかった可能性が、乾燥で膨張を生じた骨材は、相対湿度 60%で平衡となる含水量が体積を最小にする含水量よりも多かった可能性が考えられる。

岩種によって比較すると、石灰石骨材は水中、乾燥下における体積変化がその他の骨材と比べて小さいことが特徴的であつた。

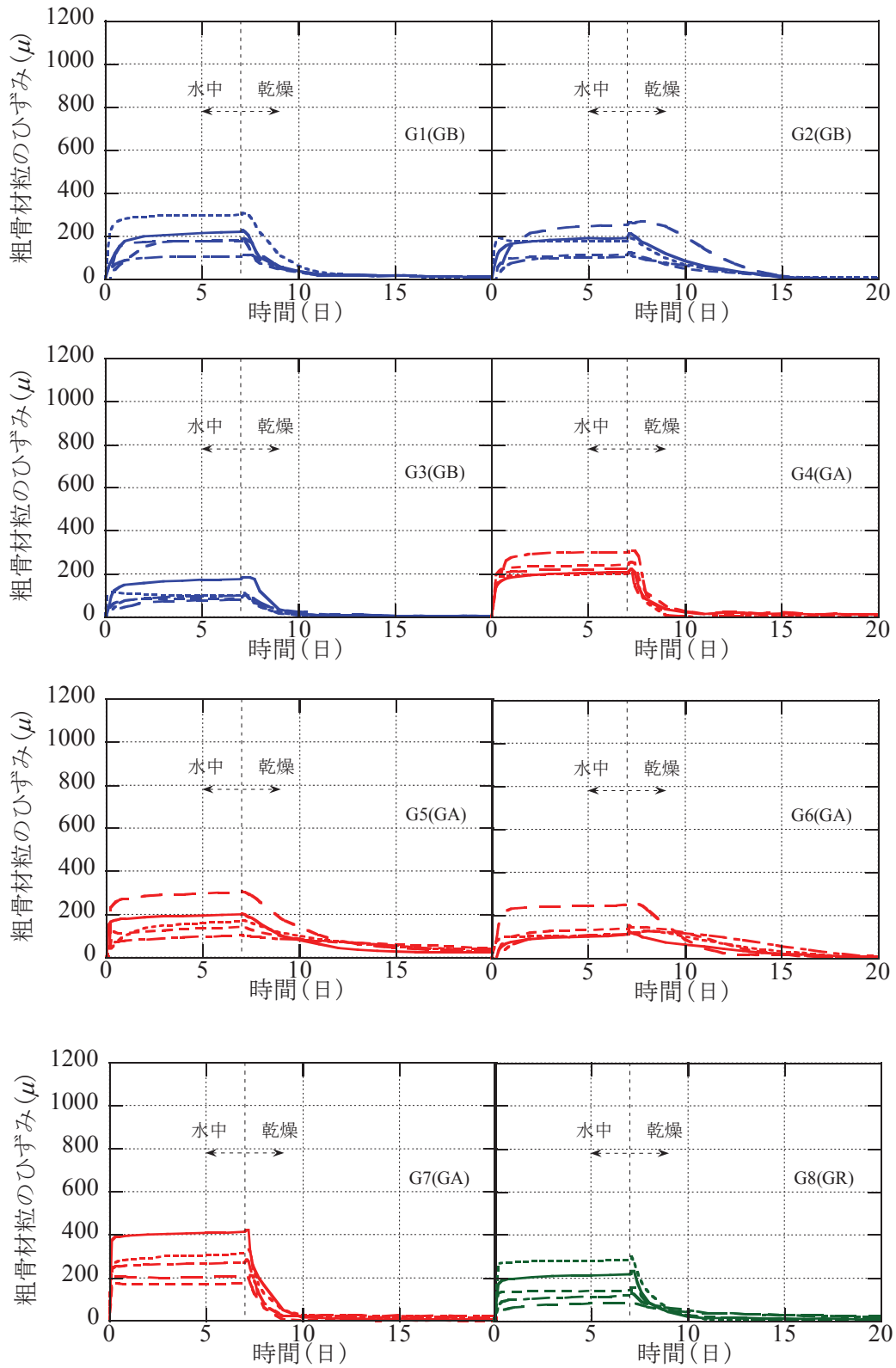


図-4.16(a) 水中・乾燥下における粗骨材粒のひずみ変化

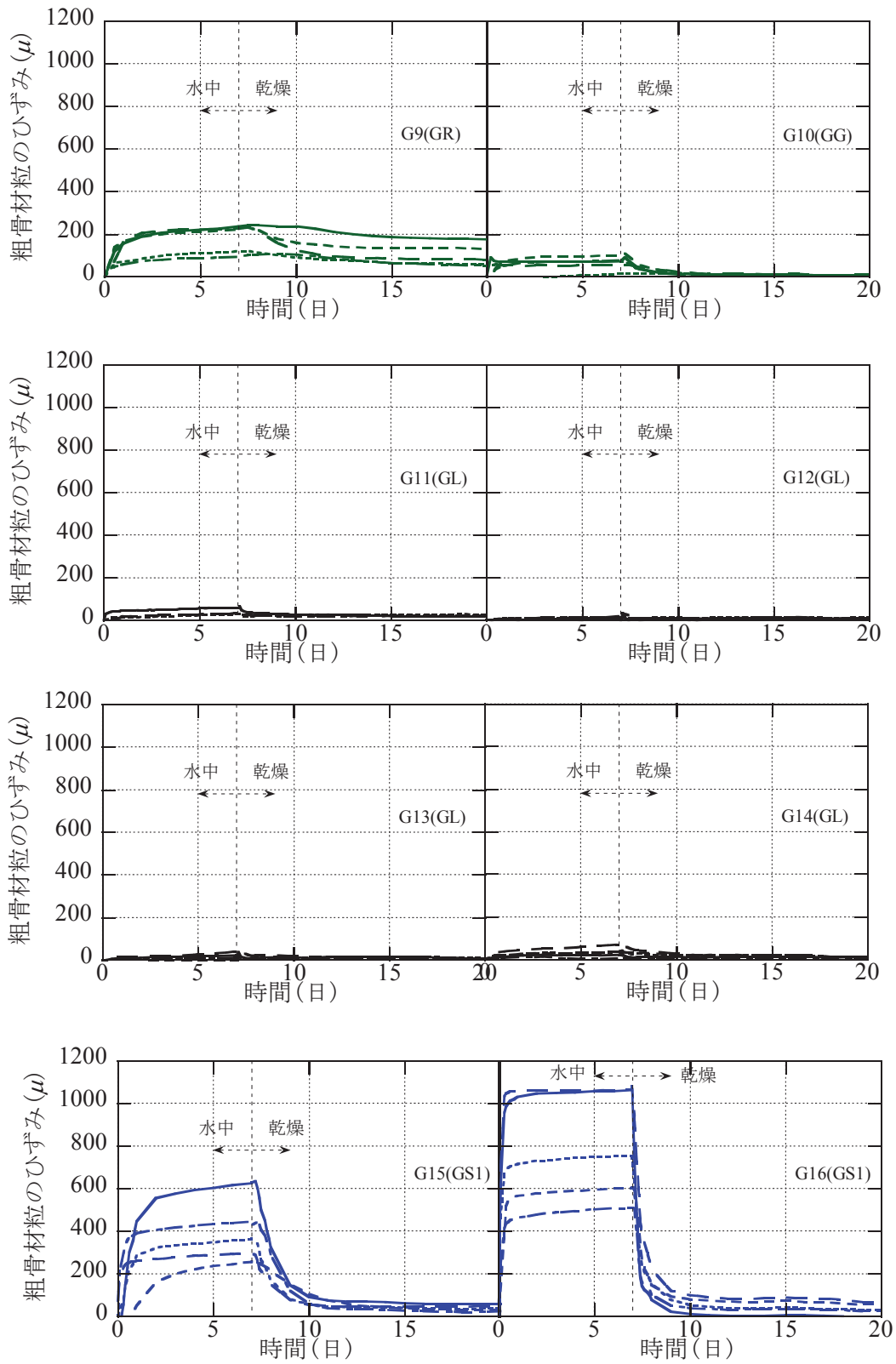


図-4.16(b) 水中・乾燥下における粗骨材粒のひずみ変化

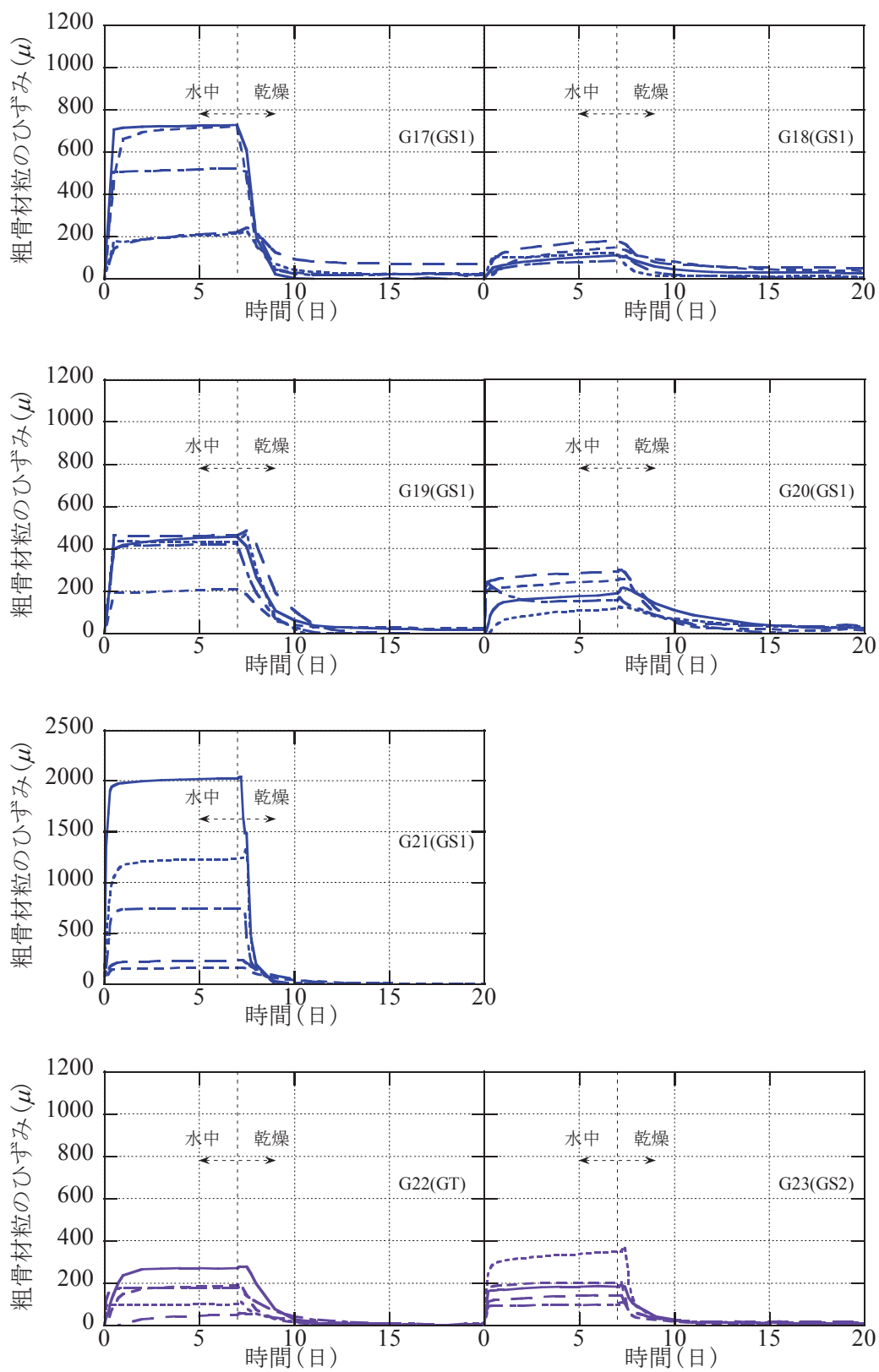


図-4.16(c) 水中・乾燥下における粗骨材粒のひずみ変化

図-4.17 および表-4.1 に、粗骨材粒 5 個あるいは 60 個(G5, G11, G15, G16 のみ)の乾燥収縮率の平均値を岩種ごとに示す。粗骨材粒の乾燥収縮率は 8~-870 μ の範囲に分布した。石灰岩(GL)の乾燥収縮率は、その他の岩種と比べて総じて小さい傾向であり 4~-18 μ であった。硬質砂岩(GS1)の乾燥収縮率は-142~-870 μ であり、その他の岩種と比べて相対的に広い範囲に分布する傾向であった。一部の粗骨材は 900 μ 程度の乾燥収縮率を生じており、セメントペーストの収縮と比べても無視し得ない大きさであった。火成岩の乾燥収縮ひずみは-50~-262 μ であった。

図-4.18 に、粗骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す。両者の関係は決定係数が約 0.9 と、岩種によらず相関性が非常に高く、コンクリートの乾燥収縮ひずみを説明する上で極めて有効な指標であると考えられた。回帰直線によれば、粗骨材の乾燥収縮率 100 μ あたりコンクリートの乾燥収縮ひずみは 70 μ 程度変化することになる。

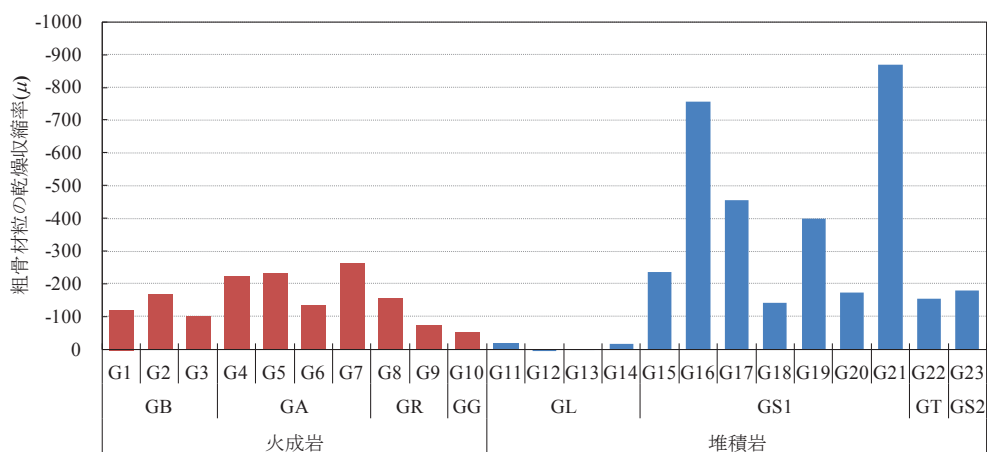


図-4.17 粗骨材粒の乾燥収縮率

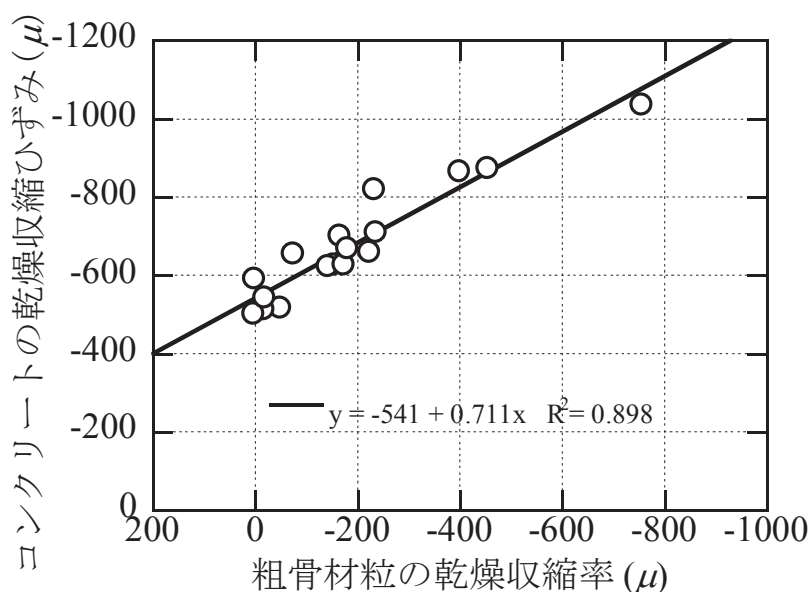


図-4.18 粗骨材粒の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

4.3.3 相関分析・重回帰分析

前項の検討より、コンクリートの乾燥収縮と最も直線回帰による相関性が高いのは粗骨材の乾燥収縮率であることが確認された。一方、粗骨材の複数の物性を用いたほうが、よりその現象を説明できる可能性があるため、相関分析および重回帰分析を行った。検討方法は変数減少法を用い、重回帰分析および相関分析のトライ&エラーによって説明度の低い変数および多重共線性(マルチコリニアリティ)の疑いのある変数を排除し、変数および回帰係数の決定を行った。説明変数は、絶乾密度、吸水率、吸湿率、静弾性係数、乾燥収縮率とした。静弾性係数と動弾性係数の両者には多重共線性があることは明らかであるため、本検討では静弾性係数を採用した。また、細孔容積は、測定した水準とコンクリート試験を実施した水準とが対応しないため除外した。変数を排除する際の多重共線性の判断基準は、重回帰分析の回帰係数と相関分析の相関係数の符号が反転しているかどうか、説明度の低さの判断基準は、 t 値の平方が 2 以下であるかどうかである。表-4.6 に説明変数の一覧を示す。

表-4.7a)~c)に、重回帰分析および相関分析の結果を示す。分析は、ステップ 1~3 の手順を踏んだ。ステップ 1 では、 t^2 値が 2 未満であり説明度が低いと考えられた絶乾密度(B)、回帰係数と相関係数の符号が異なり多重共線性の疑いのある吸湿率(D)を説明変数から除いた。ステップ 2 では、吸水率(C)の t^2 値が 2 を下回ったため、これを除いた。ステップ 3 では、説明度が低いあるいは多重共線性の疑いがある変数がないことから、粗骨材の静弾性係数(E)および乾燥収縮率(F)を説明変数とする重回帰式(4.3)を採用した。図-4.19 に、実験値と重回帰式との比較を示す。同式の決定係数は 0.931 であり、高い相関性が認められた。このことは、コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす主要な骨材物性が、それ自体の弾性係数と乾燥収縮であることを裏付ける結果であると考えられる。

$$\varepsilon_c = 2.61E_s + 0.59\varepsilon_s - 742 \quad R^2 = 0.931 \quad (4.5)$$

ここで、 ε_c 、 ε_s : コンクリートの乾燥収縮ひずみ、粗骨材粒の乾燥収縮率(μ)、 E_s : 粗骨材コアの静弾性係数(kN/mm²)である。

表-4.6 説明変数一覧

記号	目的変数	説明変数				
	コンクリートの乾燥収縮ひずみ(A)	絶乾密度 (B)	吸水率 (C)	吸湿率 (D)	静弾性係数 (E)	乾燥収縮率 (F)
G2	-701	2.66	1.99	0.85	53.6	-166
G4	-659	2.62	2.13	1.05	54.3	-224
G5	-820	2.54	2.47	1.10	42.7	-234
G8	-626	2.58	1.10	0.52	76.5	-154
G9	-655	2.61	0.65	0.34	62.4	-74
G10	-517	2.75	0.44	0.26	89.2	-50
G11	-512	2.71	0.43	0.06	78.1	-17
G12	-500	2.70	0.41	0.16	79.3	4
G13	-590	2.69	0.63	0.19	82.1	1
G14	-542	2.69	0.60	0.17	84.4	-18
G15	-709	2.66	0.74	0.36	68.6	-237
G16	-1036	2.61	1.88	1.10	44.7	-756
G17	-873	2.67	0.96	0.54	66.0	-455
G18	-623	2.73	0.55	0.18	81.0	-142
G19	-865	2.72	0.88	0.48	64.5	-400
G20	-626	2.68	0.73	0.41	67.4	-174
G23	-667	2.68	0.58	0.35	66.4	-180

表-4.7(a) 重回帰分析および相関分析(ステップ 1)

重回帰分析				相関分析						
	回帰係数	t	t^2		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
切片	-1388.3			(A)	1					
(B)	218.0	0.8	0.6	(B)	0.436	1				
(C)	-113.3	-1.4	2.0	(C)	-0.581	-0.726	1			
(D)	325.8	1.8	3.1	(D)	-0.705	-0.714	0.964	1		
(E)	3.3	1.9	3.5	(E)	0.764	0.709	-0.855	-0.897	1	
(F)	0.7	7.0	49.4	(F)	0.948	0.313	-0.492	-0.656	0.660	1
決定係数 R^2			0.948							

網掛け斜体：説明変数から除いた根拠

表-4.7(b) 重回帰分析および相関分析(ステップ 2)

重回帰分析				相関分析				
	回帰係数	t	t^2		(A)	(C)	(E)	(F)
切片	-794.3			(A)	1			
(C)	12.3	0.4	0.2	(C)	-0.581	1		
(E)	3.2	1.8	3.3	(E)	0.764	-0.855	1	
(F)	0.6	8.0	63.4	(F)	0.948	-0.492	0.660	1
決定係数 R^2			0.932					

表-4.7(c) 重回帰分析および相関分析(ステップ 3)

重回帰分析				相関分析			
	回帰係数	t	t^2		(A)	(E)	(F)
切片	-742.4			(A)	1		
(E)	2.6	2.6	6.9	(E)	0.764	1	
(F)	0.6	8.4	71.2	(F)	0.948	0.660	1
決定係数 R^2			0.931				

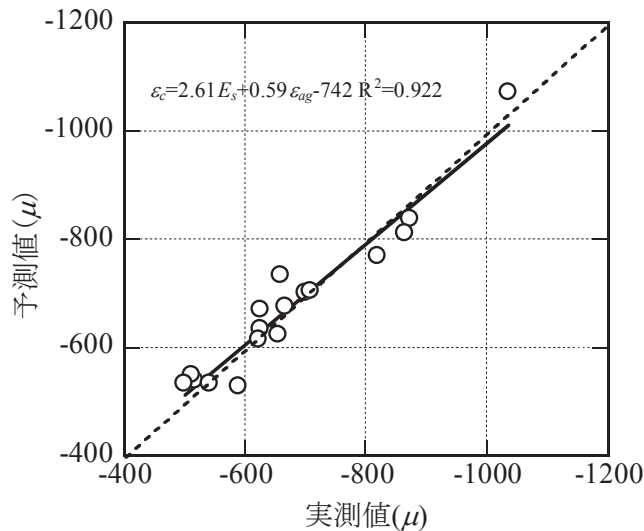


図-4.19 コンクリートの乾燥収縮ひずみの実測値と重回帰式による予測値

図-4.20 に、コンクリートの乾燥収縮の実験値と、式(4.5)で重回帰した場合の決定係数および各骨材物性で単回帰した場合の決定係数を一覧して示す。一般に、現象を説明する因子として適当であるかどうかの目安として、決定係数が 0.5 以上であることが求められる。これに該当する骨材物性は、ヤング係数および乾燥収縮率であり、重回帰式で採用した説明変数もこの 2 物性である。また、骨材の乾燥収縮率の決定係数は、その他の物性と比べて相対的に高く、単独物性であるにもかかわらず、重回帰式とほぼ同程度の相関性を有していることがわかる。

決定係数が低かった物性のいくつかは、すでにコンクリートの乾燥収縮と良好な相関性を有することが報告されているものもある。それにもかかわらず、本検討において説明度がそれほど高くない理由は、各研究者において、相関性の評価を行った骨材の種類が限定されていた可能性が考えられる。そこで、本検討で使用した骨材を、第一次分類として堆積岩と火成岩の岩種に分けてコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性評価を行った。

図-4.21 は、コンクリートの乾燥収縮ひずみと、粗骨材の絶乾密度，吸水率，吸湿率， $0.0075 \mu\text{m}$ 以下の細孔容積，静・動弾性係数との関係を、堆積岩と火成岩で分類したものである。同図より、骨材の動弾性係数を除けば、骨材物性を火成岩および堆積岩に分類することでコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性が向上していることがわかる。いずれも、堆積岩の骨材のほうが火成岩の骨材よりも、物性値の変化にともなうコンクリートの乾燥収縮ひずみの変化量が大きい傾向であることがわかる。

骨材物性とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性を、岩種別にまとめたのが図-4.22 である。火成岩骨材の絶乾密度を除けば、いずれも決定係数は 0.6 以上となっており説明度としては比較的高い。同一岩種・産地の骨材品質を把握するという目的であれば、おおむね全ての骨材物性がコンクリートの乾燥収縮ひずみの簡易指標として用いることができると考えられる。一方、岩種等の情報がない場合は、骨材の乾燥収縮を指標とすることが望ましいと考えられる。

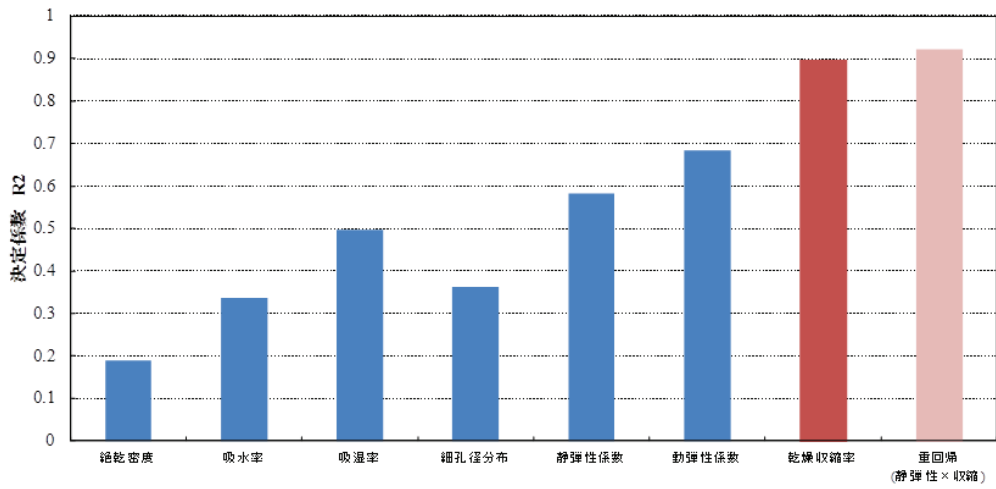


図-4.20 単回帰および重回帰による決定係数

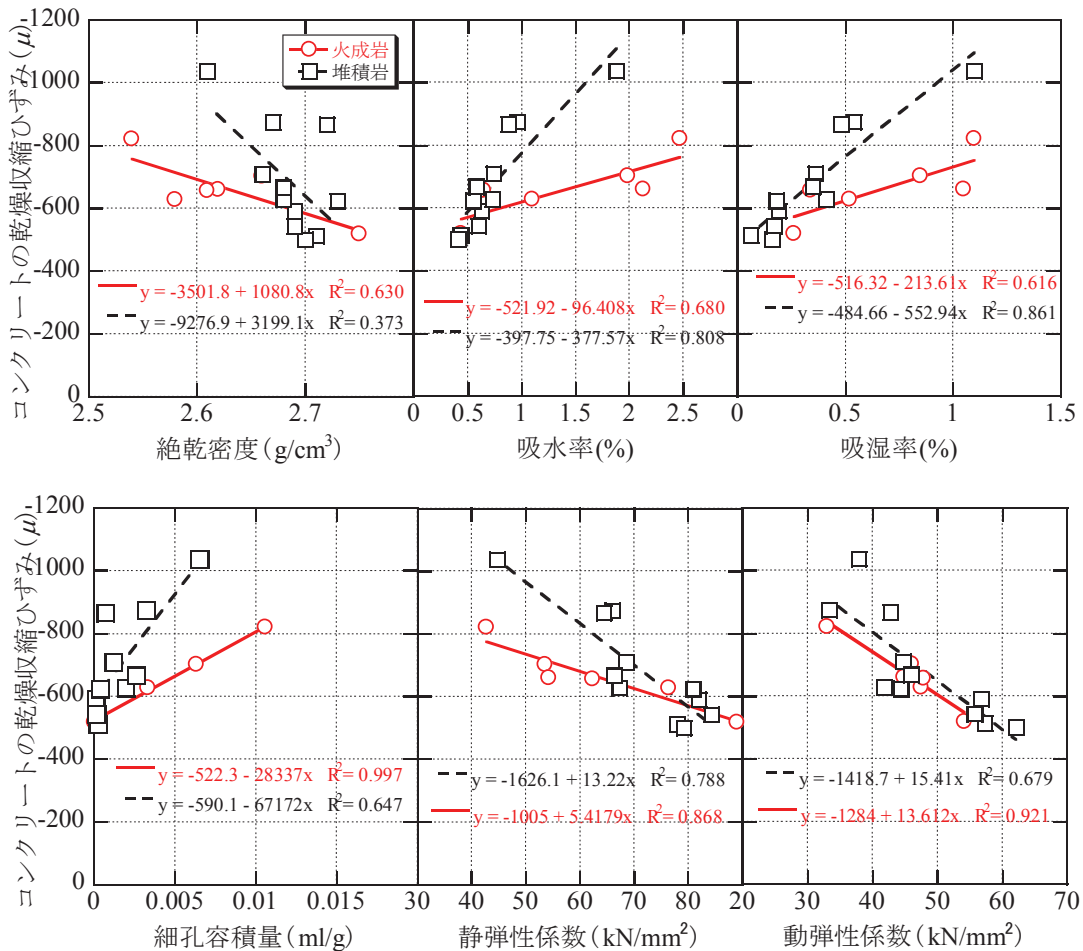


図-4.21 骨材物性を岩種で分類した場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係

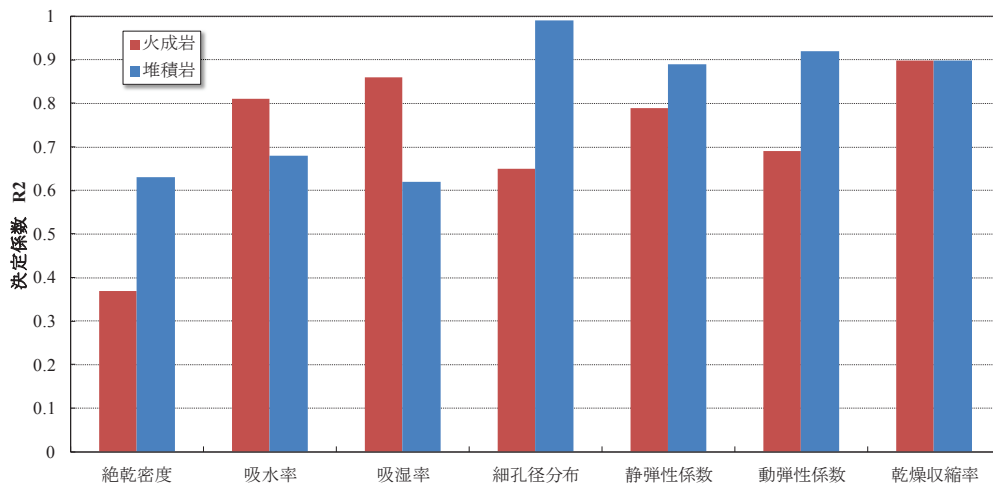


図-4.22 骨材物性を岩種で分類した場合の単回帰による決定係数

4.3.4 粗骨材粒の乾燥収縮測定方法に関する検討

(1)目的

前述したように、コンクリートの乾燥収縮ひずみを評価指標として、単独の物性としては粗骨材粒の乾燥収縮が有効であることが確認された。これまでも、粗骨材粒にひずみゲージを貼り付けてひずみ変化を計測した事例はあるが、測定手法については各研究者の独自の判断によるものであった。ここでは、粗骨材粒の乾燥収縮率測定の実用性向上を目的として、粗骨材の粒径、ひずみの測定方向、サンプル数が測定結果に及ぼす影響について検討を行った。

(2)使用材料

対象は安山岩(G5)、石灰岩(G11)、2種類の硬質砂岩(G15、G16)の計4種類とした。表-4.8に、使用した粗骨材の吸水率・絶対乾密度とコンクリートの乾燥収縮ひずみを示す。

表-4.8 粗骨材の物性およびコンクリートの乾燥収縮

記号(岩種)	吸水率 (%)	絶対乾密度 (g/cm ³)	コンクリートの乾燥収縮ひずみ(μ)
G5(GA)	2.47	2.57	-820
G11(GL)	0.44	2.69	-512
G15(GS1)	0.74	2.64	-709
G16(GS1)	1.88	2.56	-1036

(3)実験因子

表-4.9に、実験要因と試料の条件を示す。要因として、粒径、測定方向、サンプル数の影響を検討した。試料は、JIS A 1102(骨材のふるい分け試験方法)に準じて粒径の範囲を3群(5~10mm、10~15mm、15~20mm)に分け、その中から検討内容に応じて所要数の粗骨材粒をサンプリングした。粒径の検討では、3群からそれぞれ15個ずつ、測定方向および測定個数の検討では粒径

15~20mmの中から60個選んだ。

表-4.9 実験要因と試料の条件

要因	試料数 (個)	粒径の範囲(mm)		
		5~10	10~15	15~20
粒径	15	○	○	○
測定方向	60	-	-	○
サンプル数	60	-	-	○

(4)実験方法

粗骨材粒の乾燥収縮率はひずみゲージで測定した。粒径 5~10mm の粗骨材には検長 0.3mm, それ以外の粗骨材については検長 2mm の箔ゲージを用いた。測定方向の検討では、検長 2mm の 2 軸積層型(90°)を用いた。ひずみゲージ貼付け面は、ベンチグラインダおよびサンドペーパーによって平面処理し、防水を目的としたポリエステル系接着剤による下地処理とブチルゴム系のコーティング剤によるゲージ表面の被覆を行った。

ひずみゲージを貼り付けた粗骨材粒を 20℃水中に浸せきし、ひずみが安定するまで静置した(7日以上)。その後、20℃-60%R.H.でひずみが安定するまで乾燥し(7日以上)、乾燥開始時からのひずみ変化量を乾燥収縮ひずみ(符号は収縮側を負)とした。

(5)実験結果

①粒径の影響

図-4.23 に、粒径別の粗骨材の乾燥収縮ひずみを試料毎に示す。いずれの試料も、粒径が小さくなるほど乾燥収縮率が大きくなった。また、粒径間の大小差は粗骨材の乾燥収縮ひずみが大きいものほど大きくなる傾向であった。骨材粒径が小さくなるとともに、内部比表面積が大きくなる⁸⁾ことが報告されており、比表面積と収縮の関係性を勘案すると、本検討でも粒径に応じて比表面積が変化している可能性がある。粒径の影響が無視できないことから、測定には同程度の粒径の試料を用いて評価することが適当と考えられる。

②測定方向の影響

図-4.24 に、第 1, 2 軸で測定された乾燥収縮率の大きい方(最大ひずみ)と、小さい方(最小ひずみ)の比較を示す。最小ひずみと最大ひずみの差は 15%程度であり、測定方向の影響はそれほど大きくないことがわかる。乾燥収縮率が非常に小さい石灰岩を除き、岩種別に最大-最小ひずみ差を比較すると、砂岩砂岩(G15)が 22%、硬質砂岩(G16)が 13%、安山岩(G5)が 17%と、大差ない結果となった。堆積岩(G15, G16)と火成岩(G5)は岩石の生起条件が異なるため、異方性を示す可能性が考えられたが、本検討の範囲では明確な傾向は確認されなかった。

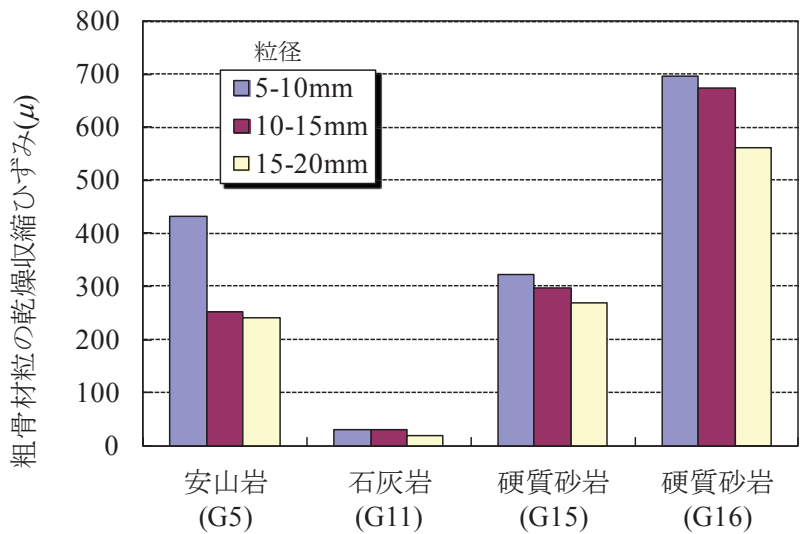


図-4.23 粗骨材の粒径と乾燥収縮ひずみ

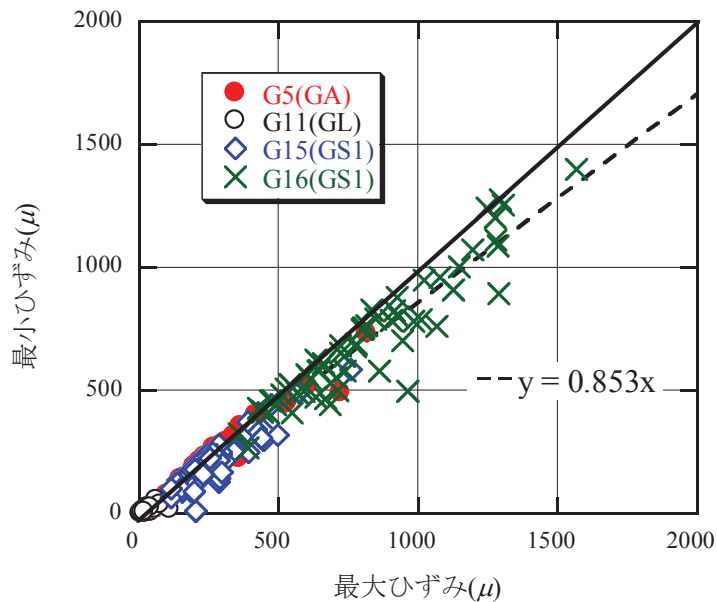


図-4.24 粗骨材粒の2方向の乾燥収縮率

③ サンプル数の影響

図-4.25 に、粗骨材粒 60 個の乾燥収縮率のヒストグラムを示す。乾燥収縮率の範囲は、安山岩(G5)が $-37 \sim -774 \mu$ (平均: 262μ)、石灰岩(G11)が $5 \sim -92 \mu$ (平均: 17μ)、硬質砂岩(G15)が $-89 \sim -673 \mu$ (平均: 237μ)、硬質砂岩(G16)が $-329 \sim -1484 \mu$ (平均: 756μ)であり、平均値に対し測定値は広く分布した。図-4.26 に、粗骨材粒の乾燥収縮率の平均値と標準偏差との関係を示す。図-4.14 の結果(n=5)および同様の実験を行なった文献結果⁹⁾も併記する。同図より、乾燥収縮ひず

みの増加にともなって標準偏差がほぼ比例して大きくなることがわかる. 測定個数が異なる場合でもその増加割合は同程度であり, 回帰直線の傾きから変動係数はおおむね40%と判断された.

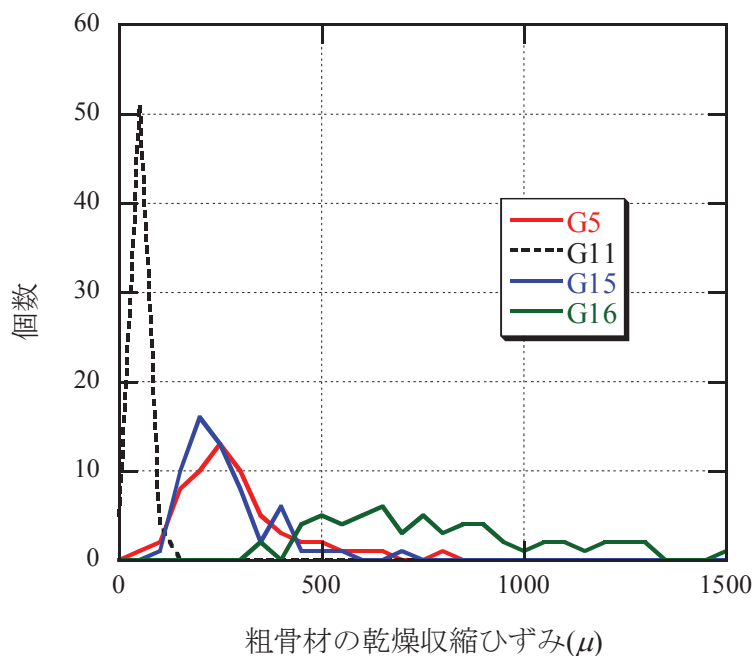


図-4.25 粗骨材粒の乾燥収縮率のヒストグラム

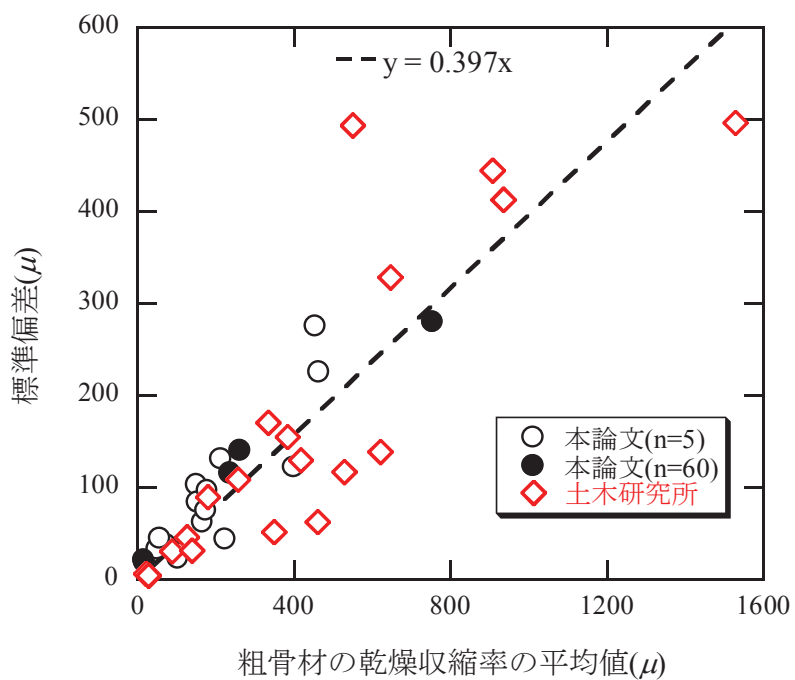


図-4.26 粗骨材粒の乾燥収縮率の平均値と標準偏差

上記の結果を用いて、信頼できる試験データが得られるサンプル数を検討した。測定を繰り返した際のばらつきは、変動係数とサンプル数から、以下の標準誤差率で表される。なお、標準誤差とは母集団からある数の標本を選んだときの統計量のばらつきである。

$$\text{標準誤差率 (\%)}: \frac{SE}{\varepsilon} \times 100 = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \frac{SD}{\varepsilon} \times 100 = \frac{CV}{\sqrt{n}}$$

ここで、 SE 、 SD ：標準誤差，標準偏差 (μ)， ε_{ag} ：粗骨材粒の乾燥収縮率 (μ)， n ：試料数 (個)， CV ：試料間の変動係数 (%) である。

図-4.27 に、サンプル数と標準誤差率の関係を、前述の変動係数 40% を用いて計算した結果を示す。サンプル数が多くなるとともに標準誤差率が小さくなり、3 個、5 個、15 個に対し、それぞれ 23%、18%、10% 程度となった。サンプル数が多くなるほどデータの信頼性は高まることになるが、式の形状からも明らかなように、標準誤差率はサンプル数を 4 倍するごとに半減する。したがって、信頼性を大幅に向上させるためにはサンプル数が飛躍的に増加することになる。サンプル数は、目的に応じて変化させる必要があるが、粗骨材の乾燥収縮を相対評価する上では、標準誤差率が 20%～10% 程度を確保できる 5 個～15 個程度で測定することが良いと考えられる。

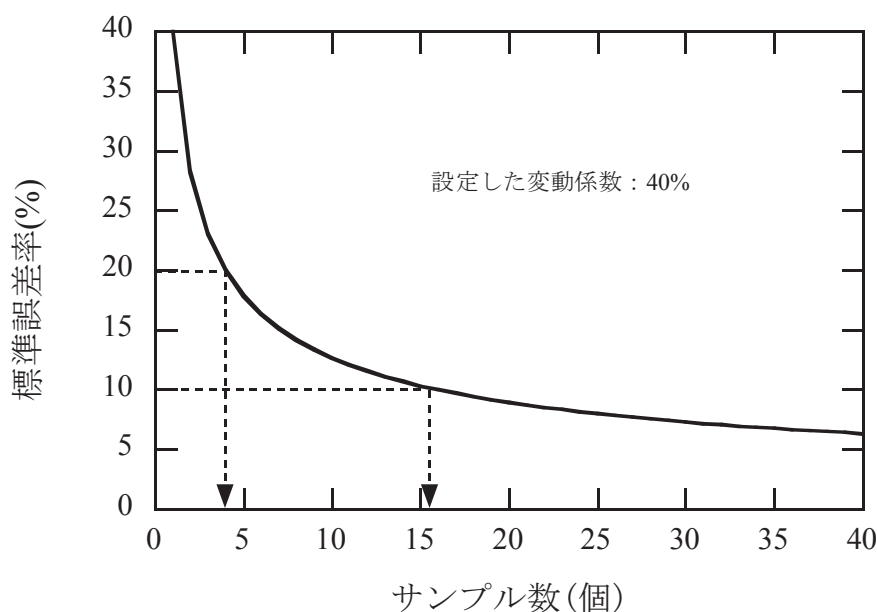


図-4.27 サンプル数と標準誤差率との関係

4.4 第4章のまとめ

本章では、コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼすとされる骨材の物性である、密度、吸水率、吸湿率、細孔径分布、静・動弾性係数、乾燥収縮率を取り上げ、コンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性について評価することで、簡易評価指標としての精度比較を行った。また、これらの指標について、統計的手法である因子分析を行うことで、コンクリートの乾燥収縮ひずみを良く説明し得る複数の指標の組み合わせを探った。さらに、粗骨材の乾燥収縮率の測定方法に関する検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの乾燥収縮ひずみは、粗骨材の種類によって大幅に異なり、乾燥期間 182 日で $-501\sim-1036\mu$ の範囲に分布した。岩種別にみると、火成岩を用いた場合の乾燥収縮ひずみは $-509\sim-820\mu$ の範囲であった。堆積岩の中では、石灰石を用いた場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみが $-501\sim-590\mu$ であり、その他の岩種よりも絶対値、分布範囲ともに小さかった。一方、堆積岩でも硬質砂岩を用いた場合の乾燥収縮ひずみは $-623\sim-1036\mu$ であり、粗骨材の種類によって大きく異なった。
- (2) 粗骨材の絶乾密度が小さくなるほど、吸水率、吸湿率が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなった。粗骨材の物性値とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性は、吸湿率が最も大きくなったが、決定係数は 0.5 を下回る結果であった(絶乾密度：0.190，吸水率：0.337，吸湿率：0.497)。
- (3) 粗骨材の細孔容積が多くなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向が認められた。細孔径を区間分けしたなかでコンクリートの乾燥収縮ひずみと相関性が最も高くなったのは、細孔径が $0.015\sim 0.0075\mu\text{m}$ の範囲であった。ただし、決定係数は 0.46 程度であり、コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する説明度は必ずしも高くなかった。
- (4) 粗骨材のコア供試体を用いて圧縮載荷試験から静弾性係数を、粗骨材粒を用いて超音波伝播時間から動弾性係数を求めた。両物性値が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向を確認した。コンクリートの乾燥収縮との相関性は比較的高く、決定係数は $0.58\sim 0.68$ であった。
- (5) 粗骨材粒の乾燥収縮率をひずみゲージによって測定し、乾燥収縮率が大きくなるとともにコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなった。両者の相関性は、決定係数が 0.898 と非常に高く、コンクリートの乾燥収縮ひずみを説明する上で有効な評価指標であると考えられた。最小二乗回帰による直線の傾きによれば、粗骨材粒の乾燥収縮率 100μ あたりコンクリートの乾燥収縮ひずみは 70μ 程度変化した。

- (6) 相関および重回帰分析によって、説明変数として粗骨材の静弾性係数(E_s)と乾燥収縮率(ε_s)を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみに関する重回帰式 $\varepsilon_c = 2.61E_s + 0.59\varepsilon_s - 742$ を導出した(決定係数 : 0.931).
- (7) 骨材を岩種(火成岩, 堆積岩)によって分類することで, 乾燥収縮率以外の物性とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性は, 岩種で分類しない場合よりも向上した(決定係数 : 0.6 以上). 同一岩種・産地の骨材品質を把握するという目的であれば, おおむね全ての骨材物性がコンクリートの乾燥収縮ひずみの簡易指標として用いることができると考えられた. 一方, 岩種等の情報がない場合は, 骨材の乾燥収縮を指標とすることが望ましいと考えられた.
- (8) コンクリートの乾燥収縮ひずみの指標として有効と考えられた粗骨材粒の乾燥収縮率の測定方法に関する検討を行い, ①粗骨材の粒径が小さいほど乾燥収縮率が大きくなる傾向が認められるため, 同程度の粒径で評価することが適当であること, ②測定方向の影響はそれほど大きくないこと, ③粗骨材粒のサンプル数は, 5~15 個程度とすることが適当であること, などがわかった.

第4章の参考文献

- 1) 加藤碩一, 脇田浩二 : 地質学ハンドブック, 朝倉書店, 2011.9
- 2) 後藤幸正, 藤原忠司 : 乾湿に伴う骨材の体積変化, 土木学会論文報告集, 第 247 号, pp.97-108, 1976.3
- 3) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直 : 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 606 号, pp.9-14, 2006.8
- 4) 藤原忠司 : 低品質の粗骨材を用いたコンクリートの諸性質, セメント・コンクリート, No.481, 1987.3
- 5) 後藤貴弘, 高尾 昇, 鳴瀬浩康 : 骨材の細孔構造とコンクリートの乾燥収縮, 「コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響」に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.7-12, 2010.12
- 6) S.P.ティモシェンコ, J.N.グーディア(著), 金多 潔(監訳) : 弾性論, コロナ社, 1973.2
- 7) HENG SALPISOTH, 仲井亮平, 服部篤史, 河野広隆 : 簡易測定可能な方法を用いた粗骨材弾性係数とコンクリートの収縮率の関係, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-284, pp.567-568, 2010.9
- 8) 日本コンクリート工学協会 : コンクリートの収縮問題検討委員会報告書, 2010.3
- 9) 樋口優香, 寺西浩司, 江崎由佳, 斉藤和秀 : コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する骨材寸法の影響, 日本建築学会大会学術講演概要集(関東), A-1(材料施工), pp.431-432, 2011.9

- 10) 独立行政法人土木研究所：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究，土木研究所資料，第 4199 号，2011.3

第5章 複合モデルによるコンクリートの 乾燥収縮予測方法の検討

5.1 はじめに

第5章では、骨材物性を考慮できるコンクリートの乾燥収縮予測式として3相複合モデルを取り上げ、予測手法としての実務上の整備を図るとともに、その予測精度を検証する。複合モデルは、理論が明快であるものの、入力パラメータとして骨材のヤング係数と乾燥収縮率のデータが必要となる。しかしながら、これらの物性値は一般的でないため、実務的に設計段階で利用することはあまり現実的とは言えない。そこで「第4章」の粗骨材のヤング係数、乾燥収縮率の評価結果および既往の研究結果に基づき、骨材の簡易な物性に関連付けたモデルを構築する。この骨材物性モデルを組み込んだ複合モデルによる予測精度を、「第3章」、「第4章」で実施したコンクリートデータおよび新たに全国のレディーミクストコンクリート工場から収集したデータを用い、現行の土木学会式と比較しながら検証する。さらに、ケーススタディを用いて、複合モデルと現行の土木学会式との関係性について考察を行う。

5.2 骨材物性のモデル化と予測精度の検証

5.2.1 3相複合モデル

「第2章」で示したように、複合モデルには様々なモデルが提案されているが、ペースト、細骨材、粗骨材のすべての相を考慮でき、拡張性の高いと考えられる寺西・佐藤¹⁾によって提案された3相複合モデルを本章における検討対象とした。以下に3相複合モデル式を示す。

3相複合モデルには、セメントペースト、細骨材、粗骨材のヤング係数及び乾燥収縮ひずみが必要になる。セメントペーストについては、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種に対し、表-5.1に示す諸係数を用いることで、ヤング係数、乾燥収縮ひずみを算出できるように整備されている。一方、骨材のヤング係数、乾燥収縮率は、実験によって入力データを用意する必要がある。また、細骨材の物性を実際に測定することは難しいため、ヤング係数 60kN/mm^2 、乾燥収縮率 337μ という、回帰分析より導き出した推奨値が提示されている。

なお、以下に示す複合モデルでは、コンクリート、セメントペースト、骨材のひずみの符号を収縮側を正としているため、本章では、これに則って収縮ひずみを表記することとする。

$$\varepsilon_{sc}(t) = \varepsilon_{sp}(t) \frac{1 - (1 - m_s n_s) V_s - (1 - m_g n_g) V_g}{n_c} \quad (5.1)$$

$$n_c = 1 + \frac{2(n_s - 1)V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1)V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1)(V_s + V_g)} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_{sp}(t) = \frac{t}{R_s(\alpha W/C + \beta) + t} R_h(\lambda W/C + \delta) \quad (5.3)$$

$$R_s = 3.29 \log(V/S) + 1.17 \quad (5.4)$$

$$R_h = 1.28 \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \quad (5.5)$$

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta \quad (5.6)$$

$$n_s = E_s/E_p, \quad n_g = E_g/E_p, \quad m_s = \varepsilon_{ss}(t)/\varepsilon_{sp}(t), \quad m_g = \varepsilon_{sg}(t)/\varepsilon_{sp}(t) \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_{ss}(t) = \frac{t}{R_a \cdot R_s(\alpha W/C + \beta) + t} \varepsilon_{ss\infty}, \quad \varepsilon_{sg}(t) = \frac{t}{R_a \cdot R_s(\alpha W/C + \beta) + t} \varepsilon_{sg\infty} \quad (5.8)$$

ここで、 ε_s ：乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 E ：ヤング係数 (kN/mm^2)、 V ：骨材体積比、 t ：乾燥期間 (日)、 W/C ：水セメント比 (%)、 V/S ：体積表面積比 (cm)、 h ：相対湿度 (%)、 R_a ：コンクリート中にある骨材とセメントペースト成分おのの乾燥収縮の進行速度の比率を表す定数、 $\varepsilon_{s\infty}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$)、 $\alpha, \beta, \lambda, \delta, \gamma, \eta$ ：セメントの種類に関わる定数、である。また、添字 c, p, s, g は、それぞれコンクリート、セメントペースト、細骨材、粗骨材を表す。

表-5.1 セメントの種類に応じた諸係数

セメント種類	α	β	λ	δ	γ	η
普通ポルトランドセメント	0.322	4.77	86.3	54	5.9	4.2
フライアッシュセメント	0.518	-4.72	67.8	581	6.9	0.2
高炉セメント B 種	0.608	-10.77	143.7	-1408	6.9	-0.9

5.2.2 セメントペーストの乾燥収縮

前述したように、表-5.1 に示す諸係数によってセメントペーストの物性は表現される。ここでは、普通ポルトランドセメントのペーストの乾燥収縮ひずみを実際に測定し、予測式との整合性を確認する。

(1) 使用材料・配合

セメントペーストの使用材料は、セメントおよび上水道水である。W/C は 50% および 30% とした。

(2)練混ぜ・成形方法

セメントペーストの練混ぜには、JIS R 5201¹⁹⁹⁷「セメントの物理試験方法」に示される機械練り用練混ぜ機(ホバートミキサ, 容量 10L)を用いた。練混ぜ手順は、次の通りである。①練り鉢に所定量の水およびセメントを投入し、②低速で 60 秒間練り混ぜ、③30 秒間練混ぜを停止し、④その間に掻き落しを行った後、⑤低速で 120 秒間練混ぜた。W/C50%のセメントペーストは、練混ぜ後、まずビニル袋に密封状態で保管し、ブリーディングがほぼ生じなくなるまで適宜ビニル袋の上から手で練り返しを行った。W/C30%のセメントペーストは、練混ぜ後、ただちに成形を行なった。成形方法は、練りさじを用いてセメントペーストを型枠内に 2 層に分けて入れ、それぞれの層を突き棒で 15 回突いて締め固めた。さらに、表層をストレートエッジで平滑化した後、型枠上面をプラスチック板、ガラス板の順に置き、 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 90%以上の湿気箱の中で保管した。脱型は、注水後、24 時間 \pm 20 分で脱型を行った。

(3)測定方法

寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体の乾燥収縮ひずみを測定した。保存条件は、材齢 7 日まで 20°C 水中、以後、 20°C -60%R.H.とした。供試体の乾燥収縮ひずみは、両端面中央に埋め込んだ乳白ガラスの標点間距離をセメント協会が提案するマイクロメータを用いて測定した。基長は材齢 7 日とした。

(4)セメントペーストの乾燥収縮ひずみ

図-5.1 に、セメントペーストの乾燥収縮ひずみの実測値と、式(5.3)~(5.5)を用いて算出した予測値を、W/C 別に示す。乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみは、実測値が W/C50%の場合 3900μ 、W/C30%の場合 2600μ であるのに対し、予測値は W/C50%の場合 3860μ 、W/C30%の場合 2430μ であり、両者はほぼ同等であった。また、収縮の発現速度についても両者はよく一致した。

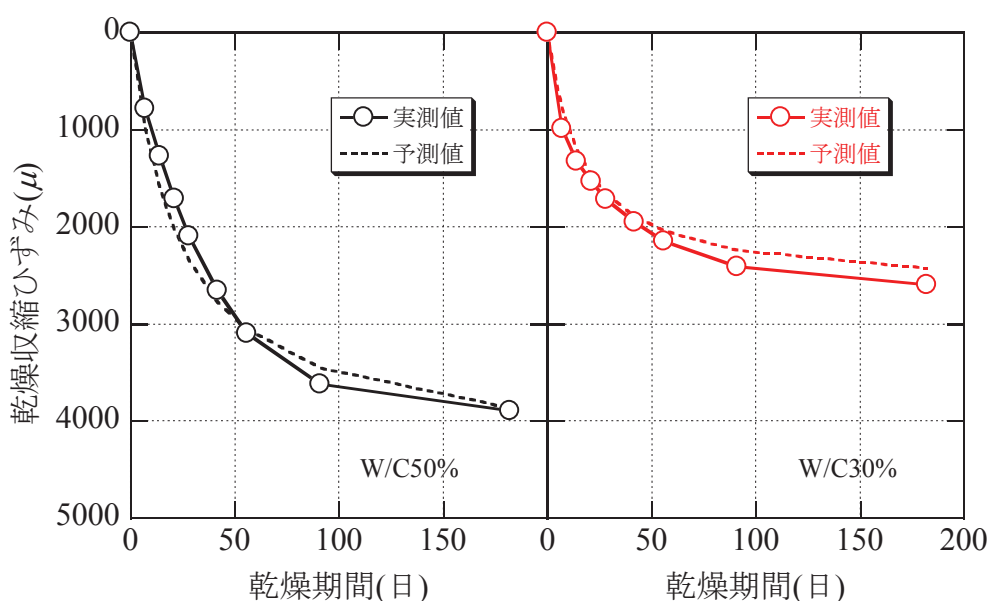


図-5.1 セメントペーストの乾燥収縮ひずみの実測値と予測値

5.2.3 骨材物性のモデル化

(1) 既往の骨材物性データ

骨材のヤング係数、乾燥収縮率をモデル化するため、「第4章」で測定した粗骨材のヤング係数、乾燥収縮率に加え、表-5.2 に示す既往の研究データを用いて行った。なお、既往の研究で数値の記載が無いものは、グラフより読み取った。骨材のヤング係数は、研究者によって試料寸法が異なったものの、いずれも骨材の原石からコアを採取し、静的載荷試験から求めたものであった。骨材の乾燥収縮率は、試料として粗骨材粒を用いたデータと骨材原石コアを用いたデータが混在していた。厳密には、原石コアと破碎工程を経た骨材とでは物性が異なる可能性もあるが、ここでは特段の区別を行わないこととした。以後、試料が粗骨材粒であっても原石コアであっても、骨材のヤング係数および乾燥収縮率と記載する。

表-5.2 骨材のヤング係数・乾燥収縮率の既往の研究の一覧

研究者・機関	ヤング係数	乾燥収縮率
	試料(寸法)	試料：寸法
寺西ら ²⁾	原石コア：φ35×70mm	粗骨材粒
田中・島 ³⁾	原石コア：100×100×200m	原石コア：100×100×200m
土木研究所 ⁴⁾	—	粗骨材粒
小山田ら ⁵⁾	原石コア：φ20×40mm	原石コア：φ20×40mm
田中・橋田 ⁶⁾	—	粗骨材粒
江口ら ⁷⁾	原石コア：φ35×70mm	原石コア：φ35×70mm
都築ら ⁸⁾	—	粗骨材粒
立松ら ⁹⁾	原石コア：φ45×50-100mm	原石コア：φ45×50-100mm
清原ら ¹⁰⁾	—	粗骨材粒

(2) 骨材のヤング係数

図-5.2 に、本論文および既往の研究データによる絶対乾密度と骨材のヤング係数との関係を示す。また、最小二乗回帰直線を併記するとともに、原石コアの実験データに基づいて提案された川上の式¹¹⁾および最近の実験データを藤倉が整理して求めた回帰式¹²⁾を併記する。同図より、絶対乾密度が大きくなるとともに骨材のヤング係数は大きくなる傾向が認められた。最小二乗回帰直線と既存の提案式と比べると、藤倉の示した提案式と回帰式はほぼ同様であった。

図-5.3 に、本論文および既往の研究データによる吸水率と骨材のヤング係数との関係を示す。また、べき乗関数による最小二乗回帰曲線および、清原らの提案式¹⁰⁾、藤倉らの提案式¹²⁾を併記する。同図より、骨材の吸水率が増加するとともに、骨材のヤング係数は小さくなる傾向であることがわかる。また、回帰曲線は併記した提案式とも概ね一致していた。

図-5.2 および図-5.3 から得られた回帰式を、式(5.9)および(5.10)にそれぞれ記す。両回帰式の決定係数は、絶対乾密度($R^2=0.347$)と吸水率($R^2=0.442$)に説明度の大幅な違いは認められなかった。

$$E_{ag} = 90.8\rho - 177 \quad R_2 = 0.347 \quad (5.9)$$

$$E_{ag} = 58.3Q^{-0.28} \quad R_2 = 0.442 \quad (5.10)$$

ここで、 E_{ag} ：骨材のヤング係数(kN/mm²)、 ρ ：骨材の絶乾密度(g/cm³)、 Q ：骨材の吸水率(%),
 である。なお、本回帰式の適用範囲は、骨材の絶乾密度 2.24~3.00g/cm³、吸水率 0.17~2.93%、
 ヤング係数 27.3~102kN/mm²である。

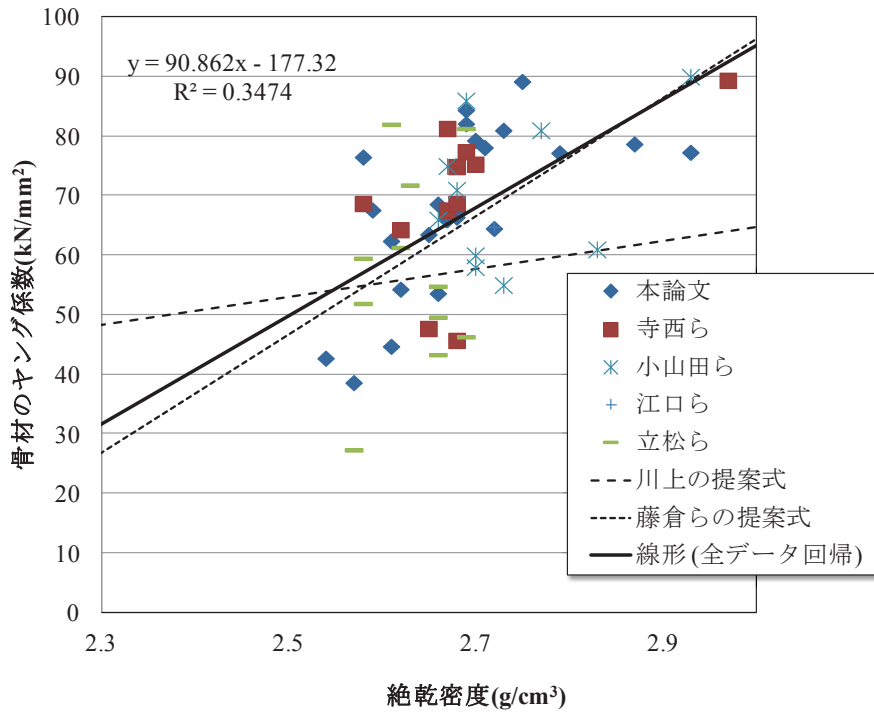


図-5.2 絶乾密度と骨材のヤング係数

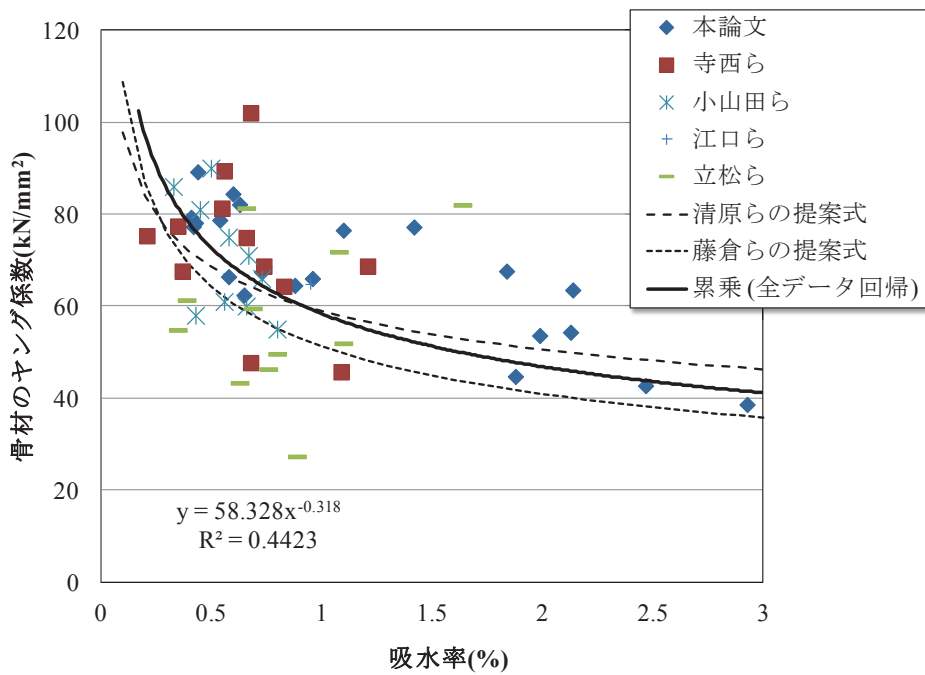


図-5.3 吸水率と骨材のヤング係数

(3) 骨材の乾燥収縮率

図-5.4 に、本論文および既往の研究データによる粗骨材の吸水率と乾燥収縮率との関係を示す。同図より、粗骨材の吸水率が大きくなるほど骨材の乾燥収縮率は大きくなる傾向が認められる。ただし、骨材によって傾向が異なることが観察される。すなわち、同じ吸水率であっても乾燥収縮率が大きい骨材と小さい骨材があることである。

このような傾向は、「第4章」の検討においても確認された。粗骨材の吸水率が同じ粗骨材であっても、堆積岩を使用したコンクリートのほうが火成岩を使用したコンクリートよりも乾燥収縮ひずみが大きくなった。同じく「第4章」の検討において、骨材とコンクリートの乾燥収縮の両者には岩種によらず高い相関性があった。これらのことから推察すると、骨材の種類を堆積岩と火成岩に分類することで、図-5.4 の吸水率と骨材の乾燥収縮率の関係が整理されることになる。

他の研究者のデータにおいても、このような傾向が認められるかどうかを確認するため、粗骨材の吸水率と乾燥収縮率との関係を、堆積岩と火成岩で分類して示したのが、図-5.5、図-5.6 である。図中には、本論文における実験データのみ対象として最小二乗回帰した直線および他の研究者データを含めた全てのデータに対する回帰直線を併記する。なお、他の研究者データの中で岩種が不明なものについては回帰から除外した。同図より、堆積岩と火成岩に分類してデータを整理することで、粗骨材の吸水率と乾燥収縮率にはおおむね直線関係が認められる。また、いずれの岩種においても、本論文データのみによる回帰直線と全データによる回帰直線はほぼ一致しており、岩種分類による整理法に一般性が認められた。

以上の結果から、全データを用いた回帰直線を骨材の乾燥収縮率モデル式として採用し、堆積岩および火成岩に対して、それぞれ式(5.11)、式(5.12)に示す。

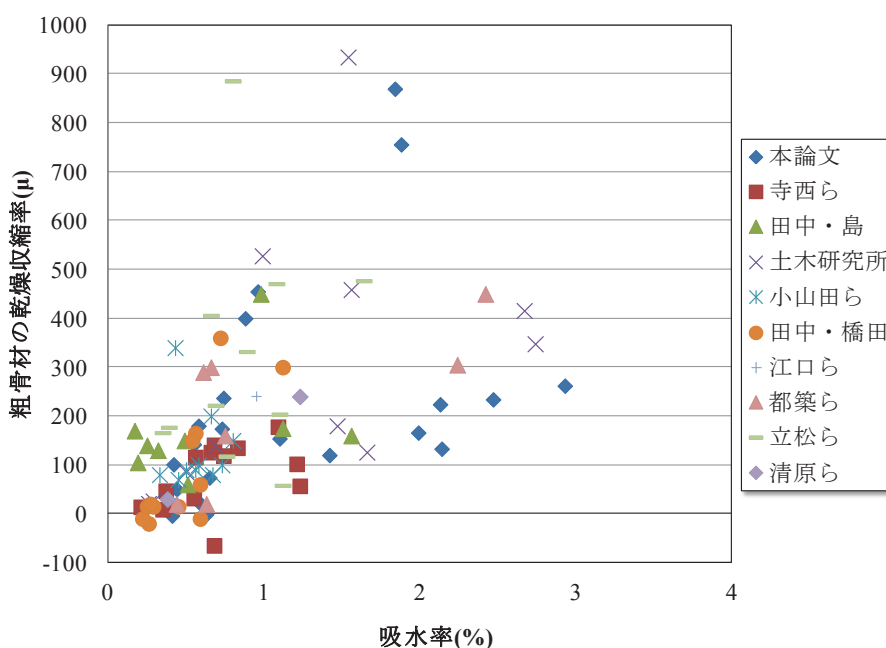


図-5.4 吸水率と粗骨材粒の乾燥収縮率との関係

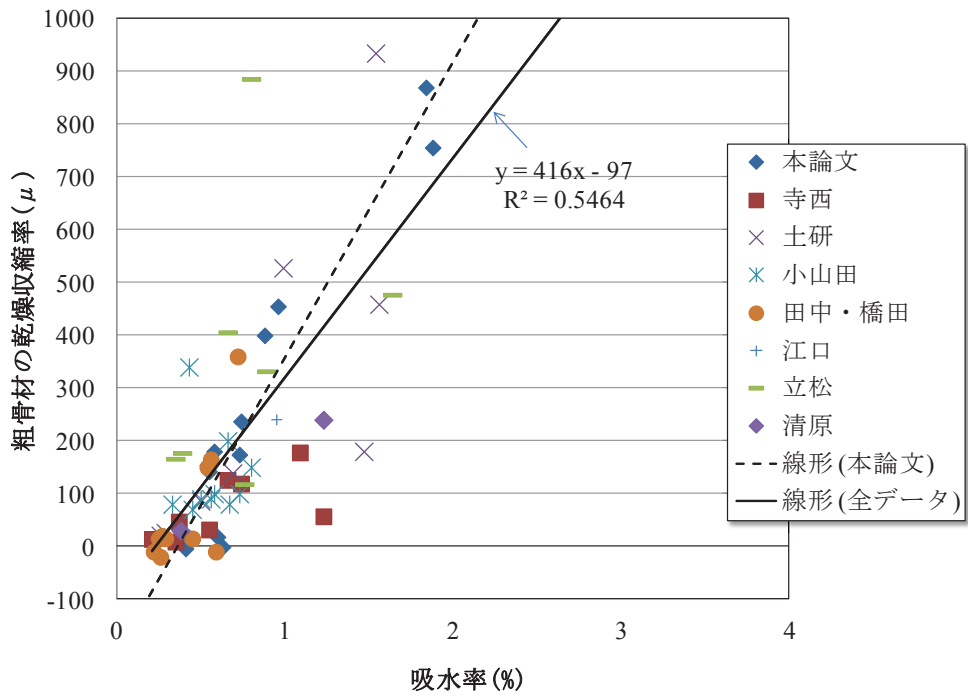


図-5.5 吸水率と骨材の乾燥収縮率との関係(堆積岩)

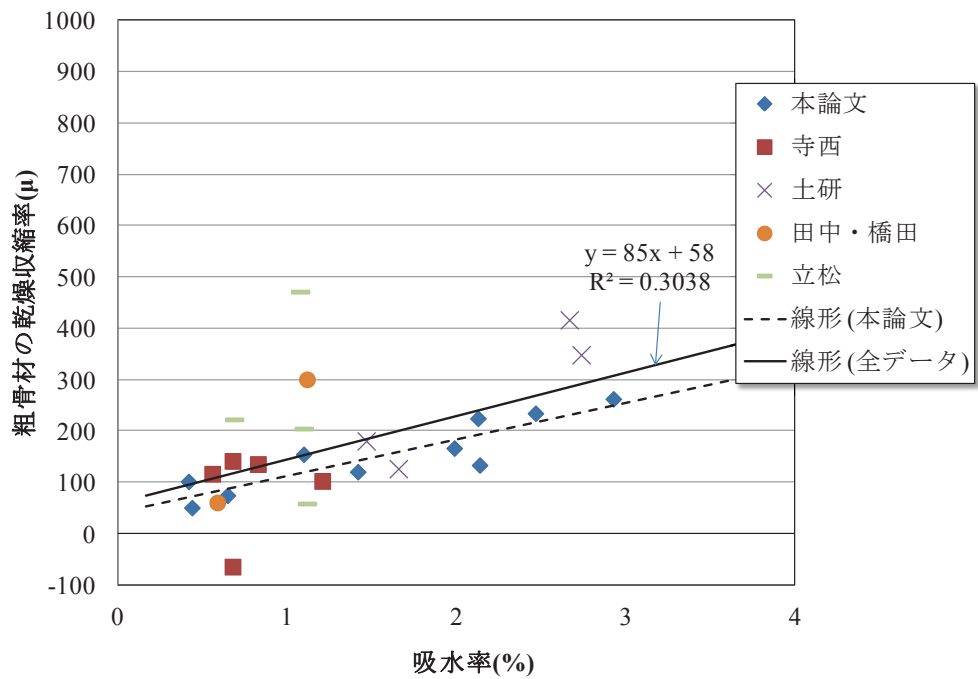


図-5.6 吸水率と骨材の乾燥収縮率との関係(火成岩)

(骨材の乾燥収縮率の予測式)

[堆積岩]

$$\varepsilon_{ag} = 416Q - 97 \quad R^2 = 0.546 \quad (5.11)$$

[火成岩]

$$\varepsilon_{ag} = 85Q + 58 \quad R^2 = 0.304 \quad (5.12)$$

ここで、 ε_{ag} ：骨材の乾燥収縮率(μ)、 Q ：骨材の吸水率(%)である。なお、本回帰式の適用範囲は、骨材の絶乾密度 2.24~3.00g/cm³、吸水率 0.17~2.93%、乾燥収縮率-65(膨張)~935(収縮) μ である。

5.2.4 骨材物性モデルの適用性の検証

(1)コンクリートの使用材料・配合

ここでは、前節で構築した骨材物性モデルを複合モデルに適用し、コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測精度を検証する。精度検証の対象として、「第3章」「第4章」で検討したコンクリートの乾燥収縮試験結果を用いることとする。表-5.3に、複合モデルに用いた骨材物性の実測値および計算値とコンクリートの乾燥収縮ひずみの一覧を示す。粗骨材の種類と記号の関係は、「第4章」における表-4.1のG2~G23に対応する。細骨材の記号は、S1, S2が「第4章」における表-4.2のS1, S2に対応する。一方、S3, S4は、それぞれ「第3章」の表-3.2(a)で示されるSS2, MS2に対応する。

粗骨材のヤング係数・乾燥収縮率の計算値は、それぞれ吸水率を用いて求めた。ヤング係数は式(5.10)を、堆積岩の乾燥収縮率は式(5.11)を、火成岩の乾燥収縮率は式(5.12)より求めた。細骨材のヤング係数・乾燥収縮率は、粗骨材の場合と同様に、吸水率と骨材物性の関係が成り立つと仮定し、式(5.10)、(5.11)、(5.12)により求めた。なお、天然砂の乾燥収縮率については、岩種の分類が困難であるため、便宜的に堆積岩の式(5.11)と火成岩の式(5.12)から求めた値の平均とした。

図-5.7に、精度検証に用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ(乾燥期間 182 日)を一覧して示す。粗骨材 G19 を用いたコンクリートは、3種類の細骨材(S2, S3, S4)を用いており、細骨材の種類が異なった場合の予測精度の検証と位置づけられる。それ以外は、粗骨材の種類に対する予測精度検証となる。

(2)検討概要

複合モデルの予測精度を検証する方法として、骨材物性モデルを用いる方法と、粗骨材物性の実測値を用いる従来方法を設定し、両者の比較を行った。表-5.4は、骨材物性モデルを用いた場合と従来法を用いた場合の各パラメータの違いをまとめたものである。骨材物性モデルによる方法は、細・粗骨材によらずそれぞれの吸水率に基づきモデルによって入力値を求めるのに対し、従来法は粗骨材の物性を実測値、細骨材の物性を寺西・佐藤ら¹⁾が回帰分析より導出した推奨値(ヤング係数 60kN/mm²、乾燥収縮率 337 μ)を用いる点異なる。

表-5.3 骨材物性の実測値・計算値およびコンクリートの乾燥収縮ひずみ

粗骨材の種類		粗骨材の物性の実測値と計算値					細骨材種と物性の計算値				コンクリートの乾燥収縮ひずみ ³⁾ (μ)		
記号 ¹⁾	岩種	Q	E_g		ε_g		記号 ²⁾	Q	E_s	ε_s	実測	計算	
			実測	計算	実測	計算						従来法	骨材モデル
G2	火成岩	1.99	53.6	47.4	166	227	S1	1.20	55.2	176	701	771	720
G4		2.13	54.3	48.0	224	220	S1	1.20	55.2	176	659	794	716
G5		2.47	42.7	39.4	234	371	S1	1.20	55.2	176	820	824	802
G8		1.10	76.5	54.8	154	163	S1	1.20	55.2	176	626	743	674
G9		0.65	62.4	57.8	74	146	S1	1.20	55.2	176	655	693	659
G10		0.44	89.2	82.8	50	84	S1	1.20	55.2	176	517	631	581
G11	堆積岩	0.43	78.1	74.6	17	86	S2	2.07	46.9	290	512	613	645
G12		0.41	79.3	81.3	-4	40	S1	1.20	55.2	176	500	598	557
G13		0.63	82.1	75.6	-1	78	S1	1.20	55.2	176	590	612	590
G14		0.60	84.4	79.9	18	49	S1	1.20	55.2	176	542	616	565
G15		0.74	68.6	63.8	237	211	S2	2.07	46.9	290	709	761	751
G16		1.88	44.7	48.2	756	685	S2	2.07	46.9	290	1036	1039	1014
G17		0.96	66.0	59.2	455	298	S2	2.07	46.9	290	873	898	806
G18		0.55	81.0	69.8	142	132	S2	2.07	46.9	290	623	713	694
G19		0.88	64.5	57.1	400	348	S2	2.07	46.9	290	865	866	836
		0.88	64.5	57.1	400	348	S3	2.26	45.6	843	1057	866	1075
		0.88	64.5	57.1	400	348	S4	2.57	43.9	624	955	866	986
G20		0.73	67.4	64.1	174	207	S1	1.20	55.2	176	626	738	684
G23	0.58	66.4	69.4	180	136	S1	1.20	55.2	176	667	735	636	

Q : 骨材の吸水率(%), $E_{s,g}$: 細・粗骨材のヤング係数(kN/mm²), $\varepsilon_{s,g}$: 細・粗骨材の乾燥収縮率(μ), 1)「第4章」の表-4.1の表記に準じる, 2)S1, S2は混合砂(砂岩砕砂+海/山砂)であり, 「第4章」の表-4.2の表記に準じる. S3, S4は, それぞれ「第3章」の表-3.2(a)で示されるSS2(砂岩砕砂), MS2(山砂)に相当, 3)乾燥期間182日の実測値, 計算値

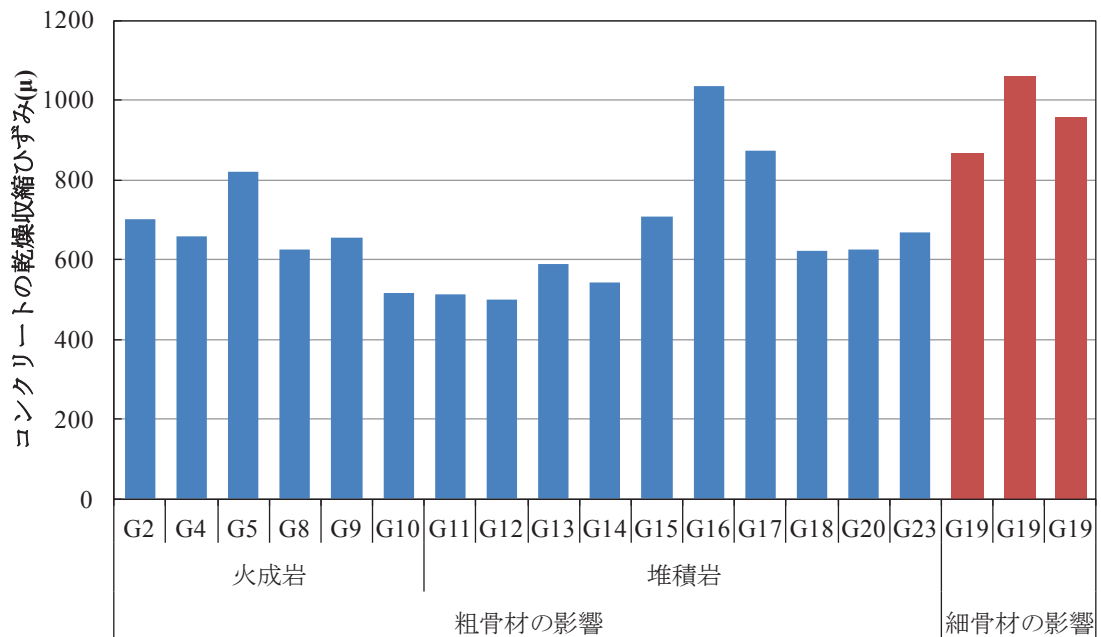


図-5.7 骨材物性モデルの適用性検証に用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ

表-5.4 従来法および骨材物性モデルを用いる方法の違い

相	物性	記号	骨材物性の実測値を用いる従来法	骨材物性モデルによる方法
コンクリート	乾燥収縮	ε_c	表-5.3	
セメントペースト	収縮	$\varepsilon_p^{1)}$	$\varepsilon_p(t) = \frac{t}{2.48(0.322W/C + 4.77) + t} (86.3W/C + 54)$	
	ヤング係数	$E_p^{2)}$	$E_p = \frac{590}{W/C} + 4.2$	
細骨材	収縮	ε_s	337 μ	$E_{s,g} = 58.3Q^{-0.28} \quad (5.11)$
	ヤング係数	E_s	60kN/mm ²	
粗骨材	収縮	ε_g	実測値(表-5.3)	$\varepsilon_{s,g} = 416Q - 97 \quad (5.12)$
	ヤング係数	E_g	実測値(表-5.3)	$\varepsilon_{ag} = 85Q + 58 \quad (5.13)$

1), 2): 表-5.1における普通ポルトランドセメントの諸係数, 相対湿度 h に 60%, $1/S$ に 2.5cm を, 式(5.3)~式(5.6)に入力した。

(3) 予測精度の検証

図-5.8 に, コンクリートの乾燥収縮ひずみの実測値と予測値との関係を, 従来法および骨材物性モデルを用いた場合についてそれぞれ示す。また, 図中のプロットは, 細骨材の種類を変化させた場合と粗骨材の種類を変化させた場合を分けて示した。なお, 実測値と予測値は, 乾燥期間 7 日, 28 日, 56 日, 91 日, 182 日で比較した。

従来法の結果である図-5.8(a)より, 粗骨材種類を変化させた実験値に対し, 予測値は, 乾燥期間によらず良く一致した。回帰直線の傾きは 1.07 であり, 予測値が実測値をやや過大評価した。決定係数($R^2=0.98$)は高く, ばらつきは小さいといえる。一方, 細骨材種類を変化させた実験値に対し, 予測値は比較的大きな乖離を生じた。これは, 細骨材物性の入力値として一定値(E_s : 60kN/mm², ε_s : 337 μ)を用いたため, 細骨材物性が異なることによる収縮の大小を反映できなかったためと推察される。

図-5.8(b)より, 骨材物性モデルを用いて予測することで, 粗骨材, 細骨材の種類のいずれを変化させた実験値に対しても, 良く再現できていることがわかる。従来法に比べると, 粗骨材種類を変化させた場合, ややばらつきが大きくなった($R^2=0.94$)。ただし, 回帰直線の傾きは 1.03 であり, 実測値と予測値の平均的な整合性は従来法よりも向上しているといえる。

表-5.5 に, 予測値から実測値を差し引いた残差の平均値, 最大値, 最小値および分散を, ①粗骨材種類を変化させたケース, ②細骨材種類を変化させたケース, ③すべてのデータを対象とするケース, をそれぞれ示す。上述したように, 従来法は粗骨材種類の変化を良く再現できるため, 残差の分散がその他の条件よりも明らかに小さい。実測値と予測値の乖離は最大でも 100 μ 以内

であった。一方、細骨材種類が変化した場合、従来法ではその影響を評価することができないため、実測値と計算値の乖離が 200μ を超える結果となった。骨材物性モデルを用いた場合、粗骨材および細骨材のいずれの種類が変化しても残差の分散は同程度であった。実測値と予測値の乖離は 150μ 以内であった。細骨材、粗骨材を区別せず、全データで残差を比較した場合、結果的には、従来法よりも骨材物性モデルを用いたほうが分散が小さく、実測値との乖離が小さくなる結果となった。

以上のことを踏まえると、骨材物性モデルを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測結果は、従来法と比べるとばらつきがやや大きくなる場合があるものの、予測精度は十分に高く、細骨材の影響を考慮できる点で従来法よりも汎用性が高いといえる。

表-5.5 残差の平均値と分散

残差	従来法			骨材物性モデル		
	粗骨材	細骨材	全データ	粗骨材	細骨材	全データ
平均値	37	-57	23	20	46	24
最大値	99	85	99	104	142	142
最小値	-32	-211	-211	-133	-31	-133
分散	697	10731	3309	2201	2779	2375

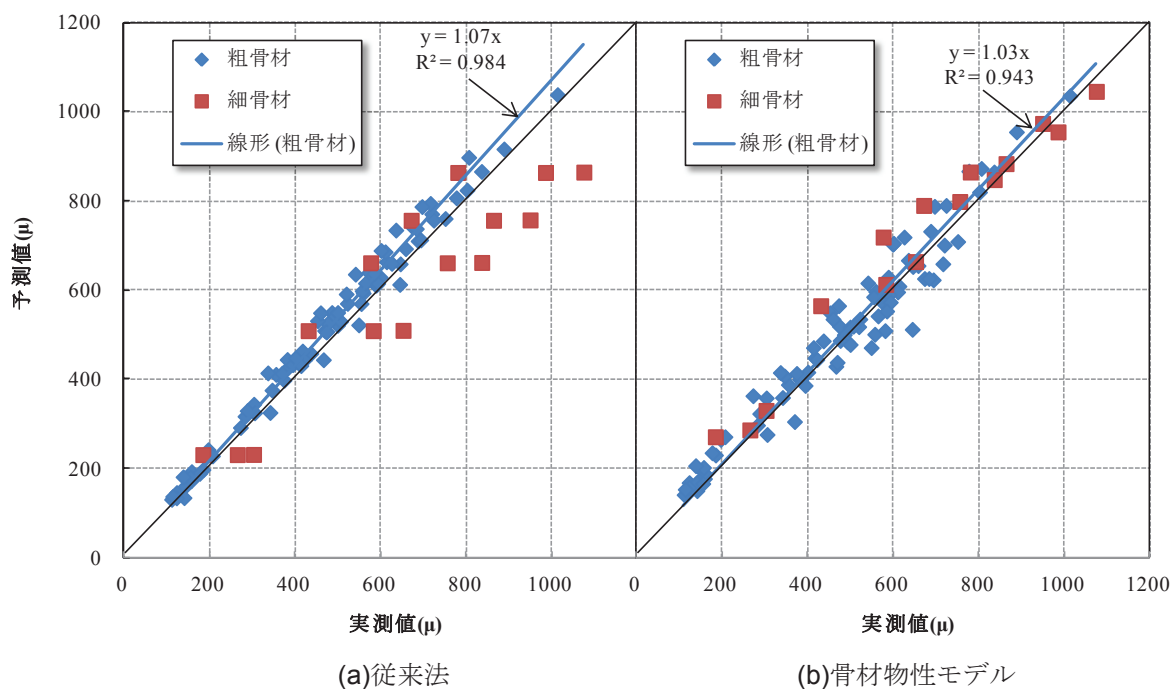


図-5.8 実測値と予測値(従来法)

5.2.5 レディーミクストコンクリートの収縮試験データによる精度検証

(1) レディーミクストコンクリートの乾燥収縮データ概要

前項 5.2.4 において、骨材物性モデルを用いた複合モデルによるコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測値が実測値と良く一致することを確認した。ただし、骨材物性モデル構築に使用した骨材の多くは、予測精度検証のためのコンクリートに使用されているものであり、両者の一致は、ある程度想定されたものといえる。骨材物性モデルの一般性を検証するためには、モデル構築の際に用いた骨材とは異なる骨材を使用した広範なコンクリートデータに対する予測精度を確認する必要があると考えられる。そこで、国内のレディーミクストコンクリート工場の乾燥収縮データを収集し、骨材物性モデルを用いた複合モデルによる予測精度の評価を行った。

表-5.6 に、収集したレディーミクストコンクリート工場の乾燥収縮試験データの概要を示す。乾燥収縮ひずみは、いずれも、JIS A 1129-2(コンタクトゲージ方法)および附属書 A(参考)に準じて測定した結果である。

図-5.9 および図-5.10 に、コンクリートの乾燥収縮ひずみ、単位水量、水セメント比、単位セメント量、呼び強度のヒストグラムを示す。コンクリートの乾燥収縮ひずみは 395~997 μ の範囲に分布し、平均値は 632 μ であった。コンクリートの配合の平均値は、単位水量が 175.8kg/m³、水セメント比が 48.4%、単位セメント量が 372.3 kg/m³、呼び強度が 33N/mm² であった。

図-5.11 に、コンクリートに使用された粗骨材の岩種と細骨材の種類の割合を示す。粗骨材は、95%が砕石、5%が砂利であった。砕石の岩種は石灰岩が半分程度、砂岩が約 1/3 を占めており、データにやや偏りがあった。細骨材は、約 70%が天然砂と砕砂の混合砂であった。砕砂を単独で使用しているコンクリートは 7%と割合としては少なかった。

表-5.6 収集した乾燥収縮データの概要

項目	範囲 (平均値)
データ数	118
乾燥収縮ひずみ(μ)	395~997 (632)
呼び強度(N/mm ²)	21~57 (33)
水セメント比(%)	35.5~58.9 (48.4)
単位水量(kg/m ³)	152~186 (175.8)
単位セメント量(kg/m ³)	284~508 (372.3)
単位粗骨材量(kg/m ³)	833~1045 (946)
セメントの種類	普通ポルトランドセメント
細骨材の岩種	砕砂(石灰岩、硬質砂岩、安山岩、花崗岩、粘板岩、流紋岩)、天然砂(陸砂、山砂、海砂)を単独および混合したもの
粗骨材の岩種	石灰岩、硬質砂岩、凝灰岩、粘板岩、玄武岩、安山岩、石英粗面岩、流紋岩、花崗岩、角閃岩、輝緑岩、砂利

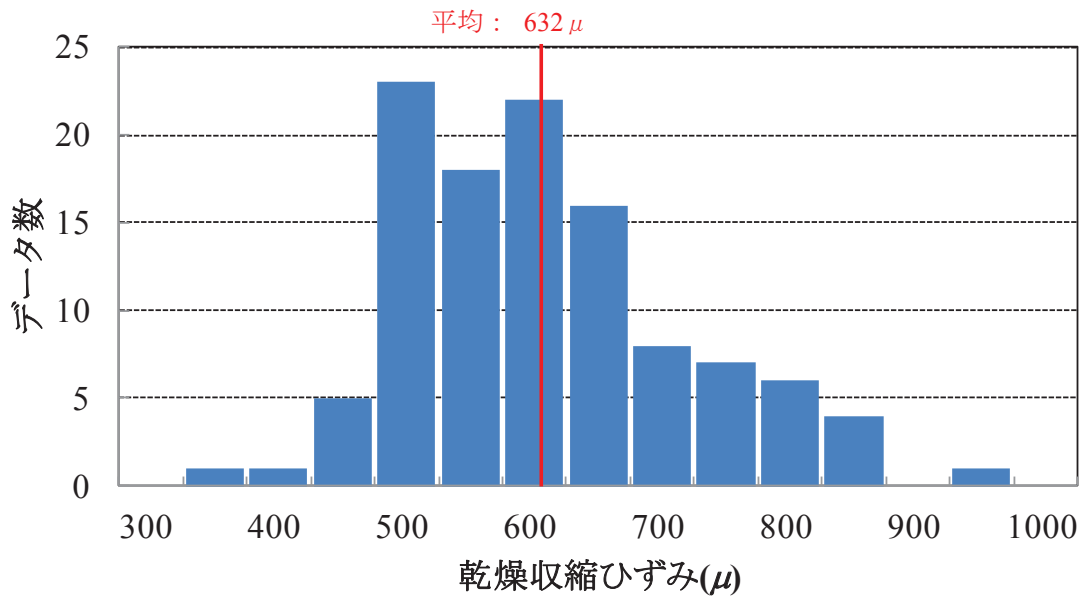
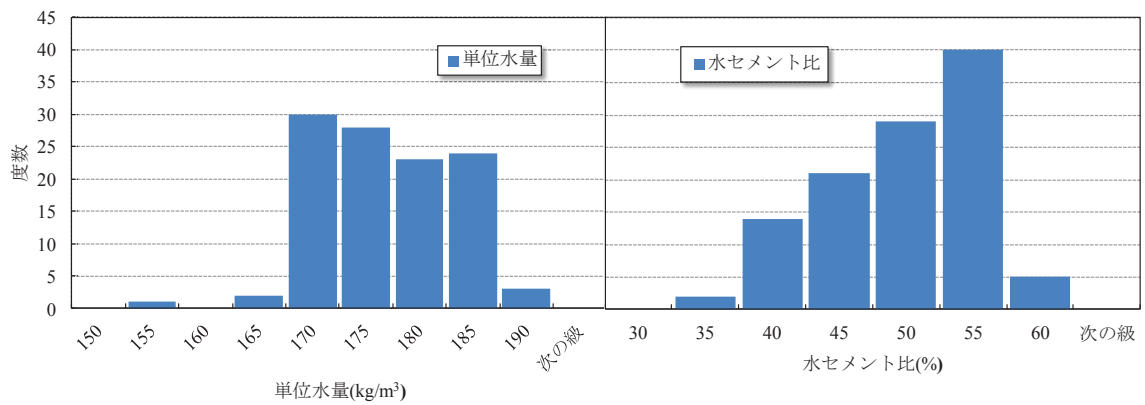
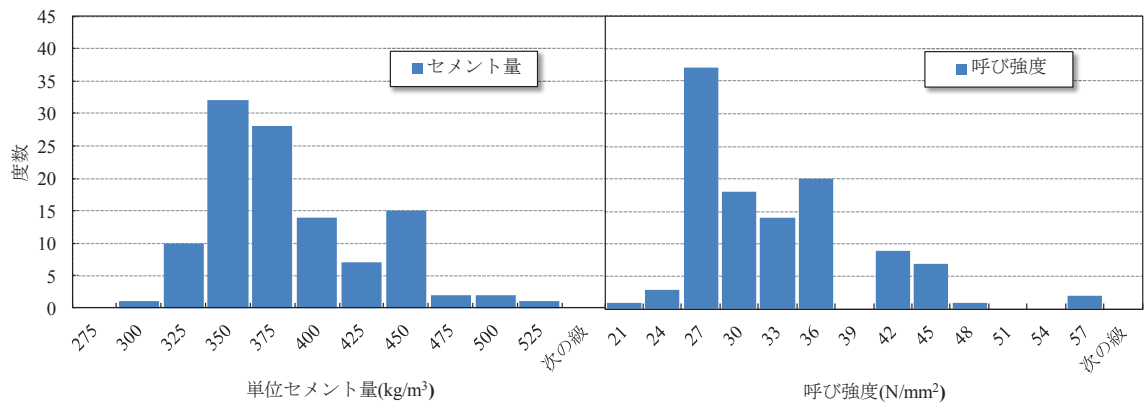


図-5.9 収集データのコンクリートの乾燥収縮ひずみ



(a)単位水量

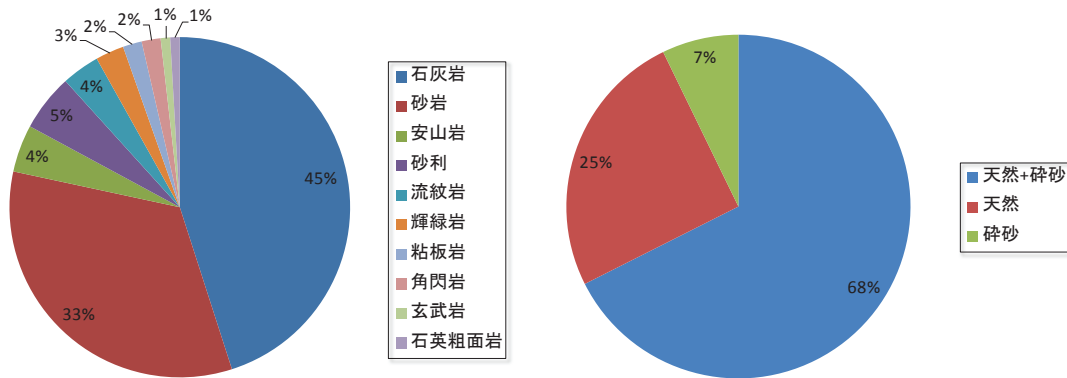
(b)水セメント比



(c)単位セメント量

(d)呼び強度

図-5.10 収集データのコンクリートの配合データ



(a)粗骨材の岩種

(b)細骨材の種類

図-5.11 収集データのコンクリートに使用した骨材の岩種・種類

(2)検討概要

複合モデルによる予測には、細・粗骨材とも骨材物性モデルを用いるケース(ケース①)に加え、細骨材物性のみ一定値($E_s : 60\text{kN/mm}^2$, $\varepsilon_s : 337\mu$)を用いるケース(ケース②)によって精度を確認した。比較として2012年制定土木学会コンクリート標準示方書に示される予測式(以下、土木学会式)の精度を確認した。土木学会式は、以下の式(5.13)~(5.15)に示すとおりである。ここで、土木学会式の適用範囲は単位水量 W が 175kg/m^3 以下に制限されていることから、収集データの半数程度が適用範囲外となる。しかしながら、同式を提案した綾野ら¹³⁾の研究では、単位水量 W が 200kg/m^3 程度までのコンクリートデータに基づいて予測式を構築していることから、本収集データにも適用できると判断した。また、土木学会式では、骨材の品質を表す係数 α に、標準的には4を用いてよいとしているが、綾野ら¹³⁾の研究では、砂岩骨材の場合は $\alpha=6$ とすることで予測精度が向上すると報告している。そこで、粗骨材に砂岩を使用しているコンクリートに対しては $\alpha=6$ とするケース(ケース③)、骨材種類によらず $\alpha=4$ とするケース(ケース④)とを設定して精度を確認した。表-5.7 に、各ケースの条件をまとめて示す。

$$\varepsilon'_{sh}(t, t_0) = \frac{\frac{1 - RH/100}{1 - 60/100} \cdot \varepsilon'_{sh,inf} \cdot (t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)} \tag{5.13}$$

$$\varepsilon_{sh,inf} = \left(1 + \frac{\beta}{182}\right) \cdot \varepsilon'_{sh} \tag{5.14}$$

$$\beta = \frac{30}{\rho} \left(\frac{120}{-14 + 21C/W} - 0.70 \right) \tag{5.15}$$

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20 + 30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \right) \quad (5.16)$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_S}{100 + \omega_S} S + \frac{\omega_G}{100 + \omega_G} G \quad (5.17)$$

ここで、 $\varepsilon'_{sh}(t, t_0)$ ：部材の収縮ひずみ、 t, t_0 ：コンクリートの材齢および乾燥開始材齢(日)、 RH ：構造物の置かれる環境の平均相対湿度(%), d ：有効部材厚(mm), $\varepsilon_{sh,inf}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値、 β ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数、 ε'_{sh} ：収縮の試験値の推定値(μ)、 W ：コンクリートの単位水量(kg/m^3)、 C/W ：セメント水比、 α ：骨材の品質の影響を表す係数($\alpha=4\sim 6$)。標準的な骨材の場合 $\alpha=4$ 、 $\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量、 ω_S および ω_G ：細骨材および粗骨材の吸水率(%), S および G ：単位細骨材量および単位粗骨材量(kg/m^3)

表-5.7 精度検証ケースと条件

条件	複合モデル		土木学会式	
	ケース①	ケース②	ケース③	ケース④
骨材物性モデル式(5.11)~(5.13)	細・粗骨材	粗骨材 (細骨材は推奨値)	-	-
骨材の品質の影響を表す係数 a	-	-	4(砂岩骨材以外) 6(砂岩骨材)	4(全骨材)

図-5.12 および図-5.13 に、複合モデルおよび土木学会式の予測値と実測値の関係を示す。また、表-5.7 に予測値から実測値を差し引いた残差の平均値と分散を示す。

図-5.12 より、複合モデルを用いたケース①、②の予測値は、いずれも実測値をほぼ±50%の範囲で再現していることがわかる。ケース①の回帰直線の傾きは1であり、予測値と実測値は平均的に良く一致した。決定係数は $R^2=0.86$ であり、高い相関性を示した。ケース②の場合、回帰直線の傾きは1.08であり、予測値が実測値をやや過大に評価する傾向であった。決定係数は $R^2=0.79$ であり、ケース①の決定係数を下回ったものの、同じく高い相関性を示した。これらのことから、骨材物性モデルを粗骨材だけでなく細・粗骨材の両者に適用したほうが予測精度の向上が図れることが確認された。

図-5.13 より、土木学会式を用いたケース③、④ともに、予測値は実測値をほぼ±50%の範囲で再現できていることがわかる。回帰直線の傾きは、ケース③が0.92、ケース④が0.87であり、いずれも予測値が実測値をやや過小評価する傾向であった。決定係数は、ケース③が $R^2=0.88$ 、ケース④が $R^2=0.86$ であった。いずれのケースも高い相関性を示したが、砂岩粗骨材の場合に $\alpha=6$ を用いたほうが、より予測精度が高くなっている。これは、綾野ら¹³⁾の研究結果と同様である。

表-5.8 より、残差の平均値はケース①が最小であり、実測値と予測値が平均的に最も一致しているといえる。一方、残差の分散、標準偏差より、ばらつきはケース③が最も小さかった。ケー

ス①とケース④がほぼ同程度のばらつきであり、ケース②が最もばらつきが大きかった。ただし、各ケースのばらつきの差は、標準偏差で $10\mu\sim 20\mu$ 程度でありそれほど大きいとは言えない。

以上の結果より、本章で構築した骨材物性モデルを組み込んだ複合モデルによる乾燥収縮予測値は、現行の土木学会式と同程度の精度で実測値を再現できることが確認された。ただし、今後、より多くのデータに対し検証を進めていく必要があると考えられる。

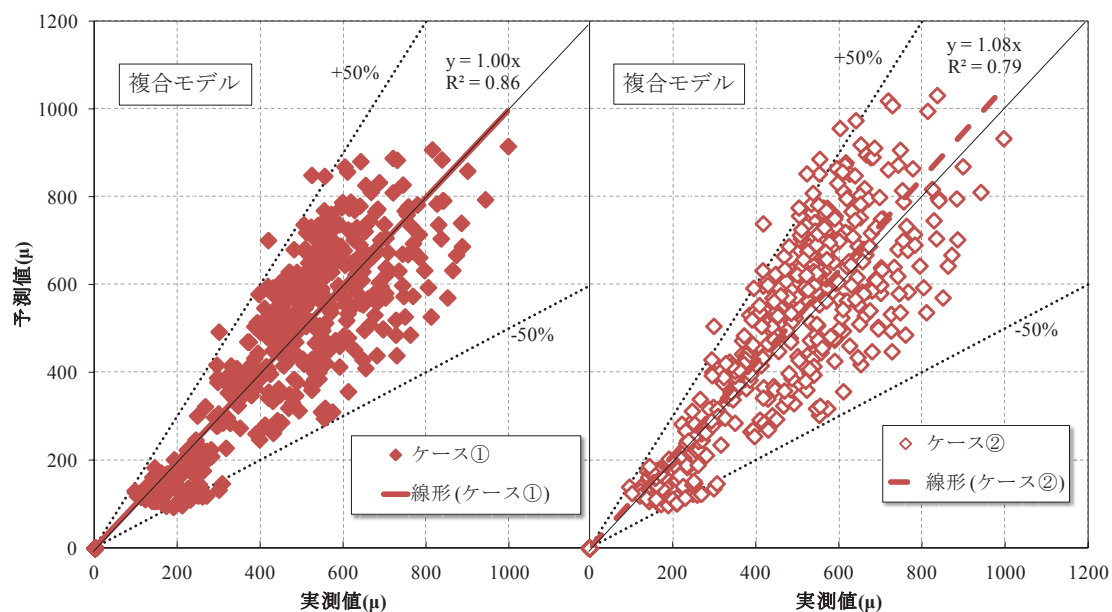


図-5.12 予測値と実測値の比較(複合モデル)

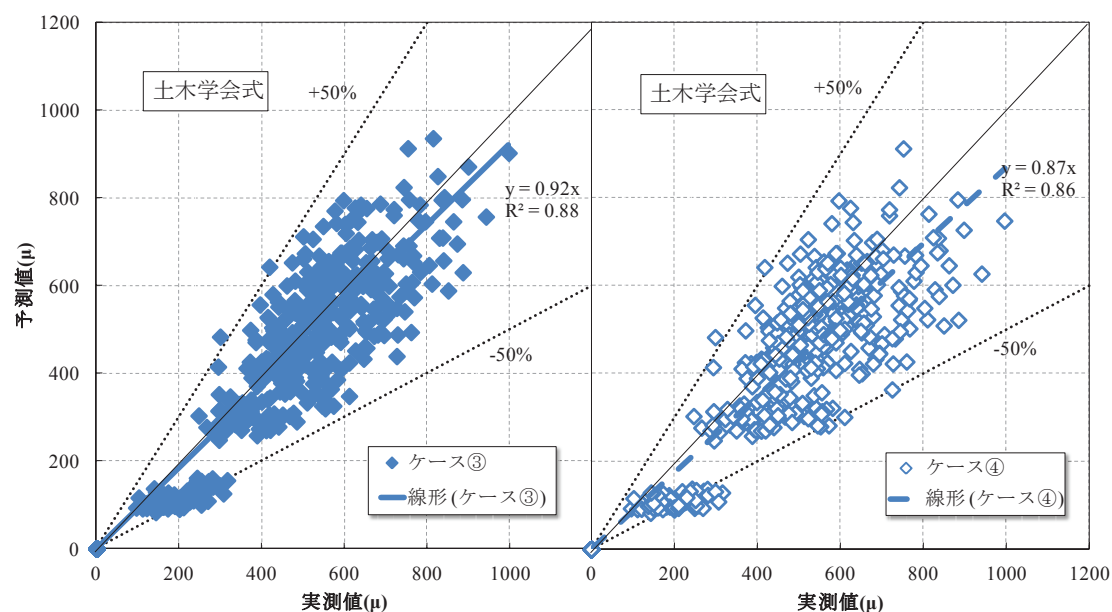


図-5.13 予測値と実測値の比較(土木学会式)

表-5.8 残差の平均値と分散

残差	複合モデル		土木学会式	
	ケース①	ケース②	ケース③	ケース④
平均値	-1	-21	31	49
最大値	289	280	287	364
最小値	-327	-353	-224	-224
最大-最小差	616	633	511	588
分散	8777	11267	6950	8143
標準偏差	94	106	83	90

5.3 ケーススタディによる複合モデルと土木学会式の比較

前項の検討より、骨材物性モデルを組み込んだ複合モデルの予測値が、現行土木学会式と同程度の精度を有することが確認された。本項では、両予測式が骨材物性の違いによってどのような相関関係にあるかケーススタディによって確認する。本検討の意義は次のとおりである。

土木学会式では、骨材品質を表す係数 α を骨材の種類・品質に応じて4~6に変化させるとしている。標準的には $\alpha=4$ とすること、綾野ら¹³⁾の検討では砂岩の場合は $\alpha=6$ とすることが良いことが報告されているが、それ以外の条件についてどのような値を選ぶべきか言及されていない。また、骨材品質を表す係数 α は、多くのデータから求めた実験定数であり、物理的根拠に乏しい。そのため、今後、骨材品質が変化した場合、改めてコンクリートデータベースを更新せざるを得ず、膨大な労力がかかるといった課題がある。骨材のヤング係数や乾燥収縮率といった物性を陽な形で組み込む複合モデルと、実験定数の形でその影響を組み込む土木学会式との相関関係を把握することで、骨材種類に応じた係数 α の提案や、物理的な意味の付与につながると考えられる。

具体的な検討方法は、コンクリート配合を仮定し、両予測式のパラメータとなる骨材の吸水率を変化させた場合、乾燥収縮の予測値がどのように変化するかを比較する。

ケーススタディのために仮定したコンクリートの配合を表-5.9に示す。コンクリートは、単位水量170kg/m³、W/C50%、空気量4.5%とし、単位粗骨材絶対容積を0.350m³/m³とした。細・粗骨材の表乾密度をそれぞれ2.60g/cm³、2.65g/cm³と仮定して単位量を算出した。

表-5.10に、検討ケース別に、細・粗骨材の骨材種類の組み合わせと吸水率の範囲を示す。細骨材および粗骨材の組み合わせは、ケース①堆積岩+堆積岩、ケース②火成岩+火成岩、ケース③天然+堆積岩、ケース④天然+火成岩、とした。骨材の吸水率はJIS A 5005に準じて、0.5%~3%まで変化させた。この条件のもとで、乾燥期間6か月の乾燥収縮ひずみを、複合モデルを用いた場合と、土木学会式を用いて α を4, 5, 6に変化させた場合について比較検討した。

図-5.14に、収縮予測結果と骨材中に含まれる水分量との関係を示す。なお、骨材中の水分量が同じであっても、細骨材と粗骨材の吸水率の組合せは様々な値を取り得るため、実際には幅を

持った図になるはずであるが、ここでは簡単のため、細・粗骨材の吸水率が最小(0.5%)の場合と最大(3.0%)の場合の予測値を線分で結んだ。ケース①では、いずれの条件においても、複合モデルの結果が土木学会式の予測値を上回った。両者を整合させるためには、土木学会式の係数 α を8にする必要があった。ケース②では、 α に標準的な値である4を用いた場合と良く一致した。ケース③の場合、骨材中の水分量が小さい範囲では、複合モデルの予測値が土木学会式の予測値を上回るものの、骨材中の水分量が大きくなるとともに土木学会式($\alpha=6$)と一致する傾向であった。ケース④の場合、骨材中の水分量が小さい範囲では、複合モデルの予測値が土木学会式の予測値を上回る傾向が、骨材中の水分量が大きい範囲では、逆に、土木学会式の予測値を下回る傾向であった。

以上の結果をまとめたのが、図-5.15 である。同図によれば、粗骨材に堆積岩を用いた場合、細骨材の種類に応じて、骨材品質に関する係数 α に6~8となる。コンクリートの細骨材として砕砂を100%使用するケースはそれほど多くないが、吸水率が大きい堆積岩系の細骨材を使用する場合には、土木学会式で予測され得る収縮量を大きく超える可能性が示唆され、使用においては一定の注意が必要であると考えられる。一方、粗骨材に火成岩を用いた場合、骨材中の水分量の大小によって傾向は異なるが、評価結果の重要性が相対的に高いと考えられるコンクリートの乾燥収縮が大きい範囲では、おおむね骨材品質に関する係数 α は4となる。

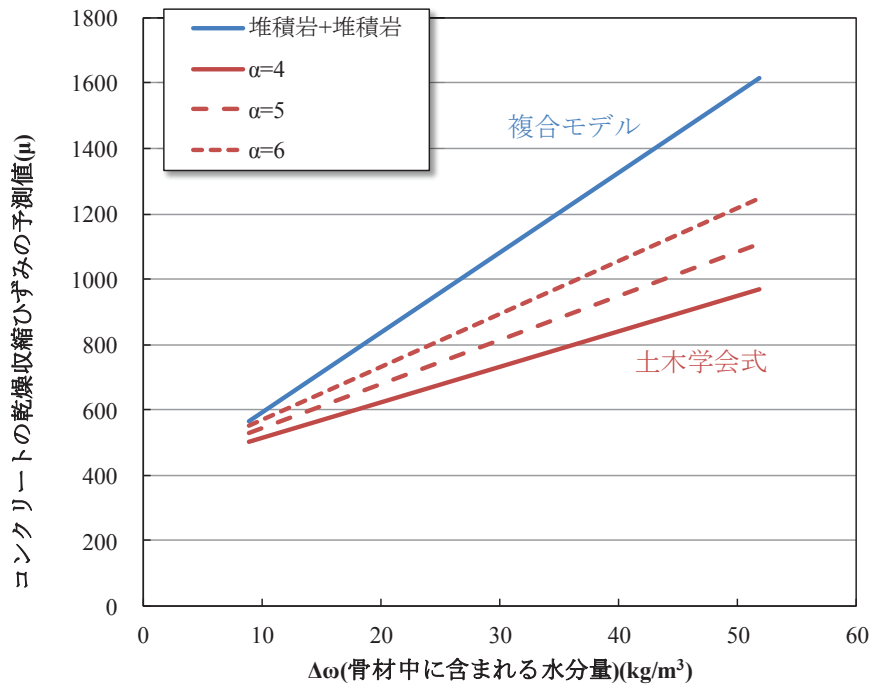
表-5.9 ケーススタディに用いたコンクリートの配合

セメント種類	空気量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S*	G*
N	4.5	50	170	340	851	928

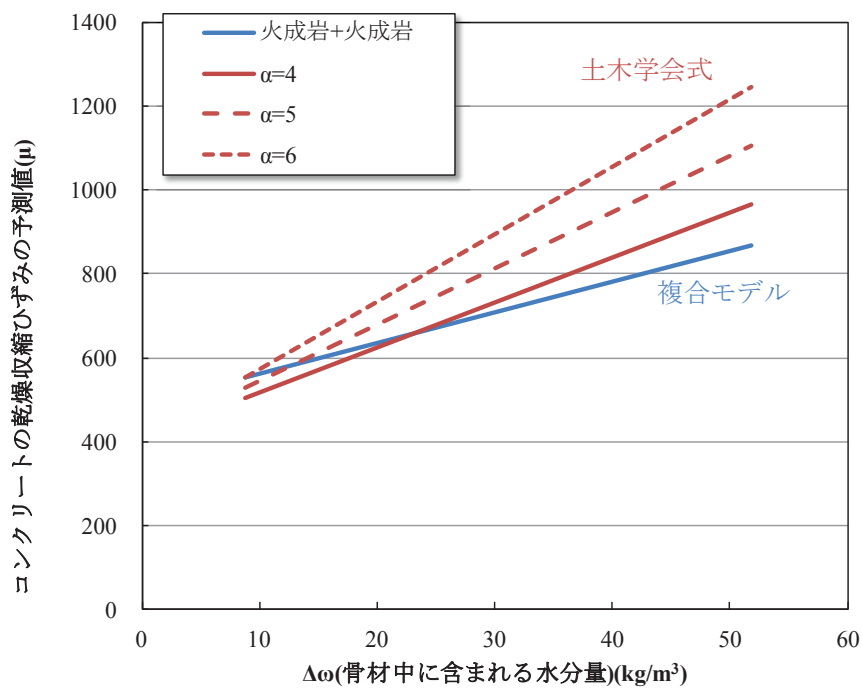
*：細骨材および粗骨材の表乾密度を 2.60 g/cm³、2.65g/cm³ と仮定

表-5.10 複合モデルで検討したケース

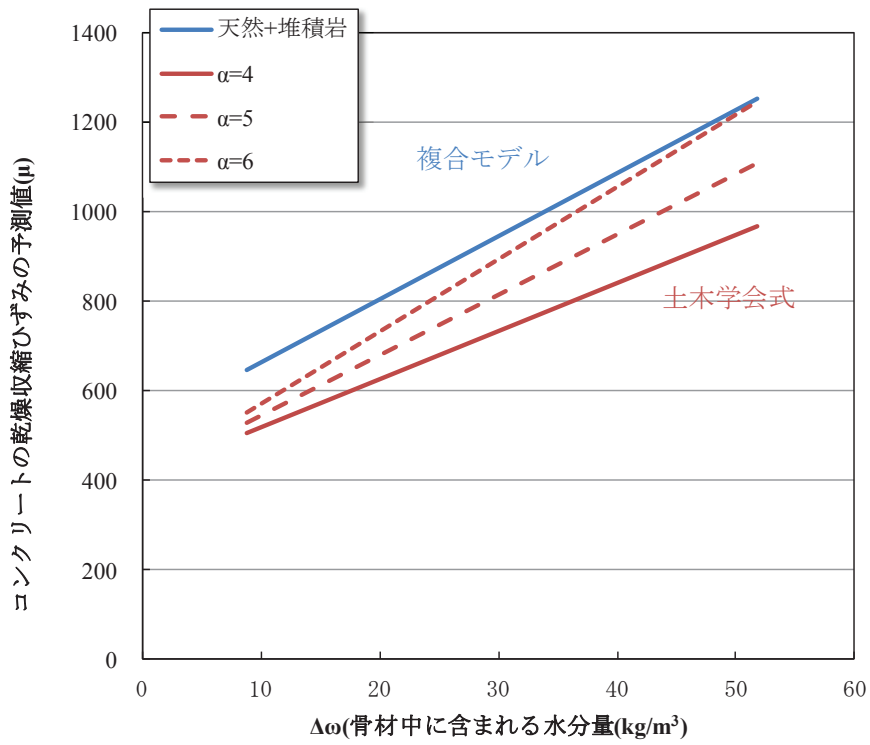
ケース	岩種		吸水率 (%)
	細骨材	粗骨材	
①	堆積岩	堆積岩	0.5~3.0
②	火山岩	火山岩	
③	天然	堆積岩	
④	天然	火山岩	



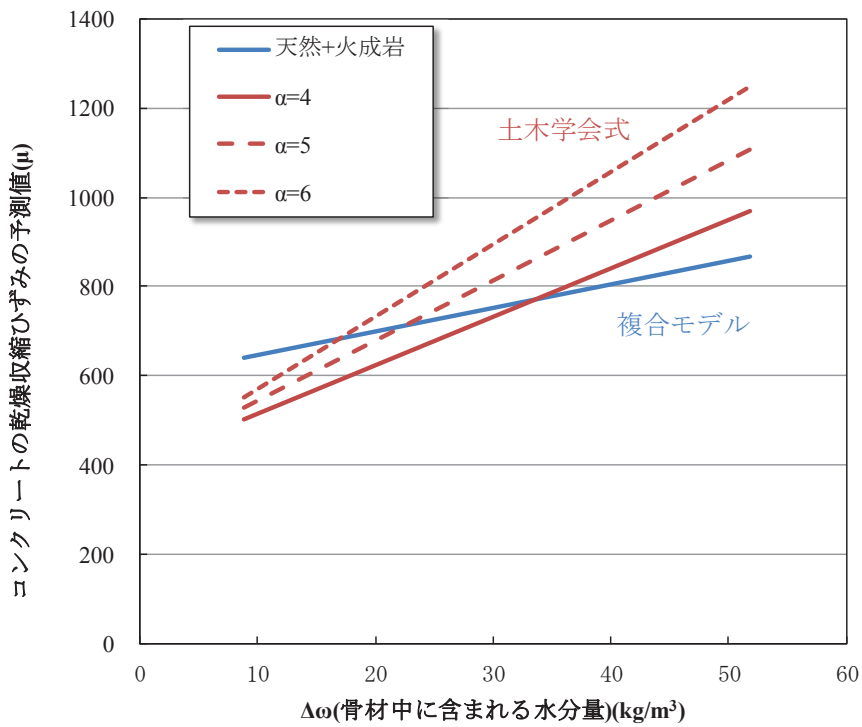
(a) ケース①



(b) ケース②



(c) ケース③



(d) ケース④

図-5.14 複合モデルと土木学会式の比較

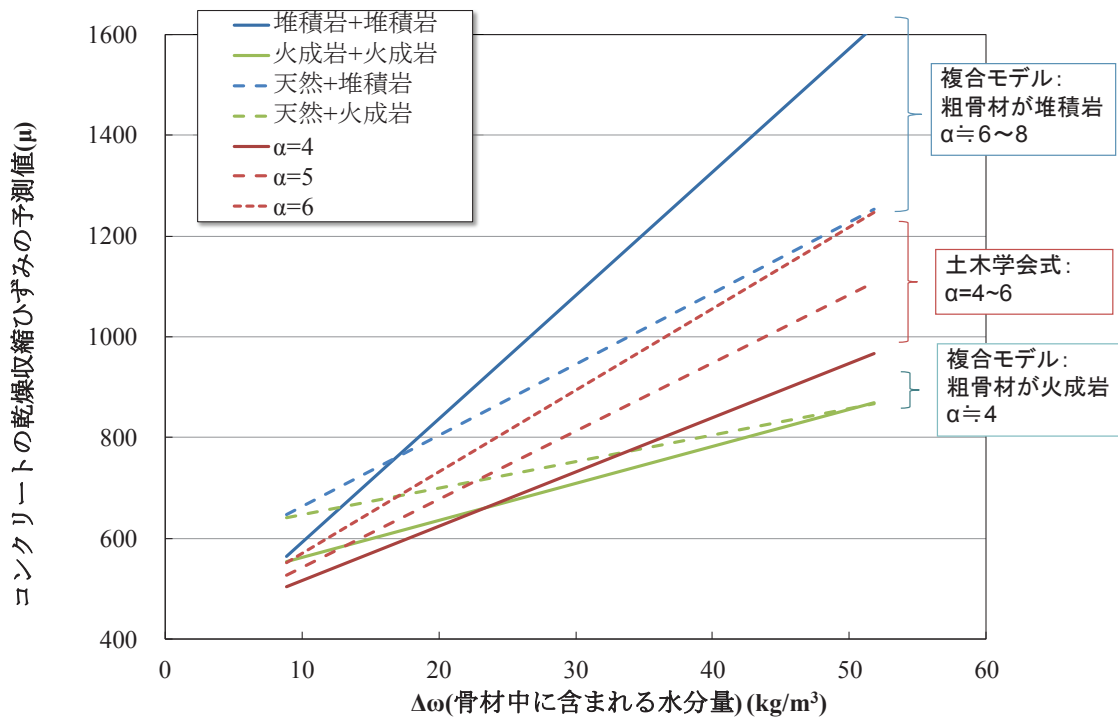


図-5.15 複合モデルと土木学会式の比較(まとめ)

5.4 第5章のまとめ

本章では、骨材物性を考慮できるコンクリートの乾燥収縮予測式として3相複合モデルを取り上げ、予測手法としての実務的な整備を図るとともに、その予測精度を検証した。「第4章」の粗骨材のヤング係数、乾燥収縮率の評価結果および既往の研究結果に基づき、骨材の簡易な物性に関連付けたモデルを構築した。この骨材物性モデルを組み込んだ複合モデルによる予測精度を、「第3章」、「第4章」で実施したコンクリートデータおよび新たに全国のレディーミクストコンクリート工場から収集したデータを用い、現行の土木学会式と比較しながら検証した。さらに、ケーススタディを用いて、複合モデルと現行土木学会式との関係性について考察を行った。

- (1) 骨材のヤング係数および乾燥収縮率を、実験データおよび既往の研究データに基づきモデル化した。骨材のヤング係数は絶対乾密度および吸水率に基づくモデル式を提案した。骨材の乾燥収縮率は、堆積岩と火山岩に分類した直線モデル式を提案した。
- (2) 骨材物性モデルにより同定した細・粗骨材物性を複合モデルに入力したコンクリートの乾燥収縮予測精度が十分に高いことを確認した。細骨材物性を一定値(ヤング係数 60kN/mm², 乾燥収縮率 337μ)とし粗骨材物性を実測する従来法と比べ、骨材物性モデルを用いる方法は、

細骨材の種類の影響を考慮できる点で有利であることを確認した。

- (3) 骨材物性モデルを組み込んだ複合モデルによるコンクリートの乾燥収縮予測精度は、レディームイクストコンクリート工場から収集したコンクリートデータに対し、現行の土木学会式と同程度の精度で再現できることを確認した。
- (4) 複合モデルを用いたケーススタディより、土木学会式の骨材品質に関する係数 α の値は、粗骨材に堆積岩を用いた場合 6~8、火成岩を用いた場合 4 程度となった。細・粗骨材ともに吸水率の大きい堆積岩を使用した場合、土木学会式で予測され得る収縮量を大きく超える可能性があることが示唆された。

第 5 章の参考文献

- 1) 寺西浩司, 佐藤嘉昭: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, ー3 相モデルへの展開および外的要因の影響の考慮ー, 日本建築学会構造系論文集, No.602, pp.21-28, 2006.4
- 2) 寺西浩司, 樋口優香: 骨材がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響 その 1, 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1(北陸), pp.929-932, 2010.9
- 3) 田中希枝, 島 弘: 骨材の乾燥収縮とヤング係数を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する複合モデルの検証, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.1, pp.72-82, 2012.3
- 4) 土木研究所: 骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究, 土木研究所資料 第 4199 号, 2011.3
- 5) 小山田哲也, 小田島悠弥, 越谷 信, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に対する石灰石骨材の有効性, コンクリート工学年次論文集, pp.359-364, Vol.32, No.1, 2010.6
- 6) 田中博一, 橋田浩: 骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.553-558, 2009.7
- 7) 江口清, 寺西浩司: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.15-22, 2002.7
- 8) 都築正則, 友澤史紀, 千歩 修, 浜 幸雄: 各種の粗骨材を用いたコンクリートにおける乾燥収縮低減剤の効果, コンクリート工学論文集, Vol.24, No.1, 2002.7
- 9) 立松和彦, 荒井正直, 岩清水隆, 木村芳幹, 浦野英男, 今本啓一, 元木 亮: 関西地区における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 549 号, pp.1-6, 2001.
- 10) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 上田賢司: コンクリートのヤング係数の推定式, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.601-606, 1999.7

- 11) 川上英男, 松田勝彦, 熊井雄大: セメント硬化体の弾性係数について, コンクリート工学年次報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 497-502, 1994
- 12) 藤倉祐介, 後藤貴弘: 構成材料の空隙構造に基づくモルタル, コンクリートの乾燥収縮推定モデルの検討, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.3, pp.309-323, 2013.9
- 13) 綾野克紀, 藤井隆史, 平 喜彦: コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.421-437, 2013.

第6章 コンクリートの収縮が RC はりのせん断耐荷挙動に及ぼす影響

6.1 はじめに

コンクリートの乾燥収縮の材料特性値は、従来 $-600\mu\sim-800\mu$ 程度とされてきたが、骨材の品質によって -1000μ を超える収縮を生じる場合があることは、これまでの章でも示してきたとおりである。近年、骨材に起因する過大収縮によってコンクリート構造物に想定外のひび割れやたわみが発生した事例が大きな問題となりとなった。しかしながら、過大な乾燥収縮が生じた場合、構造性能にどのような影響を及ぼすかについて研究した事例は少ない。今後、良質な骨材の採取が難しくなることが想定される中で、このような高収縮コンクリートを鉄筋コンクリート構造物の設計に組み込む方法を提示していく必要があると考えられる。

本章では、せん断補強筋のない普通強度 RC はりのせん断耐荷挙動に及ぼす収縮の影響を明らかにすることを目的とし、乾燥収縮が -1000μ を超える高収縮コンクリートとそれを封緘養生あるいは膨張材を使用することによって乾燥収縮を抑制した低収縮コンクリートを用いて、水結合材比(50%, 35%), 有効高さ(250mm, 500mm, 1000mm)をパラメータとした曲げせん断載荷実験を行った。実験結果に基づき、コンクリートの収縮が、普通強度 RC はりのせん断強度に及ぼす影響のメカニズムについて考察するとともに、等価引張鉄筋比による収縮の影響を考慮したせん断強度評価法の適用性について検討した。

6.2 実験概要

6.2.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-6.1に、コンクリートの使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。骨材には、同一産地の砂岩系の砕砂および砕石2005を用いた。同骨材は、事前にコンクリートの乾燥収縮を測定し、JIS A 1129-3(供試体寸法：100×100×400mm)および附属書A(参考)に準じて、温度20℃、相対湿度60%環境で乾燥期間6か月の値が -1000μ 以上($-1038\sim-1146\mu$)であることを確認した上で採用した。混和材には石灰系の低添加型膨張材を、化学混和剤にはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤およびAE剤を用いた。

主鉄筋には、PC異形鋼棒C種1号(記号：SBPD1080/1230)を用い、鉄筋の降伏前にせん断破壊を生じるようにした。載荷試験時には、鉄筋とコンクリートのずれを防止する目的で、はり端部をナットとアンカープレートで定着した(図-6.1)。

表-6.2に、コンクリートの配合を示す。目標強度レベルを 40N/mm^2 および 60N/mm^2 に設定し、

表-6.1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類/物理的性質
水	W	工業用水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
混和材	EX	低添加型膨張材(石灰系), 密度: 3.16g/cm ³
細骨材	S	砕砂, 表乾密度: 2.65g/cm ³ , 吸水率: 1.86%
粗骨材	G	砕石 2005, 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率: 0.89%
混和剤	—	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系), AE 剤

表-6.2 コンクリートの配合

シリーズ	コンクリートの種類	保管条件	目標値		W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			スランプ (cm)	空気量 (%)			W	C	EX	S	G
HS50	高収縮	気中暴露	10±2.5	4.5±1.5	50	46.4	170	340	-	832	977
LS50	低収縮	封緘養生					170	340	-	832	977
HS35	高収縮	気中暴露	15±2.5		35	41.0	170	486	-	686	1001
LS35	低収縮	封緘養生					170	466	20	686	1001

事前の確認試験に基づき水結合材比(以下, W/B)をそれぞれ50%および35%とした。単位水量はいずれも170kg/m³とした。スランプの目標値は, W/Bに応じてそれぞれ10±2.5cmおよび15±2.5cmとし, 目標空気量は4.5±1.5%とした。コンクリートの収縮量がRCはりのせん断強度に及ぼす影響を評価するため, 低収縮コンクリート(LSシリーズ)および高収縮コンクリート(HSシリーズ)を用意した(以後, シリーズ-W/Bの順にLS50, HS50, LS35, HS35と記す。)。HSシリーズは脱型後に気中暴露, LSシリーズは載荷試験直前まで封緘養生することで収縮量を制御した。なお, LS35は, 自己収縮の影響によって封緘養生するだけでは低収縮化が難しいと考えられたため, 膨張材をセメントの内割りで20kg/m³使用した。

6.2.2 供試体概要

RCはり供試体の諸元を表-6.3に, 断面図および側面図を図-6.1(a)に示す。有効高さ d を250mm, 500mm, 1000mmの3種類($d250$, $d500$, $d1000$)に変化させたせん断補強筋のないRCはり供試体を作製した。いずれの供試体も, 幅を300mm, せん断スパン有効高さ比(a/d)を3.0の一定とし, 引張鉄筋比($p_s=A_s/bd$, A_s : 公称鉄筋断面積, b : はり幅)を1.03%~1.06%と同程度に設定した。供試体数は同一諸元, 条件のものを2体ずつ作製し, 合計24体とした。

供試体を作製する際, 型枠表面には二重のポリエステルフィルムを貼り付け, その間にはグリスプレーを吹き付けることでコンクリートとの摩擦を極力低減した。コンクリートの打込み

終了後、打込み面をポリエステルフィルムと養生マットで覆い、材齢7日まで型枠内で封緘養生した。脱枠後、LSシリーズについては、アルミ粘着テープを全面に貼り付け、載荷直前まで保管した。HSシリーズについては、雨がかりのない屋内で保管した。載荷試験時の引張鉄筋ひずみのある程度揃えるため、供試体寸法に応じて養生期間を140日～300日に変化させた。気中暴露期間中の、平均相対湿度は64.4～66.3%であった。いずれの供試体も自重による曲げモーメントが極力生じないように、供試体下縁応力で $0.015\text{N}/\text{mm}^2$ 以下となるよう支点位置を調整した。供試体の保管状況を写真-6.1に示す。

各コンクリートの自由ひずみ挙動を確認するため、RCはり供試体と同断面外寸で、長さが1000mmの無拘束供試体を各条件1体ずつ用意した(図-6.1(b))。材齢7日で脱枠後、封緘養生するものは全面をアルミ粘着テープでシールした。気中暴露するものは、乾燥の影響を長さ方向に限

表-6.3 RCはり供試体の諸元

記号	d (mm)	h (mm)	L (mm)	c (mm)	a (mm)	b (mm)	a/d	p_s (%)
d250	250	305	2300	200	750	300	3.0	1.03 (2D22)
d500	500	580	4500	500	1500			1.06 (2D32)
d1000	1000	1130	7500	500	3000			1.06 (4D32)

d : 有効高さ, h : 高さ, L : 長さ, c : 載荷点距離, a : せん断スパン, b : はり幅, p_s : 引張鉄筋比($=A_s/bd$), A_s : 引張鉄筋の公称断面積

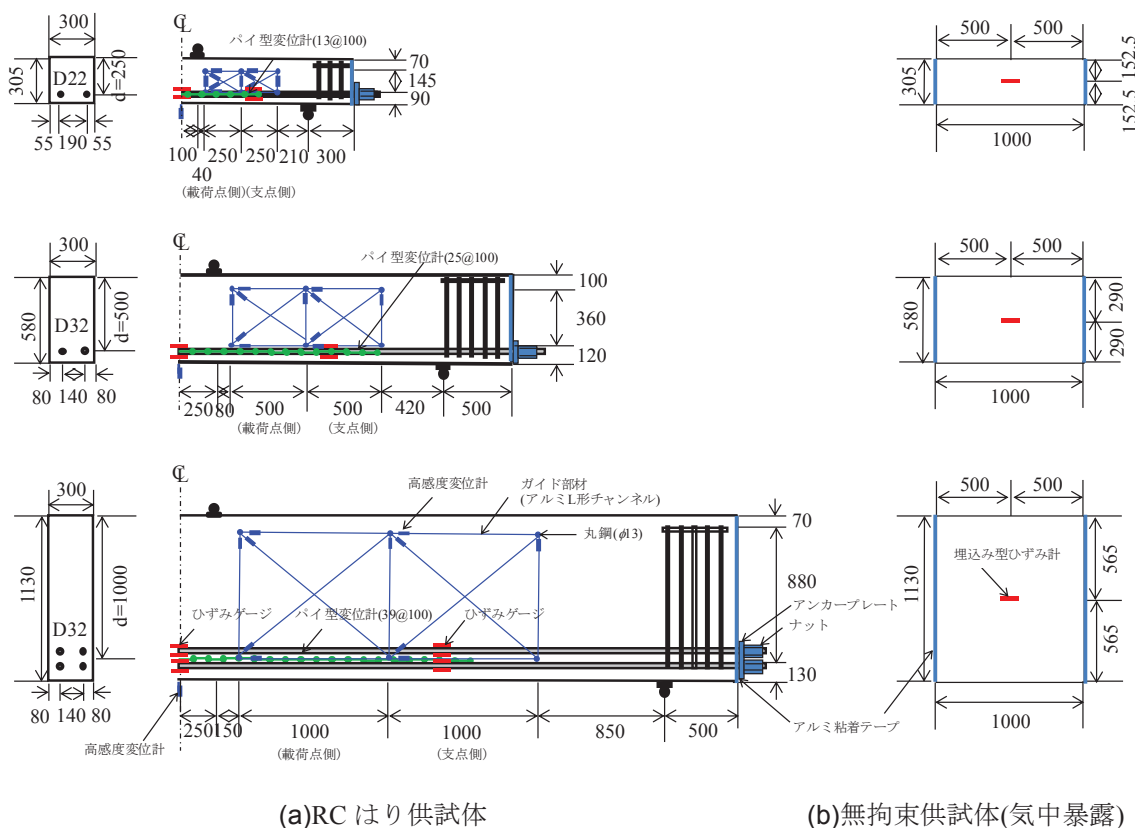


図-6.1 RCはり供試体および無拘束供試体の概要図 (単位: mm)

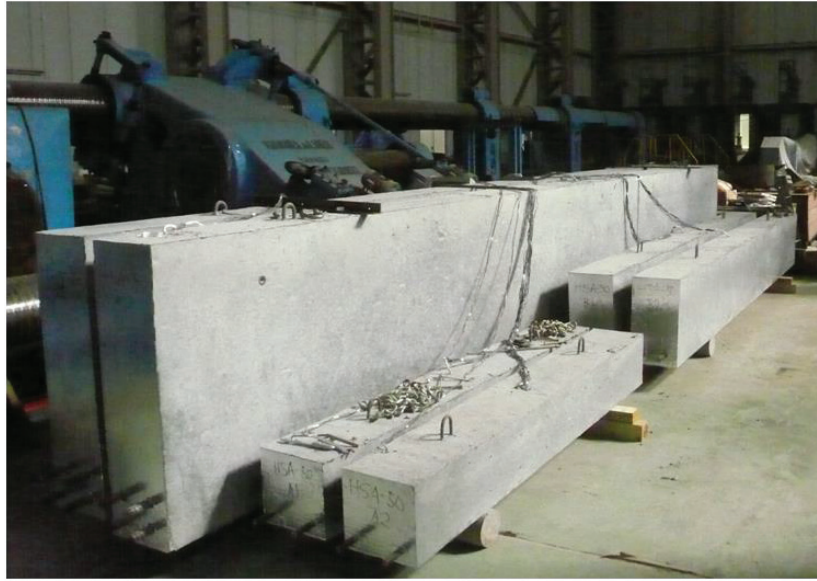


写真-6.1 RCはり供試体の保管状況

定するため、両端部をシールした。載荷試験時のコンクリートの力学特性を確認するため、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体(圧縮強度、ヤング係数試験用)、 $\phi 150 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体(割裂引張強度試験用)、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体(破壊エネルギー試験用)を作製した。いずれも、RCはり供試体と同一環境で養生を行った。

6.2.3 試験方法

RCはり供試体の載荷試験方法は、2点集中荷重による単調載荷とした。測定項目は、荷重、支間中央位置のたわみ、引張鉄筋ひずみ、せん断スパンの載荷点側と支点側の2区間の水平、鉛直、斜め方向の各変位および引張鉄筋図心位置のひび割れ幅とした。せん断スパン内の各変位は、高感度変位計(精度： $1/200\text{mm} \sim 1/1000\text{mm}$)を取り付けたガイド部材の両端部をはりの所定の位置の6箇所に予め埋め込んだネジ棒に連結し計測した。なお、ガイド部材の両端部は、ベアリング機能を有する治具を取り付けたヒンジ構造としてある。せん断スパン内の変位の計測状況を、写真-6.2に示す。ひび割れ幅の計測には、パイ型変位計(測長： 100mm 、精度： $1/1000\text{mm}$)を用いた。コンクリートの収縮によってRC供試体の引張鉄筋に生じた封緘養生および気中暴露期間中の鉄筋ひずみを支間中央およびせん断スパン中央部に貼り付けた電気抵抗線式ひずみゲージ(ゲージ長： 5mm)で測定した。温度変化にともなう零点移動量は、コンクリート打込み時に埋設したダミー鉄筋のひずみを引張鉄筋の実測ひずみから差し引くことで補正した。

自由ひずみは、無拘束供試体の中心部に配置した埋込み型ひずみ計(見かけの弾性係数：約 40N/mm^2 、測長： 100mm)で測定した。RCはり供試体の載荷試験と併せてコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度試験を、それぞれJIS A 1108, 1149および1113に準じて測定した。破壊エネルギー試験は、日本コンクリート工学協会(現工学会)の「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」に準じて行った。



写真-6.2 せん断スパン内の変位の計測状況

6.3 実験結果および考察

6.3.1 コンクリートの強度・収縮特性

(1) 強度特性

表-6.4に、RCはり供試体の載荷試験時におけるコンクリートの強度特性を示す。コンクリートの圧縮強度は、LS50が $39.6 \sim 40.4 \text{N/mm}^2$ (平均 40.2N/mm^2)、HS50が $40.0 \sim 43.1 \text{N/mm}^2$ (平均 42.0N/mm^2)、LS35が $51.8 \sim 58.6 \text{N/mm}^2$ (平均 55.0N/mm^2)、HS35が $51.9 \sim 53.1 \text{N/mm}^2$ (平均 52.6N/mm^2)であり、W/BによらずLSシリーズとHSシリーズの間に大幅な強度差は認められなかった。また、載荷試験材齢が異なる影響も、それほど大きくなかった。

図-6.2に、載荷試験時のコンクリートの圧縮強度と、引張強度、ヤング係数および破壊エネルギーとの関係を示す。また、図中には2012年版土木学会コンクリート標準示方書²⁾(以下、示方書とする)に示される設計式を併記する。圧縮強度と引張強度との関係は、LS、HSシリーズでほぼ同様であり、示方書の設計式ともおおむね一致した。圧縮強度とヤング係数の関係は、HSシリーズのほうがLSシリーズよりも小さい傾向であった。コンクリートのヤング係数は、内部の含水率の低下によって小さくなる³⁾ことが知られており、本検討でも同様であった。示方書のヤング係数設計式と比べると、LS、HSシリーズとも、実験値がやや小さい傾向であった。圧縮強度と破壊エネルギーの関係は、ばらつきはあるものの、HSシリーズのほうがLSシリーズを上回る傾向であった。示方書の設計式と比べると、いずれのシリーズも実験値のほうが大きい傾向であった。

表-6.4 強度特性一覧

シリーズ	供試体名	荷材齢 (日)	コンクリートの強度特性				
			f'_c	f_t	E_c	G_f	l_{ch}
LS50	LS50-250-A/B	94/89	39.6	3.1	25.2	0.15	395
	LS50-500-A/B	114/113	40.5	3.2	25.3	0.15	378
	LS50-1000-A/B	107/111	40.4	3.2	25.2	0.16	383
HS50	HS50-250-A/B	121/129	40.0	3.0	21.4	0.20	476
	HS50-500-A/B	286/287	43.0	3.1	21.5	0.20	436
	HS50-1000-A/B	292/291	43.1	3.1	21.5	0.20	436
LS35	LS35-250-A/B	141/140	58.6	4.0	29.4	0.18	325
	LS35-500-A/B	218/220	51.8	3.7	29.4	0.17	363
	LS35-1000-A/B	176/178	54.7	3.6	29.4	0.17	383
HS35	HS35-250-A/B	209/211	51.9	3.4	22.7	0.22	432
	HS35-500-A/B	300/299	53.1	3.4	23.3	0.16	313
	HS35-1000-A/B	267/265	52.7	3.4	23.3	0.16	313

f'_c : 圧縮強度(N/mm²), f_t : 割裂引張強度(N/mm²), E_c : ヤング係数(kN/mm²), G_f : 破壊エネルギー(N/mm), l_{ch} : 特性長さ(mm)

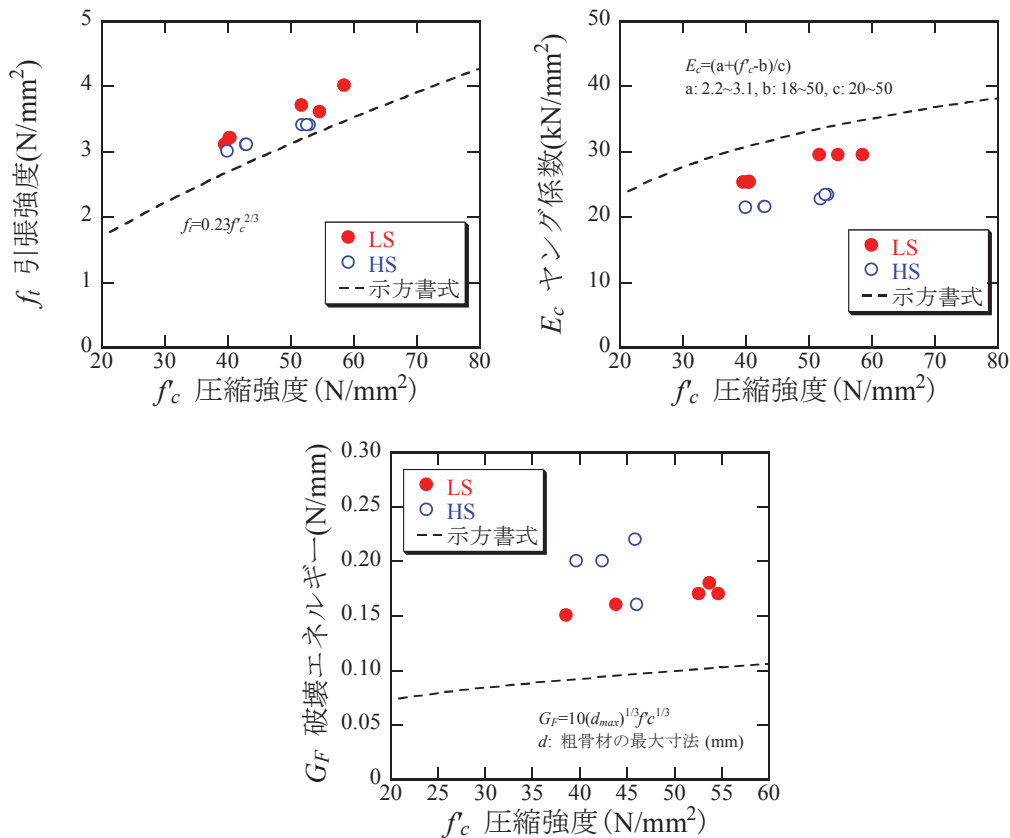


図-6.2 荷重試験時の圧縮強度と各力学特性との関係

(2) 収縮特性

図-6.3は、無拘束供試体の自由ひずみとRCはり供試体の引張鉄筋ひずみの経時変化をd1000供試体について例示したものである。また、表-6.5に、荷重試験直前の引張鉄筋ひずみの一覧を示す。HS50およびHS35の自由ひずみは、材齢初期にW/Bの違いによる自己収縮ひずみ差が生じたものの、長期的には両者の収縮量は同程度となった。LS35は、膨張材の初期膨張ひずみによって自己収縮の影響がキャンセルされ、荷重試験時のひずみはほぼゼロであった。引張鉄筋ひずみの発現挙動は、自由ひずみとほぼ同様であり、最終的な各シリーズのひずみの大小関係も同じであった。荷重試験時点のLSシリーズとHSシリーズの引張鉄筋のひずみ差は、W/B50%が $161\mu\sim 267\mu$ (平均 234μ)、W/B35%が $291\mu\sim 372\mu$ (平均 329μ)であった。

図-6.4は、HSシリーズの無拘束供試体の自由ひずみとRCはり供試体の引張鉄筋ひずみを比較したものである。同図より、自由ひずみと引張鉄筋ひずみにはおおむね直線関係が認められることがわかる。供試体の有効高さによらず最小二乗回帰したときの直線の傾きは、HS50シリーズ

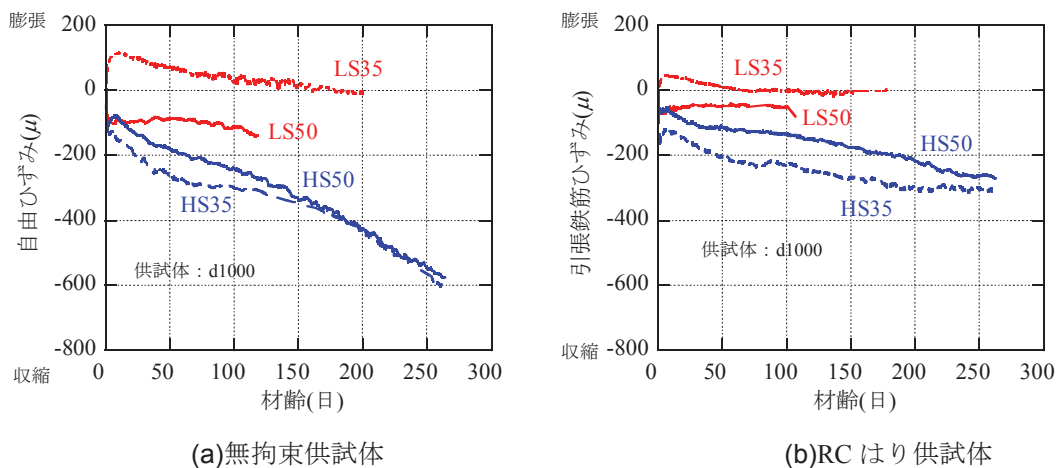


図-6.3 自由ひずみと引張鉄筋のひずみの経時変化

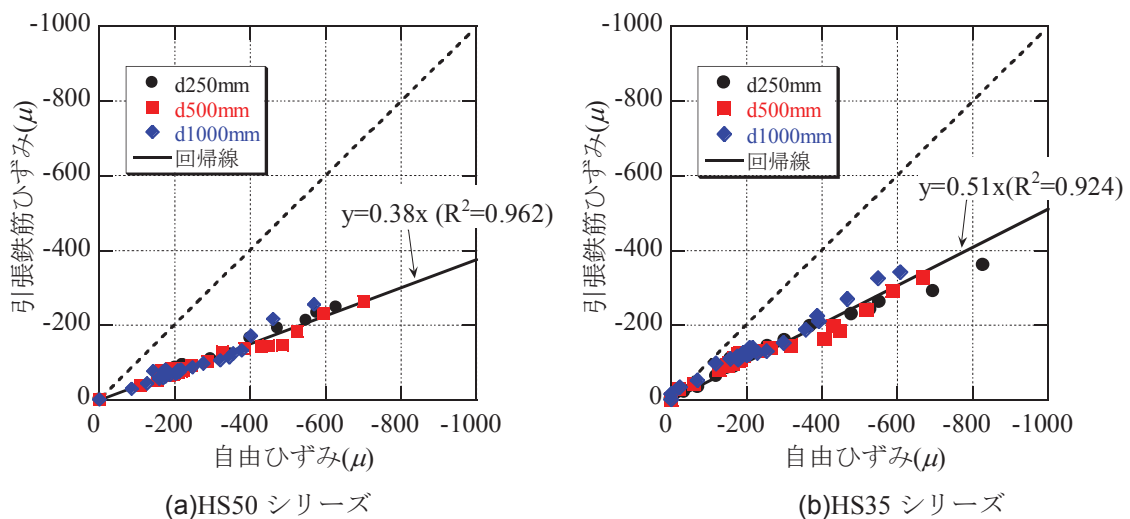


図-6.4 自由ひずみと引張鉄筋のひずみの関係

が0.38, HS35シリーズが0.51であった。後述するように, HSシリーズのRCはり供試体には, すべて, 0.1mm以下の微細な乾燥ひび割れが, はり下縁から引張鉄筋の直方向に生じていた。コンクリートにひび割れが発生すると, 鉄筋との付着喪失領域が生じるため, 通常, 自由ひずみの変化割合と比べて鉄筋ひずみの変化割合は鈍化する。一方, 本検討において, 両者の直線関係が保たれていたのは, 乾燥ひび割れの幅が小さく, 深さがコンクリート表層に限定されたため, 若干の応力解放をとめないながらも引張鉄筋を圧縮するのに有効なコンクリート断面が維持されたためと考えられる。載荷試験時の引張鉄筋図心位置でのコンクリートの応力 $\sigma_{c,def}$ (+: 引張, -: 圧縮)を, 全断面有効および平面保持を仮定し, 式(6.1)によって算出した結果を, 表-6.5に示す。なお, 表中の供試体名は, コンクリートの種類(LS: 低収縮, HS: 高収縮), W/B(50%, 35%), 有効高さ(250mm, 500mm, 1000mm), 枝番(A, B)の順で記す。

表-6.5 実験結果一覧

シリーズ	供試体名	載荷材齢(日)	鉄筋ひずみ・コンクリート応力			斜めひび割れ発生時		$\tau_c / \tau_{c,cal}$	破壊形態
			$\varepsilon_{s,def}$	$\sigma_{c,def}$	$\varepsilon_{s0,def}$	V_c	τ_c		
LS50	LS50-250-A	94	26	0.09	-29	81	1.07	0.91	斜め引張
	LS50-250-B	89	-24	0.09	-27	88	1.18	0.99	斜め引張
	LS50-500-A	114	-47	0.21	-54	130	0.87	0.86	斜め引張
	LS50-500-B	113	-39	0.17	-45	148	0.99	0.97	斜め引張
	LS50-1000-A	107	-73	0.35	-86	241	0.80	0.94	斜め引張
	LS50-1000-B	111	-57	0.28	-67	232	0.77	0.91	斜め引張
HS50	HS50-250-A	121	-291	1.02	-335	79	1.06	0.89	斜め引張
	HS50-250-B	129	-288	1.01	-332	78	1.05	0.88	せん断圧縮
	HS50-500-A	286	-307	1.33	-363	140	0.93	0.90	斜め引張
	HS50-500-B	287	-302	1.31	-357	131	0.87	0.84	斜め引張
	HS50-1000-A	292	-234	1.11	-280	198	0.66	0.76	斜め引張
	HS50-1000-B	291	-246	1.17	-295	208	0.69	0.80	斜め引張
LS35	LS35-250-A	141	-71	0.25	-79	110	1.47	1.09	斜め引張
	LS35-250-B	140	-56	0.20	-62	110	1.47	1.09	せん断圧縮
	LS35-500-A	218	-30	0.13	-34	152	1.01	0.92	斜め引張
	LS35-500-B	220	-4	0.02	-5	155	1.04	0.94	斜め引張
	LS35-1000-A	176	2	-0.01	2	242	0.81	0.86	斜め引張
	LS35-1000-B	178	-23	0.11	-26	250	0.83	0.89	斜め引張
HS35	HS35-250-A	209	-405	1.43	-463	96	1.28	0.99	斜め引張
	HS35-250-B	211	-409	1.44	-468	90	1.20	0.93	斜め引張
	HS35-500-A	300	-376	1.63	-440	150	1.00	0.90	斜め引張
	HS35-500-B	299	-321	1.39	-376	161	1.07	0.97	斜め引張
	HS35-1000-A	267	-329	1.57	-390	182	0.61	0.65	斜め引張
	HS35-1000-B	265	-318	1.52	-377	224	0.75	0.80	斜め引張

f'_c : 圧縮強度(N/mm²), f_t : 割裂引張強度(N/mm²), E_c : ヤング係数(kN/mm²), G_f : 破壊エネルギー(N/mm), l_{ch} : 特性長さ(= $E_c G_f / f_t^2$)(mm), $\varepsilon_{s,def}$: 載荷直前の引張鉄筋ひずみ(μ)(-: 収縮, +: 膨張), $\sigma_{c,def}$: 載荷直前の引張鉄筋図心位置でのコンクリート応力(N/mm²)(+: 引張, -: 圧縮), $\varepsilon_{s0,def}$: 引張鉄筋位置のコンクリート応力がゼロのときの引張鉄筋ひずみ(-: 収縮, +: 膨張), V_c : 斜めひび割れ発生時のせん断力(kN), τ_c : 斜めひび割れ発生時のせん断強度(N/mm²) (= V_c / bd), $\tau_{c,cal}$: 式(6.2)によるせん断強度の計算値

$$\sigma_{c,def} = -\frac{P_s}{A_c} \left[1 + \frac{A_c(d - C_g)^2}{I_g} \right] \quad (6.1)$$

$$P_s = A_s E_s \varepsilon_{s,def}$$

ここで、 P_s ：鉄筋に生じる圧縮・引張力、 I_g ：全断面有効の中立軸周りの断面二次モーメントである。引張鉄筋図心位置でのコンクリート応力は、LS50シリーズが0.09～0.35 N/mm²、HS50シリーズが1.01～1.33 N/mm²、LS35シリーズが-0.01～0.25 N/mm²、HS35シリーズが1.39～1.63 N/mm²と算出された。

6.3.2 RC はりのせん断強度に及ぼす乾燥の影響

(1) 荷重-たわみ曲線

図-6.5に、全供試体の荷重とスパン中央のたわみの関係を示す。図中に示す○は、斜めひび割れ発生荷重であり、河金らの方法⁴⁾に準じて、荷重が急減あるいは支間中央部のたわみおよびせん断スパン内のせん断変位の急増した時の荷重から総合的に判断した。

供試体寸法、強度レベルによらず、HSシリーズはLSシリーズよりも曲げひび割れ発生荷重が小さく、同一荷重時のたわみが大きくなる傾向であった。これは、コンクリートの収縮が鉄筋に拘束されることで導入された引張応力によって、見かけの曲げひび割れ発生強度が低下したことによると考えられる。また、曲げひび割れ後のたわみは、LS、HSシリーズともに概ね平行に増加していることから、コンクリートの収縮によって引張鉄筋に蓄積された圧縮ひずみが、ひび割れとともに解放されて、載荷前後のひずみの変化が増大したと考えられる。

斜めひび割れ発生後、アーチを形成し荷重が増加する供試体や、一旦低下した荷重が繰り返し増減した後、破壊する供試体が見られたが、多くは斜めひび割れ発生と同時に急激に荷重低下する斜め引張破壊であった。以降、この斜めひび割れ発生荷重 V_c を有効断面積 bd で除した値をせん断強度 τ_c とする。

(2) せん断強度

表-6.5に、斜めひび割れ発生時のせん断力、せん断強度および破壊形態の一覧を示す。図-6.6は、同一シリーズ、同一寸法の2体の供試体のせん断強度の平均値を、LSシリーズに対するHSシリーズの比($\tau_{c,HS}/\tau_{c,LS}$)で示したものであり、せん断強度に及ぼす乾燥の影響を示している。d250、d1000供試体では、LSシリーズに比べてHSシリーズのせん断強度が明確に低下する傾向が認められた。d500供試体においては明瞭な傾向が認められなかった。せん断強度比($\tau_{c,HS}/\tau_{c,LS}$)は、W/B50%の場合0.86～0.97(平均：0.92)、W/B35%の場合0.83～1.01(平均：0.89)であり、HSシリーズの強度低下率は、最大で17%であった。

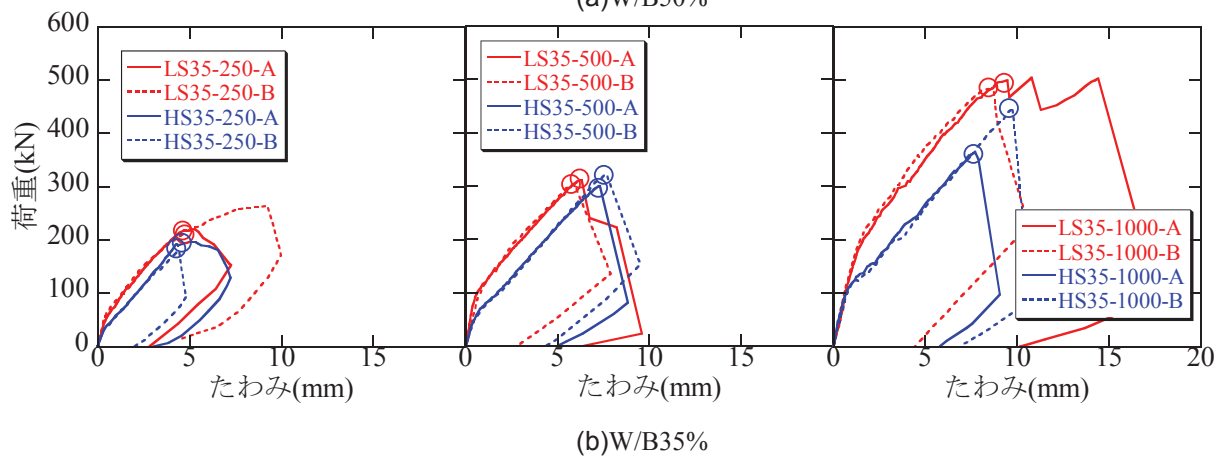
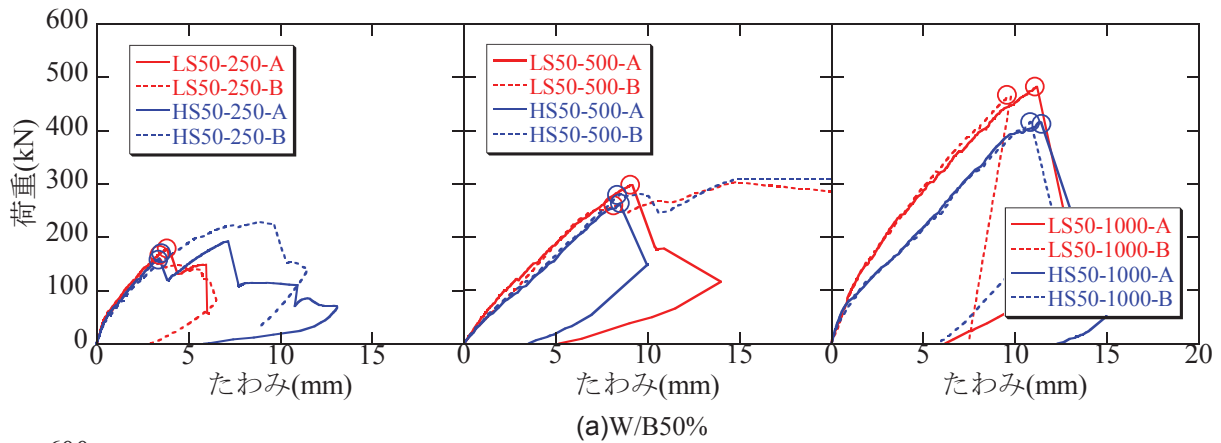


図-6.5 荷重-たわみ関係

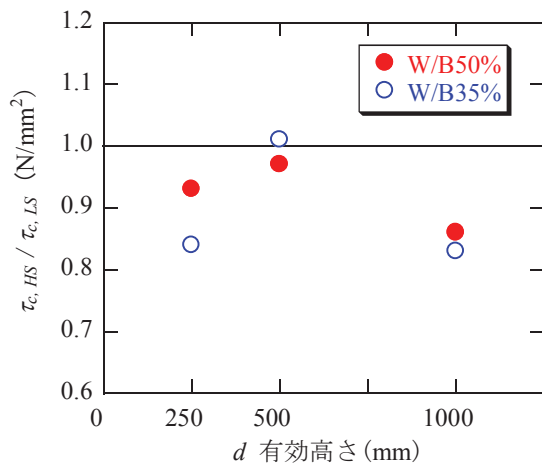


図-6.6 せん断強度に及ぼす乾燥の影響

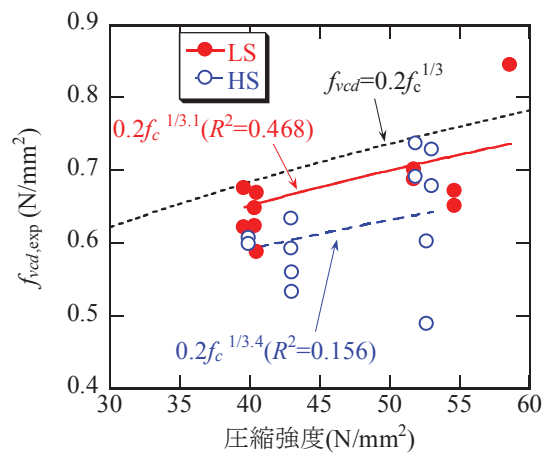


図-6.7 せん断強度に及ぼす圧縮強度の影響

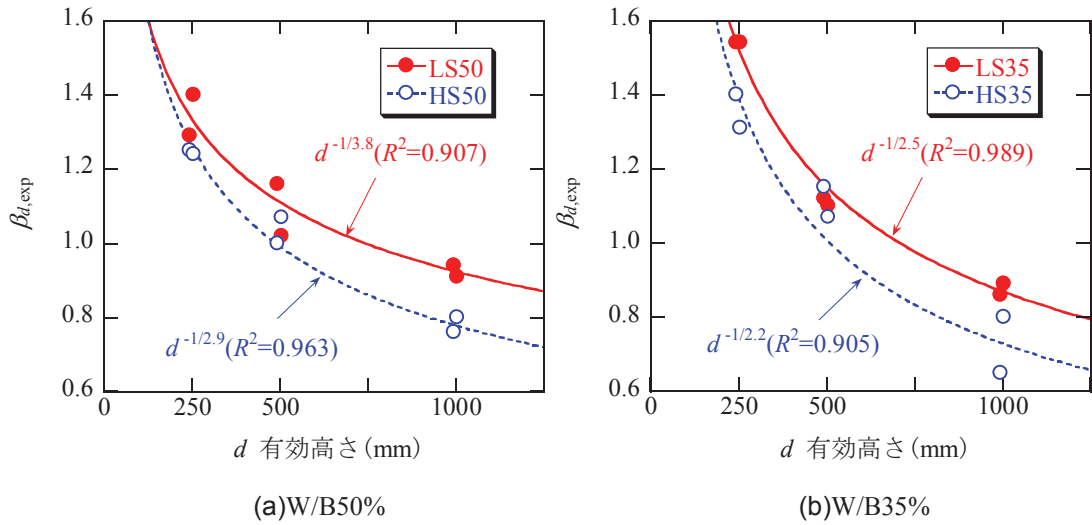


図-6.8 セン断強度に及ぼす有効高さの影響

(3) 寸法効果

せん断強度に影響を及ぼす要因は、これまでの実験的研究によって、コンクリート強度、引張鉄筋比、せん断スパン比、有効高さであることが確かめられている。二羽らは、これらの要因を組み込んだOkamura and Higai⁵⁾による普通強度RCはりのせん断強度評価式を修正し、式(6.2)を提案⁶⁾している。これは、現在の示方書式²⁾の基礎となっており、広くその精度が確認されている。

$$\begin{aligned}
 \tau_{c,cal} &= f_{vcd} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \\
 f_{vcd} &= 0.2 f_c^{1/3} \\
 \beta_d &= (d/1000)^{-1/4} \\
 \beta_p &= (100p)^{1/3} \\
 \beta_a &= (0.75 + 1.4/(a/d))
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

ここでは、既往の評価手法⁷⁾を参考に、式(6.2)と載荷試験で得られたせん断強度 τ_c とを比較し、本実験における評価因子であるコンクリート強度、有効高さおよびコンクリートの収縮の影響について分析する。

図-6.7は、実験によるせん断強度 τ_c から $f_{vcd,exp}$ を逆算し、載荷時のコンクリートの圧縮強度との関係を示したものである。また、図中には式(6.2)による f_{vcd} の計算値およびべき乗関数による回帰線を、LS、HSシリーズに対してそれぞれ示す。なお、 $f_{vcd,exp}$ は式(6.3)によって算出した。

$$f_{vcd,exp} = \tau_c / \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \tag{6.3}$$

コンクリートの圧縮強度の増加とともに $f_{vcd,exp}$ は増加し、回帰曲線によれば、その増加割合はLS、HSシリーズとも同程度であった。一方、同一圧縮強度で比較すると、HSシリーズの $f_{vcd,exp}$ は、

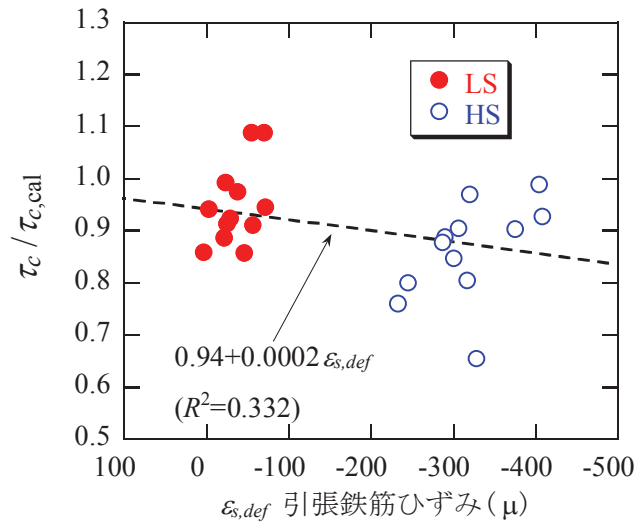


図-6.9 セン断強度に及ぼす引張鉄筋ひずみの影響

LSシリーズの $f_{vcd,exp}$ よりも低い傾向にあることがわかる。このことから、HSシリーズのせん断強度の低下には、コンクリートの強度特性以外の因子が影響していると推察される。

図-6.8は、実験によるせん断強度 τ_c から逆算した $\beta_{d,exp}$ と有効高さとの関係を示したものである。図中には、有効高さ1000mmの供試体の $\beta_{d,exp}$ の平均値を通るべき乗関数で回帰した結果を併記する。なお、 $\beta_{d,exp}$ は式(6.4)によって算出した。

$$\beta_{d,exp} = \tau_c / f_{vcd} \cdot \beta_p \cdot \beta_a \quad (6.4)$$

同図より、強度レベルによらずHSシリーズのほうがLSシリーズよりも有効高さの変化にともなう $\beta_{d,exp}$ の変化が大きく、せん断強度の寸法効果の増大が認められた。回帰曲線によって求めた有効高さ d に対するべき乗数は、LS50が $-0.26(-1/3.8)$ 乗であり、式(6.2)と同じく $-1/4$ 乗に近い値を示した。一方、HS50は $-0.34(-1/2.9)$ 乗、LS35は $-0.40(-1/2.5)$ 乗、HS35は $-0.45(-1/2.2)$ 乗となり、強度レベルが高く、収縮が大きいほどせん断強度の寸法効果が大きくなった。

図-6.9は、せん断強度の実測値 τ_c を式(6.2)の計算値 $\tau_{c,cal}$ で除したせん断強度比($\tau_c / \tau_{c,cal}$)と、載荷試験直前の引張鉄筋のひずみ $\varepsilon_{s,def}$ の関係を示したものである。図中には、全てのデータに対する回帰直線を併記する。なお、せん断強度比は式(6.5)によって算出した。

$$\tau_c / \tau_{c,cal} = \tau_c / f_{vcd} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \quad (6.5)$$

同図より、引張鉄筋の圧縮ひずみが大きくなると、せん断強度比が相対的に低下していることがわかる。図-6.4で示したように、引張鉄筋ひずみの増大は、コンクリートの収縮の増大と等価

であることから、コンクリートの収縮がせん断強度を低下させる一因であることを示唆する結果といえる。なお、回帰直線によれば、引張鉄筋の圧縮ひずみが 100μ 増加すると、 0.02N/mm^2 程度せん断強度が低下する結果であった。

以上の結果から、コンクリートの収縮によってRCはりのせん断強度が低下する傾向にあり、また、その寸法効果は、収縮が大きく強度レベルが高いものほど大きくなる傾向が確認された。これらのメカニズムを明らかにするため、次節6.3.3において、コンクリートの収縮がRCはりのひび割れ・変形に及ぼす影響について検討する。

6.3.3 コンクリートの収縮がRCはりのひび割れ・変形に及ぼす影響

(1) ひび割れ幅

図-6.10に、曲げひび割れ幅とせん断力との関係を示す。曲げひび割れ幅は、せん断スパン中央部のパイ型変位計の変位を用いた。これは、斜めひび割れの起点となる曲げひび割れの位置が、せん断スパン中央近傍であったことによる。斜めひび割れの起点となる曲げひび割れの位置をシリーズ別に平均すると、載荷点からLSシリーズが $1.55d$ 、HSシリーズが $1.61d$ 支点側にシフトした位置であった。同図より、HSシリーズのひび割れ発生せん断力はLSシリーズよりも小さくなっていることがわかる。これは、収縮応力によって見かけのひび割れ強度が低下したためと考えられる。ひび割れ発生以降のひび割れ幅は、同一せん断力で比べると、HSシリーズのほうがLSシリーズよりも大きい。これは、前述したように、コンクリートの収縮によって蓄積された圧縮ひずみが、ひび割れによって開放され、載荷前後の鉄筋ひずみの変化量が増大したためと考えられる。

図中の○は、斜めひび割れ発生時の曲げひび割れ幅であり、これらを全ての供試体について示したのが、図-6.11である。斜めひび割れ発生時の曲げひび割れ幅は、供試体の有効高さが大き

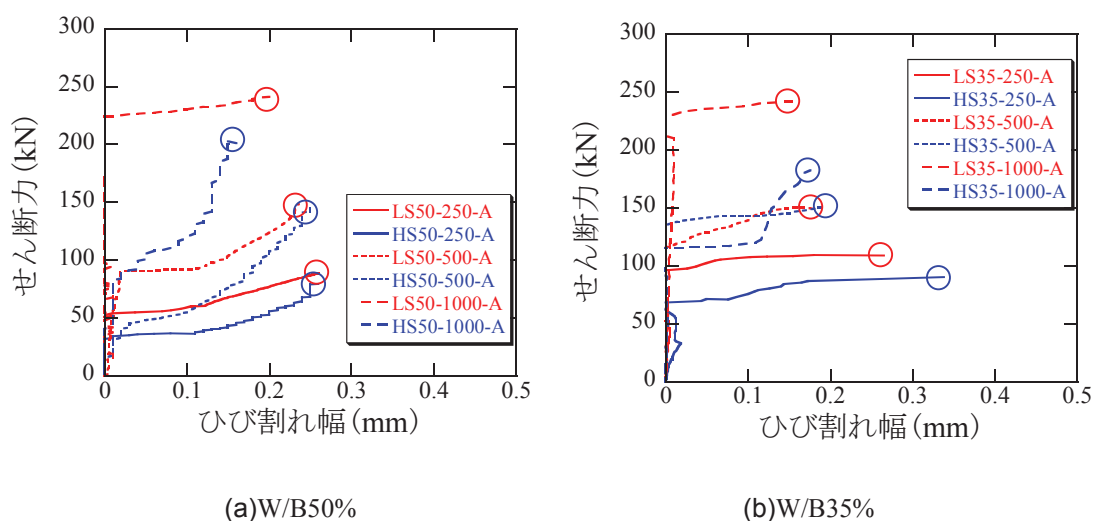


図-6.10 せん断力と曲げひび割れ幅の関係

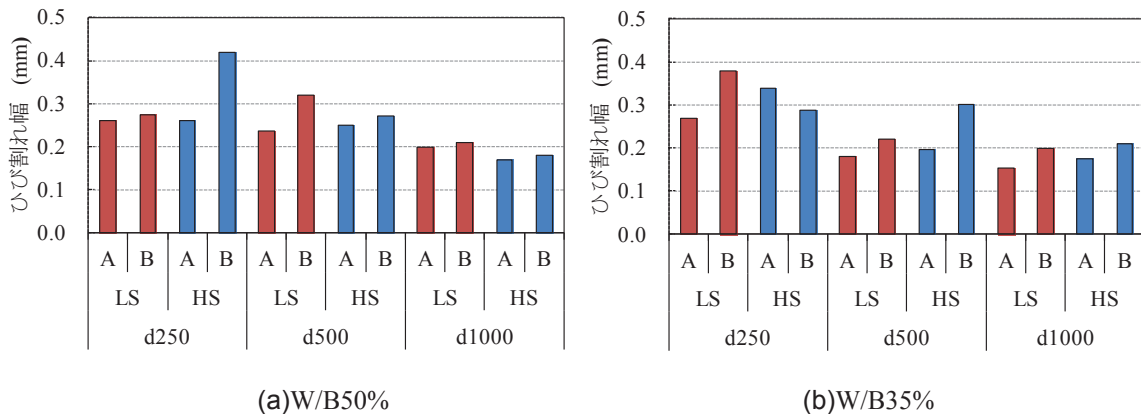


図-6.11 斜めひび割れ発生時のせん断スパン中央部の曲げひび割れ幅

くなるとともに小さくなる傾向であることがわかる。強度レベル別に曲げひび割れ幅を平均すると、W/B50%が0.26mm、W/B35%が0.24mmであり両者の違いはほとんど認められなかった。LSシリーズとHSシリーズの曲げひび割れ幅を、同一強度レベル、同一有効高さの供試体で比較すると、幾分ばらつきはあるものの、両者に明確な大小関係は認められなかった。これは、斜めひび割れ発生時の鉄筋位置での曲げひび割れ幅の大小には、コンクリートの収縮は影響しないと解釈できる。

(2) ひび割れ進展

図-6.12に、せん断応力($\tau = V/bd$)が 0.67N/mm^2 に達したときのひび割れ図を示す。同応力は、HSシリーズのd1000供試体(HS50-1000-B, HS35-1000-B)に、斜めひび割れが発生する直前の応力である。図中の赤線は、荷重以前に生じた収縮ひび割れであり、青線は荷重によって生じたひび割れである。なお、供試体は、有効高さによらず、はり高さおよびスパンが同一となるよう図示している。

6.3.1(2)で述べたように、HSシリーズには全ての供試体のはり下縁から、引張鉄筋の直交方向に 0.1mm 以下の微細な収縮ひび割れが生じていた。一方、荷重によるひび割れについては、HSシリーズのせん断スパンにおける曲げひび割れが、LSシリーズよりも圧縮縁側深くまで進展する傾向が認められた。これは、有効高さが大きい供試体のほうが顕著であり、一部の供試体では、曲げひび割れからせん断ひび割れに移行しているもの(HS50-1000-B, HS-35-1000-B)も確認された。これは、有効高さが大きくなると、引張鉄筋のひび割れ分散効果の影響範囲が相対的に低下するため、ひび割れが局所化したためと考えられる。一方、強度レベル別に比較すると、W/B50%とW/B35%のひび割れの進展状況に、明確な相違は見られなかった。

藤田ら⁸⁾は、高強度RCはりが普通強度RCはりよりもひび割れが局所化することを実験的に確認している。また、ひび割れの局所化を破壊力学パラメータであるコンクリートの特性長さ l_c と結びつけ、せん断強度やその寸法効果への影響評価を行っている。図-6.13は、本検討におけるコ

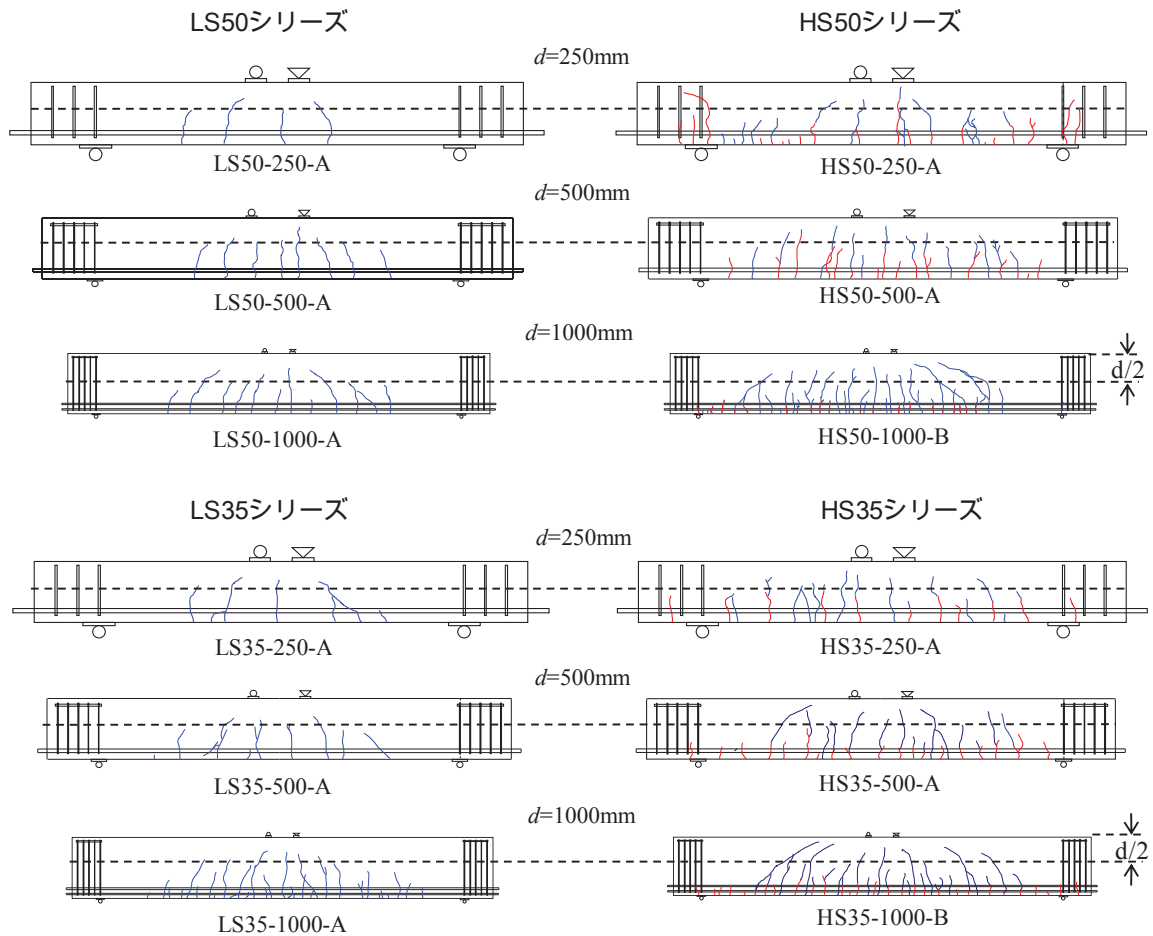


図-6.12 ひび割れ進展状況($\tau=0.67\text{N/mm}^2$)

ンクリートの圧縮強度と特性長さとの関係を示したものである。封緘養生供試体による河金・佐藤³⁾の実験結果および気中養生供試体による藤田ら⁸⁾の実験結果を併記する。また、示方書に示される引張強度，ヤング係数，破壊エネルギーの設計式から算出した特性長さを示す。同図より，特性長さはコンクリートの圧縮強度が高くなるとともに短くなるのがわかる。ただし，本検討における圧縮強度の範囲($39.6\sim 58.6\text{N/mm}^2$)と特性長さの範囲($313\sim 476\text{mm}$)は，藤田らが検討した強度($35.1\sim 85.6\text{N/mm}^2$)および特性長さの範囲($271\text{mm}\sim 661\text{mm}$)よりも狭い。そのため，強度レベルの違いによるひび割れの局所化の差が，図-6.12に示したひび割れ進展状況に明確に現れなかったのではないかと考えられる。

(3) 中立軸位置

図-6.14に，圧縮縁からの中立軸深さを有効高さで除した中立軸比と，せん断力との関係を示す。なお，中立軸深さは，図-6.1に示した圧縮縁近傍および引張鉄筋位置近傍の水平方向変位から，平面保持を仮定して算出し，載荷点側および支点側の区間の結果を平均した値である。有効高さ，強度レベルによらず，LSシリーズよりもHSシリーズのほうが低いせん断力でひび割れが

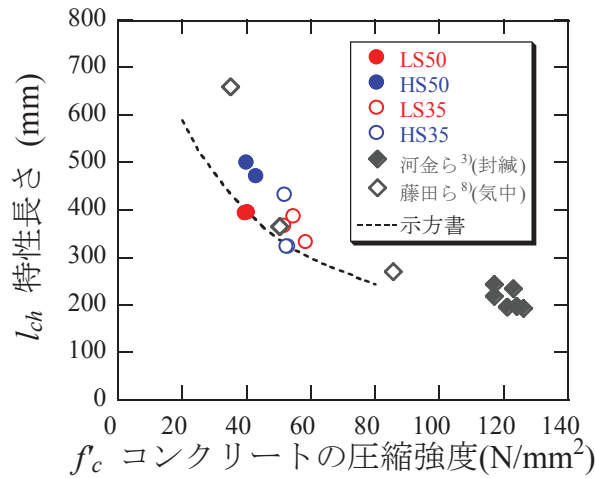


図-6.13 コンクリートの圧縮強度と特性長さ

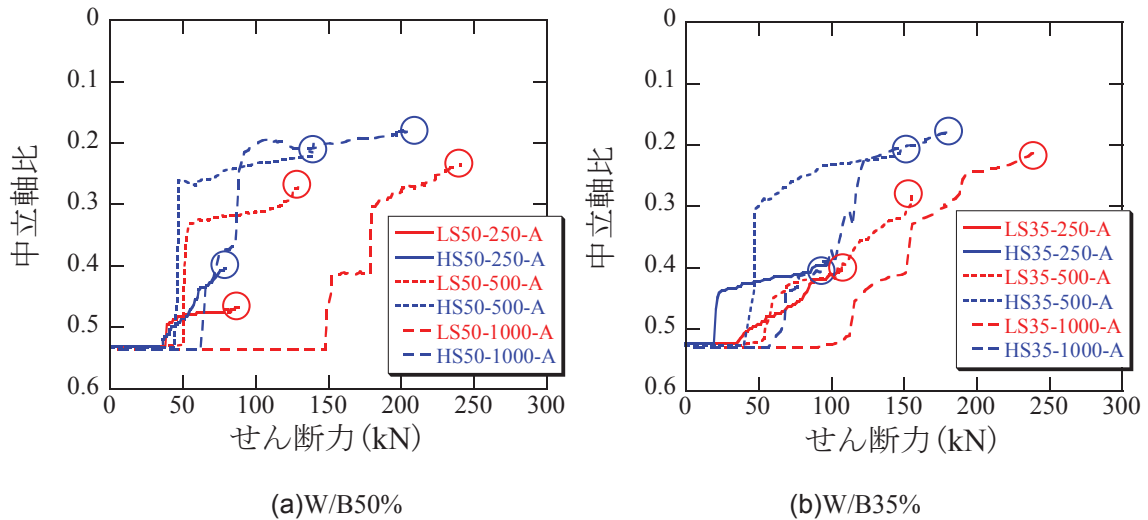


図-6.14 中立軸比とせん断力との関係

発生し、その後、急激に中立軸比が小さくなった。図中に示す○は、斜めひび割れ発生時の中立軸比である。斜めひび割れ発生時の中立軸比は、供試体の有効高さが大きいほど、また、同一有効高さの場合はLSシリーズよりもHSシリーズのほうが、小さくなる傾向であることがわかる。ここでの中立軸比は、せん断スパンにおける平均的な中立軸深さに基づくものであるが、巨視的には、せん断抵抗要素の一つである圧縮部コンクリートの厚さの増減を示すと考えられる。これによれば、コンクリートの収縮および有効高さの増大は、圧縮部コンクリートを減少させる方向に作用すると解釈できる。

図-6.15は、せん断破壊時のひび割れ状況を示したものである。HSシリーズの斜めひび割れは、LSシリーズと比べると、供試体上縁に沿うようにひび割れが進展していることが観察される。これは、コンクリート圧縮部の減少を反映したものと考えられ、前述の収縮および有効高さの増大にともなって中立軸比が小さくなる傾向と対応している。

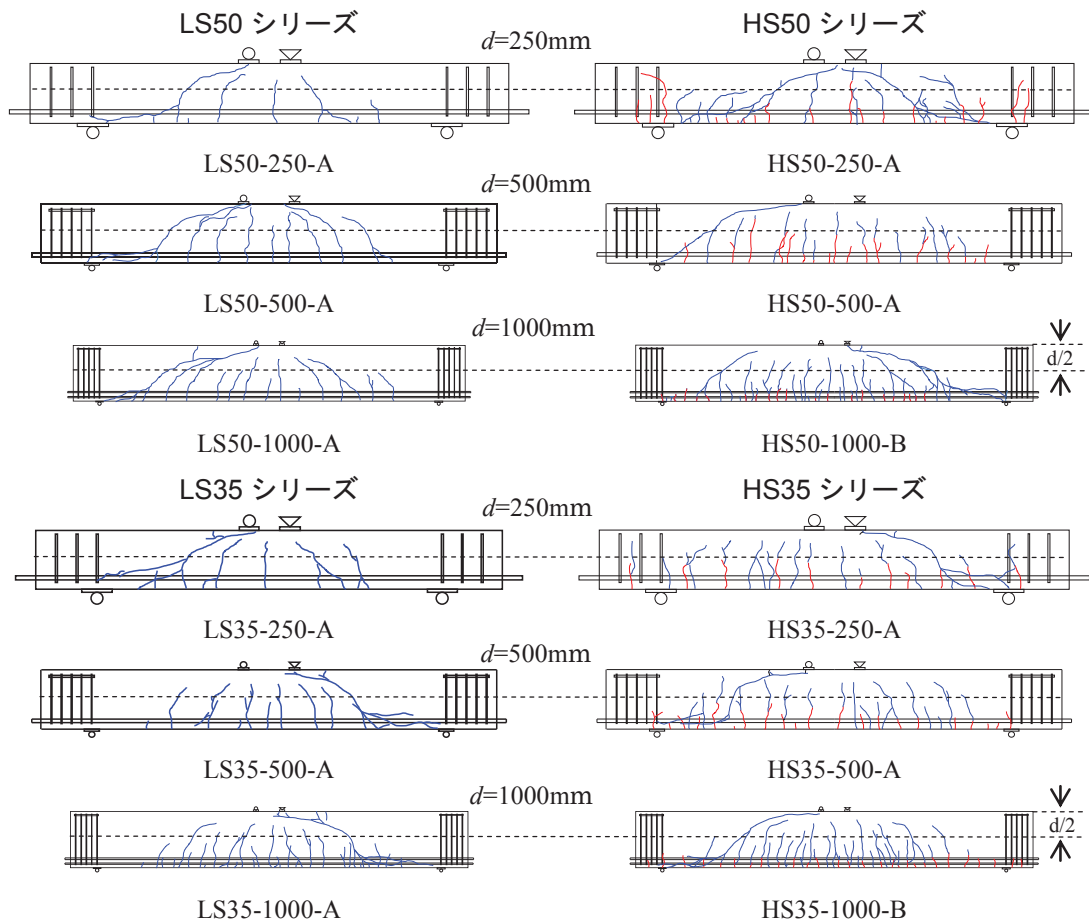


図-6.15 破壊時のひび割れ状況

以上の結果から、有効高さおよびコンクリートの収縮の増大が、圧縮部コンクリートを減少する方向に作用し、せん断強度の低下に関与したことが推察される。

(4) せん断変形

図-6.16は、せん断応力とせん断変位との関係を示したものである。せん断変位は、図-6.1に示した載荷点側および支点側の2区間の斜め方向変位の計測結果より、既往の算定式⁹⁾を用いて求めた。同一せん断応力で比較すると、せん断変位は、有効高さの増大とともに大きくなった。一方、有効高さが同じであっても、同一せん断応力時のせん断変位は、HSシリーズのほうがLSシリーズよりも大きい傾向が認められた。このことは、コンクリートの収縮がせん断変位の増加に寄与することを示している。

図中に示す○は、斜めひび割れ発生時のせん断変位である。斜めひび割れ発生時のせん断変位は、有効高さの増大にともなって大きくなる傾向であった。ただし、その増加割合は、W/B35%のほうがW/B50%よりも小さいことがわかる。また、d1000供試体と比較すると、W/B50%の斜めひび割れ発生時のせん断変位が1.5mm程度であるのに対し、W/B35%は1mm程度であり、2/3程度

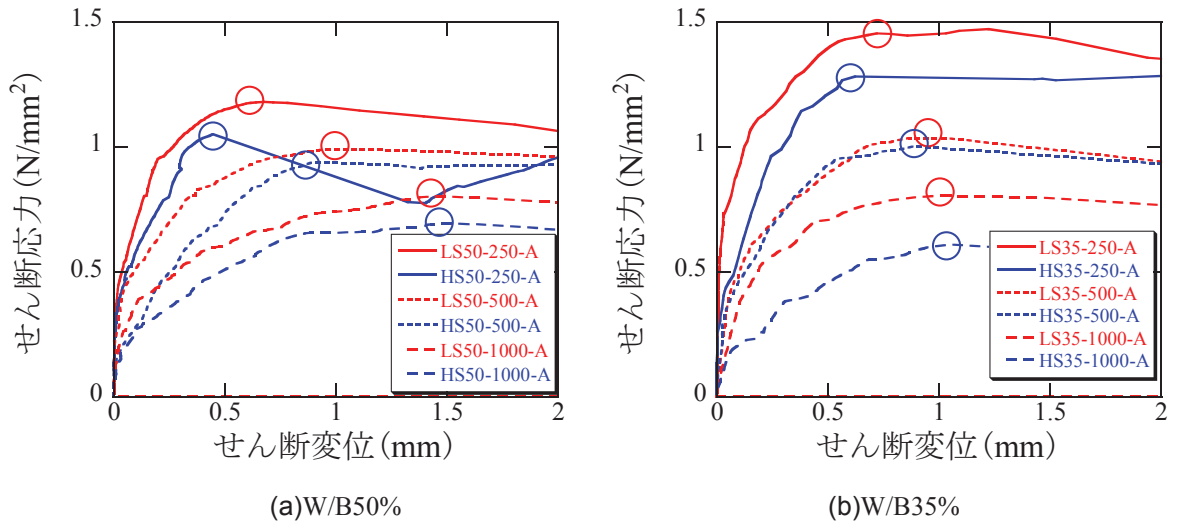


図-6.16 せん断応力-せん断変位関係

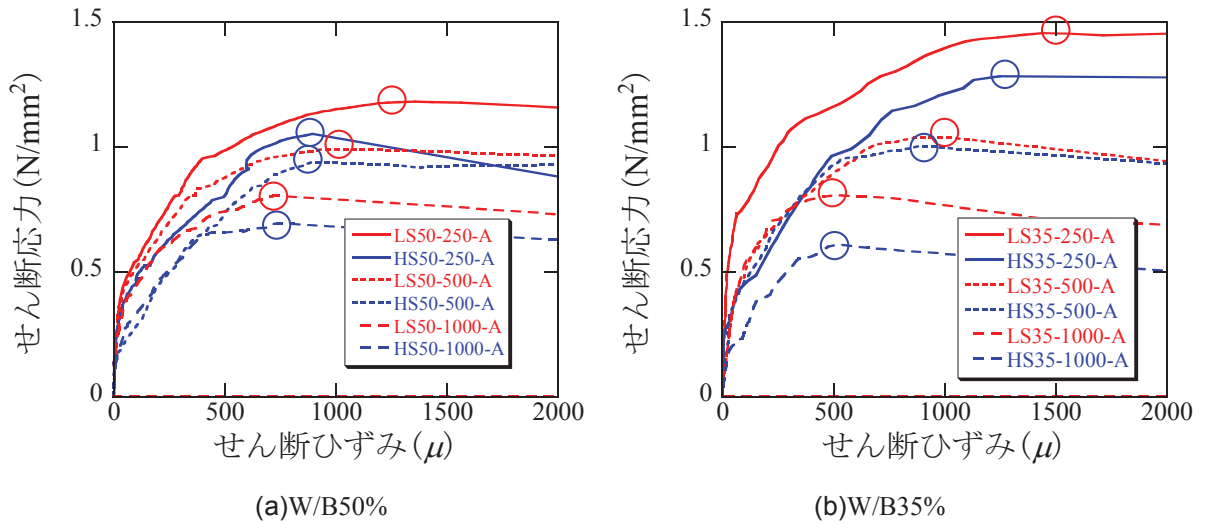


図-6.17 せん断応力-せん断ひずみ関係

に小さくなっている。W/B35%のコンクリートのヤング係数は、W/B50%よりも平均で13%程度しか大きくないことを考慮すると、強度レベルの違いによる斜めひび割れ発生時のせん断変位の違いは、両者のひび割れ状況の違いを表していると考えられる。すなわち、これらは、図-6.12のひび割れ状況では明確ではなかったものの、コンクリートの高強度化によって特性長さが短くなり、曲げせん断ひび割れの局所化が顕著になる傾向を捉えた結果であると考えられる。

図-6.17は、せん断応力とせん断ひずみの関係を示したものである。せん断ひずみは、図-6.16で示したせん断変位を、荷点側、支点側の2区間の水平長さで除すことによって算出した。図中○で示す斜めひび割れ発生時のせん断ひずみは、有効高さが大きくなるほど小さくなる傾向にあり、せん断変位の場合と逆の傾向を示した。これは、有効高さの増大による曲げせん断ひび割れの局所化の影響を示していると考えられる。すなわち、有効高さが増大し、曲げせん断ひび

割れが局所化すると、ひび割れ部に変形が集中する一方で、せん断ひずみの小さい非局所化部分も増大する。このため、全体としてはせん断ひずみが小さくなったと考えられる。

強度レベル別に比較すると、W/B50%よりもW/B35%のほうが、有効高さの変化にともなう斜めひび割れ発生時のせん断ひずみの変化が大きい。これは、**図-6.16**のせん断変位においても考察したように、コンクリートの高強度化によって曲げせん断ひび割れの局所化が顕著になる傾向を捉えたものと考えられる。

なお、斜めひび割れ発生時のせん断ひずみおよびせん断変位は、有効高さが同じであれば、いずれも収縮の大小によらずほぼ同一の値を示している。これは、**図-6.10**および**図-6.11**に示したせん断スパン中央部の曲げひび割れ幅が、収縮の影響をほとんど受けないことと対応している。

以上のことを整理すると、斜めひび割れ発生時のせん断変位やせん断ひずみは、概ね有効高さによって定まり、コンクリートの収縮の影響はほとんど受けないこと、その一方で、コンクリートの収縮は、同一のせん断応力時のせん断変形を増大させることが確認された。また、コンクリートの高強度化にともなって、曲げせん断ひび割れの局所化が顕著になる傾向が確認された。

(5) コンクリート強度、収縮および有効高さによるせん断強度の低下と寸法効果増大メカニズム

RCはりのせん断強度の寸法効果は既によく知られ、通常、その主たる原因は曲げせん断ひび割れの局所化として有効高さと関係づけて説明されている。これを掘り下げて破壊力学的な説明もなされている。**Gustafsson and Hillerborg**はひび割れ先端部の破壊進行領域の長さは近似的に特性長さに比例し、その長さは $0.3-0.5l_{ch}$ と報告した¹⁰⁾。これに基づき**Zink**は、破壊進行領域の長さがはり高さに依存しないことがせん断強度の寸法効果の主たる要因であるとし、破壊力学パラメータと結び付けた考察を行った¹¹⁾。**Walraven**は、普通骨材と軽量骨材を用いたRCはりのせん断強度を比較し、両者のせん断強度が有効高さの増大とともに平行に低下することより、その寸法効果はコンクリートの引張軟化特性によるとした¹²⁾。これら3編の報告はいずれもせん断強度の寸法効果とひび割れ先端部の破壊進行領域における引張軟化特性が深く関係していることを指摘したものである。

これら既往の知見および本論文における実験結果に基づき、コンクリートの収縮、強度および有効高さが、RCはりのせん断強度とその寸法効果に及ぼす影響をまとめたのが、**図-6.18**である。

有効高さが増大すると、**6.3 (3)**で示したように、有効高さが小さい場合と比べ、曲げせん断ひび割れの局所化が顕著になる[1]。**6.3 (4)**で述べたように、ひび割れの局所化によって、破壊に至る曲げせん断ひび割れにエネルギー消費が集中するため、相対的に曲げせん断ひび割れ幅が増大する[2]。曲げせん断ひび割れ幅が増大することによって、ひび割れ部のせん断伝達は低下し、引いてはせん断強度を低下させる[3]。また、**Gustafsson and Hillerborg**¹⁰⁾、**Zink**¹¹⁾らの説によれば、ひび割れ先端部の破壊進行領域の長さは寸法によらず一定としている。そのため、有効高さが増大するとせん断抵抗する破壊進行領域が相対的に小さくなりせん断強度が低下する[4]。

コンクリート強度が増大すると、**図-6.13**に示したように、特性長さが短くなる[5]。先にも述べたように、**藤田ら**⁸⁾は、高強度コンクリートが普通強度コンクリートよりも特性長さが短くなり、

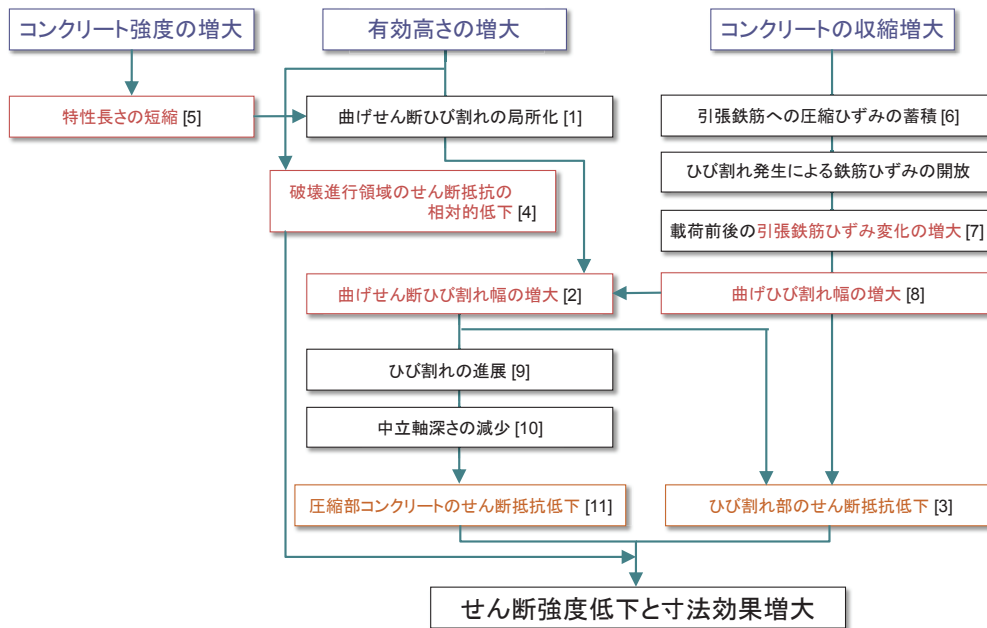


図-6.18 コンクリートの収縮，強度および有効高さの増大によるせん断強度低下と寸法効果増大のメカニズム

曲げせん断ひび割れの局所化が顕著になる[1]としており，本検討の強度レベル(40-60N/mm²レベル)においても，図-6.16および図-6.17に示した斜めひび割れ発生時のせん断変位およびせん断ひずみの結果にその傾向が認められた。

コンクリートの収縮によって，引張鉄筋は圧縮ひずみを蓄積する[6]ため，後述の図-6.21に示すように，ひび割れの発生によって載荷開始時から所定の荷重までの鉄筋ひずみ変化量が増大し[7]，図-6.10に示すように同一せん断力作用時の曲げひび割れ幅が増大する[8]。曲げひび割れ幅の増大は，曲げせん断ひび割れ幅の増大[2]につながり，ひび割れ部のせん断伝達を低下させる[3]。このことが，せん断強度を低下させる一因となる。

せん断強度は有効高さの増大にともなって低下するため，斜めひび割れ発生時のせん断スパン中央部の荷重による鉄筋ひずみ量は，有効高さの増大とともに小さくなる。コンクリートの収縮による載荷前の引張鉄筋ひずみ量が同一であるとすれば，斜めひび割れ発生時のせん断スパン中央付近の曲げひび割れ幅，さらには曲げせん断ひび割れ幅に及ぼす収縮の影響は，有効高さが大きくなるほど相対的に大きくなる。そのため，コンクリートの収縮は，せん断強度の寸法効果を増大させると考えられる。これについては，次項6.4において詳述する。

収縮による曲げせん断ひび割れ幅の増大は，図-6.14および図-6.15で示したように，ひび割れを進展させ[9]，ひび割れ後の中立軸深さを浅くし[10]，せん断抵抗要素の一つであるコンクリート圧縮部を減少させる[11]。

以上の事象が，コンクリートの収縮，強度，RCはり部材の有効高さの変化にともなって連成して作用し，せん断強度およびその寸法効果が変化したと考えられる。

6.4 コンクリートの収縮を考慮したせん断強度評価法

6.4.1 既往のせん断強度評価式

二羽らのせん断強度評価式(6.2)による計算値と、本論文における実測値との比((実測値)/(計算値))を、表-6.4に示す。また図-6.19に、(実測値)/(計算値)と、載荷試験直前の引張鉄筋ひずみの関係を示す。同図は、図-6.9のプロットを、強度レベル別に分類して再掲したものである。前述したとおり、載荷直前の引張鉄筋ひずみが大きくなると、(実測値)/(計算値)が小さくなる傾向が認められる。全供試体の(実測値)/(計算値)の範囲は0.65~1.09、平均値は0.90、変動係数は10.6%であった。コンクリートの収縮によって引張鉄筋に圧縮ひずみが蓄積されたHSシリーズだけで見ると、(実測値)/(計算値)の範囲は0.65~0.99、平均値は0.86となり、計算値が実測値を過大評価した。一方、低収縮で引張鉄筋のひずみが小さいLSシリーズの(実測値)/(計算値)の範囲は0.86~1.09、平均値は0.95であり、HSシリーズと比べて実測値と計算値が整合する結果となった。

ここで、せん断強度評価式(6.2)は国内外における既往の実験データを整理した経験式である。そのため、供試体製造後の環境条件はさまざまであり、載荷試験までの養生方法や期間によっては、既にコンクリートの収縮の影響を多少なりとも含んでいる可能性が考えられる。コンクリートの収縮の影響を組み込む上で、同評価式が収縮の影響を大きく受けた結果に基づくものであるか、それとも収縮の影響が有意に含まれていない実験データから導かれたものであるか、前提条件を確認することは重要であると考えられる。

そこで、せん断強度評価式(6.2)を構築する際に用いられた265体の供試体の実験データの中から、コンクリートの収縮の影響がそれほど含まれていないと考えられる95体(全体の36%)のデータを文献^{13), 14), 15), 16), 17), 18), 19)}から抽出し(表-6.6)、全データとの比較分析を行うこととした。ここで、せん断強度評価式(6.2)の構築には、各文献に示される全ての供試体の実験データを使用しているわけではないため、文献中のどの実験データが評価式構築に採用されたかを調べる必要があった。これについては、表-6.6に示すコンクリート強度、鉄筋比、有効高さ等のパラメータの範囲やその平均値、また、個々の文献毎のせん断強度比((実測値)/(計算値))の平均値および変動係数⁶⁾が全て一致する供試体の組合せを文献中から抽出し、評価式構築に採用された実験データであると判断した。

収縮の影響が小さい実験データであるかどうかの判断は、ほとんどの文献に養生条件が記されていないため、供試体製造から載荷試験までの期間の長さによった。すなわち、載荷試験が供試体製造後、4週間程度以内に実施されていることが記載されていることを判断基準とした。これは、仮にその期間乾燥に曝されていたとしても、RCはり供試体の場合、通常、材料評価用の供試体と比べて寸法が大きいため、収縮の影響は大きくないであろうと考えたことによる。

図-6.20は、土木学会コンクリート標準示方書²⁾に示される部材の収縮ひずみの算定式である式(6.6)および式(6.7)を用い、表-6.6に示されるRCはり供試体の平均的な収縮ひずみの経時変化を試算したものである。比較としてJIS A 1129に準じた供試体(角柱供試体：100×100×400mm)の試算結果も併記する。なお、RCはり供試体の収縮ひずみの試算には、鉄筋による拘束の影響は無

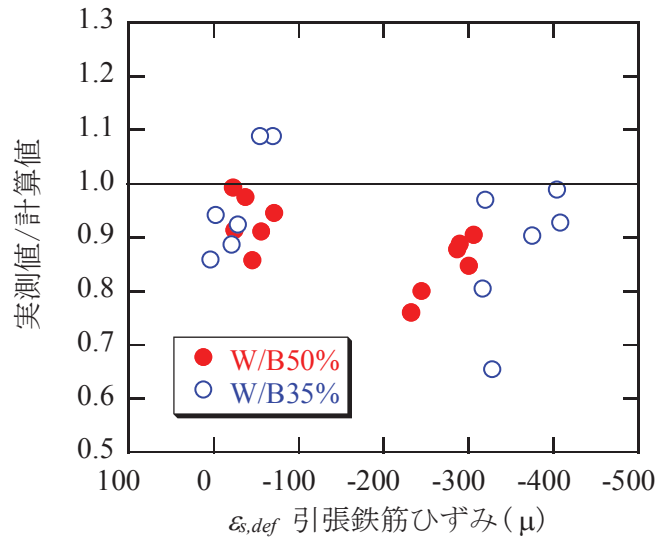


図-6.19 セン断強度評価式(6.2)の精度に及ぼす引張鉄筋ひずみの影響

表-6.6 抽出したせん断供試体の概要

研究者	供試体数	f'_c (N/mm ²)	p (%)	d (m)	a/d
Morrow ¹³⁾	11	15-46 (29.9)	1.2-3.8 (2.26)	0.36-0.37 (0.35)	3.8-7.9 (4.70)
Mathey ¹⁴⁾	7	23-30 (26.2)	0.5-0.9 (0.75)	0.40	2.8-3.8 (3.37)
Moody ¹⁵⁾	24	12-41 (26.0)	1.6-2.4 (1.90)	0.26-0.27 (0.27)	2.9-3.4 (3.26)
Leonhardt ¹⁶⁾	6	30-31 (30.6)	2.0-2.1 (2.04)	0.27-0.28 (0.28)	3.0-5.9 (4.76)
Leonhardt ¹⁷⁾	12	35-39 (37.9)	1.3-1.7 (1.55)	0.07-0.60 (0.24)	3.0
Taylor ¹⁸⁾	23	19-37 (26.3)	0.9-2.3 (1.70)	0.22	4.1
Taylor ¹⁹⁾	12	24-32 (27.3)	1.2-1.9 (1.43)	0.22	3.8
全体	95	15-46	0.5-3.8	0.07-0.60	2.8-7.9

()内は平均値

視している。また、コンクリートのひずみの表記は示方書式にならい、収縮側を正としている。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{\frac{1-RH/100}{1-60/100} \cdot \varepsilon_{sh,inf} \cdot (t-t_0)}{\left(\frac{D}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t-t_0)} \quad (6.6)$$

$$\beta = \frac{30}{\rho} \left(\frac{120}{-14 + 21C/W} - 0.70 \right) \quad (6.7)$$

ここで、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 部材の収縮ひずみ、 t : コンクリートの材齢、 t_0 : 乾燥開始材齢(=3日)、 RH : 構造物の置かれる環境の平均相対湿度(=60%)、 D : 有効部材厚(=225, 100mm)、 $\varepsilon_{sh,inf}$: 乾燥収縮

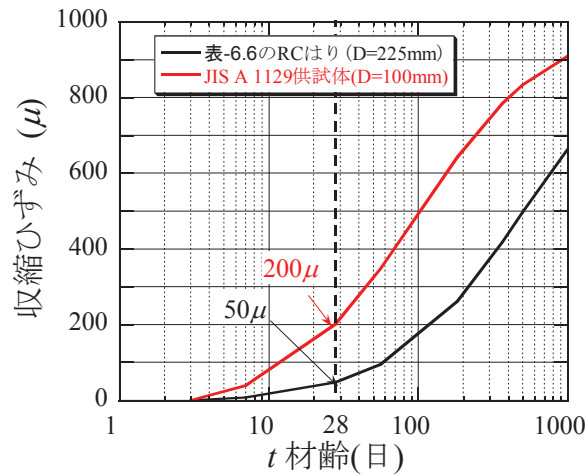


図-6.20 表-6.6のRCはりの収縮ひずみの試算結果

表-6.7 セン断強度評価式(6.2)で使用された全データと表-6.6の抽出データとの比較

対象とするデータ	供試体数	f'_c (N/mm ²)	P (%)	d (m)	a/d	実測値/計算値	
						平均値	変動係数
式(6.2)に使用された 全供試体のデータ	265	12-66 (29)	0.25-4.52 (2.40)	0.07-1.10 (0.30)	2.6-8.5 (4.2)	1.02	8.2
表-6.6で抽出した 供試体のデータ	95	12-46 (29)	0.5-3.8 (1.72)	0.07-0.60 (0.27)	2.8-7.9 (3.8)	1.02	8.2

()内は平均値

ひずみの最終値(=1000 μ)， β ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数(=99)， ρ ：コンクリートの単位容積質量(=2.18g/cm³)， C/W ：セメント水比(=1.39)である。

式(6.6)および式(6.7)に用いたパラメータは次のように定めた。乾燥開始材齢は3日，相対湿度は60%，乾燥収縮ひずみの最終値は1000 μ と仮定した。単位容積質量およびセメント水比は，各文献に示される配合から算出し，これらを平均した。RCはりの有効部材厚は，文献に示される断面諸元より，同じ断面積の正方形の一辺の長さを求め，これらを平均した(225mm)。比較用のJIS A 1129供試体の有効部材厚は100mmとした。なお，これらを体積表面積比で表すと，RCはりが56mm，JIS A 1129供試体が25mmとなる。

図-6.20より，RCはりの収縮ひずみの発現は，JIS A 1129供試体と比べて明らかに緩やかであることがわかる。材齢4週($t=28$ 日)におけるRCはりの収縮ひずみは50 μ と小さく，これは設定した収縮ひずみの最終値の5%に過ぎない。表-6.6に示されたRCはりに，収縮ひずみの最終値がどの程度の大きさのコンクリートを使用していたかは不明であるが，一般に1000 μ を超えるケースはそれほど多くないことを考えると，実際には，材齢4週における収縮ひずみは試算結果よりもさらに小さかった可能性が高いと考えられる。

以上のことから、抽出した表-6.6に示されるRCはりの実験データには収縮の影響がそれほど含まれていないと判断し、抽出したデータに対するせん断強度評価式(6.2)の予測精度が、全データを対象にした場合の予測精度と比べてどの程度相違するか比較した。コンクリートの収縮によってせん断強度が低下し、かつその影響を大きく受けた供試体が評価式構築の際のデータに有意に含まれているとすれば、抽出データと全データの(実測値)/(計算値)の平均値は相違すると考えられるためである。両者を比較した結果を表-6.7に示す。抽出した供試体の(実測値)/(計算値)の範囲は0.83~1.26、平均値は1.02、変動係数は8.2%であり、せん断強度評価式(6.2)のベースとなった全てのデータ(265体)に対する予測精度⁶⁾(平均値: 1.02, 変動係数: 8.2%)と一致した。このことから、本論文では、せん断強度評価式(6.2)にコンクリートの収縮の影響は有意に含まれていないと判断し、以後、これを組み込む手法について検討を行うこととした。

6.4.2 コンクリートの収縮を考慮したせん断強度評価法

(1) 等価引張鉄筋比の概念

せん断補強筋のないRCはりのせん断抵抗要素として、圧縮部コンクリート、破壊進行領域のせん断抵抗、ひび割れ面でのかみ合い、ダウエル作用があり、せん断強度評価式(6.2)には、これらを包括的に評価する因子の一つとして引張鉄筋比の項が含まれている。前章で示したように、コンクリートの収縮は、RCはりの曲げひび割れ幅およびせん断変形の増大をもたらし、中立軸深さを減少させる。これらは、各々、上述のせん断抵抗要素と強く関連する事象であることから、せん断強度評価式(6.2)の鉄筋比の影響項に、コンクリートの収縮の影響を集約することが可能であると考えられる。

Sato and Kawakaneは、自己収縮による高強度RCはりのせん断強度の低下を、図-6.21に示す収縮による鉄筋ひずみ変化量の増加を引張鉄筋比の減少と等価とみなす、等価引張鉄筋比の概念を提案²⁰⁾した。これは、収縮によって鉄筋に蓄積された圧縮ひずみがひび割れ発生によって解放されることによって、同一曲げモーメント時の引張鉄筋ひずみの変化量が収縮のない場合よりも大きくなることを、機能的に引張鉄筋比の減少と等価であるとする考えである。等価引張鉄筋比は、鉄筋位置のコンクリート応力がゼロの状態を収縮のないRCはりと同じ状態とみなし、そこから斜めひび割れ発生時までの鉄筋ひずみの変化量を取り入れた式(6.8)で表される。

$$p_{s,e} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s - \varepsilon_{s0,def}} p_s \quad (6.8)$$

$$\varepsilon_{s0,def} = \varepsilon_{s,def} - \sigma_{c,def} / E_c$$

ここで、 $p_{s,e}$: 等価引張鉄筋比、 p_s : 公称鉄筋比、 ε_s : せん断スパン中央でのコンクリート引張部を無視した曲げ理論を用いて求めた斜めひび割れ発生時の引張鉄筋ひずみ、 $\varepsilon_{s0,def}$: 引張鉄筋位置のコンクリート応力がゼロのときの引張鉄筋ひずみ、 $\varepsilon_{s,def}$: 載荷直前の引張鉄筋ひずみ、 $\sigma_{c,def}$: 載荷直前の引張鉄筋図心位置でのコンクリート応力である。

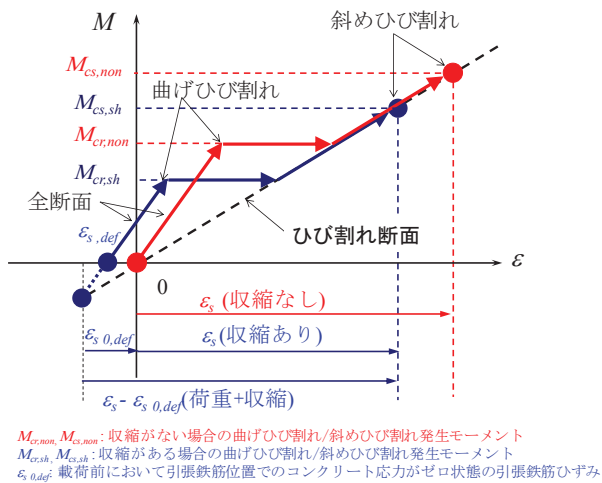


図-6.21 等価引張鉄筋比の概念

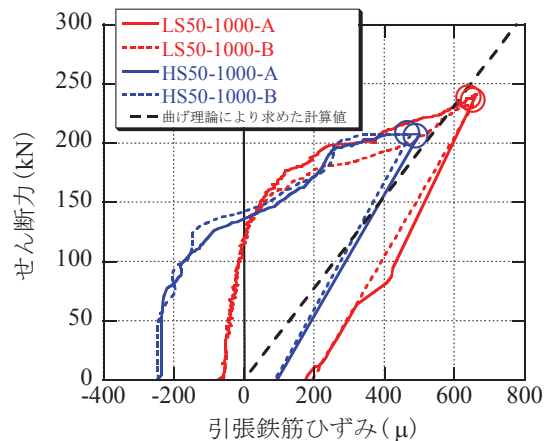


図-6.22 載荷試験時のせん断スパン中央部の引張鉄筋ひずみ

図-6.22は、載荷試験時のせん断スパン中央の引張鉄筋ひずみとせん断力との関係を、HSシリーズ(HS50-1000-A, B)とLSシリーズ(LS50-1000-A, B)について比較した一例である。図中には、コンクリート引張部を無視した曲げ理論によって求めた鉄筋ひずみの計算値を併記する。HSシリーズは、LSシリーズよりも低いせん断力で曲げひび割れが発生した。引張鉄筋ひずみは、曲げひび割れ発生後、せん断力の増加とともに計算値に漸近するように増加し、斜めひび割れ発生時に計算値とほぼ一致した。載荷直前の引張鉄筋ひずみから、図中○で示す斜めひび割れ発生時までのひずみの変化量は、LSシリーズが720 μ 程度、HSシリーズが730 μ 程度であり、両者はほぼ同程度であった。これは、前述した斜めひび割れ発生時の曲げひび割れ幅が、収縮の大小によらずほぼ同等であったことと符号する。なお、W/B35%の場合、W/B50%と比べて、載荷直前の引張鉄筋ひずみから斜めひび割れ発生時までの鉄筋ひずみの変化量がやや大きくなる傾向であったが、せん断力の増加にともなうひずみの挙動はほぼ同様であった。

図-6.23は、引張鉄筋位置のコンクリート応力がゼロのときから斜めひび割れ発生時までの、せん断スパン中央部における引張鉄筋ひずみの変化量と曲げひび割れ幅との関係を示したものである。ばらつきはあるものの、両者には概ね線形関係が認められる。これまで述べたように、コンクリートの収縮は、直接的にはひび割れ幅の増大という形でせん断耐荷機構に関与する。一方、等価引張鉄筋比の概念では、これを引張鉄筋ひずみの変化量で代表させており、両者の線形関係は、等価引張鉄筋比の適用性を示すものと考えられる。

等価引張鉄筋比は、図-6.21に基づいて定式化された式(6.8)からわかるように、コンクリートの収縮に起因する引張鉄筋ひずみの大きさに依存する。したがって、斜めひび割れ発生時の荷重によるひずみに対し、収縮に起因するひずみが大きくなれば、等価引張鉄筋比は小さくなる。一方、収縮に起因するひずみが同一であっても、有効高さの増大にともなってせん断強度が低下すれば、荷重によるひずみの影響は相対的に小さくなるため、等価引張鉄筋比は小さくなる。すなわち式(6.8)には、コンクリートの収縮が、RCはりのせん断強度およびその寸法効果に影響を及

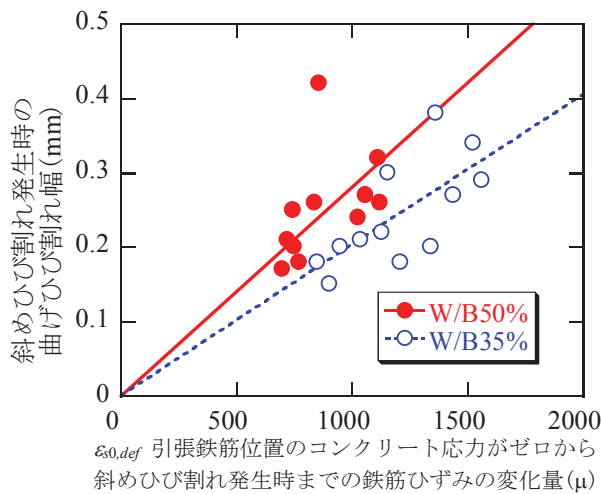


図-6.23 引張鉄筋ひずみの変化量と斜めひび割れ発生時の曲げひび割れ幅

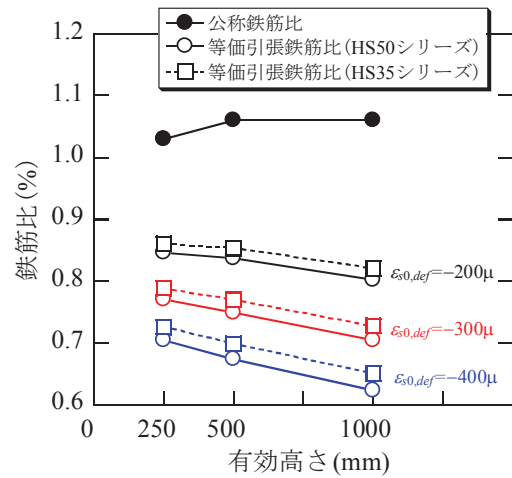


図-6.24 等価引張鉄筋比に関するパラメータスタディ

表-6.8 パラメータスタディに用いた因子・水準

シリーズ	HS50	HS35
圧縮強度(N/mm ²)	40.0	53.0
ヤング係数 (kN/mm ²)	21.0	23.0
有効高さ(mm)	250, 500, 1000	
公称鉄筋比 (%)	1.03, 1.06, 1.06	
$\epsilon_{s0,def}(\mu)$	-200, -300, -400	

ばすメカニズムが合理的に組み込まれていることを意味している。

このことを示したのが、図-6.24である。同図は、収縮および有効高さの変化によって、どの程度等価引張鉄筋比が変化するか、パラメータスタディを行った結果である。パラメータの設定条件は、表-6.8の通りである。コンクリートの圧縮強度およびヤング係数は、表-6.4に示したHS50, HS35シリーズの実験結果に基づき定めた。収縮の影響として、引張鉄筋位置のコンクリート応力がゼロのときの引張鉄筋ひずみを -200μ 、 -300μ 、 -400μ とした。斜めひび割れ発生時の荷重による鉄筋ひずみは、後述するように、せん断強度評価式(6.2)に等価引張鉄筋比を代入して求めた。同図によれば、等価引張鉄筋比は、収縮の影響が大きくなるほど、また、有効高さが大きくなるほど小さくなっている。鉄筋比の大小をせん断強度の大小に置き換えれば、これまで示した実験結果の傾向と一致していることがわかる。

(2) 等価引張鉄筋比のせん断強度評価式への適用

コンクリートの収縮の影響をRCはりのせん断強度評価式で考慮する方法として、ここでは、式(6.8)による等価引張鉄筋比を、せん断強度評価式(6.2)の鉄筋比の影響を表す項 β_p に、公称鉄筋

表-6.9 評価式(6.2)に公称鉄筋比および等価引張鉄筋比を用いた場合の(実測値)/(計算値)

シリーズ	公称鉄筋比			等価引張鉄筋比		
	範囲	平均値	変動係数	範囲	平均値	変動係数
LS	0.86-1.09	0.95	8.1	0.86-1.11	0.96	8.5
HS	0.65-0.99	0.86	11.0	0.77-1.13	0.98	10.6
全体	0.65-1.09	0.90	10.6	0.77-1.13	0.97	9.5

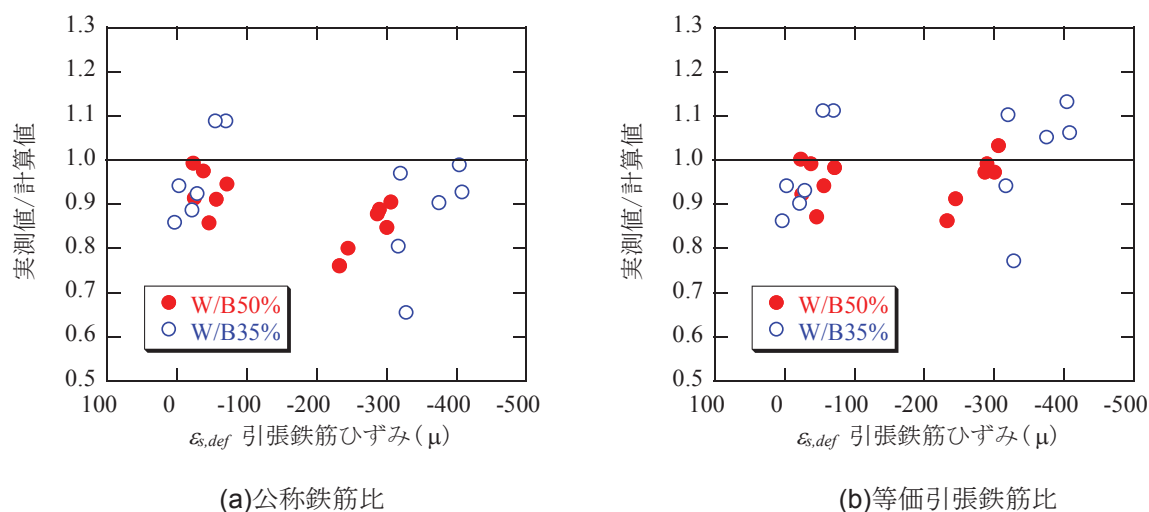


図-6.25 せん断強度評価式(6.2)の精度に及ぼす引張鉄筋ひずみの影響

比の代わりに直接入力する方法を採用した。これは、森戸・半井²¹⁾が用いた方法であり、コンクリートの収縮が異なる同一有効高さのRCはりを対象に、その適用性が確認されている。本検討では、有効高さが増えた場合の影響を含め、改めてその精度を評価するものである。

表-6.9は、せん断強度評価式(6.2)に、公称鉄筋比あるいは等価引張鉄筋比を用いた場合の(実測値)/(計算値)の範囲、平均値、変動係数を示したものである。全データの(実測値)/(計算値)の範囲は0.77~1.13、平均値が0.97、変動係数が9.5%であり、公称鉄筋比を用いた場合の結果(範囲:0.65~1.09、平均値:0.90、変動係数:10.6%)に比べて予測精度が向上している。LSシリーズだけで見ると、(実測値)/(計算値)の範囲は0.86~1.11、平均値は0.96であり、公称鉄筋比による結果(範囲:0.86~1.09、平均値:0.95)と大きな差は認められない。これは、LSシリーズのコンクリートの収縮が小さいためである。一方、HSシリーズの場合、(実測値)/(計算値)の範囲が0.77~1.13、平均値が0.98であり、公称鉄筋比による計算値(範囲:0.65~0.99、平均値:0.86)よりも明らかに精度向上が認められる。図-6.25は、公称鉄筋比あるいは等価引張鉄筋比を用いた計算値と実測値の比((実測値)/(計算値))と、載荷直前の引張鉄筋ひずみとの関係を示したものである。公称鉄筋比を用いた図-6.25(a)と比べると、等価引張鉄筋比を用いた図-6.25(b)は、引張鉄筋ひずみの増大にともなう(実測値)/(計算値)の減少傾向が是正されていることがわかる。

(3) 等価引張鉄筋比を用いた寸法効果の評価

RCはりのせん断強度の寸法効果が、コンクリートの強度と収縮によって変化することは、これまで述べたとおりである。一方、等価引張鉄筋比を用いることで、せん断強度に及ぼすコンクリートの収縮の影響を是正できることは、前節で示した。そこで、せん断強度の実測値を式(6.9)によって換算し、せん断強度の寸法効果をコンクリートの収縮の影響を受けない形で整理することとした。なお、式(6.9)は、コンクリートの収縮の大小によらず、RCはりのせん断強度は鉄筋比の1/3乗に比例するとの仮定を設け、公称鉄筋比と式(6.8)で算出した等価引張鉄筋比の比を、実測せん断強度に乗じたものである。

$$\tau_{c,e} = \tau_c \times \left(\frac{p_s}{p_{se}} \right)^{1/3} \quad (6.9)$$

ここで、 $\tau_{c,e}$ ：収縮の影響がない形に換算したせん断強度である。さらに、換算したせん断強度 $\tau_{c,e}$ から、 $\beta_{d,exp}$ を式(6.10)によって逆算し、有効高さとの関係を示したのが、図-6.25である。

$$\beta_{d,exp} = \tau_{c,e} / f_{vcd} \cdot \beta_a \quad (6.10)$$

等価引張鉄筋比による換算せん断強度は、図-6.8と比べると明らかなように、コンクリートの収縮の大小に依存せず $\beta_{d,exp}$ を統一的に評価できていることがわかる。このことは、せん断強度の寸法効果に及ぼすコンクリートの収縮の影響を、等価引張鉄筋比によって定量的に評価できることを裏付ける結果といえる。強度レベル別に最小二乗回帰したときのせん断強度の寸法効果は、W/B50%が有効高さ d の $-0.28(-1/3.5)$ 乗($R^2=0.916$)、W/B35%が有効高さ d の $-0.43(-1/2.3)$ 乗

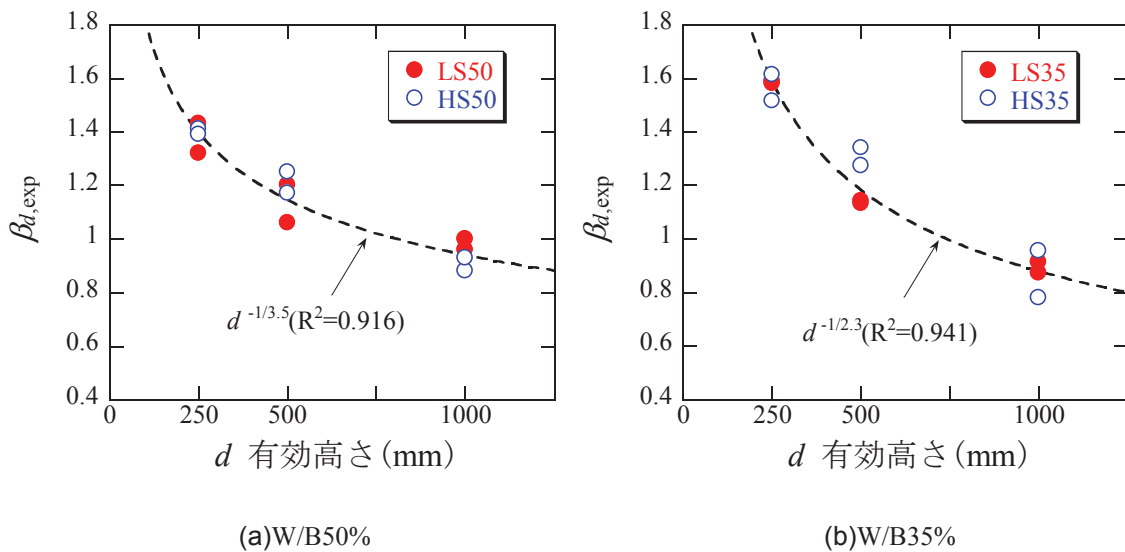


図-6.26 等価引張鉄筋比を用いた換算せん断強度と有効高さの関係

表-6.10 寸法効果則の近似値

W/B(%)	せん断強度	収縮量	有効高さ d に対する指数の近似値
50	実測値 (τ_c)	低収縮(LS)	-1/4
	実測値 (τ_c)	高収縮(HS)	-1/3
	換算値 ($\tau_{c,e}$)	ゼロ	-1/4
35	実測値 (τ_c)	低収縮(LS)	-2/5
	実測値 (τ_c)	高収縮(HS)	-1/2
	換算値 ($\tau_{c,e}$)	ゼロ	-2/5

($R^2=0.941$)となり、前者はせん断強度評価式(6.2)における-1/4乗と、後者はSato and Kawakane²⁰⁾が高強度RCはりを対象に提案した評価式における-2/5乗とほぼ同一であった。

表-6.10に、図-6.8で示したLS、HSシリーズの実測せん断強度の寸法効果則と、図-6.26で示した等価引張鉄筋比を用いてコンクリートの収縮の影響のない形に換算したせん断強度の寸法効果則を一覧して示す。なお、有効高さに対する指数は、整数の比となるように分母・分子をそれぞれ四捨五入によって丸めた近似値である。

6.5 第6章のまとめ

せん断補強筋のないRCはりのせん断挙動に及ぼすコンクリートの収縮、強度および有効高さの影響を明らかにするため、乾燥収縮が -1000μ を超える高収縮コンクリートと低収縮コンクリートを用いてRCはり(高収縮RCはり、低収縮RCはり)を製造し、有効高さ(d : 250mm, 500mm, 1000mm)、水結合材比(W/B: 50%, 35%)をパラメータとした曲げせん断載荷実験を行った。実験結果に基づき、収縮、有効高さ、強度がRCはりのせん断耐荷挙動に影響を及ぼすメカニズムについて考察するとともに、等価引張鉄筋比による収縮の影響を考慮したせん断強度評価法の適用性について検討した。本検討で得られた知見を以下に示す。なお、これらの知見は、載荷試験時のコンクリートの圧縮強度が39.6~58.6N/mm²の実験結果に基づくものである。

- (1) すべての高収縮RCはりで、載荷試験以前に、引張鉄筋と直交方向に微細な収縮ひび割れが確認された。
- (2) 高収縮RCはりのせん断強度は、低収縮RCはりよりも低下することが確認された。両者のせん断強度比は、W/B50%の場合0.86~0.97(平均: 0.92)、W/B35%の場合0.83~1.01(平均: 0.89)であり、低収縮RCはりに対する高収縮RCはりのせん断強度低下率は最大で17%であった。
- (3) せん断強度の寸法効果は、コンクリートの収縮が大きく、強度レベルが高いほうが大きくなった。低収縮RCはりのせん断強度の寸法効果は、W/B50%の場合、有効高さの-1/4乗、W/B35%

の場合、 $-2/5$ 乗に概ね比例した。高収縮RCはりの場合は、それぞれ有効高さの $-1/3$ 乗、 $-1/2$ 乗に概ね比例した。

- (4) コンクリートの収縮は、ひび割れの進展を促進し、同一応力下のひび割れ幅やせん断変形を増大させ、中立軸深さを浅くすること、その一方で、斜めひび割れ発生時のひび割れ幅やせん断変形は、収縮の大小によらずほぼ同一であることを実験的に確認した。このことから、コンクリートの収縮によるせん断強度の低下は、曲げせん断ひび割れ部および圧縮部コンクリートのせん断抵抗の低下によってもたらされたと考えられた。
- (5) 有効高さが大きくなるともに、寸法効果によってせん断強度が低下するため、斜めひび割れ発生時の引張鉄筋ひずみも低下し、コンクリートの収縮の影響が相対的に大きくなる。そのため、コンクリートの収縮は、せん断強度の寸法効果を増大させると考えられた。
- (6) コンクリートの高強度化によって、曲げせん断ひび割れの局所化が顕著になる傾向が、斜めひび割れ発生時のせん断変位およびせん断ひずみから確認された。
- (7) せん断強度に及ぼすコンクリートの収縮、強度および有効高さの影響を実験的に確認し、これらの連成作用を考慮したせん断強度の低下およびせん断強度の寸法効果の増大メカニズムを提示した。
- (8) 等価引張鉄筋比には、コンクリートの収縮がRCはりのせん断強度およびせん断強度の寸法効果に影響を及ぼすメカニズムを、合理的に組み込んでいることをパラメータスタディによって示した。
- (9) 等価引張鉄筋比を組み込んだ既往のせん断強度評価式により本実験のすべてのはりのせん断強度を評価した結果、(実測値)/(計算値)の範囲は $0.77 \sim 1.13$ 、平均値が 0.97 、変動係数が 9.5% であり、公称鉄筋比を用いた場合の結果(範囲： $0.65 \sim 1.09$ 、平均値： 0.90 、変動係数： 10.6%)に比べて予測精度の向上が確認された。
- (10) せん断強度の寸法効果に及ぼす収縮の影響を、等価引張鉄筋比を組み込んだ既往のせん断強度評価式によって定量的に評価できることを示した。
- (11) 等価引張鉄筋比を用いて収縮の影響がない形に換算したせん断強度の寸法効果は、 $W/B50\%$ の場合、有効高さの $-1/4$ 乗、 $W/B35\%$ の場合、有効高さの $-2/5$ 乗に概ね比例した。

第6章の参考文献

- 1) 土木学会：垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書，2008.
- 2) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2012.
- 3) 河金甲，佐藤良一：高強度RCはりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価，土木学会論文集E，Vol. 65，No. 2，pp. 178-197，2009.
- 4) 岡島達雄，一瀬賢一：コンクリートの強度および弾性定数の含水率依存性，セメント技術年報，Vol. 36，pp. 211-213，1982.
- 5) Okamura, H. and Higai, T.: Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement, *Proceedings of JSCE*, No. 300, pp. 131-141, 1980.
- 6) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No. 372，V-5，pp. 167-176，1986.
- 7) 土木学会：2002年版コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリーNo. 108，pp. 20-24，2002.
- 8) 藤田学，佐藤良一，松元香保里，高木康宏：高強度コンクリートを用いたRCはりのせん断強度と寸法効果，土木学会論文集，No. 711/V-56，pp. 161-172，2002.
- 9) 前田匡樹，有菌祐介，幸村信行：鉄筋コンクリート梁部材の変形評価法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 19，No. 2，pp. 861-866，1997.
- 10) Gustafsson, P. J. and Hillerborg, A.: Sensitivity shear strength of longitudinally reinforced concrete beams to fracture energy of concrete, *Journal of ACI*, pp. 286-294, 1988.
- 11) Zink, M.: Diagonal shear cracking in slender concrete beams, *LASER No. 5, University of Leipzig*, pp. 305-332, 2000.
- 12) Walraven, J. C.: Size effect: their nature and their recognition in building code, *JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures*, pp. 295-314, 1993.
- 13) Morrow, J. and Viest, I. M.: Shear strength of reinforced concrete frame members without web reinforcement, *Journal of ACI*, pp. 833-869, 1957.
- 14) Mathey, R. G. and Watstein, D.: Shear strength of beams without web reinforcement containing deformed bars of different yield strengths, *Journal of ACI*, pp. 183-206, 1963.
- 15) Moody, K. G., Viest, I. M., Elstner, R. C. and Hognestad, E.: Shear strength of reinforced concrete beams, Part I tests of simple beams, *Journal of ACI*, pp. 317-332, 1954.
- 16) Leonhardt, F. and Walther, R.: Beitrage zur Behandlung der schubprobleme im Stahlbetonbau, *Beton und Stahlbetonbau*, pp. 32-44, 1962.
- 17) Leonhardt, F. and Walther, R.: Beiträge zur Behandlung der schubprobleme im Stahlbetonbau, *Beton und Stahlbetonbau*, pp. 54-64, 1962.
- 18) Taylor, R.: Some shear tests on reinforced concrete beams without shear reinforcement, *Magazine of Concrete Research*, pp. 145-154, 1960.

- 19) Taylor, R. and Brewer, R. S.: The effect of the type of aggregate on the diagonal cracking of concrete beams, *Magazine of Concrete Research*, pp. 87-92, 1963.
- 20) Sato, R. and Kawakane, H.: A new concept for the early age shrinkage effect on diagonal cracking strength of reinforced HSC beams (Invited paper), *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 45-67, 2008.
- 21) 森戸重光, 半井健一郎 : 収縮応力および収縮ひび割れが RC はりのせん断耐力及ぼす影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 32, No. 2, pp. 673-678, 2010.

第7章 結 論

7.1 はじめに

構造物の長寿命化を目的とした品質確保の観点から、コンクリートの収縮挙動を適切に予測することは重要な工学的課題のひとつである。最近、骨材の品質に起因する過大なコンクリートの収縮によって構造物にひび割れや想定外のたわみが生じた問題に端を発し、コンクリートの収縮の取扱い、設計方法を見直す必要性が生じてきた。具体的には、①収縮抑制材料の効果についてデータ蓄積が必要であること、②骨材物性を考慮できる乾燥収縮予測式が整備されていないこと、③収縮が構造物の安全性に及ぼす影響が明らかにされていないこと、などが技術的課題と考えられた。本研究では、これらの課題に対して、①石灰石骨材、膨張材、収縮低減剤の効果の体系的な評価、②骨材品質がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する検討と、それに基づく簡易な評価方法および予測式の整備、③RCはり部材のせん断破壊に及ぼす収縮の影響評価を実験的に行なった。これによって、材料物性から構造性能までを包含した体系的な収縮設計方法の構築に資することを最終的な目的とした。

7.2 本研究で得られた知見と課題

7.2.1 本研究で得られた知見

第1章では、コンクリートの乾燥収縮に関する社会的要請や技術背景を述べ、本研究の意義・目的を述べた。

第2章では、本研究に関係した研究を調査・整理した。得られた知見と現状の課題を以下に記述する。

- (1) コンクリート中の骨材量が大幅に変化する配合では、骨材がセメントペーストを希釈する効果がコンクリートの乾燥収縮に支配的な影響を及ぼす。しかしながら、実際に使用されるコンクリート配合の骨材含有率の範囲では、骨材がセメントペーストを拘束する影響のほうが大きく、コンクリートの乾燥収縮を評価する上で、骨材物性を検討する必要がある。
- (2) コンクリートの乾燥収縮を抑制する材料として、石灰石骨材、膨張材、収縮低減剤といった材料が広く認知されている。しかしながら、これら材料の収縮抑制効果は、標準的な材料を用いた場合について示されたものであり、セメントや骨材の種類など材料の組み合わせが異なる場合について考慮した検討はほとんどない。また、コンクリートの乾燥収縮に及ぼすセメント種類や石灰石骨材の影響については、研究によって意見が異なる。
- (3) 骨材の収縮拘束効果として、骨材自体のヤング係数および乾燥収縮が関与していることが

明らかとされてきている。また、これらを直接測定する以外にも、コンクリートの乾燥収縮を評価できるとする指標が多数提案されている。コンクリートの乾燥収縮ひずみの計測には通常 6 か月を要するため、簡易な骨材指標によってコンクリートの乾燥収縮ひずみを評価できれば有益と考えられる。しかしながら、現状では、それぞれの指標を各研究者が提案している段階であり、それぞれの精度の比較検証が十分でない。また、各指標を複合した場合の評価精度についても検討がなされていない。

- (4) 近年構築された規準類の乾燥収縮予測式は、骨材の影響を考慮できる形になっている。ただし、これらは膨大なコンクリートデータベースに基づいて構築された平均値を求める確率論モデルであるため、骨材の影響の取り扱いについて物理的な意味があいまいであることや、今後、骨材品質が変化した場合、改めてコンクリートデータベースを更新せざるを得ず、膨大な労力がかかるといった課題がある。一方、骨材物性の影響を直接考慮できる予測式である複合モデルは、理論が明快であるものの、入力値となる骨材物性を実験で求める必要があるため、設計段階での運用が難しいといった問題がある。
- (5) RC はりのせん断挙動を、機械的に断面に引張力を導入して検討した事例や、解析的に軸方向引張力を与え、斜めひび割れ面にロッド要素でコンクリートの引張軟化特性やかみ合わせ効果を組み込んで検証した事例などがあり、いずれも断面に引張力が生じることでせん断強度が低下することが確認されている。一方、実際にコンクリートの収縮によって部材断面に引張応力が生じた場合のせん断強度の低下について検討した事例はほとんどない。
- (6) コンクリートの自己収縮が高強度 RC はりのせん断挙動に及ぼす影響について検討されており、収縮によってせん断強度が低下すること、寸法効果が増大することが実験的に確認されている。2次元非線形 FEM による解析結果からも現象の妥当性が再現されている。一方、普通強度レベルで卓越するコンクリートの乾燥収縮については、RC はりのせん断挙動に影響を及ぼすか明らかになっていない。

第3章では、コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼすセメント種類、物性・産地の異なる骨材の影響を評価するとともに、収縮抑制材料として石灰石骨材、膨張材、収縮低減剤を用いて、骨材の組合せやセメント種類が異なる場合の効果について系統的な検討を行った。以下に得られた知見を記す。

- (1) 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみに対するその他のセメントの場合の乾燥収縮ひずみは、骨材が異なっても-5.3%~6.6%の範囲であり、セメント種類が乾燥収縮ひずみの大小に及ぼす影響は小さい。
- (2) 早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、その他のセメントを

用いた場合の乾燥収縮ひずみよりも相対的に小さい傾向が認められ、全セメント平均値の-2%~4%であった。これは、近年の調査結果と一致した傾向であった。

- (3) コンクリートの圧縮強度に及ぼす骨材の影響は小さく、セメント種類の影響が支配的であった。一方、コンクリートの静弾性係数は、骨材の種類の影響が支配的であり、示方書のヤング係数の設計値を30%程度下回る場合も確認された。
- (4) 硬質砂岩砕石を石灰石砕石によって置換した場合、ほぼその置換率に比例してコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなった。一方、同量の石灰石砕砂を用いても、石灰石砕石を用いた場合よりも乾燥収縮ひずみの抑制効果が小さくなった。これは、コンクリートの静弾性係数に及ぼす影響が、粗骨材よりも細骨材のほうが小さかったためであると考えられた。
- (5) 収縮補償用として膨張材を使用したコンクリートの拘束膨張ひずみは、骨材が異なる場合においても所要の目標性能(150~250 μ)を確保した。膨張コンクリートの拘束膨張ひずみには、骨材の種類よりもセメント種類の影響が支配的であった。
- (6) 拘束膨張・収縮ひずみより求めた普通コンクリートに対する膨張コンクリートの収縮補償量は、コンクリートと鋼材間ですべりが生じたと考えられた一部の配合を除けば、材料の組合せによる有意な差は認められなかった。
- (7) 収縮低減剤の標準添加量をコンクリートに使用した場合、セメント種類、骨材の組合せによらず所要の目標性能を満足する結果であった。早強ポルトランドセメントの場合、その他のセメントを用いた場合と比べ、収縮低減剤の効果が大きい傾向が認められた。これは、収縮低減剤の効果が初期材齢で大きいことから、早期に強度が発現し収縮駆動力が大きくなると考えられる早強ポルトランドセメントにおいて、より大きな効果がもたらされたと推察された。
- (8) 膨張材の収縮抑制効果は、骨材やセメントの種類によらず拘束膨張収縮ひずみで120~160 μ 程度であった。収縮低減剤の収縮抑制効果は、基準となるコンクリートの乾燥収縮の大きさによらず15~20%程度であった。これらの結果によれば、基準となるコンクリートの乾燥収縮ひずみが-1000 μ 程度以下では、収縮抑制効果は膨張材のほうが収縮低減剤よりも大きくなり、-1000 μ 程度以上では、その効果が逆転する。

第4章では、火成岩、堆積岩の砕石2005を用い、粗骨材の密度、吸水率、吸湿率、細孔径分布、静・動ヤング係数、乾燥収縮率を計測し、これらの物性とコンクリートの乾燥収縮との相関性を評価するとともに、統計解析を用いて影響度の高い因子の特定を行った。また、粗骨材の乾

乾燥収縮率の測定方法に関する検討を行なった。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの乾燥収縮ひずみは、粗骨材の種類によって大幅に異なり、乾燥期間 182 日で $-501 \sim -1036 \mu$ の範囲に分布した。岩種別にみると、火成岩を用いた場合の乾燥収縮ひずみは $-509 \sim -820 \mu$ の範囲であった。堆積岩の中では、石灰石を用いた場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみが $-501 \sim -590 \mu$ であり、その他の岩種よりも絶対値、分布範囲ともに小さかった。一方、堆積岩でも硬質砂岩を用いた場合の乾燥収縮ひずみは $-623 \sim -1036 \mu$ であり、粗骨材の種類によって大きく異なった。
- (2) 粗骨材の絶乾密度が小さくなるほど、吸水率、吸湿率が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなった。粗骨材の物性値とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性は、吸湿率が最も大きくなったが、決定係数は 0.5 を下回る結果であった(絶乾密度：0.190，吸水率：0.337，吸湿率：0.497)。
- (3) 粗骨材の細孔容積が多くなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向が認められた。細孔径を区間分けしたなかでコンクリートの乾燥収縮ひずみと相関性が最も高くなったのは、細孔径が $0.015 \sim 0.0075 \mu\text{m}$ の範囲であった。ただし、決定係数は 0.46 程度であり、コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する説明度は必ずしも高くなかった。
- (4) 粗骨材のコア供試体を用いて圧縮載荷試験から静弾性係数を、粗骨材粒を用いて超音波伝播時間から動弾性係数を求めた。両物性値が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向を確認した。コンクリートの乾燥収縮との相関性は比較的高く、決定係数は $0.58 \sim 0.68$ であった。
- (5) 粗骨材粒の乾燥収縮率をひずみゲージによって測定し、乾燥収縮率が大きくなるとともにコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなった。両者の相関性は、決定係数が 0.898 と非常に高く、コンクリートの乾燥収縮ひずみを説明する上で有効な評価指標であると考えられた。最小二乗回帰による直線の傾きによれば、粗骨材粒の乾燥収縮率 100μ あたりコンクリートの乾燥収縮ひずみは 70μ 程度変化した。
- (6) 相関および重回帰分析によって、説明変数として粗骨材の静弾性係数(E_s)と乾燥収縮率(ε_s)を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみに関する重回帰式 $\varepsilon_c = 2.61E_s + 0.59\varepsilon_s - 742$ を導出した(決定係数：0.931)。
- (7) 骨材を岩種(火成岩、堆積岩)によって分類することで、乾燥収縮率以外の物性とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関性は、岩種で分類しない場合よりも向上した(決定係数：0.6 以上)。同一岩種・産地の骨材品質を把握するという目的であれば、おおむね全ての骨材物性

がコンクリートの乾燥収縮ひずみの簡易指標として用いることができると考えられた。一方、岩種等の情報がない場合は、骨材の乾燥収縮を指標とすることが望ましいと考えられた。

- (8) コンクリートの乾燥収縮ひずみの指標として有効と考えられた粗骨材粒の乾燥収縮率の測定方法に関する検討を行い、①粗骨材の粒径が小さいほど乾燥収縮率が大きくなる傾向が認められるため、同程度の粒径で評価することが適当であること、②測定方向の影響はそれほど大きくないこと、③粗骨材粒のサンプル数は、5～15個程度とすることが適当であること、などがわかった。

第5章では、骨材物性を考慮できるコンクリートの乾燥収縮予測式として3相複合モデルを取り上げ、予測手法としての実務的な整備を図るとともに、その予測精度を検証した。「**第4章**」の粗骨材のヤング係数、乾燥収縮率の評価結果および既往の研究結果に基づき、骨材の簡易な物性に関連付けたモデルを構築した。この骨材物性モデルを組み込んだ複合モデルによる予測精度を、「**第3章**」、「**第4章**」で検討したコンクリートの実験データおよび新たに全国のレディーミクストコンクリート工場から収集したデータを用い、現行の土木学会式と比較検証した。さらに、ケーススタディを用いて、複合モデルと現行土木学会式との関係性について考察を行った。

- (1) 骨材のヤング係数および乾燥収縮率を、実験データおよび既往の研究データに基づきモデル化した。骨材のヤング係数は絶対乾密度および吸水率に基づくモデル式を提案した。骨材の乾燥収縮率は、堆積岩と火山岩に分類した直線モデル式を提案した。
- (2) 骨材物性モデルにより同定した細・粗骨材物性を複合モデルに入力したコンクリートの乾燥収縮予測精度が十分に高いことを確認した。細骨材物性を一定値(ヤング係数 60kN/mm^2 、乾燥収縮率 337μ)とし粗骨材物性に実測値を用いる従来法と比べ、骨材物性モデルを用いる方法は、細骨材の種類の影響を考慮できる点で有利であることを確認した。
- (3) 骨材物性モデルを組み込んだ複合モデルによるコンクリートの乾燥収縮予測精度は、レディーミクストコンクリート工場から収集したコンクリートデータに対し、現行の土木学会式と同程度の精度で再現できることを確認した。
- (4) 複合モデルを用いたケーススタディより、土木学会式の骨材品質に関する係数 α の値は、粗骨材に堆積岩を用いた場合 6～8、火成岩を用いた場合 4 程度となった。細・粗骨材ともに吸水率の大きい堆積岩を使用した場合、土木学会式で予測され得る収縮量を大きく超える可能性があることが示唆された。

第6章では、せん断補強筋のない普通強度RCはりのせん断挙動に及ぼす収縮の影響を明らかにするため、乾燥収縮が -1000μ を超える高収縮コンクリートと低収縮コンクリートを用いて、有効

高さ(d: 250mm, 500mm, 1000mm), 水結合材比(W/B: 50%, 35%)をパラメータとした曲げせん断実験を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) すべての高収縮RCはりで、載荷試験以前に、引張鉄筋と直交方向に微細な収縮ひび割れが確認された。
- (2) 高収縮RCはりのせん断強度は、低収縮RCはりよりも低下することが確認された。両者のせん断強度比は、W/B50%の場合0.86~0.97(平均: 0.92), W/B35%の場合0.83~1.01(平均: 0.89)であり、低収縮RCはりに対する高収縮RCはりのせん断強度低下率は最大で17%であった。
- (3) せん断強度の寸法効果は、コンクリートの収縮が大きく、強度レベルが高いほうが大きくなった。低収縮RCはりのせん断強度の寸法効果は、W/B50%の場合、有効高さの $-1/4$ 乗, W/B35%の場合、 $-2/5$ 乗に概ね比例した。高収縮RCはりの場合は、それぞれ有効高さの $-1/3$ 乗, $-1/2$ 乗に概ね比例した。
- (4) コンクリートの収縮は、ひび割れの進展を促進し、同一応力下のひび割れ幅やせん断変形を増大させ、中立軸深さを浅くすること、その一方で、斜めひび割れ発生時のひび割れ幅やせん断変形は、収縮の大小によらずほぼ同一であることを実験的に確認した。このことから、コンクリートの収縮によるせん断強度の低下は、曲げせん断ひび割れ部および圧縮部コンクリートのせん断抵抗の低下によってもたらされたと考えられた。
- (5) 有効高さが大きくなるとともに、寸法効果によってせん断強度が低下するため、斜めひび割れ発生時の引張鉄筋ひずみも低下し、コンクリートの収縮の影響が相対的に大きくなる。そのため、コンクリートの収縮は、せん断強度の寸法効果を増大させると考えられた。
- (6) コンクリートの高強度化によって、曲げせん断ひび割れの局所化が顕著になる傾向が、斜めひび割れ発生時のせん断変位およびせん断ひずみから確認された。
- (7) せん断強度に及ぼすコンクリートの収縮、強度および有効高さの影響を実験的に確認し、これらの連成作用を考慮したせん断強度の低下およびせん断強度の寸法効果の増大メカニズムを提示した。
- (8) 等価引張鉄筋比には、コンクリートの収縮がRCはりのせん断強度およびせん断強度の寸法効果に影響を及ぼすメカニズムを、合理的に組み込んでいることをパラメータスタディによって示した。
- (9) 等価引張鉄筋比を組み込んだ既往のせん断強度評価式により本実験のすべてのはりのせん

断強度を評価した結果、(実測値)/(計算値)の範囲は0.77～1.13, 平均値が0.97, 変動係数が9.5%であり, 公称鉄筋比を用いた場合の結果(範囲: 0.65～1.09, 平均値: 0.90, 変動係数: 10.6%)に比べて予測精度の向上が確認された。

(10)せん断強度の寸法効果に及ぼす収縮の影響を, 等価引張鉄筋比を組み込んだ既往のせん断強度評価式によって定量的に評価できることを示した。

(11)等価引張鉄筋比を用いて収縮の影響がない形に換算したせん断強度の寸法効果は, W/B50%の場合, 有効高さの-1/4乗, W/B35%の場合, 有効高さの-2/5乗に概ね比例した。

以上, 本研究における成果をまとめた中から, 材料物性から構造性能までを包含した体系的な収縮設計方法の構築という最終目的の観点から成果をピックアップすると, ①膨張材, 収縮低減剤, 石灰石骨材の収縮抑制効果の系統的な把握, ②コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材物性の影響把握, ③骨材物性をモデル化することによる設計段階での複合モデルの利用とその適用性把握, ④収縮によって蓄積された引張鉄筋ひずみに基づく等価引張鉄筋比を用いた RC はり部材のせん断耐荷力の定量化が挙げられる。

7.2.2 今後の課題

(1)せん断強度評価における課題

上記成果を利用することで, 理論的には材料性能から構造性能までを体系的に収縮設計を実施することができる。図-7.1 は, コンクリートの設計強度 45N/mm^2 , 普通コンクリートの収縮ひずみを -500μ , 膨張コンクリートの収縮ひずみを -264μ と仮定し, 等価引張鉄筋比を用いて算出した RC はりのせん断強度と, 二羽式¹⁾から算出したせん断強度との強度比である(ケース①)。膨張コンクリートの収縮ひずみは, 「第3章」図-3.37 に示した拘束収縮比の回帰式から求めた。その他の計算の諸条件は, 表-7.1 に示すとおりであり, 材料の物性値は基本的に 2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書[設計編]²⁾に準じた。また, コンクリートの収縮から鉄筋ひずみの算出には以下の式(7.1)を用いた。

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c} = 1 / \left\{ 1 + p_s \cdot \frac{(d - C_g)^2}{I_c / A_c} \cdot \frac{E_s}{E_c} (1 + \chi\phi) \right\} \quad (7.1)$$

ここで, ε_c : コンクリートの収縮ひずみ, ε_s : 引張鉄筋ひずみ, p_s : 引張鉄筋比(= A_s/bd), d : 有効高さ, C_g : 中立軸深さ, I_c : コンクリート純断面の中立軸周りの断面二次モーメント, A_c : コンクリートの断面積, E_s, E_c : 鉄筋, コンクリートのヤング係数, χ : 材齢係数, ϕ : クリープ係数である。

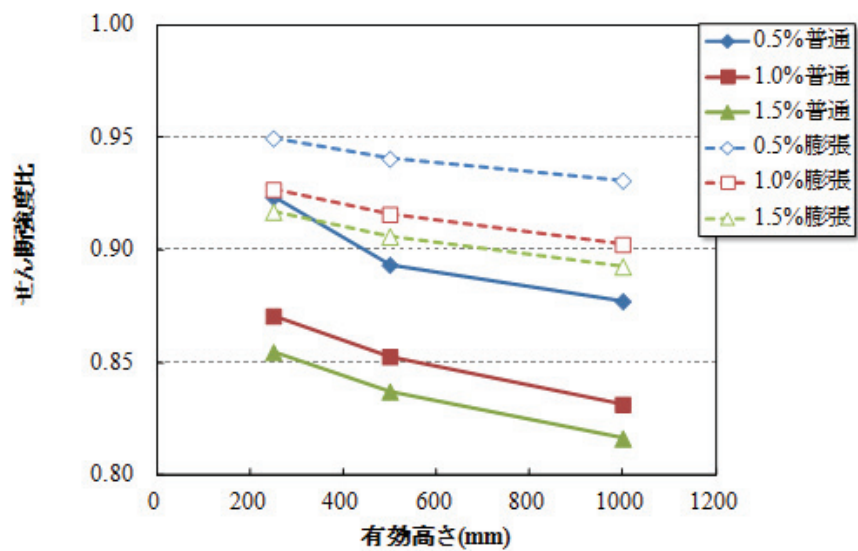


図-7.1 等価引張鉄筋比により試算したせん断強度と二羽式との比(ケース①)

表-7.1 試算の条件

設計値	単位	入力値	
		ケース①	ケース②
コンクリートの圧縮強度 f_c	N/mm ²	45	
コンクリートの引張強度 f_t	N/mm ²	2.9	
普通コンクリートの収縮ひずみ ϵ_c	μ	-500	-500, -800, -1200
膨張コンクリートの収縮ひずみ	μ	-264	-264, -531, -1013
引張鉄筋比(= A_s/bd) p_s	%	0.5, 1.0, 1.5	
有効高さ d	mm	250, 500, 1000	1000
幅 b	mm	300	
コンクリートのヤング係数 E_c	kN/mm ²	32	
鉄筋のヤング係数 E_s	kN/mm ²	200	
クリープ係数 ϕ		2.0	
材齢係数 χ		0.8	

同図より、等価引張鉄筋比より計算したせん断強度は、有効高さが大きくなるほど、鉄筋比が大きくなるほど小さくなり、二羽式との乖離が大きくなることがわかる。一方、膨張材を使用すると収縮が抑制されるため、普通コンクリートよりも、せん断強度の低下割合が小さくなる傾向が再現されている。また、膨張材によるせん断強度低下の抑制効果は、鉄筋比が大きくなるほど増加する傾向であることがわかる。

次に、コンクリートの収縮ひずみを-500, -800, -1200 μ と仮定し、有効高さ1000mmの場合について試算した結果を図-7.2に示す(ケース②)。試算結果より、コンクリートの収縮が大きく

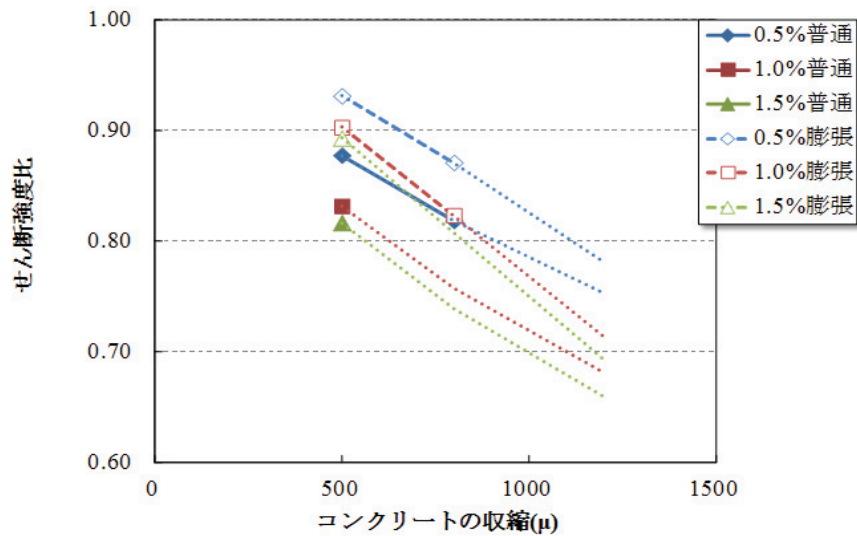


図-7.2 等価引張鉄筋比により試算したせん断強度と二羽式との比(ケース②)

なると、引張強度よりも収縮応力のほうが大きくなるため、ひび割れが生じる場合があることがわかった。図中にプロットで示した結果は、計算上、ひび割れが発生しないとされたものである。一方、図中の点線は、ひび割れが発生すると計算されたものの、ひび割れが生じないと仮定して図示したものである。本論文「第6章」でも、コンクリートの収縮によって微細な表面ひび割れが生じていたことは述べたが、さらに収縮応力が大きくなると鉄筋に到達するひび割れとなる可能性がある。この場合、鉄筋に蓄積された圧縮ひずみが解放されるため、本研究で明らかにしたせん断破壊メカニズムとは異なってくる可能性がある。

また、本研究ではコンクリートの過大収縮を生じさせるため、あらかじめ選別された骨材を使用した。一方、RCはりのせん断耐荷機構に粗骨材のかみ合せ効果が大きな影響を及ぼすことがよく知られており、骨材の品質がせん断強度に影響を及ぼす可能性も考えられる。今後、異なる物性の骨材についても検討を深めていく必要であると考えられる。

(2)コンクリートの収縮予測に関する課題

骨材物性をモデル化したことで、複合モデルによってコンクリートの乾燥収縮を予測することが簡易になったことが本研究の大きな成果のひとつである。その一方で、骨材は天然の素材であることから、世の中に検討対象としたものとは異なる物性を有する骨材が存在している可能性は否定できない。今後の、継続的な検討が必要である。特に、骨材の乾燥収縮率のモデル化の際、堆積岩と火山岩に分離したことが妥当であるかどうか検証するとともに、それらを岩種で区分せず統一的に評価できる簡易指標や骨材自体の収縮メカニズムの解明が必要であると考えられる。

「第4章」において、岩種で分類することなくコンクリートの乾燥収縮を評価できる骨材物性は、骨材自体の乾燥収縮率であることを示した。一方、骨材の収縮と骨材内部の比表面積に相関性があることが報告³⁾されている。後藤・藤原⁴⁾は、吸水率やヤング係数が大幅に異なる軽量骨

材と普通骨材において、コンクリートの収縮量がさして変わらない理由を、窒素吸着量から求めた骨材の内部比表面積が軽量骨材のほうが普通骨材よりも小さいためと説明した。今本ら⁵⁾は、骨材の内部比表面積の測定を水蒸気によって行う簡易な方法を提案した。この方法に基づき、水分吸着量から求めた骨材の内部比表面積とコンクリートの乾燥収縮との相関性に関する検討が盛んに行われることとなった。コンクリートの統一的な乾燥収縮評価手法として、同手法の妥当性を結論とする論文も多数報告された。

本論文で使用した骨材の一部についても、水蒸気吸着量に基づく内部比表面積を測定した。骨材の乾燥収縮率との関係を示したのが、**図-7.3**である。また、「**第5章**」**表-5.2**に示した既往の研究^{6),7),8),9)}から、同様のデータを抽出し図中に併記した。同図より、骨材の内部比表面積を用いたとしても、骨材の乾燥収縮率を統一的に評価することは難しいことがわかる。骨材内部の空隙構造が収縮に関与していることは有力な説明であり、内部比表面積による骨材収縮の評価方法が必ずしも否定されるものではない。ただし、測定方法の改善や測定されている物性の物理的解釈を改めて検討していく必要があると考えられる。また、物理的なメカニズム以外、たとえば鉱物学的なアプローチについても目を向けることが、今後、必要になってくると考えられる。

本研究が取り扱ったコンクリートの乾燥収縮のほとんどが JIS 試験によって得られるデータであることから、実際の構造物の収縮を予測する場合に適用できるか検証が必要である。乾燥収縮は寸法が大きくなることによって、断面内の含水率分布の勾配にともなう内部拘束の影響が大きくなる。そのため、過大な乾燥収縮を生じるコンクリートの場合、部材寸法や環境条件によっては拘束がほとんど無くても、内部拘束の影響だけでひび割れが生じ、予測したひずみ挙動と異なる可能性がある。実際に、「**第6章**」で用いた無拘束供試体はそのような挙動を示した。このことは、RCはり部材における鉄筋ひずみの算出精度を低下させたり、ヤング係数等の見かけのコンクリート物性を変化させ、せん断耐荷挙動が異なってきたりする可能性がある。

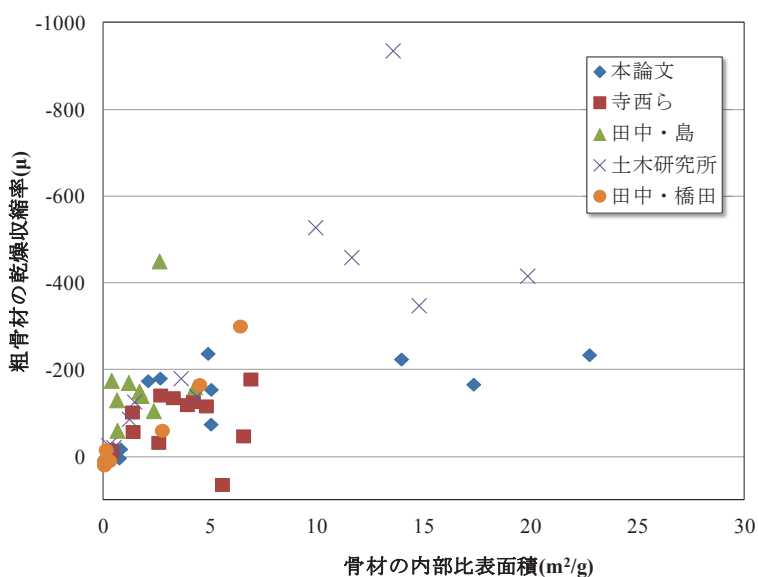


図-7.3 骨材の内部比表面積と乾燥収縮率との関係

7.3 おわりに

本章では、本研究から得られた知見を取りまとめるとともに、今後の研究課題を記した。コンクリートの収縮あるいは材料による収縮抑制を考慮した設計の体系化を志向し、材料性能と構造性能を繋ぐいくつかの有益な知見が得られた。しかしながら、限定された条件で得られた知見であることは言うまでもなく、残された課題に向き合い、さらに研究を継続する必要があると考える。本研究で得られた知見が、当該分野の研究の発展に一助となることを祈念する。

第7章の参考文献

- 1) 二羽淳一郎, 山田一宇, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, V-5, pp.167-176, 1986.
- 2) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 3) Roper, H.: Study of shrinking aggregates in concrete, *National Building Research Institute Special Technical Report*, No.502, Council for scientific and industrial research, Pretoria, South Africa, pp.136, 1959.
- 4) 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, 第 286 号, pp.125-137, 1979
- 5) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直: 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会論文集構造系論文集, No.606, pp.9-14, 2006
- 6) 寺西浩司, 樋口優香: 骨材がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響 その 1, 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1(北陸), pp.929-932, 2010.9
- 7) 田中希枝, 島 弘: 骨材の乾燥収縮とヤング係数を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する複合モデルの検証, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.1, pp.72-82, 2012.3
- 8) 土木研究所: 骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究, 土木研究所資料 第 4199 号, 2011.3
- 9) 田中博一, 橋田浩: 骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.553-558, 2009.7

本論文に関連のある研究報告

A. 査読付き論文

- (1) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.571-576, 2009.6
- (2) 兵頭彦次, 井坂幸俊, 谷村充, 佐藤良一: コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす粗骨材物性および収縮低減材料の影響評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.377-382, 2010.6
- (3) 太田光貴, 三谷昂大, 佐藤良一, 兵頭彦次: 早期材齢における高収縮コンクリートの収縮と収縮応力および寸法依存特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.479-484, 2010.6
- (4) 兵頭彦次, 谷村充, 杉山真悟, 佐藤良一: 骨材のヤング係数・乾燥収縮に基づくコンクリートの乾燥収縮評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.479-484, 2011.6
- (5) 太田光貴, 中山紘紀, 兵頭彦次, 佐藤良一: 高収縮コンクリートの収縮特性と寸法依存性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.569-574, 2011.6
- (6) 三谷昂大, 兵頭彦次, 太田光貴, 佐藤良一: 収縮による普通強度 RC はりのせん断強度低下とその評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.721-726, 2011.6
- (7) 兵頭彦次, 中崎豪士, 谷村充, 佐藤良一: 乾燥収縮抑制材料の効果に及ぼすセメント種類・骨材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.370-375, 2012.6
- (8) 兵頭彦次, 中山紘紀, 宮本和也, 佐藤良一: 乾燥収縮が RC はりのせん断強度低下に及ぼす影響評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.643-648, 2013.6

B. 国際会議論文

- (1) H.Hyodo, M.Tanimura, H.Fujita: Influence of Limestone Aggregate on Drying Shrinkage Properties of Concrete, Proceedings of 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovation and Structural Implications, No.2, pp.1193-1198, 2009
- (2) H.Hyodo, R.Sato, K.Kawai, H.Nakayama: Effects of Drying Shrinkage on Shear Tension Strength of Reinforced Concrete Beams, 8th International conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, pp.678-685, 2013
- (3) H.Hyodo, M.Tanimura, R.Sato, K.Kawai: Evaluation of effect of aggregate properties on drying shrinkage of concrete, 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies, 2013

C. 口頭発表論文

- (1) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 物性の異なる粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.867-868, 2009
- (2) 谷村充, 兵頭彦次, 中崎豪士, 井坂幸俊: 粗骨材の乾燥収縮特性に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.319-320, 2010
- (3) 兵頭彦次, 谷村充, 中崎豪士, 井坂幸俊: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす粗骨材物性・収縮低減材料の影響, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.321-322, 2010
- (4) 三谷昂大, 太田光貴, 佐藤良一, 横山美穂, 兵頭彦次: 乾燥開始材齢が高収縮コンクリート

- の収縮に及ぼす影響，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.339-340, 2010
- (5) 兵頭彦次, 谷村充, 井坂幸俊, 佐藤良一：コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす骨材物性の影響とその予測，コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会, pp.17-24, 2010
 - (6) 兵頭彦次, 三谷昂大, 太田光貴, 中山紘紀, 佐藤良一：コンクリートの収縮が RC はりのせん断挙動に及ぼす影響，耐久性力学に基づく収縮影響評価に関するワークショップ論文集，日本コンクリート工学会, pp.101-108, 2011
 - (7) 谷村充, 兵頭彦次, 杉山真吾, 中崎豪士：各種セメント・骨材を使用した膨張コンクリートの拘束膨張特性，高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関するシンポジウム，日本コンクリート工学会, pp.369-372, 2011
 - (8) 杉山真吾, 兵頭彦次, 谷村充：粗骨材の乾燥収縮測定に関する検討，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.446-447, 2011
 - (9) 兵頭彦次, 杉山真吾, 谷村充：乾燥収縮評価のための粗骨材の動弾性係数測定に関する検討，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.444-445, 2011
 - (10) 宮本和也, 兵頭彦次, 太田光貴, 中山紘紀, 佐藤良一：収縮による RC はりのせん断強度への影響評価，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.264-265, 2012
 - (11) 中崎豪士, 兵頭彦次, 谷村充, 杉山真吾：各種セメント・骨材の組合せによる収縮抑制材料の効果の検討，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.483-484, 2012
 - (12) 兵頭彦次, 中崎豪士, 谷村充：粗骨材の乾燥収縮測定に及ぼす各種要因の検討，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.515-516, 2012

D. 解説・報告

- (1) 兵頭彦次, 井坂幸俊, 杉山真吾, 谷村充：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材物性の影響評価，セメント・コンクリート, No.777, pp.24-29, 2011

謝辞

本論文は、筆者が太平洋セメント(株)中央研究所在職中および広島大学大学院工学研究科社会環境基盤専攻博士課程における研究成果を取りまとめたものであります。

研究の遂行、取りまとめを行うにあたり、終始懇切なご指導、ご教示を賜った広島大学特任教授・佐藤良一先生には心より感謝の意を表します。かねてから自身が進めていたコンクリートの乾燥収縮に関する研究を、RCはり部材の耐荷性能に結びつけ、材料から構造レベルまで一貫した取り組みに拡張していただきました。私の今後の研究人生において、大きな糧となることは言うまでもありません。重ねて御礼申し上げます。

本論文の審査にあたって快く主査をお引き受けくださった広島大学教授・河合研至先生に深く感謝致します。先生からいただくさりげないお言葉は、いつも広い視野からのものでした。至らぬ私が、その真意に遅れて気付くことは一度や二度ではございません。副査として広島大学教授・藤井堅先生、広島大学准教授・半井健一郎先生には、研究内容に対し具体的かつ的確なご意見を賜りました。予備審査でのご意見は、本論文の構成を大きく見直すきっかけとなりました。

愛媛大学教授・氏家勲先生、足利工業大学教授・宮澤伸吾先生、名古屋大学准教授・丸山一平先生には、科研での打合せを通じて、大変貴重な議論をさせていただきました。広島大学助教授・小川由布子先生には、実験や供試体製造時ご協力賜り、学生を先導・指導していただきました。

学部時代の恩師であります早稲田大学名誉教授・関博先生には、卒業後、学会等でお会いするたびに私の研究者としての未来を気に留めていただき、いつも温かい言葉で励ましていただきました。

本論文をまとめる機会を与えてくださりました、当時太平洋セメント(株)常務執行役員・富田六郎博士、同執行役員中央研究所長・小川賢治博士(現専務執行役員)、同中央研究所セメント・コンクリート研究部長・石川雄康博士(現太平洋コンサルタント(株)専務取締役)、同中央研究所セメント・コンクリート研究部チームリーダー・谷村充博士には、多大なるご尽力・ご配慮を賜りましたこと深く御礼申し上げます。

また、本論文を執筆することに理解とご配慮を賜りました、現太平洋セメント(株)執行役員中央研究所長・三浦啓一博士、同第2研究部長・田中敏嗣博士、同第2研究部チームリーダー・江里口玲氏に深く感謝いたします。

本研究で行ったRCはり部材は大型であるため、製造や載荷試験が大掛かりとなり苦勞をとまなかった。そのため、たくさんの方々の協力をいただいております。広島大学技官・藤枝洋二氏には部材製造・載荷試験に関して多くのご助言・実働を頂きました。広島市生コンクリート共同試験場長・古井博氏には、生コンクリートの設計・製造・管理を全面的に引き受けていただきました。太平洋セメント(株)中国支店技術部長・藤山修氏には製造時に度重なるご協力をいただ

きました。また、本論文の起点となる研究をなされた極東興和(株)・河金甲博士には、載荷試験時に実験のノウハウや研究に関する助言をいただきました。

構造材料工学研究室、三谷昂大氏(現(株)建設技術研究所)、太田光貴氏(現前田建設(株))、横山美穂氏(現広島市役所)、中山紘紀氏(現鹿島建設(株))、宮本和也氏(現(株)大林組)には、主体的に実験の実働いただくとともに、研究課題に真摯に取り組んでいただきました。甲斐麻里子氏、黒村容子氏には、事務手続きの面でサポートいただきました。そのほかの構造材料工学研究室の皆様、卒業生におかれましては、様々な面でご助力いただいたことは言うまでもありません。

太平洋セメント(株)中央研究所・早野博幸博士、河野克哉博士には貴重なご意見を、井坂幸俊氏、杉山真悟氏、中崎豪士氏には、材料評価実験やデータ取りまとめを、畠田聖史氏、落合昂雄氏にはデータや文書のチェックに多大なる協力を頂きました。

他にも、多くの方々のご指導、ご協力があって本論文は完成いたしました。すべての方のお名前を紹介できませんでしたが、厚く御礼申し上げます。

最後に、家のことを任せきりで出産・子育てで精一杯にもかかわらずいつも明るく励ましてくれた妻・美紀と、健やかにたくましく育ってくれた長男・崇太郎に心より感謝します。

2015年3月