

令和3年度 修士論文

人工軽量骨材によるコンクリートの膨張性劣化の
低減機構に関する研究

広島大学大学院先進理工系科学研究科
先進理工系科学専攻
建築耐震工学研究室

M204054 殿畑 匠海

人工軽量骨材によるコンクリートの膨張性劣化の低減機構に関する研究

学生番号 M204054 氏名 殿畑匠海
研究室 建築耐震工学 指導教員 寺本篤史 准教授

1. 研究背景

本研究で対象としているコンクリートの膨張性劣化はアルカリ骨材反応 (ASR) 及びエトリングタイトの遅延生成 (DEF) を指している。ASR は大規模に対策が行われ、著しく減少したが現在でも発生が報告されており、鉄筋が破断する事例も確認されている。一方で、DEF は日本での発生事例はほとんど報告されていないが、今後プレキャストコンクリートの流行により DEF の増加が懸念されている。

この 2 つの膨張性劣化はコンクリート内部で発生する現象でいつ発生するかわからず、発生後の対策が難しいとされている。そのため予防策の研究もなされており、近年 ASR 対策の一つとして人工軽量骨材 (ALA) が注目されている。ALA は通常の骨材に比べて強度が低く、コンクリートの力学性能を確保するには少量の使用が望ましい。しかし ALA による ASR の低減機構は定性的にも定量的にも不明な点が多く、特に DEF をはじめ他の膨張性劣化への効果は分かっていない。そこで本研究では、ALA による ASR 低減機構の解明とともに類似した劣化である DEF にも適用可能性について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 膨張量・質量測定

本研究では、ALA の粒径・量の違いによる ASR・DEF 低減効果の違いを見るため、ASR・DEF を促進する調査のコンクリートの骨材の一部を ALA に置換し、膨張量の測定を行った。試験体の調査を表 1、表 2 に示す。ASR 試験体は反応性骨材率をペシマム混合率 (本研究では粗骨材中の 30%) で固定し、非反応性骨材中の一部を ALA と置換した。表 1、表 2 の調査を用いて、φ100*200mm の円柱試験体を作製し、コンタクトゲージ法により膨張量測定を行った。DEF は材齢初期に高温となるのが発生条件であるため、4 時間 20°C 恒温室での前養生後、12 時間の間 90°C が続くように高温養生を行った。

2.2 化学法・骨材反応性試験

本研究で使用する反応性骨材及び ALA の反応性を確かめるため、化学法 (JISA 1145) を実施した。本来、化学法は粉碎により粒径を 150-300μm として実施するが、本研究では骨材粒径が反応性に及ぼす影響を確認するため、ふるい分けにより粒度の調整を行った骨材 100g を 1mol/L・NaOH 溶液 400mL に浸漬し、定期的に 10mL ずつ分取を

表 1 ASR 試験体調査

	W	C	単位量(kg/m ³)				混和剤	
			細骨材 s		粗骨材 G		減水剤 C×%	AE調整剤 C×%
			非反応性	ALA	非反応性	ALA		
AG-5	160	320	805	309	670.7	22.3	1.8	0.1
AG-10					635.4	44.6		
AG-20					564.8	89.3		
AG-50					353	223.3		
AS-5			770.5	24.2	706	468.9		
AS-10			736	48.4				
AS-20			667	96.8				
AS-50			460	242				

表 2 DEF 試験体調査

	W	C	単位量(kg/m ³)				混和剤	
			細骨材 s		粗骨材 G		減水剤 C×%	AE調整剤 C×%
			非反応性	ALA	非反応性	ALA		
DG-5	160	320	847	1059.0	1021.9	23.4	1.8	0.1
DG-10					984.9	46.9		
DG-20					910.7	93.8		
DG-50					688.35	234.5		
DG-100			317.7	468.9	484.8	254.1		
DS-50			122.5	508.2				
DS-100			847					
ALA-0			847					

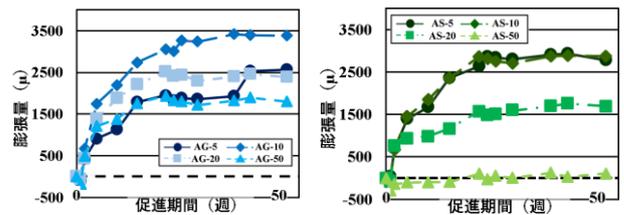


図 1 ASR 膨張量 (左: AG 右: AS)

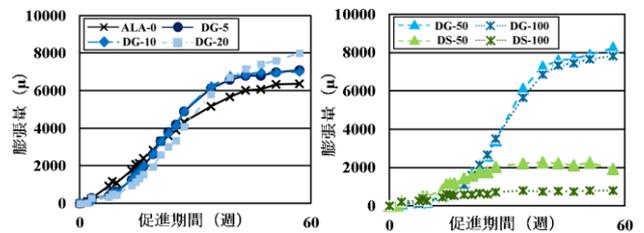


図 2 DEF 膨張量 (左: ALA 率低 右: ALA 率高)

行った。分取した溶液は化学法と同じくろ過を行い、アルカリ濃度減少量 (Rc) は中和滴定、シリカ溶出量 (Sc) は原子吸光光度法により測定した。

3. 膨張量測定結果および X 線 CT 撮影からの考察

膨張量の測定結果を図 1、図 2 に示す。図 1 に示す ASR では、ALA 細骨材 (AS)、ALA 粗骨材 (AG) とともに ALA 率に伴い膨張を低減し、AS シリーズの方が膨張低減量が大きい結果となった。DEF では ALA 粗骨材 (DG) には膨張抑制効果がみられない一方で、ALA 細骨材を用いた試験体 (DS) では顕著な膨張低減効果が見られた。本研究では、コンクリートの内部性状を確認するため促進 52 週時点の ASR 試験体に対して X 線 CT 撮影を行った。本研究

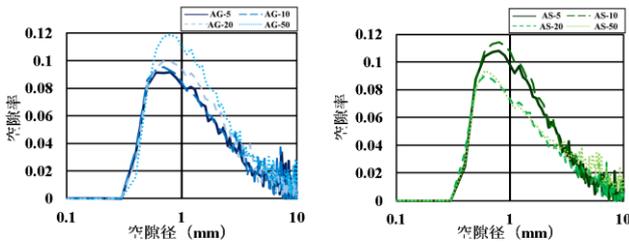


図 6 X線 CT 撮影による空隙率

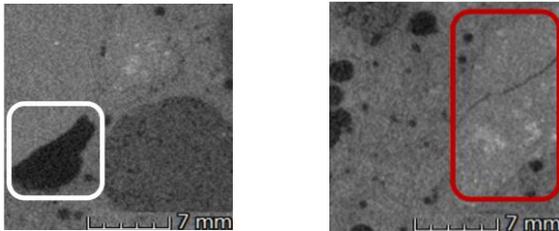


図 7 X線 CT 写真 (AG-50)

で用いた X 線 CT 撮影の分解能は 0.1123mm/pixel であった。X 線 CT により得られた結果の例を図 6, 図 7 に示す。図 6 より, X 線 CT 撮影により空隙率分布を取得したところ, AG シリーズでは ALA 量に比例して空隙率が増えるのに対して, AS シリーズでは ALA 量が多いほど空隙率が低減される結果となっている。AG シリーズについては X 線 CT 写真から ALA 率が大きい試験体ほど粗大な空隙 (図 7 中白枠) 見られた。ALA 粗骨材は吸水率が 29% と大きく, 過大な水分による施工不良により空隙が増加したものと考えられる。AS シリーズはそれほど粗大な空隙は確認されず ALA 細骨材の吸水率 (16%) が低いことに起因するものと思われる。

X 線 CT 撮影では, 反応性骨材らしき骨材を貫通するひび割れ (図 7 中赤枠) は多く見られたが ALA を貫通するひび割れは見られなかった。本研究の条件では ALA の破砕による膨張圧の早期解放の可能性は低いものとした。

4. 骨材反応性試験および ASR 膨張予測モデルからの考察

骨材反応性試験の結果を図 3, 図 4 に示す。図中の赤破線は $R_c/Sc=1$ のラインを示しており, $R_c/Sc < 1$ となると化学法の指標では「無害でない」の結果になる。化学法の結果より, 本試験で用いた反応性骨材は R_c に比べて Sc が非常に大きい結果となった。図 4 より ALA のアルカリ消費は粒形が小さいほど大きい結果となった。

本研究では, 骨材反応性試験から得られた結果から魚本らによって提案された ASR 膨張予測モデルを用いて膨張量試験の検討を行った。算定値と実測値を比較したものを図 5 に示す。図 5 より ALA 率が大きいほど膨張量を低減する結果が再現されており, ALA のアルカリ消費は

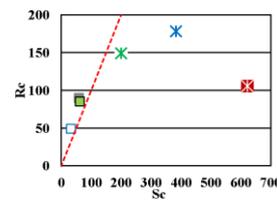


図 3 化学法結果 (24h)

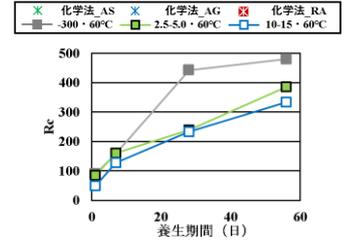


図 4 Rc 経時変化

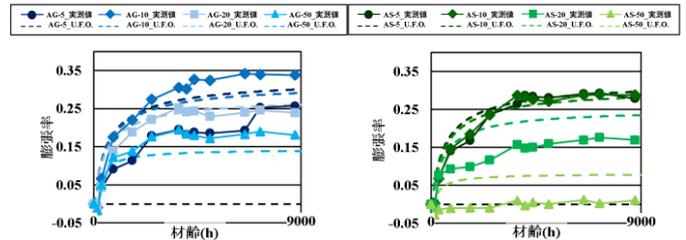


図 5 U.F.O. モデル算定値・実測値の比較

ASR に対して大きく影響を及ぼしていることがわかる。一方で AS-50 の実測値で見られた全く膨張しない結果は再現することができなかった。これは ALA のポズラン反応に起因するものと思われる。既往の研究では ALA を粉砕した粉末がポズラン反応を示すことが確認されている。骨材反応性試験は NaOH 溶液に浸漬しており, ポズラン反応に必要なカルシウムが存在していない。そのため, ALA 細骨材を用いたコンクリートではセメントから供給されるカルシウムによりポズラン反応を起こし, より大きなアルカリ消費により反応性骨材による ASG が発生しにくく, 結果的に ASR 膨張を防いだことが考えられる。

DEF もポズラン反応による材齢初期の pH 低下, $Ca(OH)_2$ の消費, 物質移動抵抗性の増加が DEF 膨張を低減することが確認されており, 本研究の DEF 膨張を低減させた機構として ALA 細骨材が持つポズラン反応が考えられる。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) ASR・DEF を発生する調合のコンクリートの一部を ALA で置換したところ, ASR では ALA 粗骨材・細骨材ともに膨張を低減する結果となった。一方で DEF では ALA 細骨材を置換した試験体のみ低減する結果となった。
- 2) ASR 膨張予測モデルの結果から, ALA による ASR 低減機構はアルカリの消費が大きく影響しており, ALA 細骨材ではポズラン反応を示すことで, より大きな低減効果をもたらしたと考えられた。
- 3) DEF では, ALA 細骨材のみで DEF 低減効果が見られたことからポズラン反応による材齢初期の pH の低下, $Ca(OH)_2$ の消費等の影響が大きいと考えられた。

修士論文要旨

Summary of the Master's Thesis

学 生 番 号 Student ID Number	M204054	プ ロ グ ラ ム Program	建 築 学 プ ロ グ ラ ム
氏 名 Name	殿 畑 匠 海	主 指 導 教 員 Supervisor	寺 本 篤 史
論 文 題 目 Thesis Title	人 工 軽 量 骨 材 に よ る コ ン ク リ ー ト の 膨 張 性 劣 化 の 低 減 機 構 に 関 す る 研 究		

本研究で対象としているコンクリート膨張性劣化はアルカリ骨材反応 (ASR) 及びエトリンタイトの遅延生成 (DEF) を指している。ASR は過去に大規模に対策が行われ、著しく減少したが現在でも報告されており、鉄筋を破断する事例が確認されることもある。一方で、DEF は日本での事例はこれまでほとんど報告されていないが、2%に上る異常膨張が確認されており、今後プレキャストコンクリートの流行により DEF の増加が懸念されている。

この2つの劣化はコンクリート内部で発生する現象でいつ発生するかわからず、発生後の対策が難しいとされている。そのため、予防策の研究もおこなわれており、近年 ASR 対策として注目されているものに人工軽量骨材 (ALA) がある。ALA は通常の骨材に比べて強度が低く、コンクリートの力学性能を確保するにはできるだけ少量が望ましい。しかし、ALA による ASR の低減機構について自己養生による緻密化、アルカリ消費など様々な機構が挙げられているものの定量的な研究はあまりされておらず、具体的なメカニズム、ALA 量の検討が難しいことが現状である。そこで本研究では、ALA による ASR 低減機構の解明とともに類似した劣化である DEF にも適用可能か検討を行った。

ASR・DEF が発生する調合の一部を ALA 粗骨材・ALA 細骨材に置換することによるコンクリート性状 (強度・質量・膨張量) の違いの検討を行った。また、ALA の反応を伴わない低減機構を ALA の骨材特性とし、X 線 CT 撮影によりコンクリートの内部性状を観察することで考察を行った。

ASR が発生する調合の一部を ALA 粗骨材で置換した試験体 (AG) と ALA 細骨材で置換した試験体 (AS) では、いずれも概ね ALA 量が大きいほど膨張を低減する結果となった。また、AS シリーズの方が膨張低減効果が大きく、全粗骨材体積の約 35%分の細骨材を ALA 細骨材とした場合、ASR を完全に抑制する結果となった。

DEF が発生する調合の一部を ALA 粗骨材で置換した試験体 (DG) と ALA 細骨材で置換した試験体 (DS) では、DG シリーズでは ALA 量が大きいほど、若干膨張量が増加する一方で、DS シリーズでは大きく膨張を低減しており、ALA を置換していない試験体では約 0.6%膨張しているのに対して、全粗骨材体積の約 70%分の細骨材を ALA 細骨材とすることで約 0.1%程度の膨張まで低減する結果となった。

コンクリートの内部性状把握のため促進 52 週時点の ASR による膨張量を測定した試験体 (AG・AS) に対して X 線 CT 撮影を行ったところ、反応性骨材らしき骨材を貫通するひび割れは見られる一方で、ALA を貫通するひび割れは観察されず、本研究の範囲では ALA の破砕による膨張圧の早期解放の可能性は低いものとした。

コンクリートの空隙率を分析したところ、AG シリーズでは ALA の増加に伴い、空隙率が増加する一方で AS シリーズでは ALA の増加に伴い、空隙率が減少する結果となった。X 線 CT 写真を観察したところ、AG シリーズでは ALA 内部の気孔や、セメント部に粗大な空隙が多く見られた。そのため、比較的小さい径の空隙については ALA 内部の気孔を計上していると考えられた。また、ALA 粗骨材の吸水率 (29%) から過剰な水分による施工不良で粗大な空隙が増加したと考えられた。ALA 細骨材については吸水率が比較的低く (16%)、適度な水分による自己養生から緻密化されたものと考えられた。

ALA による ASR 低減機構としてアルカリの消費が考えられている。本研究では、骨材の反応性を確かめるため、アルカリシリカ反応性試験として一般的に行われている化学法を反応性骨材および ALA に行った。化学法は本来 ALA は適用外であり、粒径による反応性の違いを考慮できないため、粉砕を行わない骨材反応性試験を ALA に行った。

化学法について反応性骨材の結果はアルカリ濃度減少量(Rc)が約 100mmol/L に対して、シリカ溶出量が約 600mmol/L と非常に大きく、「無害でない」結果となった。ALA については ALA 粗骨材が Rc : Sc がおよそ 180 : 400 に対して、ALA 細骨材では 150 : 200 程度でいずれも「無害でない」結果となった。

粉砕を行わなかった骨材反応性試験では、大きな差はあまり見られなかったものの粒径が小さいほど反応速度が速くなる結果であった。

本研究では魚本らによって提案された U.F.O.モデルと呼ばれる ASR 膨張予測モデルと骨材反応性試験の結果を用いて試算を行った。また、その結果から ALA による ASR・DEF 低減機構について考察を行った。

骨材反応性試験で得られた結果を用いて U.F.O.モデルによる試算を行ったところ、ALA 率が大きいほど ASR を低減していること、AG シリーズに比べて AS シリーズの方が効果が大きいという ASR 膨張を測定した試験体と同様の傾向が見られた。このことから ALA による ASR 低減機構は ALA によるアルカリの消費が大きく影響していると考えられた。一方で、AS-50 で見られた ASR 膨張を完全に抑制する結果は見られなかった。既往の研究では ALA を粉砕したものがポズラン反応を示すことが確認されている。このことから粒形の小さい ALA 細骨材を用いた AS シリーズでは、ポズラン反応により骨材反応性試験に見られた以上のアルカリの消費が行われた可能性が考えられた。

以下に本研究で考えられた ALA が各コンクリート膨張性劣化に及ぼす影響について述べる。

【研究結果：ALA による ASR 低減機構】

ALA による ASR 低減機構について大きく影響しているのは ALA によるアルカリ消費だと考えられた。骨材反応性試験の結果から ALA は大きくアルカリを消費することが確認されており、ALA がアルカリを消費してしまうことで反応性骨材の反応が不十分となり、有害な ASG が生成されず、結果的に ASR 膨張が低減されると考えられた。

なお、骨材反応性試験の結果から ALA もアルカリシリカ反応性を有することが確認されているが、反応性骨材と比較するとアルカリ消費量に対してシリカ溶出量が非常に小さく、また、骨材内部に気孔を多く持つことから ALA による ASG は有害とならなかったと考えられた。

【研究結果：ALA による DEF 低減機構】

ALA による DEF 低減機構について大きく影響しているのは ALA 細骨材のみで低減効果が見られたことから ALA 細骨材が持つポズラン反応性であると考えられた。ポズラン反応による DEF 低減機構は①材齢初期の pH 低下によるエトリンサイト溶解度の低下、②水酸化カルシウム消費によるエトリンサイト生成の抑制、③物質移動抵抗性の増加によるエトリンサイトの生成・膨張の抑制が考えられる。しかし、本研究では、ALA のポズラン反応性について具体的な検討が行えておらず、どの効果が支配的となるのかわからない。そのため、具体的なポズラン反応の検討が今後の課題となる。

目次

M204054 殿畑 匠海	1
第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 ASR の概要	2
1.2.1 はじめに	2
1.2.2 ASR の特徴と被害	2
1.2.3 ASR の発生メカニズム	4
1.2.4 ASR におけるペシマム現象	6
1.2.5 ASR の対策とその問題点	7
1.3 DEF の概要	8
1.3.1 はじめに	8
1.3.2 DEF の特徴と被害	8
1.3.3 DEF の発生メカニズム	9
1.3.4 DEF の対策	10
1.4 本論文の目的	10
1.5 本論文の構成	11
第2章 既往の研究	13
2.1 はじめに	13
2.2 ALA の既往の研究	13
2.2.1 ALA について	13
2.2.2 ALA による ASR 抑制効果について	13
2.2.3 検討事項のまとめ	14
2.3 ASR・DEF の分析方法	15
2.3.1 はじめに	15
2.3.2 骨材の反応性評価	15
2.3.3 内部性状の観察	17
2.3.4 組成分析	24
2.3.5 細孔溶液分析	28
2.3.6 強度試験	33
2.4 ALA による抑制機構の分析方法まとめ	36
第3章 ALA の骨材特性による低減機構	38
3.1 はじめに	38
3.2 ASR 膨張・DEF 膨張の違い	38

3.2.1	それぞれの膨張メカニズム.....	38
3.2.2	骨材による影響（粒径）.....	40
3.2.3	水分・湿度による影響.....	40
3.2.4	空隙による影響.....	40
3.3	ALA を置換したコンクリートでの ASR・DEF 低減効果.....	41
3.3.1	はじめに.....	41
3.3.2	実験概要（ASR）.....	41
3.3.3	実験概要（DEF）.....	44
3.3.4	質量・膨張量測定.....	45
3.3.5	強度試験結果.....	47
3.3.6	質量測定結果及び考察.....	51
3.3.7	膨張量測定結果及び考察.....	55
3.4	X線 CT 撮影による内部性状の把握.....	59
3.4.1	はじめに.....	59
3.4.2	X線 CT による内部観察.....	59
3.4.3	X線 CT による空隙率分布について.....	62
3.5	3章のまとめ.....	64
第4章	ALA の化学特性による抑制機構.....	66
4.1	はじめに.....	66
4.2	ASR 反応と DEF 反応の違いについて.....	66
4.2.1	それぞれの発生メカニズム.....	66
4.2.2	骨材による影響（反応性）.....	67
4.2.3	アルカリによる影響.....	68
4.2.4	硫酸塩による影響.....	68
4.2.5	温度による影響.....	68
4.3	化学法・骨材反応性試験.....	69
4.3.1	はじめに.....	69
4.3.2	化学法（JIS A 1145）概要.....	69
4.3.3	森大介らを参考にした骨材反応性試験.....	70
4.3.4	化学法・骨材反応性試験結果および考察.....	71
4.4	ALA の化学特性を考慮した ASR・DEF 低減機構について.....	75
4.4.1	はじめに.....	75
4.4.2	ASR 低減機構について.....	75
4.4.3	DEF 低減機構について.....	76
4.5	まとめ.....	78
第5章	U.F.O.モデルを用いた ALA による低減機構の検討.....	80

5.1	はじめに.....	80
5.2	U.F.O.モデル概要.....	80
5.2.1	U.F.O.モデルについて.....	80
5.2.2	計算式について.....	80
5.2.3	本研究で用いた U.F.O.モデル諸条件.....	83
5.2.4	試算結果および考察.....	84
5.3	ALA による ASR・DEF 低減機構の考察.....	86
5.3.1	はじめに.....	86
5.3.2	DEF の低減機構.....	86
5.3.3	ASR の低減機構.....	88
5.4	ALA が ASR・DEF に及ぼす影響のまとめ.....	89
第 6 章	結論.....	91
付録	今後行うべきこと.....	94
	謝辞.....	

第1章 序論

1.1 研究背景

本研究で、コンクリートの膨張性劣化はアルカリ骨材反応（Alkali-Silica Reaction 以下、ASR）およびエトリンガイトの遅延生成（Delayed Ettringite Formation 以下、DEF）を指している。

ASR は 1938 年に Santon に発見¹⁾されて以降、様々な国で ASR の報告がされ、日本では 1970 年代から報告されていた²⁾。ASR は鉄筋を破断する事例や 1%に上る膨張が確認されており、被害が大きいため古くから研究が行われている。1986 年に行われた ASR 抑制対策により ASR の報告数は著しく減少したものの未だ報告されており、問題となっている。

DEF は日本ではあまり報告されていないが、膨張量が 2%を超える非常に大きな値で発生したときの被害が大きいため知られている。DEF は高温蒸気養生を行ったコンクリート二次製品から確認されている³⁾。今後日本でも施工性の観点からプレキャストコンクリート等高温蒸気養生を行うコンクリートが流行することが考えられ、日本で DEF が増加する可能性が考えられている。

ASR・DEF の 2 つの膨張性劣化の共通点として 10 年単位で劣化が進行し、供用期間中のいつ劣化が発生するのかわからないが発生後は急激に膨張すること、コンクリート内部で発生する劣化であるため発生後に完全に無害化することが難しい点がある。そのため、これらの劣化では予防策の研究もおこなわれている。

近年 ASR の予防策として着目されている⁴⁾ものに人工軽量骨材（Artificial Light-weight Aggregate 以下、ALA）がある。ALA は通常では、コンクリートの軽量化や断熱性能向上のために用いられているが、ASR 抑制対策に使えることがわかれば新たな ALA の利用法となり得る。ALA は骨材そのものの強度や弾性係数が通常の骨材に比べて低く、コンクリートの力学的性能を確保するにはできるだけ少量が望ましい。しかし、ALA による ASR 低減メカニズムは物理的なもの、化学的なもので様々な可能性が挙げられているが定量的に研究したものはあまりなく、具体的な低減メカニズムはわかっていないため、ASR 抑制に必要な ALA 量の検討が難しいのが現状である。

そこで本研究では、ALA による ASR 低減メカニズムの解明を目的として研究を行う。また、同じくコンクリートの膨張性劣化である DEF に対しても同様の試験を行い、ALA の効果の検討、また DEF に対しても ALA で抑制が可能かを検討する。

1.2 ASR の概要

1.2.1 はじめに

本節では、ASR による被害、膨張メカニズム、現在の対策およびその問題点について述べていく。

1.2.2 ASR の特徴と被害

ASR が発生した構造物の写真を図 1-1⁴⁾、図 1-2⁴⁾、図 1-3⁴⁾、図 1-4⁵⁾に示す。ASR はコンクリート内部で膨張することでひび割れや部材変形を起こすと知られている。ASR によるひび割れは鉄筋等の有無により特徴が変わる。ASR が発生した箇所に鉄筋による拘束がない場合、図 1-1 に示したような亀甲状のひび割れが発生し、拘束がある場合、図 1-2 のように鉄筋に沿ったひび割れが発生する。また、ASR が発生した際の特徴的な外観性状として図 1-3 のような白いゲルの滲出がある。このような外部変状が見られた場合には、ASR が発生したことを疑い、詳細な検討を行う。

詳細な検討では、コンクリート構造物からコア採取を行い、内部性状の検討が行われる。顕微鏡観察等により得られる内部性状を図 1-5⁶⁾、図 1-6⁶⁾、図 1-7⁷⁾、図 1-8⁸⁾に示す。ASR



図 1-1 無拘束状態のひび割れ⁴⁾



図 1-2 拘束状態のひび割れ⁴⁾



図 1-3 ひび割れからのゲルの滲出⁴⁾



図 1-4 ASR による鉄筋破断⁵⁾

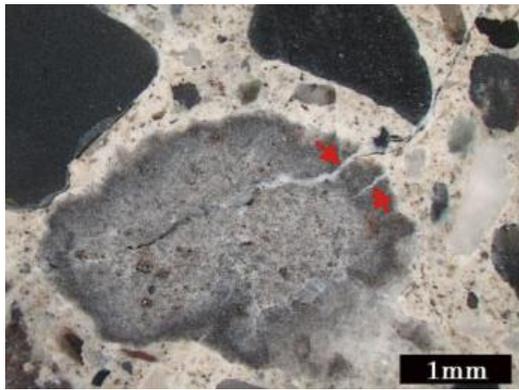


図 1-5 骨材内部を貫通するひび割れ⁶⁾
(実態顕微鏡観察)

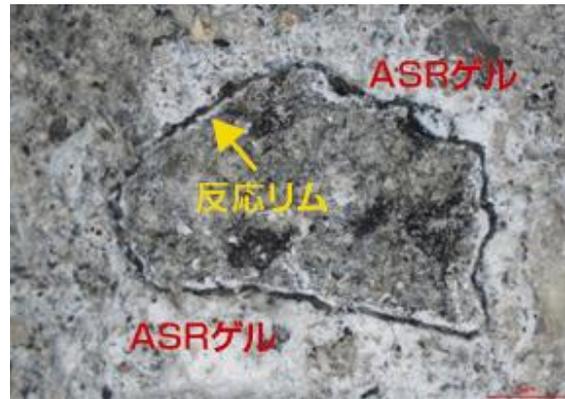


図 1-6 骨材に見られる反応リム⁶⁾
(実態顕微鏡観察)

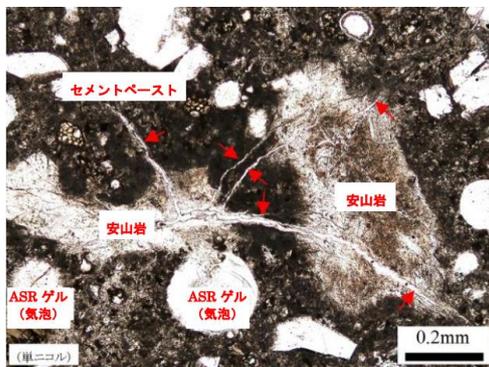


図 1-7 気泡を埋める ASG⁷⁾
(偏光顕微鏡観察)

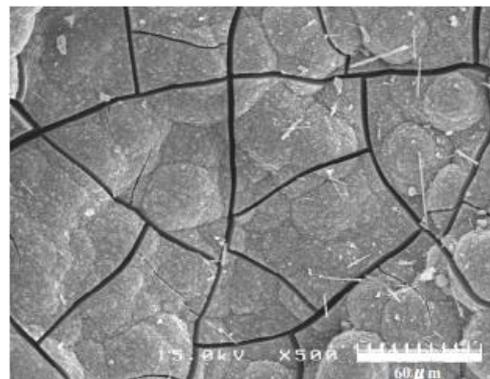


図 1-8 ゼリー状の ASG⁸⁾
(SEM 観察)

はアルカリ反応性骨材とアルカリが反応することでアルカリシリカゲル（以下、ASG）を生成、ASG が吸水することで膨張するため、図 1-5 のように骨材を貫通するひび割れ、そのひび割れを埋める白色の ASG が観察されることが多い。また、図 1-6 のように骨材の周囲に反応リムと呼ばれる変色が見られる。ASG は生成初期の流動性が大きいいため、骨材周囲にとどまらず、コンクリート内部を移動する。その際に空隙があれば図 1-7 のようにその空隙を ASG で埋めることも特徴的である。走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope 以下、SEM）を用いることで ASG そのものの観察も可能になっている。図 1-8 は典型的な ASG の様子であるが、実際の診断の際はこのような典型的な ASG の写真と観察対象を見比べることで ASG と判断することもある。

ASR は観察により以上のような劣化が見られるが、このような目に見える特徴だけでなく、コンクリートの機械的性能にも影響を与えている。ASR が発生した際の強度性状のデータを図 1-9⁹⁾、図 1-10⁹⁾に示す。図 1-9 より、ASR により膨張した場合、膨張量が大きいほど若干圧縮強度が減少したものの、ほぼ変化しておらず ASR が圧縮強度に及ぼす影響は小さいとされている。一方で図 1-10 を見ると静弾性係数に及ぼす影響は著しく、膨張量が

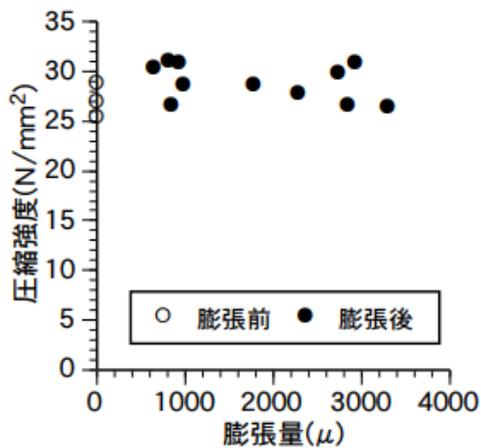


図 1-9 ASR 強度比と膨張量の関係⁹⁾

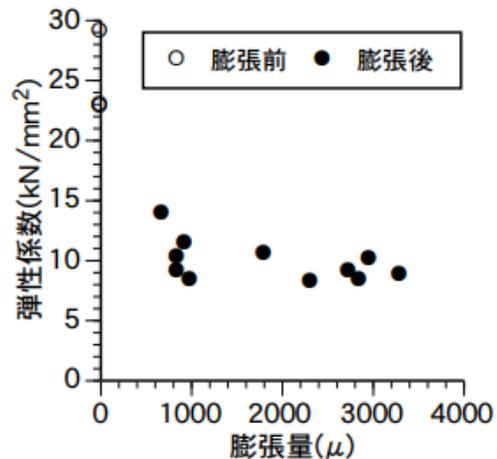


図 1-10 静弾性係数と膨張量の関係⁹⁾

1000μ程度で膨張前の約1/2程度まで低下し、それ以降は膨張に伴い微減傾向にある。このことよりASRは圧縮強度にはあまり影響を及ぼさないものの、1000μ程度の膨張で静弾性係数は著しく低下し、変形しやすくなる危険な現象となっている。

1.2.3 ASRの発生メカニズム

本項では、ASRおよびASRによる膨張のメカニズムについて述べる。ASR発生メカニズムを表したものを図1-11¹⁰⁾に示す。

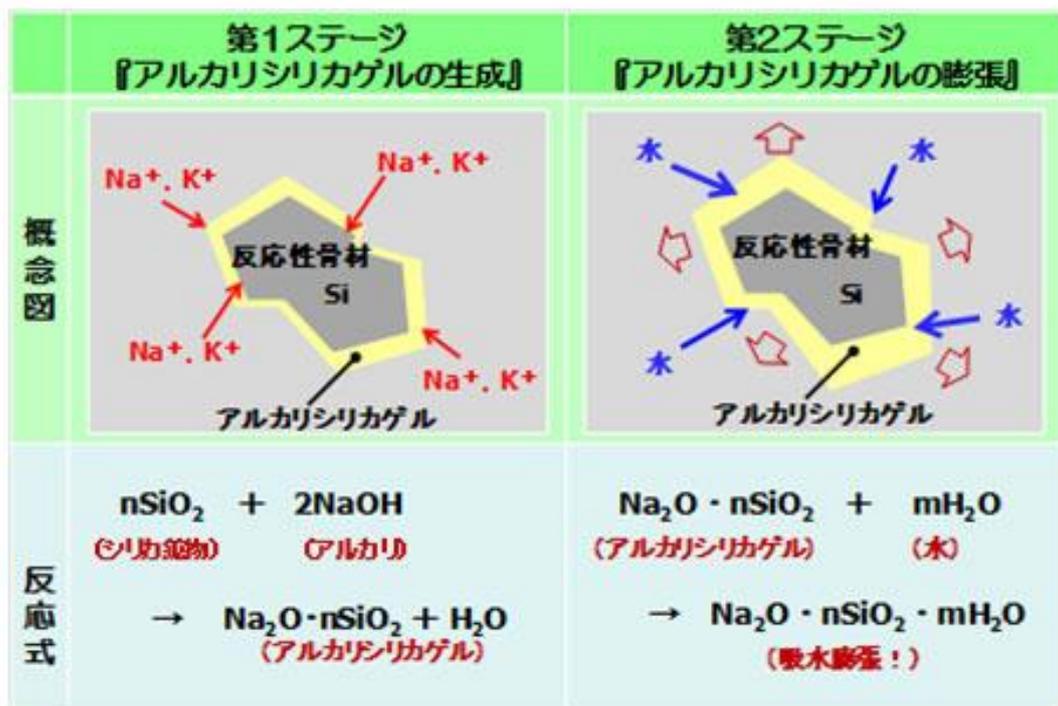


図 1-11 ASRの発生・膨張メカニズム¹⁰⁾

ASR はコンクリートの細孔溶液に含まれるアルカリ成分と骨材に含まれるオパール、カルセドニーなどのシリカ鉱物が反応することで発生する。この反応により発生した ASG はカルシウムイオンを含んでおらず、非常に流動性が高いが、骨材が膨張するには ASG が一定の流動性と硬さを有しており、ゲルの周囲の組織から反力を得る必要であるため生成初期の ASG はあまり膨張圧を持つことができないとされている¹¹⁾。ASG の粘弾性に関するものを図 1-12 に示す。ASG はひび割れ等によってコンクリート中を移動し、その際セメントペーストとカルシウムイオンを交換することで ASG が粘性を持ち、膨張圧を持ち始める。これにより ASG の持つアルカリイオンが再度細孔溶液に放出され、継続的に ASR が進行する¹²⁾。ただし、ASR 膨張が進行し、ASG が蓄積するとアルカリは ASG に蓄えられ、反応性鉱物との反応に寄与しなくなり、他からのアルカリの供給がなければ ASR は終了する。

ASG はセメントペーストとカルシウムを交換することで徐々に組成が変化していく。組成変化の様子を図 1-13 に示す。この図からみられるように ASG はセメントペーストとカルシウム交換を続けていくと CSH の組成に非常に近いものとなる。このため ASR が非常に進行した際に SEM などにより組成分析を行うと ASR ではないと誤診する可能性があるとされている。また、最終的に ASR 膨張により発生したひび割れや空隙を ASG が埋めた状態で CSH に近づく。

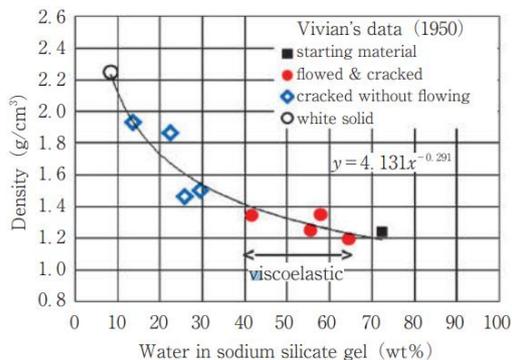


図 1-12 ASG の粘弾性の範囲¹¹⁾

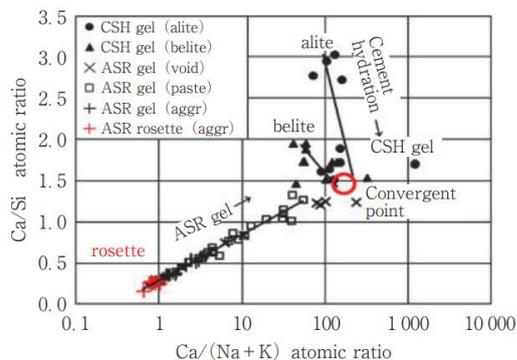


図 1-13 安山岩の ASG の組成変化¹¹⁾

1.2.4 ASRにおけるペシマム現象

ASRにはペシマム現象と呼ばれるものがある。ペシマム現象とは、コンクリートに使用される骨材すべてを反応性骨材とするより、ある程度非反応性骨材を含んでいる方が膨張率が増加するという現象である。ペシマム現象による膨張量の差を表したものを図 1-14¹³⁾、図 1-15¹³⁾に示す。ペシマム現象にはいくつかあるが、ここでは例として粒径と調合について述べる。粒形ペシマムは骨材が小さいほど膨張量が大きいわけではなく、図 1-14 のようにある特定の大きさに膨張量が最大となるものである。一方で、調合ペシマムは図 1-15 のように岩種により異なるがコンクリートに混合する割合をある特定の割合にすることで最も膨張するものことである。

田村ら¹³⁾によるとこのようなペシマム現象が現れる原因の一つに骨材とアルカリ量のバランスがあるとされている。ペシマム現象前後の様子を表した概念図を図 1-16¹³⁾に示す。まず、骨材に供給されるアルカリ量が骨材に消費されるアルカリ量より十分多ければ、骨材の反応性が高い・骨材の粒度が小さい・骨材の量が多いほど反応性生成物の量が多くなるのは自明である。しかし、骨材に供給されるアルカリ量が骨材に消費されるアルカリ量より少なく、不十分の場合は、細孔溶液中のカルシウムが反応生成物に取り込まれ、高カルシウム型の膨張性の小さい ASG となり、結果的に膨張率が下るとされている。

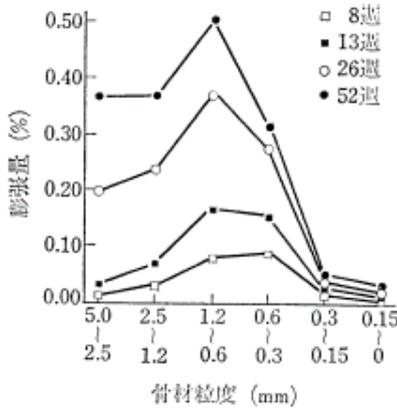


図 1-14 粒径ペシマム¹³⁾

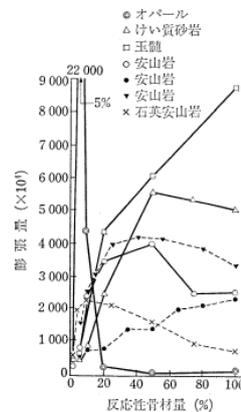


図 1-15 調合ペシマム¹³⁾

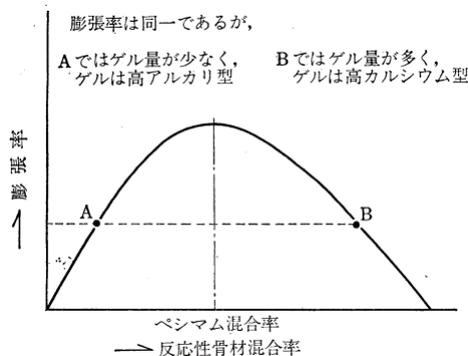


図 1-16 ペシマム条件前後における反応生成物の相違¹³⁾

1.2.5 ASR の対策とその問題点

本項では、ASR に行われている対策について述べる。先述したように ASR による反応はアルカリ反応性骨材、アルカリがなければ成り立たない。そのため、現在一般的に下記のような抑制対策が行われている¹⁴⁾。

- ①コンクリート中のアルカリ総量の抑制
(コンクリート 1m³に含まれるアルカリ総量を Na₂O 換算で 3.0kg 以下にする)
- ②抑制効果のある混合セメント等の使用
(高炉セメント、フライアッシュセメント等 ASR 抑制効果の確認されたものの使用)
- ③安全と認められる骨材の使用
(骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果で無害と判定された骨材の使用)

これらの対策が取られたことにより、これ以降建てられた建物での ASR 報告数は著しく減少した¹²⁾。しかし、ASR の報告がまったく無くなったわけではなく、これらの対策が取られた建物でも未だ報告されている。

①コンクリート中のアルカリ総量の規制についてはまず調合に含まれないアルカリの存在がある。調合に含まれないアルカリには海水や潮風など外部環境によるものや骨材自身から溶出するアルカリの存在がある¹⁵⁾。また、低アルカリ環境でも非常に反応性の高い骨材があれば被害が出てしまうことにある。

③安全と認められる骨材の使用についても問題点がある。一般的に日本で行われているアルカリシリカ反応性試験として化学法、モルタルバー法があるがこれらは比較的短時間で行われる試験であるため、遅延膨張性骨材の反応が見られず無害と判定され、コンクリートに含まれてしまうことで ASR が発生し、問題となっている。

1.3 DEF の概要

1.3.1 はじめに

本節では、対象としているもう一つのコンクリート膨張性劣化である DEF について概要を説明する。

1.3.2 DEF の特徴と被害

DEF による劣化事例を図 1-17¹⁶⁾、図 1-18¹⁷⁾に示す。DEF が発生した際の外観上の劣化は ASR と酷似しており、図 1-17 に示したように鉄筋等による拘束がない場合は亀甲状のひび割れとなり、鉄筋等による拘束がある場合は鉄筋に沿ったひび割れが発生する。一方で、ASR と異なる点として DEF は 2%を超える非常に大きな膨張量があり、図 1-18 に見られるようなプレキャストコンクリートの縁石ブロックが膨張し、せり上がる事例が見られている。



図 1-17 DEF の無拘束状態のひび割れ¹⁶⁾



図 1-18 異常膨張によるせり上がり¹⁷⁾

DEF は内部に特徴的な劣化がある。DEF の内部の様子を図 1-19¹⁸⁾、図 1-20¹⁸⁾に示す。DEF が発生した際は骨材周囲に発生するギャップと呼ばれる隙間とギャップにできる繊維状のエトリングイト (Ett) が特徴となっている。

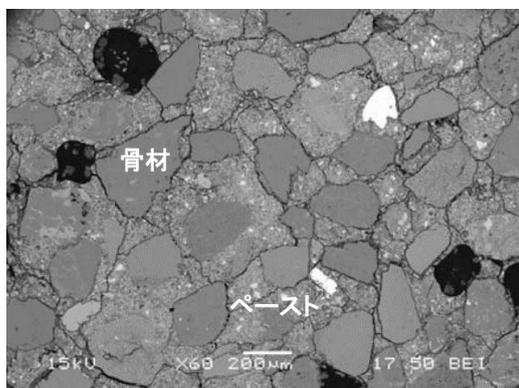


図 1-19 骨材周辺に生成されるギャップ

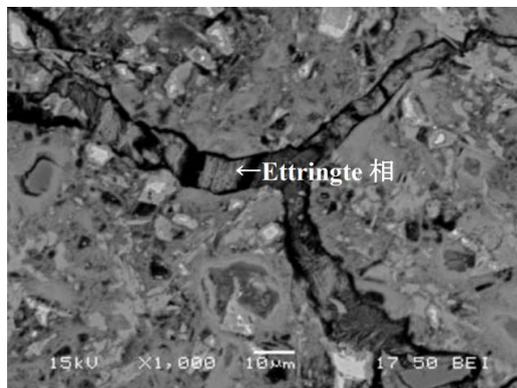


図 1-20 ギャップに生成される Ett

1.3.3 DEF の発生メカニズム

DEF は未だ完全にメカニズムがわかっておらず、①結晶成長圧説と②ペースト膨張説の二つが唱えられている¹⁷⁾。①の結晶成長圧説は骨材とセメントペーストの界面に生成したマクロなエトリンガイトが吸水により成長し、膨張することでマクロなコンクリートの膨張圧につながるという説である。一方で、ペースト膨張説はマイクロなエトリンガイトがセメントペーストに均一に生成されることでセメントペースト全体が膨張するとしている説である。近年は、ギャップに必ずしもエトリンガイトが充填されていないこと、ギャップの幅と膨張量に相関がみられており、①結晶成長圧説ではこれらの説明がつかないことから②ペースト膨張説が有力であるとされている。

DEF は発生する条件として材齢初期の高温養生が必要となっている¹⁹⁾。モルタルに高温養生を行った際の模式図を図 1-21 に示す。DEF ではまず材齢初期に高温状態となることでコンクリート内に存在するエトリンガイトが分解され、モノサルフェート水和物の生成と共に硫酸イオンが放出される。その後、温度の低下とともにエトリンガイトの溶解度が低下し、同時に内部 C-S-H に収容されていた硫酸イオンが放出され、硫酸イオンが消費されることで再度エトリンガイト結晶が生成される。そしてエトリンガイトが再結晶化することで膨張が進行するとされている。そのため、コンクリート中の硫酸イオンの量も DEF の発生に影響している。

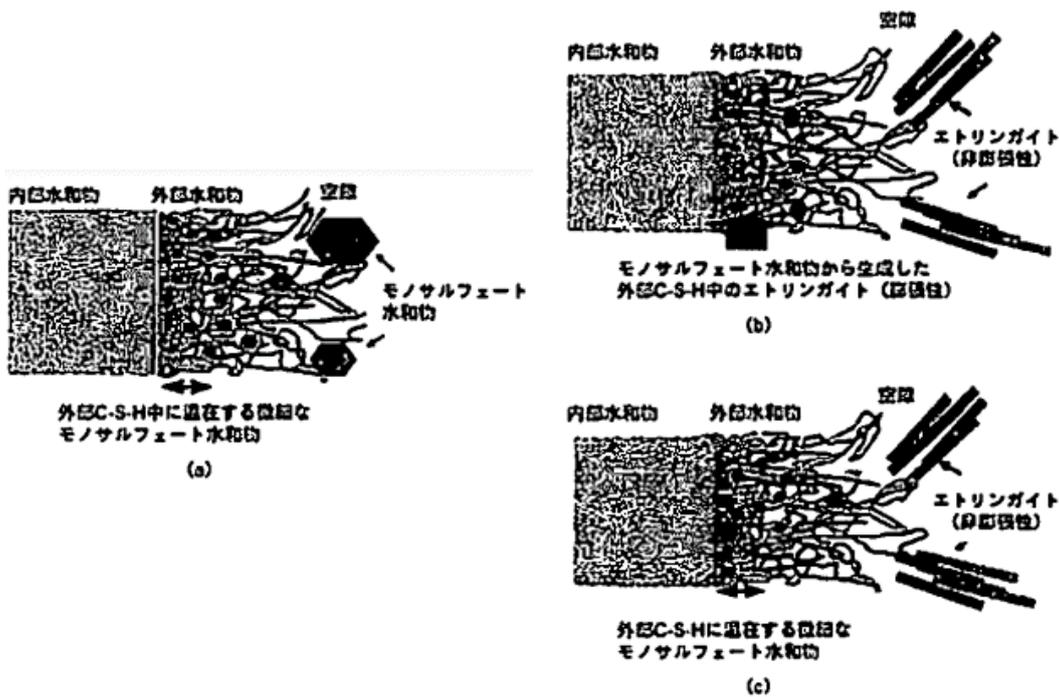


図 1-21 高温養生モルタルの膨張メカニズムの模式図¹⁹⁾

(a)高温養生後、(b)水中養生した膨張性モルタル、(c) 水中養生した非膨張性モルタル

1.3.4 DEF の対策

日本では、DEF を制御するうえで下記のような指標を設けている²⁰⁾。

①一般に、コンクリート最高温度の限界値は 70℃とする。ただし、コンクリート中のアルカリ量が 4kg/m³ かつ SO₃ 量が 17kg/m³ 以上の場合は 65℃とする。

②以下にいずれかの条件が満足される場合には、コンクリートの最高温度の限界値を 80℃とすることができる。

- ・早強または普通ポルトランドセメントを用いる場合で、コンクリートのアルカリ量および SO₃ 量がそれぞれ 3kg/m³ 以下、かつ 9.0kg/m³ 以下の場合
- ・中庸熱または低熱ポルトランドセメントのいずれかを使用する場合
- ・高炉セメント B 種もしくは C 種、フライアッシュセメント C 種を用いる場合、または、これらのセメントと同等以上の混合比率で高炉スラグ微粉末、フライアッシュを用いる場合、または、混合比率 10%以上でコンクリート用シリカフェームを用いる場合

1.4 本論文の目的

ここまで、研究背景および ASR・DEF の概要・問題点について述べたが改めて本論文での目的をここに示す。

- ①ASR 抑制の可能性が見られている ALA による具体的 ASR 抑制メカニズムの解明
- ②ASR 抑制に必要な ALA の粒径および量の検討
- ③今後増加が懸念されている DEF に対して ALA が有効であるか、またそのメカニズムの検討

本論文ではこの 3つを目的として研究を行った。

1.5 本論文の構成

本論文は第1章を含めて全6章から構成されている。以下に第2章以降の概要を示す。

第2章 既往の研究

ASR・DEFに一般的に行われている分析，ALAによるASR抑制効果についてまとめた。

第3章 ALAの骨材特性による抑制機構

本研究でALAによるASR・DEF抑制機構を検討するために作成した試験体，また，その実験条件等について述べた。また，2章で述べたALAの骨材特性（ALAの反応を伴わない特性）から考えられるASR・DEF抑制機構より，試験体で発生した現象について考察した。

第4章 ALAの化学特性による低減機構

ASRの抑制機構として重要である骨材の反応性について本研究で使用した骨材の実験概要及びその結果について述べた。また，骨材反応性試験の結果からASR・DEF試験体で発生した現象についてALAの化学特性から考察を行った。

第5章 U.F.O.モデルによるALAの抑制機構の検討

ASR膨張予測モデルとして知られるU.F.O.モデルを用いて，4章で行った骨材反応性試験の結果から本研究のASR試験体の膨張挙動について検討を行った。3章，4章，5章で得られた結果から，ALAによるASR・DEFの抑制機構について総合的な考察を行った。

第6章 結論

各章で示した内容や結果を整理し，ALAによるコンクリートの膨張性劣化抑制メカニズムについて総括的な結論を示した。

-
- 1) 川端雄一郎, 山田一夫, 古賀裕久, 久保善司: アルカリシリカ反応を生じた構造物の診断に対する技術者の意識調査—ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会の活動—, コンクリート工学, Vol.50, No.7, 2012
 - 2) 川端雄一郎, 松下博通: 高温蒸気養生を行ったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, 2011
 - 3) Chang Li, Michael D.A. Thomas, Jason H. Ideker: A mechanistic study on mitigation of alkali-silica reaction by fine lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, Vol.104, pp.13-24, 2018
 - 4) ASR に関する対策検討委員会: アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン (案), 2008
 - 5) 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会 HP, <https://www.j-cma.jp/?cn=102643>
 - 6) 株式会社太平洋コンサルタント HP, <https://www.taiheiyo-c.co.jp/cement/asr/>
 - 7) 菊池弘紀, 山戸博晃, 広野真一, 鳥居和之: 細・粗骨材の組み合わせのペシマム現象による ASR 劣化事例の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016
 - 8) 千田崇男, 橘久生, 佐藤根彰: コンクリートのアルカリ骨材反応 (ASR) 判定について, 全地連「技術 e-フォーラム 2006 名古屋」, 2006
 - 9) 久保善司, 上田隆雄, 黒田保, 野村倫一: アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
 - 10) 岡崎組 HP, <https://i-const.jp/problems/asr/>
 - 11) 片山哲哉: アルカリシリカ反応入門 ③アルカリシリカ反応の診断方法, コンクリート工学, Vol.52, No.12, 2014
 - 12) 鳥居和之, 山田一夫: コンクリート診断 ASR の的確な診断/抑制対策/岩石学的評価, 森北出版, 2017
 - 13) 田村博: コンクリート用材料とアルカリ骨材反応, コンクリート工学, Vol.24, No.11, 1986
 - 14) 国土交通省 HP アルカリ骨材反応抑制対策について, https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/130801_.html
 - 15) JCI-TC115FS, ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 2012
 - 16) 日本コンクリート工学会 エトリンガイトの遅延生成 (DEF) に関する研究委員会, 「DEF のリスクを考える」に関するシンポジウム, 2019
 - 17) 川端雄一郎, 松下博通: 高温蒸気養生を行ったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, 2011
 - 18) 羽原俊祐, 福田峻也, 小山田哲也, 藤原忠司: コンクリートの DEF による硫酸塩膨張の生気条件の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
 - 19) 平尾宙: 硫酸塩劣化事例—エトリンガイトの遅延生成 (DEF) に関する研究—, コンクリート工学, Vol.44, No.7, 2006
 - 20) 佐藤良一, 金津努: 改訂版「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」について, コンクリート工学, Vol.55, No.12, 2017

第2章 既往の研究

2.1 はじめに

本章では、ASR に対して確認されている人工軽量骨材（以下、ALA）の効果、一般的に ASR・DEF に行われている分析方法を整理し、本研究で検討すべき事項についてまとめた。

2.2 ALA の既往の研究

2.2.1 ALA について

ALA には様々な種類があるが本研究では日本メサライト工業製の膨張頁岩製のメサライト¹⁾を用いた。ALA は膨張頁岩等を主原料として人工的に焼成・発泡することで得られる。ALA は内部に多くの空隙を持ち、軽量であることが特徴的性質となっている。そのため、一般的にはコンクリートの軽量化や断熱性向上のために用いられる²⁾。また、ALA の特徴的な効果として自己養生効果がある。ALA は内部に多くの空隙を持っているが、通常ではその空隙に水分を含んだ状態で用いられるため、打設後コンクリート内部で ALA から水分が放出することで自己収縮ひずみが低減されることがわかっている³⁾。ALA の一般的な使用方法は上記のようにになっている。以降は ALA の ASR 抑制効果について述べる。

2.2.2 ALA による ASR 抑制効果について

本項では、ALA による ASR 抑制効果として考えられているメカニズムについてまとめる。現在考えられる、ALA による ASR 抑制機構の可能性のあるものを以下に列挙する。

①ALA のポゾラン反応性

Bektas らの研究⁴⁾では軽量骨材の一種であるパーライト粉末を用いて ASR 緩和のための研究を行っている。Bektas らは ASR が発生するモルタル調合に粉碎したパーライトを入れ、モルタルバーを作成した。打設後 24 時間で脱型を行い、徐々に 80 度まで温度が上昇する水槽にて 24 時間の水中養生を行った。その後、1mol/L・NaOH 溶液に浸漬させ膨張量を計測している。その結果、パーライト粉末を混ぜた試験体では ASR 抑制効果が見られ、要因の一つはパーライト粉末の空隙に ASG を収容したため、もう一つはポゾラン反応によりナトリウムを吸着したためだと考察している。しかし、ここで用いられた骨材は粉末であり、それ以上に径の大きい ALA 細骨材・ALA 粗骨材では同様にポゾラン反応性を示すかはわかっていない⁷⁾。

②ALA のアルカリ消費

杉山らの研究⁵⁾では粉砕した ALA が ASG を生成していることを確認している。また、杉山らの研究では、ALA による ASG は ALA 内部の空隙により無害化される可能性が考えられている。このことから先に ALA がアルカリと反応・消費することで反応性骨材がアルカリと反応できず、有害な ASG が発生しない可能性が考えられる。

③自己養生によるコンクリート微細構造の緻密化

ALA は自己養生効果を持っており、打設後にコンクリート内部で ALA が水分を放出することでコンクリート微細構造の緻密化が行われる。Dale ら⁶⁾は自己養生のためにモルタルの一部の骨材を ALA で置換した試験体を作成し、ALA なしの試験体とともに塩化物イオンの侵入を評価した。その結果、ALA を置換した試験体の方が塩化物イオンの侵入深さが小さいことがわかった。これは自己養生効果によって遷移帯が減少したためであるとし、ALA の自己養生により有害物質の浸透に対する抵抗力が上昇するとしている。このことから Chang ら⁷⁾は ASG への水分の侵入が減少し、ASR の発生が遅れる可能性があるとして述べている。

④ALA の破砕による膨張圧の早期解放

渡部らの研究では、ASR 膨張により発生したひび割れが ALA を貫通しており、過大な膨張圧を蓄積する前に破砕することで膨張量を低減させる可能性が考えられる。

⑤ALA の物理的膨張圧低減

ALA は通常の骨材に比べて、強度、静弾性係数が低いことで知られている。そのため、ALA の強度の低さから物理的に膨張圧を低減する可能性が考えられる。

2.2.3 検討事項のまとめ

現在 ALA の ASR 抑制効果として前述した①～⑤の効果が考えられる。本研究では、これらの抑制機構を ALA の反応を伴わない骨材特性 (③, ④, ⑤) と ALA そのものの反応を伴う化学特性 (①, ②) に分けて分析を行っていく。

2.3 ASR・DEF の分析方法

2.3.1 はじめに

本研究で行うべき分析を検討するため、本節では、ASR および DEF に対して一般的に行われている分析方法についてまとめた。

2.3.2 骨材の反応性評価

ASR は骨材がアルカリと反応し、ASG を生成することで発生する。そのため、骨材がアルカリを消費するか、また ASG となるシリカを持っているかが重要となる。そこで本項では、骨材の反応性を調べるための方法を記す。

(1)化学法[JIS A 1145]

化学法は骨材のアルカリシリカ反応性を比較的迅速(1週間程度)で判定する方法である。化学法は骨材を $150\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ に粉碎し、その試料 25g を 1mol/L の NaOH 水溶液 25mL に浸漬し、 80°C の恒温水槽で 24 時間反応させる。放冷後、吸引ろ過を行い、ろ液のアルカリ濃度減少量 (Rc) と溶解シリカ量 (Sc) を測定し、その結果から判定を行う。溶解シリカ量の測定には質量法、原子吸光光度法、吸光光度法のいずれか、アルカリ濃度減少量の測定は中和滴定法で行う。化学法の結果の例を図 2-1⁸⁾に示す。図 2-1 の場合、○のマークが Sc : 20, Rc : 80 であり、「無害」判定中にあるため無害となる。

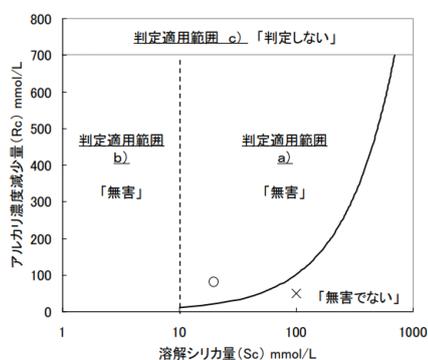


図 2-1 化学法結果例⁸⁾

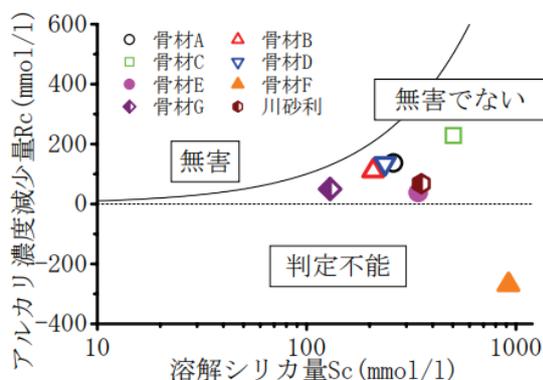


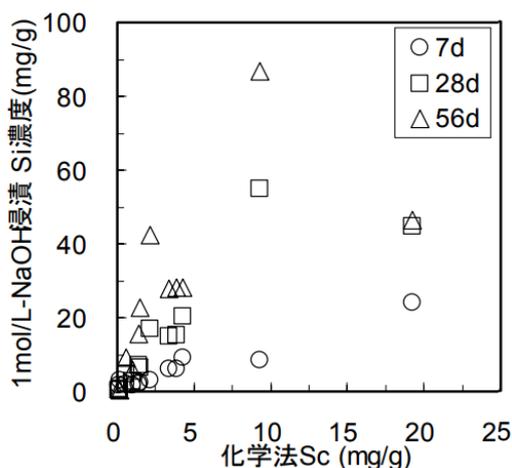
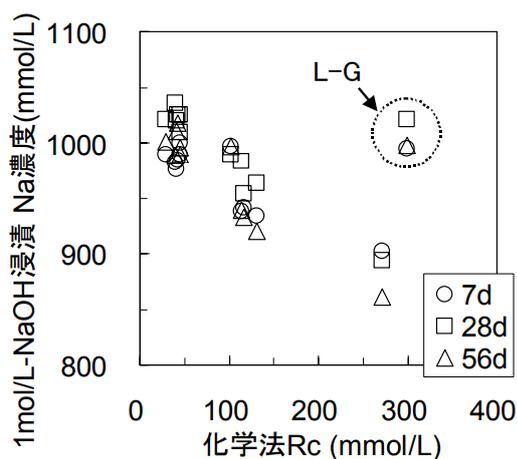
図 2-2 ALA の化学法結果⁵⁾

ただし、本研究で使用する ALA の化学法への適用性に関して、杉山ら⁵⁾は、軽量骨材のように粉碎により大きく性質が変わることや骨材気孔中にアルカリ溶液が吸着されること、骨材からのアルカリの溶出などがあることから精度が不安定としている。そのため JIS A1145 では、人工軽量骨材は化学法の適用範囲外となっている。以上を踏まえたうえで、軽量骨材に化学法を適用した例を図 2-2⁵⁾に示す。図 2-2 より、軽量骨材の多くは「無害でない」領域に分類されるが、骨材 F (ガラスでアルカリ含有量が多い) の Rc が負の値を示す、つまり化学法試験中に消費されるアルカリ量より骨材から溶出されるアルカリ量の方が多くなっているように、試験方法そのものに適合していない可能性も考えられる。

(2) 森大介らによる骨材反応性試験⁹⁾

前述したように化学法は骨材の粉碎を行い、150-300 μm に調整されているため、本研究で対象としている ALA には適さない。また、本来コンクリート内では粉末ではなく、細骨材・粗骨材として存在しているが化学法では骨材粒径による反応性の違いを考慮できていない。

森らの研究では、骨材を細骨材の粒径 (0.15-5mm) として骨材の溶解挙動を試験している。森らは骨材を細骨材サイズに調整し、1L ポリプロピレン製容器に入れたアルカリ溶液 800mL に骨材 200g を浸漬させた。その後 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温槽内で保管し、一定期間ごとに 10mL 分取を行い、ICP 発行分析装置により Si, Na 濃度を分析している。分析を行った結果を図 2-3⁹⁾、図 2-4⁹⁾に示す。図 2-3 より Sc は 7 日までではあるが、化学法の Sc と直線的な関係が得られていると述べている。また、図 2-4 の Rc においても例外はあるもののいずれの時間においても化学法と直線的な結果となっている。このことから粗骨材粒形については不明だが、細骨材の粒径でも Rc, Sc の検討が可能となっており、ALA の骨材反応性の検討は森らの方法で行うべきであることが考えられる。

図 2-3 森 Sc と化学法 Sc の関係⁹⁾図 2-4 森 Rc と化学法 Rc の関係⁹⁾

2.3.3 内部性状の観察

ASR, DEF は外観上のひび割れは酷似しており, 見分けることが難しい。一方で, 内部では ASR では骨材を貫通するひび割れ, そこを埋める ASG が見られ, DEF では骨材周囲のギャップ, そこを埋める繊維状のエトリンガイトなど ASR, DEF は共に内部性状に特徴的な劣化が見られており, これらの現象は内部性状の観察が非常に重要となっている。

(1) 偏光顕微鏡観察

山田ら^{10), 11)}によると偏光顕微鏡による薄片の観察では, 骨材の岩種や構成鉱物, セメントの種類(混和材等の有無)などのコンクリートの構成要素とともに, ASR の発生・進行段階を確認する。まず, 偏光顕微鏡による観察を行う場合, 薄片試料の作成のために肉眼, 実態顕微鏡, コアスキャナー等で ASR の判定を行うとともに薄片試料作製部位を決定する。偏光顕微鏡では, 透過光を用いて観察するため薄片試料は厚さ 15~30 μm である必要がある。

一般に粗骨材の岩種の識別は肉眼や実態顕微鏡を用いて行う。実態顕微鏡, 線積分法を用いることで必要に応じて岩種の同定, 鉱物のおよその含有量を求めることは可能であるが, 不可能な場合は偏光顕微鏡を用いることになる。細骨材の岩種構成を定量的に求める場合は, ポイントカウンティングという方法が用いられる。これは, 薄片試料上に適当な間隔の方眼をかけ, 交点上の岩石や鉱物を種類別に数え, 計測した総数に対する種類別の計測数から構成割合を求めるという手法である。他にはセメントやフライアッシュなどは特殊な形状・光学的特徴, ブリーディングの発生は骨材周辺にできた粗大なポルトランダイトなど様々な物質・現象の確認が可能になっている。

鳥居らの研究¹²⁾で実際に観察された顕微鏡写真を図 2-5¹²⁾に示す。この顕微鏡写真より, 安山岩 A は火山ガラスを非常に多く含み, 安山岩 B はクリストバライトが比較的多く, 一方で安山岩 C は火山ガラス, クリストバライトはいずれも少量であることが分かる。安山岩 B は安山岩 A・C と比較してシリカ分 (SiO_2) が多い。また, 安山岩 C はスメクタイトを多く含んでおり, スメクタイトはアルカリを吸着することが知られているため, 安山岩 C は

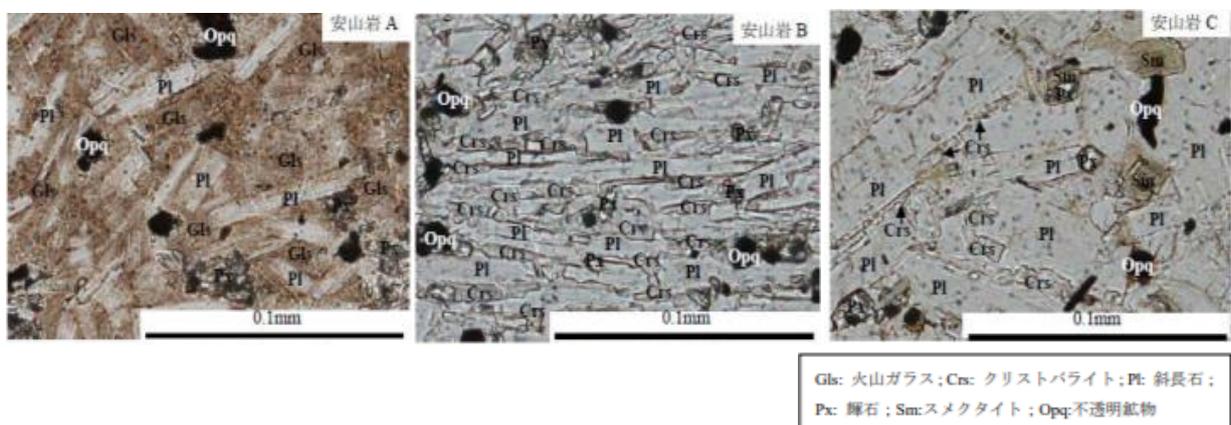


図 2-5 偏光顕微鏡による安山岩碎石の薄片試料写真¹²⁾

モルタルバー法では ASR 反応性を適切に評価できない。以上のことからいずれも潜在的な反応性を有するが、安山岩 C の反応性は他のものに比べて低いものと判断されている。火山ガラスを多く含む安山岩 A は火山ガラスの高い反応性のほかに、火山ガラスは多くのアルカリを溶出することから ASR が長期にわたって発生する可能性を考えている。

ASR の発生・進行段階の評価も薄片観察で行われる。通常の場合、ASR は①骨材の反応リムの形成、②骨材周辺のゾル・ゲルの取り巻き、③骨材内の膨張ひび割れの形成・ゲルの充填、④骨材を取り巻くセメントペースト内の膨張ひび割れの形成・ゲルの充填、⑤骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのゲルの沈殿、という順序で ASR は進行するため、これに着目して ASR の進行状況を評価する。

同じく鳥居らの研究¹³⁾で用いられている偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定指標を表 2-1¹³⁾、偏光顕微鏡による促進モルタルバー試験終了後のモルタルの薄片試料写真を図 2-6¹³⁾、その判定結果を表 2-2¹³⁾に示す。ここでは、薄片試料は厚さ 20 μm となっており、図中の OPC は普通ポルトランドセメント（等価アルカリ量 0.55%）、FA、BFS は混和材（等価アルカリ量 FA : 1.14%、等価アルカリ量 BFS : 0.43%）を示している。通常のポルトランドセメントが用いられた試験体（図 2-6OPC）では、大きなひび割れが観察され、骨材からセメントペーストに連続的なひび割れ網が形成されていることが分かる。一方で、FA 及び BFS を置換されている試験体では、ひび割れ幅が小さく、ひび割れ密度も減少していることが確認されている。

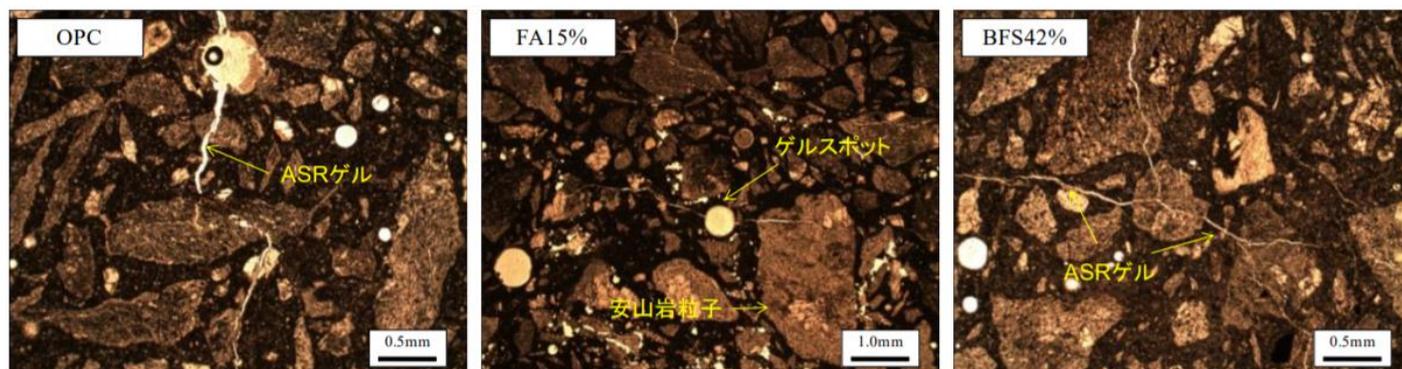
表 2-1 偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度判定指標

レベル	ひび割れの発生及び反応状況
I	反応環の形成と反応性骨材粒子からの ASRゲルの析出
II	反応性骨材粒子からのひび割れの発達
III	反応性骨材粒子からセメントペーストへひび割れの進展(最大ひび割れ幅25 μm 以下)
IV	連続的なひび割れ網の形成とASRゲルの気泡への侵入(最大ひび割れ幅25-50 μm)
V	連続的なひび割れ網の形成とASRゲルの気泡への侵入(最大ひび割れ幅50 μm 以上)

表 2-2 偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度判定結果

骨材	試験法	OPC	FA15%	BFS42%
安山岩A	JISA1146	*	*	*
	デンマーク法	V	III	II
	ASTM法	V	IV	IV
安山岩B	JISA1147	*	*	*
	デンマーク法	II	I	*
	ASTM法	IV	III	III
安山岩C	JISA1147	*	*	*
	デンマーク法	IV	*	*
	ASTM法	V	III	III

*:ASRによるひび割れや反応環が観察されない



(b) ASTM C1260

図 2-6 偏光顕微鏡による促進モルタルバー試験終了後のモルタル薄片試料写真

(2)走査電子顕微鏡 (SEM)

SEM では偏光顕微鏡では観察が難しかった数 μm 以下の非常に微細な反応性鉱物や反応生成物を偏光顕微鏡と同じ鏡面研磨薄片試料から同定することができる。実際の ASR 診断では、実態顕微鏡、偏光顕微鏡観察の補助として用いられる。

片山の報告¹⁴⁾で実際に観察されたものを図 2-7, 図 2-8¹⁴⁾, に示す。図 2-7 は日本で膨張ひび割れを発生させる例の多い安山岩中のクリストバライト (左図, 粒状) とトリディマイト (右図: 板状) である。ここではクリストバライトとトリディマイトが反応し、ここから生じたゲルがロゼット状の集合体になっていることが確認されている。図 2-8 は遅延膨張性の ASR を引き起こす可能性がある隠微晶質石英の様子である。隠微晶質石英は薄片・透過光の観察では見逃されてしまうが, SEM を用いることにより, ASG に変化し膨張ひび割れを形成していく様子や結晶化しロゼットに変化している様子を観察することができる。このように SEM での反応性鉱物の観察では, 偏光顕微鏡では見られないある岩石の中のある鉱物の反応性を評価するために用いられている。

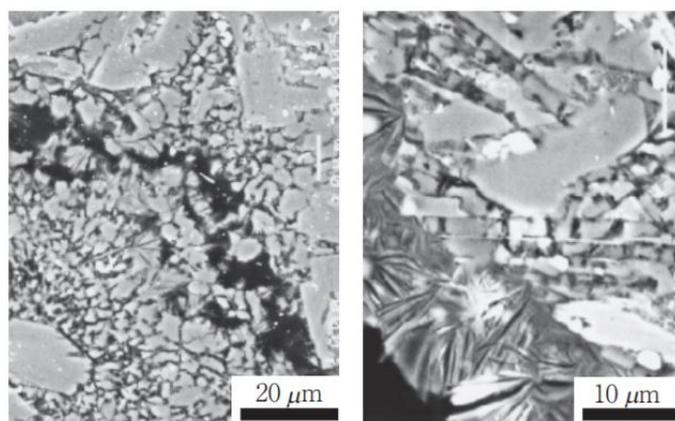


図 2-7 安山岩のクリストバライト(左:粒状)・トリディマイト(右:板状)の反応¹⁴⁾

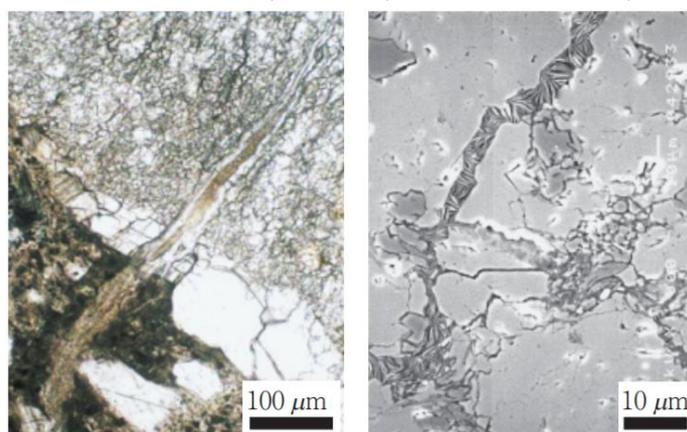


図 2-8 安山岩のクリストバライト・トリディマイトの反応(左:偏光顕微鏡 右:SEM)¹⁴⁾

SEM は鉱物だけでなく ASG 等の反応生成物の観察にも用いられている。実際に ASG を観察したものを図 2-9¹¹⁾に示す。例えば、肉眼でコンクリートに白色もしくは透明の物質が見られたとしても、それだけでは必ずしもその物質が ASG となるわけではない。その際に本当に ASG かどうかを確認するために用いられる場合もある。図 2-9 の左のものは乾燥によりひび割れが発生した非晶質の ASG, 右のものは ASG がロゼット状に再結晶化したものでどちらも典型的な ASG の形態である。研磨を行わない資料ではこのような典型的な ASG が見られるため、SEM による観察と文献などで見られる ASG を比較することで ASG かどうかを確認することが可能となっている。

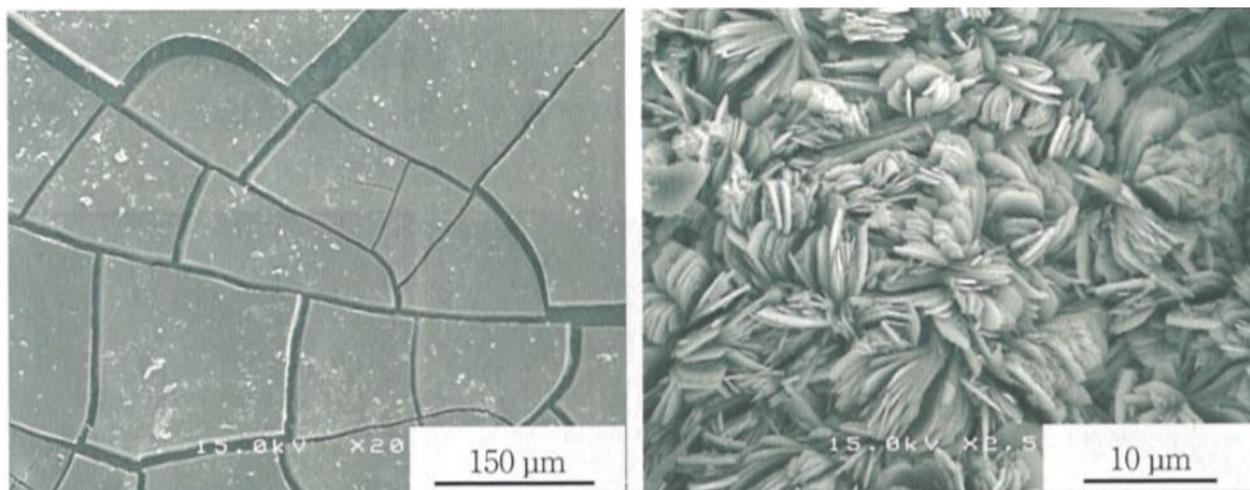


図 2-9 SEM による ASG 観察の様子(左：乾燥収縮によるひび割れ 右：ロゼット状に再結晶)¹¹⁾¹⁴⁾

(3)X線 CT

X線 CT は他の試験と異なり、内部の状況を非破壊で把握できることが特徴である。コンクリートの力学的挙動に大きく影響を及ぼすものとしてコンクリートに多数発生する微細なひび割れが存在する。コンクリート表面に発生するひび割れの場合、顕微鏡等を用いれば観察可能だが、表面と内部では応力の状態が異なっているため、内部の観察も必要となる。内部に発生する微細なひび割れは通常、コンクリートを切断し、顕微鏡等を用いることで観察が可能となるが、その場合切断した時点でその断面は「表面」であるため ASG が外部に漏れだす、切断により微細なひび割れが発生するなどが考えられ、その後の変化は「内部で発生する現象」とは言えなくなる。また、全く同一の試験体で載荷前、載荷後のひび割れの発生・進展の状況を観察することができない。そのような場合に X 線 CT は非破壊であるため連続的な撮影が行え、ひび割れ観察の有効な手段となる。

川端ら¹⁵⁾は DEF を発生させた円柱試験体のひび割れ分布を把握するために X 線 CT を用いている。実際に撮影された CT 画像を図 2-10¹⁵⁾に示す。図 2-10 から DEF において典型的な現象である骨材周辺のギャップ、また、骨材が大きいほどギャップが大きくなるという現象が確認できる。DEF は外観上のひび割れとして亀甲状のひび割れが発生することが知られているが、この円柱試験体では表面から中心に向かって 1cm 程度の長さでそれより内部はギャップとしてひび割れが存在していることが分かる。

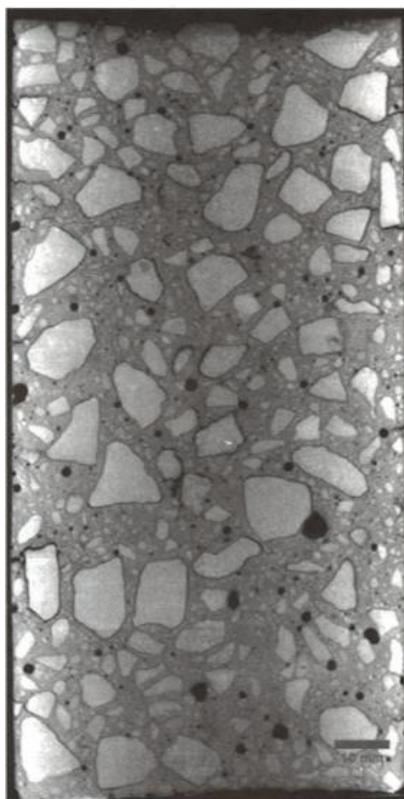


図 2-10 DEF が発生した試験体の X 線 CT 写真¹⁵⁾

天明らの研究¹⁶⁾では、コンクリートの強度と X 線 CT から得られる空隙、骨材、モルタルの比率の関係性を検討している。天明らの研究での X 線 CT 装置の仕様を表 2-3¹⁶⁾、CT 値の頻度分布を図 2-11¹⁶⁾、得られた X 線 CT 画像とそれを 2 値化したものをそれぞれ図 2-12¹⁶⁾、図 2-13¹⁶⁾に示す。ここで、CT 値はその物質の X 線の吸収し易さを表しており、物体の密度に比例する。X 線 CT によりコンクリートの各材料の密度や寸法を定量的に検討するには、撮影された断面画像の画像処理により各材料の境界 CT 値（しきい値）を適切に設定する必要がある。この研究ではそのしきい値決定のために材料構成定量化法¹⁷⁾を採用している。この方法はまず使用する X 線 CT 装置の分解能を考慮して、コンクリートを比較的大きな骨材（図 2-11 中の「骨材」）、比較的小さい骨材を含むセメントペースト（図 2-11 中の「モルタル」）、比較的大きな空隙（図 2-11 中の「空隙」）に分ける。そして、空隙とモルタルの境界 CT 値については CT 値のヒストグラムから特徴点を見出し、微分処理でしきい値を決定し、骨材とモルタルの境界 CT 値は供試体と共に撮影した標本（図 2-12 中の「ファントム」）を用いてしきい値を決定する。これにより、図 2-13 のように空隙と骨材を明確にできる。ここで、図 2-11 のモルタル部の CT 値とそれに対応するピクセル数の積の合計をモルタル部の総ピクセル数で除した値をモルタル平均 CT 値としている。

表 2-3 X 線 CT 装置仕様 ¹⁶⁾

管電圧	150, 200, 300 kV
最高撮影高さ	600 mm
撮影回転角度	180, 360, 720°
スライス厚	0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm
撮影領域	150, 400 mm
撮影画素数	512×512, 1024×1024, 2048×2048 pixel

下線は本研究で使用した設定

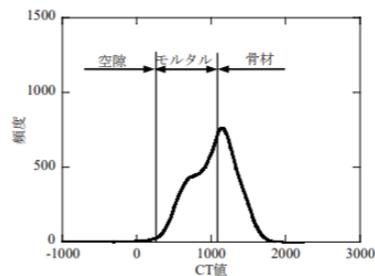


図 2-11 CT 頻度分布 ¹⁶⁾

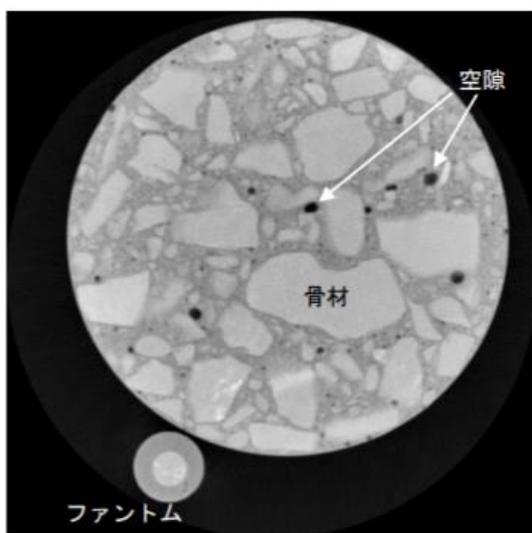


図 2-12 天明らによる X 線 CT 写真 ¹⁶⁾

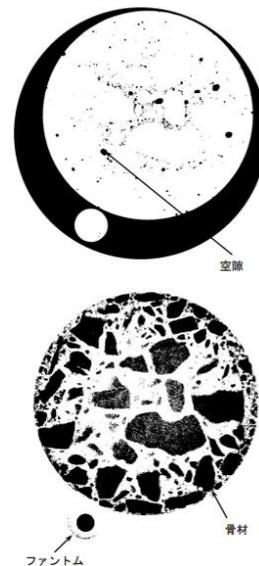


図 2-13 X 線 CT 写真の 2 値化画像 ¹⁶⁾

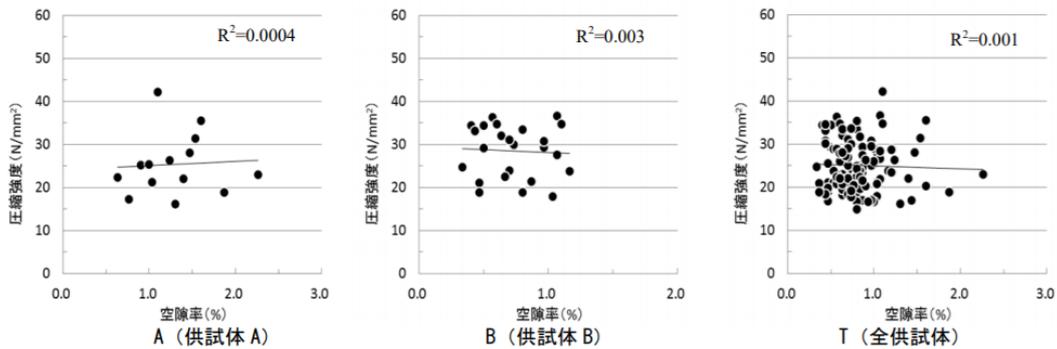


図 2-14 空隙率と圧縮強度¹⁶⁾

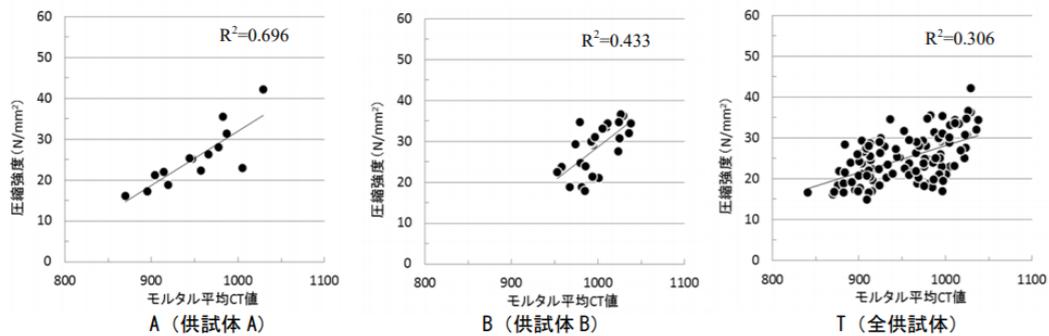


図-8 モルタル平均 CT 値と圧縮強度

図 2-15 モルタル平均 CT と圧縮強度¹⁶⁾

天明らの研究¹⁶⁾で得られたコンクリートの圧縮強度と空隙率及びモルタル平均 CT 値を比較したものを図 2-14¹⁶⁾、図 2-15¹⁶⁾に示す。図 2-14 より、空隙率と圧縮強度は相関が低いことが分かる。武田らの研究¹⁸⁾では、空隙率と圧縮強度に高い相関がみられているが、天明らの材料構成定量化法による空隙率では圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられている。そのため、実際に X 線 CT において空隙率を計算する場合は注意が必要である。図 2-15 より、モルタル平均 CT 値と圧縮強度は高い相関がみられた。CT 値は物質の密度と相関が高いことから、セメント水比の大きいコンクリートほど密度が大きく、圧縮強度が大きくなることと関係していると天明らは推察している。

このように X 線 CT 画像は非破壊で断面を確認できるため、切断による損傷を考慮することなく、ひび割れ分布、ひび割れ幅、また、空隙率などの情報を比較的簡単に数値として取得し、様々な観点から考察を進めることができる。

2.3.4 組成分析

EPMA 等組成分析に用いられる装置は、偏光顕微鏡観察では判断しづらい鉱物の特定に用いられる。また、セメントペースト硬化体の元素分布や将来的に膨張性があるかどうかの検討にも用いられる。

(1) 分析型走査電子顕微鏡 (SEM-EDS・EDX)

SEM-EDS・EDX を用いると試料を構成する元素の情報を得ることができる。なお、EDS・EDX は呼び方が違うだけで同じ装置である。

山田ら¹⁰⁾によると、未水和セメントに含まれるエーライトとビーライトは、一定の $[Ca]/[Si]$ 比を持った最終的な水和物 (CSH ゲル) になるが、ASR ゲルは反応性骨材からセメントペーストへの移動に伴い、アルカリを放出、Ca を吸収して CSH ゲルの組成に近づく。エーライト、ビーライトによる CSH ゲルの組成及び ASR ゲルの組成を図 2-16¹⁰⁾ に示す。ASR の組成線の形は、傾き、範囲などから 3 つの進化型に区別できる。I 型は ASR ゲルの組成が 1 本の組成線で表され、 $[Ca]/[Si]$ 比と $[Ca]/[Na+K]$ 比とともに増加する図 2-16 のような形となる。I 型は膨張が進行中の前期～中期に ASR ゲルに見られる。II 型は平衡に並列する ASR ゲルの組成線で特徴づけられ、これは生成時期の異なるゲルの存在を示唆している。これは中期～後期に見られ、この ASR ゲルは膨張性が比較的小さい。III 型の組成線は屈曲した形を示し、ASR がさらに後期のステージにあることを示唆する。

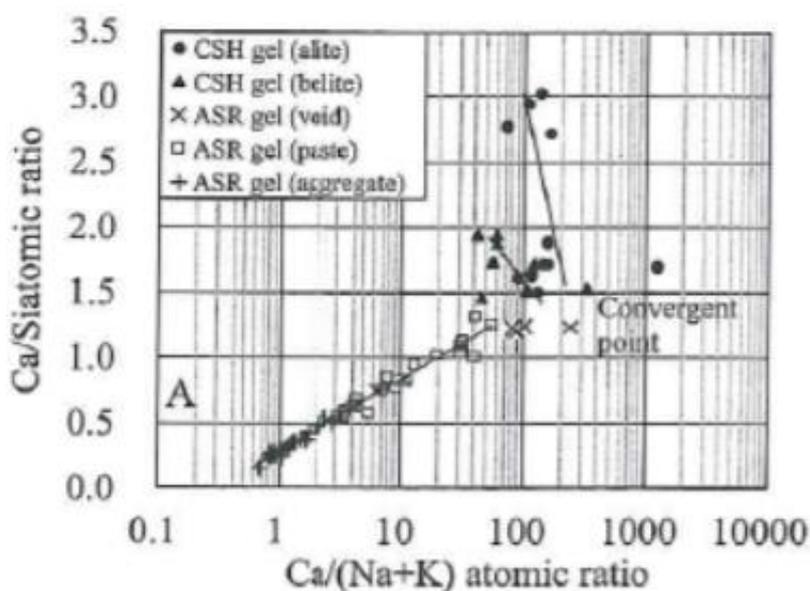


図 2-16 $[Ca]/[Si]$ — $[Ca]/[Na+K]$ (I 型)¹⁰⁾

杉山ら⁵⁾は軽量骨材単体と、軽量骨材を用いたモルタルに対して SEM-EDX 分析を適用している。SEM-EDX による分析結果を図 2-17⁵⁾、図 2-18⁵⁾に示す。図 2-17 に関して、測定方法は骨材粒子の鏡面研磨試料 (1.2~2.5mm) を作成し、反射電子像画面でガラス相と想定される 5 個所での点分析の平均値をとっている。杉山らはここで内部組織が均一でないこと、微量な化学成分 (アルカリ等) が偏在することを確認している。また、平均的な化学組成から軽量骨材のガラス相が反応性骨材 (図中、川砂利) と類似しており、ASR が生じる可能性があると考えられている。図 2-18 は軽量骨材を用いたモルタルバーにモルタルバー法を適用し、その ASG の組成分析を行ったものである。ここで、ASG はどの成分が多いかによって ASG そのものの反応性が異なっており、図 2-18 で骨材外殻近傍とあるアルカリ分が 17~28%、シリカ分が 42~58%、カルシウム分が 13~24%の範囲にあるものは、カルシウム分が少ないことから吸水膨張性のある ASG であり、外殻部分に多量生成した場合 ASR 膨張の危険性があると判断されている。一方で、骨材の気孔、モルタルの空隙中にも ASG が確認されており、それはカルシウム分が多く、吸水膨張の小さい、危険性の低い ASG と判断されている。

このように、SEM-EDS・EDX は骨材に適用することでその骨材がどのような組成であり、ASR 反応性があるのかを確認することができる。確認される ASG そのものに SEM-EDS・EDX 分析を行うことでそれが将来的に膨張するかの予測を立てることができる。また、組成そのもののだけでなく、ASG が発生する箇所 (外殻なのか、気孔中なのかなど) も重要であるため、観察の際には注意が必要である。

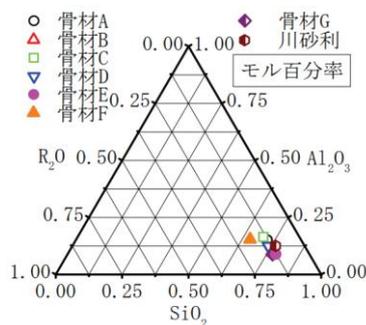


図 2-17 軽量骨材の化学組成⁵⁾

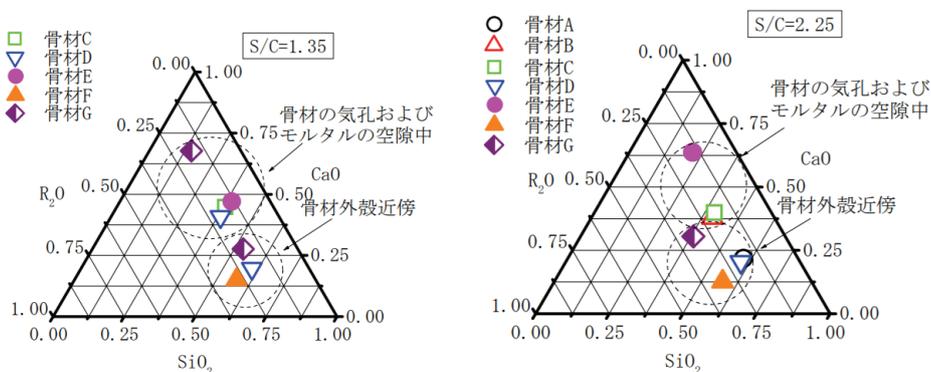


図 2-18 モルタルバー法終了後の ASR ゲルの化学組成⁵⁾

(2) 電子プローブマイクロアナライザー (EPMA)

EPMA はある断面に対して、アルカリ金属、硫黄などを面分析することができ、それにより面的にイオン供給の様子を確認することができる。

俵積田らの論文¹⁹⁾では、暴露試験を行った $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の試験体に EPMA を適用している。俵積田らは観察台に収まるように乾式のコンクリートカッターを用いて試験体の切断を行い、試料を樹脂で包埋した後、乾式で研磨、さらに分析面に導電性を与えるために炭素の蒸着を行っている。EPMA 分析の結果を図 2-19¹⁹⁾に示す。 Na_2O 濃度について着目すると、N10FA15-3.0-沖縄を除いて、内側と比較して表層の 10~20mm の濃度が低いことが確認できる。N10FA15-沖縄でも濃度が低い、その領域は 5~10mm 程度であり、溶脱の程度が小さいことが分かる。この結果から、FA の添加により組織が緻密になり、アルカリの溶脱が抑制されたと考察されている。また、反応性の高い反応性骨材を用いている N10FA15-3.0-沖縄、N10FA15-沖縄で全体的に濃度が低いことは反応による消費や反応による内部組織の破壊でイオンの移動が容易になったためだと考察している。 K_2O 濃度に着目する Na_2O と同じく内側と表層の濃度に差があることが確認されたが、その差は小さかった。これについては、調合においてアルカリ総量の調整に NaOH を用いているため、そもそも K が少なく、勾配も小さくなったと考察されている。また、 $\text{K} \cdot \text{Na}$ どちらも表層部に非常に濃度が高い部分があるが、これは Na と K の濃縮部が一致していることから、炭酸化したセメントペーストのアルカリ吸着能力が高いことによるものだと考察されている。

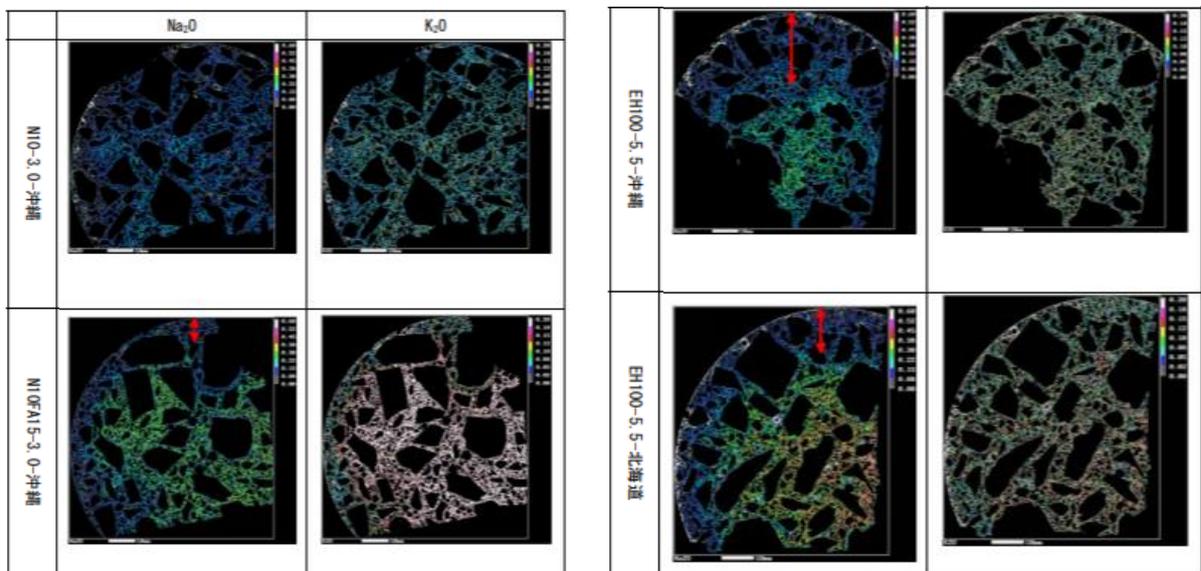


図 2-19 EPMA 測定結果¹⁹⁾

俵積田らはコンクリートに対して EPMA を行っているが、林ら²⁰⁾の研究のように骨材とそこにある ASG 脈に着目している場合もある。林らによる EPMA 分析の結果を図 2-20²⁰⁾、図 2-21²⁰⁾に示す。図 2-20 より、ASG の化学組成は、マトリクス境界から骨材内部に向かって Ca 濃度が減少するのに対して、Na・K 及び Si 濃度は増加するという結果になっている。その様子をまとめたものが図 2-21 だが、マトリクス境界から 25 μm で急激に Si が高くなり、それ以降は一定となる結果になった。一方で、同じ 25 μm で Ca は急激に低下しており、そこから徐々に減少している結果となっている。Na・K はともに徐々に内部に向かって増加している。これに関して林らは Wang ら²¹⁾、Brouxel²²⁾の

- ①骨材表面の反応性シリカが OH の影響で活性度が高くなる
- ②骨材とマトリクスの境界でセメント由来のアルカリにより骨材中のシリカが反応する
- ③そのアルカリが内部のシロキサン結合を分裂して吸着することでゲル化する
- ④セメント由来の Ca^{2+} がゲル中のアルカリに置換する
- ⑤ Ca^{2+} が置換し、放出されるアルカリがより内部の反応に寄与できる

という ASR 機構から骨材内部に徐々に反応が進んでいくのではないかと考えている。

このように EPMA では面分析を行うことで、内側・外側による差が可視化され、外的要因や内部からの漏出などをより正確に考察が行えるようになる。

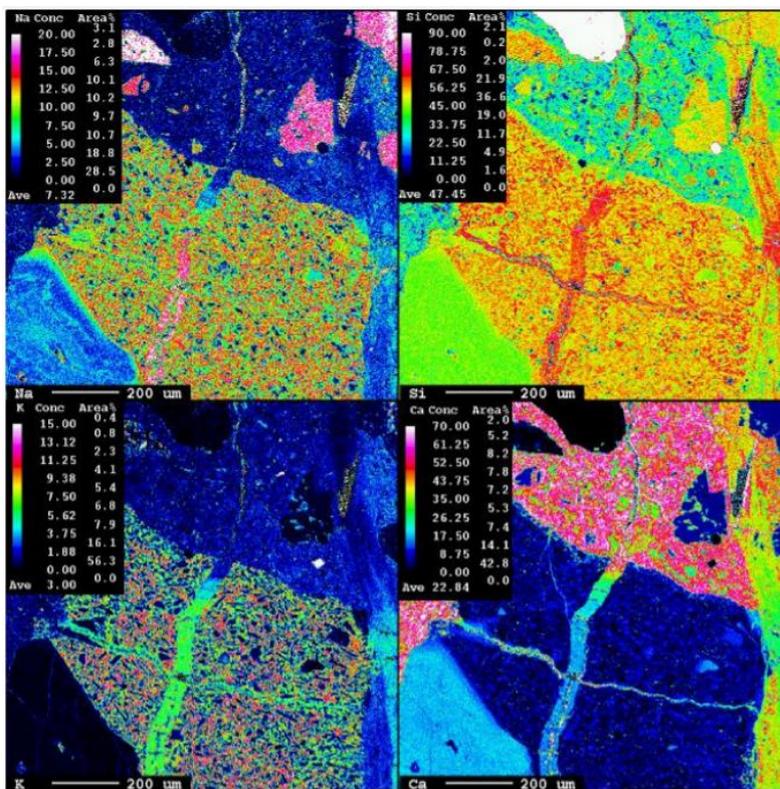


図 2-20 EPMA 面分析結果²⁰⁾

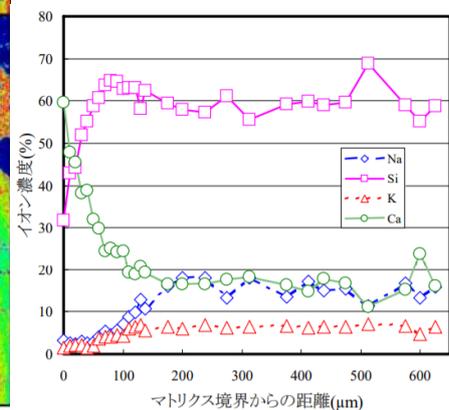


図 2-21 ASR ゲル組成結果²⁰⁾

2.3.5 細孔溶液分析

ASR は化学的要素が多く，コンクリートの持つ細孔溶液の化学組成を分析することは重要となる。特にアルカリとの関係が深く，OH濃度を測定することで将来的な ASR の予測に用いることができる。

(1) 酸溶解

この項では鶴田らにより唱えられている²³⁾酸溶解により硬化コンクリート中のアルカリ総量を求める手法について説明する。試験の概要を図 2-22²³⁾，図 2-23²³⁾に示す。方法としてφ100*200mmのコンクリートとそれに使用した骨材をそれぞれ105μm以下に全粉砕し，四分法により分取後，一部は550°Cで3時間強熱，残りは110°Cで24時間乾燥し，それぞれの減量を測定する。その後110°Cの試料とギ酸を混合し，30°Cで40分間攪拌することでセメントペーストを酸溶解する。その後，吸引ろ過によりろ液部分と個体残渣を分離し，ろ液中のアルカリを原子吸光光度法で測定する。それらの試験で得られた数値を用いて計算する。

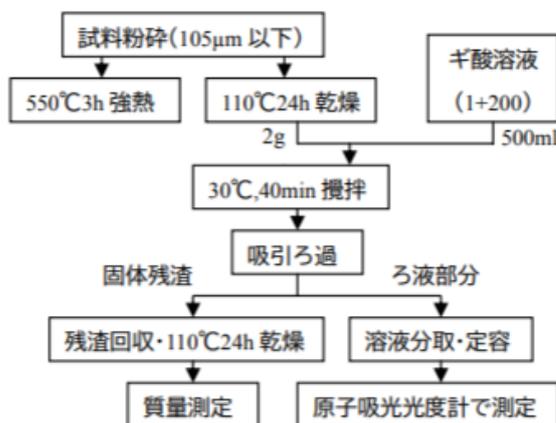
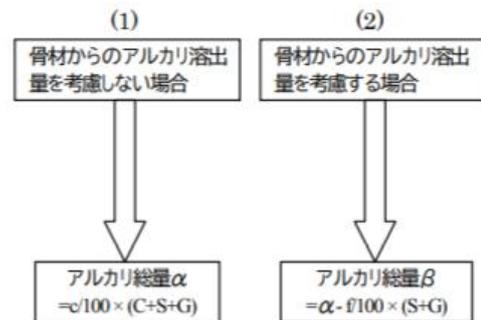


図 2-22 酸溶解による測定フロー²³⁾



- a: コンクリート酸処理溶液中のアルカリ分析値(g)
- b: 無水換算コンクリート試料量(g)
= 110°C乾燥試料量 - (550°Cの試料減量 - 110°Cの試料減量)
- c: 無水換算コンクリート試料から溶解したアルカリ量(%)
= $a/b \times 100$
- d: 骨材酸処理溶液中のアルカリ分析値(g)
- e: 無水換算骨材試料量(g)
= 110°C乾燥試料量 - (550°Cの試料減量 - 110°Cの試料減量)
- f: 骨材試料から溶出したアルカリ量(%)
= $d/e \times 100$
- C: 単位セメント量 S: 単位細骨材量 G: 単位粗骨材量
なお、無水換算コンクリートとは骨材+セメントを表す

図 2-23 アルカリ総量算定手順²³⁾

試験の結果を図 2-24²³⁾に示す。図 2-24 中の□は骨材からのアルカリ溶出量を考慮しない場合のアルカリ総量になるが、作成供試体より多くのアルカリ量が見積もられた。図 2-25²³⁾に骨材からのアルカリ溶出量を示しているが、頁岩からのアルカリ溶出量は、セメント中のアルカリ量の約 1/4 (コンクリート中のセメント：骨材比が 1:4~5 であることを考慮するとコンクリートからの溶解量とほぼ同量) に相当しており、骨材のアルカリ量は考慮する必要があることが分かる。図 2-24 中の■は、骨材からのアルカリ量を考慮して図 2-23 にしたがって、□ (アルカリ総量 α) から骨材のアルカリ量を配合比にしたがって差し引いたものである。図 2-24 より、この■は作成供試体に近い値を示していることが分かる。

この結果よりコンクリート中のアルカリ総量の推定において骨材から溶出するアルカリ量は考慮すべきであることが分かった。

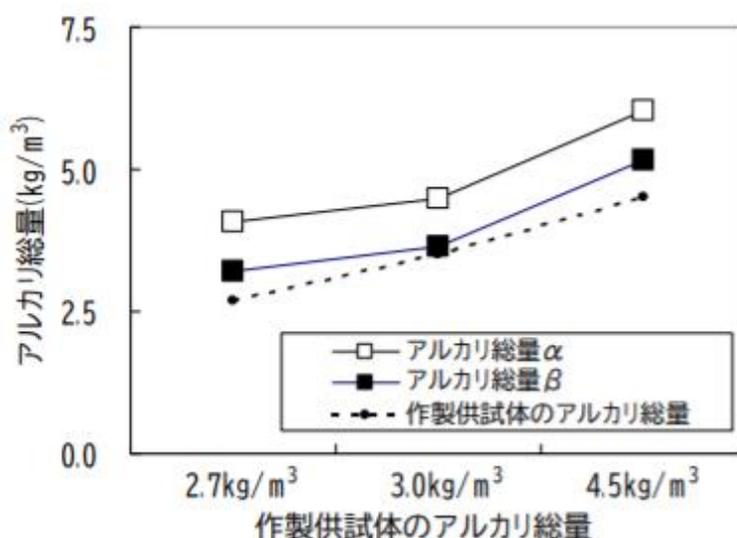


図 2-24 コンクリート中のアルカリ総量の算定²³⁾

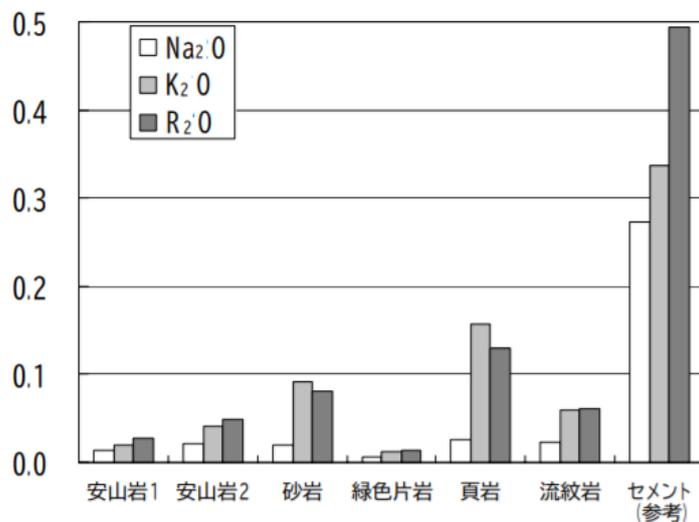


図 2-25 骨材からのアルカリ溶出量²³⁾

(2)圧搾抽出

圧搾抽出は名前の通りモルタルもしくはコンクリートに圧力をかけることで硬化体内にある細孔溶液を抽出する手法である。ただし、元はセメントペーストやモルタルのために作られた手法であり、コンクリートから得られる細孔溶液は少量であるため適用例は少ない¹¹⁾。

田中らの論文²⁴⁾では混和材による影響を細孔溶液で見るとするため、混和材を入れたφ50×100mmモルタルシリンダーを作成し、Barneybackらの論文²⁵⁾を参考に作った試験装置で圧搾を行っている。試験装置の概要図を図2-26²⁴⁾に示す。ここではモルタルシリンダーに最大約500N/mm²の圧縮応力を与えて、切りかき溝を伝って流れ出る溶液を注射器を用いて採取している。採取した溶液は直ちにイオン交換水で100倍希釈を行い、ICPを用いてNa, K, Ca, OHの4種類の定量分析、中和滴定でOHイオンを濃度を測定した。試験結果の一部を図2-27²⁴⁾、図2-28²⁴⁾に示す。測定は脱型日、2, 4, 8週目に行われている。図2-27からいずれの試験体でもOHイオンはほぼ2週目までに消費されその後、ほぼ横ばいの結果となっており、これは配合にフライアッシュや高炉スラグなど混和材が用いられているが、材齢初期に水和反応やポゾラン反応が活発に生じるためであると考察されている。図2-28は細孔溶液の抽出を行った試験体と同じ配合のモルタルバーの膨張量を計測したものであるが、反応性骨材の入ったR-0と通常の骨材のみのN-0はアルカリの濃度があまり変わらないのに対して膨張量は大きく異なる結果となっている。混和材を入れたものの結果を見るとイオン濃度が低くなっているものほど膨張量が小さくなっており、アルカリ吸着・消費がASR抑制に密接に関係していると考察されている。

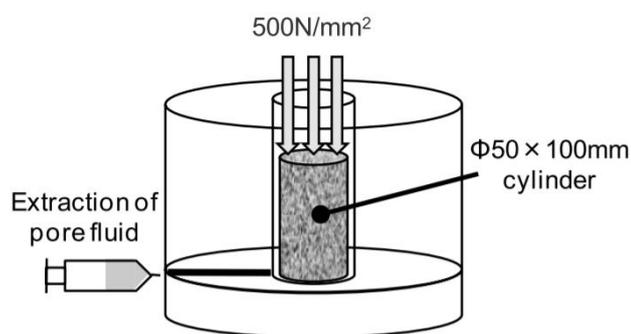


図 2-26 圧搾抽出試験概要図²⁴⁾

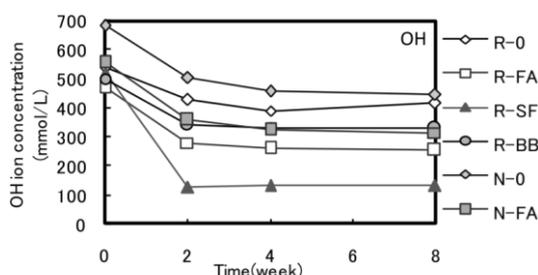


図 2-27 OH濃度測定結果²⁴⁾

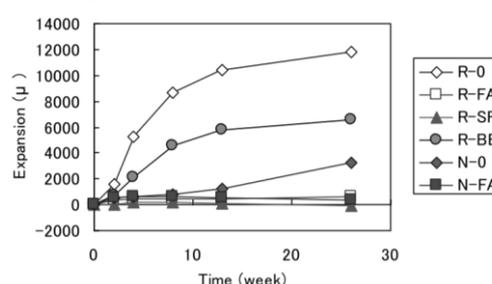


図 2-28 膨張量測定結果²⁴⁾

(3)温水抽出

温水抽出法は Rogers, Hooton ら²⁶⁾によって 1993 年に提案されている。温水抽出法はまず、コンクリート試料を 150 μm のふるいを通過するように、粉砕する。次にそこから 10g のサンプルを取得し、このサンプルをビーカーに入れ、蒸留水 80mL に浸して 10 分間沸騰させる。その後溶液を 20 時間 \pm 4 時間放置した後、ろ液を回収し、原子吸光光度法、ICP などでアルカリ含有量を分析する。

Fournier らの研究²⁷⁾では、コンクリートの残存膨張量を評価するうえで、アルカリ残存量が重要であるため、コンクリートのアルカリ溶液を分析する方法である Bérubé らにより改良された方法^{28), 29)}と Espresso 法と呼ばれる方法の 2 つの結果を比較している。Bérubé らにより改良された方法²⁸⁾ではろ液を回収した後に蒸留水で 100mL にして、分析を行っている。Espresso 法では、重力ではなく、吸引によりろ液を回収する。ろ液回収の様子を図 2-29²⁷⁾に示す。温水抽出法ではコンクリート試料の準備から非常に厳密に行われている。

- ①コンクリートを切断して、コアを長手方向に半分に分割する
- ②コンクリートをハンマーで破壊し、25mm 程度の粒子にする
- ③ジョークラッシャーを用いて、粉塵が出すぎないようにジョーの間隔を徐々に狭めながら、複数回にわけて破砕する。これを全ての試料が 5mm 未満になるまで行う
- ④この 5mm 未満の試料から 1kg 採取を行い、ローラークラッシャーなどですべての材料が 150 μm 以下になるまで粉砕する。
- ⑤その後 10 \pm 0.1g のサンプルを 2, 3 個確保し、炭酸ガスの発生を防ぐため、気密性の高い袋で保存する。
- ⑤'ここで、残りの試料から予備を確保して同様に気密性の高い袋に入れ、冷凍庫で保管を行う。

Fournier らはこの試料の準備を行ったうえで、最適な試験方法を検討するため、抽出液の温度 (25 or 100 $^{\circ}\text{C}$) および抽出液の容量 (80 or 300mL) を変更している。Espresso 法で抽出温度を変更した場合の結果を図 2-30²⁷⁾に示す。この図より抽出温度を上げることでアルカリ



図 2-29 温水抽出法使用器具²⁷⁾

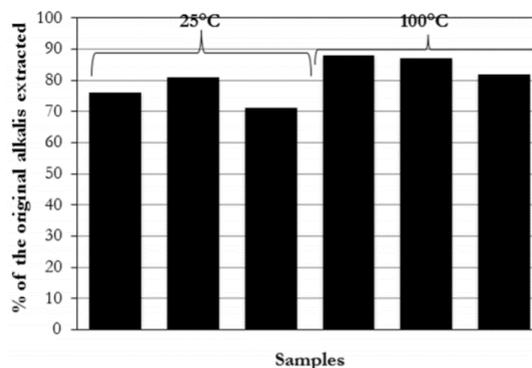


図 2-30 Espresso 法での温度変更の結果比較²⁷⁾

の抽出率が上がり (25°C : 76.1%→100°C : 85.7%), 再現性が向上することが分かった。次に Espresso 法で抽出液の容量を変えた結果を図 2-29²⁷⁾に示す。図中 A が抽出液を 80mL, B が 300mL とした場合だが, 平均アルカリ抽出率はともに約 85%と同程度であったが, 抽出液が多いほうは非常にばらつきが小さい結果となった。一方で, 80mL のほうも 1つの外れ値を除くと抽出率が高くなり, 少ない水量でより高い抽出率が得られる結果となった。Fournier らはほかに Espresso 法と Berude の方法の結果比較を行っている。その結果を図 2-30²⁷⁾に示す。この結果より, Berude は 77.4% (約 30%の外れ値は除外), Espresso 法は 84.7%の抽出率, またばらつきも Espresso 法のほうが小さいという結果となった。

以上の結果より, Fournier らは温水抽出法の改良案を提案している。試料の採取方法については前述したような厳密な方法をとる。具体的な方法としては, 粒径 150 μm 以下の 10 \pm 0.1g のコンクリートサンプルを用いて 300mL の蒸留水を沸騰させて試験を行う。その後溶液を 23 \pm 1°Cまで冷却したのち, メスフラスコで蒸留水で 500mL に希釈する。その後溶液は ICP 等で分析するという方法を提案している。ただし, セメントには多量のアルカリが含まれていることから, セメント水和物に取り込まれているアルカリが抽出される可能性があり, 実際のコンクリートの細孔溶液ではない可能性がある。また, ASR が発生している場合の細孔溶液の変化は複雑であり, 骨材によるアルカリへの寄与や ASR 生成物によるアルカリの混入の可能性があるのでから確実に測定できない可能性があることには注意が必要である。骨材からの長期的なアルカリの溶出を考慮する場合には, 異なる抽出液 (飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , KOH) でのアルカリ溶出試験が有効であるとしている。しかし, ASR に関する検証はまだ行われていない。

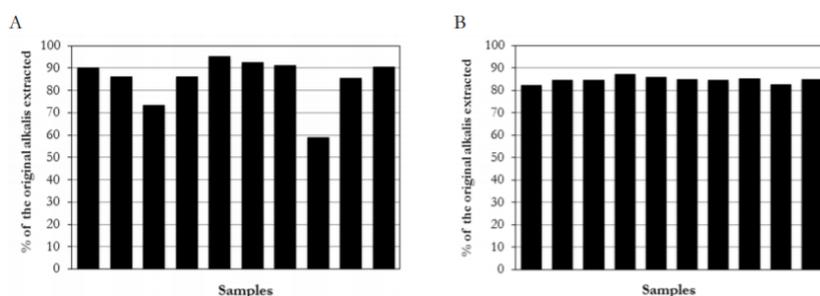


図 2-31 Espresso 法での抽出液容量の結果比較²⁷⁾

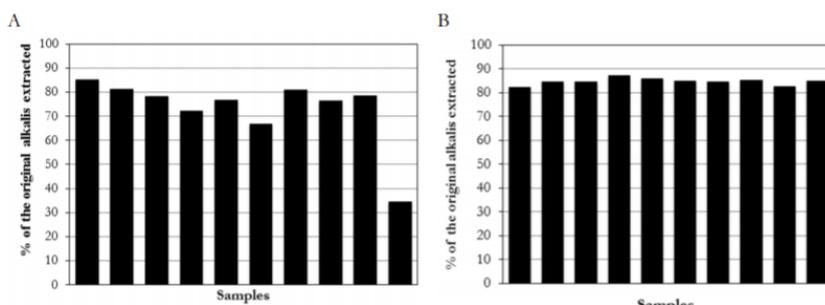


図 2-32 Berude の方法 (A), Espresso 法 (B) での結果比較²⁷⁾

2.3.6 強度試験

小林らの研究³⁰⁾では ASR は膨張に伴い、圧縮強度や静弾性係数を低下させることが確認されている。DEF でも同様に膨張に伴った機械的性能の低下が確認されており、強度試験の実施は劣化の進行度を知るのに最も効果的な方法であると思われる。

(1)圧縮強度

小林らの研究³⁰⁾では、ASR を発生させた試験体（角柱試験体：10*10*20cm）を一定期間ごとに圧縮試験を行い、圧縮強度を得ている。小林らの試験で各材齢の非反応性骨材の試験体と反応性骨材を用いた試験体の強度比（ASR 強度比）と膨張量の関係を表したグラフを図 2-33³⁰⁾に示す。図 2-33 から ASR が発生した場合、膨張率の増加に伴い、圧縮強度が低下しており、膨張率が 0.2%に達してからは漸減する傾向となっている。小林らは 0.2%以降に強度低下の割合が小さくなる理由は下記の理由からだとしている。ASR は反応の進行に伴ってコンクリート組織の結晶部分に対する非晶質部分が增大するが、0.2%の時点でこの反応は終了し、並行して ASG がひび割れや空隙の充填を埋めていく。この時点でコンクリートは非晶質部分が卓越しており、化学的・力学的に安定した状態であり、このとき吸水膨張や乾燥収縮による圧縮強度への影響はあまりないと考察している。

久保らの研究³¹⁾でも ASR が発生した際の圧縮強度を検討している。久保らの研究で得られた圧縮強度と膨張量を図 2-34³¹⁾に示す。図 2-34 より、久保らの研究では膨張に伴い若干圧縮強度の低減が見られるものの ASR による圧縮強度への影響はほぼ見られなかった。この原因として久保らは養生期間が 2 週間と比較的短く、促進曝露後に水和により強度増加したためだと考察している。そのため、ASR では基本的には膨張に伴い、圧縮強度は低下するものであると思われる一方で、ALA を用いた場合、自己養生があるため久保らと同様の傾向が見られる可能性がある。

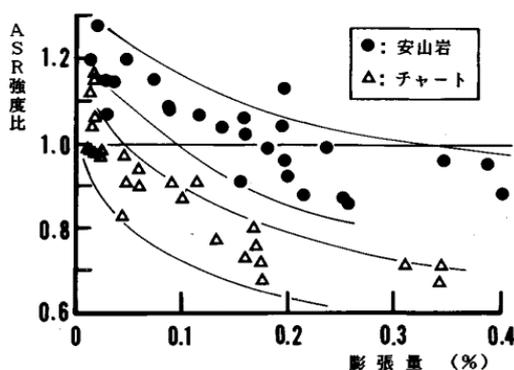


図 2-33 ASR 強度比と膨張量の関係³⁰⁾

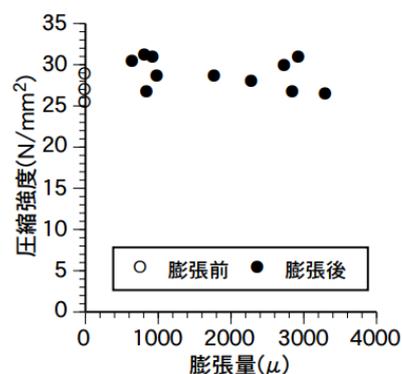


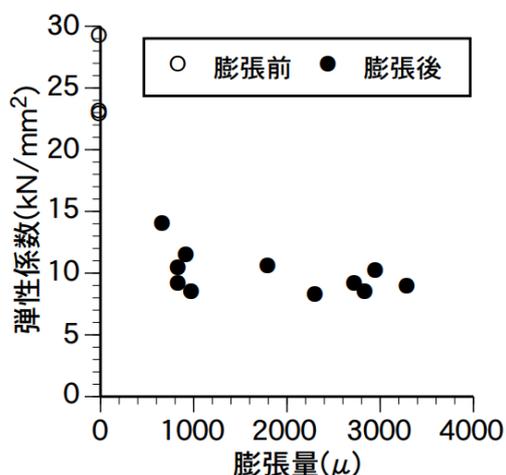
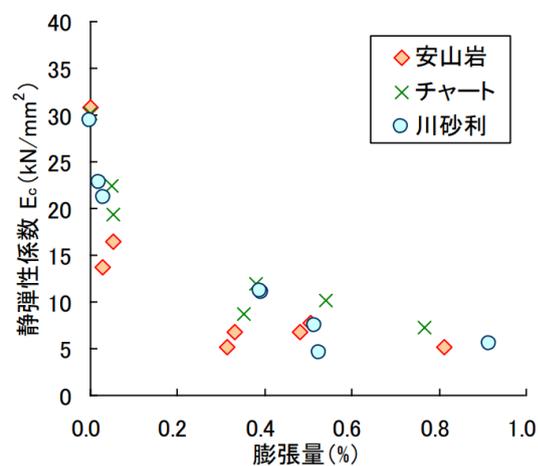
図 2-34 圧縮強度と膨張量の関係³¹⁾

(2) 静弾性係数

静弾性係数はそのコンクリートの変形しにくさを表すものでコンクリートの性能を表す重要な指標となっている。

久保らの研究³¹⁾では、ASRを発生させた試験体で静弾性係数を取得している。久保らの研究で得られた静弾性係数と膨張量の関係を図2-35³¹⁾に示す。図2-35より、静弾性係数は図2-34に示した圧縮強度と異なり、膨張量が1000 μ 程度で著しく減少し、その後は漸減する結果となっている。ASRが静弾性係数に大きな影響を与えた理由として久保らはASR膨張によりひび割れが発生すると、ひび割れの大小にかかわらずそこに空隙が生じたようなものであるため、荷重に対する変形抵抗性は小さくなるために、膨張初期ほど静弾性係数の低下が顕著になったと考察している。

久保らは別年度の研究³²⁾でも静弾性係数を取得している。ここで得られた静弾性係数と膨張量の関係を図2-36³²⁾に示す。図2-36においても安山岩については同様に膨張初期に急激に静弾性係数が低下していることがわかる。一方で、安山岩に比べてチャートは比較的静弾性係数の低下が緩い結果となった。久保らはひび割れ性状の相違や膨張開始時期による影響が原因であるとしている。Giaccioらの検討³³⁾で、膨張開始時期の遅い骨材のものは膨張初期においてマトリクスのひび割れが他のものと異なり、他のものより微細なひび割れネットワークが形成される。このひび割れ性状の違いが、静弾性係数の低下に影響したと考察している。

図 2-35 静弾性係数と膨張量の関係³¹⁾図 2-36 静弾性係数と膨張量の関係³²⁾

(3)ポアソン比

久保らの研究^{31) 32)}では、ポアソン比についての考察もなされている。久保らの研究で得られたポアソン比と膨張量の関係について図 2-37³¹⁾、図 2-38³²⁾、図 2-39³¹⁾、図 2-40³²⁾に示す。なお、コンクリートの標準的なポアソン比は 0.14 から 0.20 である³²⁾。図 2-37、図 2-38 は最大応力の 33%時のポアソン比を表しているが、膨張量が 0.5%あたりまではあまり変化がなく、それ以降は膨張に伴い増加する結果となっている。このことから過大な膨張が生じた場合は、より早期に変形抵抗性が低下すると考察している。

図 2-39、図 2-40 の最大応力の 90%でのポアソン比については膨張が大きいほどポアソン比も大きくなる結果となった。これについては応力の低い段階では、圧縮方向の変形が卓越しているのに対して、応力の高い段階では、内部に存在したひび割れが大小にかかわらず進展し、これらが連結することで横方向の変形抵抗性を下げたと考察している。

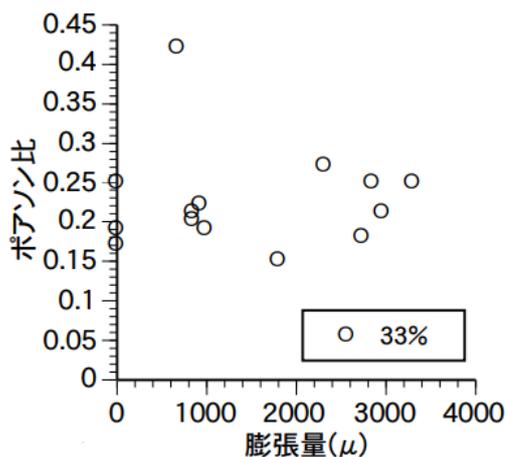


図 2-37 ポアソン比と膨張量の関係(応力 33%)³¹⁾

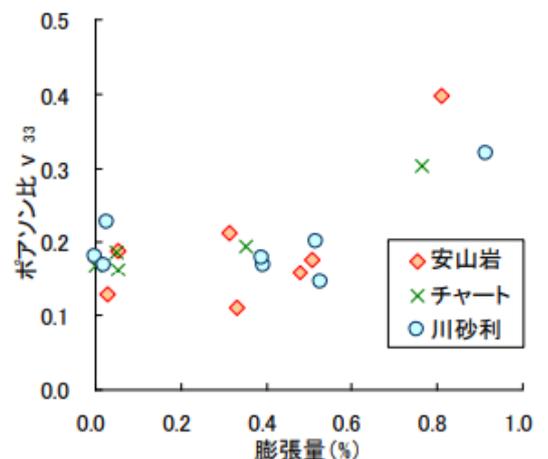


図 2-38 ポアソン比と膨張量の関係(応力 33%)³²⁾

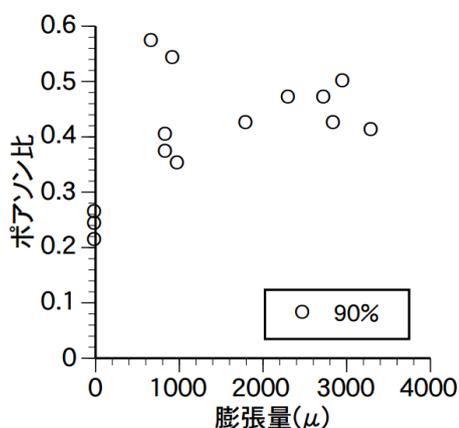


図 2-39 ポアソン比と膨張量の関係(応力 90%)³¹⁾

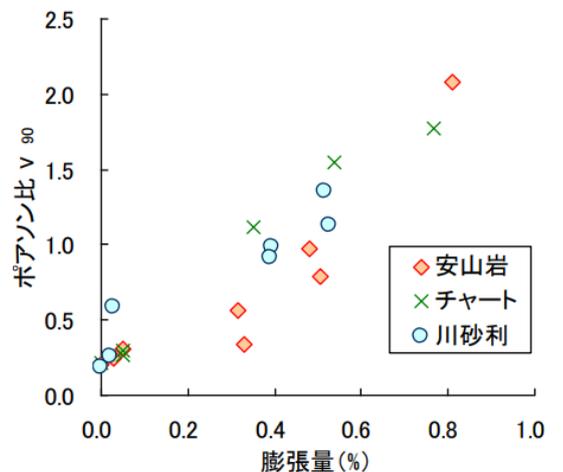


図 2-40 ポアソン比と膨張量の関係(応力 90%)³²⁾

2.4 ALAによる抑制機構の分析方法まとめ

本章では、現在考えられる ALA の抑制効果について整理し、ASR・DEF で一般的に行われている分析方法を挙げた。ALA による抑制機構の分析方法を以下にまとめる。

- ALA の骨材特性

- ③自己養生によるコンクリート微細構造の緻密化

- ④ALA の破砕による膨張圧の早期解放

- ⑤ALA の物理的膨張低減

- 内部性状の観察（顕微鏡観察，X 線 CT）

- 空隙率分布（顕微鏡観察，X 線 CT）

- 骨材強度の取得

- ALA の化学特性

- ①ALA のポゾラン反応性

- ②ALA のアルカリ消費

- 骨材反応性の評価（化学法，SEM-EDS）

- コンクリートの組成分析（SEM-EDS，EPMA，XRD，細孔溶液分析）

- ALA により ASR・DEF を低減した際の劣化度評価

- 圧縮強度・静弾性係数（コンクリートコア強度試験）

- 1) 日本メサライト工業株式会社 HP, <https://www.mitsui-kinzoku.co.jp/group/mesalite/products/index.html>
- 2) 人工軽量骨材協会 HP, <http://www.keiryokotsuzai.com/kotuzai/kotuzai.html>
- 3) 黒岩秀介, 陣内浩, 並木哲, 名和豊春: 人工軽量細骨材による高強度コンクリートの自己収縮低減, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.695, 2014
- 4) F.Bektas, L.Turanli, P.J.M. Monteiro: Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 2005
- 5) 杉山彰徳, 鳥居和之, 酒井賢太, 石川雄康: 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 判定試験法の提案, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, 2007
- 6) Dale P.Bentz: Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars, *Cement & Concrete Composites*, 2009
- 7) Chang Li, Michael D.A. Thomas, Jason H.Ideker: A mechanistic study on mitigation of alkali-silica reaction by fine lightweight aggregates, *Cement and Concrete Research*, Vol.104, pp.13-24, 2018
- 8) 一般財団法人 日本建築総合試験所 HP, https://www.gbrc.or.jp/test_research/materials/analysis/
- 9) 森大介, 中村秀三: 種々の骨材のアルカリ溶液による溶解挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 10) 山田一夫 他: ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014
- 11) 鳥居和之, 山田和夫: コンクリート診断 ASR の的確な診断/抑制対策/岩石学的評価, 森北出版株式会社, 2017
- 12) 津田誠, 澤彩夏, 広野真一, 鳥居和之: 能登産安山岩砕石のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁の分布状況, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, 2014
- 13) 西沢澤, 蟹谷真生, 山戸博晃, 鳥居和之: 能登半島産安山岩砕石の鉱物質混和材による ASR 抑制効果の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012
- 14) 片山哲哉: アルカリシリカ反応入門③アルカリシリカ反応の診断方法, コンクリート工学, Vol.52, No.12, 2014
- 15) 与那嶺一秀, 川端雄一郎, 高野大樹, 小川彰一, 柴田真仁: DEF によるコンクリートの膨張及びひび割れ挙動に関する検討, 「DEF のリスクを考える」に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学会, 2019
- 16) 天明敏行, 尾原祐三, 吉永徹: X 線 CT 法による硬化コンクリートの強度に影響を及ぼす要因の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, 2016
- 17) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三: X 線 CT 法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008
- 18) 武田三弘, 大塚浩司: X 線造影撮影によるコンクリート強度の推定, 土木学会論文集 E, Vol.62, 2006
- 19) 俵積田新也, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴: 3 年間の暴露試験に基づくアルカリ溶脱と ASR 膨張の関係性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020
- 20) 林建佑, 河野克哉, 山田一夫: 能登半島地域の橋脚コンクリートに生じた ASR の岩石・鉱物学的考察, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 5-082, 2008
- 21) H Wang, J.E. Gillott: Mechanism of Alkali-silica Reaction and The Significance of Calcium Hydroxide, *Cement Concrete Research*, Vol.21, 1991
- 22) M.Brouxel: The Alkali-aggregate Reaction Rim: Na₂O, SiO₂, K₂O, and CaO Chemical Distribution, *Cement Concrete Research*, Vol.21, 1991
- 23) 鶴田孝司, 上原元樹, 水野清: 酸溶解による硬化コンクリート中のアルカリ総量測定手法の検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009

-
- 24) 田中泰司, 速水悠仁, 須藤卓哉: 混和材の組み合わせがアルカリシリカ反応抑制効果に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.64, 2010
- 25) R. S. Barneyback, S Diamond : Expression and Analysis of Pore Fluid from Hardened Cement Pastes and Mortars, Cement and Concrete Research, Vol. 11, No. 2, pp. 279-285, 1981
- 26) Rogers et al : Reduction in mortar and concrete expansion with reactive aggregates due to alkali leaching, Cement Concrete and Aggregates, 1993
- 27) Benoit Fournier et al : Evaluation of the available alkali content in concrete through a modified hot-water extraction method,
- 28) Bérubé et al : Measurement of the alkali content of concrete using hot water extraction, Cement Concrete and Aggregates, 2002
- 29) Bérubé et al: Évaluation du potentiel résiduel de réaction et d'expansion du béton en service atteint de réactivité alcalis-silice. Rapport final no.CO-93-04, soumis à Hydro Québec, 151 p.1994
- 30) 小林一輔, 白木亮司, 森弥広: ASR を生じたコンクリートの圧縮強度性状に関する 2, 3 の考察, 土木学会論文集, Vol.14, No.426, 1991
- 31) 久保善司, 上田隆雄, 黒田保, 野村倫一: アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 32) 中田正文, 久保善司: 骨材種類が ASR 劣化コンクリートの力学的性能および変形特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 33) G. Giaccio, R. Zerbino, J.M. Ponce, O.R. Batic : Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research, 2008

第3章 ALAの骨材特性による低減機構

3.1 はじめに

前章で述べたように人工軽量骨材（以下、ALA）によるアルカリ骨材反応（以下、ASR）・エトリングタイトの遅延生成（以下、DEF）抑制効果には様々なことが考えられる。本章では、本研究でALAの骨材特性による膨張抑制機構を検証するために行った実験およびその結果と考察について記す。骨材特性による膨張低減効果は自己養生水によるコンクリートの緻密化、ALAの破碎による膨張圧の早期解放、ALAの強度の低さによる物理的膨張圧の低減効果を考えている。

3.2 ASR膨張・DEF膨張の違い

3.2.1 それぞれの膨張メカニズム

ASR及びDEFは併発することが多く、外観上の劣化が酷似していることからASRとDEFを誤った診断を下されることがある。しかし、実際の膨張過程は異なっており、まったく別の現象である。

ASR、DEFの内部劣化の写真、またそれぞれの膨張のメカニズムを示した概念図を図3-1¹⁾、図3-2²⁾、図3-3、図3-4に示す。また、膨張の原因であるASG及びエトリングタイト結晶のSEM画像を図3-5³⁾、図3-6⁴⁾に示す。ASRはアルカリ、アルカリ反応性骨材（以下、単に反応性骨材）、水分がそろうことで発生するとされており、内部には図3-1に示したような骨材内部・周囲に白色のアルカリシリカゲル（以下、ASG）が見られることが特徴となっている。一方で、DEFは材齢初期の高温養生、過剰な硫酸塩、水分が発生の条件とされており、内部には図3-2のように骨材周囲にギャップと呼ばれる隙間（以下、単にギャップ）、また、そのギャップを埋める繊維状のエトリングタイトが特徴的である。

ASRでは、アルカリと反応性骨材が反応することでASGが生成され、それが吸水膨張することでマクロなコンクリートの膨張につながるとされている。ASGが膨張することで劣化が発生するにはASGの吸水膨張の際に周囲の組織から反力を得る必要がある⁵⁾ため、骨材内部の気孔および骨材の周囲が膨張の起点となっている。

一方で、DEFのメカニズムは完全には解明されていないが、有力とされている⁶⁾ペースト膨張説に基づくと、材齢初期に高温となることでコンクリート内に存在するエトリングタイトが分解される。その後、温度の低下とともにエトリングタイトの溶解度が低下し、セメントペースト全体にミクロなエトリングタイト結晶が生成され、それが吸水膨張することでコンクリートのマクロな膨張につながる。そのため、ASRでは骨材が主な膨張の起点となっていることに対して、DEFはセメントペースト自体が膨張の起点となっており、ASRとDEFは異なる起点で膨張を発生させている。

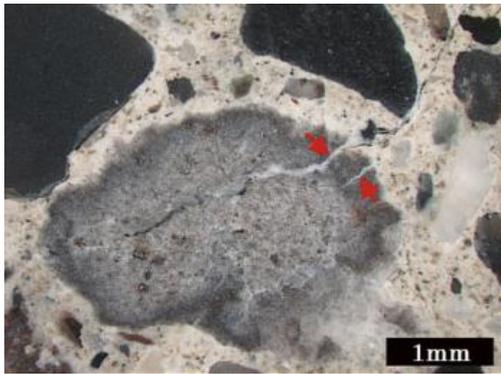


図 3-1 ASRによる内部劣化の様子¹⁾

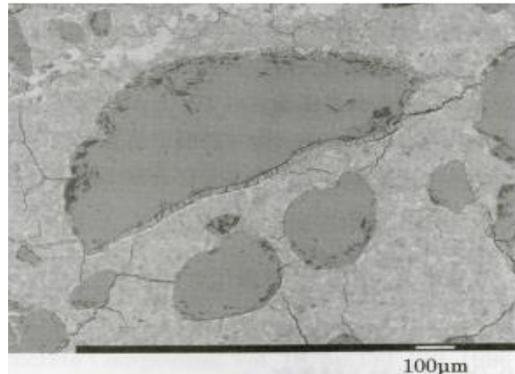


図 3-2 DEFによる内部劣化の様子²⁾

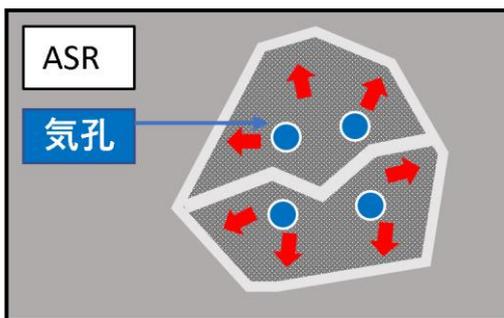


図 3-3 ASR膨張のイメージ

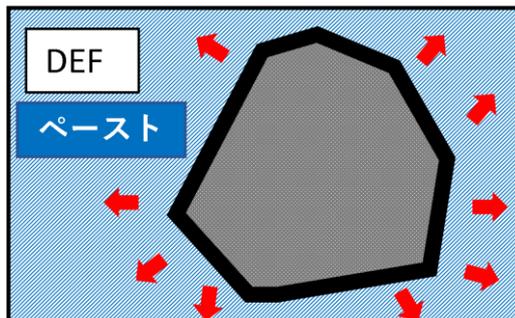


図 3-4 DEF膨張のイメージ

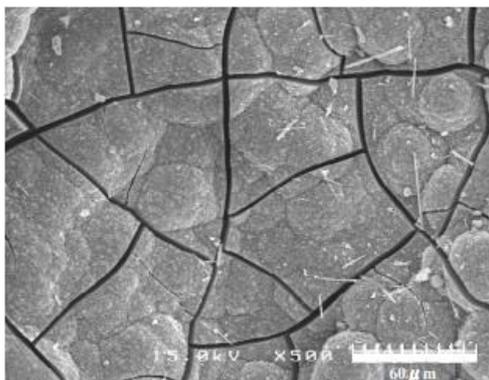


図 3-5 ゼリー状のASG

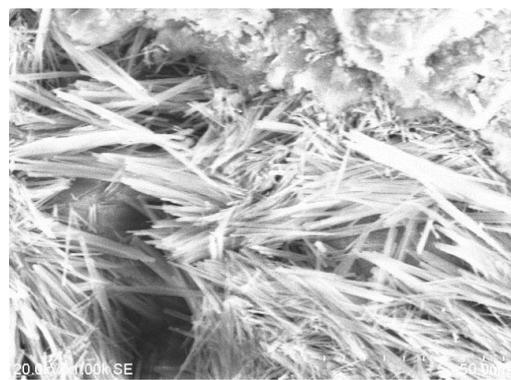


図 3-6 針状のエトリンガイト結晶

3.2.2 骨材による影響（粒径）

ASRは反応性骨材の存在が必要であり、主にASRの反応そのものに関わり、粒径によりペシマムを起こす場合がある。一方で、DEFでは、骨材の存在は反応に直接は影響せず必須ではない。DEFでは、初期の高温養生の際にセメントペーストと骨材の熱膨張係数の違いにより、微細ひび割れが発生することや、骨材の周囲に遷移帯が形成されることで、コンクリートの物質移動抵抗性が低下し、DEF膨張の開始に影響するとされている²⁾。

3.2.3 水分・湿度による影響

ASR・DEF共に水分の存在は必要不可欠であり、水分が増えるほど、膨張量が増大する。ただし、既往の研究では、水中養生環境下ではアルカリの溶出が発生するため、ASRでは終局膨張量が減少するとされている。逆にDEFはアルカリの溶出によりコンクリートのpHが低下するため、DEF膨張の開始が速まるとされている²⁾。

3.2.4 空隙による影響

DEFについて山崎らの研究⁷⁾では、空気量が多いほど水分の浸透量が多く、pHの低下に関連する K^+ の溶出量が多いため、結果的にDEF膨張が早期に発生するとされている。また、空気量の多い試験体では、空隙でエトリングタイトの生成が確認されており、空隙を充填するエトリングタイトは膨張に寄与しないとされているため、最終的な膨張率が小さくなると考察している。山崎らの研究では空気量が1.1%の膨張量が約2.5%なのに対して、空気量が4.0%の場合、約1.5%の膨張量となっている。

3.3 ALAを置換したコンクリートでのASR・DEF低減効果

3.3.1 はじめに

本実験は骨材の一部をALAで置換することでALA量に対するASR・DEF低減効果を検討するために行った。次項ではその実験概要について記す。

3.3.2 実験概要 (ASR)

本実験はALA量によってASR・DEFをどれだけ抑制できるのかを検討するために行う。まずはASRの試験体について説明を行う。そのため、本実験での調合は反応性骨材率をペシマム混合率で固定し、非反応性骨材の一部をALAで置換し、その置換率を変更することでALAによるASR低減効果量の検討を行った。本実験で使用したコンクリートの調合を表3-1、表3-2に示す。

反応性骨材は既往の研究⁸⁾でペシマム混合率が30%とされている急速膨張性の安山岩と同産地のものを使用し、非反応性骨材は広島県黒瀬産の石英斑岩砕石を使用した。ALAには日本メサライト工業株式会社の膨張頁岩製のもの⁹⁾を用いた。ALAの写真を図3-7⁹⁾、図3-8⁹⁾に示す。ALAは粗骨材(AG)と細骨材(AS)の2種類を使用している。ALA試験体の概要を、に示す。本実験ではAG、ASの効果量を比べるため、AGシリーズでは非反応性骨材の5%、10%、20%、50%をALAで置換した。ASシリーズでは、AGシリーズの各置換率のALAの体積と同体積としている。そのため、「AG-○」などAGシリーズでは、○は非反応性粗骨材中での体積割合を示しているが、ASシリーズの場合、体積割合ではなく、例えば「AS-50」なら「AG-50」と同体積のALAが調合に含まれていることに注意してほしい。

この試験体では、ASRを促進するため、水酸化ナトリウム試薬を用いてアルカリ総量が5.5kg/m³となるように調整を行った。ただし、骨材からのアルカリの溶出は考慮していない。セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

表 3-1 AG シリーズ調合

	単位量(kg/m ³)						混和剤	
	W	C	細骨材s		粗骨材G		減水剤 C×%	AE調整剤 C×%
			非反応性	反応性	非反応性	ALA		
AG-5	160	320	805	309	670.7	22.3	1.8	0.1
AG-10					635.4	44.6		
AG-20					564.8	89.3		
AG-50					353	223.3		

表 3-2 AS シリーズ量合

	単位量(kg/m ³)						混和剤	
	W	C	細骨材s		粗骨材G		減水剤 C×%	AE調整剤 C×%
			非反応性	ALA	反応性	非反応性		
AS-5	160	320	770.5	24.2	309	706	1.8	0.1
AS-10			736	48.4				
AS-20			667	96.8				
AS-50			460	242				



図 3-7 ALA 粗骨材 (AG) ⁹⁾



図 3-8 ALA 細骨材 (AS) ⁹⁾

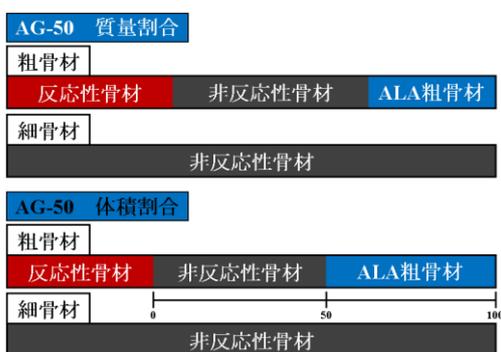


図 3-9 ALA 試験体調合概要 (AG)



図 3-10 ALA 試験体調合概要 (AS)

以上の調合で、φ100*200mmの円柱試験体を作成し、打設後28日間は20℃恒温室内で封緘養生を行った。封緘養生終了後はASRを促進させるため、1mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液を浸漬させたウエスを試験体に巻き付け、アルカリラッピングを施した。また、アルカリラッピングの乾燥を防ぐため、ウエスを巻き付けた後さらにラップを施し、アルミ袋にいった。その後、60℃恒温槽内に設置した。試験体の様子を図3-11、図3-12、図3-13に示す。



図 3-11 アルカリラッピングの図



図 3-12 アルカリラッピング+アルミ袋



図 3-13 60°C恒温槽での養生

3.3.3 実験概要 (DEF)

DEFにおいても同様にDEFに対するALAの効果を検討するため、調合の一部をASRに用いたものと同じALAで置換している。また、ASRとの効果を比較するため、ASRとほぼ同量のALAを置換しており、若干量は異なるが「DG-5」等は「AG-5」等とほぼ同じALA量を示している。DEF試験体の調合を表3-3に示す。DEF試験体ではDEFを促進するためにSO₃換算でセメント量の2%の硫酸カリウムを添加した。セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。以上の調合でφ100*200mmの円柱試験体を作成した。

既往の研究¹⁰⁾¹¹⁾では、約4時間の前養生、6~12時間で膨張量が大きくなるとされていた。そのため、打設後4時間は20℃恒温室に設置し、その後図3-14に示したように最高温度の90℃が約12時間継続するように恒温槽を用いて温度履歴を与えた。高温養生終了後は材齢28日まで20℃恒温室で封緘養生を行った。なお、高温養生による水分の蒸発を防ぐため、円柱試験体を打設した後、打設面をアルミテープにより塞いだ。

28日間の封緘養生終了後は20℃恒温室で水中養生を行った。

表 3-3 DEF 試験体調合

	単位量(kg/m ³)						混和剤	
	W	C	細骨材 s		粗骨材 G		減水剤 C×%	AE調整剤 C×%
			非反応性	ALA	非反応性	ALA		
DG-5	160	320	847	/	1021.9	23.4	1.8	0.1
DG-10					984.9	46.9		
DG-20					910.7	93.8		
DG-50					688.35	234.5		
DG-100					317.7	468.9		
DS-50			484.8	254.1	1059.0	/		
DS-100			122.5	508.2				
ALA-0			847					

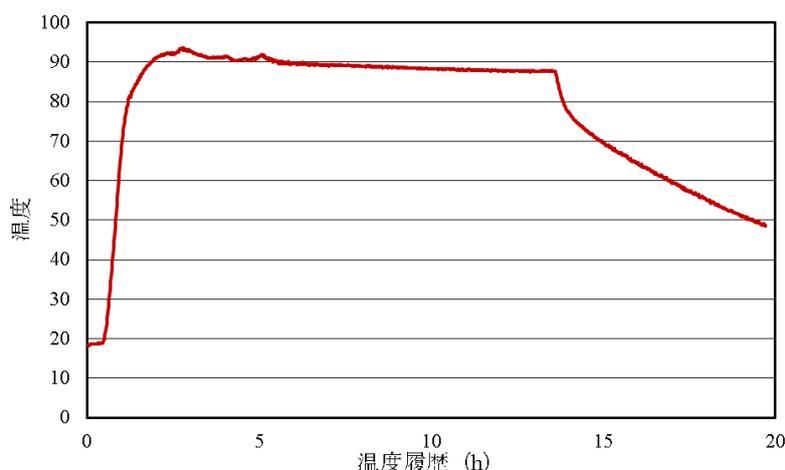


図 3-14 恒温槽内温度変化

3.3.4 質量・膨張量測定

本実験では、前項で述べた $\phi 100*200\text{mm}$ の円柱試験体にステンレス製のバンド（基調100mm）を取り付け、コンタクトゲージ法によりコンクリートの膨張量を計測した。試験体の写真及び概要図、計測の様子を図3-15、図3-16、図3-18、図3-17、図3-19に示す。コンタクトゲージによる測定は人為的なバラつきが大きくなる可能性があるため、3人で測定を行い、その平均値を測定値とした。

前述したようにASR促進のため試験体は 60°C 恒温槽内に設置されている。熱膨張による影響を取り除くため、測定前日に 60°C 恒温槽から取り出し、 20°C 恒温室に移動させ、 20°C に到達した後に測定を行った。また、質量はアルカリラッピングを取り外し、表面に付着した結晶と水分をふき取った後測定した。膨張量と水分を測定した後は再び同様のアルカリラッピングを行い、 60°C 恒温槽に設置した。

DEF試験体は水中養生を行っているため、水槽から出して表面水をふき取ったのち計測を行った。



図 3-15 コンタクトゲージ試験体写真

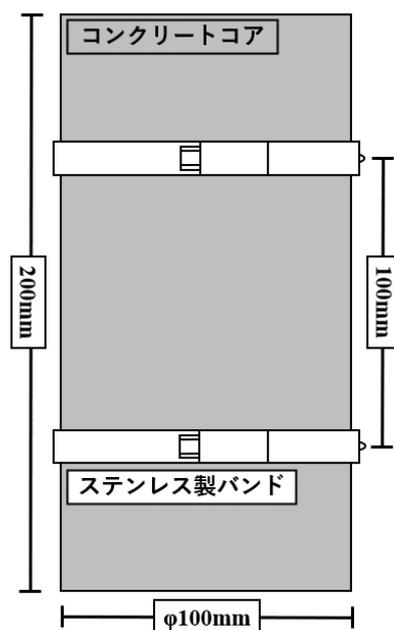


図 3-16 コンタクトゲージ試験体概要図



図 3-18 膨張量計測の様子



図 3-17 コンタクトゲージの写真



図 3-19 質量測定の様子

3.3.5 強度試験結果

本実験では、ASR及びDEF劣化後の強度性状を確認するため、圧縮試験を行った。圧縮試験より得られた結果を表3-4、表3-5、図3-20、図3-21に示す。なお、表3-4、表3-5に示した各試験体の初期強度は試験体数の関係から2体平均となっている。表3-4、表3-5より、圧縮強度はASシリーズの方が小さく、若干ではあるもののASシリーズではALA量が増えるほど圧縮強度が下がる傾向が見られた。静弾性係数についてはAG・ASともにALA量が増加するほど下がる結果となった。これについては既往の研究¹²⁾でも確認されており、材齢28日時点ではALAの強度が小さいためALAが少ないほど静弾性係数、圧縮強度ともに大きくなることが確認されている。

図3-20より圧縮強度は膨張に伴い微減の傾向が見られるものの、本試験の膨張率の範囲では初期強度を下回るものは少なく、ALAの置換率が大きいものは基本的に初期強度より大きい結果となった。既往の研究¹³⁾では、ASRによる圧縮強度への影響は小さいことが確認されており、ALA率の大きいものはASRを低減していることに加えて、ALAによる自己養生効果があったためであると考えられる。

一方で、図3-21に示した静弾性係数はいずれの試験体も膨張が0.1%ほどで約60%まで著しく減少し、以降はほぼ一定であった。ALAを混和することで完全に膨張を抑制したAS-50では、静弾性係数の低下を抑制する結果となった。静弾性係数の低下が膨張率0.1%以降ほぼ低下しなかった原因としては以下の仮説が考えられる。

小林ら¹⁴⁾によると、ASRは反応の進行に伴い、コンクリート中の非晶質部分（主としてASG）が増加するが、0.2%程度の膨張量の時点でこの非晶質の増加が終了し、並行してひび割れ等をゲルが埋めるとされている。本研究でも、同様の現象が行った結果、静弾性係数の低下幅が停滞したことが考えられる。

表 3-4 AG シリーズ初期強度

	AG-5	AG-10	AG-20	AG-50
圧縮強度 (N/mm ²)	30.5	31.0	32.9	30.3
静弾性係数	34.7	33.0	33.2	29.1

表 3-5 AS シリーズ初期強度

	AS-5	AS-10	AS-20	AS-50
圧縮強度 (N/mm ²)	27.6	29.4	27.2	24.8
静弾性係数	32.4	32.4	31.1	30.6

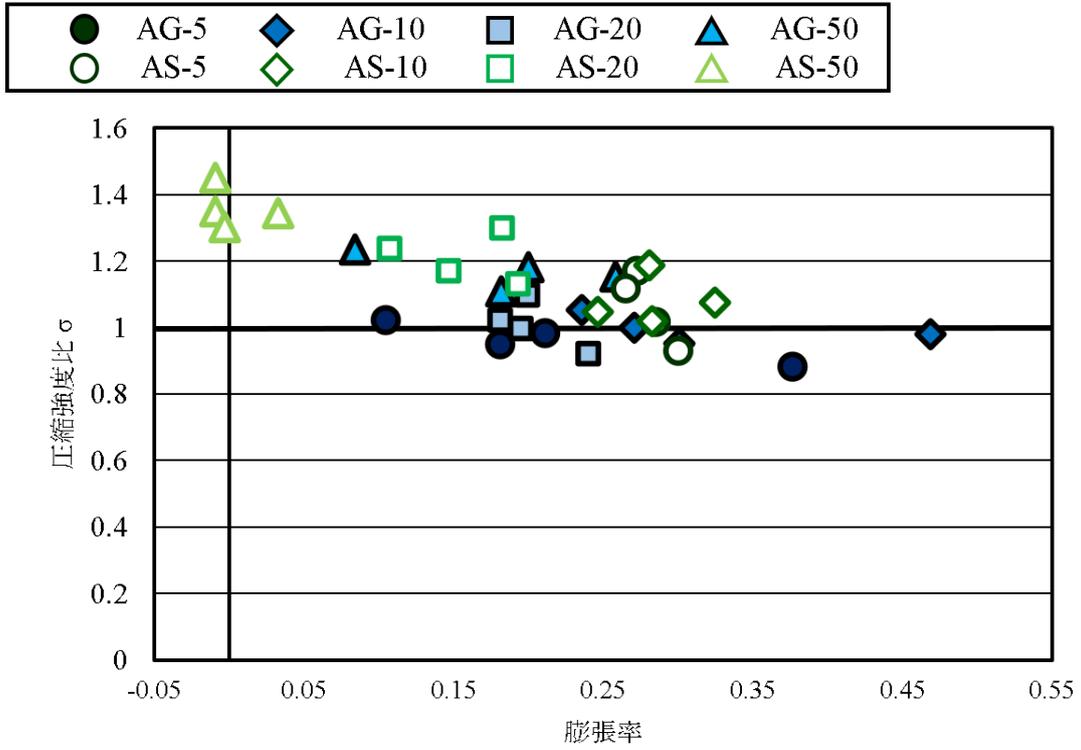


図 3-20 ASR 圧縮強度比

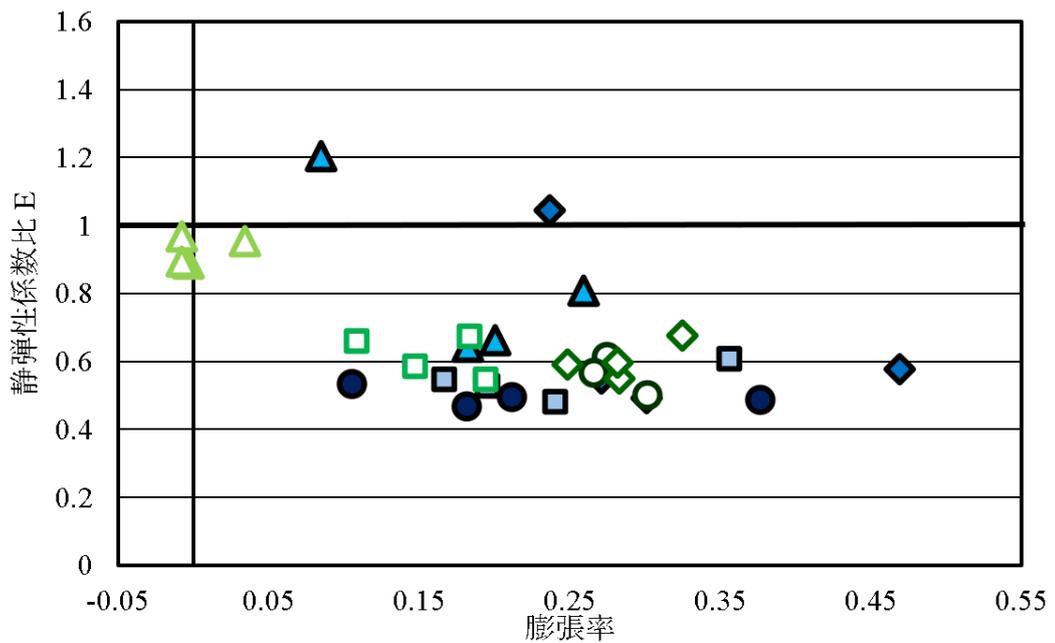


図 3-21 ASR 静弾性係数比

続いてDEFの圧縮試験の結果を表3-6、表3-7、図3-22、図3-23示す。

表3-6、表3-7より、圧縮強度についてDG-20が最も大きく、DG-20を境にALA率が少なく、もしくは大きくなるほど低下する傾向が見られた。また、ALAを同体積置換しているものではDSシリーズのほうが低いことがわかる。

まずDG-20を境に強度が低下していくことについては一種のペシマムのような現象が起きている可能性が考えられる。既往の研究¹⁵⁾では、ALAは通常の骨材に比べて強度が小さいため、ALAが多いほど強度は低下するが、DG-20まではALAの自己養生による強度発現が上回ったものと思われる。本研究では、骨材そのものの強度を取得していないためはっきりとは言えないが、DSシリーズのほうが低いことについては表3-4、表3-5のASRの試験体と同様の傾向が見られていることから単純にALA粗骨材(AG・DG)よりもALA細骨材(AS・DS)の方が骨材の強度が低い可能性が考えられる。一方で、静弾性係数も概ね圧縮強度と同様の傾向が見られるものの若干ALA率による差は小さい結果となった。

図3-22、図3-23より、いずれの試験体でも傾向はほぼ変わらず、圧縮強度は膨張に伴いASRと同様に比較的緩やかに低下しているのに対して、静弾性係数は膨張に伴い著しく減少していることがわかる。一方で、DEFではASRのような膨張率0.1%程度で急激に静弾性係数が減少した後、微減する傾向は見られなかった。

表3-6 DEF試験体初期強度(ALA-0~DG-20)

	ALA-0	DG-5	DG-10	DG-20
圧縮強度(N/mm ²)	33.8	30.1	34.9	36.8
静弾性係数	33.3	32.7	34.5	34.1

表3-7 DEF試験体初期強度(DG-50~DS-100)

	DG-50	DG-100	DS-50	DS-100
圧縮強度(N/mm ²)	32.6	29.7	30.0	26.7
静弾性係数	29.2	28.7	28.6	28.1

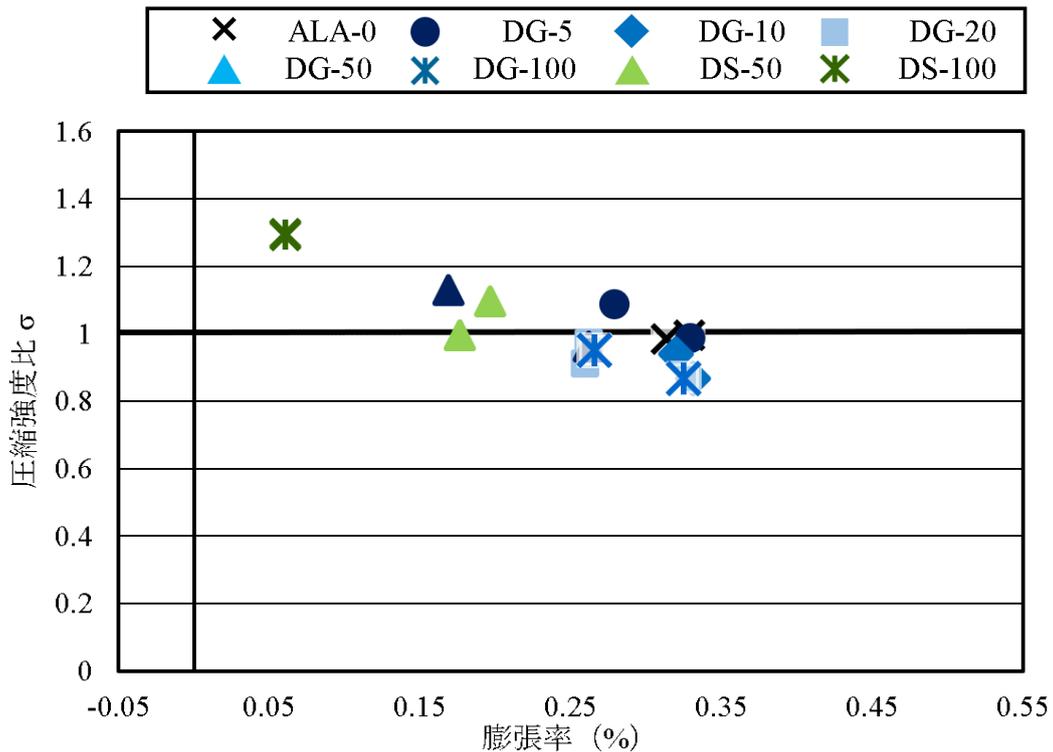


図 3-22 DEF 圧縮強度比

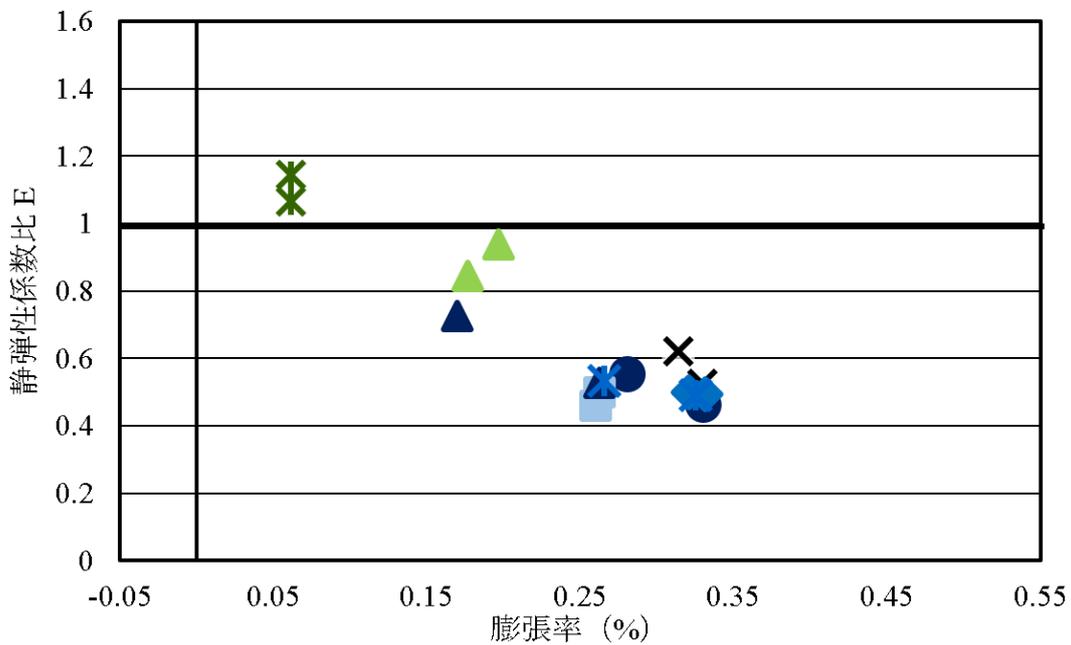


図 3-23 DEF 静弾性係数比

3.3.6 質量測定結果及び考察

前述した質量測定で得られた ASR の質量変化の結果を図 3-24, 図 3-25 に示す。なお, 24 週まではコンタクトゲージを付けている 3 体の試験体の平均値を測定値としているが, 26 週以降は圧縮試験に伴い, 試験体数が減少したため 2 体の平均値を測定値としている。

図 3-24, 図 3-25 より, いずれの試験体でも促進 2 週目まで急激に質量が増加した後, 少し減少し, 24 週まではほぼ一定となる結果となった。同様の傾向は既往の研究¹⁶⁾でも確認されており, 急激な増加については試験体内で ASG が生成・吸水膨張しているためだと考えられる。また, その後の質量減少は ASR 膨張により発生したひび割れから, 生成初期の流動性が高い ASG が試験体外部に流出したためだと考えられる。

図 3-24 で AG-20, AG-50 に着目すると 24 週までの傾向は他のものと異なり, 質量減少が長く続く結果となった。この原因については ALA の性質が関係しているものと思われる。ALA は通常の骨材より内部水を多く持っており, ASG が生成・吸水膨張により水分が奪われ, ひび割れから流出した場合質量減少の割合が大きいことに加えて, AG-20, AG-50 は ALA が試験体内に多く存在し, ASG が流出しやすい試験体外部に多く存在したことが原因であると考えられる。AS シリーズでは ALA 率が大きい場合でも顕著な質量低下が見られなかった。これについては AG の吸水率が 29%であるのに対して, AS の吸水率は 16%でありやや小さいこと, また AS は膨張量が小さく, ASG が流出するためのひび割れが少なかったことが考えられる。

図 3-24, 図 3-25 で 26 週から 39 週にかけて大きく質量減少しているが, これはアルミ袋に穴が開いており, 試験体が乾燥したためである。

図 3-24 で 39 週から 43 週にかけて AG-5 で急激な質量増加があるが, 後述する膨張量測定の結果でも AG-5 で同時期に膨張量の増加が見られているため, それまで反応できていなかった反応性骨材がアルカリと反応し, ASR・ASR 膨張が発生したものと思われる。

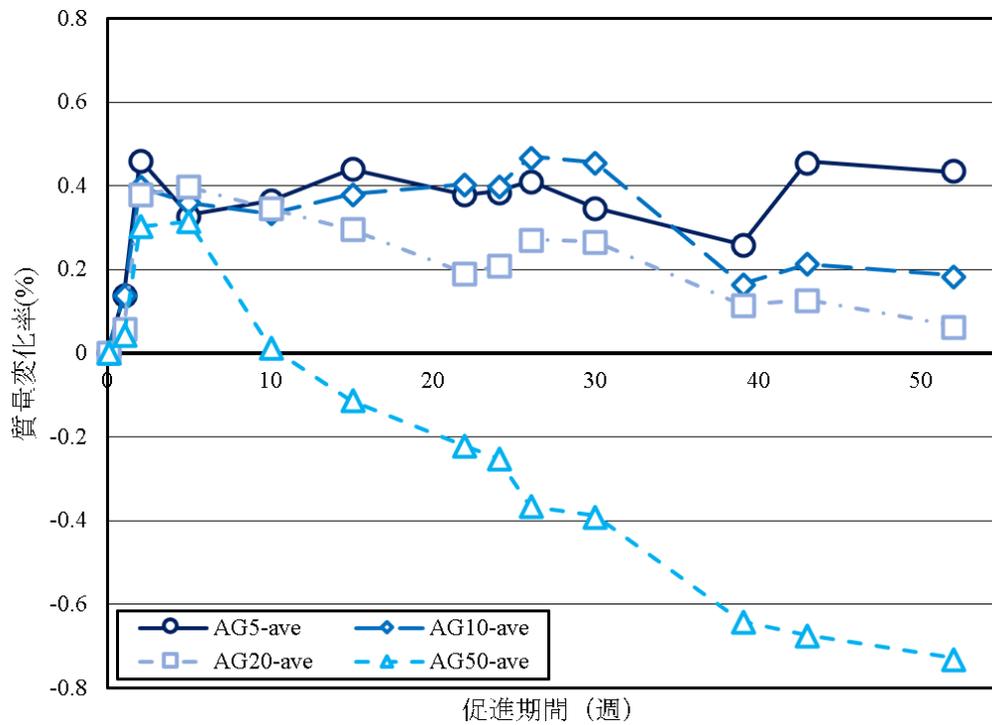


図 3-24 ASR 質量経時変化 (AG シリーズ)

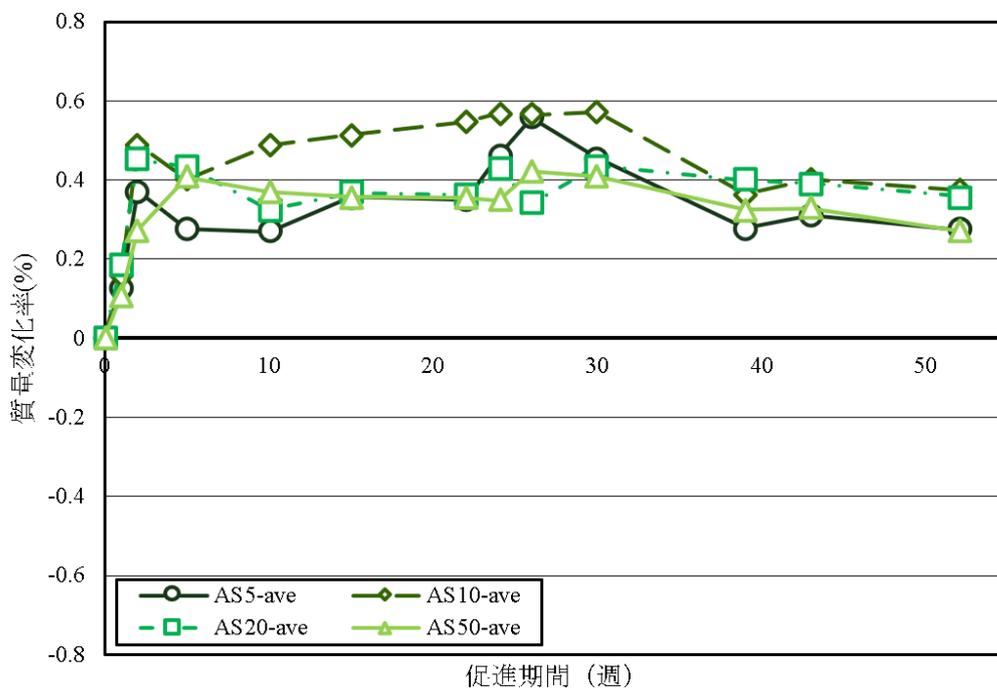


図 3-25 ASR 質量経時変化 (AS シリーズ)

質量および膨張量の関係を図 3-26, DEF 試験体より得られた質量の経時変化を図 3-27, 図 3-28 に示す。DEF についても圧縮試験により試験体数が減少したため, 図 3-27 に示した試験体は 23 週以降, 図 3-28 に示した試験体は 27 週以降 2 体平均となっている。

図 3-27, 図 3-28 より, いずれの試験体でも徐々に質量が増加する傾向にあり, DG シリーズでは, ALA 率が大きくなるほど質量の増加が大きくなる傾向にある結果となった。一方で, AS シリーズでは ALA 率が大きいほど質量増加が小さい結果となった。

既往の研究¹⁷⁾で水中養生を行っているコンクリートでは空気量が大きいほうが質量増加が大きいことが確認されており, 空気量の大きい試験体では単に水分の浸透量が多くなったためだと考察されている。このことから図 3-26 より, 質量変化率と膨張量に高い相関がみられていることエトリングaitの生成に加えて, DEF 膨張により発生したひび割れに水分が浸透した影響が考えられる。

図 3-26 より, 膨張量が 8000 μ 当たりの部分に注目すると AG-20, AG-50, AG-100 については同程度の膨張量にも係わらず, ALA 率が大きいほど質量変化が大きい結果となった。同様に AS-50, AS-100 を比較すると, ALA 率が大きいものでは膨張量に対して質量変化の割合が大きい傾向がうかがえる。これについてははっきりとしたことはわからないが, ALA の吸水率が大きいことが影響しているものと思われる。本実験では通常の骨材, ALA ともに水分を含んだ状態で混和しているが初日の高温養生, その後の封緘養生の 28 日間で骨材内部の水分が放出され水和に用いられていた場合, コンクリート内部の水分は少なく, 骨材そのものが乾燥していた可能性が考えられる。そのため, 長期間の水中養生により骨材内部にまで水分が浸透し, 吸水率が大きい ALA が多く存在したもののほど質量増加が大きいことが考えられる。

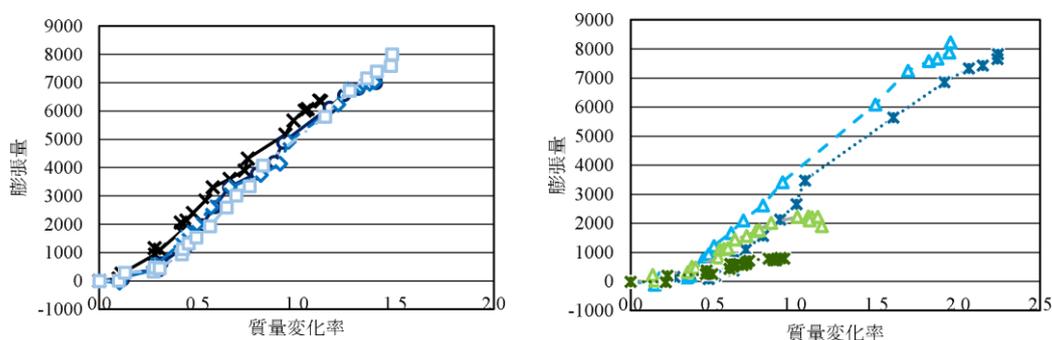


図 3-26 DEF 質量変化率—膨張量の関係

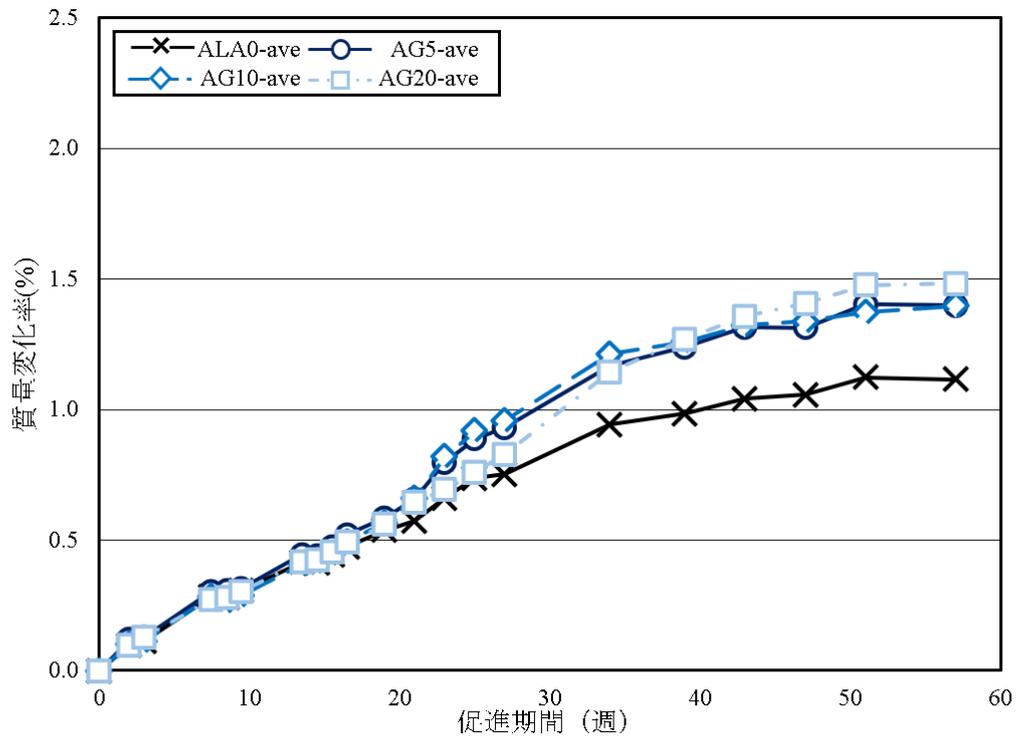


図 3-27 DEF 質量経時変化 (ALA 置換率 : 低)

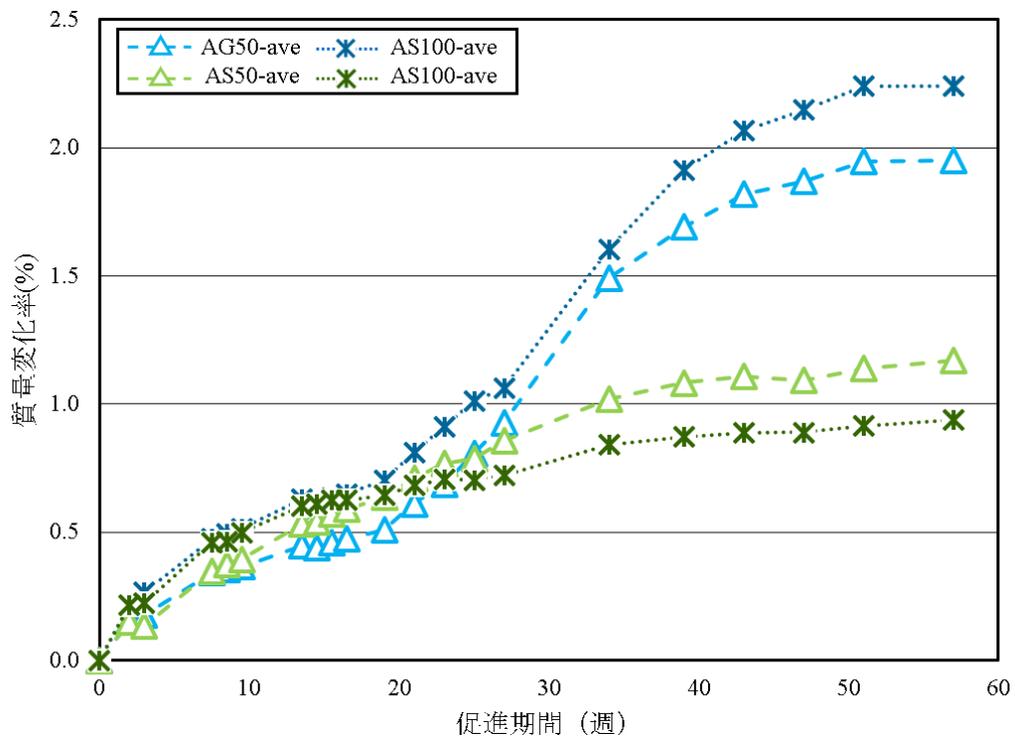


図 3-28 DEF 質量経時変化 (ALA 置換率 : 高)

3.3.7 膨張量測定結果及び考察

ASR について膨張量の比較のため、渡部らの研究¹⁸⁾で得られた膨張量を図 3-29¹⁸⁾に示す。また、本研究で膨張量測定により得られた結果を図 3-30, 図 3-31 示す。なお、図 3-29 に示した「CS-○%」等の○は粗骨材全体での反応性骨材率（本研究と同産地の急速膨張性安山岩）を示しており、例えば CS-30%は反応性骨材が 30%,非反応性骨材が 70%であり、ALA-30%では、反応性骨材 30%, ALA 粗骨材（本研究とは別種の膨張頁岩製のアサノライト）が 70%であることを示している。図 3-30, 図 3-31 では膨張量計測でも同様に 26 週以降は圧縮試験により試験体数が減少したため、2 体の平均値を測定値としている。

図 3-29 では、CS-30%が本研究の調合において ALA 率が 0%と同義のものであるが、ALA が存在しない場合、約 0.5%の膨張が確認されている。一方、図 3-30, 図 3-31 より本実験では最大の膨張量でも 3500 μ 程度であり、ALA を少なくとも 5%置換することで ASR を抑制していることがわかる。

AS-50を除いて、いずれの試験体でも促進開始から 22 週にかけて膨張量が増加していき、それ以降ほぼ一定となる結果となっている。図 3-31 の AS シリーズを見ると、ALA の置換率が大きいほど膨張を抑制していることがわかる。また、本実験の範囲内では、AS を非反応性骨材中の約 50%置換することでほぼ完全に ASR を抑制できる結果となった。

一方で、図 3-30 の AG シリーズでは必ずしも ALA 率が大きいほど膨張を抑制する結果とはならなかった。また、AS-50 と同じ骨材量を置換している AG-50 は AS-50 ほど顕著な ASR 抑制効果は見られず、AS-20 と同程度であった。図 3-29 より、渡部らの研究ではペシマム混合率を取った調合の非反応性粗骨材をすべて ALA 粗骨材で置換した試験体（図中 ALA-30%）は、ALA の種類が異なるものの本研究の AG-100 とほぼ同義であるが、非反応性骨材を完全に ALA と置換することで完全に ASR を抑制する結果となっており、AG・AS では量による ASR 抑制効果が大きく異なっていることがわかる。

ALA の骨材特性から AG・AS での膨張低減効果について考えると、自己養生によるコンクリートの緻密化、ALA の破砕による膨張圧の早期解放、ALA の物理的膨張圧の低減いずれの影響も考えられる。AG・AS の膨張低減効果の違いについては、AG・AS の大きな違いとして比表面積の大きさがある。比表面積が大きい AS シリーズのほうがコンクリート中の様々なところに存在しており、これらの膨張低減効果を発揮しやすかった可能性が考えられる。

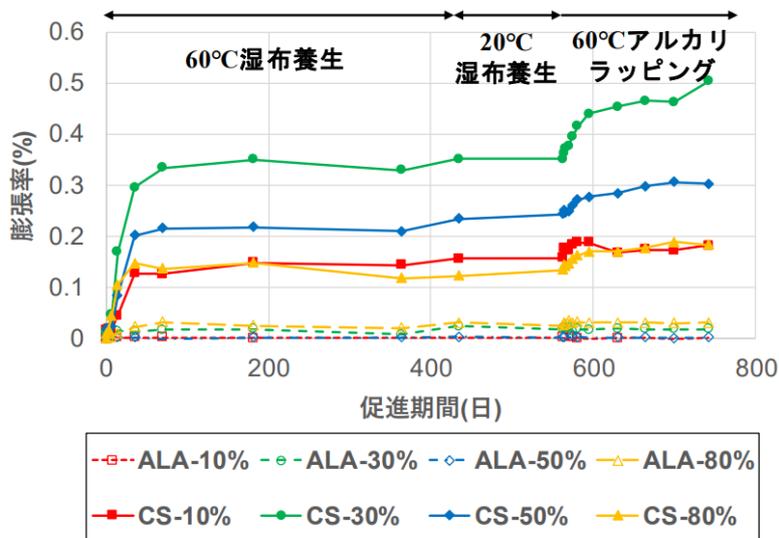


図 3-29 渡辺らの研究で得られた膨張量¹⁸⁾

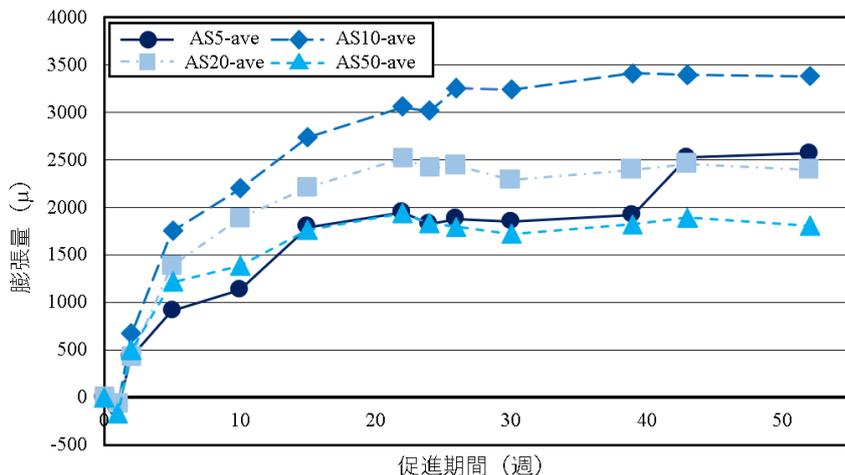


図 3-30 ASR 膨張量計測結果 (AG シリーズ)

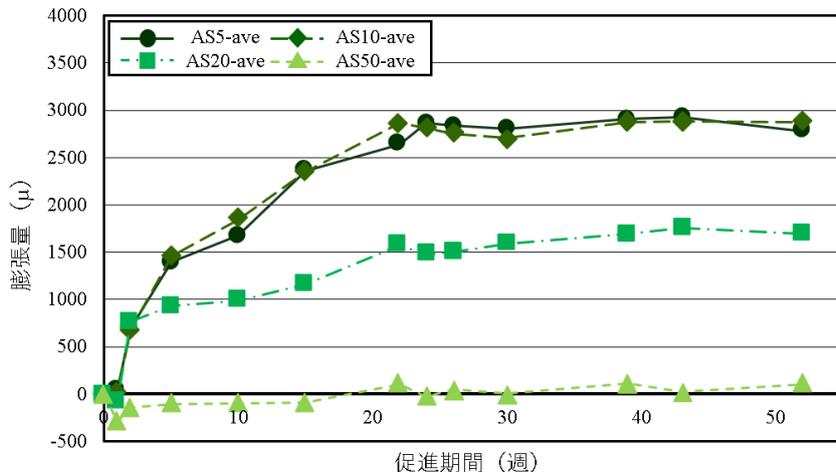


図 3-31 ASR 膨張量計測結果 (AS シリーズ)

DEF試験体の膨張量の経時変化を図 3-32, 図 3-33, 図 3-34 に示す。図 3-32 より, ALA粗骨材を用いた試験体では DEF 膨張を全く低減しておらず, むしろ ALA 率が大きいほど若干膨張を増長している傾向が見られた。また, ALA-0 は促進期間初期からほぼ一定の割合で膨張しているが, ALA 率が大きいほど膨張の開始が遅れる傾向が見られた。

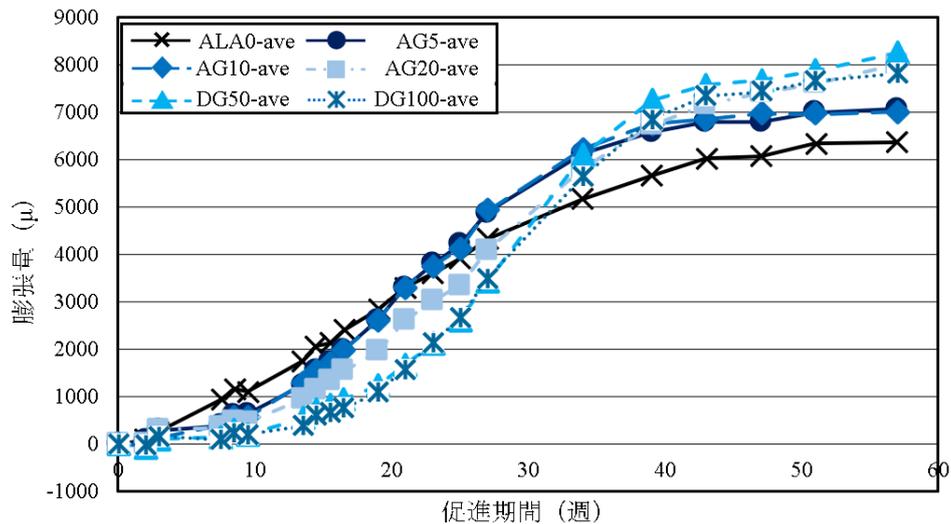


図 3-32 DEF 膨張量計測結果 (ALA-0~DG-100)

ALA 率と DEF 発生の遅れの関係について, コンクリート中の水分量が関係している可能性がある。既往の研究¹⁷⁾では, コンクリート内の空隙量が多さに伴い, 水分浸透量が多い, つまりコンクリート中の水分が多い場合, K^+ が溶出しやすいため, 細孔溶液の pH の低下が早く, 早期に DEF が発生したと考察している。ALA は自ら水分を放出してコンクリートの強度に影響を与えるほどの水分を持っているが, 逆に言えば ALA が水分を持っておらず, 周囲に吸収可能な水分が存在すれば, 多くの水分を奪う可能性が考えられる。実際に, 質量測定の結果からも ALA 率が大きいほど質量変化が大きいことが確認されている。そのため, コンクリート中の細孔に供給され K^+ の溶出を促すはずであった水分が, ALA に吸水されることで DEF 膨張の発生が遅れたものと思われる。

図 3-34 より, ALA 粗骨材を用いた DG シリーズでは DEF 膨張を悪化させているのに対して, ALA 細骨材を用いた DS シリーズでは大きく DEF 膨張を抑制する結果となった。

ASR の膨張低減機構は ALA の骨材特性を考えると, コンクリートの緻密化, 膨張圧の早期解放, 物理的膨張圧低減いずれの可能性もあるとし, AG・AS は比表面積によるコンクリート内での配置で効果の大きさに差が出たとした。しかし, DEF では, ALA 粗骨材では効果は見られず, 悪化させてる一方で, ALA 細骨材では顕著な膨張低減効果が見られた。

次節では, 前述した ALA の骨材特性による膨張低減効果について本実験での可能性を X 線 CT 撮影の結果から検討を行う。

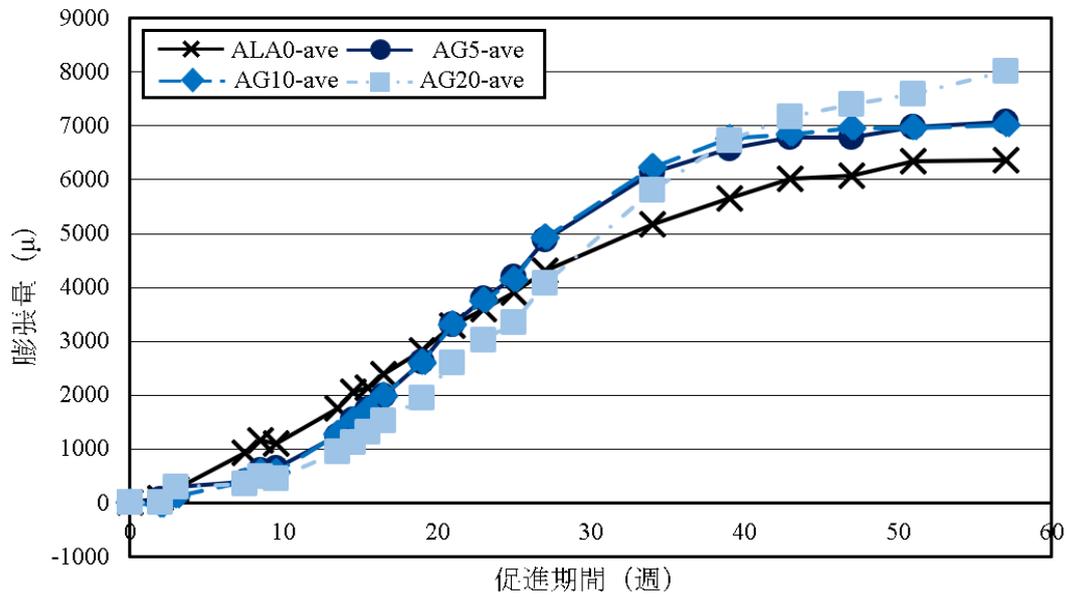


図 3-33 DEF 膨張量計測結果 (ALA 置換率：低)

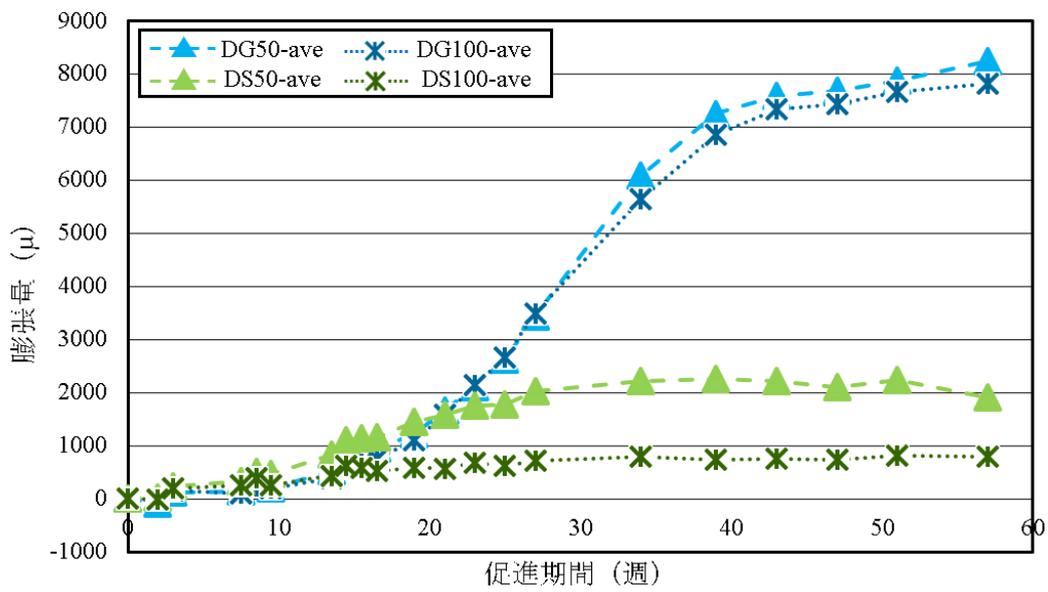


図 3-34 DEF 膨張量計測結果 (ALA 置換率：高)

3.4 X線CT撮影による内部性状の把握

3.4.1 はじめに

3.3節では、ALAを置換したコンクリートにASR・DEFが発生した際の膨張量について考察を行った。X線CT撮影は3.3節で示したAG・ASシリーズ各2体の試験体に対して52週の時点で行った。なお、DEFは現在でも膨張が進行していたためX線CTによる撮影は行わなかった。

3.4.2 X線CTによる内部観察

ASRによるX線CT撮影により得られたCT画像の例を図3-36、図3-37に示す。なお、図3-36、図3-37では、赤枠：ひび割れ、青枠：ALA粗骨材、緑枠：ALA細骨材をそれぞれ例として示しており、画像の右側が打設面である。また、本実験で取得したX線CT画像の分解能は0.1123mm/pixelであった。

本研究では、ALAの破碎による膨張圧の早期解放をASR・DEF抑制機構の一つとして想定していたが、本実験の写真では、既往の研究¹⁹⁾で見られた図3-35のようなALAを貫通するひび割れは観察されなかった。そのため、本実験以上の解像度ではより微細なひび割れが見られる可能性があるが、本実験で使用したAG・AS試験体での膨張抑制効果はALAの破碎による膨張圧の早期解放は可能性が低いと思われる。

X線CT写真で見られた特徴的な情報として、空隙の大きさがある。ASシリーズではあまり見られなかったが、AGシリーズのALA置換率が大きいものでは図3-36の白枠に見られる粗大な空隙が多くみられる傾向にあった。試験体打設時にALA粗骨材の浮きが見られたことから、ALA粗骨材では量が多いほど施工不良が発生しやすかった可能性が考えられる。

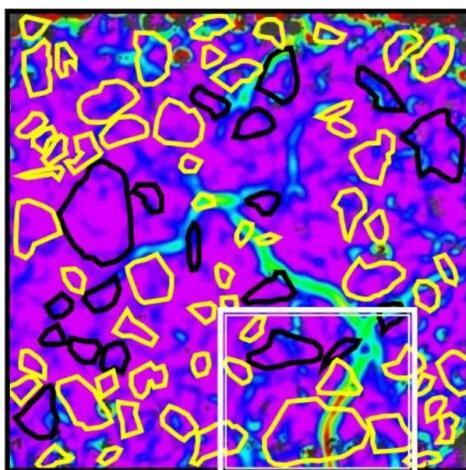


図 3-35 ASRによるひび割れがALAを貫通する様子¹⁹⁾

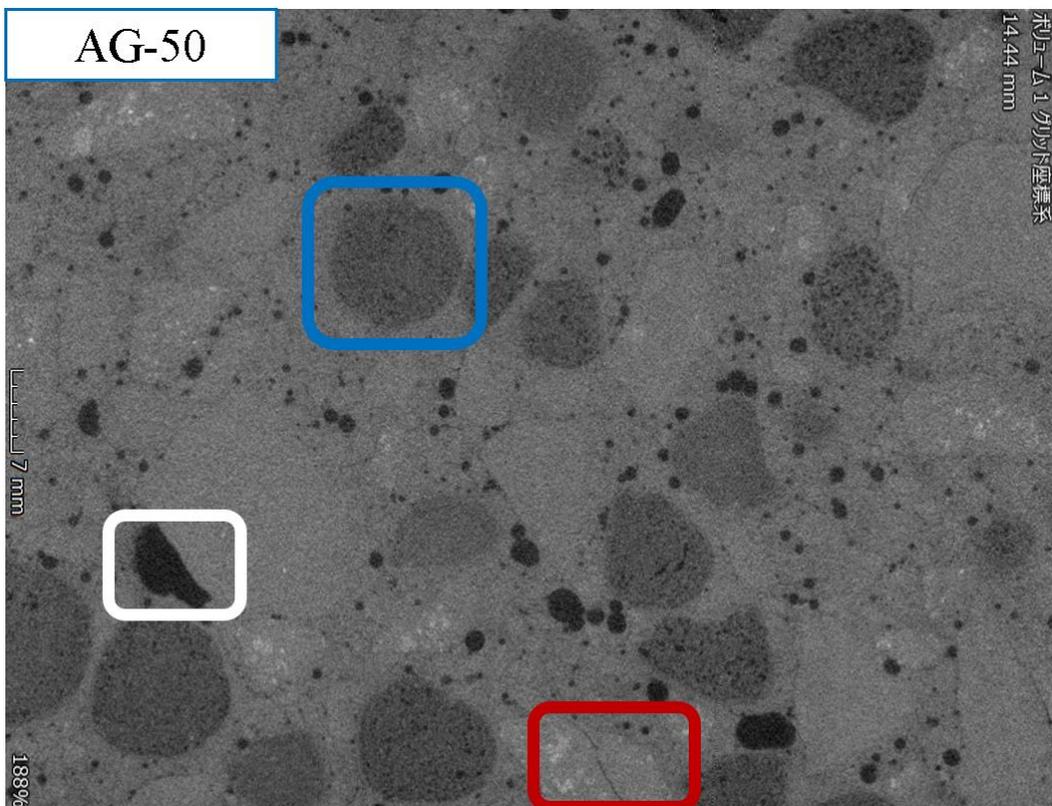
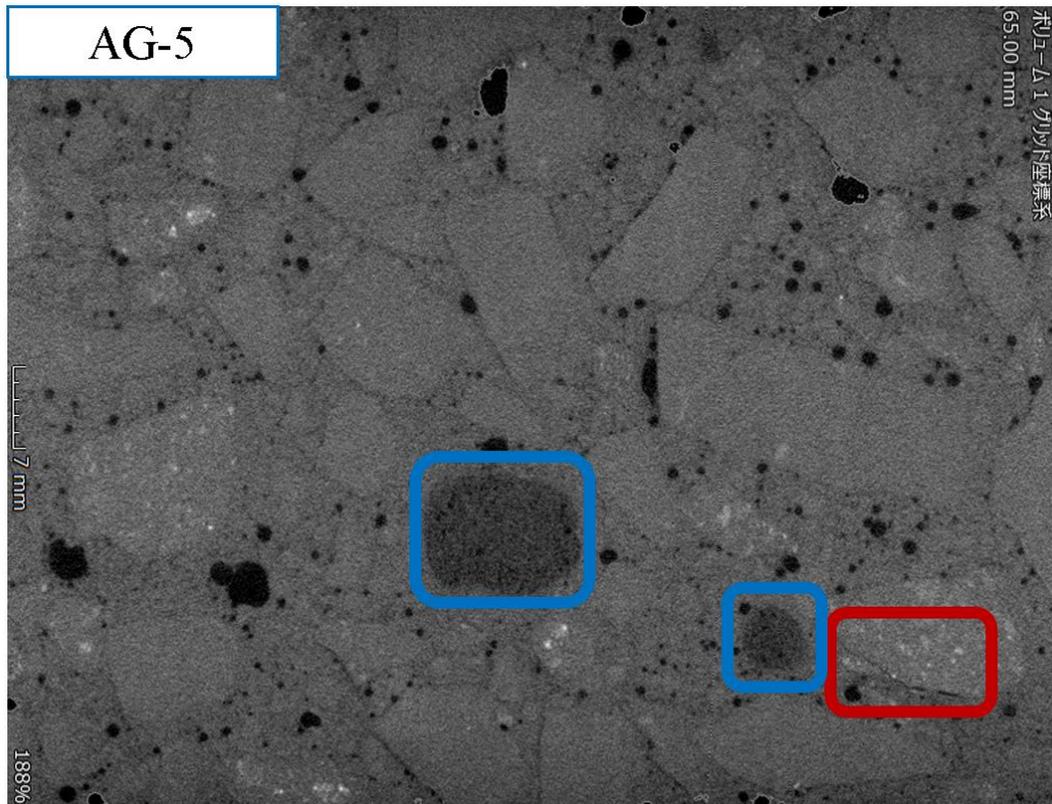


図 3-36 AS シリーズ CT 画像例 (上 : AG-5 下 : AG-50 画像右側 : 打設面)

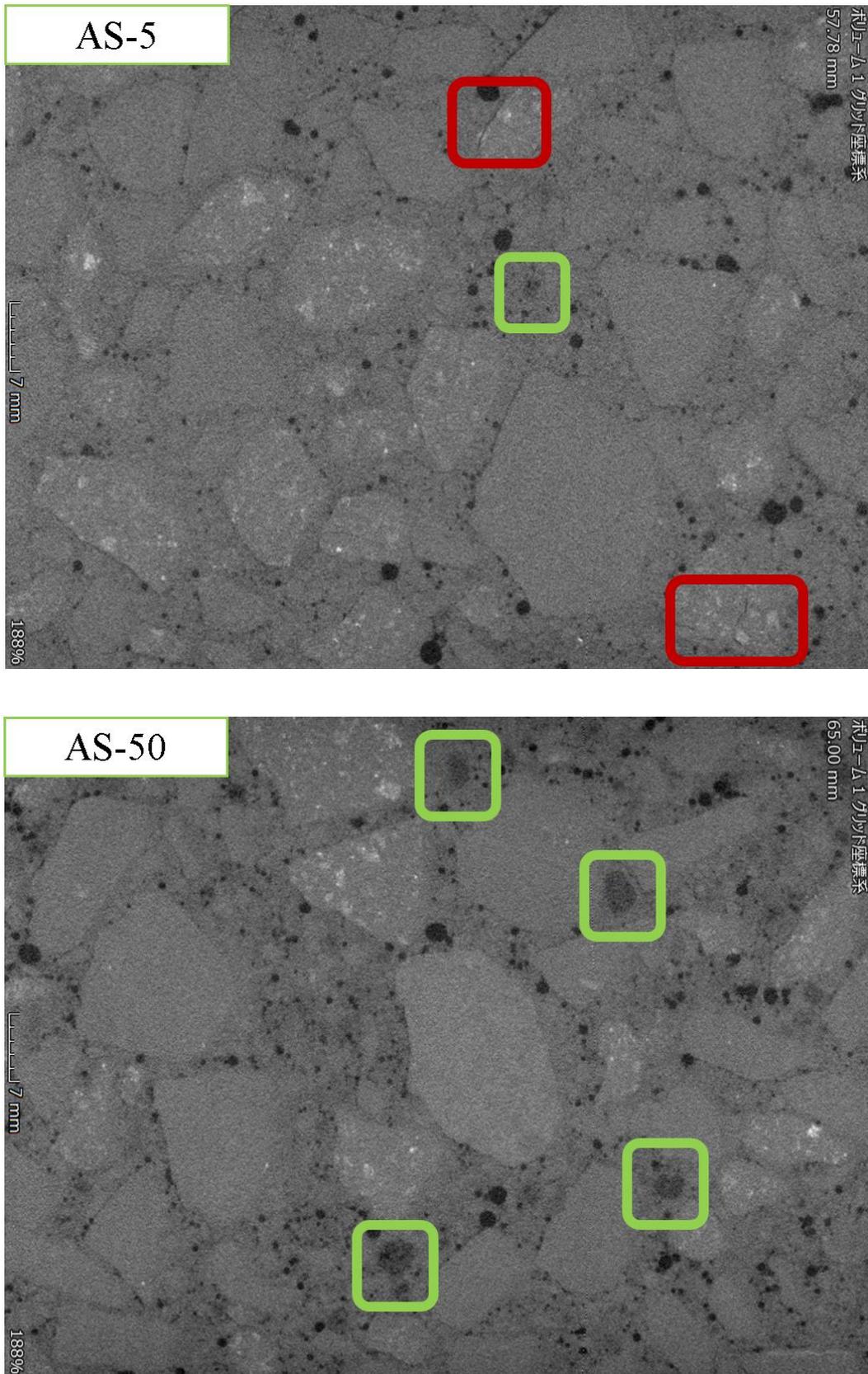


図 3-37 AS シリーズ CT 画像例 (上 : AS-5 下 : AS-50 画像右側 : 打設面)

3.4.3 X線CTによる空隙率分布について

X線CT撮影により得られた空隙径分布を図3-38, 図3-39, ALAの断面写真を図3-40, 図3-41に示す。なお, 本実験のX線CTの分解能は0.1123mm/pixelであり, 空隙は最小で直径0.28mmのものまで検出可能であった。

図3-38よりAGシリーズでは, ALA率が大きいものでは空隙量が多いに対して, 図3-39に示したASシリーズでは, ALA率が大きいほどの空隙量が少ない結果となった。まず, AGに見られた結果は図3-40のようにALA粗骨材の断面に直径0.5mm前後の空隙がいくつか見られていることからX線CT撮影の際にALA粗骨材内部の空隙を検出した可能性が考えられる。一方で1mm以上の空隙に関しては前項のX線CT写真からAGシリーズではALA率が大きいほど, 粗大な空隙が多い傾向が見られており, ALA粗骨材を用いた試験体ではALAを多く用いた場合, 施工不良が発生する可能性が考えられる。

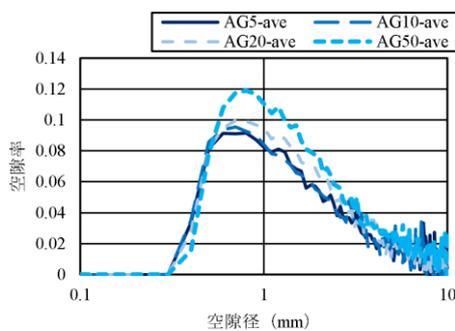


図 3-38 AG シリーズ空隙径分布

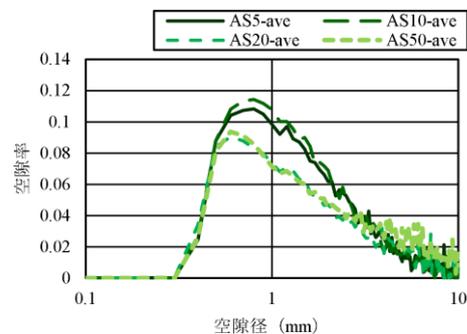


図 3-39 AS シリーズ空隙径分布

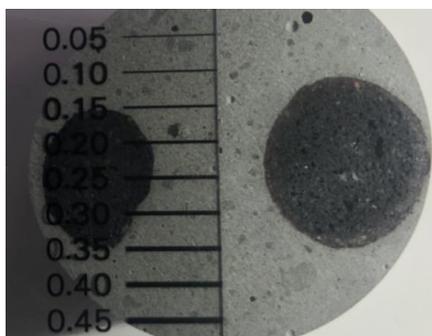


図 3-40 ALA 粗骨材断面

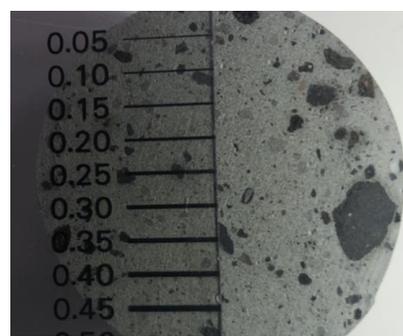


図 3-41 ALA 細骨材断面

図3-41からはALA細骨材の断面には明確な空隙は認められず, ALA細骨材の空隙が図3-39の結果に影響している可能性は低い。図3-38, 図3-39より, ALAの持つ吸水率に着目すると, ALA細骨材が16%に対してALA粗骨材は29%と倍ほどの水分を有している。このことから, AGシリーズではALA量が少ない場合, 適度な水分による自己養生によりコンクリートの緻密化が行われたが, ALA粗骨材が増えるにつれ, 骨材内部に含む空隙と過剰な水分により, ブリーディングが発生し, 空隙量が増加した。一方で, ALA細骨材では, ALA細骨材に含まれる水分が比較的少なく, ブリーディングが発生せず, 自己養生によりコンクリートの緻密化が行われたことが考えられる。

DEFによる膨張量の変化(図3-34)を再度示す。図3-38, 図3-39から先ほど考察したように, AGシリーズでは過剰な水分によりあまり微細な空隙は存在せず, ASシリーズでは自己養生によりコンクリートの緻密化が行われているとすると, 図3-34に示したDG・DSでの膨張量の差は微細な空隙によるものであることが考えられる。

ALAの骨材特性を考えるとコンクリート中の空隙が微細化した理由として, 自己養生によるものが挙げられる。申らの研究²⁰⁾では, W/Cが53%の普通コンクリートに対して細骨材を体積割合で膨張頁岩製のALA細骨材(吸水率:15%)に25%, 50%置換して検討を行っており, 普通コンクリートに比べて, 若干ブリーディング量が多いことが確認されている。また, 物質移動特性の指標の一つである透気係数はシート養生の場合, 普通コンクリートに比べて良好な結果が出ている一方で, 給水養生の場合普通コンクリートに比べALAが多いほど若干悪化している。ただし, いずれの結果も置換率25%, 50%で大きな差は見られていないことからALAによる自己養生効果はどこかの値で頭打ちになる可能性がある。

以上のことから自己養生効果はALA粗骨材・ALA細骨材ともに持つ特性であるが, ALA粗骨材は吸水率が29%と大きく, X線CTの結果から施工不良が考えられたため, DGシリーズではALAによる自己養生はむしろ悪化を招いている可能性が大きい。一方で, DSシリーズでは直径0.28mm以下の微細な空隙は確認できていないものの自己養生によるコンクリートの緻密化の可能性が見られた。しかし, 既往の研究では給水養生では普通コンクリートに比べて物質移動抵抗性が悪くなっている可能性が見られること, 本研究ではAGシリーズでは明確にASR抑制効果が見られたことに対してDGシリーズではDEF抑制効果が見られなかったことから, 本研究でのASR・DEF膨張の差について, ALAの自己養生効果によるコンクリート細孔構造の緻密化だけでは説明できない結果となった。

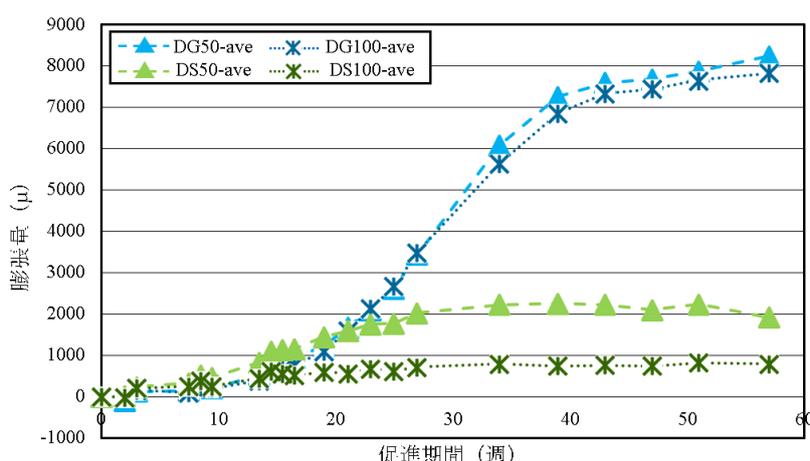


図 3-34 DEF 膨張量測定結果 (ALA 置換率: 高)

3.5 3章のまとめ

3章では、ALAの骨材特性からASR・DEFに対する抑制効果の検討を行った。ALAを置換したコンクリートにASR・DEFが発生した際の膨張量の計測を行ったところ、下記の結果が得られた。

①ALAを置換したコンクリートにASRが発生した際、ALA粗骨材・ALA細骨材いずれのALAを用いた場合、でもASRを大きく低減する結果が見られた。一方で、ALA粗骨材に比べてALA細骨材のASR抑制効果は大きく、本実験の条件では、ALAを非反応性骨材中の50%を置換することでASRを完全に抑制する結果となった。

②ALAを置換したコンクリートにDEFが発生した際、ALA細骨材を用いていた場合、ALAの置換率が大きいほどDEF膨張を抑制する傾向が見られた。一方で、ALA粗骨材を用いた場合、ALA粗骨材を全く用いなかった試験体よりも膨張量が増加する傾向が見られ、また、ALAの置換率が大きいほどDEF膨張の開始を遅らせる傾向が見られた。

③X線CT画像の観察では、ALAを明確に貫通したひび割れは見られなかった。そのため、本実験ではALAの破砕による膨張圧の早期解放の可能性は低いことが考えられた。

④X線CT撮影により直径0.28mmまでの空隙率分布を取得したところ、AGシリーズではALA率に比例して空隙量が増加し、ASシリーズでは逆に減少する結果となった。このことから、DEF試験体でDSシリーズのみ膨張低減が見られた原因について微細な空隙の存在が考えられた。

⑤X線CT撮影の結果から、ALA粗骨材が多いものでは施工不良が発生しやすい可能性が見られた。また、このことからDGシリーズで見られたALA率が大きいほど膨張量が大きくなったことについては施工不良によるものであると考えられた。

⑥微細な空隙が多くなる理由について、ALAの骨材特性を考えると、適度な内部水を持つDSシリーズでは自己養生による緻密化の可能性が考えられた。ただし、既往の研究ではALA細骨材による自己養生効果はある程度で頭打ちになっており、給水養生ではむしろALAが多いと普通コンクリートに比べて物質移動抵抗性が悪化していることから、ASR・DEF抑制機構はALAの自己養生効果によるコンクリート細孔構造の緻密化だけでは説明がつかない結果となった。

3章では上記の結果が得られたが、AG・AS、DG・DSでの膨張挙動の違いについてALAの骨材特性だけでは説明がつかず、解決できていない。そのため、4章では、ALAの化学反応特性からASR・DEFの低減機構について検討を行った。

-
- 1) 株式会社太平洋コンサルタントHP, <https://www.taiheiyo-c.co.jp/cement/asr/>
 - 2) エトリングタイトの遅延生成(DEF)に関する研究委員会:「DEFのリスクを考える」に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学会, 2019
 - 3) 千田崇男, 橘久生, 佐藤根彰:コンクリートのアルカリ骨材反応(ASR)判定について, 全地連「技術e-フォーラム2006名古屋」, 2006
 - 4) 藤兼雅和, 中原浩慈, 仲村哲男:エトリングタイトの遅延生成(DEF)によるコンクリート製品の劣化に関する報告, 土木技術資料, 2009
 - 5) 片山哲哉:アルカリシリカ反応入門 ③アルカリシリカ反応の診断方法, コンクリート工学, Vol.52, No.12, 2014
 - 6) 川端雄一郎, 松下博通:高温蒸気養生を行ったコンクリートにおけるDEF膨張に関する検討, 土木学会論文集E2, Vol.67, No.4, 2011
 - 7) 山崎由紀, 鶴田孝司, 上原元樹:エトリングタイトの遅延生成(DEF)膨張に及ぼすコンクリート中の空気量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019
 - 8) 上野貴行, 川端雄一郎, 山田一夫, 佐川康貴:アルカリ反応性を有する急速膨張性骨材のペシマム混合率の経時的变化に関する研究, 「性能規定に基づくASR制御型設計・維持管理シナリオ」に関するシンポジウム論文集, pp.231-238, 2017
 - 9) 日本メサライト工業株式会社HP, https://www.mitsui-kinzoku.co.jp/group/mesalite/products/products01_1.html
 - 10) C.Famy: Expansion og Heat-Cured Mortars, Ph.D.Thesis, University of London, 1999
 - 11) 吉田夏樹:エトリングタイトの遅延生成(DEF)によるコンクリートの劣化現象, 日本建築総合試験所(GBRC), Vol.46, No.1, 2021
 - 12) 伊達重之, 室賀陽一郎, 長谷川聖史:軽量コンクリートの力学的特性と耐久性に及ぼす骨材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
 - 13) 川島恭志, 幸左賢二, 松本茂, 三浦正嗣:構造物の調査に基づいたASR劣化度の定量評価, 土木学会論文集E2, Vol.67, No.1, 2011
 - 14) 小林一輔, 白木亮司, 森弥広:ASRを生じたコンクリートの圧縮強度性状に関する2, 3の考察, 土木学会論文集, No.426, Vol.14, 1991
 - 15) 黒岩秀介, 陣内浩, 並木哲, 名和豊春:人工軽量骨材による高強度コンクリートの自己収縮低減, 大成建設技術センター報, Vol.46, 2013
 - 16) 大澤紀久, 五十嵐豪, 山田一夫, 西脇智哉:アルカリシリカ反応によるアルカリシリカゲルが膨張圧を発生する機構に関する基礎研究, Cement Science and Concrete Technology, Vol.71, pp.272-279, 2018
 - 17) 山崎由紀, 上原元樹, 鶴田孝司:空気量の異なるモルタル・コンクリートにおけるDEF(エトリングタイトの遅延生成)による膨張挙動, 第62回粘土科学討論会講演要旨集,
 - 18) 渡部雅貴, 大久保孝昭:ASR診断の高度化に向けた研究, 広島大学大学院, 2020
 - 19) Atsushi Teramoto, Masaki Watanabe, Ryota Murakami, Takaaki Ohkubo: Visualization of internal crack growth due to alkali-silica reaction using digital image correration, Construction and Building Materials, Vol.190, 2018
 - 20) 申相澈, 小山智幸, 小山田英弘, 肥後康秀:人工軽量骨材の自己養生効果による暑中コンクリート工事の物性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017

一方で、DEFは材齢初期の高温養生により、コンクリートに含まれるエトリンガイトが溶解、コンクリートが硬化したのち、エトリンガイトの溶解度が下がり、再度生成することで発生するとされている。具体的なメカニズムを有力とされているペースト膨張説に基づき、既往の研究³⁾⁶⁾を参考に以下に示す。

①コンクリートの硬化過程で60～70℃以上の高温履歴を受けるとセメントの水和初期にセメント鉱物のC₃A（アルミン酸三カルシウム）とCaSO₄・2H₂O（二水石膏）の反応により生成するエトリンガイトが分解する。

②分解したエトリンガイトはアルミン酸イオン、硫酸イオンなどを放出し、放出されたイオンは内部C-S-Hに収着される。なお、エトリンガイトだったものはモノサルフェートとしてもともとエトリンガイトがいた場所に存在するとされている。

③コンクリート硬化後、冷却、pHの低下等により内部C-S-Hから硫酸イオンが細孔溶液に放出され、再度反応してエトリンガイトを形成することでセメント部が膨張する。DEFでは骨材は膨張しないため、骨材とペーストに隙間が形成するとされている。

4.2節ではこの発生メカニズムに及ぼす諸要因について述べる。

4.2.2 骨材による影響（反応性）

ASRでは既往の研究⁴⁾で斜方輝石安山岩が骨材の反応に十分なアルカリが存在する場合、粒形が小さいもので作成した試験体ほど膨張率が大きいことが確認されている。これは粒形が小さいほど同一体積での比表面積が大きくなり、反応率が増大し、生成されるASG量が増加したためだと考察されている。

DEFではASRと併発することが多いため、ASR・アルカリ反応性骨材と共存した際の影響について研究が行われている。山崎らの研究⁵⁾では、硫酸カリウムを添加し、反応性骨材を用いたモルタルの膨張挙動を検討している。ASRが生じたコンクリートでは、ASRが生じていないものに比べて、最終的な膨張量は小さくなるものの、コンクリート中の硫酸塩がより少なく、水分供給が少ない環境下でもDEF膨張が生じる可能性があるとして述べられている。理由として、反応性骨材によるASGの生成により細孔溶液中のpHが低下し、エトリンガイトが析出しやすくなるためだとしている。

4.2.3 アルカリによる影響

ASR はアルカリ金属と骨材に含まれるシリカ鉱物の反応により発生するため、そもそもアルカリが存在しなければ、ASR は発生しない。既往の研究⁴⁾では、反応性細骨材を用いてASR 発生させた際、いずれの粒径においてもアルカリ濃度が大きくなるほど膨張率が増加していることが確認されている。これはアルカリ濃度が大きいほどASR が促進されるためだと考察されている。

一方でDEF では必要不可欠ではないが、アルカリがDEF の発生に関わるとされている。既往の研究⁶⁾では、アルカリ濃度が大きいほど、高温になった際のエトリングタイトの安定息が狭まるとされており、アルカリ濃度はエトリングタイトの溶解を促進するものと認識されている。

4.2.4 硫酸塩による影響

DEF では、発生条件に過剰な硫酸塩があり、硫酸塩の存在は必須の要素である。羽原らの研究⁷⁾では、硫酸カリウムの添加量を変化させた場合の膨張挙動の違いについて検討している。そこでは添加量が増えるほど膨張の開始時期が遅れるものの、最終的な膨張量は大きくなることを確認されている。

一方で、既往の報告⁸⁾ではASR において硫酸塩は抑制要因となるとされている。硫酸塩が可用性の場合、

4.2.5 温度による影響

ASR ではアルカリと反応性骨材の反応を促進させるため、温度が大きい場合にはASR を促進するとされている。

一方で、DEF ではDEF の原因であるエトリングタイトの溶解度に関わるため、重要な要素となっている。DEF では、初期材齢では約70°Cを超えると大きくエトリングタイトの溶解に影響を及ぼし、温度が大きいほど、また、その時間が長いほど最終的なDEF 膨張が大きくなるとされている⁹⁾。

4.3 化学法・骨材反応性試験

4.3.1 はじめに

ALAによるASR・DEF抑制機構としてアルカリ消費のことを考慮すると、骨材の反応性について検討を行う必要がある。本研究では、骨材のアルカリシリカ反応性試験として一般的に行われている化学法と森大介らの研究⁹⁾を参考にした骨材反応性試験を行った。

4.3.2 化学法（JIS A 1145）概要

本実験はJIS A 1145に従い、反応性骨材およびALA粗骨材、ALA細骨材の試験を行った。化学法では、軽量骨材は粉碎により反応性が大きく変わるため、適用外とされているが本研究では通常の化学法通り行っている。

筆者が実際に行った化学法の試験の様子を図4-2、図4-3、図4-4、図4-5に示す。化学法は骨材を粉碎した後150 μ m~300 μ mに調整する。その後、その骨材25gと1mol/L・水酸化ナトリウム水溶液50mlを図4-2に示した金属製の容器にいれ、図4-3のように80 $^{\circ}$ C恒温水槽で24時間水中養生を行う。24時間養生を行った後は吸引ろ過を行った後、ろ過後の溶液5mlを100mLに希釈し、シリカ溶出量（Sc）は原子吸光光度法（図4-4）、アルカリ濃度（Rc）は中和滴定により取得した。



図 4-2 化学法反応容器



図 4-3 80 $^{\circ}$ C恒温水槽での水中養生



図 4-4 原子吸光光度計



図 4-5 中和滴定の様子

4.3.3 森大介らを参考にした骨材反応性試験

ALA粗骨材とALA細骨材の骨材の反応性を検討するうえで骨材粒形の差は重要である。しかし、従来の化学法は骨材の粉砕を行い、粒径を調整しているため比表面積による反応性の違いを考慮できない。そのため、本研究では、森大介らの研究⁹⁾を参考にした骨材反応性試験を行った。試験を実際に行った様子を図4-6、図4-7、図4-8に示す。

本実験では、骨材の反応性を比較するためふるい分け試験により、骨材の粒径を-0.3mm (AS)、2.5mm-5.0mm (AS)、10-15mm (AG)の3種類に分類した。また、温度依存性を確認するために養生温度を20℃、60℃、80℃の3種類とした。

ポリプロピレン製の容器に1mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液400mLを入れ、各粒径の骨材100gを浸漬させた。その後、各溶液を20℃恒温室、60℃・80℃恒温槽にて養生を行った。溶液は一定期間ごとに定量ピペットにより10mLずつ分取を行った。その後、分取した溶液は吸引ろ過を行い、化学法と同様にろ過後の溶液5mLを100mLに希釈し、Scは原子吸光度法、Rcは中和滴定により測定した。なお、試験体数は同一条件につき2体とした。



図 4-6 ふるいによる調整後の骨材

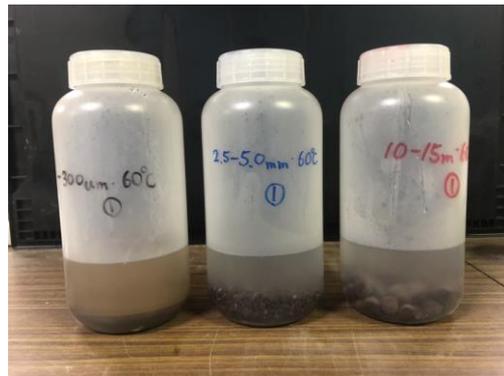


図 4-7 骨材浸漬の様子



図 4-8 吸引ろ過の様子

4.3.4 化学法・骨材反応性試験結果および考察

化学法および骨材反応性試験を行った24時間時点での結果を図4-9に示す。なお、図中の赤破線は $Sc/Rc=1$ となるラインを示している。

まず化学法の結果に着目すると、反応性骨材の結果（図中、化学法_RA）は Rc に比べて Sc が非常に大きく、「無害でない」結果となっている。AG・ASについては本来化学法適用外であるが、本実験では反応性骨材に比べて Sc 量が少ないものの「無害でない」結果となった。

骨材反応性試験の結果に着目すると、骨材粒形が小さい・養生温度が大きいほど $Sc \cdot Rc$ の値が大きい傾向が見られる。一方で化学法の条件に最も近いAS_-300・80°Cでも、化学法より $Rc \cdot Sc$ ともに小さい結果となった。この原因について既往の研究¹⁰⁾では、ALA外殻とALA内部に生成されるASGの組成が異なっていることが確認されている。化学法では粉砕しているのに対して骨材反応性試験では粉砕をしておらず、粉砕による反応性の違いに関連しているものと思われる。

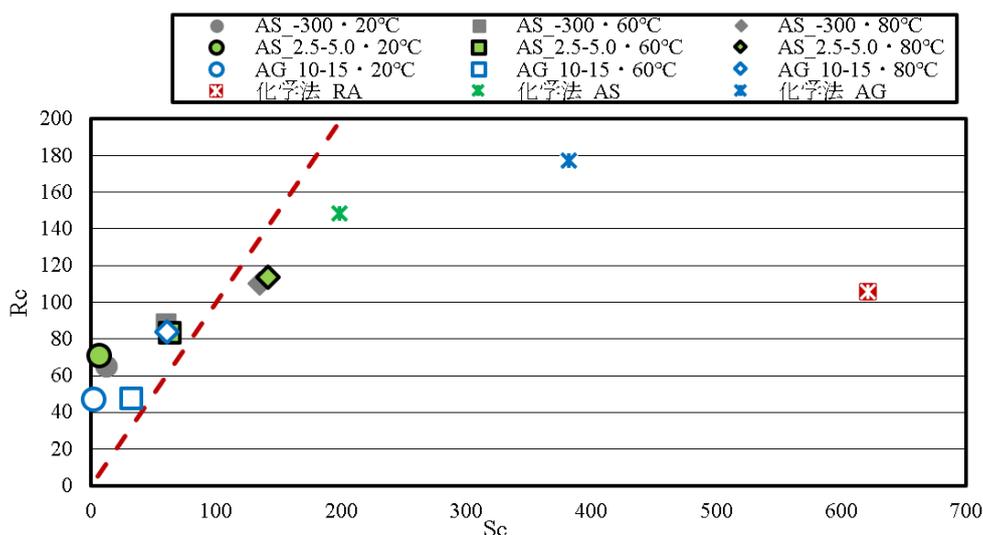


図 4-9 化学法・骨材反応性試験の結果 (24h)

Rc の経時変化を示したものを図4-10、図4-11に示す。なお、0時間の値は骨材をアルカリ溶液に浸漬させた後、10回強く振った直後に溶液の分取を行ったものである。

図4-10より、いずれの試験体でも0時間時点で50mmol/L程度のアルカリを吸着していることがわかる。各試験体のその後の経時変化に着目すると、あまり値が安定しないが、24時間時点では、ASシリーズの粒径が-300 μ m、2.5-5.0mm以下のものが若干大きい結果となっている。値が安定していないことについては分取前に10回ほど振り、10分ほど骨材の沈下をまって分取を行ったが浸漬を行っている原液が400mLであるのに対して、分取量が10mLであったため、ばらつきが出てしまったものと思われる。また、杉山ら¹¹⁾は軽量骨材の気孔中にアルカリ溶液が吸着されるため、溶液の量が一定にならないとしており、これ

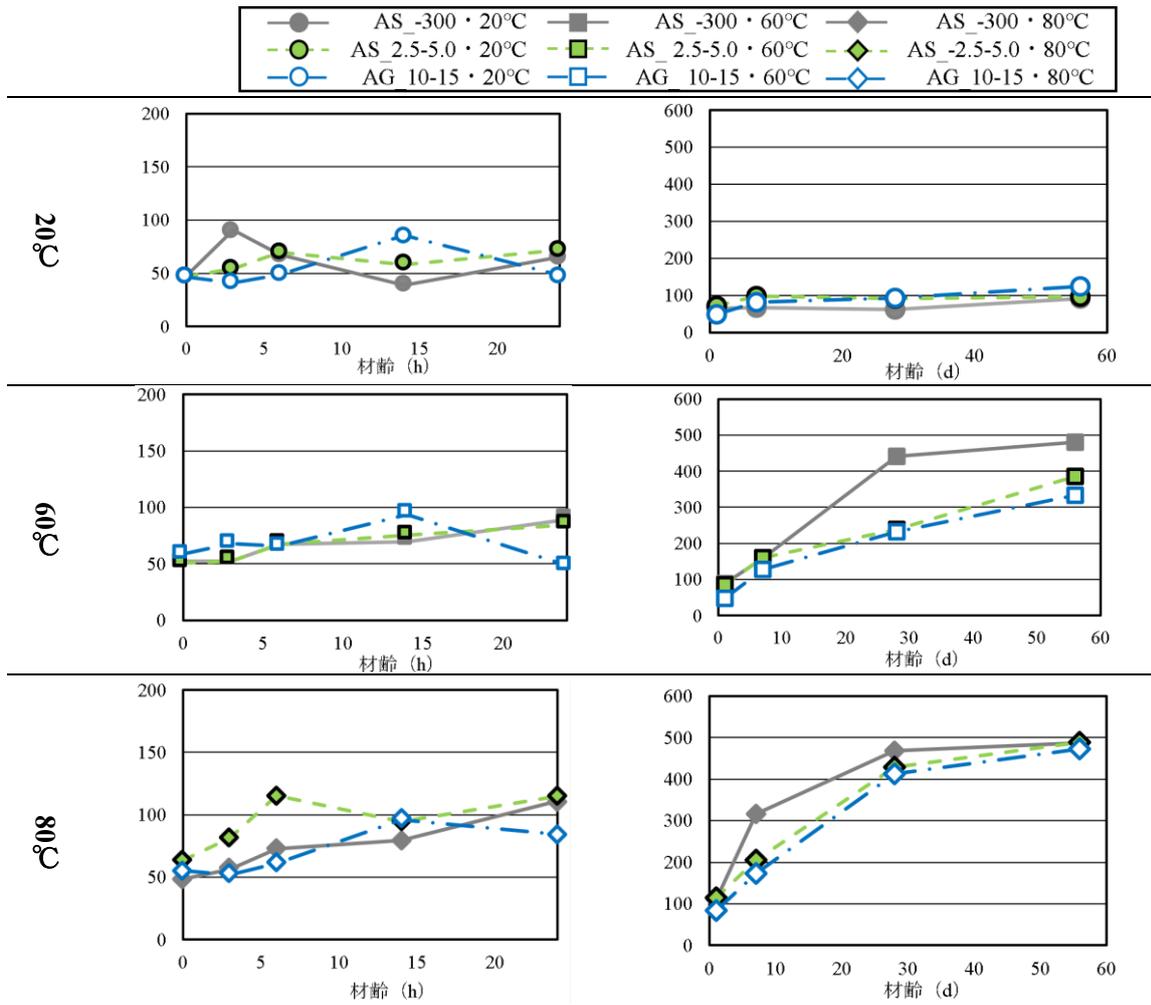


図 4-10 R_c 経時変化 (24h まで)

図 4-11 R_c 経時変化 (24h-56d)

もばらつきがでた原因の一つであると思われる。

図 4-11 より、24 時間以降の結果を見ると 20°C はほぼ反応していないが、養生温度が大きいほど反応速度が大きい傾向が見られ、ALA は AG・AS いずれの場合でも温度依存性を持つことがわかる。

膨張量計測を行った条件と同じ 60°C に着目すると、24 時間から 56 日の期間では、2.5mm-5.0mm と 10-15mm の比較的大きい骨材には、2.5mm-5.0mm が若干反応速度が速いもののあまり差が見られなかった。一方で、-300 μ m のものは反応速度が速い結果となった。

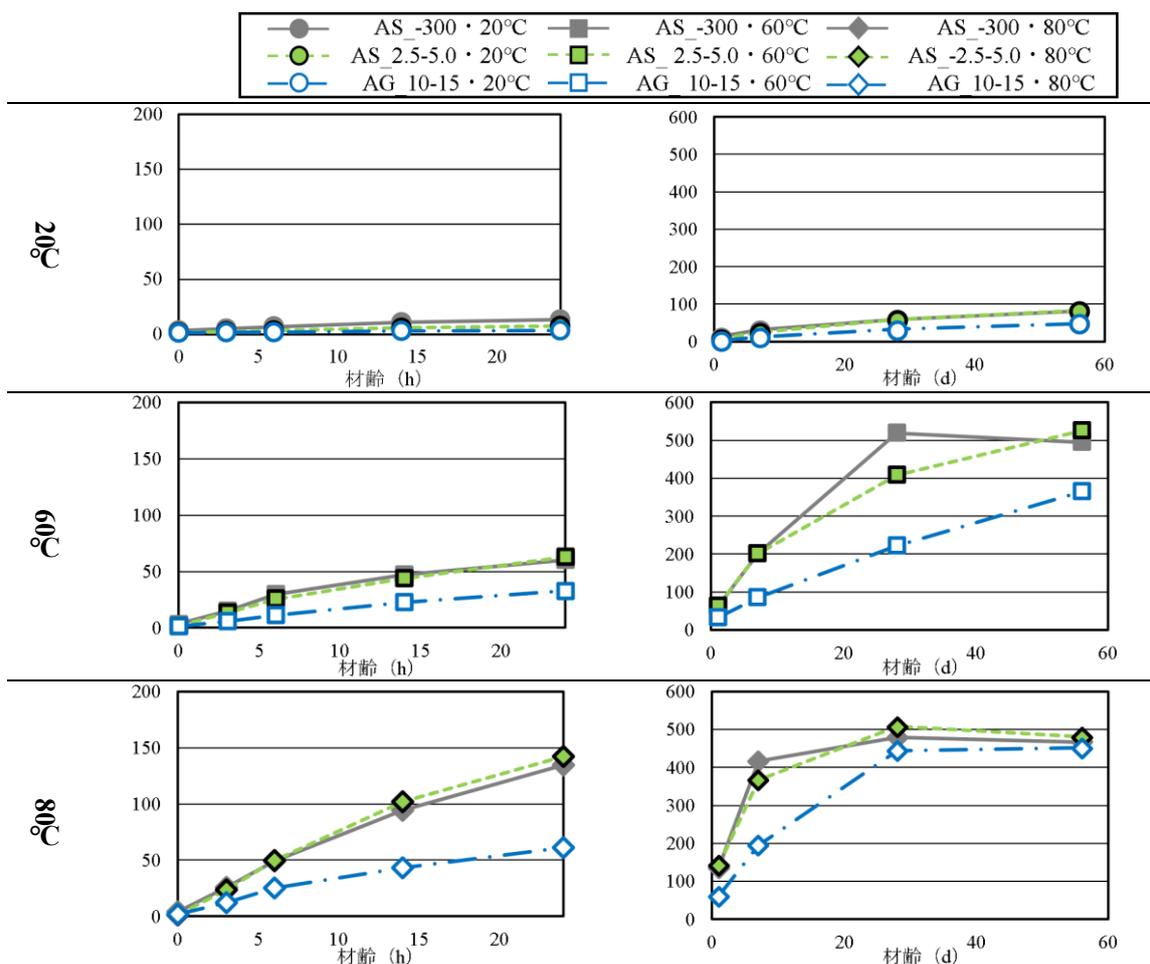


図 4-12 Sc 経時変化 (24h まで)

図 4-13 Sc 経時変化 (24h-56d)

Sc の経時変化を図 4-12, 図 4-13, Sc-Rc の関係を図 4-14, 図 4-15 に示す。図 4-12 より, 先ほど示した Rc に比べてばらつきがほぼ見られず, 時間に伴い Sc 量が増加していることがわかる。

図 4-12 より, Sc も温度に大きく依存していることわかる。粒形については, 粒形が小さいほど Sc 量が多い傾向が見られ, Rc の結果と同様に 24 時間時点では-300 μ m と 2.5-5.0mm のものはほぼ同じ数値であった。

図 4-13 より膨張量計測と同じ 60°C に着目すると, 粒形が小さいほど反応速度が速い結果となった。また, 本試験の結果から ALA はいずれの粒径でも Sc・Rc とともに 500mmol/L 程度で反応が終了したと思われる。

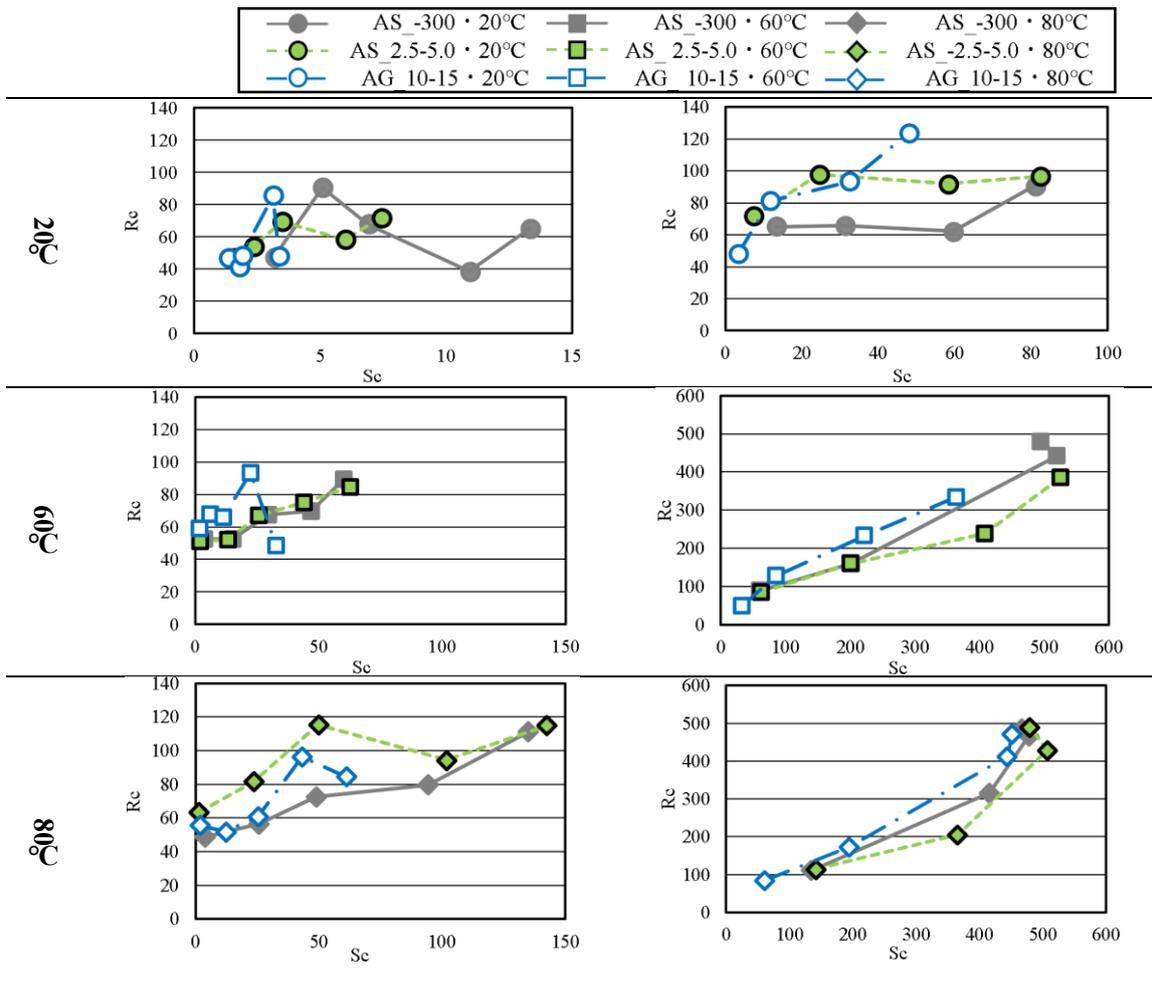


図 4-14 Sc-Rc 関係 (24h まで)

図 4-15 Sc-Rc 関係 (24h-56d)

図 4-14, 図 4-15 より, アルカリ濃度の減少に伴いシリカ溶出量が増加しており, 本研究で用いている ALA もアルカリシリカ反応性を有するものであることがわかる。一方で, 図 4-9 の化学法の結果に基づくと本試験で用いた ALA は無害であることがわかる。また, 反応性骨材に比べて, シリカ溶出量に対するアルカリ濃度減少量が非常に大きい結果となっている。

このことから本研究で用いた ALA は反応性骨材と共存した場合, 有害な量のシリカを溶出せずアルカリを消費し, 反応性骨材による有害となりうるシリカの溶出を阻害できる可能性が考えられる。

4.4 ALAの化学特性を考慮したASR・DEF低減機構について

4.4.1 はじめに

4.2節ではASR・DEFの発生メカニズム及び反応に影響を及ぼす諸要因について整理し、4.3節ではALAの化学反応特性について分析を行った。その結果、本研究で用いているALAではアルカリシリカ反応性を有している可能性が見られるものの反応性骨材に比べてシリカ溶出量に対するアルカリ消費量が非常に大きい結果となった。本節ではこの結果を踏まえてALAの化学特性からASR・DEF試験体で起きた差について考察を行う。

4.4.2 ASR低減機構について

ASRの膨張量を測定した結果を図4-16、図4-17、骨材反応性試験の結果を図4-18、図4-19に示す。4.3節から得られた結果を考慮すると、AG・ASで膨張量に差がでたことについてALAによるアルカリ消費が考えられる。

図4-18、図4-19は膨張量試験と同じ、60°Cの養生条件のアルカリ濃度減少量だが、ASシリーズ、特に微粉末の-300が非常に反応速度が速いことがわかる。この結果を考慮すると、ALAのアルカリの消費により、反応性骨材が反応できるアルカリが減少し、ASG量が減少したことでASR膨張量が減少したと思われる。また、AG・ASの膨張量の差は比表面積の差による反応速度の違いに起因するものだと考えられる。

この現象を確認するため、本研究では後述するASR膨張予測モデルで検討を行った。

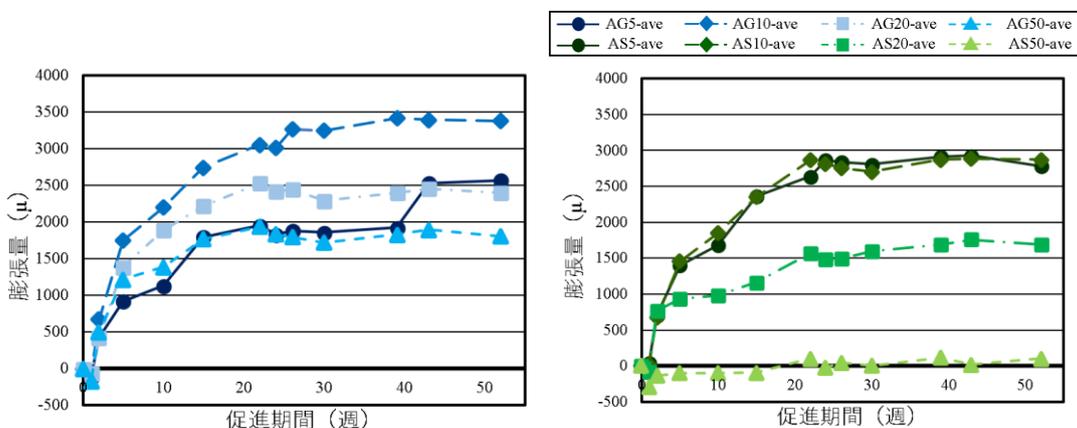


図 4-16 AG シリーズ膨張量計測結果

図 4-17 AS シリーズ膨張量計測結果

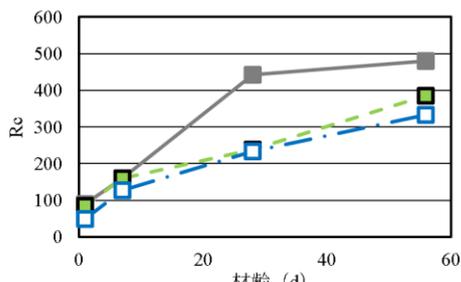
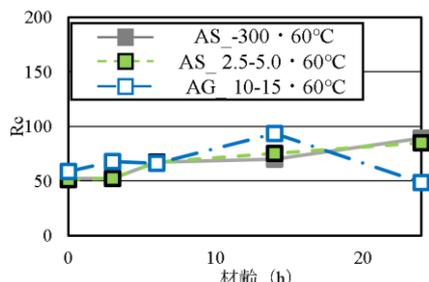


図 4-18 R_c 経時変化 (24h まで)

図 4-19 R_c 経時変化 (24h-56d)

4.4.3 DEF 低減機構について

DEFの膨張量を計測した結果を図4-20, 図4-21, 図4-22, 図4-23に示す。3章では, DEFによる膨張低減効果は骨材特性にから考えると自己養生による緻密化によるものだと考えられたもののそれだけでは説明できない結果となった。

図4-21よりALAが同体積の場合, 若干ではあるもののDSシリーズの方がDEF膨張の速度が速いことがわかる。4.2節で述べたが, DEFではアルカリ反応性骨材が存在した場合, コンクリート硬化後はアルカリ濃度が低下することで, エトリンガイトが析出しやすくなり, DEF膨張が速まる可能性があると考えられている。そのため, アルカリ消費速度の大きいDSシリーズのほうが早期にDEF膨張が開始したことが考えられる。

一方で, 図4-20を見ると, アルカリをあまり消費できていないと思われるALA置換率の低いものの方がDSシリーズよりDEF膨張の速度が速いことがわかる。これについてはアルカリや硫酸イオンの反応は細孔溶液を通して行われるため, 3章で述べたように初期の高温養生で大半の水分が失われたとして, ALA率が大きいものでは, 水分がALAに吸水されるため水分の浸透が遅く, ALAがアルカリを消費できず, エトリンガイトの溶解度が下がらなかったこと, また, エトリンガイトの生成に必要な硫酸イオンが細孔溶液に放出できなかったことに起因すると思われる。

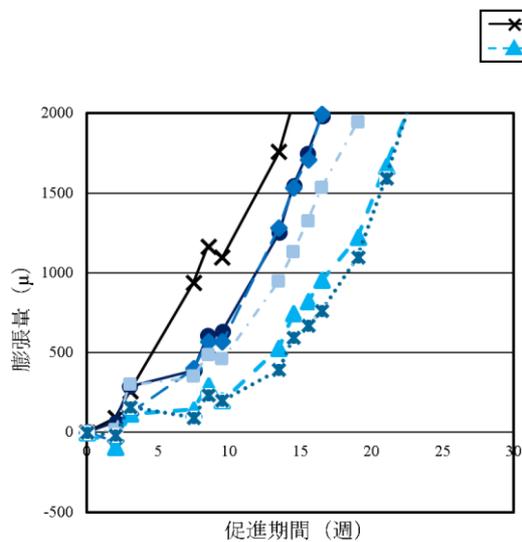


図 4-20 DEF 試験体膨張量結果-30 週まで
(ALA-0~DG-100)

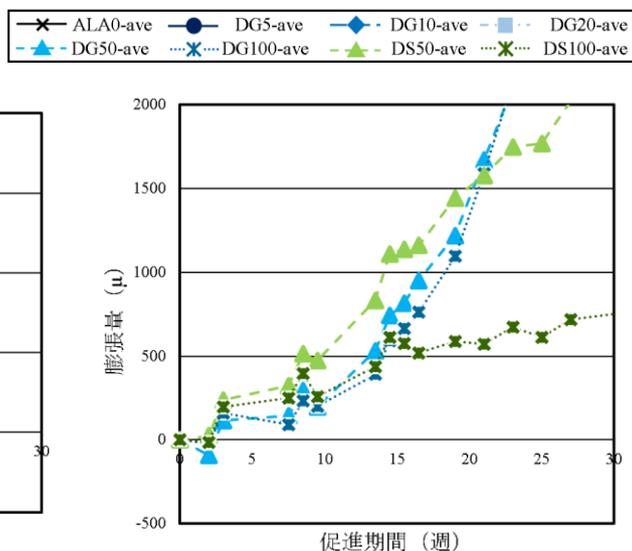


図 4-21 DEF 試験体膨張量結果-30 週まで
(DG-50~DS-100)

図 4-22, 図 4-23 より, DS シリーズでは大きく膨張を抑制する結果に対して DG シリーズでは ALA 率が大きいほど, 膨張量が増加する結果となっている。

4.2 節で述べたが, DEF は反応性骨材と共存した場合, 材齢初期のコンクリート中の pH を下げることで, エトリンガイトの溶解度を下げ, 最終的な膨張率が小さくなる可能性があるとしてされている。DS シリーズについてはその傾向が見られる。しかし, DG シリーズについて ASR 膨張量の結果から ALA 粗骨材がアルカリを消費しているのは間違いないはず, また, 骨材反応性試験においても ALA 粗骨材とそこまで大きな反応性の違いがあるわけではなかったにもかかわらず, むしろ膨張量が増加する結果となっている。そのため単純な ALA によるアルカリ消費のみでは説明がつかない。

そこで ALA 粗骨材と ALA 細骨材の差としてポゾラン反応性の存在が挙げられる。Bektas らの研究¹²⁾では本研究とは別種 (パーライト) ではあるものの粉砕した ALA がポゾラン反応性を示すことが確認されている。本実験の範囲では直接的に ALA によるポゾラン反応性を確認していないが, ALA 細骨材には微粒子が含まれており ALA 細骨材ではポゾラン反応を示す可能性がある。

本研究の ALA 細骨材がポゾランを持っているとすると, 物質移動抵抗性の増加のほかに, より大きなアルカリ濃度減少, 水酸化カルシウムの消費が DEF 膨張低減の可能性として考えられる。既往の研究¹³⁾では, メカニズムが不明ではあるものの DEF 膨張が大きいものほど水酸化カルシウムが減少することから水酸化カルシウムが DEF に影響していることが確認されており, 同研究ではフライアッシュがポゾラン反応により水酸化カルシウムを消費したことで DEF 膨張を抑制した可能性が考えられている。また, 後藤らの研究¹⁴⁾では, 物質移動抵抗性の増加によりアルカリや硫酸イオンの溶出, また, 水分の移動が生じにくかったことで DEF を抑制したとしている。

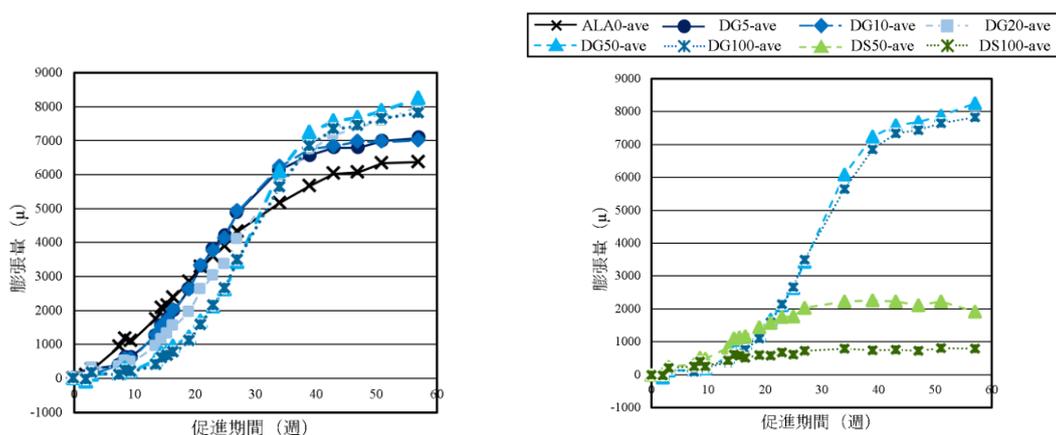


図 4-22 DEF 試験体膨張量測定結果
(ALA-0~DG-100)

図 4-23 DEF 試験体膨張量測定結果
(DG-50~DS-100)

4.5 まとめ

本章では、ASR・DEFの発生メカニズムを整理し、ALAの骨材反応性試験を行った結果からALAの化学反応特性がASR・DEFにどう影響するのかを考察した。その結果、以下に示す可能性が考えられた。

①反応性骨材・ALAに化学法を適用した結果、どちらも「無害でない」結果になった。一方で、粒形を考慮した骨材反応性試験では、化学法の指標では「無害」の結果となった。これは骨材の粉砕の有無による反応性の違いに起因することが考えられた。

②粒形を考慮した骨材反応性試験では、ALA細骨材の方が反応速度が大きい結果となった。これは単純な比表面積による差であると考えられた。

③骨材反応性試験の結果から、本試験でASRを抑制した要因はALAによるアルカリ消費の影響が大きい可能性が考えられた。

④骨材反応性試験の結果からALAのアルカリの消費が確認されたが、アルカリの消費だけでは説明がつかないことから、DEF膨張を抑制した要因はポゾラン反応による影響が大きいことが考えられた。

5章では、ASRの膨張挙動予測モデルにより3章の骨材特性の考察及び4章の化学法・骨材反応性試験から得られた情報を用いて算定を行い、ALAのASR・DEF抑制機構について検討を行う。

-
- 1) 株式会社岡崎組 HP, <https://i-const.jp/problems/asr/>
 - 2) 鳥居和之, 山田一夫: コンクリート診断 ASR の的確な診断/抑制対策/岩石学的評価, 森北出版株式会社, 2017
 - 3) 吉田夏樹: エトリングタイトの遅延生成 (DEF) によるコンクリートの劣化現象, GBRC, Vol.46, No.1, 2021
 - 4) 黒田保, 西林新蔵, 井上正一, 吉野公: 反応性骨材の粒径, 粒度および混入量がモルタルの ASR 膨張に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
 - 5) 山崎由紀, 上原元樹, 鶴田孝司: 異なる環境条件におけるエトリングタイトの遅延生成 (DEF) に及ぼす ASR 反応性骨材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020
 - 6) エトリングタイトの遅延生成 (DEF) に関する研究委員会: 「DEF のリスクを考える」に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学会, 2019
 - 7) 羽原俊介, 福田俊也, 小山田哲也, 藤原忠司: コンクリートの DEF による硫酸塩膨張の生気条件の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
 - 8) 羽原俊介: エトリングタイトの遅延生成によるコンクリートの劣化現象の解明, 科学研究費助成事業 (科学研究費補助金) 研究成果報告書, 2012
 - 9) 森大介, 中村秀三: 種々の骨材のアルカリ溶液による溶解挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
 - 10) 人工軽量骨材協会 HP: <http://www.keiryokotsuzai.com/>
 - 11) 杉山彰徳, 鳥居和之, 酒井賢太, 石川雄康: 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応 ASR 判定試験法の提案, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.79-91, 2007
 - 12) F.Bektas, L.Turanli, P.J.M. Monteiro: Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research, 2005
 - 13) 池田隆徳, 川端雄一郎, 濱田秀則, 佐川康貴: 混和材による高温養生を行ったモルタルの DEF 膨張の抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
 - 14) 後藤卓, 伊藤貴康: DEF 膨張に及ぼすクリンカー-鋳物組成と少量混合成分増量の影響, Cement Science and Concrete Technology, Vol.74, 2020

第5章 U.F.O.モデルを用いた ALA による低減機構の検討

5.1 はじめに

4章では、ALAの化学特性に基づくと、ALAのアルカリ消費により反応性骨材が反応できるアルカリがなくなることで結果的にASR膨張を抑制する可能性が考えられることを示した。本章では、4章で得られた値を用いてU.F.O.モデルと呼ばれるASR膨張予測モデルにより考察の検証を行う。

5.2 U.F.O.モデル概要

5.2.1 U.F.O.モデルについて

U.F.O.モデルとは、魚本、古澤ら¹⁾によって提案されたASR膨張予測モデルである。ASRの進行をASRの進行を骨材表面からの一軸反応と仮定し、反応速度論に基づいてASR膨張量を定式化した。このモデルは一般にU.F.O.モデルと呼ばれている。本論文では、このU.F.O.モデルを、複数種類の骨材の反応を考慮できるように修正したモデル²⁾をもとに計算を行った。

5.2.2 計算式について

U.F.O.モデルでは、ASRが骨材表面から内部に向かって一義的に進行するとしている。反応層に形成されるアルカリの濃度勾配が直線で近似でき、反応速度がアルカリ濃度に比例すると仮定すると、反応層の成長速度は式(1)で表すことができる。

$$\frac{dx}{dt} = (C_{cp} - C_{th}) \cdot \frac{k}{x} \quad (1)$$

ここで、
 x : 反応層の厚さ (cm)
 t : 時間 (hr)
 C_{cp} : ペースト部の間隙水のアルカリ濃度 (mol/L)
 C_{th} : ASRが進行するアルカリ濃度の限界値 (mol/L)
 k : 反応速度定数 (cm²/hr)

k は骨材表面から反応層 x が内部に向かって成長する速度を表している。式(1)について、 $t = 0$, $x = 0$ の条件を与えると式(2)が求まる。

$$x = \sqrt{2k(C_{cp} - C_{th})t} \quad (2)$$

また、反応層 x は化学法の結果に基づいた骨材の溶出試験から得られる R_c および S_c の値を用いて反応層と骨材の反応率の関係を表した式(3)により計算を行った

$$x = r \cdot \left(1 - (1 - a)^{\frac{1}{3}}\right) \quad (3)$$

ここで、 r : 骨材の半径 (cm)
 a : 骨材の反応率 (骨材反応性試験の結果から取得)

反応性骨材の反応が進むことでコンクリート内のアルカリ濃度は減少する。本研究では、反応性骨材と同時に ALA も反応するため、ある時点でのアルカリ濃度 C_{cp} は式(4)表される。なお式中の r_a , a_{la} , f_{ala} , c_s はそれぞれ反応性骨材, ALA (AGorAS), ALA 微粉末 (AS のみ), 石英斑岩砕石を示す。

$$C_{cp} = C_{in} - k_{conra}A_{ra} \sum \beta_{rai} k_1 a_{rai} - k_{conala}A_{ala} \sum \beta_{alai} k_1 a_{alai} - k_{confala}A_{fala} \sum \beta_{falai} k_1 a_{falai} - (C_{aggra} + C_{aggala} + C_{aggfala}) \quad (4)$$

ここで、 C_{in} : 間隙水中の初期のアルカリ濃度 (mol/L)
 k_{con} : 骨材の反応量から消費アルカリ単位濃度に換算する係数 (mol/g · L)
 C_{agg} : ASR が進行するアルカリ濃度の限界値 (mol/L)

次に、反応性骨材の反応率は反応層の体積と反応性骨材の比で表される。本研究では ALA も反応を行うとしているため、反応生成物量 T_{pr} は次式(5)(5)で表される。

$$T_{pr} = A_{ra} \sum \beta_{rai} k_1 a_{rai} + A_{ala} \sum \beta_{alai} k_1 a_{alai} + A_{fala} \sum \beta_{falai} k_1 a_{falai} \quad (5)$$

ここで、 A : 反応性骨材量 (g)
 β_i : 全骨材に占める半径 r_i の骨材の比率
 k_1 : 反応率から生成物量に換算する係数(SiO_2 の分子量の逆数=0.0166)
 a_i : 半径 r_i の骨材の反応率

式(5)で得られる反応生成物量から、膨張に寄与しない反応生成物量 T_{er} を差し引き、膨張に寄与する反応生成物量 T_{pr} と全体の膨張率との比例定数 E を用いて、膨張率 ε は式(6)(6)のように表せる。

$$\varepsilon = (E_{ra}V_{ra} + E_{cs}V_{cs} + E_{ala}V_{ala} + E_{fala}V_{fala})(T_{pr} - T_{er}) \quad (6)$$

ここで、 E : 各種骨材の膨張に寄与する反応生成物量と膨張率との比例定数 (%/mol)
 V : 各種骨材の体積割合

また、 T_{er} は式(7)(7)のように表せる。

$$T_{er} = A_{ra} \sum \beta_{rai} \frac{h_{ra}}{r_{ra}} + A_{ala} \sum \beta_{alai} \frac{h_{ala}}{r_{ala}} + A_{ala} \sum \beta_{alai} \frac{h_{ala}}{r_{ala}} \quad (7)$$

ここで、 h : 単位反応比表面積から、膨張低減容量に換算する係数 (mol/l-mortar)

これらの式を用いてに図 5-1³⁾示す計算フローに従い、U.F.O.モデルによる計算は行われる。

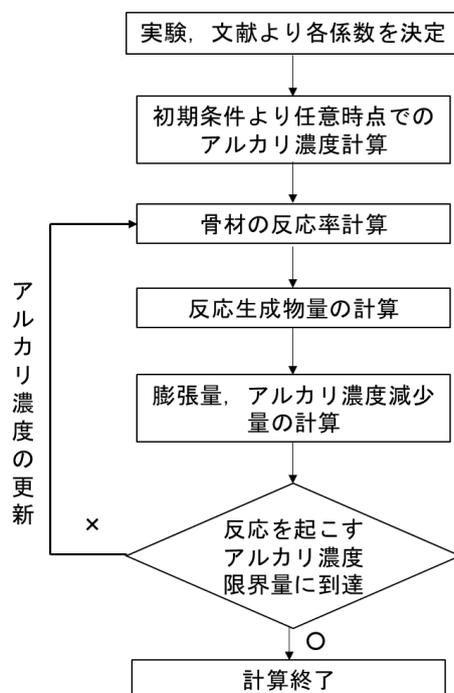


図 5-1 U.F.O.モデルでの計算フロー³⁾

5.2.3 本研究で用いた U.F.O.モデル諸条件

U.F.O.モデルの試算に用いた諸条件を表 5-1, 表 5-2 に示す。骨材量や間隙水量等は膨張量試験体の調合をもとに設定を行った。また, 本試算での骨材粒形は反応性骨材については化学法の試験を行った 225 μ m とし, AG, AS, AS 微粉末はそれぞれ骨材反応性試験に用いた粒形をもとにそれぞれ 12.5mm, 3.75mm, 225 μ m とした。間隙水量は, 既往の研究⁴⁾と同様にセメント質量の 24%に当たる質量の水が水和反応により消費されたと仮定し, 練り混ぜ水量からその水量を差し引いた後の残り分とした。間隙水中のアルカリ濃度はアルカリ総量を間隙水量で除したものとした。 k , k_{con} , C_{agg} はそれぞれ骨材反応性試験の結果から求められるが, 反応性骨材については化学法による 24 時間までの値のみであるため 24 時間までの値を用い, ALA については森大介らの研究⁵⁾から 7 日までの値は化学法の値と直線的な関係が得られていることから 7 日までの値を用いて計算を行った。

膨張量の低減に関係する係数 h と膨張に寄与する反応生成物と膨張率の比例定数 E はフィッティングにより求めるが, ALA は骨材内部に多くの気孔を有しており, ASG の膨張圧を緩和する可能性が見られること⁶⁾から, h は反応性骨材よりも膨張を低減する値とした。 E は DEF 試験体の結果からポズラン反応性を有している可能性のある AS_fala の値を 0 とし, 他の ALA は X 線 CT から骨材の破砕が見られなかったためほかと同じ値とした。なお, アルカリラッピングによるアルカリの供給の条件は再現が難しく, 本試験では考慮していない。

表 5-1 U.F.O.モデル試算条件—各試験体について

	RA	AG 10-15	AS 2.5-5.0	AS fala	間隙水量	アルカリ濃度
	g	g	g	g	g	mol/l
AG-5	379.5	41.6			130.7	2.132
AG-10		83.2				
AG-20		166.5				
AG-50		416.3				
AS-5			33.8	11.3		
AS-10			67.6	22.6		
AS-20			135.4	45.1		
AS-50			338.4	112.8		

表 5-2 U.F.O.モデル試算条件—各骨材について

	k	k_{con}	C_{agg}	h	E	C_{th}	C_{in}
	cm ² /hr	mol/g · l	mol/g	mol · cm/g	%/mol	mol/l	mol/l
反応性骨材	1.09E-10	1.31E-10	2.74E-05	2.0E-06	2.0	0.25	2.13
AG_10-15	4.13E-09	7.39E-10	5.74E-05	2.0E-05	2.0		
AS_2.5-5.0	2.17E-09	5.52E-10	4.96E-05		0		
AS_fala	7.65E-12	5.52E-10	4.89E-05		2.0		
石英斑岩砕石	—	—	0	0	2.0		

5.2.4 試算結果および考察

U.F.O.モデルによる試算で得られた結果と円柱試験体の膨張を計測した実測値との比較を図 5-2, 図 5-3, またアルカリ濃度, 反応生成物を図 5-4, 図 5-5 に示す。

図 5-2, 図 5-3 より, ALA 量が多いほど膨張率が低下している傾向は再現されていることがわかる。また, アルカリ消費速度の大きい ALA 細骨材を用いた AS シリーズの方が膨張を低減している結果となった。一方で AS-50 の実測値で見られるようなほぼ膨張していない現象は見られず, 若干 AS の方が膨張低減効果が大きいものの顕著な差は見られなかった。

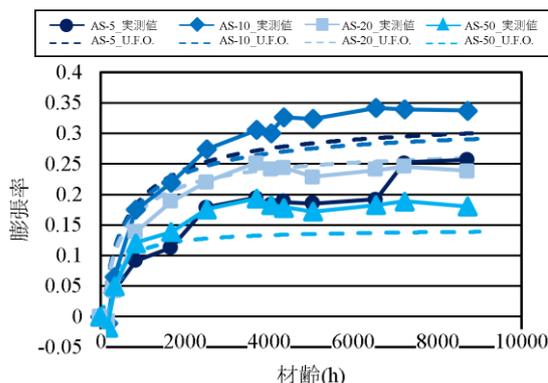


図 5-2 U.F.O.モデルの膨張率と実測値の比較(AG)

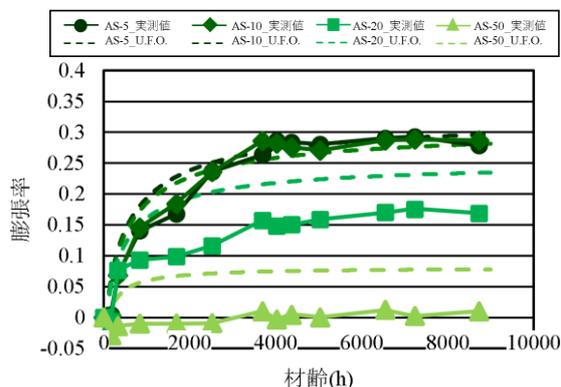


図 5-3 U.F.O.モデルの膨張率と実測値の比較(AS)

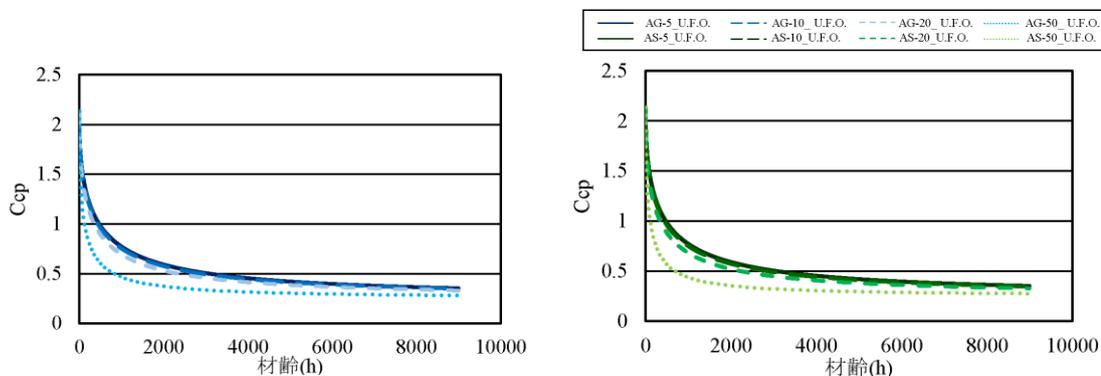


図 5-4 各試験体のアルカリ濃度

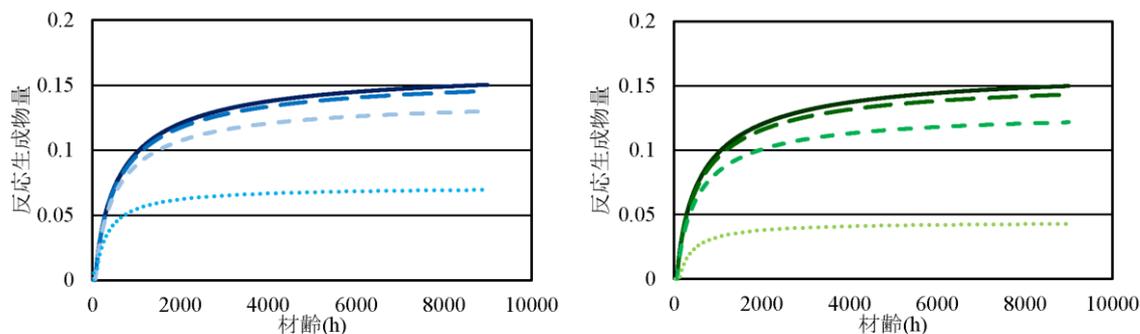


図 5-5 各試験体の膨張に寄与する総 ASG 量

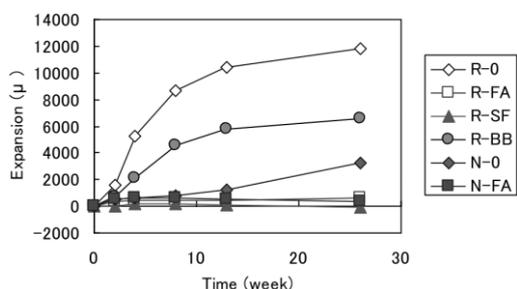


図 5-6 混和材による膨張量の違い⁷⁾

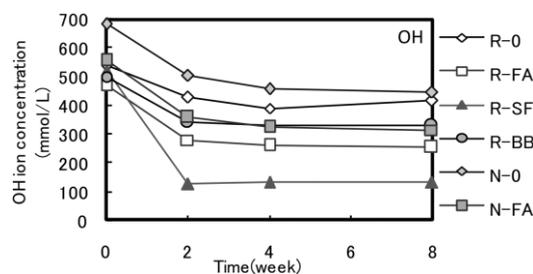


図 5-7 混和材による OH 濃度の違い⁷⁾

そこで、本研究では AG・AS で ASR 抑制効果の違いが出た要因に粒径によるアルカリ消費速度の違いに加えて、ALA 細骨材のみが持つと思われるポズラン反応が考えられる。

ポズラン反応による ASR 抑制機構はポズラン反応により生成される低 Ca/Si 比の C-S-H によるアルカリ金属イオンの固定化による pH 濃度の低下、ポズラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の減少、生成される ASG の粘性の低下など様々な効果があるとされている。

田中らの研究⁷⁾では、フライアッシュや高炉スラグ微粉末など混和材を組み合わせることによる ASR 抑制効果の影響を検討している。田中らの研究では混和材を置換したモルタルの細孔溶液の分析を行ったところ、脱型日から 2 週間目にかけてアルカリ濃度が大きく減少しており、減少量が大きい順に膨張率が低くなる結果が確認されている(図 5-6, 図 5-7)。そのため、混和材によるアルカリ消費・吸着の影響が膨張に及ぼす影響が大きいとされている。

伊藤らの研究⁸⁾では、フライアッシュの ASR 抑制メカニズムとしてフライアッシュのアルカリ吸着効果により、細孔溶液中に溶出するアルカリが非常に少量となること、また材齢初期からポズラン反応が活発に発生することで OH⁻イオンが消費され、OH⁻イオンによるシロキサン基の切断が抑制されたことが、ASR 抑制につながったとされている。

本研究では、骨材反応性試験による ALA のアルカリ濃度減少量は 1mol/L・NaOH 溶液に ALA を浸漬することで得ているため、カルシウムが存在しない条件となっている。そのため、実際のコンクリート中ではカルシウムが存在していることでポズラン反応を起こし、骨材反応性試験から得られたアルカリ濃度減少量より大きくアルカリを減少することで反応性骨材による ASG の発生を抑制し、結果的に ASR 膨張を抑制することになったと考えられる。

5.3 ALA による ASR・DEF 低減機構の考察

5.3.1 はじめに

本節では、3章で述べた骨材特性による低減機構、4章で述べた化学特性による低減機構、本章で得られた情報を整理し、ALA による ASR・DEF の低減機構を述べる。

5.3.2 DEF の低減機構

DEF 試験体から得られた材齢 30 週までの膨張量変化を図 4-20、図 4-21 に示す。図 4-21 より、ALA 率が同体積の場合、若干ではあるものの粒形の小さい DS シリーズの方が膨張の開始が早いことがわかる。これは ALA のアルカリ消費に起因するものである。DEF の原因であるエトリンガイトはアルカリ濃度が大きいほど溶解度が大きい性質を持っており、アルカリ消費速度の大きい DS シリーズでは、アルカリの濃度が低下するのが速く、エトリンガイトが速く析出できたため、膨張の開始が速まったものと考えられた。

図 4-20、図 4-21 より、ALA が同種の場合、ALA 率が大きいほど膨張の開始が遅れる結果となっている。これは ALA の吸水率に起因する可能性が大きい。DEF 試験体では DEF を促進するため、12 時間高温養生を行い、その後 28 日間の封緘養生を行った。この時、コンクリート中の水分が ALA の持つ水分を含めて多く失われていた場合、水中養生の際に水分がコンクリートの細孔のほかに ALA に給水される可能性が考えられる。前述したように DEF ではコンクリート硬化後のアルカリ濃度が小さいほど DEF 膨張の開始が速まるが、コンクリート内でのアルカリ消費は細孔溶液により行われる。そのため、ALA 率が大きい場合、アルカリ消費速度が速くとも水分の浸透が遅くそもそも反応できなかったため、膨張の開始が遅れた可能性が考えられた。

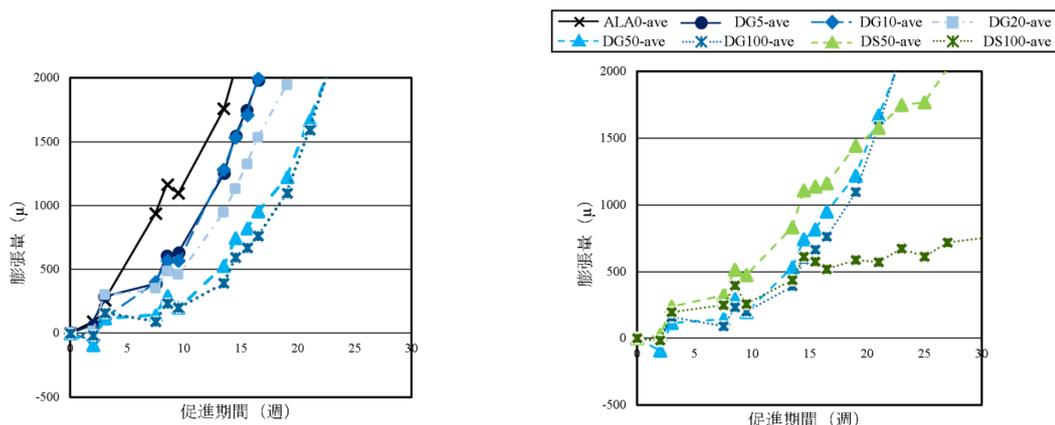


図 5-8 DEF 試験体膨張量結果-30 週まで (ALA-0~DG-100)

図 5-9 DEF 試験体膨張量結果-30 週まで (DG-50~DS-100)

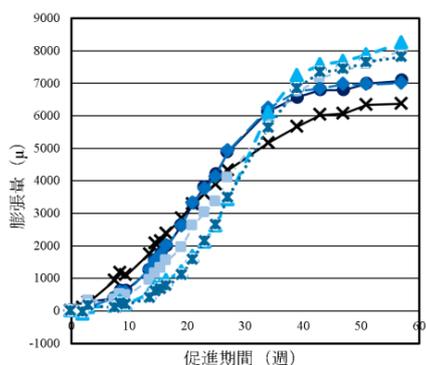


図 5-10 DEF 試験体膨張量測定結果 (ALA-0~DG-100)

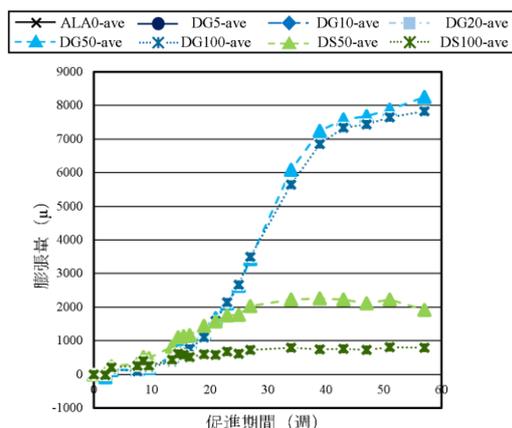


図 5-11 DEF 試験体膨張量測定結果 (DG-50~DS-100)

続いて ALA が最終的な DEF 膨張へ及ぼす影響について述べる。DEF 試験体の全期間の膨張量変化を図 5-10, 図 5-11 に示す。図 5-10, 図 5-11 より, DG シリーズでは ALA 率が大きいほど膨張量が増加する結果に対して, DS シリーズでは ALA 率が大きいほど膨張を抑制する結果となった。これは ALA 微粉末の持つポゾラン反応性に起因するものと考えられた。DEF の抑制は既往の研究⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾からポゾラン反応により①ALA 細骨材のアルカリ消費と合わせて材齢初期の pH が著しく低下し, エトリンガイトが溶解しなかったこと, ②水酸化カルシウムが消費されたこと, ③物質移動抵抗性が増加することでエトリンガイトの生成・膨張を抑制した可能性が考えられた。

DG シリーズでは X 線 CT 観察の結果から粗大な空隙が ALA 率に伴い増えていることが確認されている。そのため, ALA の浮きにより施工不良が発生し, 膨張に対する抵抗力を失ったものと考えられた。

図 5-10, 図 5-11 の結果から ALA を全く置換していないものに比べて DS-50 では膨張量が約 1/3 程度まで減少しているものの, DS-50 の 2 倍の ALA 細骨材が存在している DS-100 は約 1/6 程度であり, DS-50 から DS-100 にかけて低減割合が大きく減少している結果となったが, これについては原因がわかっていないため, 今後検討を行う必要がある。

5.3.3 ASR の低減機構

U.F.O.モデルによる試算の結果を図 5-12, 骨材反応性試験の結果を図 5-13, 図 5-14 に示す。図 5-12 より, 骨材の試験体内での配置を考慮した場合の U.F.O.モデルによる試算では, 膨張率を実測した結果と近い傾向が得られている。ASR は, 骨材に含まれるシリカ鉱物とアルカリ金属が反応することにより ASG を発生させる。図 5-13 の骨材反応性試験の結果から AG・AS とともに ALA によるアルカリ消費が行われており, コンクリート内のアルカリを減少させることで反応性骨材での ASR の発生を抑制した可能性が考えられる。図 5-14 の結果から本研究で使用した ALA がアルカリシリカ反応性を有するものであるが, 杉山らの研究⁶⁾で見られたように ALA 内部の空隙により膨張圧を抑制した可能性が考えられる。

図 5-12 より U.F.O.モデルによる試算では AS シリーズは実測値ほど膨張を低減していない結果となった。これについては ALA 細骨材が持つポゾラン反応性によるものだと考えられる。既往の研究⁷⁾⁸⁾からポゾラン反応によるアルカリ消費が ASR に大きく影響することが確認されている。骨材反応性試験ではカルシウムが存在せず, ポゾラン反応を示さなかった可能性が考えられる。一方で, 実際のコンクリートではカルシウムが存在しており, ポゾラン反応を発生させることで図 5-13 に示した値より大きくアルカリを減少させ, 反応性骨材による ASG が発生せず, 結果的に ASR 膨張が抑制されたものと考えられる。

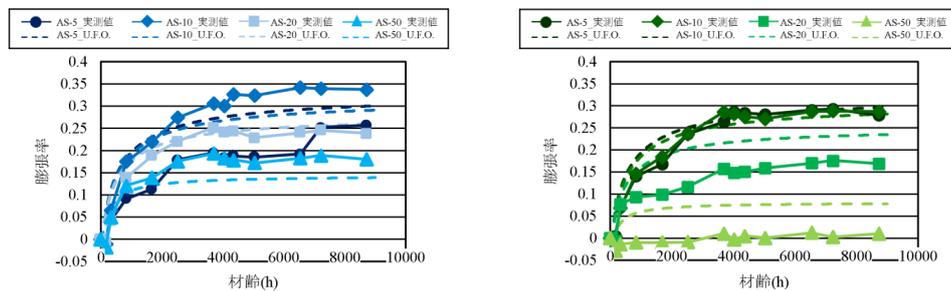


図 5-12 U.F.O.モデルと実測値の比較

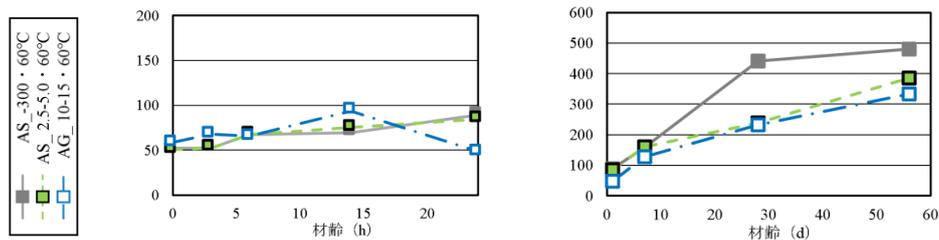


図 5-13 Rc 経時変化 (60°C養生 左: 24h まで 右: 24h-56d)

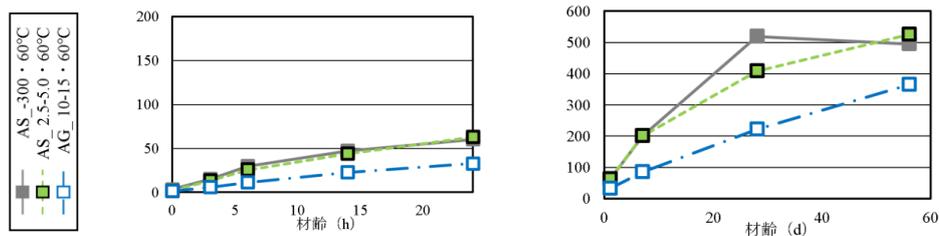


図 5-14 Sc 経時変化 (60°C養生 左: 24h まで 右: 24h-56d)

5.4 ALA が ASR・DEF に及ぼす影響のまとめ

本章ではこれまでに得られた ALA の情報を整理し、ALA による ASR・DEF 抑制機構について最終的な結論を出した。本研究で考えられた ALA が ASR・DEF に及ぼす影響を下記に示す。

・ ALA が ASR・ASR 膨張に及ぼした影響

本研究では、主に ALA は ASR の反応そのものに影響を及ぼした可能性が考えられた。4章で行った骨材反応性試験の結果から ALA 粗骨材・ALA 細骨材ともにアルカリ反応性を有しているものの、シリカ溶出量に対して大きくアルカリ消費を行っていることがわかった。

そのことから、ALA の反応によりコンクリート内のアルカリを消費することで、反応性骨材が反応できず、有害な ASG の発生を防ぐことで結果的に ASR による膨張が発生しなかったことが考えられた。また、ALA による ASG は ALA の気孔により膨張圧を緩和したと考えられた。ただし、本研究ではポズラン反応の影響を定量的に評価できていないため、今後検討が必要である。

本研究の条件では、体積割合で非反応性骨材中の 50%、粗骨材全体積中で約 35%分の細骨材を ALA 細骨材で置換することで ASR を完全に無害化することができた。粗骨材では非反応性骨材中の 50%置換した場合でも、ALA 細骨材が 20%のものとはほぼ同じ低減効果という結果から、ALA を ASR 抑制目的で使用する場合、アルカリ反応性、ポズラン反応性の観点から ALA 細骨材が推奨される。

・ ALA が DEF・DEF 膨張に及ぼす影響

本研究では、ALA が DEF 抑制に影響を及ぼしている点は ALA 細骨材のみで DEF 抑制効果が見られることからポズラン反応性が考えられる結果となった。本研究で使用した ALA 細骨材はポズラン反応性を持つ可能性が考えられ、ポズラン反応による DEF 低減機構は以下のものが考えられた。

- ①材齢初期の pH 低下によるエトリンガイト溶解度の低下
- ②水酸化カルシウム消費によるエトリンガイト生成の抑制
- ③物質移動抵抗性の増加によるエトリンガイトの生成・膨張の抑制

本研究の条件では、粗骨材体積の約 70%の細骨材を ALA 細骨材 (DS-100) と置換した場合、57 週時点で約 0.1%の膨張が見られる結果となった。これは ALA をまったく膨張していない場合の約 1/6 程度の膨張率である。一方で、粗骨材体積の約 35%の ALA 細骨材 (DS-50) では 0.2%ほどの膨張率であり、ALA を置換していないものの約 1/3 程度の膨張率である。DS-50 から DS-100 では膨張低減率が低下しており、この原因はわかっていないため、今後検討が必要である。

-
- 1) 魚本健人, 古沢靖彦: アルカリ・シリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.109-119, 1992
 - 2) 寺本篤史, 大久保孝昭: 反応性骨材と共存する骨材が ASR 膨張に及ぼす影響, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.74, pp.235-242, 2021
 - 3) 渡部雅貴, 大久保孝昭: ASR 診断の高度化に向けた研究, 広島大学大学院, 2020
 - 4) 上野貴行, 川端雄一郎, 山田一夫, 佐川康貴: アルカリ反応性を有する急速膨張性骨材のペシマム混合率の経時的変化に関する研究, 「性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオ」に関するシンポジウム論文集, pp.231-238, 2017
 - 5) 森大介, 中村秀三: 種々の骨材のアルカリ溶液による溶解挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
 - 6) 杉山彰徳, 鳥居和之, 酒井賢太, 石川雄康: 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応 ASR 判定試験法の提案, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.79-91, 2007
 - 7) 田中泰司, 速水悠仁, 須藤卓哉: 混和材の組み合わせがアルカリシリカ反応抑制効果に及ぼす影響, *Cement Science and Concrete Technology*, No.64, 2010
 - 8) 伊藤尚子, 二村誠二: 種類の異なるフライアッシュの ASR 防止対策に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007
 - 9) 山崎由紀, 上原元樹, 鶴田孝司: 異なる環境条件におけるエトリンタイトの遅延生成 (DEF) に及ぼす ASR 反応性骨材の影響
 - 10) 池田隆徳, 川端雄一郎, 濱田秀則, 佐川康貴: 混和材による高温養生を行ったモルタルの DEF 膨張の抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
 - 11) 後藤卓, 伊藤貴康: DEF 膨張に及ぼすクリンカー・鉱物組成と少量混合成分増量の影響, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.74, 2020

第6章 結論

本研究では、ALA による ASR・DEF 抑制機構の解明を目的として様々な実験、検討を行った。各章についてまとめたものを以下に示す。

第1章 序論

本研究の背景と目的を示し、ASR・DEF の概要から本研究の意義をまとめ、最後に本論文の構成を示した。

第2章 既往の研究

ALA による ASR 低減機構としてこれまでに考えられているものについて示した。また、ASR・DEF において一般的に行われている試験を調査し、ALA の低減機構を分析方法について検討した。

第3章 ALA の骨材特性による低減機構

ASR・DEF が発生する調合の一部を ALA 粗骨材・ALA 細骨材に置換することによるコンクリート性状（強度・質量・膨張量）の違いの検討を行った。また、ALA の反応を伴わない低減機構を ALA の骨材特性とし、X 線 CT 撮影によりコンクリートの内部性状を観察することで考察を行った。

【実験結果：膨張量】

ASR が発生する調合の一部を ALA 粗骨材で置換した試験体（AG）と ALA 細骨材で置換した試験体（AS）では、いずれも概ね ALA 量が大きいほど膨張を低減する結果となった。また、AS シリーズの方が膨張低減効果が大きく、全粗骨材体積の約 35%分の細骨材を ALA 細骨材とした場合、ASR を完全に抑制する結果となった。

DEF が発生する調合の一部を ALA 粗骨材で置換した試験体（DG）と ALA 細骨材で置換した試験体（DS）では、DG シリーズでは ALA 量が大きいほど、若干膨張量が増加する一方で、DS シリーズでは大きく膨張を低減しており、ALA を置換していない試験体では約 0.6%膨張しているのに対して、全粗骨材体積の約 70%分の細骨材を ALA 細骨材とすることで約 0.1%程度の膨張まで低減する結果となった。

【実験結果：X 線 CT】

コンクリートの内部性状把握のため促進 52 週時点の ASR による膨張量を測定した試験体（AG・AS）に対して X 線 CT 撮影を行ったところ、反応性骨材らしき骨材を貫通するひび割れは見られる一方で、ALA を貫通するひび割れは観察されず、本研究の範囲では ALA の破砕による膨張圧の早期解放の可能性は低いものとした。

コンクリートの空隙率を分析したところ、AG シリーズでは ALA の増加に伴い、空隙率が増加する一方で AS シリーズでは ALA の増加に伴い、空隙率が減少する結果となった。X 線 CT 写真を観察したところ、AG シリーズでは ALA 内部の気孔や、セメント部に粗大な空隙が多く見られた。そのため、比較的小さい径の空隙については ALA 内部の気孔を計上していると考えられた。また、ALA 粗骨材の吸水率 (29%) から過剰な水分による施工不良で粗大な空隙が増加したと考えられた。ALA 細骨材については吸水率が比較的低く (16%)、適度な水分による自己養生から緻密化されたものと考えられた。

第4章 ALA の化学特性による低減機構

ALA による ASR 低減機構としてアルカリの消費が考えられている。本研究では、骨材の反応性を確かめるため、アルカリシリカ反応性試験として一般的に行われている化学法を反応性骨材および ALA に行った。化学法は本来 ALA は適用外であり、粒径による反応性の違いを考慮できないため、粉砕を行わない骨材反応性試験を ALA に行った。

【実験結果：骨材の反応性】

化学法について反応性骨材の結果はアルカリ濃度減少量(Rc)が約 100mmol/L に対して、シリカ溶出量が約 600mmol/L と非常に大きく、「無害でない」結果となった。ALA については ALA 粗骨材が Rc : Sc がおよそ 180 : 400 に対して、ALA 細骨材では 150 : 200 程度でいずれも「無害でない」結果となった。

粉砕を行わなかった骨材反応性試験では、大きな差はあまり見られなかったものの粒径が小さいほど反応速度が速くなる結果であった。

第5章 U.F.O.モデルを用いた ALA による低減機構の検討

本章では魚本らによって提案された U.F.O.モデルと呼ばれる ASR 膨張予測モデルと 4 章の骨材反応性試験の結果を用いて試算を行った。また、その結果から ALA による ASR・DEF 低減機構について考察を行った。

【実験結果：U.F.O.モデル算定値と実測値の比較】

4 章で得られた結果を用いて U.F.O.モデルによる試算を行ったところ、ALA 率が大きいほど ASR を低減していること、AG シリーズに比べて AS シリーズの方が効果が大きいという ASR 膨張を測定した試験体と同様の傾向が見られた。このことから ALA による ASR 低減機構は ALA によるアルカリの消費が大きく影響していると考えられた。一方で、AS-50 で見られた ASR 膨張を完全に抑制する結果は見られなかった。既往の研究では ALA を粉砕したものがポズラン反応を示すことが確認されている。このことから粒形の小さい ALA 細骨材を用いた AS シリーズでは、ポズラン反応により骨材反応性試験に見られた以上のアルカリの消費が行われた可能性が考えられた。

以下に本研究で考えられた ALA が各コンクリート膨張性劣化に及ぼす影響について述べる。

【研究結果：ALA による ASR 低減機構】

ALA による ASR 低減機構について大きく影響しているのは ALA によるアルカリ消費だと考えられた。骨材反応性試験の結果から ALA は大きくアルカリを消費することが確認されており、ALA がアルカリを消費してしまうことで反応性骨材の反応が不十分となり、有害な ASG が生成されず、結果的に ASR 膨張が低減されたと考えられた。

なお、骨材反応性試験の結果から ALA もアルカリシリカ反応性を有することが確認されているが、反応性骨材と比較するとアルカリ消費量に対してシリカ溶出量が非常に小さく、また、骨材内部に気孔を多く持つことから ALA による ASG は有害とならなかったと考えられた。

【研究結果：ALA による DEF 低減機構】

ALA による DEF 低減機構について大きく影響しているのは ALA 細骨材のみで低減効果が見られたことから ALA 細骨材が持つポズラン反応性であると考えられた。ポズラン反応による DEF 低減機構は①材齢初期の pH 低下によるエトリンガイト溶解度の低下、②水酸化カルシウム消費によるエトリンガイト生成の抑制、③物質移動抵抗性の増加によるエトリンガイトの生成・膨張の抑制が考えられる。しかし、本研究では、ALA のポズラン反応性について具体的な検討が行えておらず、どの効果が支配的となるのかわからない。そのため、具体的なポズラン反応の検討が今後の課題となる。

付録 今後行うべきこと

本研究ではいくつか検討できなかったことがある。今後の検討すべき事項について述べる。

(1)ALA のアルカリ消費による ASR 低減機構の確認について

本研究では、ALA の ASR 低減機構はアルカリ消費の影響が大きいと考えられた。具体的なメカニズムとしては、ALA がコンクリート細孔溶液中のアルカリを先に消費してしまうことで反応性骨材が反応できず、有害な ASG が発生しなかったためコンクリートが膨張しなかったと考えている。

このメカニズムの検証については膨張量を測定した試験体の骨材の反応性を再度分析することで検証できるのではないかと考えている。方法としては、膨張量を測定した試験体を圧縮試験などである程度壊してしまい、試験体中の反応性骨材をとりわけると。その後、反応性骨材を再度化学法などでアルカリ濃度減少量、シリカ溶出量を取得する。これを AG-5～AG-50、AS-5～AS-50 の各試験体で行い、化学法の結果を比較する。私の考えでは、膨張量を低減した試験体ほど反応性骨材が反応できなかったため、この化学法の結果では大きく反応するのではないかと考えている。

ただし、骨材を選り分ける際に ALA と通常の骨材の違いは明らかであるが、本研究での非反応性骨材である石英斑岩砕石と反応性骨材の安山岩砕石は見分けが困難であるため、非反応性骨材が混ざり、ばらつきが出る可能性が高い。そのため、本研究では ALA ではない粗骨材をすべて混ぜて粉砕・使用し、ばらつきをできるだけ平均化するため、より多くの試験溶液を作製する必要があると考えている。

(2)ALA のポゾラン反応性について

本研究では、ASR・DEF 共に ALA のポゾラン反応性が影響していることが考えられるとした。しかし、本研究で用いた ALA のポゾラン反応性については直接的に確認していない。また、ALA のどの粒径までポゾラン反応性を示すのかを確認できていない。そのため、本研究で使用した ALA のポゾラン反応性を評価することが必要である。

ALA のポゾラン反応性の評価方法として山本らが考案した API 法¹²⁾がある。API 法では、モルタルバー試験による強度発現性とフライアッシュとセメントを混和した際のカルシウムイオンの消費量からポゾラン反応性を評価している。

山本らの試験では、強度試験用・ASR 試験用調合をフライアッシュを混和・無混和で作成し、混和・無混和の強度比と膨張率の関係を比べている。

化学試験では、フライアッシュと普通ポルトランドセメント、純水をポリプロピレン容器に入れ 1 時間攪拌した後、80℃恒温槽で養生し、その後 ICP で各種イオンを分析している。

(3)ALA による ASG について

本研究では, ALA によりアルカリが消費されたことで ASR を抑制したと考えた。一方で, ALA はアルカリと反応することで反応性骨材と同じく ASG を生成するとされている。

既往の研究では ALA による ASG 組成は外殻と内部で異なっていることや ALA とは異なるがフライアッシュのポゾラン反応によりカルシウムが減少することで ASG の組成が異なってくる事が知られている。このことから ASG の組成を分析し, ASG の膨張性を評価することが必要であると考えられる。

また, 既往の研究では ALA 内部の気孔により ASG の膨張を無害化する可能性が見られているが, 本研究では ALA の内部を観察できていない。そのため, ALA による ASG の生成については今後検討すべき事項が多い。

(4)ALA の DEF 膨張への影響について

DEF を促進する試験体の一部を ALA で置換したとき, ALA 細骨材を置換した場合はポゾラン反応が影響し DEF を低減した可能性が考えられた。一方で, ALA 粗骨材を使用した場合は ALA を置換しなかった場合に比べて若干ではあるものの膨張量が増加する結果となった。

ALA 粗骨材が膨張を増加した理由については DEF の発生への影響よりも, DEF 膨張へ影響したことが考えられ, ALA の粒径・粒形, また, 吸水率が影響している可能性がある。吸水率については ALA 粗骨材のもつ多量の内部水により骨材周囲の W/C が局所的に上昇し, 付着が弱まった可能性などが考えられるが, 原因についてははっきりとわからない。

ALA 粗骨材により DEF 膨張が増加した検証については X 線 CT により行えると考えている。仮に ALA 粗骨材により DEF 膨張が増加してしまった場合,

-
- 1)山本武志, 金津努:フライアッシュのポゾラン反応性とアルカリシリカ反応抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, 2000
 - 2)山本武志, 金津努:API 法によるフライアッシュのアルカリシリカ反応抑制効果の評価, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, 2006

謝辞

本研究を行うにあたり、寺本篤史准教授や大久保孝昭教授には日々の研究室での活動や研究など様々な場面で助言を頂き、本当に感謝しています。無事修士論文を書き上げ、卒業できるのも先生方の適切な助言があったからだと考えています。

研究室の同期、先輩、後輩どの世代の人にも恵まれ、研究室にいる3年間絶えず楽しく過ごすことができました

最後に大学院に通うわがまを聞いてもらい、大学生活を不自由なく過ごせるようにしてくれた両親、親族に感謝申し上げます。

これから私は大学を出て、一つの企業の一員となって働いていきますが、今後なにかで広島に帰ってきて広島の皆様に会うこともあるかもしれません。その時は私の知らない美味しいお店を紹介してもらうのを楽しみにしています。3年間ありがとうございました。