



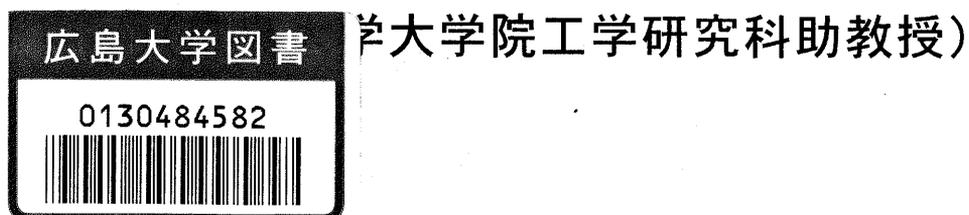
石炭灰を多量に使用した鉄筋コンクリート 部材の力学的特性に関する研究

(課題番号 13650630)

平成 13 年度～平成 14 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (C) (2))
研究成果報告書

平成 15 年 3 月

研究代表者 アヲキ 荒木 ヒデオ 秀夫





は し が き

本研究「石炭灰を多量に使用した鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究」は平成 13 年度～平成 14 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）により，産業廃棄物である石炭灰を建築構造分野に有効利用するための技術開発を目指して実施したものである。

研究組織

- 研究代表者 : 荒木 秀夫 (広島大学大学院工学研究科・助教授)
- 研究分担者 : 菅野 俊介 (広島大学大学院工学研究科・教授)
- 研究分担者 : 南 宏一 (福山大学工学部・教授)
- 研究分担者 : 玉井 宏章 (広島大学大学院工学研究科・助手)
- 研究分担者 : 椋山 健二 (広島大学大学院工学研究科・助手)

研究経費

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 13 年度	1,100 千円	0 円	1,100 千円
平成 14 年度	1,600 千円	0 円	1,600 千円
総計	2,700 千円	0 円	2,700 千円

研究発表

学会誌等発表論文

- (1) 中谷誠, 榎山健二, 荒木秀夫, 菅野俊介: 石炭灰を多量に用いたコンクリートの素材特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 2, pp.1609-1614, 2002年6月
- (2) Kenji Kabayama, Hideo Araki, Shunsuke Sugano: Experimental Study on Utilization of Coal Ash to R/C Members, Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, Vol. 1, pp.243-250, Sept. 2002
- (3) Hideo Araki, Shunsuke Sugano, Kenji Kabayama: Seismic Behavior of Reinforced Concrete Members Which Used Coal Ash, Proceedings of the 1st fib Congress 2002, Osaka, Vol.5, pp.577-584, Oct. 2002
- (4) 榎山健二, 中谷誠, 荒木秀夫, 菅野俊介: 石炭灰を活用した実大 RC 柱に関する実験的研究, 広島大学大学院工学研究科研究報告, 第51巻, 第1号, pp.31-36, 2002年12月
- (5) Kenji Kabayama, Hideo Araki, Shunsuke Sugano: Experimental Study on Seismic Behavior of R/C Members Containing High Volume Coal Ash, Proceedings of fib Symposium 2003, Athens, May 2003. (掲載決定)

口頭発表論文

- (1) 中谷誠, 成相覚, 榎山健二, 荒木秀夫, 菅野俊介: 高強度石炭灰コンクリートを用いた RC 柱の耐力および変形能, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第25号, pp.277-280, 2002年3月
- (2) 中谷誠, 榎山健二, 荒木秀夫, 菅野俊介, 南宏一: 石炭灰を使用した実大鉄筋コンクリート柱の耐震性能 その1. 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2巻, pp.343-344, 2002年8月
- (3) 荒木秀夫, 菅野俊介, 南宏一, 榎山健二, 中谷誠, 小林正和: 石炭灰を使用した実大 RC 柱の耐震性能に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第26号, pp.41-44, 2003年3月

- 目 次 -

第1章 序論	1
1-1 研究の背景	1
1-2 研究の経過	2
1-3 研究の目的	2
1-4 研究の方法	3
第2章 コンクリート構造体内の材料特性分布	4
2-1 コンクリートの使用材料と調合設計	4
2-1-1 コンクリートの使用材料	4
2-1-2 コンクリートの調合設計	5
2-2 試験体の作製と試験	5
2-2-1 コンクリート構造体の製作	5
2-2-2 コア抜きおよびコンクリート供試体の製作	7
2-2-3 試験方法	10
2-3 試験結果および考察	12
2-3-1 コア抜きしたコンクリート供試体の試験結果	12
(1) 比重の分布	12
(2) 高さ方向における圧縮強度の分布	12
(3) 断面内での圧縮強度の分布	12
(4) ヤング係数の分布性状	14
(5) ポアソン比の分布性状	15
(6) 引張強度の分布性状	16
2-3-2 標準水中養生したコンクリート供試体との比較	16
2-4 まとめ	19
第3章 実大鉄筋コンクリート柱の施工性と耐震性能	20
3-1 実大鉄筋コンクリート柱の概要	20
3-1-1 実大鉄筋コンクリート柱の外形と実験変数	20
3-1-2 配筋設計	21
3-1-3 コンクリートの調合	26
3-2 実大鉄筋コンクリート柱の施工試験	27
3-2-1 フレッシュコンクリートの性状	27
3-2-2 コンクリートの施工性	28
3-3 実大鉄筋コンクリート柱の載荷実験	31

3-3-1	試験体	31
3-3-2	実験方法	32
	(1) 制御計測システム	32
	(2) 載荷方法	32
	(3) 測定方法	36
3-3-3	使用材料の力学的特性	44
	(1) コンクリート	44
	(2) 鉄筋	47
3-4	載荷実験の結果と考察	48
3-4-1	軸圧縮性能	48
	(1) 軸方向に関する応力-ひずみ関係	48
	(2) ヤング係数	49
	(3) ポアソン比	50
3-4-2	水平抵抗特性	51
	(1) 損傷性状	51
	(2) 最大水平耐力	56
	(3) 水平力-水平変位履歴曲線	57
	(4) 水平変位分布	58
	(5) 曲率分布性状	59
	(6) 主筋のひずみ分布	61
	(7) 帯筋のひずみ分布	64
	(8) 中子筋のひずみ分布	66
3-4-3	実験結果の考察	68
	(1) 損傷進展性状	68
	(2) 履歴包絡線	71
	(3) エネルギー吸収能力	73
	(4) 既往の水平耐力評価式の適用	74
	(5) 除荷時の残留変形と変形性能	76
	(6) 傾きによる水平変形性状の検討	77
	(7) 曲げ変形性状の検討	79
3-4-4	寸法効果に関する考察	81
	(1) ヤング係数	81
	(2) ポアソン比	82
	(3) 最大水平耐力	83
3-5	まとめ	84
第4章 結語		86

謝辞	90
参考文献	91
付録-1 石炭灰に関する資料	付-1
付録-2 実大鉄筋コンクリート柱のひび割れ図	付-8
付録-3 石炭灰を活用した実大無筋コンクリート柱の実験概要	付-13
付録-4 石炭灰を活用した準実大鉄筋コンクリート柱の実験概要	付-17
発表論文	A-1

第1章 序論

1-1 研究の背景

石炭灰とは石炭の燃焼した残渣で、主に石炭火力発電所から排出され、日本における発生量は図 1-1 に示すように今日の電力事情から数年後には 1 千万トンを超えると推測されている¹⁾。1991 年制定の「再生資源の利用の促進に関する法律」（通称、リサイクル法）および 2001 年制定の「資源の有効な利用の促進に関する法律」（通称、資源有効利用促進法）において石炭灰は指定副産物に定められ有効利用の促進が求められている。日本では現在その 6 割程度がセメント原料や路盤材として活用されているが、残り 4 割は埋め立て等で処分されており、図 1-2 に示すようにその量は 2000 年で 200 万トンを超えている。更に、石炭灰は世界規模で今後の増量が確実視されており、今日の最優先課題である環境保全の観点から石炭灰有効利用技術の開発が急務の課題となっている²⁾。石炭灰の諸性状に関する資料を付録に示す。一方、コンクリートの原料はこれまで自然界からの採取に頼ってきたが、瀬戸内海地域における近年の海砂採取禁止措置に見られるように、その採取量には限界がある。しかし、コンクリートは今日の生活環境基盤を形成する主要な建設資材の一つで、今後も多量の需要が確実であり、その原料確保が緊急課題となっている。

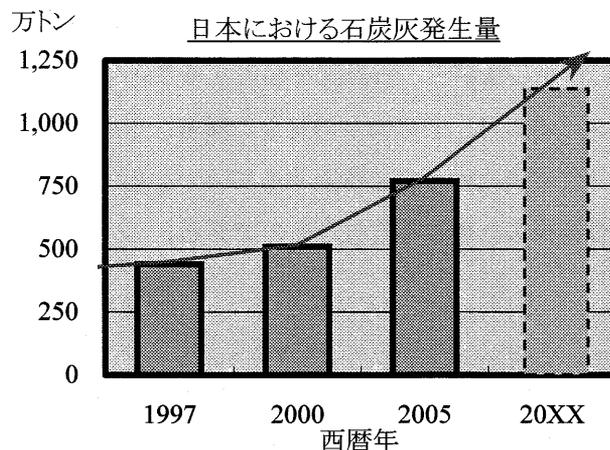


図 1-1 日本における石炭灰発生量の推移

日本での石炭灰推定発生量(2000年) ; 510 万トン

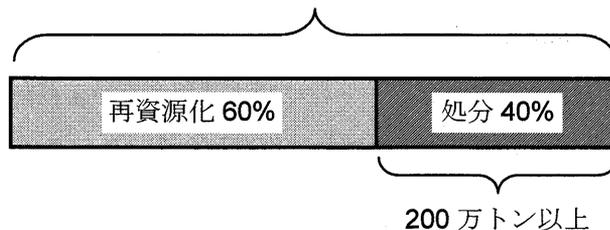


図 1-2 日本における石炭灰の処分量

石炭灰のなかでもフライアッシュは従来からコンクリートの高性能化を目的としてセメント原料や混和材に用いられ、その施工性や力学的特性についての性能把握が進んでいる^{3,4)}。近年ではフライアッシュやフライアッシュ以外の石炭灰を大量に使用したコンクリートについても研究^{5~13)}が進み、その性能が明らかになりつつある。石炭灰を大量に使用したコンクリートは普通コンクリートに比べ施工性や長期強度増大など多くの優れている点を持つ反面、初期強度の低さや中性化の懸念から、現在の用途は人工漁礁等の直接に強度や剛性を要求されないものに限定されている。これまでの研究もコンクリートそのものの物性について調べたものが多く、構造材料としての性能について調べたものはほとんどないのが現状である。

大量の石炭灰をコンクリートに混入し建物等の構造材料として使用できれば、膨大な消費を見込め、なおかつコンクリート原料の自然界からの採取量を減量できる。このような現状に鑑み、石炭灰を建築構造分野に有効利用するための技術開発に関して、石炭灰を混入したコンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材および構造体の構造安全性に関する研究が必要とされている。

1-2 研究の経過

すでに研究代表者等は科学研究費補助金（平成 11~12 年度，基盤研究(C)(2)，課題番号；11650587，課題名；石炭灰を多量に使用した鉄筋コンクリート部材の耐震特性に関する研究，研究代表者；荒木秀夫）等の研究助成費を受け、石炭灰を活用した鉄筋コンクリート建築物の実現に向け、各種の実験的研究を展開してきた。これまでに石炭灰を混入したコンクリートの建築構造材料としての力学的特性を把握し^{14,15)}、各種の縮小鉄筋コンクリート部材の載荷実験を実施して、石炭灰の混入が鉄筋コンクリート部材の構造安全性に及ぼす影響を検討した^{16~18)}。しかしながら、石炭灰を混入することで発生するコンクリート内部での粒度構成の変化は、試験体のサイズに応じて、その力学的特性に顕著な影響を及ぼす可能性があるため、実用に供するためには耐震性能や施工性を実大サイズで検証することが必要である。特に、耐震性能の把握は地震国である日本においては安全性確保のために不可欠なものである。

1-3 研究の目的

本研究では、石炭灰を建築構造材料としてリサイクルする資源循環型技術の実用化を目指し、石炭灰を大量に混入した鉄筋コンクリート建築物の構造性能、耐震性能および施工性を実大サイズの部材レベルで把握することを目的として、下記の項目に関して検討を行う。

- ・石炭灰を混入した実大サイズのコンクリート構造体における材料特性分布の把握
 - コンクリート構造体内部各点における比重，圧縮強度，引張強度，ヤング係数，ポアソン比の力学的特性の分布性状に関する検討
- ・石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱に関する施工性および耐震性能の検証
 - 実大サイズの構造部材の施工時におけるフレッシュコンクリートの性状およびコンクリート打設性能の把握
 - 実大サイズの構造部材の耐力，変形能力，エネルギー吸収能力等の耐震性能に関する検討

本研究を通して、構造安全性の見地から建築分野における石炭灰多量活用の有効性を検証する。

1-4 研究の方法

上記の目的の達成に向け、本研究では以下に示す①～③の試験および実験を実施する。

- ① 実大サイズのコンクリート構造体からコア抜きしたコンクリート供試体の素材試験
- ② 実際の建設工事に準じた手順による実大鉄筋コンクリート柱の施工試験
- ③ 実大鉄筋コンクリート柱の載荷実験

①のコア抜きしたコンクリート供試体の素材試験の結果は、それと同時に作成し標準水中養生したコンクリート供試体の試験結果と比較し、構造体内における力学的特性分布を検討する。②の施工試験で製作した実大鉄筋コンクリート柱を試験体として③の載荷破壊実験を実施する。この際、実験変数は石炭灰混入の有無、コンクリートの設計基準強度および試験体に加える軸力比とする。これらの結果を検討することで、石炭灰の混入が実大サイズの鉄筋コンクリート部材の構造特性に及ぼす影響を検証・評価することを試みる。

第2章 コンクリート構造体内の材料特性分布

石炭灰を活用したコンクリートを用いて実大サイズの柱型構造体1体を作成し、その各所からコア抜きしたコンクリート供試体の素材試験を実施して材料特性の分布性状を把握する。材料特性の基準値としては柱型構造体と同時に作成し標準水中養生したコンクリート供試体の試験結果を用いる。

2-1 コンクリートの使用材料と調合設計

2-1-1 コンクリートの使用材料

石炭灰

石炭灰には中国電力(株)新小野田発電所産の原粉を使用した。本研究ではより大量の石炭灰の有効利用を目指す目的に沿うため、JISフライアッシュに分級・精製される以前の原粉の採用を選択した。石炭灰の物理性状を表2-1に、粒度分布を図2-1に示す。原粉ではあるがJISフライアッシュⅡ種にほぼ匹敵する物理性状を有している。

表2-1 使用した石炭灰の物理性状

中国電力(株)新小野田発電所産

湿分 (%)	強熱減量 (%)	比重	ブレン値 cm^2/g	フロー値 (%)	MB吸着量 mg/g
0.1以下	3.20	2.13	3200	101	0.44

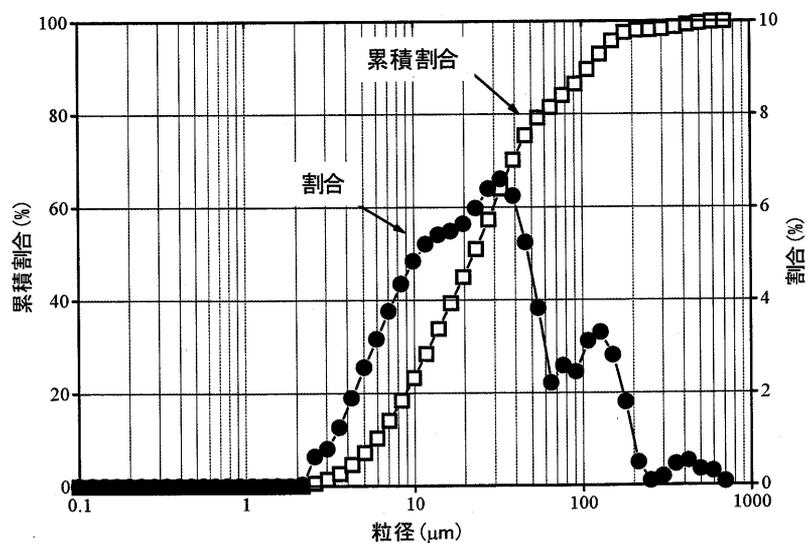


図2-1 使用した石炭灰の粒度分布

セメント

普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3,270\text{cm}^2/\text{g}$)を使用した。

細骨材

佐賀県呼子町産海砂（表乾比重 2.58, 吸水率 1.83%, FM2.70）と広島県産瀬戸砕砂（表乾比重 2.59, 吸水率 1.72%, FM2.80）を JIS の細骨材粒度の管理値内に納まるように体積比 7 : 3 で混合して使用した。

粗骨材

岡山県産芳井砕石（表乾比重 2.70, 吸水率 0.66%, FM6.74）と広島県産瀬戸砕石のうち最大寸法 20mm（表乾比重 2.65, 吸水率 0.79%, FM7.01）と最大寸法 15mm（表乾比重 2.65, 吸水率 0.71%, FM6.42）の砕石を容積比 7 : 3 で混合して JIS の粗骨材粒度の管理値内に納まるように調整して使用した。

高性能減水剤

高性能 AE 減衰剤レオビルド SP8LS を使用した。

AE 助剤

AE 助剤マイクロエア 785 を使用した。

練混ぜ水

福山市上水道水を使用した。

2-1-2 コンクリートの調合設計

石炭灰の混入方法は細骨材置換材とし、全細骨材体積の 20%に相当する石炭灰を混入した。コンクリートの調合では、設計基準強度 $F_c=27\text{N/mm}^2$ 、スランプ値 $18\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.0\%$ を目標として、事前に試し練りを行って調合設計を決定した。調合表を表 2-2 に示す。

表 2-2 使用した石炭灰の物理性状

セメント量	石炭灰量	水量	s/a	細骨材		粗骨材			混和剤	
				海砂	砕砂	砕石2015 (芳井町産)	砕石2015 (瀬戸町産)	砕石1505 (瀬戸町産)	減水剤	AE剤
320	124	180	43	239	361	290	285	448	2.24	1.6

【単位;kg/m³】

2-2 試験体の作製と試験

2-2-1 コンクリート構造体の製作

コンクリート構造体の寸法は実大の柱を想定し、高さ 2,350mm, 断面 800×800mm とした。その作製においては、実際の建設工事に準じてコンクリートは生コンプラントで練り、コンクリートミキサー車で搬送し、ポンプ圧送車で鋼製型枠に縦打ちで打設した。脱型は試験体の湿潤状態確保のために打設後 7 日以上経過してから行った。ただし、打設面である上面の養生は行っておらず、気中養生している。また、脱型後は実験棟内に放置して気中養生とし、温度管理は行っていない。（写真 2-1～写真 2-3）

コンクリート構造体の製作に併せて、同一バッチのコンクリートを用いてシリンダー型（直径 100mm×高さ 200mm）コンクリート供試体を作製した。これらの供試体は脱型後に標準水中養生している。

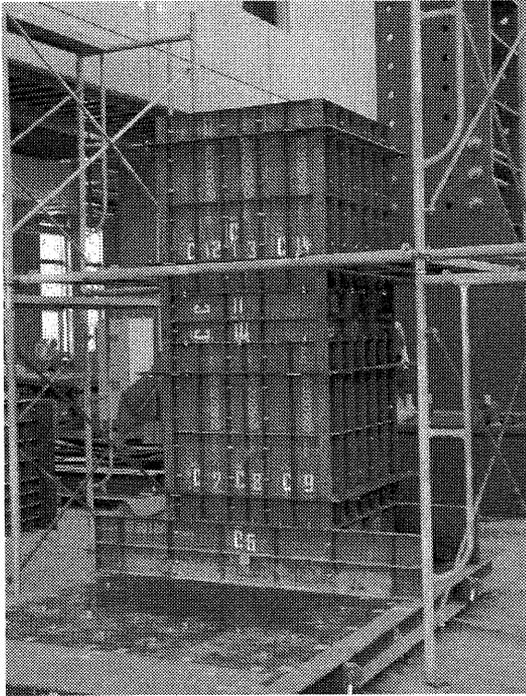


写真 2-1 鋼製型枠の全景



写真 2-2 コンクリート打設の状況

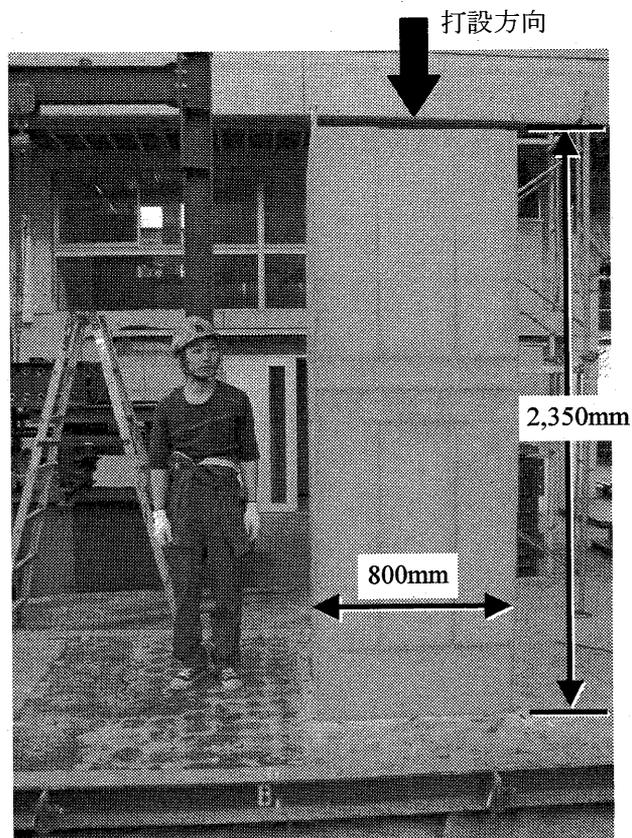


写真 2-3 脱型後のコンクリート構造体

2-2-2 コア抜きおよびコンクリート供試体の製作

コンクリート構造体のコア抜きは試験体の高さ方向に材令 28 日と材令 91 日において行った (写真 2-4)。コアボーリング位置を図 2-2 に示す。同図にある通り STA~STD が材令 28 日, LTA~LTC が材令 91 日におけるコア抜き位置である。いずれの材令時についてもコア抜き機で抜き出した長円柱を同一箇所でダイヤモンドカッターにて切断し (写真 2-5), 圧縮試験用のシリンダー型 (直径 100mm×高さ 200mm) コンクリート供試体を作製した (写真 2-6, 写真 2-7)。その両端面は圧縮試験前に研磨仕上げとしている。割裂試験用の供試体は図 2-2 に示す通り圧縮試験用供試体の間で採取しており, 高さが 75mm~100mm の間でばらつきがあることを付記する (写真 2-8)。



写真 2-4 コア抜きの風景



写真 2-5 コア抜きした長円柱をダイヤモンドカッターにて切断

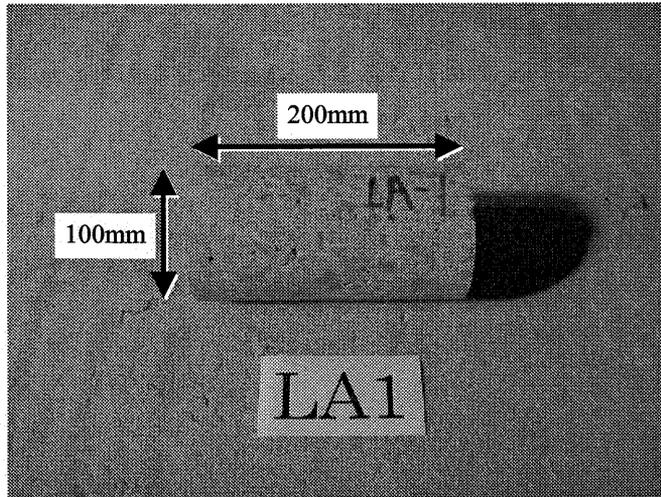


写真 2-6 圧縮試験用のコンクリート供試体寸法

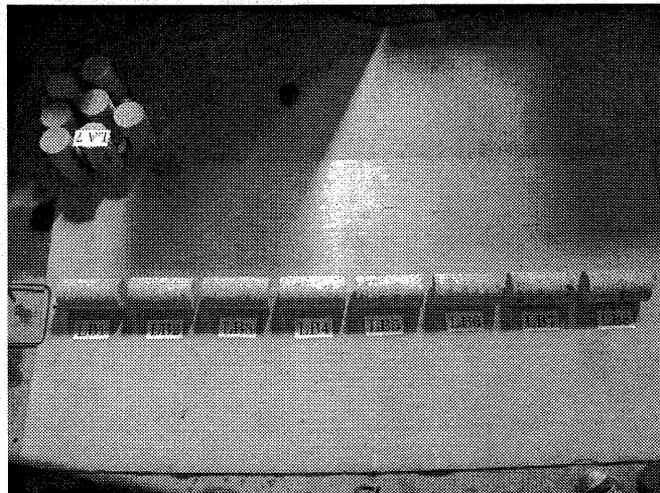


写真 2-7 圧縮試験用のコンクリート供試体

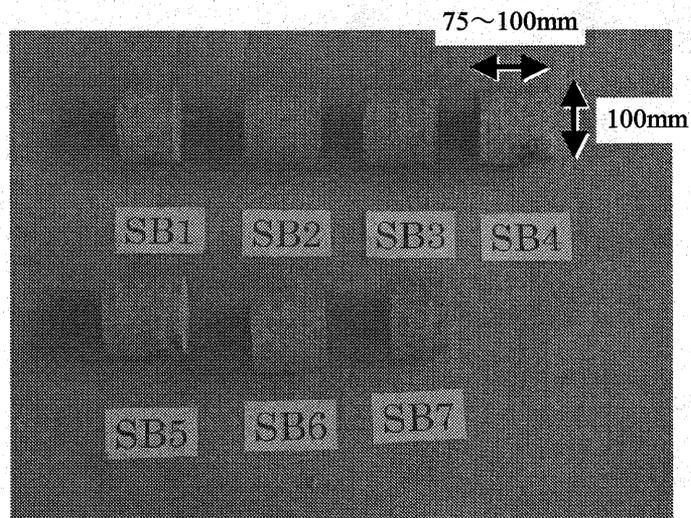


写真 2-8 割裂試験用のコンクリート供試体

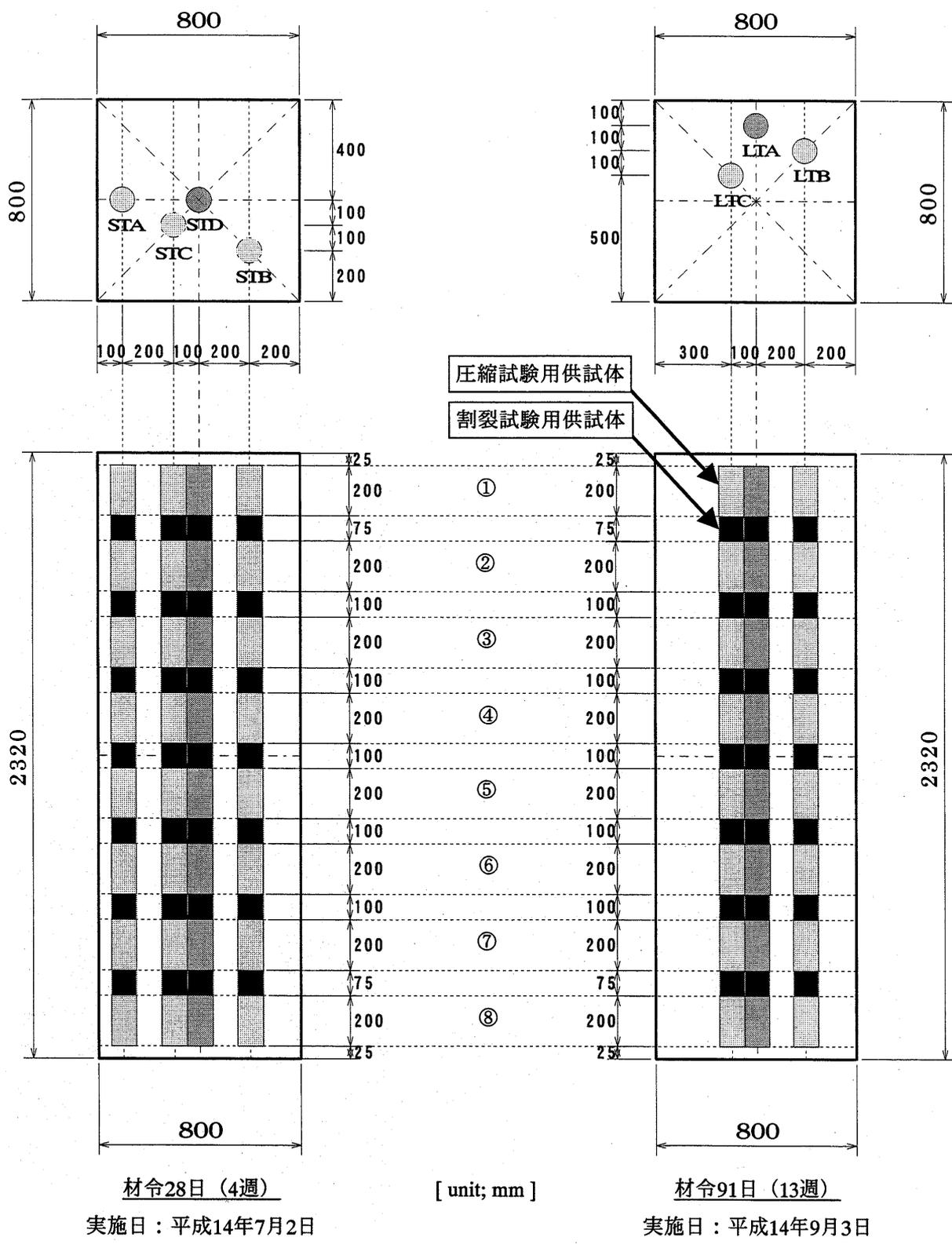


図 2-2 コンクリート構造体のコアボーリング位置

2-2-3 試験方法

各材令時ともにコア抜きしてコンクリート供試体を作製した後、速やかに比重測定、圧縮試験（JISA1108に準拠）および割裂試験（JISA1113に準拠）を実施した。圧縮試験、割裂試験の载荷装置には600kN アムスラー試験機を用いた。荷重は試験機からの検出値を測定し、圧縮試験ではテストピース側面中央部表裏に貼付した2枚のコンクリート用ひずみゲージ（㈱東京測器研究所製 PL-60-11）およびコンプレッソメーター（㈱東京測器研究所製 CMB-10）を用いてひずみデータを測定した。圧縮試験より圧縮強度、ヤング係数およびポアソン比を、割裂試験より引張強度を算定した。写真2-9に圧縮試験と割裂試験の様子を示す。また、コンクリート構造体と同時に作製し、標準水中養生としたコンクリート供試体についても、コア抜きから作製した供試体と同時に圧縮試験および割裂試験を実施し、各力学的特性を算定している。

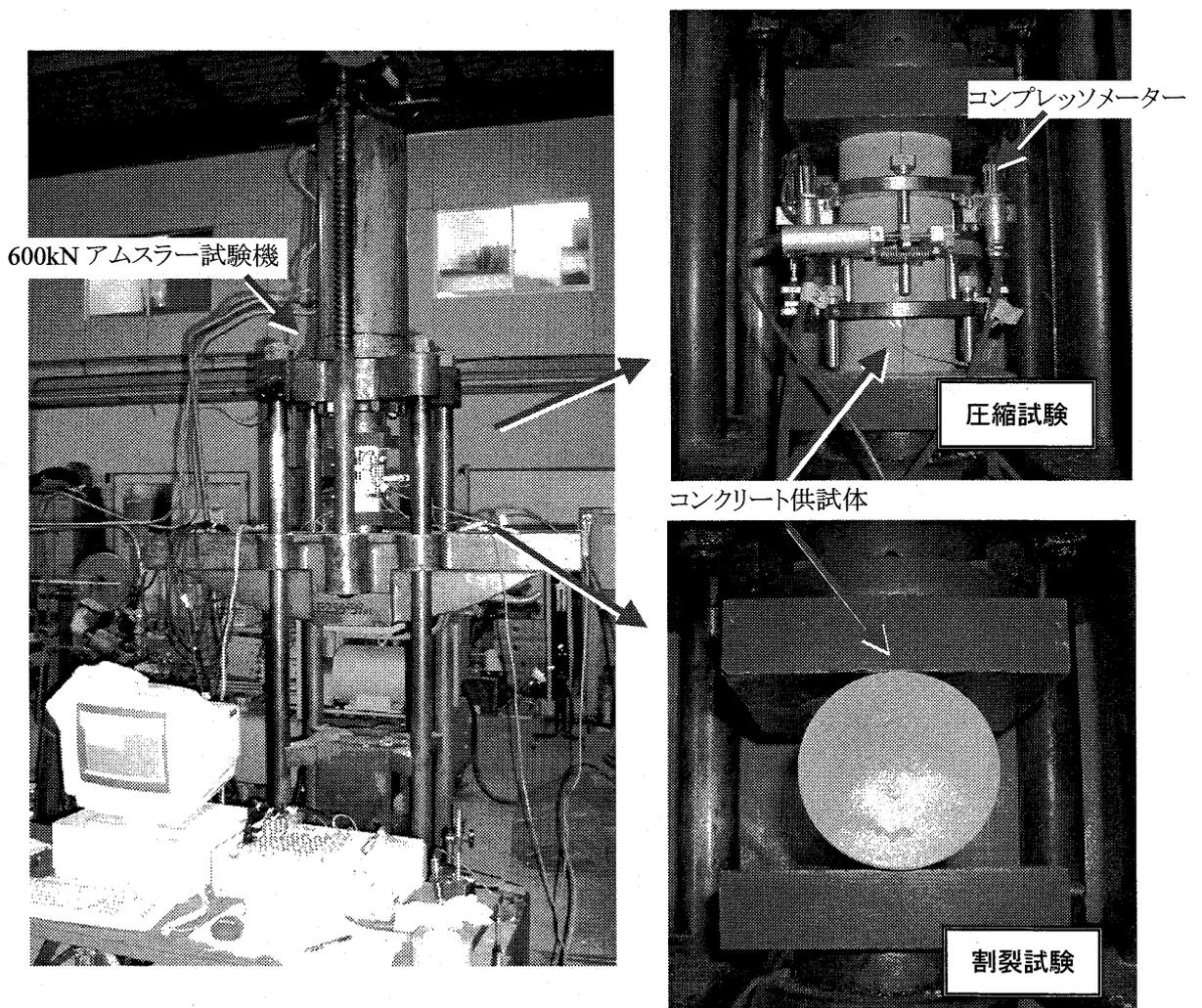


写真 2-9 コンクリート供試体の圧縮試験および割裂試験

圧縮試験および割裂試験による各力学的特性の算定方法を以下に記す。

圧縮強度

コンクリート供試体の圧縮強度は式 2-1 によって計算し、有効数字 3 桁まで求める。

$$\sigma_B = \frac{P_C}{\pi(d/2)^2} \dots\dots\dots (式 2-1)$$

ここに、 σ_B : 圧縮強度 (N/mm²)

d : $(d_1+d_2)/2$ (mm)

d_1, d_2 : コンクリート供試体の直交する 2 方向の直径

P_C : 圧縮試験における最大荷重 (N)

ヤング係数

コンクリート供試体のヤング係数は式 2-2 で計算し、有効数字 3 桁まで求める。

$$E = (S_1 - S_2) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \dots\dots\dots (式 2-2)$$

ここに、 E : ヤング係数 (N/mm²)

S_1 : 圧縮強度 σ_B の 1/3 に相当する応力度 (N/mm²)

S_2 : ひずみ度 50×10^{-6} の時点における応力度 (N/mm²)

ε_1 : 応力度 S_1 の時点におけるひずみ度

ε_2 : ひずみ度 50×10^{-6}

ポアソン比

コンクリート供試体のポアソン比はコンプレッソメーターで測定した横ひずみと縦ひずみから式 2-3 により計算する。

$$\nu = \text{横ひずみ} / \text{縦ひずみ} \dots\dots\dots (式 2-3)$$

ここに、 ν : ポアソン比

引張強度

コンクリート供試体の引張強度は式 2-4 で計算し、有効数字 3 桁まで求める。

$$\sigma_t = \frac{2P_t}{\pi d l} \dots\dots\dots (式 2-4)$$

ここに、 σ_t : 引張強度 (N/mm²)

P_t : 割裂試験における最大荷重 (N)

l : コンクリート供試体の長さ (mm)

2-3 試験結果および考察

2-3-1 コア抜きしたコンクリート供試体の試験結果

(1) 比重の分布

高さ方向における比重の分布の関係を図 2-3 に示す。上層部になるにつれて比重が小さくなり、特に最上層で顕著に小さいことが分かる。これは骨材の沈下およびコンクリート打設後の上面からの水分の蒸発に起因すると推察される。断面位置による差はなく、また、材令 28 日と材令 91 日とで有意な差は見られない。

(2) 高さ方向における圧縮強度の分布

高さ方向における圧縮強度の分布の関係を図 2-4 に示す。上層部になるにつれて強度が低くなる傾向を示している。この原因としては比重の場合と同様に骨材の沈下およびコンクリート打設後の上面からの水分の蒸発が考えられる。なお、断面位置による有意な差はない。

(3) 断面内での圧縮強度の分布

同一断面内での圧縮強度の分布を材令 28 日については図 2-5 に、材令 91 日については図 2-6 にそれぞれ示す。各図中の①～⑧の番号はコンクリート供試体の最上部位置からの順番を表す。材令 28 日の場合ではコンクリート構造体の柱中心軸から遠ざかるにつれて圧縮強度がやや小さくなる傾向が一部で認められる。試験体内部の温度差や水分の発散によるポゾラン反応の速度の違いがその原因として挙げられる。なお、材令 91 日の場合では柱中心軸位置の供試体がないため判断できない。

各位置における材令 91 日での圧縮強度を材令 28 日での圧縮強度で除して圧縮強度の増加比率を算定し、その値を図 2-7 に示す。いずれの高さにおいても、柱中心軸からの距離が 140mm と 280mm の位置ではほぼ一定であるが、300mm の位置で急激に増加比率が大きくなる傾向がわかる。

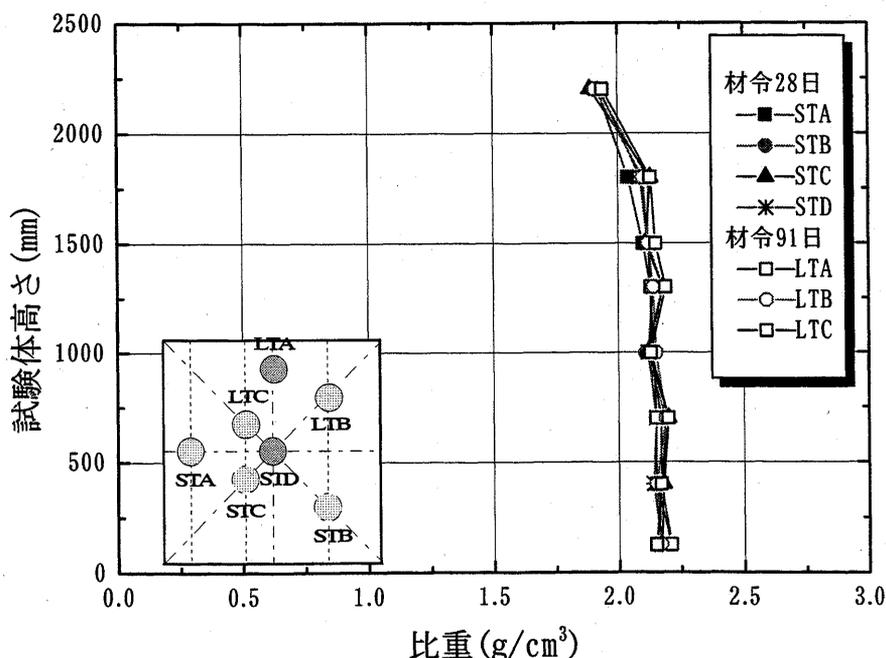


図 2-3 高さ方向における比重の分布

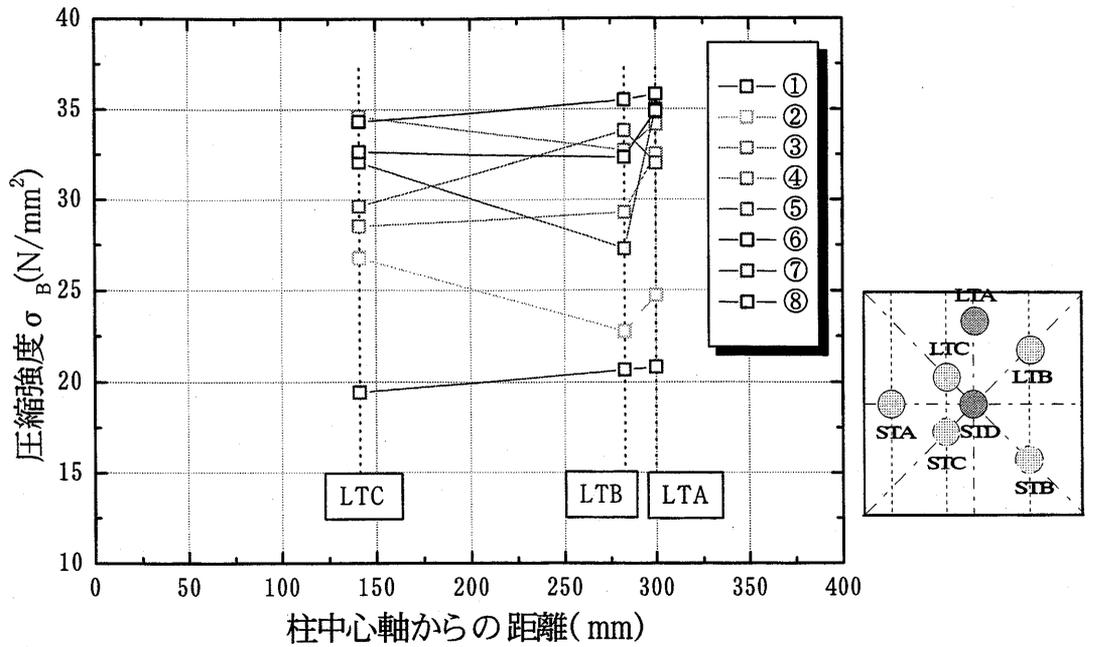


図 2-6 断面内での圧縮強度の分布 (材令 91 日時点)

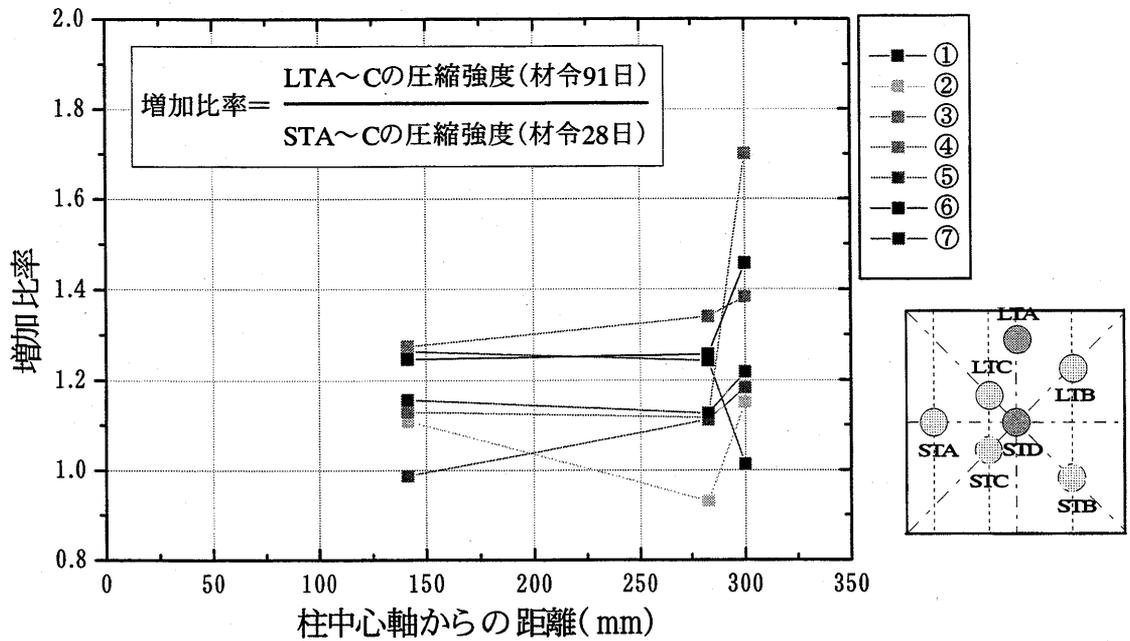


図 2-7 断面内での圧縮強度の増加比率

(4) ヤング係数の分布性状

高さ方向におけるヤング係数の分布性状を図 2-8 に示す。断面位置および材令に依らず、上層部になるにつれてヤング係数が小さくなる傾向を示しており、特に最上層で顕著に小さいことがわかる。

(5) ポアソン比の分布性状

高さ方向におけるポアソン比の分布性状を図 2-9 に示す。高さ方向における有意な差はない。材令 28 日の結果はばらつきが大きいのに対し、材令 91 日の場合は比較的安定しており、総体的に材令 28 日の場合より大きなポアソン比となっている。

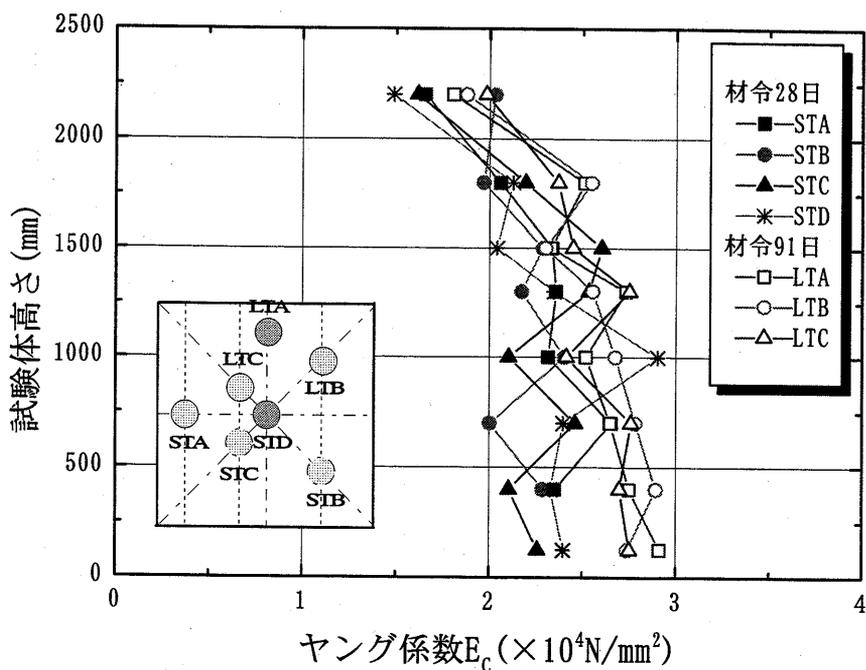


図 2-8 ヤング係数の分布性状

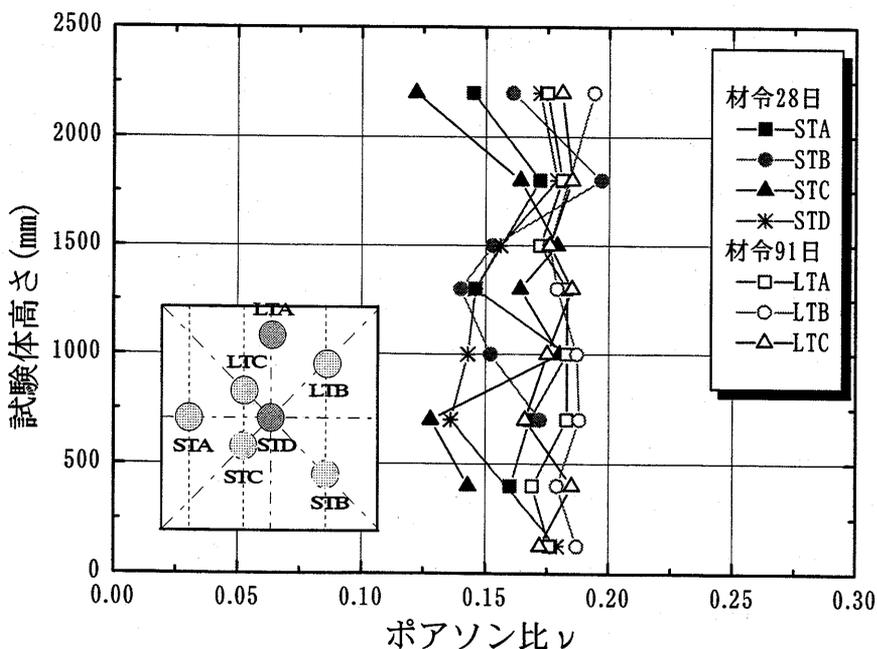


図 2-9 ポアソン比の分布性状

(6) 引張強度の分布性状

高さ方向における引張強度の分布性状を図 2-10 に示す。いずれもばらつきが大きいものの最上層の結果を除き高さ方向における有意な差は見られない。また、断面位置による差も見られない。

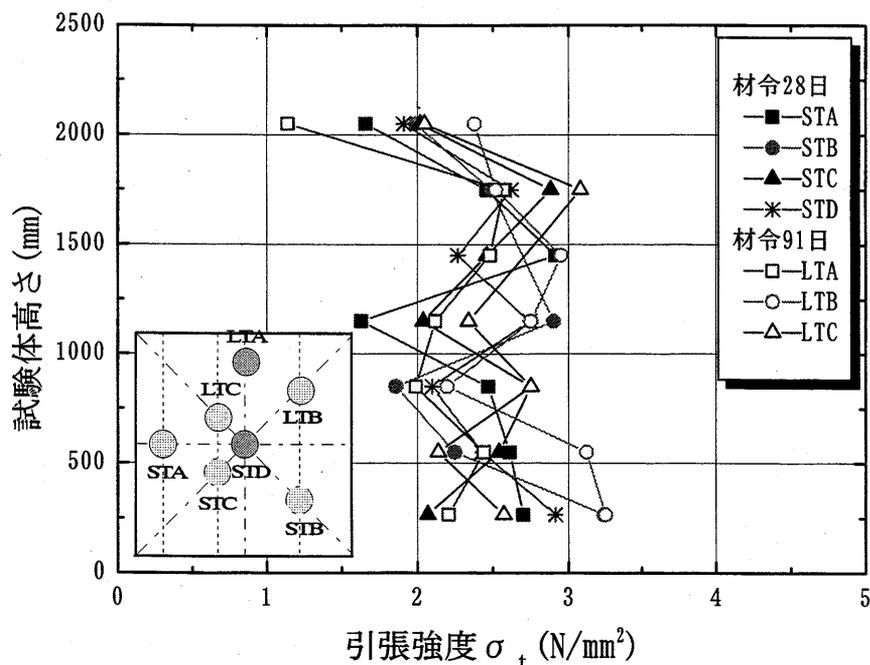


図 2-10 引張強度の分布性状

2-3-2 標準水中養生したコンクリート供試体との比較

コンクリート構造体からコア抜きして作製したコンクリート供試体の各力学的特性を標準水中養生したコンクリート供試体の結果で除して基準化し、高さ方向の分布として図 2-11～図 2-14 に示す。全ての力学的特性に関して材令 91 日に比較し、材令 28 日の場合のばらつきがやや大きいことがわかる。また、いずれの力学的特性も各材令時ともに断面位置による有意な差は見られない。なお、いずれの力学的特性とも最上部の位置でそれ以降の部分の傾向とは異なる性状を示している。この原因はコンクリート打設後の上面からの水分発散に起因すると考えられる。以下に各力学的特性に関して特徴を述べる。

圧縮強度に関しては（図 2-11），いずれの材令においてもコンクリート構造体の上端から約 1/3 以降の部分ではほぼ全点で標準水中養生したコンクリート供試体の結果より大きな値を示している。

ヤング係数に関しては（図 2-12），いずれの材令においてもコンクリート構造体の中間以降の部分で標準水中養生したコンクリート供試体の結果と同等かやや大きな値を示している。

ポアソン比に関しては（図 2-13），いずれの材令においてもコンクリート構造体の高さ位置に依らず標準水中養生したコンクリート供試体の結果をやや下回る値となった。

引張強度に関しては（図 2-14），ばらつきが大きいものの、いずれの材令においても総体的に標準水中養生したコンクリート供試体の結果をやや上回る値となっている。

コンクリート構造体のポアソン比を除く各力学的特性は特に下層部において標準水中養生したコンクリート供試体の結果を上回る傾向にあり、その原因として、骨材の下層部への沈降および試験体内部での発熱によるポゾラン反応増進が考えられる。

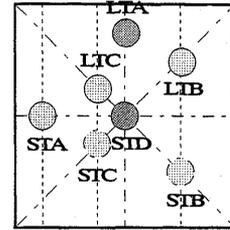
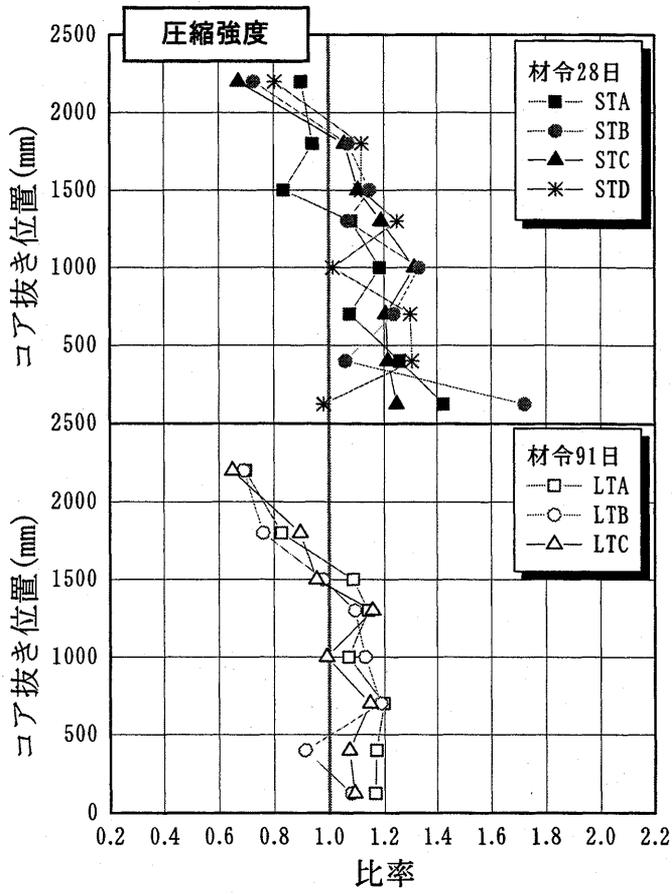


図 2-11 基準化した圧縮強度の分布性状

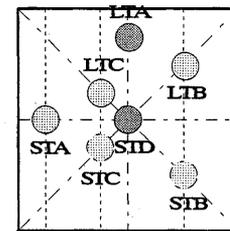
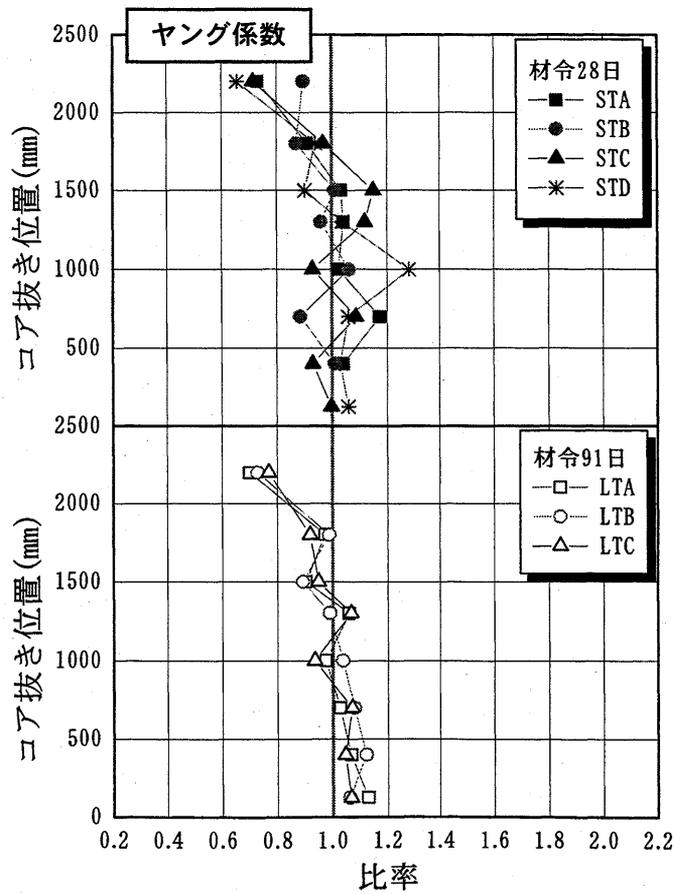


図 2-12 基準化したヤング係数の分布性状

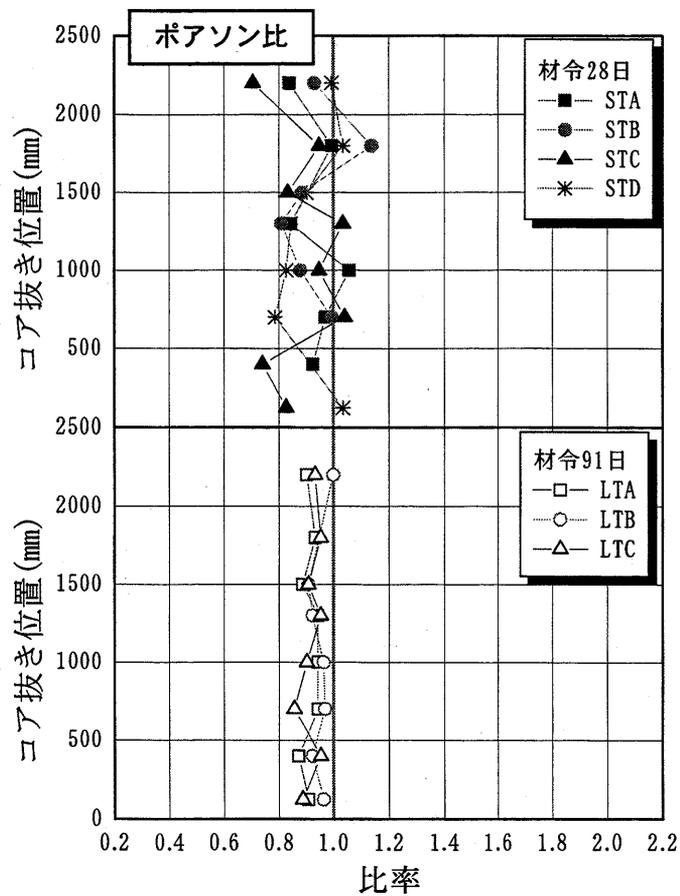


図 2-13 基準化したポアソン比の分布性状

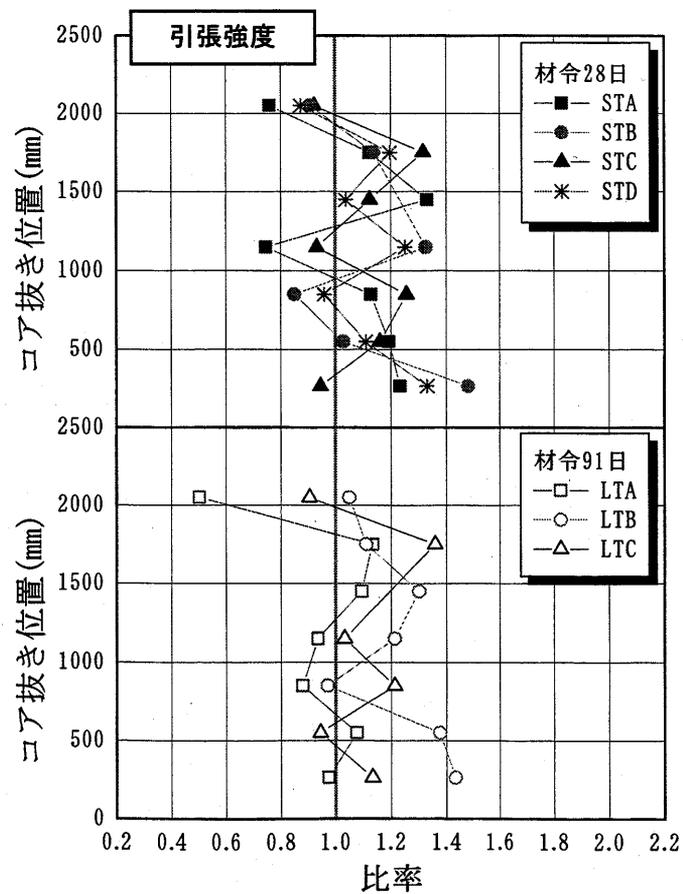


図 2-14 基準化した引張強度の分布性状

2-4 まとめ

石炭灰を活用したコンクリートによる実大サイズの柱型構造体に関して、材料特性の分布性状を把握するために構造体各所からコア抜きしたコンクリート供試体の素材試験を実施した。その結果の検討および標準水中養生したコンクリート供試体の試験結果との比較から以下の知見を得た。

- ・比重は上層部になるにつれて小さくなり、特に最上層で顕著に小さい。断面位置、材令による有意な差は見られない。
- ・圧縮強度は上層部になるにつれて低くなる傾向を示し、いずれの材令においてもコンクリート構造体の上端から約 1/3 以降の部分で、標準水中養生したコンクリート供試体の結果より大きな値を示した。同一断面内において、コンクリート構造体の柱中心軸から遠ざかるにつれて圧縮強度がやや小さくなる傾向が一部で認められた。
- ・ヤング係数に関しては、断面位置および材令に依らず、上層部になるにつれて値が小さくなる傾向を示し、コンクリート構造体の中間以降の部分で標準水中養生したコンクリート供試体の結果と同等かやや上回る値を示した。
- ・ポアソン比に関しては、高さ位置による有意な差はないが、長期材令時に増加する傾向が見られた。高さ位置、断面位置、材令に依らず、標準水中養生したコンクリート供試体の結果をやや下回る値となった。
- ・引張強度に関しては、ばらつきが大きいものの、高さ方向による差は見られず、総体的に標準水中養生したコンクリート供試体の結果をやや上回る値となった。
- ・コンクリート構造体のポアソン比を除く各力学的特性は特に下層部において標準水中養生したコンクリート供試体の結果を上回る傾向にあり、その原因として、骨材の下層部への沈降および試験体内部での発熱によるポゾラン反応増進が考えられる。

第3章 実大鉄筋コンクリート柱の施工性と耐震性能

石炭灰を活用したコンクリートの建設工事における施工性を検証するために、石炭灰の混入とコンクリートの設計基準強度を変数として、一般的な施工手順に準じて実大サイズの鉄筋コンクリート柱を製作し、フレッシュコンクリートの性状およびコンクリート打設性能を確認した。更に製作した実大鉄筋コンクリート柱を試験体として、軸圧縮荷重実験および一定軸力下の水平荷重破壊実験を実施し、石炭灰の混入が実大サイズの鉄筋コンクリート部材の構造特性に及ぼす影響を検証・評価する。

3-1 実大鉄筋コンクリート柱の概要

3-1-1 実大鉄筋コンクリート柱の外形と実験変数

試験体とする実大鉄筋コンクリート柱 3 体は同一形状で、文献¹⁹⁾の設計例を参考にして、柱部分は断面 800×800mm 角、高さ 2,400mm の外形とし、その上下に荷重装置に固定するためのスタブが取り付けられている。その外形を写真 3-1 に示す。実験変数は石炭灰混入の有無とコンクリートの設計基準強度とし、試験体名は表 3-1 に示す通り FS27CA、FS36CA および FS36NC である。低層建物の最下層柱を想定した FS27CA では、コンクリートの設計基準強度 F_c を 27N/mm^2 とし、石炭灰を細骨材置換材として細骨材全体積の 20% に相当する量を混入する。一方、中層建物の最下層柱を想定した FS36CA と FS36NC では、コンクリート設計基準強度 F_c を 36N/mm^2 とする。FS36CA では石炭灰を FS27CA と同様に細骨材置換材として細骨材全体積の 20% を混入し、FS36NC では石炭灰を混入せず普通コンクリートを用いる。FS36NC は石炭灰混入の影響を検討するための比較対象である。なお、荷重実験では実建物における軸力を勘案し、低層建物を想定した FS27CA では、軸力比 $\eta = 0.1$ に相当する軸力を導入し、中層建物を想定した FS36CA と FS36NC では、軸力比 $\eta = 0.2$ に相当する軸力を導入する。

表 3-1 試験体の一覧

試験体名	想定建物	F_c (N/mm^2)	η	コンクリート種別	石炭灰混入方法
FS27CA	低層	27	0.1	石炭灰コンクリート	細骨材置換 (体積比20%)
FS36CA	中層	36	0.2	石炭灰コンクリート	細骨材置換 (体積比20%)
FS36NC	中層	36	0.2	普通コンクリート	なし

F_c : コンクリート設計基準強度

η : 軸力比, $\eta = N / (F_c \cdot b \cdot D)$

N: 軸力, b: 柱断面の幅, D: 柱断面の全せい

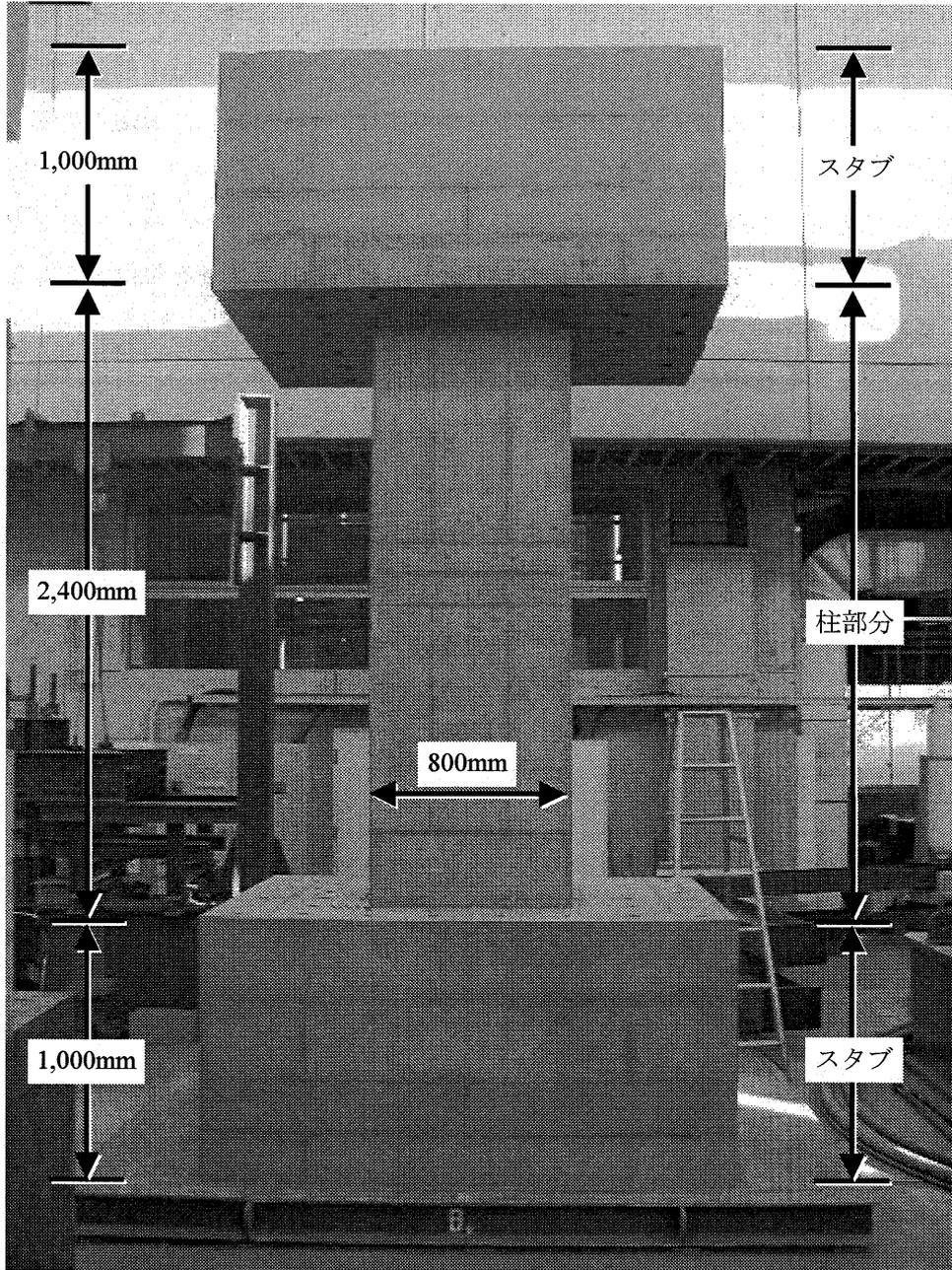


写真 3-1 実大鉄筋コンクリート柱の外形

3-1-2 配筋設計

実大鉄筋コンクリート柱の配筋設計では、文献¹⁹⁾に記載されている設計例を参考として、いずれの試験体とも荷重実験における水平荷重により、せん断破壊に先立ち主筋の曲げ降伏が発生する曲げ降伏先行型となるよう計画した。また、付着割裂破壊に対しても安全となるよう設計している。FS27CAの配筋詳細を図3-1に、配筋状況を写真3-2にそれぞれ示し、同一配筋であるFS36CAとFS36NCの配筋詳細を図3-2に、配筋状況を写真3-3にそれぞれ示す。いずれの柱においても、主筋にはSD345のD25を16本配しており、引張鉄筋比は $p_t=0.55\%$ （二段筋まで考慮）である。主筋間のあきは160mmとし、主筋の両端部は定着確保

のために 800mm 角，厚さ 9mm のエンドプレートを溶接する機械式定着を採用した。なお，エンドプレートの中央にはこのコンクリート打設のために直径 400mm の充填孔が開いている。かぶりコンクリートの厚さは主筋中心から 80mm である。帯筋についてはコンクリート設計基準強度と軸力レベルの相違から仕様が異なっている。FS27CA では口字型とした SD295 の D16 (135° フック) を 100mm 間隔で配しており，帯筋比は $p_w=0.50\%$ である。一方，FS36CA と FS36NC では高強度鉄筋 USD1275 の U10.7 を罫字型に溶接閉鎖して 150mm 間隔で配しており，帯筋比としては $p_w=0.30\%$ となる。帯筋比は FS27CA に比較し小さいが，高強度鉄筋を使用していることからせん断補強効果は高い。柱部分の上下に取り付くスタブでは主筋，あばら筋ともに D25 を使用しており，柱体部分に比較して十分に高い剛性と強度を保持するよう考慮してある。また，スタブにおけるかぶりコンクリートの厚さは 100mm とした。

実大鉄筋コンクリート柱の設計時における曲げ終局耐力とせん断終局耐力，および両者の比から求めたせん断余裕度を比較して，表 3-2 に示す。文献²⁰⁾に示されている算定式に準拠し，曲げ終局耐力の算定では同表脚注の式 3-1 を，せん断終局耐力の算定では式 3-2 をそれぞれ使用した。なお，曲げ終局耐力の算定では，引張鉄筋として最外縁の主筋だけ考慮した場合 (5-D25) と二段筋まで考慮した場合 (7-D25) について求めており，同表に示されている通り，いずれの場合も曲げ終局耐力がせん断終局耐力を下回る曲げ降伏先行型となっている。なお，材料強度には設計基準強度および公称強度を用いている。

表 3-2 設計時における終局耐力

試験体名	考慮した主筋の本数	曲げ終局耐力 (kN)	せん断終局耐力 (kN)	せん断余裕度
FS27CA	7-D25	1170	1320	1.13
	5-D25	981	1266	1.29
FS36CA	7-D25	1855	1963	1.06
FS36NC	5-D25	1669	1904	1.14

曲げ終局耐力： cQ_{MU}

$$cQ_{MU} = M_U / h \dots\dots\dots (式 3-1)$$

$$\text{終局曲げモーメント； } M_U = 0.8 a_t \sigma_{SY} D + 0.5 N D \left(1 - \frac{N}{b D F_c} \right)$$

a_t ：引張鉄筋断面積， b ：柱断面幅， D ：柱断面せい， h ：柱高さ，

N ：軸力， F_c ：コンクリート設計基準強度， σ_{SY} ：主筋の降伏強度

せん断終局耐力： cQ_{SU}

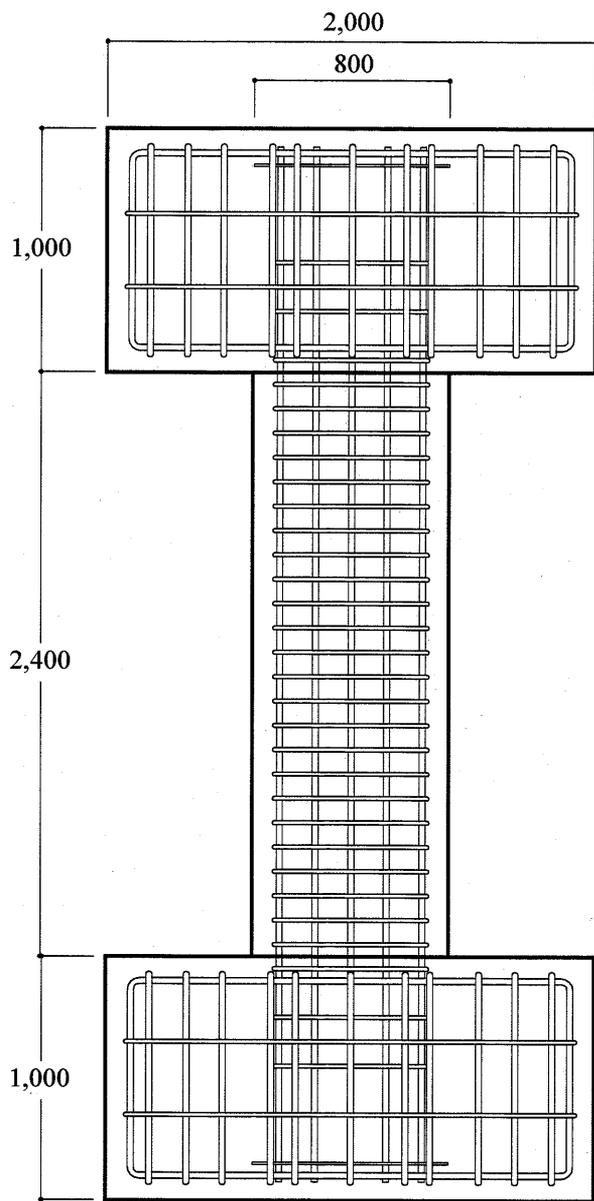
$$cQ_{SU} = (\tau_U + 0.1 \sigma_0) b j \dots\dots\dots (式 3-2)$$

$$\text{せん断終局応力度； } \tau_U = \frac{0.092 k_U k_P (180 + F_c)}{(M/Qd) + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \sigma_{WY}}$$

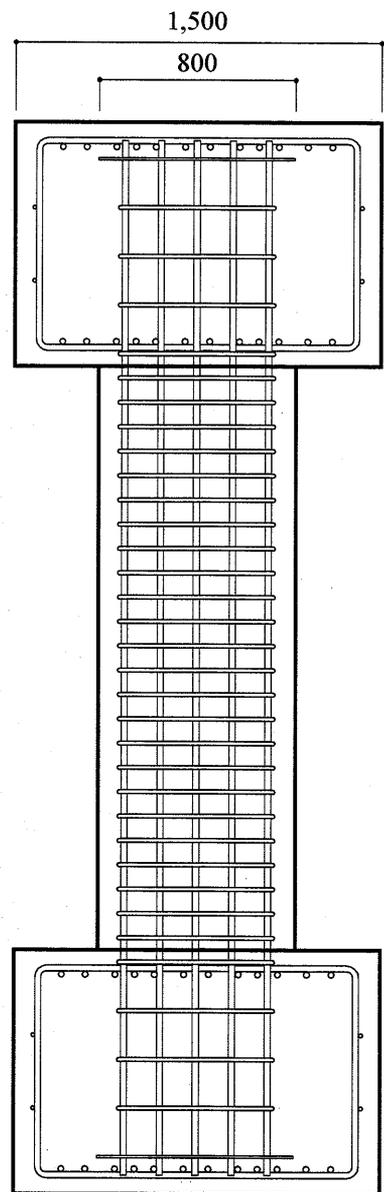
$$\text{平均軸方向応力度； } \sigma_0 = N / (b D)$$

j ：応力中心間距離， k_U ， k_P ：断面寸法による補正係数，

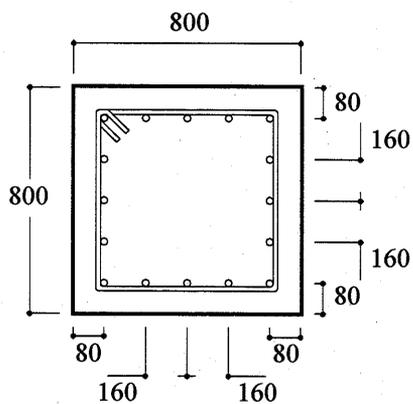
M/Qd ：せん断スパン比， p_w ：帯筋比， σ_{WY} ：帯筋の降伏強度



加力方向



加力直交方向



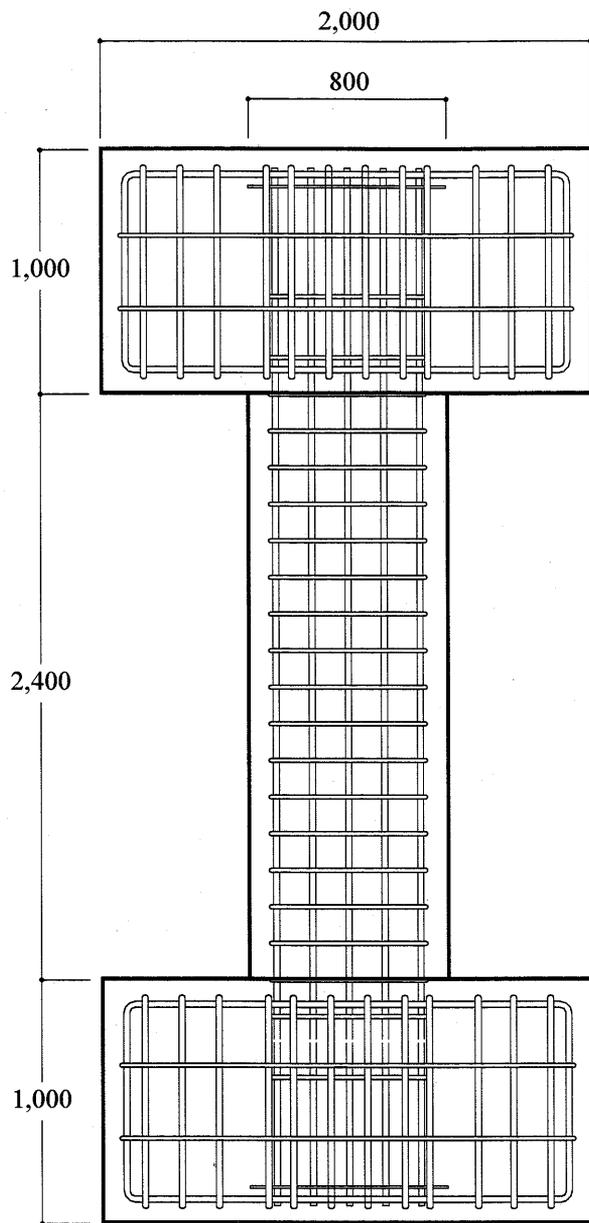
柱部分断面

配筋情報

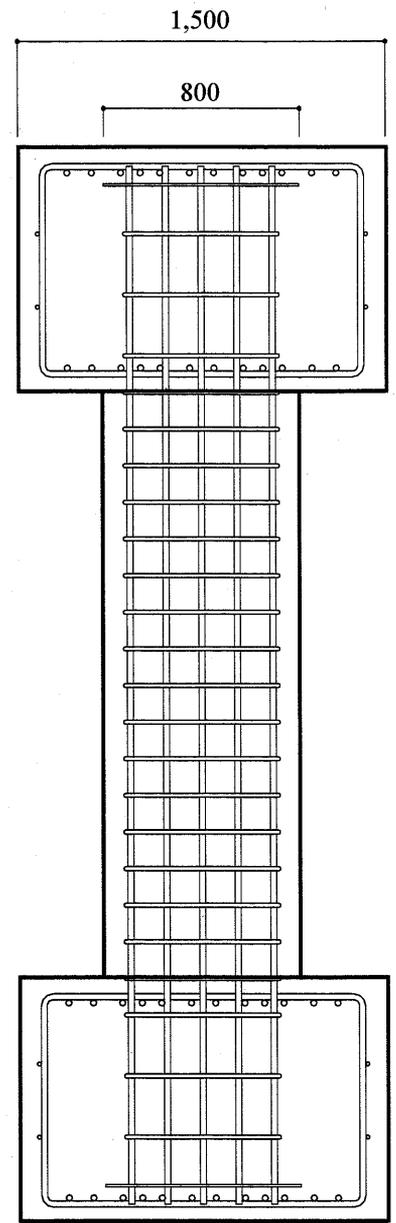
主筋 ; 16-D25 (SD345)
 主筋のあき ; 160mm
 引張鉄筋比 ; 0.55%
 帯筋 ; D16(SD295, 135° フック)
 帯筋間隔 ; @100mm
 帯筋比 ; 0.5%

【Unit ; mm】

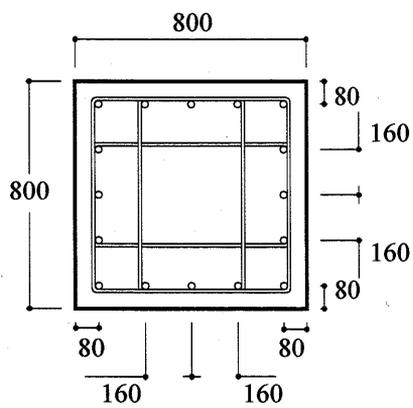
図 3-1 FS27CA の配筋



加力方向



加力直交方向



柱部分断面

配筋情報

主筋 ; 16-D25 (SD345)

主筋のあき ; 160mm

引張鉄筋比 ; 0.55%

帯筋 ; U10.7(高強度溶接閉鎖型, SD1275)

帯筋間隔 ; @150mm

帯筋比 ; 0.30%

【Unit ; mm】

図 3-2 FS36CA と FS36NC の配筋

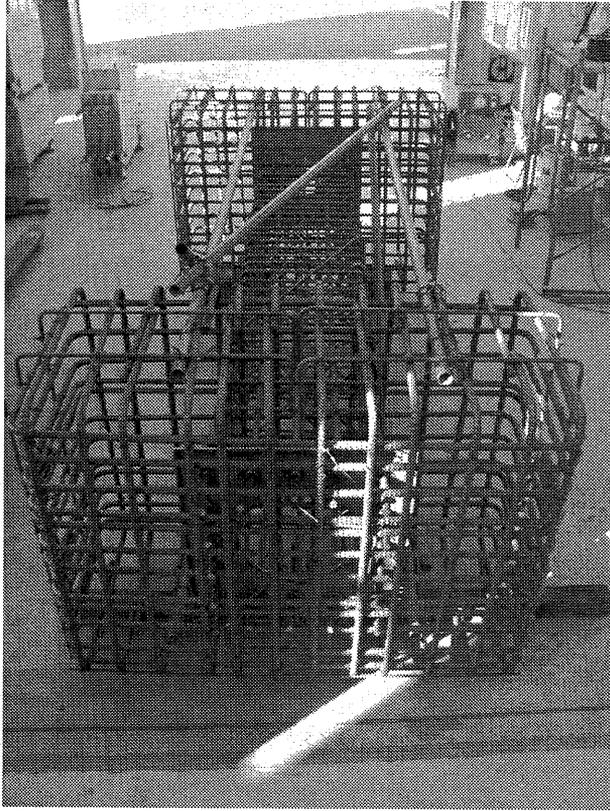


写真 3-2 試験体配筋状況 (FS27CA)

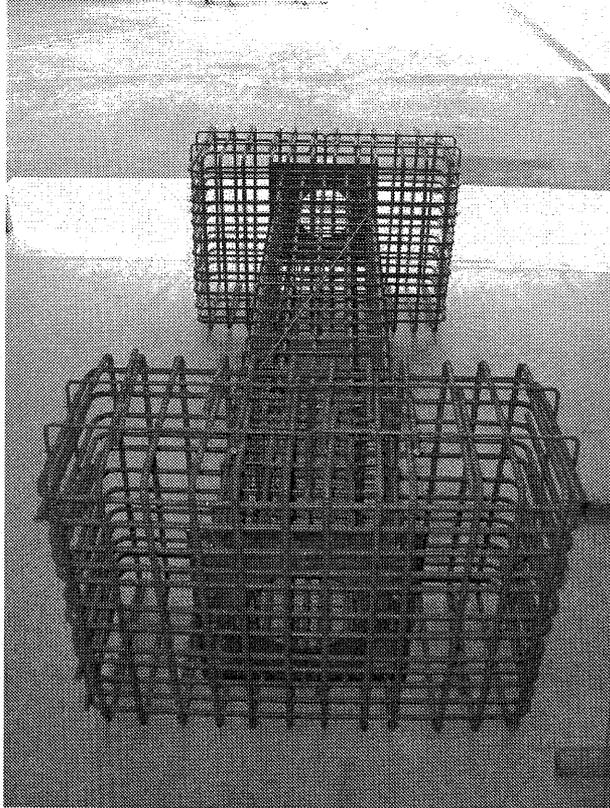


写真 3-3 試験体配筋状況 (FS36CA)

3-1-3 コンクリートの調合

各実大鉄筋コンクリート柱のコンクリートの調合を表 3-3 に示す。設計強度は FS27CA で 27N/mm^2 、FS36CA と FS36NC で 36N/mm^2 を目標値とし、スランプ値 $18\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.0\%$ を目標にして試し練りを行い、各コンクリートの調合を決定した。FS27CA と FS36CA では細骨材全体積の 20% を石炭灰の原粉で置換している。FS36CA では石炭灰を混入せず、普通コンクリートを使用している。実大鉄筋コンクリート柱の製作に併せて、コンクリートの強度管理のために直径 100mm、高さ 200mm のシリンダー型コンクリート供試体を作成した。これらのコンクリート供試体は打設後 1 日で脱型を行い、水温 20°C に管理した水槽中で標準水中養生としている。以下にコンクリートの各使用材料の概要を記す。

表 3-3 コンクリートの調合

試験体名	セメント (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	石炭灰 (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)	混和剤 (%)
FS27CA	320	180	124	600	1023	1.12
FS36CA	400	180	124	577	983	5.6
FS36NC	439	180	0	725	947	3.7

石炭灰

石炭灰には中国電力（株）新小野田発電所産の原粉を使用した。本研究ではより大量の石炭灰の有効利用を目指す目的に沿うため、JIS フライアッシュに分級・精製される以前の原粉の採用を選択した。石炭灰の物理性状と粒度分布は第 2 章において表 2-1 および図 2-1 に示した通りである。

セメント

普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 、比表面積 $3,270\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。

細骨材

佐賀県呼子町産海砂（表乾比重 2.58、吸水率 1.83%、FM2.70）と広島県産瀬戸砕砂（表乾比重 2.59、吸水率 1.72%、FM2.80）を JIS の細骨材粒度の管理値内に納まるように体積比 7:3 で混合して使用した。

粗骨材

岡山県産芳井砕石（表乾比重 2.70、吸水率 0.66%、FM6.74）と広島県産瀬戸砕石のうち最大寸法 20mm（表乾比重 2.65、吸水率 0.79%、FM7.01）と最大寸法 15mm（表乾比重 2.65、吸水率 0.71%、FM6.42）の砕石を容積比 7:3 で混合して JIS の粗骨材粒度の管理値内に納まるように調整して使用した。

高性能減水剤

高性能 AE 減衰剤レオビルド SP8LS を使用した。

AE 助剤

AE 助剤マイクロエア 785 を使用した。

練混ぜ水

福山市上水道水を使用した。

3-2 実大鉄筋コンクリート柱の施工試験

3-2-1 フレッシュコンクリートの性状

実大鉄筋コンクリート柱の製作において、一般の建設工事の手順に準拠して、フレッシュコンクリートは生コンプラントで製造したものをコンクリートミキサー車により運搬し、ポンプ圧送車を用いて打設した。FS27CAは12月下旬、FS36CAは6月下旬、FS36NCは7月上旬にコンクリート打設を実施し、その際の外気温はFS27CAで11度、FS36CAで25度、FS36NCで27度であった。いずれの実大鉄筋コンクリート柱においても2バッチずつのフレッシュコンクリートを使用している。荷卸し時におけるフレッシュコンクリートの性状を把握するために、バッチごとにスランプ試験（JISA1101に準拠）および空気量試験（JISA1128に準拠）を実施した。その結果を表3-4に示す。また、スランプ試験および空気量試験の状況を写真3-4に例示する。スランプ値、空気量ともに石炭灰混入の有無に関わらず、2回の打設とも目標範囲内であることを確認した。従って、石炭灰を混入したコンクリートについても、適切な調合設計を実施することで目標の品質を確保でき、生コンプラントで製造したレディーミクストコンクリートとしての提供が可能であることを示した。

表3-4 フレッシュコンクリート材料試験結果

試験体名	スランプ値(cm)		空気量(%)	
	目標値(18±2.5)		目標値(4.5±1.0)	
	一回目	二回目	一回目	二回目
FS27CA	19.0	20.0	5.0	5.1
FS36CA	19.5	17.5	4.5	5.5
FS36NC	20.5	18.1	3.5	3.5



写真3-4 スランプ試験および空気量試験の状況 (FS36CA)

3-2-2 コンクリートの施工性

コンクリート打設においては、いずれの試験体ともに同一の鋼製型枠を使用して縦打ちとした。組み立てた鋼製型枠の全景を写真 3-5 に示す。打設を 2 回に分けて実施するために柱部分の中央位置に打設口が設けてある。なお、底部には剛強な底定盤を設けて型枠全体の組み上げ精度を維持できるよう工夫してある。

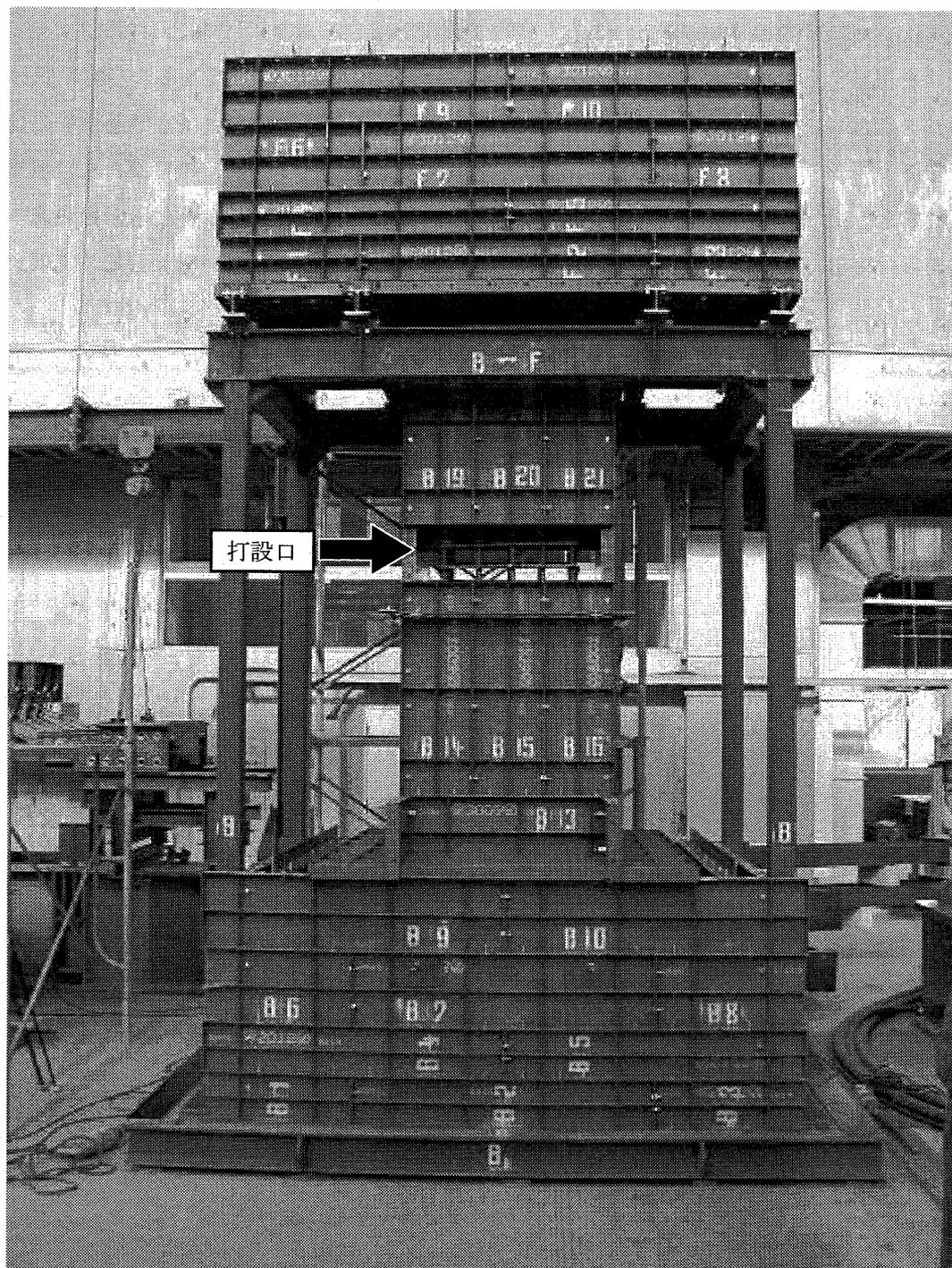


写真 3-5 鋼製型枠の全景

コンクリートの打設はポンプ圧送車を用いて実施した。その状況を写真 3-6 に示す。打設では打ち継ぎ面の性状を調べるために、第 1 回目の打設では柱中間部の打設口からその位置に達するまでコンクリートを注入し、30 分間放置の後に柱中間部の打設口を塞ぎ、新たに練混・運搬したフレッシュコンクリートをスタブ頂部まで打設した。なお、この時に打ち継ぎ面の処理は行っていない。打設中は棒形振動機と型枠振動機を使用して締固めを行った。柱部分内部の打設状況を写真 3-7 に示す。石炭灰を混入した FS27CA と FS36CA における打設でも、普通コンクリートの FS36NC と同様にコンクリートの充填性は良好であり、ブリージングはいずれの場合も目視ではほとんど見られなかった。

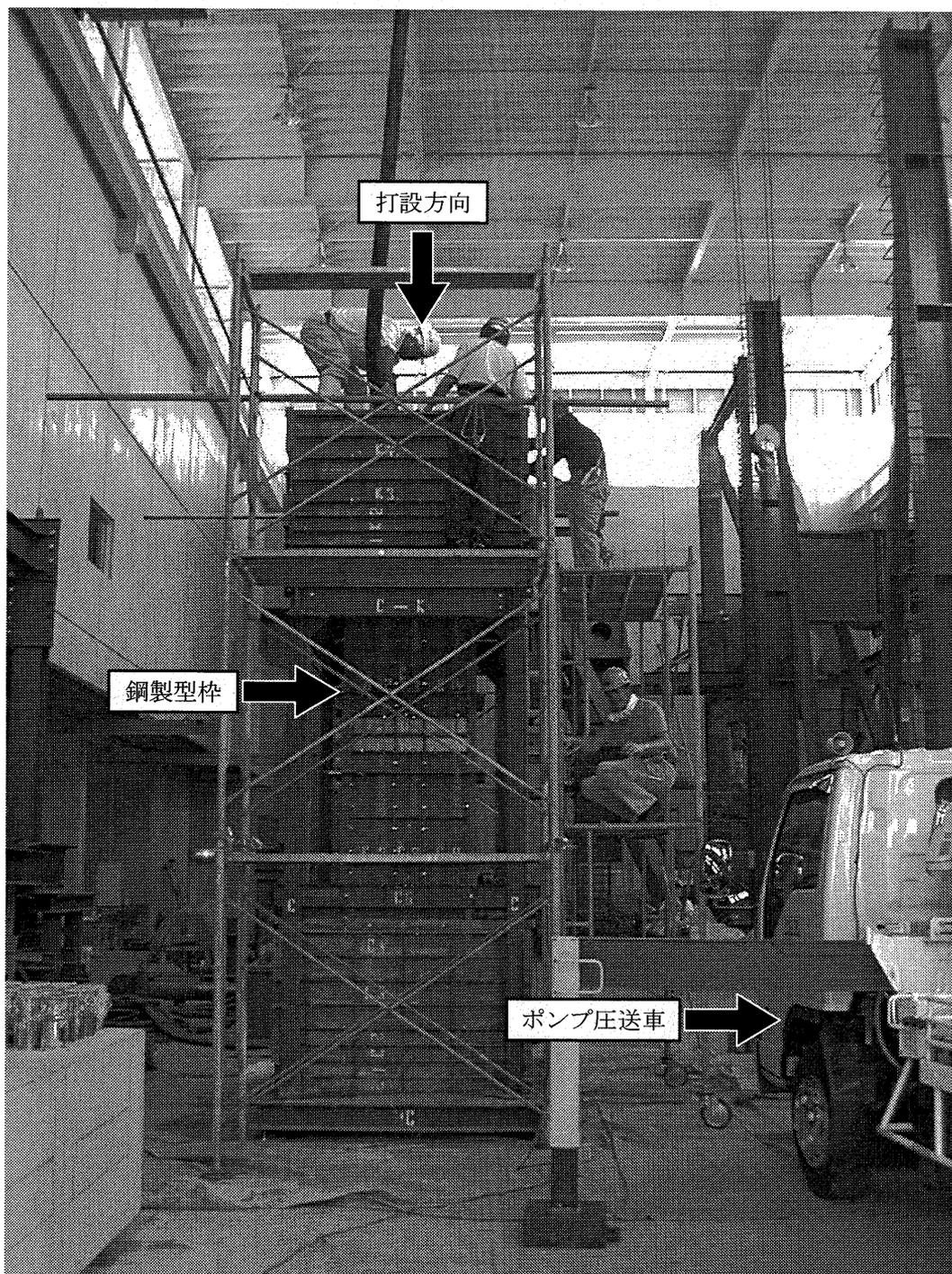


写真 3-6 コンクリートの打設状況 (FS36CA)

型枠の脱型は内部の湿潤状態を確保するために、いずれの場合も打設後 7 日以上経過の後とし、脱型後は室内で気中養生した。この際に温度管理は行っていない。脱型後の柱中央打ち継ぎ部におけるコンクリート表面の状況を写真 3-8 に例示する。打ち継ぎ面でのコールドジョイントや顕著なジャンカ等の欠陥は見られなかった。従って、石炭灰を混入した場合も、フレッシュコンクリートのワーカビリティが損なわれることはなく、施工性は従来の普通コンクリートによる場合と同様であり、ポンプ圧送車によるコンクリート打設が可能であることを確認した。

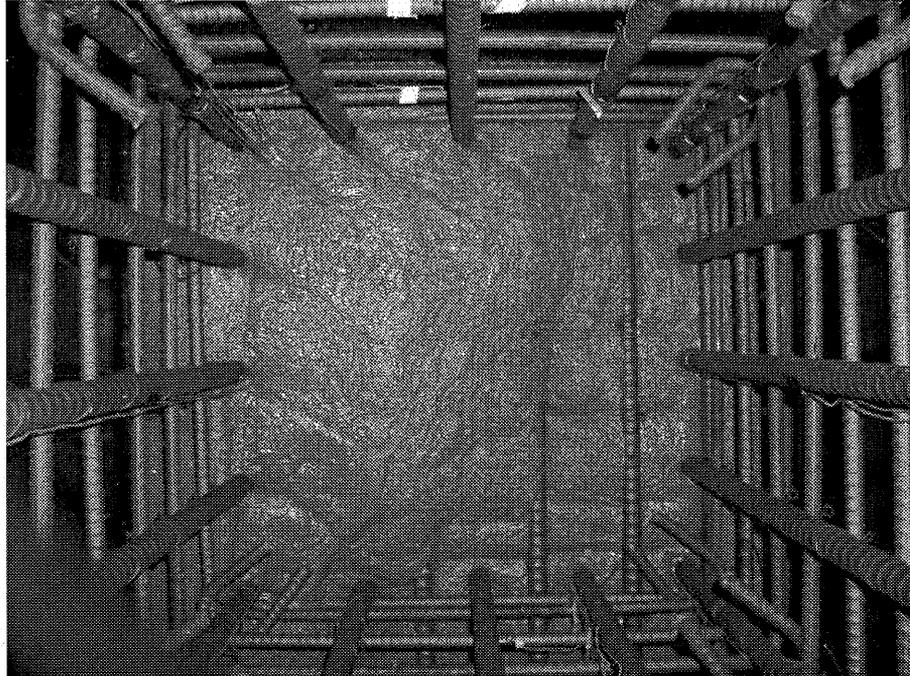


写真 3-7 柱部分内部の打設状況 (FS27CA)

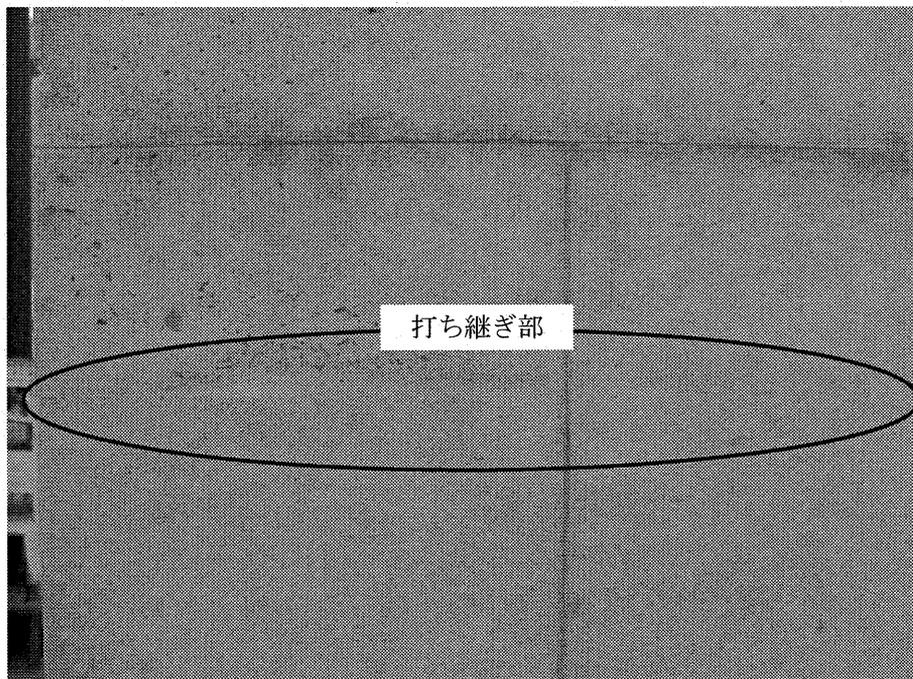


写真 3-8 打ち継ぎ部におけるコンクリート表面の状況 (FS27CA)

3-3 実大鉄筋コンクリート柱の載荷実験

3-3-1 試験体

試験体は施工試験で製作した3体の実大鉄筋コンクリート柱である。その一覧と外形を表3-5 および写真3-9 に再掲する。これらの試験体に対して、まず、同表中の軸力比に達するまで軸力を載荷し、その際の軸圧縮性能を検討する。その後、軸力を所定のレベルで一定に保持しつつ、水平方向に正負漸増繰り返し載荷を破壊に至るまで加え、実大鉄筋コンクリート柱の水平抵抗性能を検証する。

表 3-5 試験体の一覧

試験体名	想定建物	F_c (N/mm^2)	η	コンクリート種別	石炭灰混入方法
FS27CA	低層	27	0.1	石炭灰コンクリート	細骨材置換 (体積比20%)
FS36CA	中層	36	0.2	石炭灰コンクリート	細骨材置換 (体積比20%)
FS36NC	中層	36	0.2	普通コンクリート	なし

F_c : コンクリート設計基準強度, η : 軸力比, $\eta = N / (F_c \cdot b \cdot D)$
 N : 軸力, b : 柱断面の幅, D : 柱断面の全せい

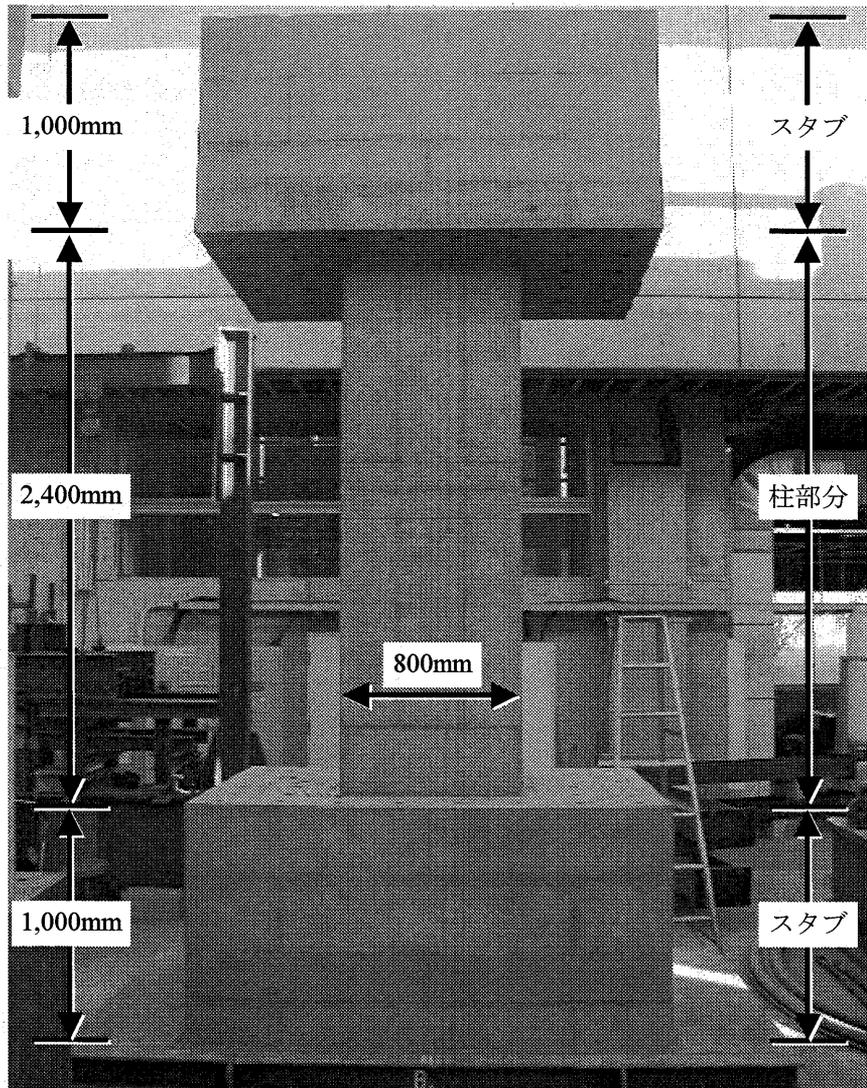


写真 3-9 試験体の実大鉄筋コンクリート柱

3-3-2 実験方法

(1) 制御計測システム

本実験では石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱の耐震性能を検証するために、所定の軸力比までの軸圧縮荷重、および一定軸力下での正負交番繰り返し荷重を実施する。実験の荷重およびデータ収録に関するシステムの構成を図 3-3 に示す。実験システムは制御システムと計測システムから構成されている。制御システムは荷重制御と変位制御を行い、荷重はジャッキシステムから制御用 PC (Iiyama 製 V500JS4) で制御し、変位は制御用変位計から直接計測し、データロガー ((株)東京測器製 TDS-602) を介して制御用 PC で制御した。これらのデータはスイッチボックス ((株)東京測器製 SHW-50D) に入力され、データロガー ((株)東京測器製 THS-1100) と GP-IB で接続した計測用 PC (NEC 製 Mate-NX MA50J) で記録した。その他にもひずみゲージ、変位計からのデータをスイッチボックス ((株)東京測器製 SHW-50D, SHW-50A) に入力し、計測用 PC で記録している。

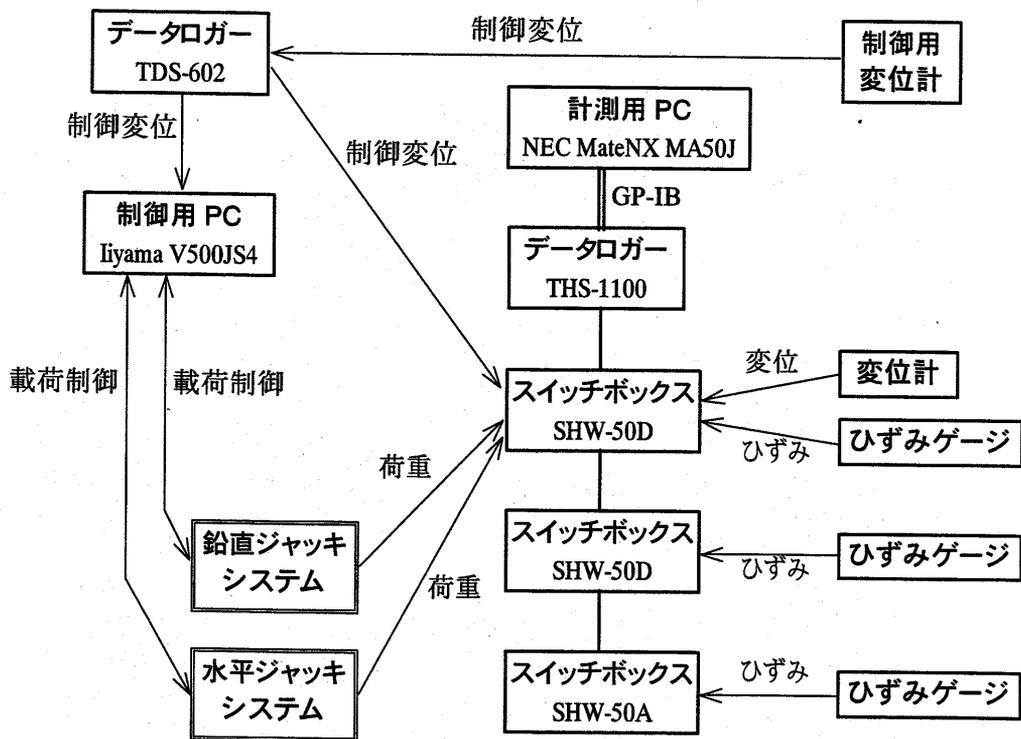


図 3-3 制御・計測システムの構成

(2) 荷重方法

福山大学ハイテクリサーチセンターにある大型試験荷重装置を使用して荷重を実施した。その正面からの詳細を図 3-4 に示す。同図にある通り、荷重装置は水平ジャッキ、鉛直ジャッキ、各ジャッキに付属するロードセルおよび荷重用治具から構成されている。水平ジャッキ、鉛直ジャッキともにその両端にはピンが設置してある。試験体を設置した状態での荷重装置の全景を写真 3-10 に示す。

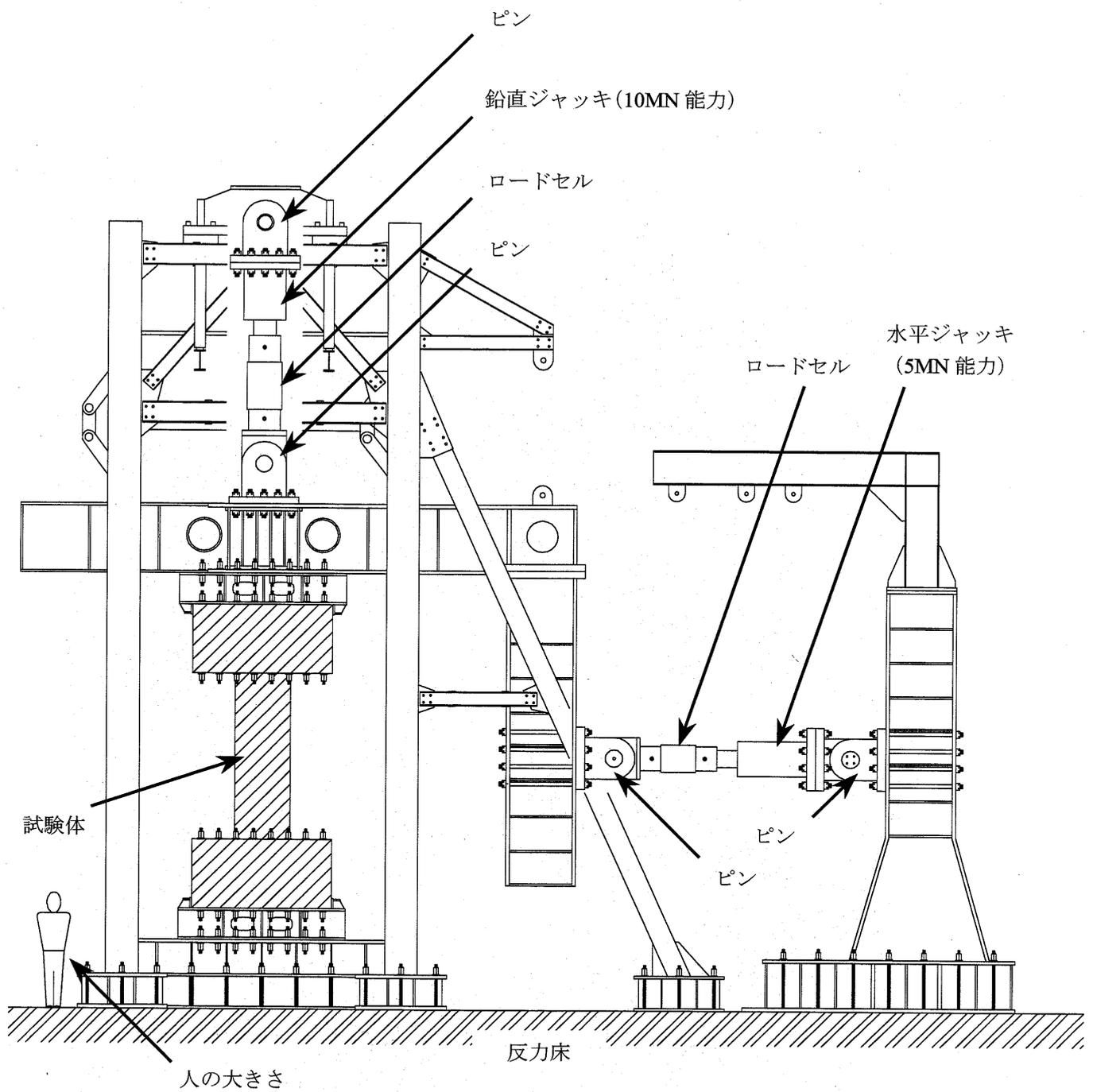


図 3-4 載荷装置

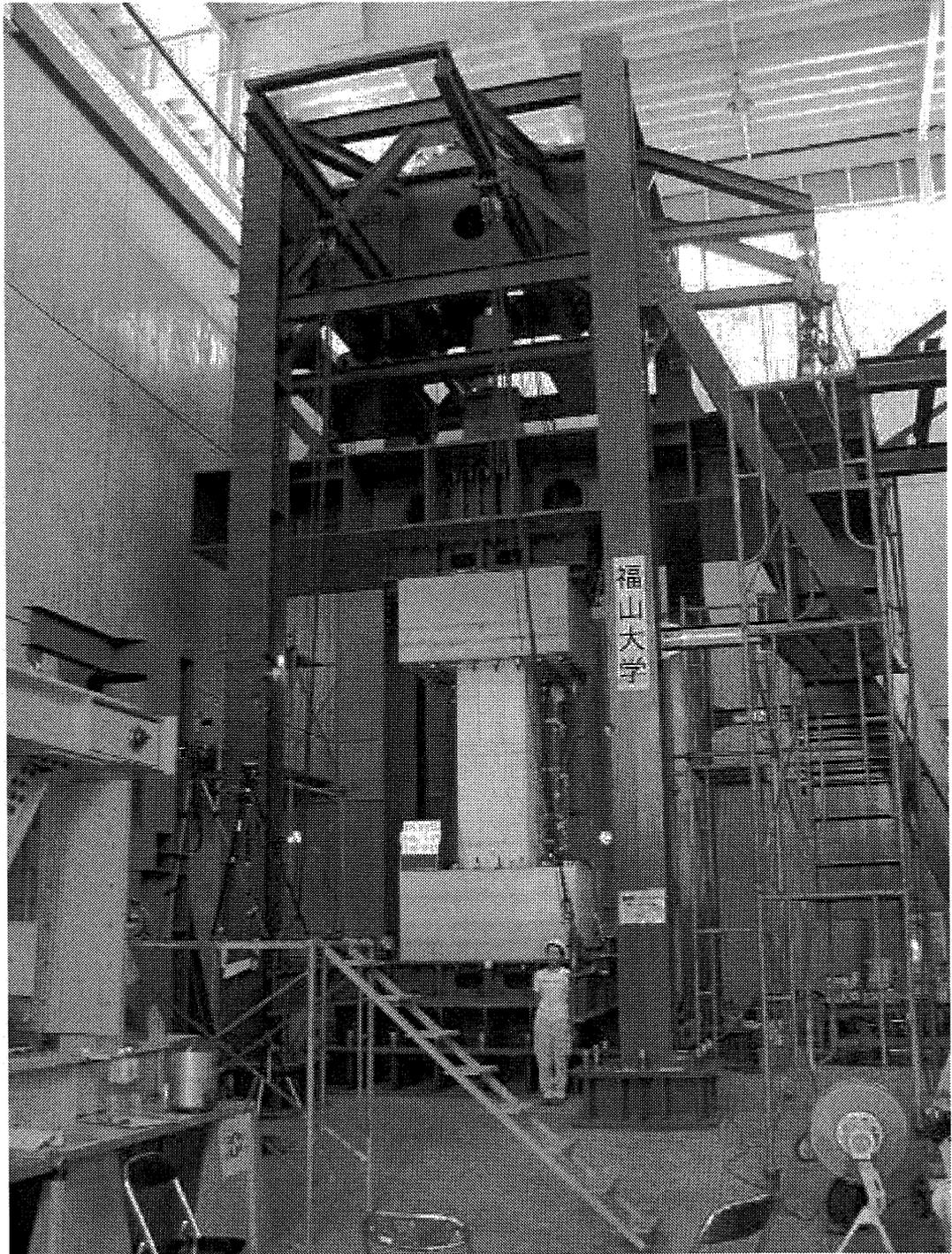


写真 3-10 載荷装置全景

この載荷装置を用いて所定の軸力比までの軸圧縮載荷を行い、その後、一定軸力下での正負交番繰り返し載荷を実施する。試験体はいずれの場合も上下のスタブにおいて 32 本ずつの全ネジ PC 鋼棒 ($\phi 19$) によって装置治具中に固定し、各 PC 鋼棒には 200kN 以上のプレテンション力を導入して、試験体と載荷治具を緊結する。低層鉄筋コンクリート造建物の最下層柱を想定している FS27CA においては、軸力比 η を 0.1、中層鉄筋コンクリート造建物の最下層柱を想定している FS36CA と FS36NC においては軸力比 η を 0.2 とし、鉛直ジャッキ (ジャッキ能力: 最大荷重 10MN, ストローク $\pm 200\text{mm}$) を用いて軸力を鉛直載荷する。鉛直載荷は荷重制御で実施し、載荷速度は 5kN/sec を原則とする。また、水平方向の正負交番繰り返し載荷は水平ジャッキ (ジャッキ能力: 最大荷重 5MN, ストローク $\pm 300\text{mm}$) により実施する。ここでは水平ジャッキが試験体を押す方向を正方向としている。水平方向は変位制御としており、試験体の全水平変位 δ を柱部分の高さ h で除した変形角 R を制御の対象とし、変形角 $R=0.0625\%$, 0.125% , 0.25% , 0.5% , 1.0% , 2.0% をそれぞれ正負に 2 回ずつ繰り返し載荷を行う。その時点で試験体が破壊に至っていない場合には、正方向に押し抜き載荷を行う。なお水平載荷の除荷時には荷重制御とし、載荷速度は鉛直載荷と同様に 5kN/sec を原則とする。一定軸力下での水平載荷の概念および水平載荷方向と方位の関係を図 3-5 に、水平載荷プログラムを図 3-6 にそれぞれ示す。

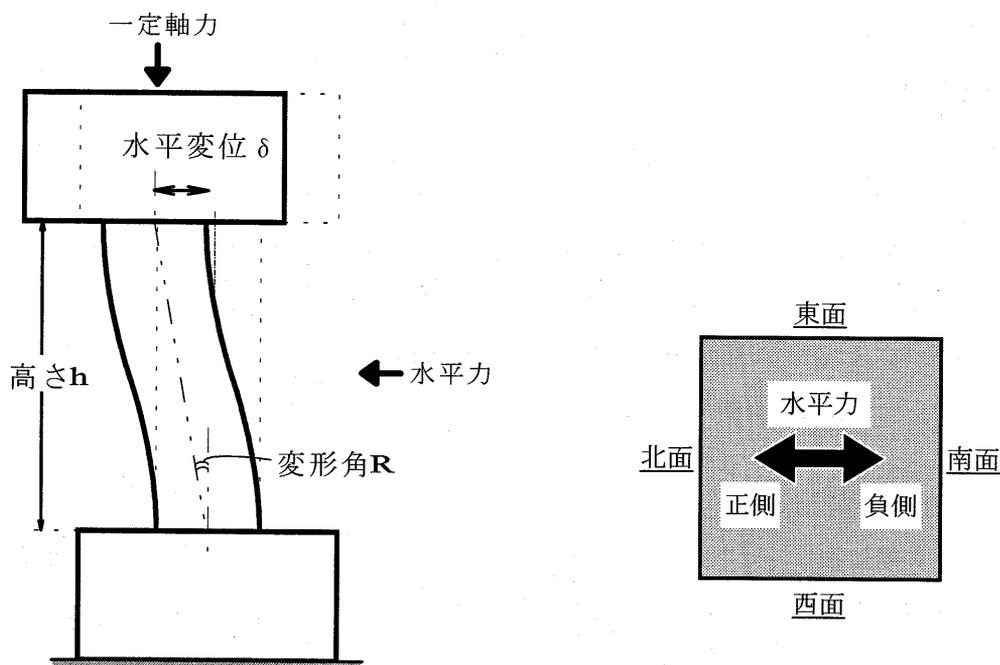


図 3-5 一定軸力下での水平載荷の概念および水平載荷方向と方位の関係

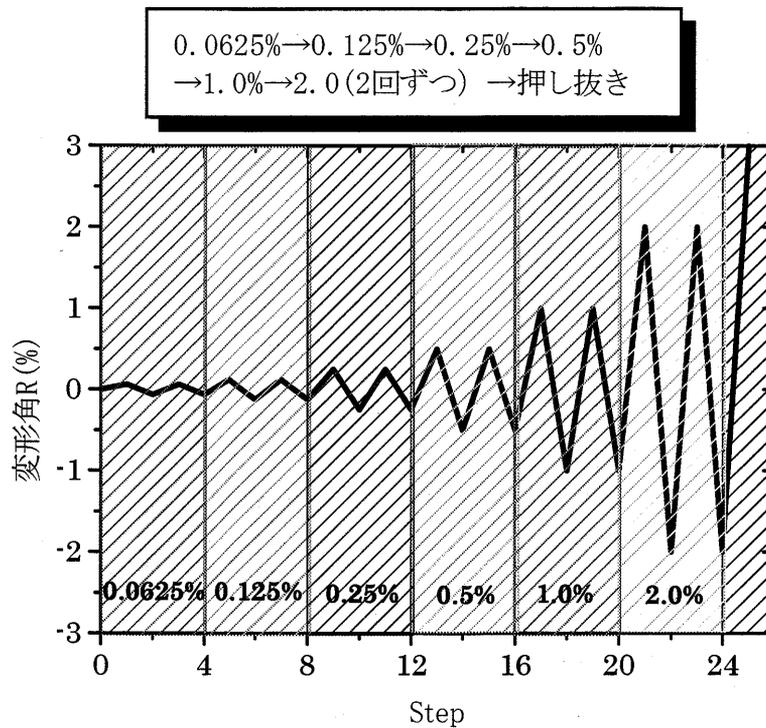


図 3-6 水平載荷プログラム

(3) 測定方法

本実験では試験体に作用する軸力と水平力，試験体の水平方向変位と軸方向変位，鉄筋のひずみおよび試験体表面のコンクリートのひずみについて測定を行う。以下①～⑤に各測定の概要を記す。また，各測定値はスイッチボックス（(株)東京測器製 SHW50A, SHW50D）とデータロガー（(株)東京測器製 THS-1100）を通してパソコン（NEC 製 Mate-NX MA50J）に収録される。

① 試験体に作用する軸力と水平力

各ジャッキ先端に取り付けられたロードセルを用いて測定した。ただし，試験体の水平移動に伴い，鉛直ジャッキが傾斜し，図 3-7 に示すように鉛直ジャッキによる載荷力に水平成分が生じることから，実験結果の考察では軸力と水平力は以下の方法により補正した。

鉛直ジャッキの傾斜による軸力と水平力の補正

試験体に作用する軸力； N'

$$N' = N_{JV}$$

N_{JV} ：鉛直ジャッキによる鉛直力

$$N_{JV} = N \cdot (h_{JV} / l_{JV})$$

N ：鉛直ジャッキによる荷重

$$h_{JV} = \sqrt{l_{JV}^2 - \delta^2}$$

l_{JV} ：鉛直ジャッキの両端ピン間距離， $l_{JV} = 3,670\text{mm}$ （中立位置） $\pm 200\text{mm}$ （ストローク）

ただし、ストロークによる長さの影響は極微小であるから、 $l_{JV} = 3,670\text{mm}$ とする。

δ : 試験体の水平変位

例えば、変形角 $R=2\%$ の大変形時において、 $\delta=240\text{mm}$ であるから、 $h_{JV}=3,662\text{mm}$ となる。

この場合、

$$N' = N_{JV} = N \cdot (h_{JV} / l_{JV}) = 0.998N \approx N$$

従って、鉛直ジャッキの傾斜による軸力の変動は無視し、下式の通り、試験体に作用する軸力は鉛直ジャッキの荷重と等しいとする。

$$N' = N$$

試験体に作用する水平力； Q'

$$Q' = Q + Q_{JV}$$

Q : 水平ジャッキによる荷重

Q_{JV} : 鉛直ジャッキによる水平力

$$Q_{JV} = N \cdot (\delta / l_{JV})$$

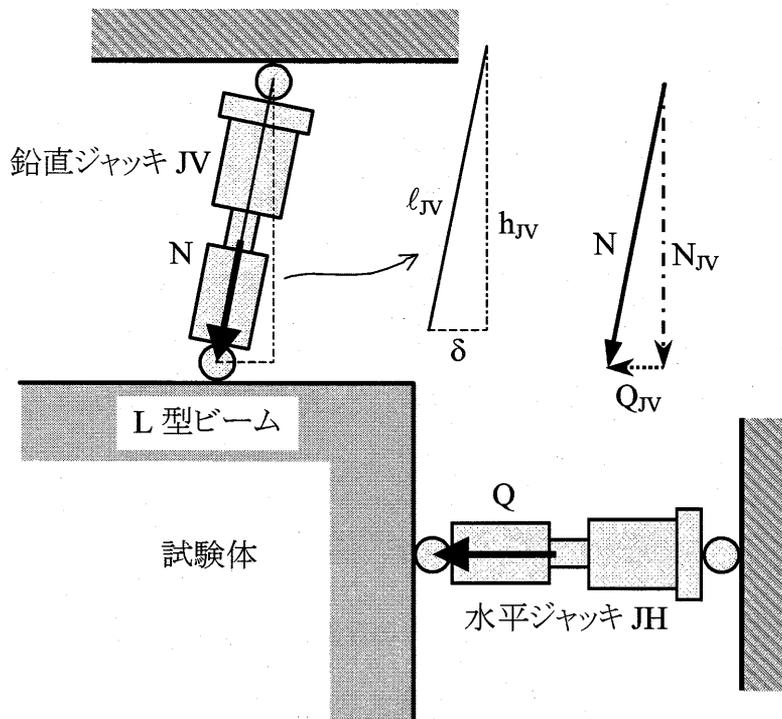
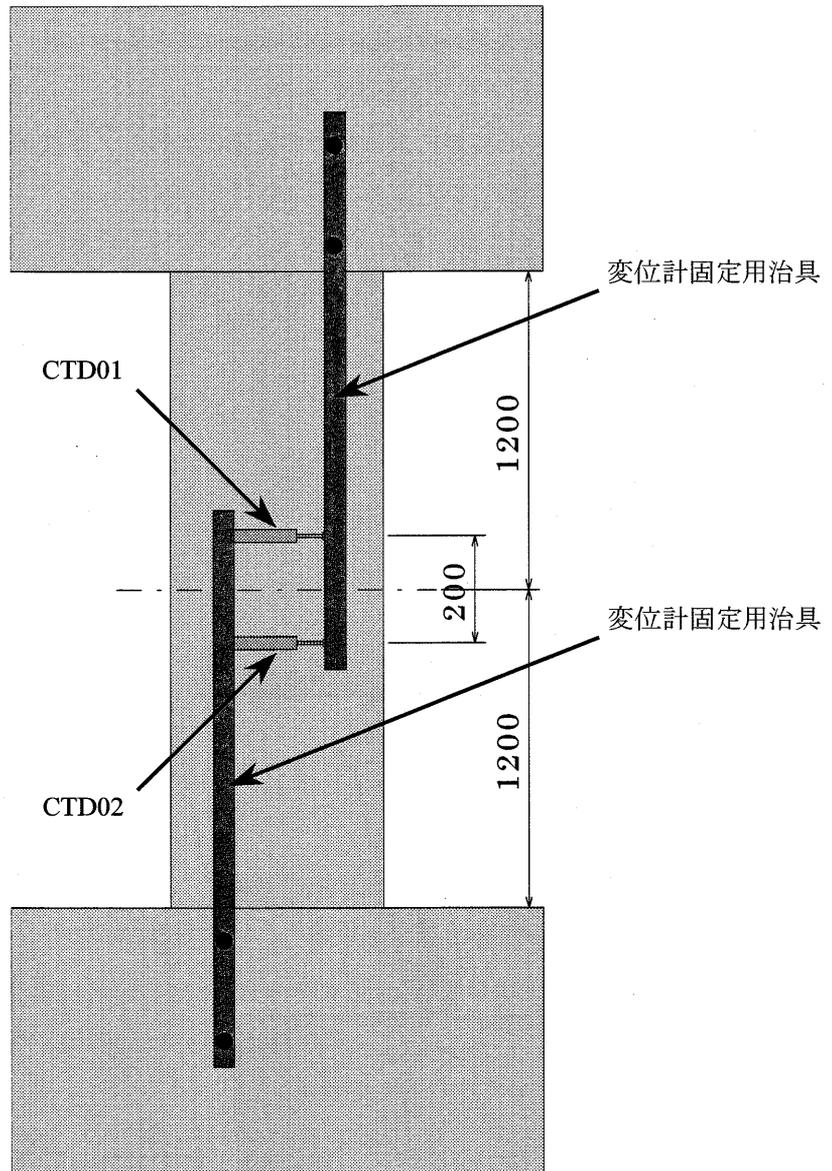


図 3-7 鉛直ジャッキの傾斜による荷重補正

② 制御用変位計

変位制御用変位計 CTD01, CTD02 ((株)東京測器製 SDP=200R) の設置位置を図 3-8 に示し、各変位計の種類と性能を表 3-6 に示す。これらの制御用変位計は試験体東面の上下スタブに固定した治具にマグネットで固定してあり、その平均値から変形角を算出し、その値に基づき水平載荷の制御を行う。



【Unit ; mm】

図 3-8 制御用変位計の設置位置 (試験体東面)

表 3-6 制御用変位計の種類と性能

記号	CTD01	CTD02
変位計種類	SDP-200R	SDP-200R
ストローク(mm)	200	200
感度(μ/mm)	100	100

③ 試験体の水平方向および軸方向の変位

変位制御用を除く変位計の設置位置を図 3-9 に示し、各変位計の種類と性能を表 3-7 に示す。同図中の記号 Dis01～Dis06 で表す変位計により柱部分の水平変位を、Dis07 と Dis08 の変位計でスタブの水平変位を測定する。Dis09～Dis16 で表す変位計により柱部分の軸方向変位を測定し、その計測値に基づき端部における曲率を算出する。

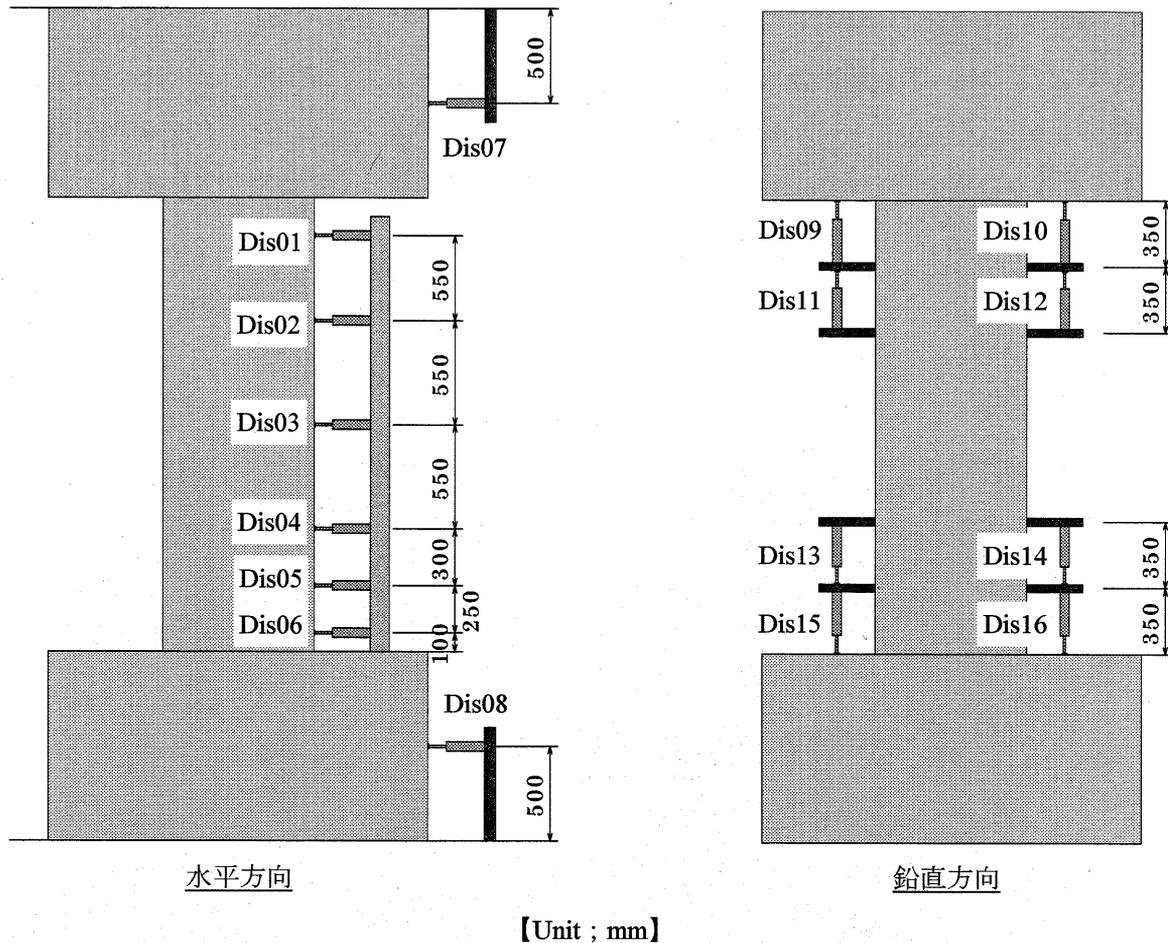


図 3-9 変位制御用を除く変位計の設置状況

表 3-7 鉛直,水平方向用変位計の種類と性能

記号	Dis01	Dis02	Dis03	Dis04	Dis05	Dis06	Dis07	Dis08
変位計種類	SDP-100R	SDP-100C	SDP-100C	SDP-100C	SDP-100C	SDP-100C	CDP-25	CDP-25
ストローク(mm)	100	100	100	100	100	100	25	25
感度(μ/mm)	100	50	50	50	50	50	500	500

記号	Dis09	Dis10	Dis11	Dis12	Dis13	Dis14	Dis15	Dis16
変位計種類	CDP-50	CDP-50	SDP-100C	SDP-100C	SDP-100C	SDP-100C	CDP-50	CDP-50
ストローク(mm)	50	50	100	100	100	100	50	50
感度(μ/mm)	200	200	50	50	50	50	200	200

④ 鉄筋のひずみ

試験体中の鉄筋に対するひずみゲージ貼付位置を FS27CA については図 3-10 に、FS36CA と FS36NC については図 3-11 にそれぞれ示す。同図に示した主筋と帯筋の各点について、ひずみゲージ（株）東京測器製 FLA-5-11 抵抗値 120Ω）を計 78 点貼付し鉄筋のひずみを測定した。また、写真 3-11 に主筋にひずみゲージを貼付し防水処置を施した状態を例示する。

⑤ コンクリート表面のひずみ

試験体のコンクリート表面の図 3-12 に示す位置にコンクリート用ひずみゲージ（株）東京測器製 PL-60-11 抵抗値 120Ω）を貼付する。計 14 箇所 20 枚のゲージにより軸方向および軸直交方向のひずみの測定を実施する。このひずみゲージの計測値に基づき軸方向載荷時の試験体の弾性時ヤング係数とポアソン比を算定する。写真 3-12 にゲージの貼付状況を示す。

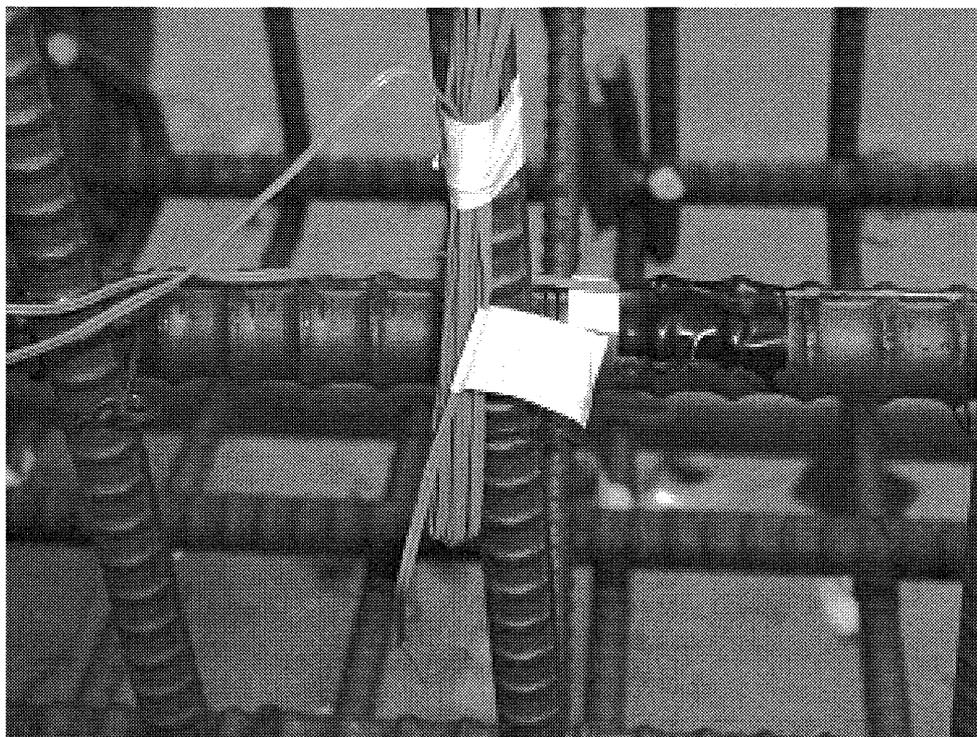
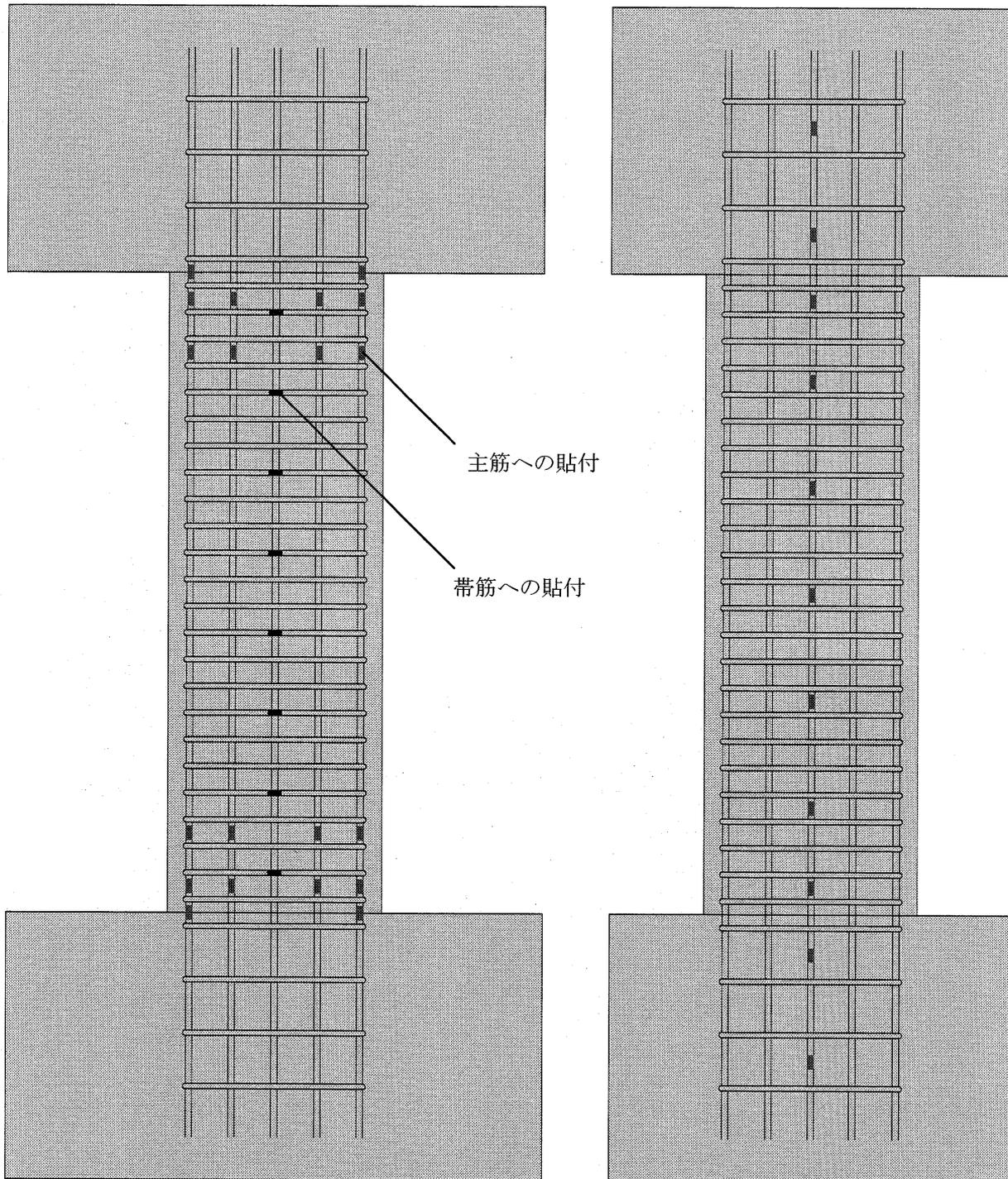


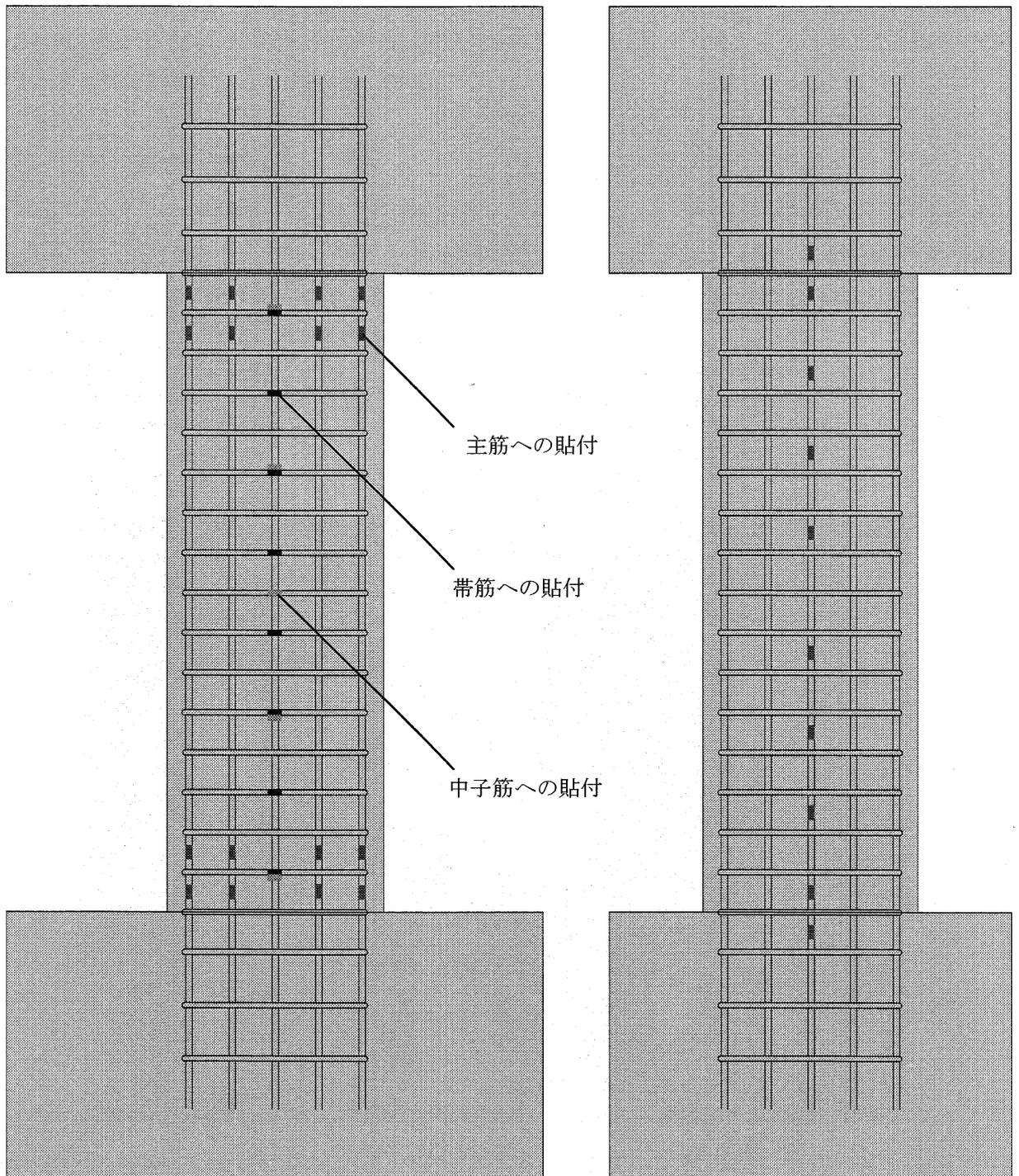
写真 3-11 主筋へのひずみゲージ貼付および防水処理状況



西面, 東面

北面, 南面

図 3-10 FS27CA における鉄筋へのひずみゲージ貼付位置



西面, 東面

北面, 南面

図 3-11 FS36CA と FS36NC における鉄筋へのひずみゲージ貼付位置

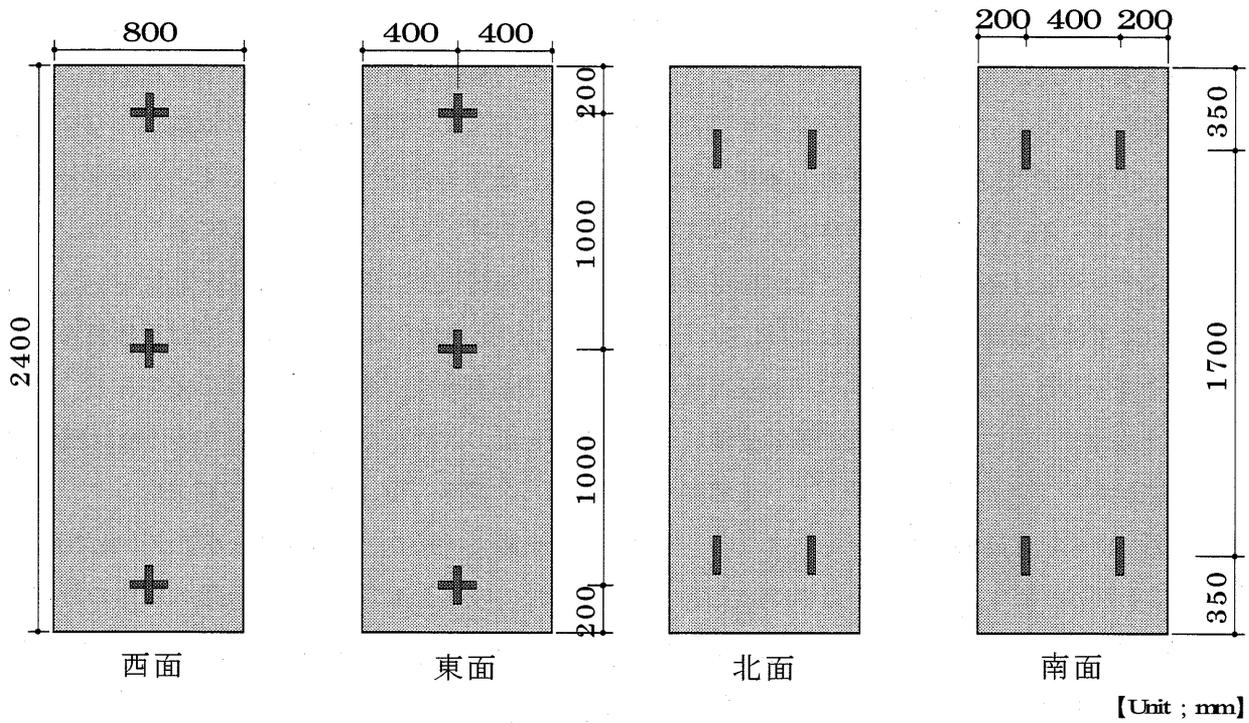


図 3-12 コンクリート表面へのひずみゲージの貼付位置

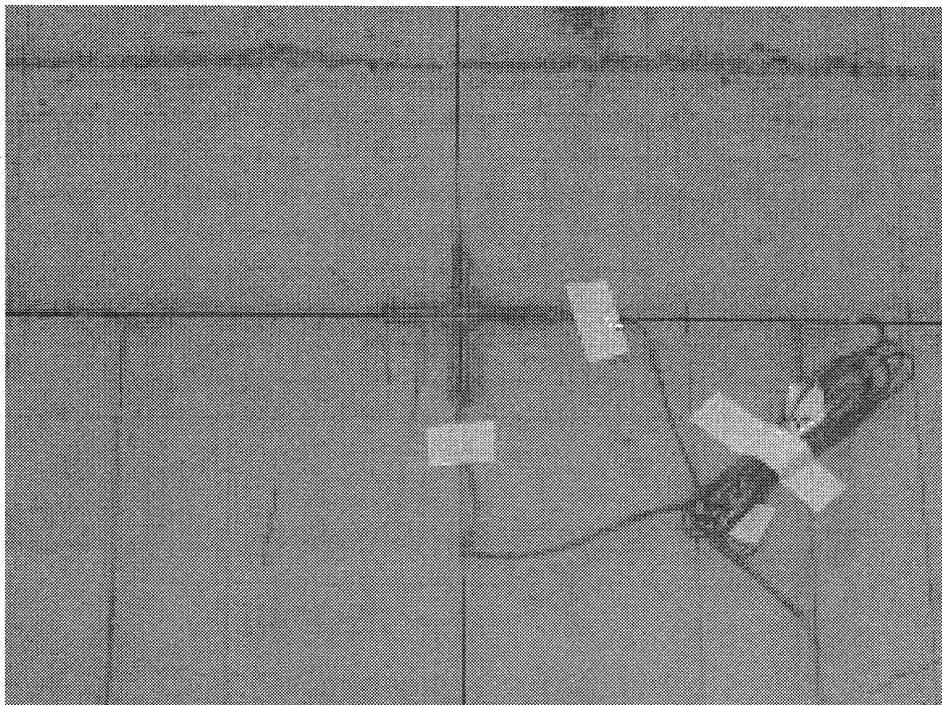


写真 3-12 コンクリート表面へのひずみゲージ貼付状況

3-3-3 使用材料の力学的特性

(1) コンクリート

実大鉄筋コンクリート柱と同時に作製し、標準水中養生したコンクリート供試体の圧縮試験および割裂試験から得られた、実験実施日におけるコンクリートの力学的特性を表 3-8 に示す。実大鉄筋コンクリート柱の作製において、コンクリート打設を 2 回に分けて実施したため、圧縮および割裂試験はバッチごとのコンクリート供試体についてそれぞれ 3 本ずつを対象とした。表中の各特性はバッチごとの平均値と全数の平均値を示している。いずれの試験体もバッチによる差は見られず、安定した値を示しており、コンクリートの性能にバッチによる差がないことが確認できる。なお、圧縮強度に関して、石炭灰を混入した FS27CA と FS36CA では目標値付近であるのに対して、普通コンクリートを使用した FS36NC では目標値を超え大きな余裕率を示した。これはコンクリート設計基準強度に対する調合設計強度の余裕率の差であり、石炭灰を混入する場合に、コンクリート設計基準強度に対してどの程度の余裕率を与えるかは今後の検討課題である。

各試験体のコンクリートに関して、圧縮強度と引張強度の関係を図 3-13 に、圧縮強度とヤング係数の関係を図 3-14 に、圧縮強度と圧縮強度時のひずみの関係を図 3-15 に、圧縮強度とポアソン比の関係を図 3-16 にそれぞれ示す。なお、同図中には文献²⁰⁾に示されている普通コンクリート用の既往の評価式および提案式を併せて示している。いずれの力学的特性も石炭灰混入の有無に関わらず既往の評価式および提案式と良好に対応しており、石炭灰混入の影響は見られない。

表 3-8 実験実施日のコンクリート力学的特性

試験体名	材令 (日)	打設種別 (試験体数)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	圧縮強度時ひずみ ϵ_B (μ)	引張強度 σ_T (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	ポアソン比 ν
FS27CA (石炭灰)	36	1回目 (3本)	26.2	1886	2.47	21.0	0.177
		2回目 (3本)	25.5	2089	2.44	20.3	0.182
		平均 (6本)	25.8	1987	2.45	20.7	0.180
FS36CA (石炭灰)	33	1回目 (3本)	33.5	1930	2.82	25.0	0.177
		2回目 (3本)	33.2	2102	2.84	23.1	0.161
		平均 (6本)	33.3	2016	2.83	24.0	0.169
FS36NC (普通)	28	1回目 (3本)	44.3	1897	2.96	30.9	0.172
		2回目 (3本)	42.9	1907	3.68	29.8	0.167
		平均 (6本)	43.6	1902	3.32	30.3	0.170

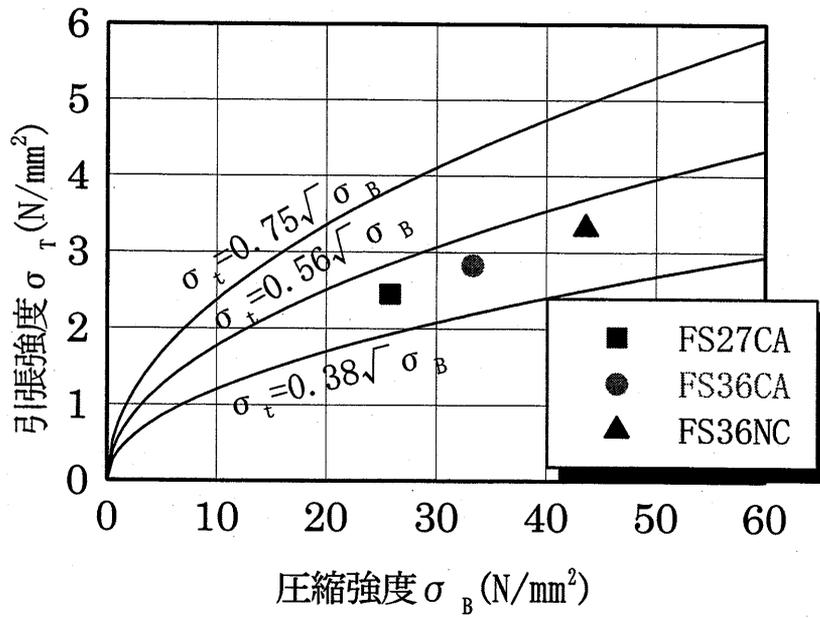


図 3-13 圧縮強度と引張強度の関係

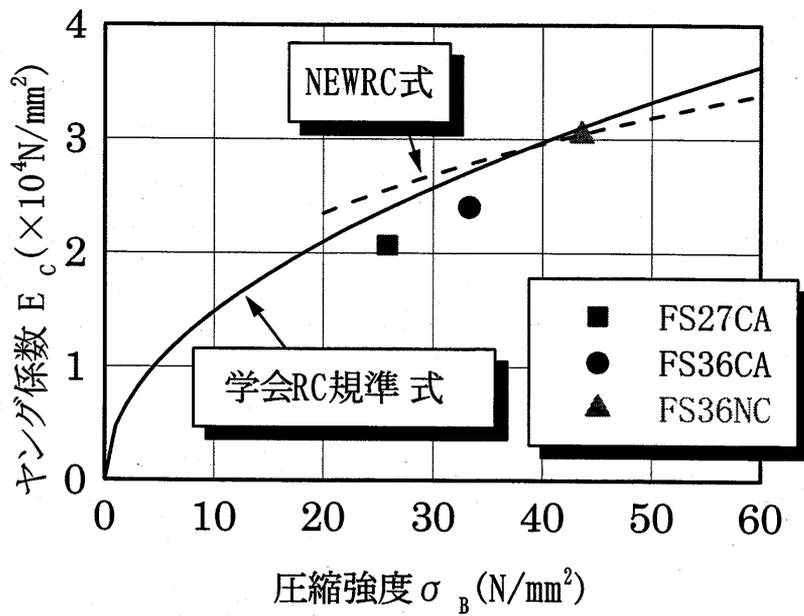


図 3-14 圧縮強度とヤング係数の関係

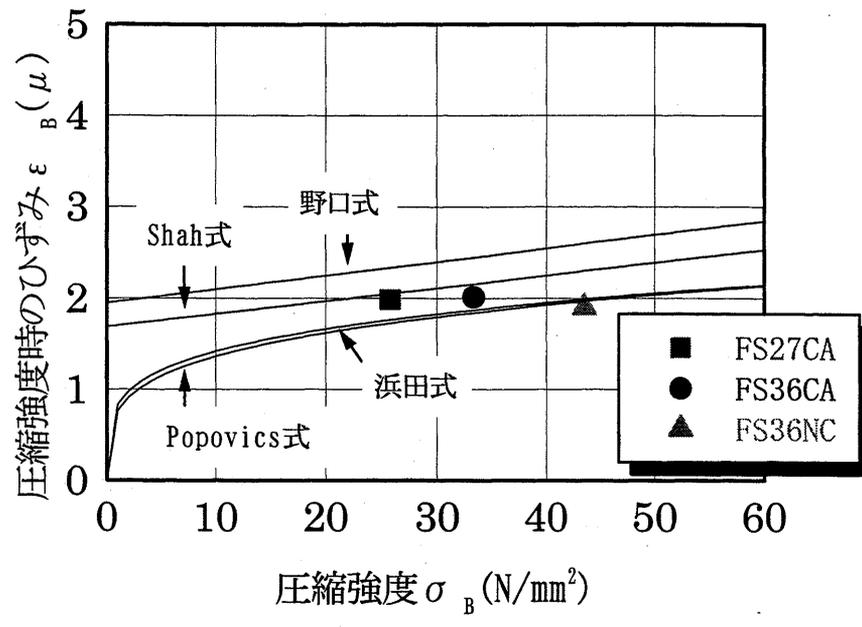


図 3-15 圧縮強度と圧縮強度時のひずみの関係

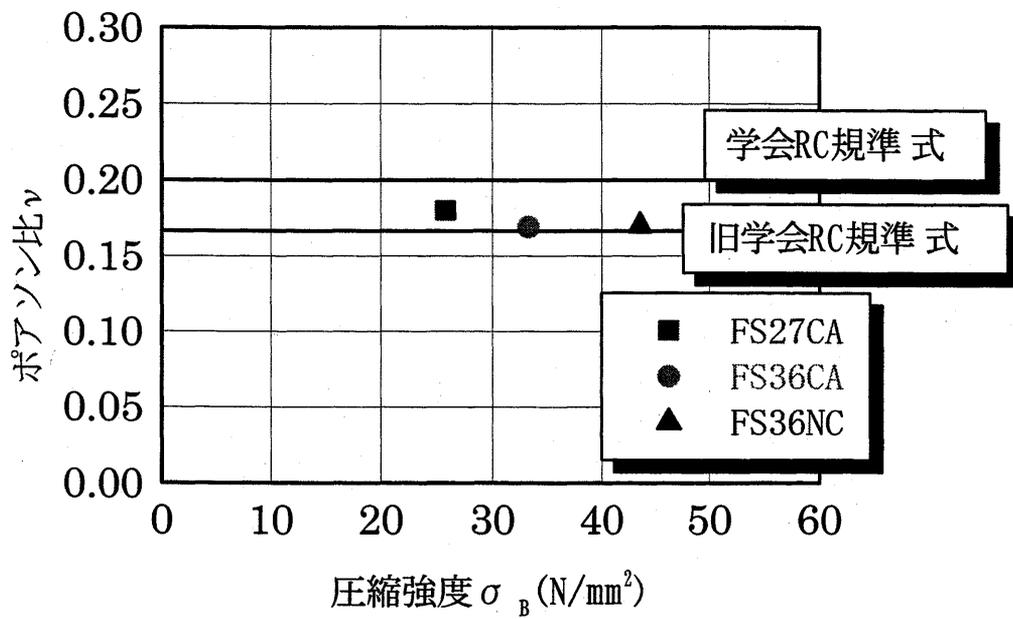


図 3-16 圧縮強度とポアソン比の関係

(2) 鉄筋

試験体の主筋に使用した D25 と帯筋に使用した D16 および U10.7 の引張試験を JIS22241 に準拠して実施した。載荷は広島大学所有の 600kN アムスラー試験機を使用し、ひずみゲージ（株東京測器研究所製 FLA-5-11-3L）を供試体中央の表裏に貼付してひずみを計測している。それぞれの種類について 3 本の試験を実施し、その平均値から力学的特性を算出した。なお降伏点が明確でない U10.7 に関しては、0.2%オフセット法を用いて降伏ひずみを算定している。その結果を表 3-9 に示す。また、試験の結果から得られた各鉄筋の応力-ひずみ曲線を図 3-17 に示す。

表 3-9 鉄筋の力学的特性

種類	種別	降伏応力度 σ_{SY} (N/mm ²)	最大応力度 σ_{SU} (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	降伏ひずみ $\epsilon_y (\times 10^{-6})$
D25	SD345	387	580	199	2293
D16	SD295A	358	543	198	2210
D25	SD345	364	536	174	2227
U10.7	SD1275	1362	1497	189	7240

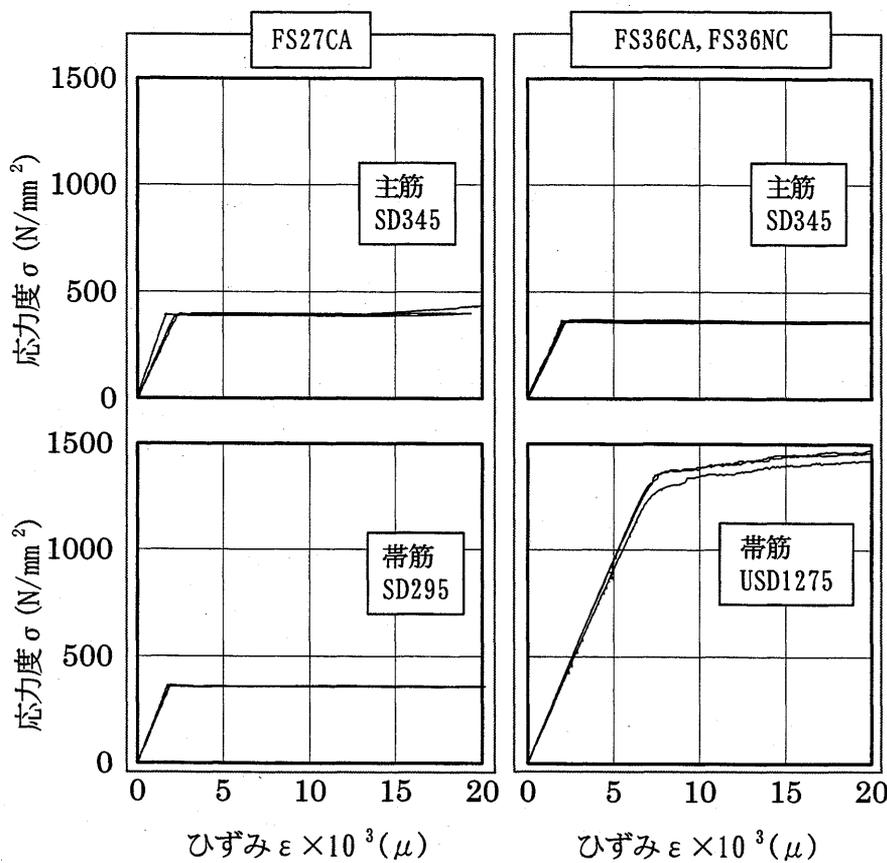


図 3-17 鉄筋の応力-ひずみ曲線

3-4 載荷実験の結果と考察

3-4-1 軸圧縮性能

試験体に所定の軸力を導入した際の軸圧縮性能に関して検討し、得られた結果を以下に示す。

(1) 軸方向に関する応力-ひずみ関係

軸圧縮荷重による軸方向に関する応力-ひずみ関係を図 3-18 に示す。図中の軸ひずみ ϵ は試験体表面に貼付したコンクリートひずみゲージ 14 点の平均値であり、軸応力 σ は軸力 N を断面積 ($800 \times 800\text{mm}$) で除した値である。従って、鉄筋の影響は考慮していない。同図中にはコンクリート供試体の圧縮試験による応力-ひずみ関係を併せて示す。図から軸力比とコンクリート強度の相違により各試験体の履歴は一致していないが、いずれも直線的な挙動を示しており、弾性範囲にあることがわかる。

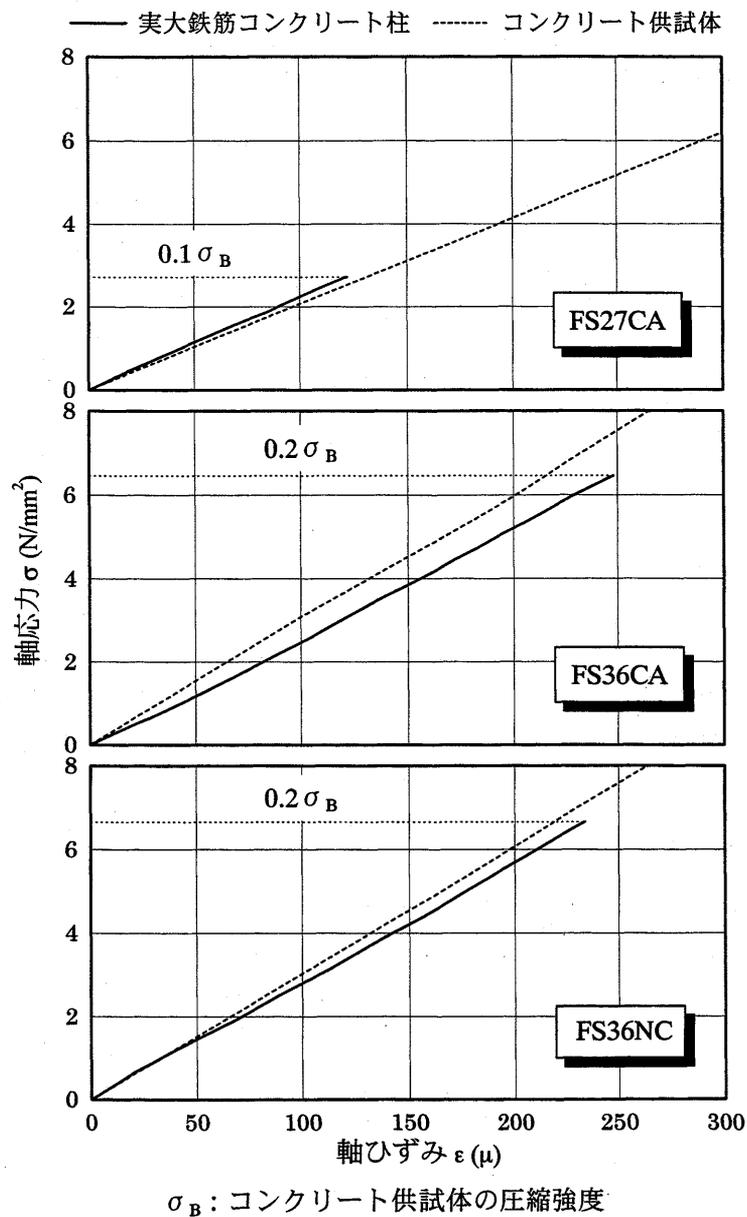


図 3-18 軸方向に関する応力-ひずみ関係

(2) ヤング係数

軸方向に関する応力-ひずみ関係から各試験体のヤング係数を算出し、表 3-8 に示したコンクリート供試体の結果と比較して図 3-19 に示す。また、同図中に文献²⁰⁾に示されている普通コンクリートのヤング係数算定式による曲線（学会 RC 規準式と記載）を併せて示す。図中の単色記号は試験体である実大鉄筋コンクリート柱のヤング係数を、白抜き記号はコンクリート供試体のヤング係数を表す。図から、いずれの場合ともに実大鉄筋コンクリート柱とコンクリート供試体のヤング係数は近似しており、学会 RC 規準式と良好な対応を示している。石炭灰混入の影響および鉄筋の補強による影響は明確には表れていない。本実験の結果では、実大鉄筋コンクリート柱の弾性時におけるヤング係数は、石炭灰の混入に関わらず、コンクリート供試体試験の結果と同等で、普通コンクリートのための既往の算定式で評価できる結果となった。ただし、本実験では軸力比で 0.1 もしくは 0.2 までの軸力までしか载荷していないことを付記しておく。

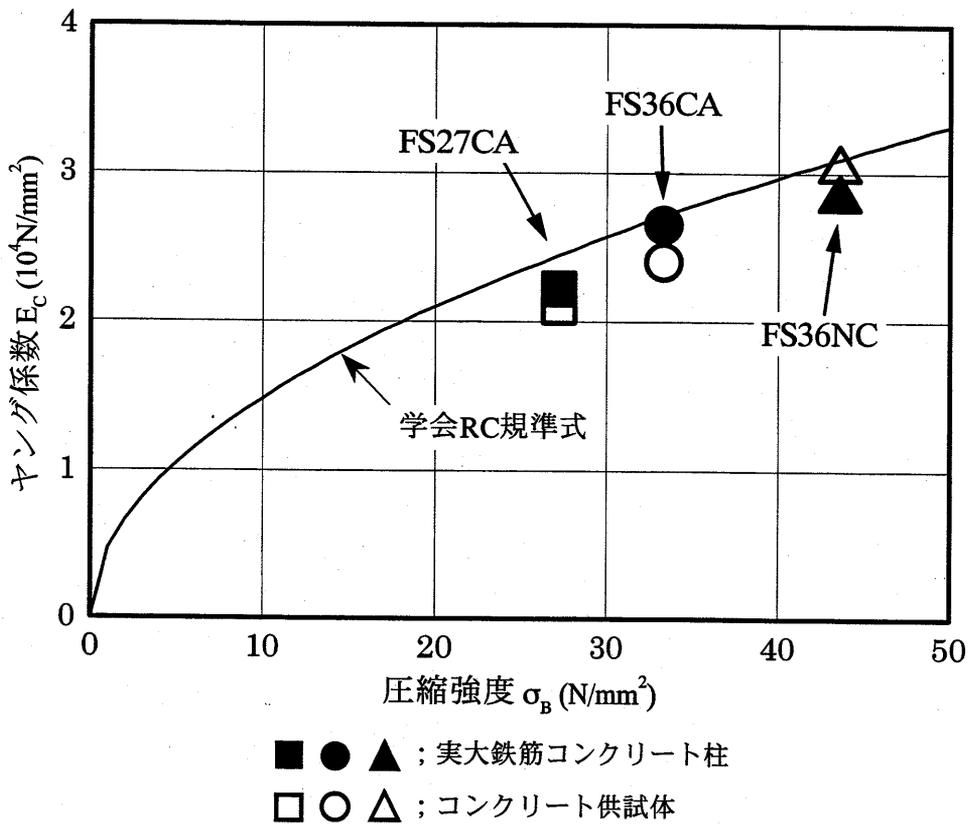


図 3-19 圧縮強度とヤング係数の関係

(3) ポアソン比

コンクリート表面に貼付したコンクリートひずみゲージの測定値から軸力載荷時のポアソン比を算出し、表 3-8 に示したコンクリート供試体の結果と比較して図 3-20 に示す。図中の単色記号は実大鉄筋コンクリート柱のポアソン比を示し、白抜き記号はコンクリート供試体のポアソン比を示す。また、文献²⁰⁾に示されている普通コンクリートの一般的なポアソン比の範囲（学会 RC 規準によるポアソン比の範囲と記載）を併せて示す。ばらつきが大きいものの、実大鉄筋コンクリート柱、コンクリート供試体ともに提示範囲内もしくはその付近に位置しており、ヤング係数の場合と同様に、石炭灰混入の影響および鉄筋の補強による影響は明確には表れていない。本実験の結果では、実大鉄筋コンクリート柱の弾性時におけるポアソン比は、石炭灰の混入に関わらず、コンクリート供試体の試験結果と同等で、普通コンクリートのための既往の提示範囲で評価できる結果となった。ただし、本実験では軸力比で 0.1 もしくは 0.2 までの軸力までしか載荷していないことを付記しておく。

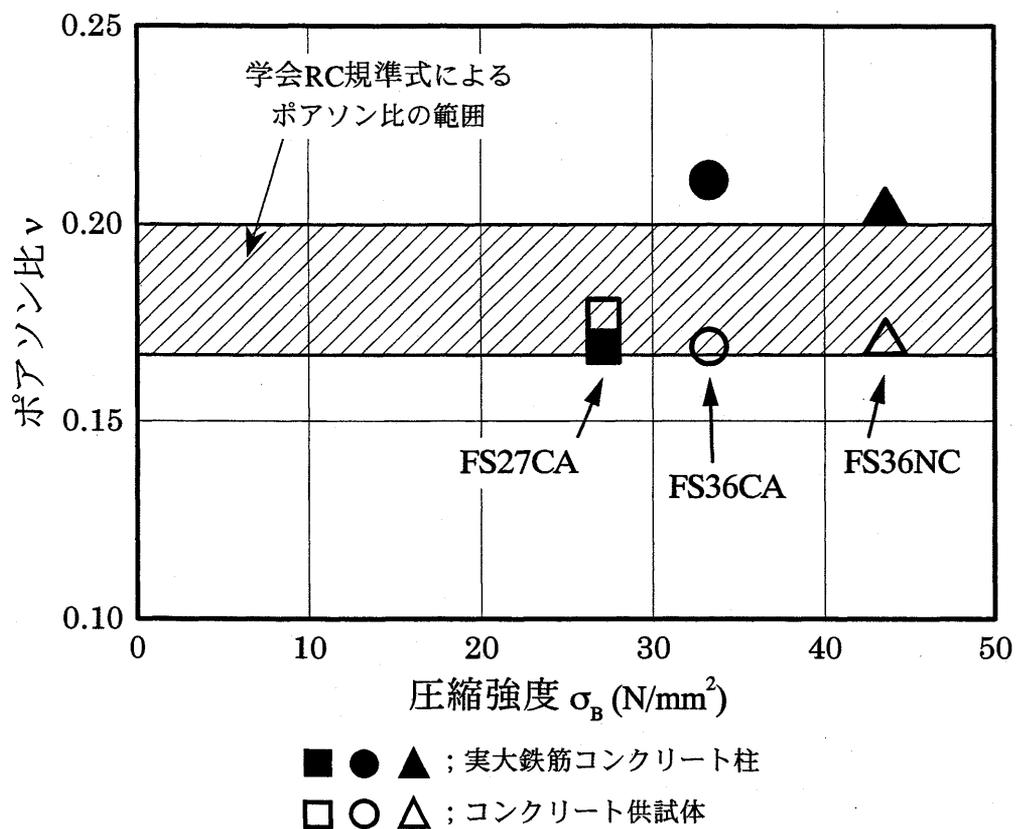


図 3-20 圧縮強度とポアソン比の関係

3-4-2 水平抵抗特性

それぞれの試験体に対して一定軸力下における水平載荷破壊実験を実施して得られた各種の水平抵抗特性を以下に示す。

(1) 損傷性状

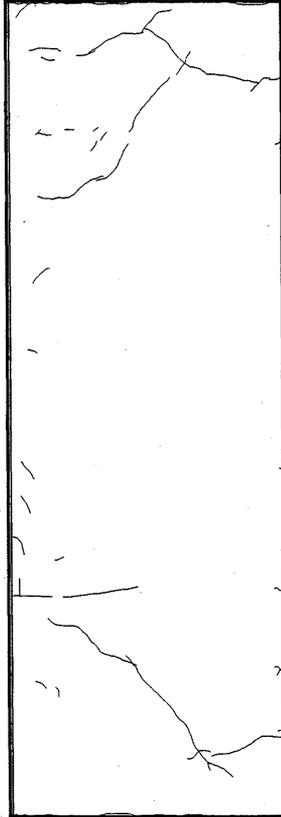
変形角 $R=0.25\%$, 0.5% , 1.0% , 2.0% における試験体西面のひび割れ進展状況を FS27CA については図 3-21 に、FS36CA については図 3-22 に、FS36NC については図 3-23 にそれぞれ示す。各図において、塗りつぶしてある部分がかぶりコンクリートの剥落が起こったことを表す。ひび割れの進展は各試験体とも変形角 $R=0.25\%$ に達するまでに柱頭および柱脚を中心に曲げひび割れが発生し、変形角 $R=0.5\%$ のサイクルにおいては曲げせん断ひび割れが発生した。変形角 $R=1.0\%$ 付近でせん断ひび割れが生じはじめ、変形角 $R=2.0\%$ においては試験体全幅に及ぶせん断ひび割れが発生してかぶりコンクリートの剥落も見られた。また、FS27CA では変形角 $R=2\%$ において付着割裂に起因すると思われるひび割れが観察された。しかしながら、いずれの場合も急激な脆性破壊は起こさなかった。なお、その他の面におけるひび割れ性状については付録に掲載する。

図 3-24 に FS36CA と FS36NC について各変形角ピーク時における試験体の最大ひび割れ幅を示す。なお、計測はクラックスケールを用いて行った。図中の実線が FS36CA の結果を示し、破線が FS36NC の結果を示している。いずれも変形角 $R=0.5\%$ までは 1mm 以下のひび割れ幅となっている。変形角 $R=1\%$ の時点で、FS36NC において最大で幅 5mm のひび割れが発生し、変形角 $R=2\%$ においては両者とも幅約 10mm のひび割れが発生している。同図から両試験体とも同様の分布を示していることがわかる。

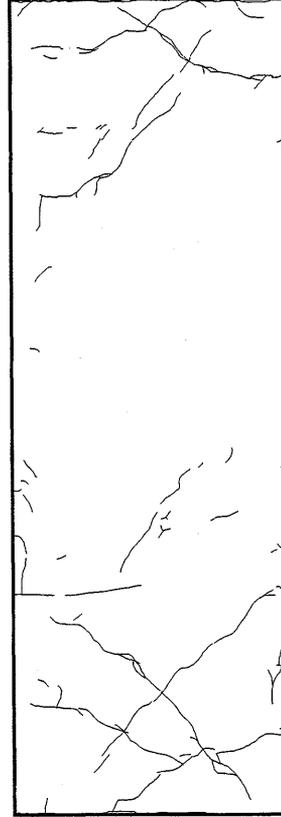
各試験体西面の終局時における損傷性状を写真 3-13 に示す。最大水平耐力を記録した点以降で水平耐力が最大水平耐力の 80% を下回った時点で終局状態と判断した。いずれの試験体ともにひび割れ幅の拡大やかぶりコンクリートの剥落が多く見られるが、コアコンクリートの顕著な破壊は見られなかった。FS27CA では柱頭、柱脚部において主筋の座屈が確認されたが、高強度補強筋を使用して高い拘束効果を持つ FS36CA と FS36NC では主筋の座屈は確認されていない。いずれの試験体も終局時に至るまで一定値の軸力を保持しており、軸抵抗性能の劣化は見られなかった。

以上から、各変形角における損傷性状に関して石炭灰の混入による有意な差は見られず、石炭灰を混入した試験体は普通コンクリートと同様の性状を示した。

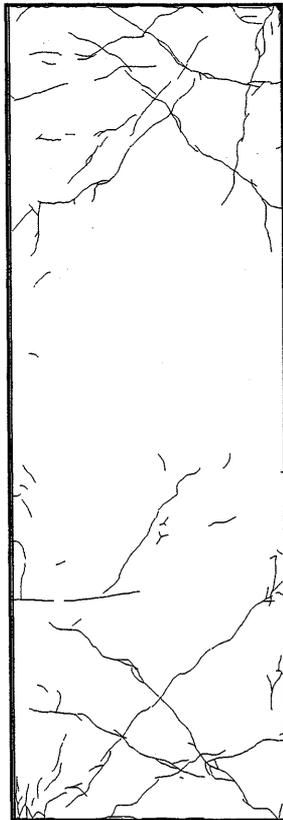
FS27CA



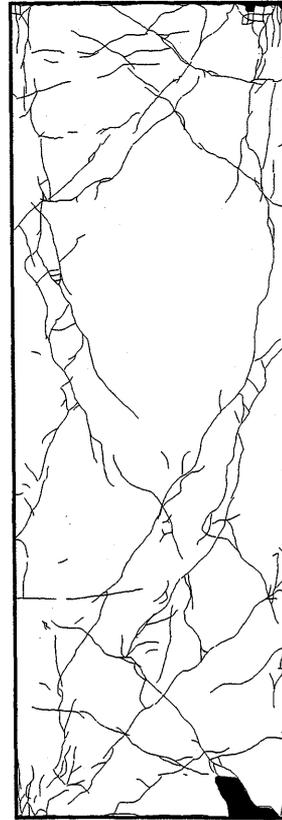
変形角 $R=0.25\%$



変形角 $R=0.5\%$



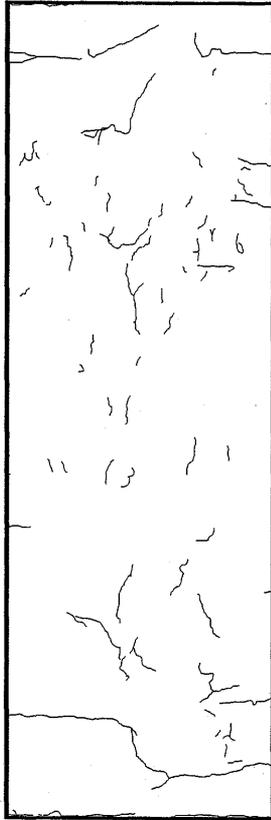
変形角 $R=1.0\%$



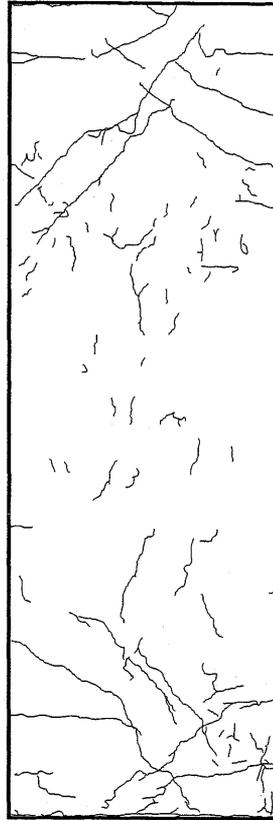
変形角 $R=2.0\%$

図 3-21 FS27CA における西面のひび割れ進展状況

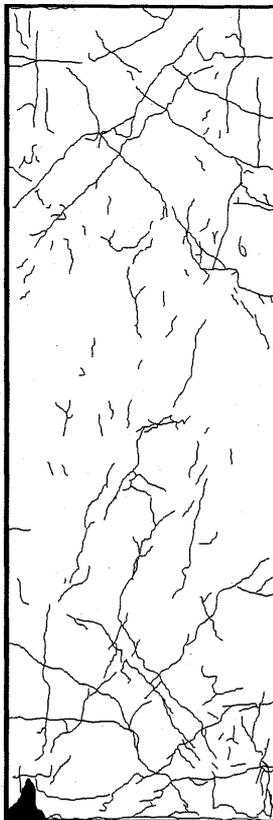
FS36CA



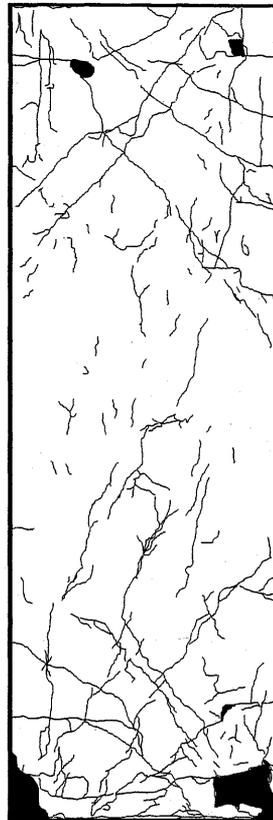
変形角 $R=0.25\%$



変形角 $R=0.5\%$



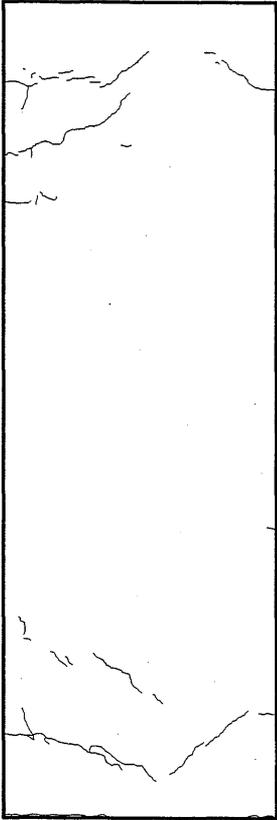
変形角 $R=1.0\%$



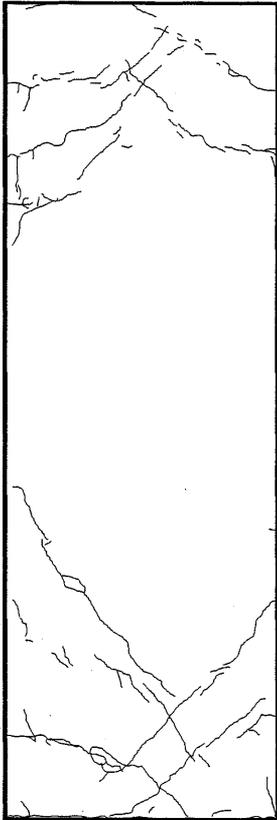
変形角 $R=2.0\%$

図 3-22 FS36CA における西面のひび割れ進展状況

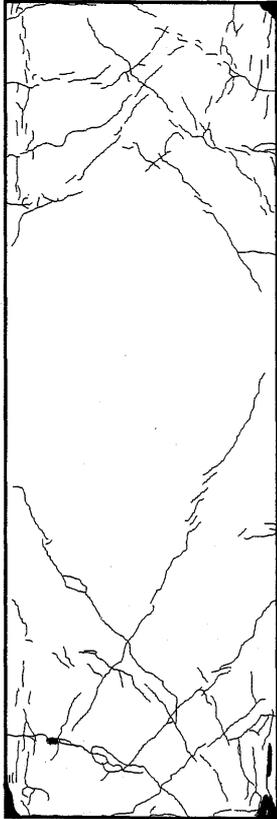
FS36NC



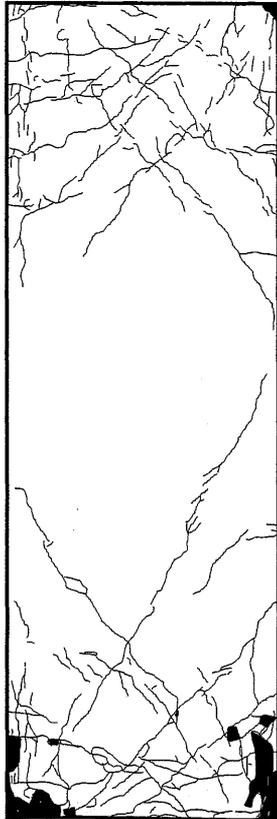
変形角 $R=0.25\%$



変形角 $R=0.5\%$



変形角 $R=1.0\%$



変形角 $R=2.0\%$

図 3-23 FS36NC における西面のひび割れ進展状況

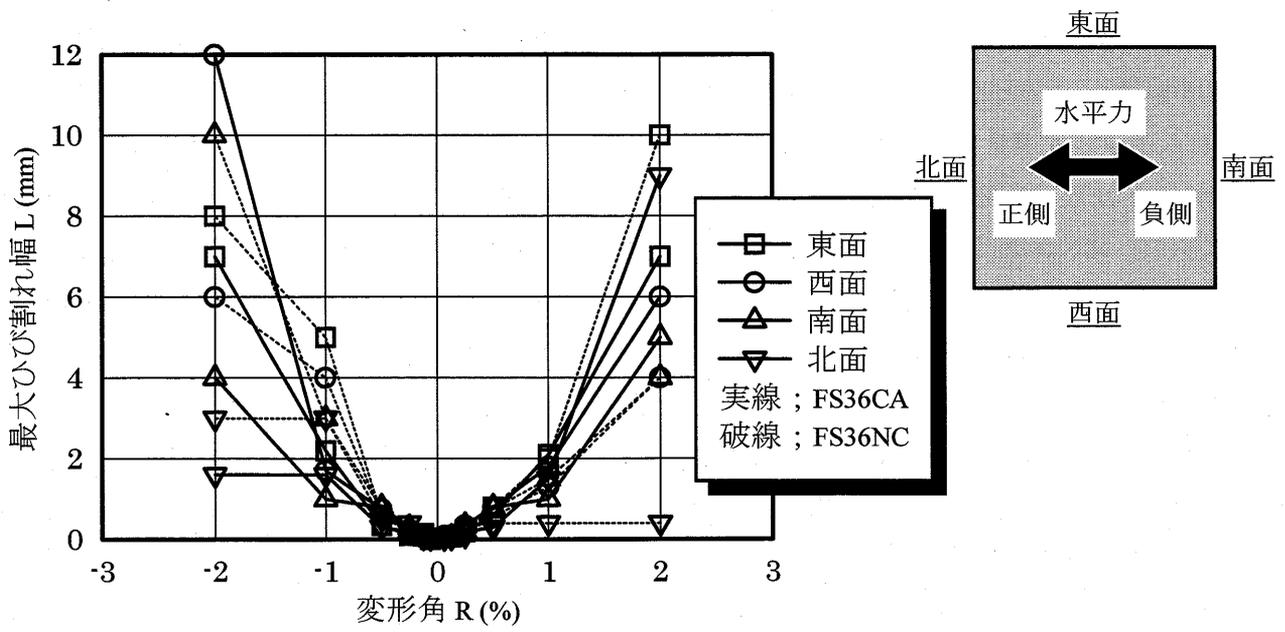
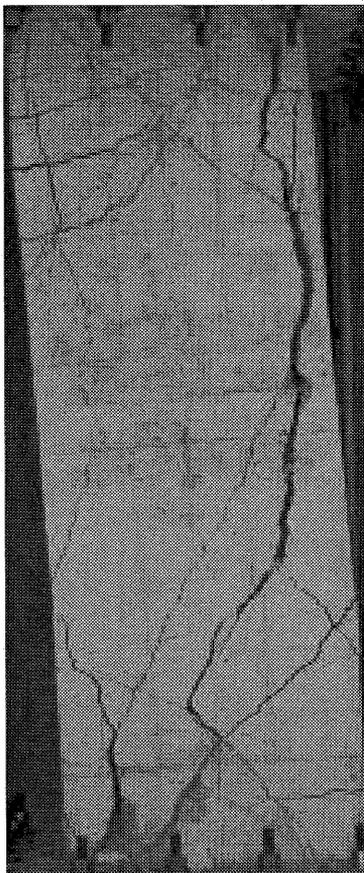
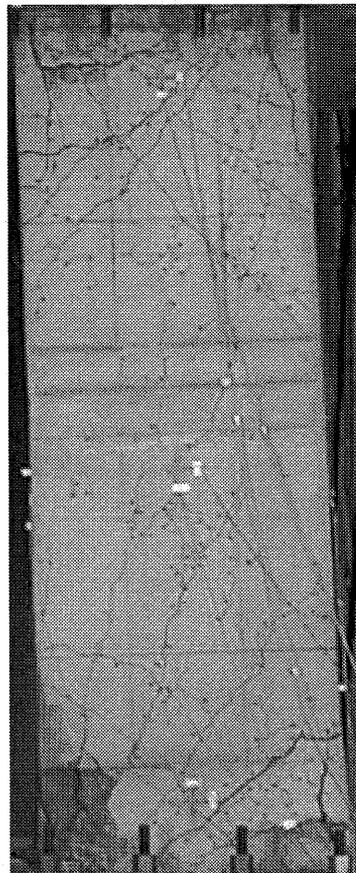


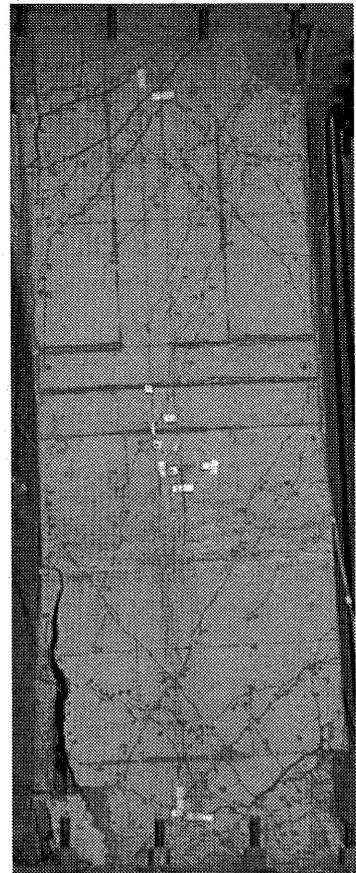
図 3-24 最大ひび割れ幅



FS27CA



FS36CA



FS36NC

写真 3-13 終局時における損傷性状

(2) 最大水平耐力

各試験体の荷重実験から得られた最大水平耐力の実験値 E_{QU} を終局曲げ耐力計算値 $c_{Q_{MU}}$ と終局せん断耐力計算値 $c_{Q_{SU}}$ 、およびそれらとの比率を併せて表 3-10 に示し、比率相互の関係を図 3-25 に示す。なお、 $c_{Q_{MU}}$ と $c_{Q_{SU}}$ の算定には、材料強度に材料試験結果の値を採用して、3-1-2 項に示した式 3-1 と式 3-2 を準用した。また、引張鉄筋として主筋の一段目まで考慮した場合と二段目まで考慮した場合の 2 通りを検討している。同図および同表からわかる通り、終局曲げ耐力において主筋を二段目まで考慮した場合、 $E_{QU}/c_{Q_{SU}}$ の比率は 1.0 に近くなる。なお、二段目の主筋に貼付したひずみゲージによる計測から鉄筋の降伏を確認しており、耐力計算には二段目の主筋まで考慮した方が妥当であると考えられる。最大水平耐力実験値が終局せん断耐力計算値と近似しているものの、せん断破壊による顕著な耐力低下はいずれの場合も起きなかったことから、石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は、普通コンクリートによる場合と同様に、式 3-2 による計算値を上回るせん断耐力を有していることがわかる。また、実験による最大水平耐力は曲げ終局耐力計算値を約 1 割上回る値となった。その原因としては、主筋の降伏後のひずみ硬化による強度上昇が挙げられる。

表 3-10 最大耐力

試験体名	考慮した主筋本数	実験値	計算値		比率	
		最大耐力 E_{QU} (kN)	曲げ終局耐力 $c_{Q_{MU}}$ (kN)	せん断終局耐力 $c_{Q_{SU}}$ (kN)	$E_{QU}/c_{Q_{MU}}$	$E_{QU}/c_{Q_{SU}}$
FS27CA	7-D25	1375	1216	1337	1.13	1.03
	5-D25		1011	1289	1.36	1.07
FS36CA	7-D25	1997	1796	1929	1.11	1.04
	5-D25		1599	1873	1.25	1.07
FS36NC	7-D25	2087	1859	2082	1.12	1.00
	5-D25		1662	2014	1.26	1.04

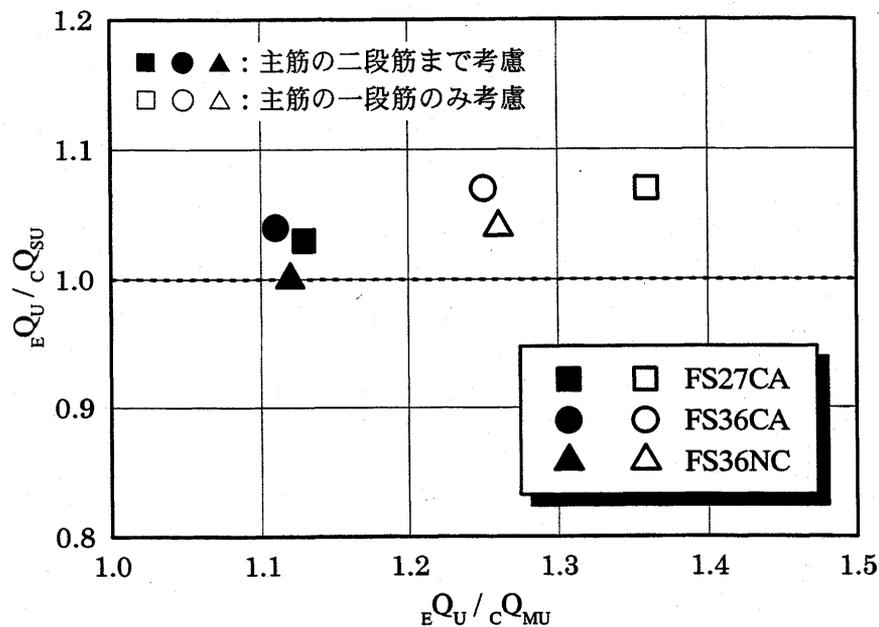


図 3-25 最大耐力と計算値の比較

(3) 水平力-水平変形角履歴曲線

各試験体の水平力-水平変形角履歴曲線を図 3-26 に示す。同図中には正負加力における降伏点および最大耐力点をプロットしている。ここで降伏点とは、いずれかの主筋が降伏に達した時点を示す。また、同図において縦軸は水平力 Q を終局曲げ耐力計算値 cQ_{MU} で除して基準化し、横軸は変形角 R としている。同図から FS27CA においては最大耐力点以降に耐力の低下が他 2 体よりも大きくなっている。その原因としては付着割裂ひび割れの進展、主筋の座屈の影響が考えられる。FS36CA と FS36NC においては、せん断ひび割れに起因するピンチング現象が顕著に見られる。いずれの試験体とも降伏点は変形角 $R=0.5\%$ 付近、最大耐力点は変形角 $R=1\%$ 付近にあり、軸力比、石炭灰混入の影響による有意な差はみられない。

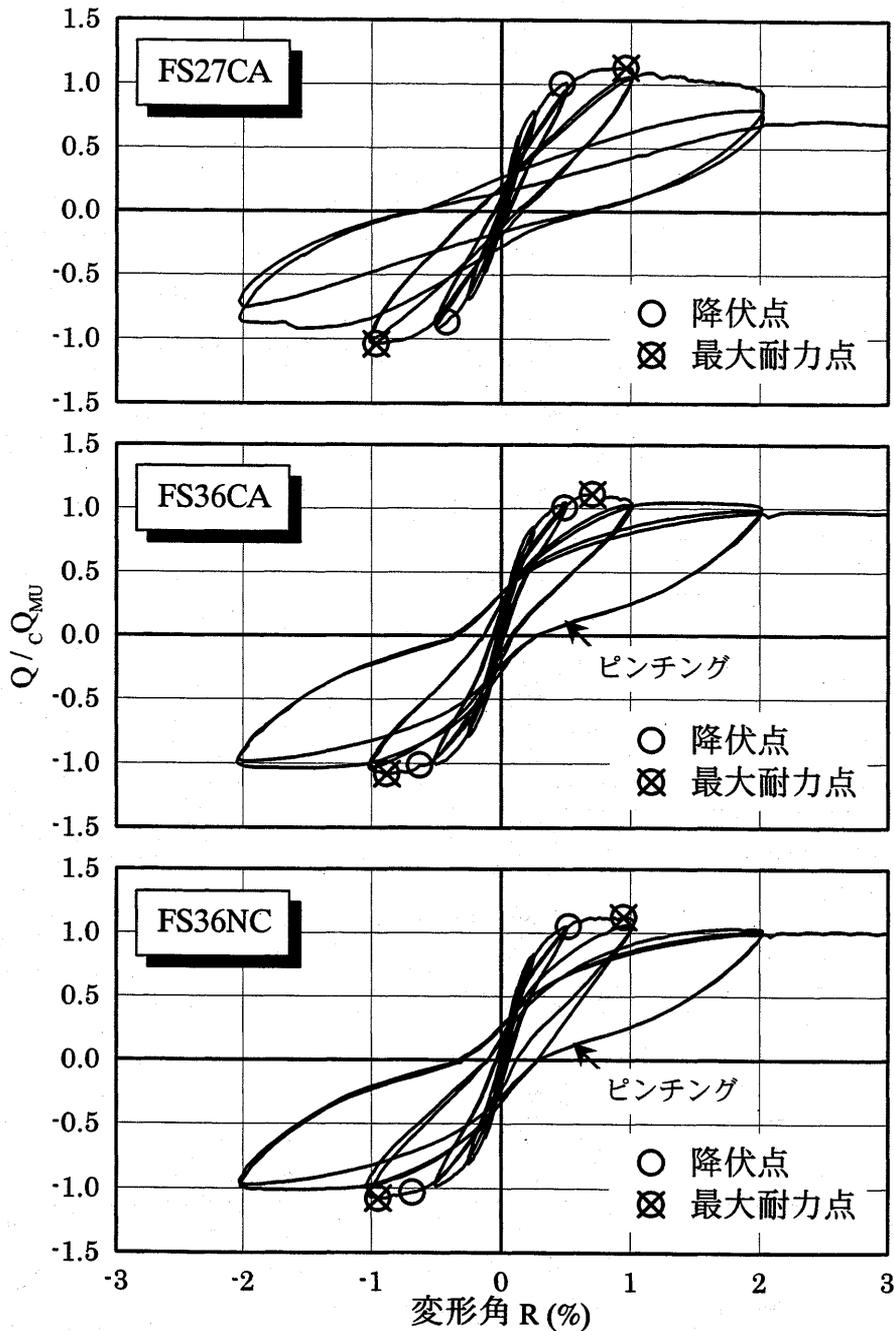


図 3-26 水平力-水平変形角履歴曲線

(4) 水平変位分布

変位計を用いて測定した水平変位の分布性状を比較して図 3-27 に示す。なお、縦軸は変形計の高さ位置 H 、横軸は水平変位 δ である。同図中で、実線が正加力時の水平変位分布を、破線が負加力時の水平変位である。いずれの試験体とも、水平変位分布は変形角 $R=2\%$ に至るまでほぼ直線的な性状を示しており、石炭灰混入の有無およびコンクリート強度の差による影響は見られない。なお、FS36CA と FS36NC の柱頭部では、変形角 $R=1\%$ 以降でかぶりコンクリートが剥落し、水平変位が計測できていない。

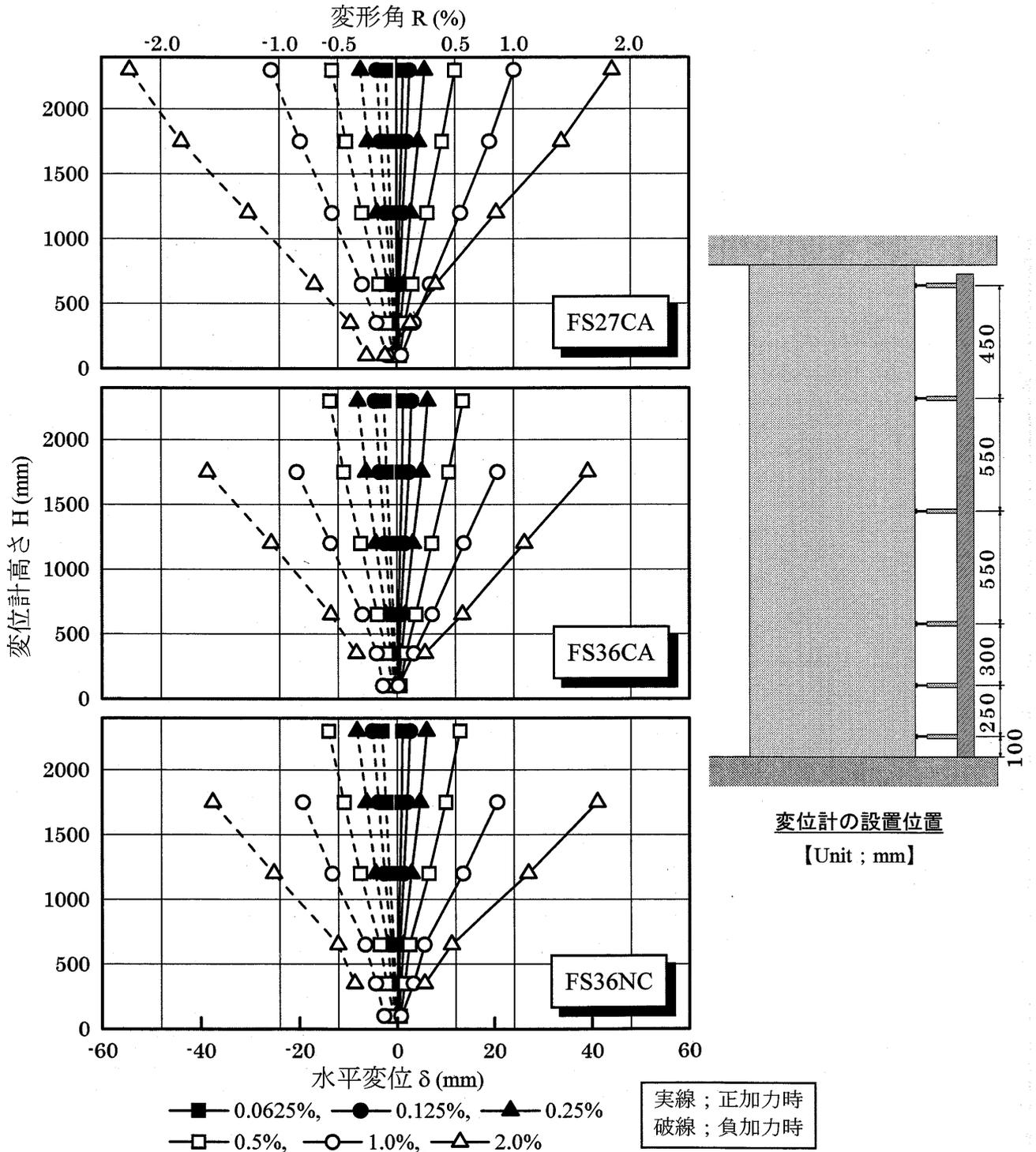


図 3-27 水平変位分布性状

(5) 曲率分布性状

鉛直方向に設置した 8 箇所の変位計から測定した変位の値から、それぞれの変形角における柱頭部および柱脚部での曲率を算出した。以下にその算出方法を示す。

各変位計の設置位置を図 3-28 (a) に示す。同図に示すように、柱頭部では領域Φ1 とΦ2、柱脚部では領域Φ3 とΦ4 において両サイドの変位量を計測しており、領域ごとに曲率を求めることができる。各領域に関して、図 3-28 (b) に示す d_a および d_b が両サイドの変位計により計測された変位にあたり、平面保持の仮定から、下式を用いて中立軸距離 x を算出することができる。

$$x = \frac{L \times d_a}{d_a + d_b} \text{ (mm)}$$

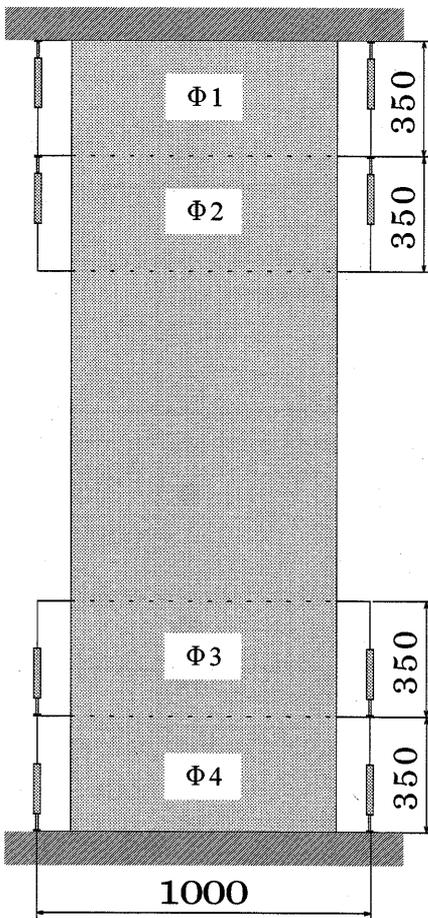
また、各計測点におけるひずみ ε_a 、 ε_b は以下の式で算出できる。

$$\varepsilon_a = \frac{d_a}{H}, \quad \varepsilon_b = \frac{d_b}{H}$$

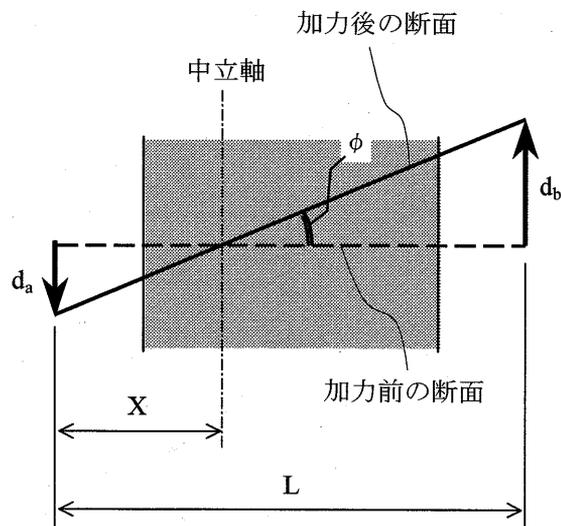
ここで、 H : 領域の高さ、 $H=350\text{mm}$

従って、各領域の曲率 ϕ は下式により算出することができる。

$$\phi = \frac{\varepsilon_a}{x} = \frac{\varepsilon_b}{L-x}$$



(a) 変位計の設置位置
[単位 : mm]



(b) 曲げによる断面の変形

図 3-28 曲率の算出方法

上記の方法で算出した各試験体の各領域における曲率を変形角との関係として図 3-29 に示す。各領域ともに曲率は変形角に対して直線的に分布しており、柱頭、柱脚に接する領域の曲率 ($\Phi 1$, $\Phi 4$) は内側領域の曲率 ($\Phi 2$, $\Phi 3$) の 2 倍以上大きな値となっている。いずれの試験体ともに同様な分布で、安定した曲げ変形性状を示しており、石炭灰混入による顕著な差は見られない。

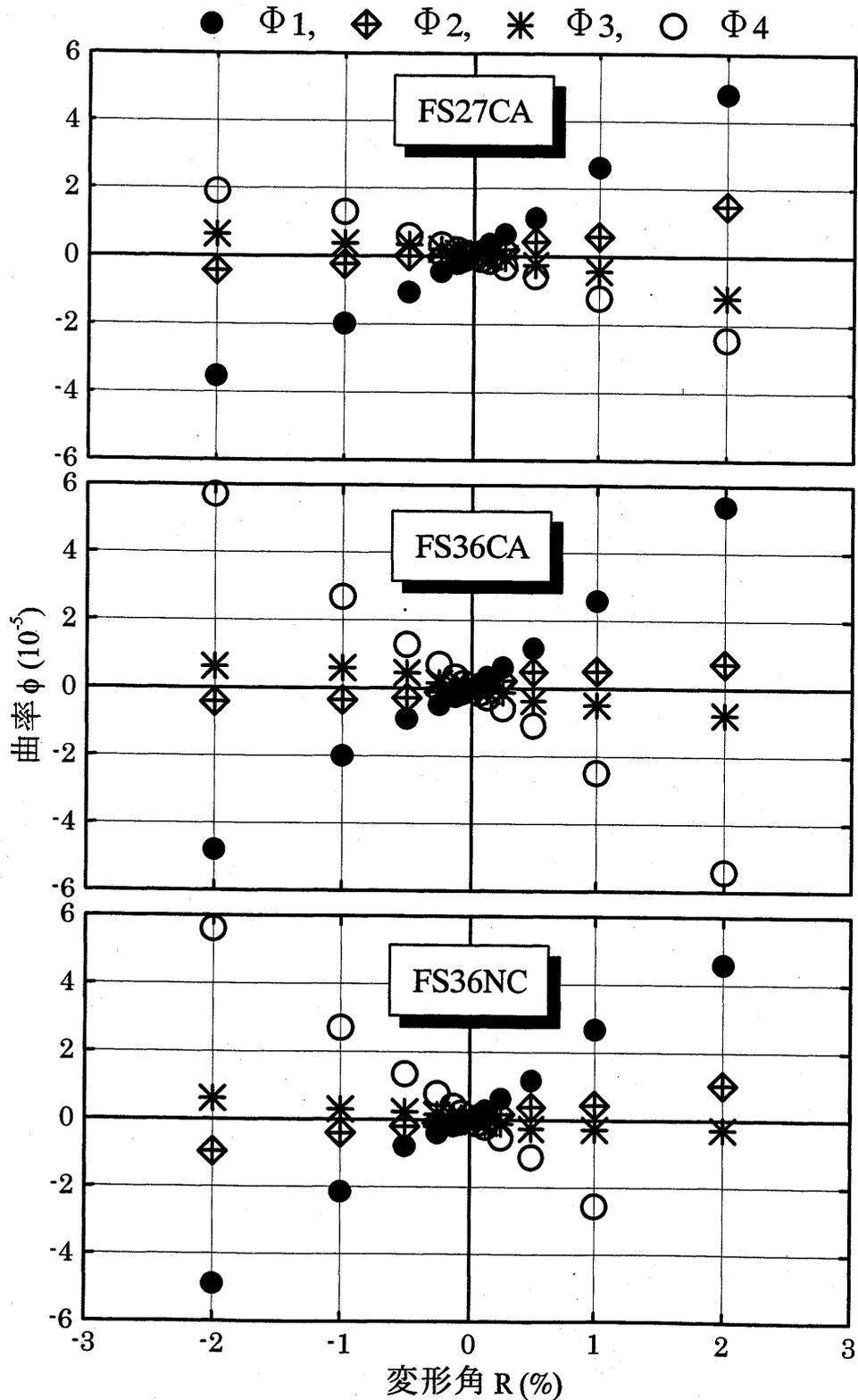


図 3-29 曲率分布性状

(6) 主筋のひずみ分布

試験体中の主筋に貼付したひずみゲージによって測定したひずみの高さ方向の分布性状を、南面最外縁の主筋について図 3-30 に、北面最外縁の主筋について図 3-31 にそれぞれ示す。同図中で横軸はひずみ ϵ を鉄筋の材料試験により得られた降伏ひずみ ϵ_Y で除して基準化している。同図から、ややばらつきはあるものの、各試験体ともひずみの分布性状は曲げモーメント図の形状と類似しており、試験体による大きな差は見られない。主筋の降伏した部分をヒンジ領域と見なすと、変形角 $R=2\%$ 時点において、部材両端部から部材せいに等しい高さ部分がヒンジ領域となっている。

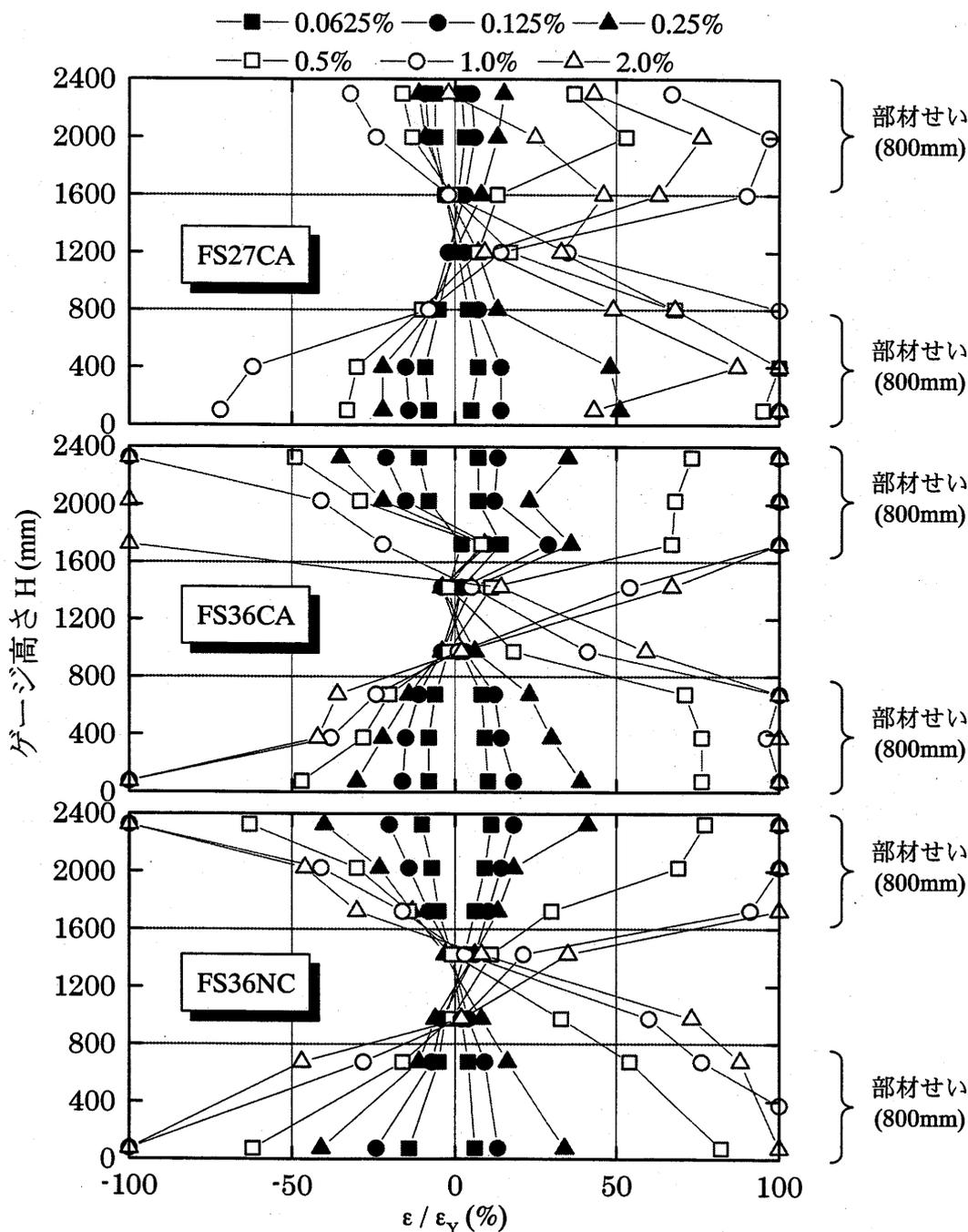


図 3-30 南面最外縁主筋の高さ方向ひずみ分布性状

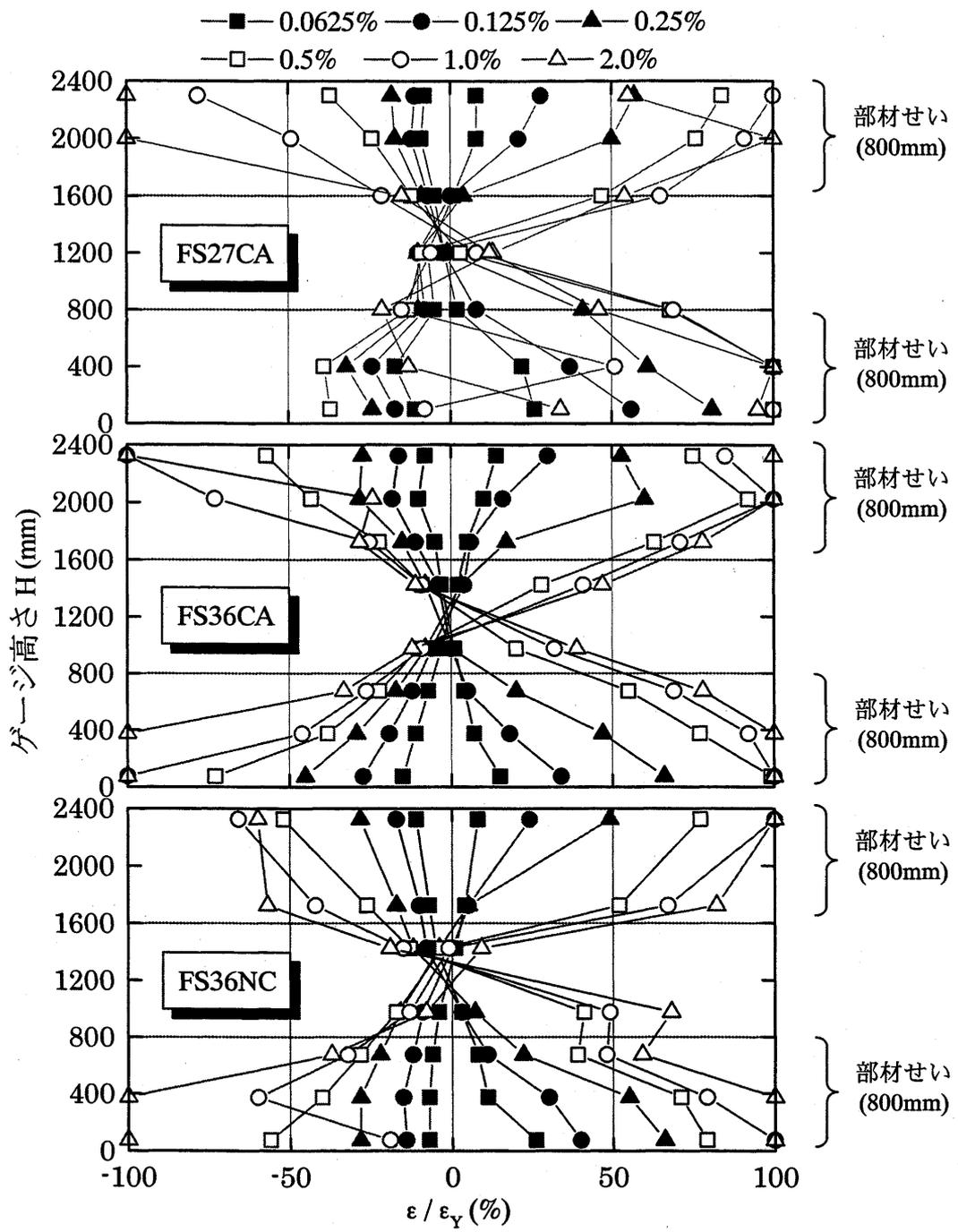


図 3-31 北面最外縁主筋の高さ方向ひずみ分布性状

柱頭部および柱脚部における同一断面内での主筋のひずみ分布を、変形角 $R=0.25\%$ までに関して、西面最外縁の主筋について図 3-32 に、東面最外縁の主筋について図 3-33 に示す。図中で縦軸はひずみ ε を降伏ひずみ ε_y で除して基準化している。同図からわかる通り、いずれの試験体においても主筋のひずみは断面内で直線的に分布しており、平面保持が成立している。なお、変形角 $R=0.25\%$ 以降のサイクルでは主筋が降伏した場合もあり、記載していない。

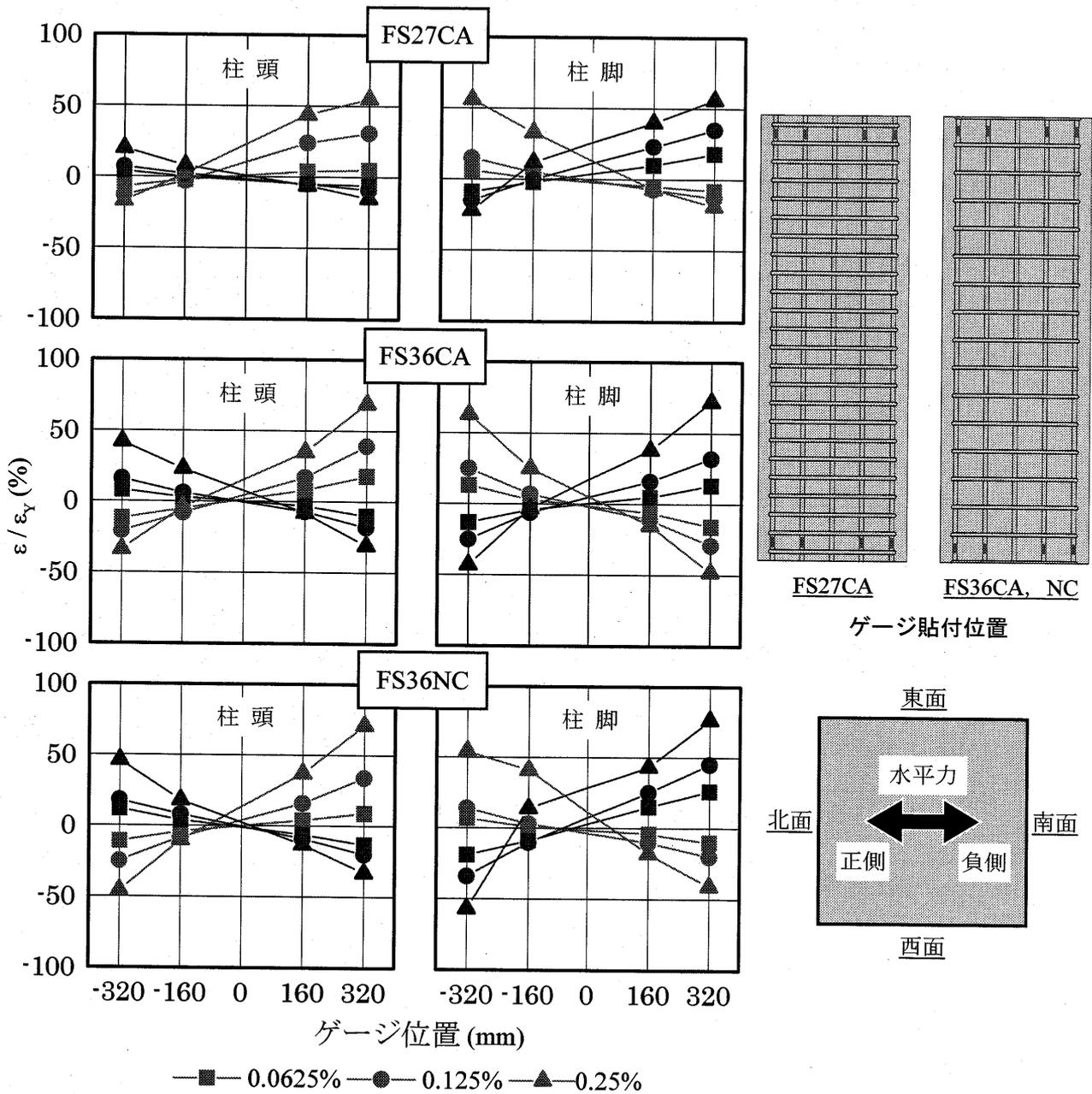


図 3-32 西面最外縁主筋の断面方向ひずみ分布性状

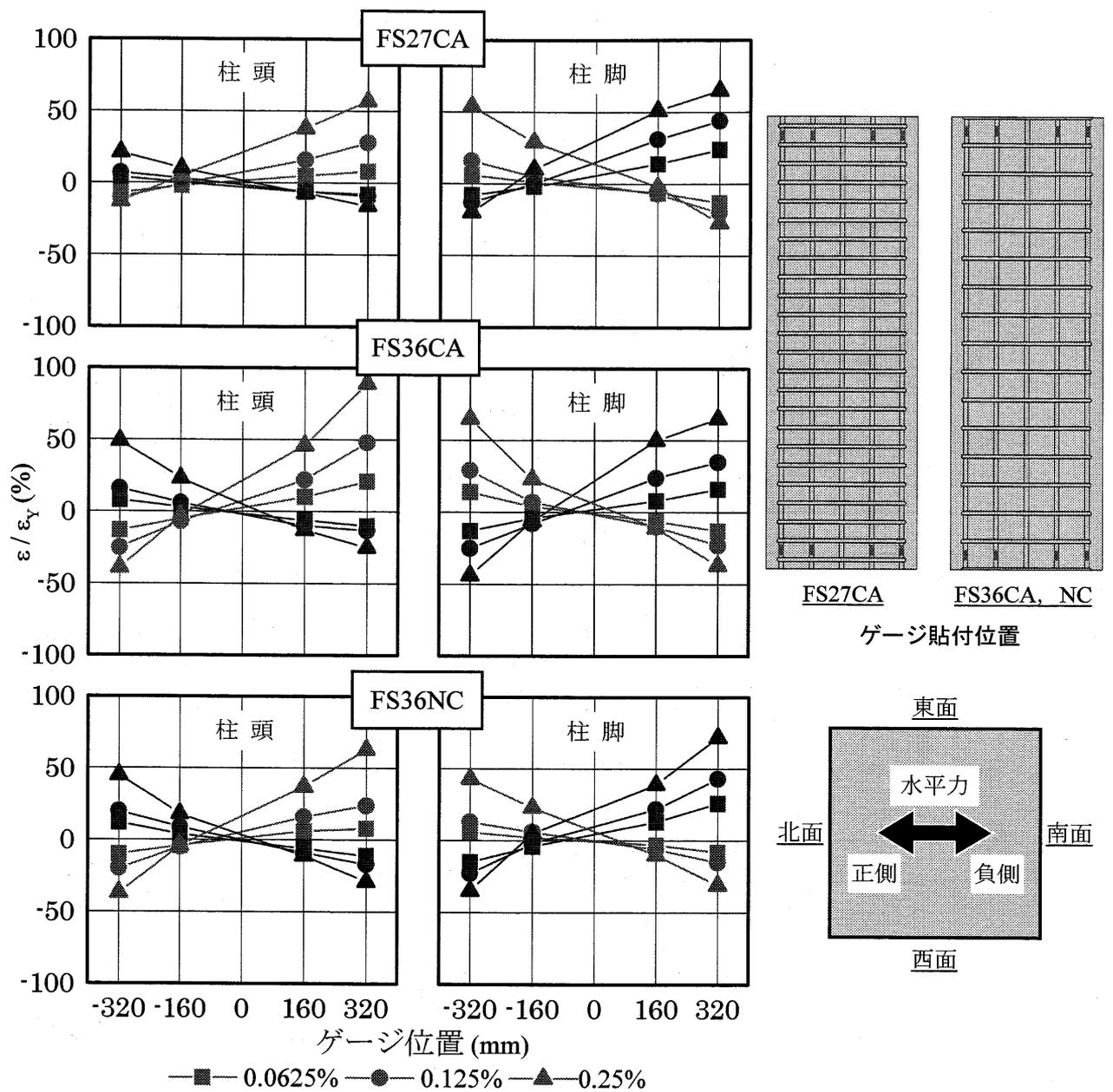


図 3-33 東面最外縁主筋の断面方向ひずみ分布性状

(7) 帯筋のひずみ分布

帯筋の高さ方向のひずみ分布性状を、西面帯筋について図 3-34 に、東面帯筋について図 3-35 にそれぞれ示す。なお、横軸はひずみ ε を鉄筋の材料試験により得られた降伏ひずみ ε_y で除して基準化している。同図から、いずれの試験体とも変形角 $R=0.5\%$ のサイクル以降にひずみの値が大きくなっており、目視による曲げせん断ひび割れ発生の確認時期と一致している。

帯筋に SD295 を用いた FS27CA では降伏した点があるのに対して、SD1275 を使用した FS36CA と FS36NC では最大でも降伏比は 40%程度に留まっている。ただし、降伏した点を除き、ひずみの値としては

変形角ごとに同程度であり、同レベルのせん断力を負担していたことが確認できる。なお、石炭灰混入による顕著な差は見られない。

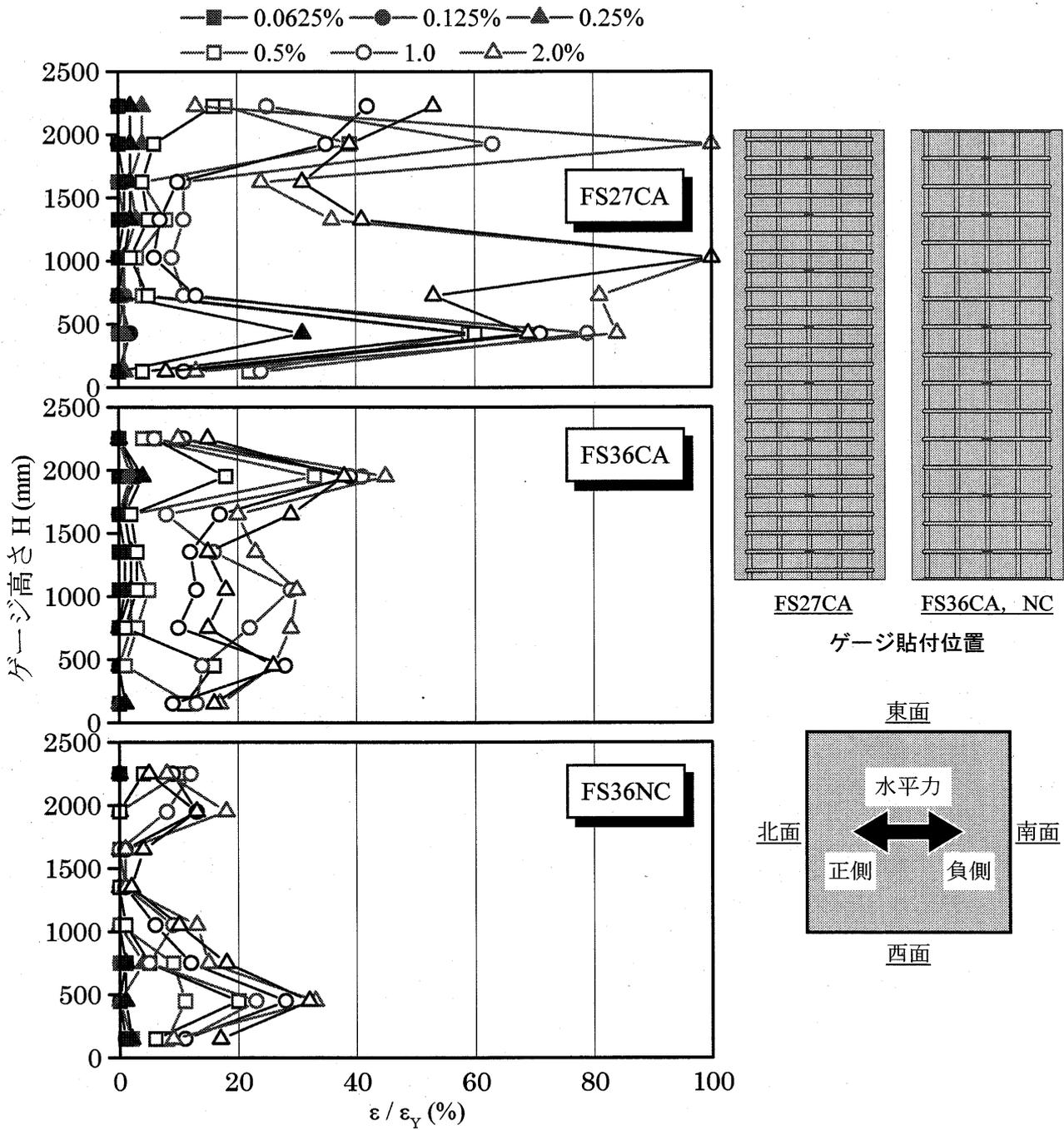


図 3-34 西面帯筋の高さ方向ひずみ分布性状

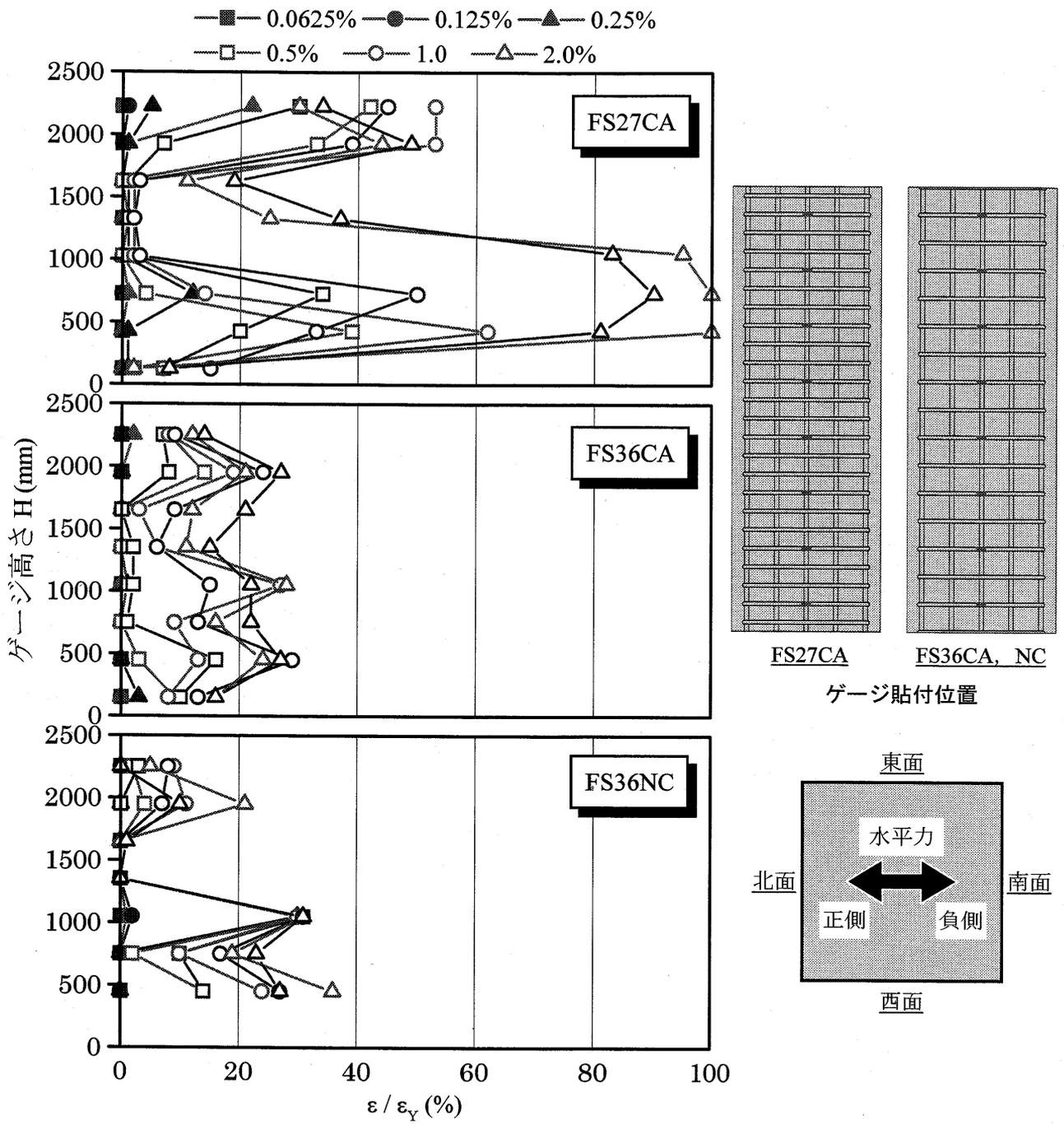


図 3-35 東面帯筋の高さ方向ひずみ分布性状

(8) 中子筋のひずみ分布

中子筋を有する FS36CA と FS36NC に関して、中子筋の高さ方向のひずみ分布性状を、西面中子筋について図 3-36 (a) に、東面中子筋について図 3-36 (b) にそれぞれ示す。なお、横軸はひずみ ϵ を鉄筋の材料試験により得られた降伏ひずみ ϵ_y で除して基準化している。分布性状にはややばらつきがあるものの、いずれの試験体も変形角 $R=0.5\%$ のサイクルからひずみの値が大きくなっており、最大で 40% 付近になっている。

中子筋も帯筋と同様に変形角 $R=0.5\%$ のサイクル以降でせん断力を負担して、拘束効果を発揮していることが確認できる。

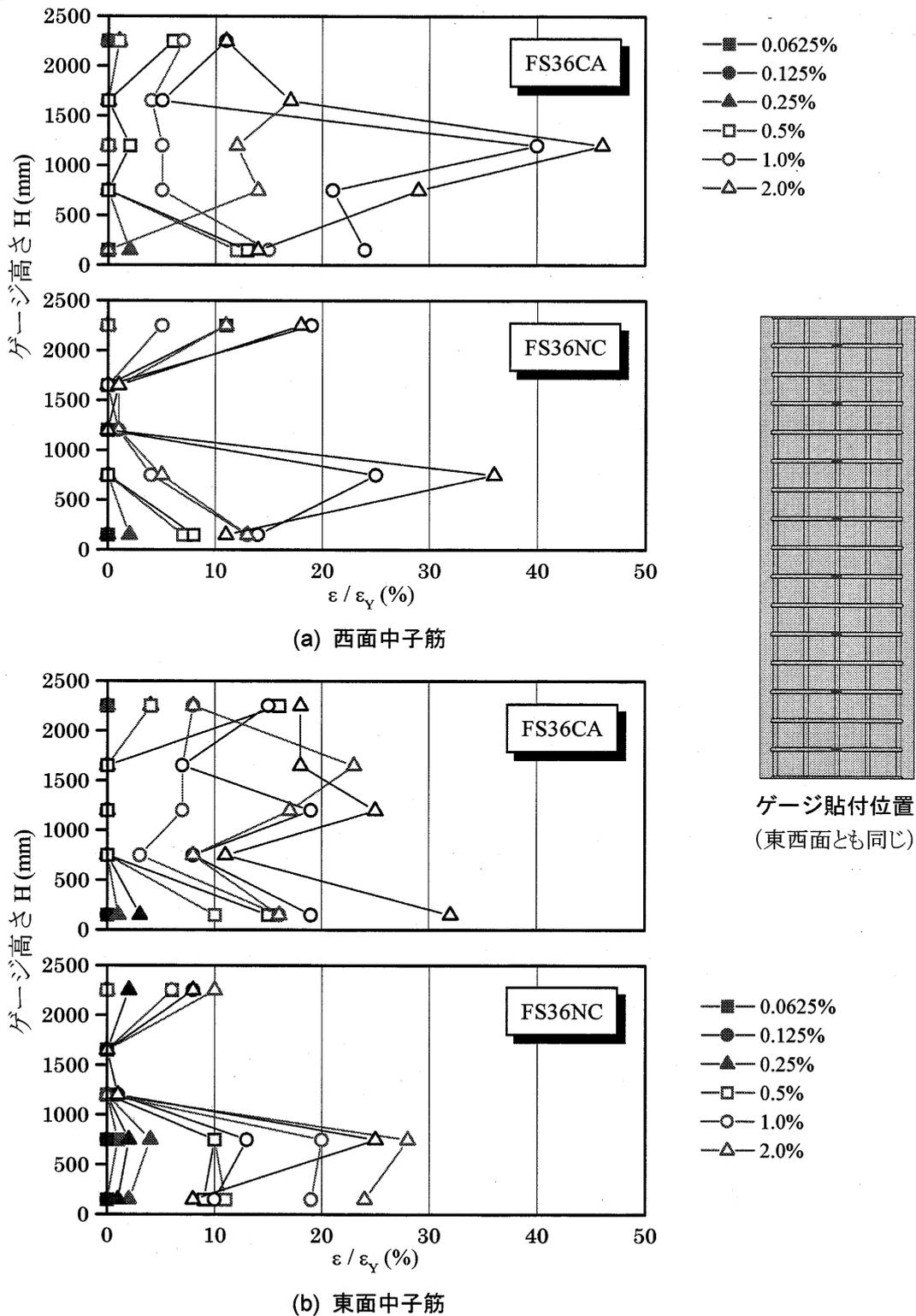


図 3-36 中子筋の高さ方向ひずみ分布性状

3-4-3 実験結果の考察

(1) 損傷進展性状

各変形角における試験体の損傷性状を比較するために、文献²¹⁾に基づき柱の損傷度を評価した。実際の損傷度判定においては地震後の損傷状況から構造部材の損傷度を判定するが、本研究では変形角のピーク時における点で損傷評価を行った。文献²¹⁾に記載されている損傷度判定表を表 3-11 に示す。同表に従って判定した変形角 $R=2\%$ までの結果を表 3-12 および図 3-37 に示す。同図中の横軸は変形角とし、縦軸は損傷度を示している。なお、FS27CA においてはひび割れ幅を測定していないため、写真からひび割れ幅を推定し、損傷度を判定した。変形角 $R=2\%$ 以内においてはいずれの試験体ともかぶりコンクリートの剥落が確認できるが、コアコンクリートの損傷、主筋の座屈は見られず、損傷状況は類似したものとなった。また、各変形角における最大ひびわれ幅、水平耐力比、鉛直耐力比なども同程度であり、損傷度はほぼ一致している。変形角が 2% の時でも損傷度がⅢに収まっていることから、大地震時においても十分な耐震性能を有していることがわかる。損傷度Ⅳに相当する状態は、本実験においては変形角 $R=2\%$ 以降の $R=3\%$ 程度で観察された。変形角 $R=2\%$ および終局状態において損傷の顕著な部分を比較して写真 3-14 に示す。しかし、鉄筋の破断や柱軸方向の著しい変形は生じていない。軸力比による損傷進展性状の違いはあるが FS36CA と FS36NC の試験体においては有意な差は見られない。

以上に示した損傷度判定の結果から、石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱の水平載荷に対する損傷レベルは、普通コンクリートによる場合と同程度であることを確認した。

表 3-11 損傷判定表

損傷度	損傷内容
I	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ (ひび割れ幅0.2mm以下)
II	肉眼ではっきり見える程度のひび割れ (ひび割れ幅0.2~1mm程度)
III	比較的大きなひび割れが生じているがコンクリートの剥落は極わずかである。(ひび割れ幅1~2mm程度) 水平耐力やや劣化鉛直耐力ほぼ健全
IV	大きなひび割れ (2mmを超える) が多数生じコンクリートの剥落も激しく鉄筋がかなり露出している。水平耐力やや劣化鉛直耐力やや劣化
V	鉄筋が曲がり内部のコンクリートも崩れ落ち、一見して柱の高さ方向の変形が生じていることがわかるもの。鉄筋の破断が生じている場合もある。

表 3-12 損傷状況と判定結果

試験体名	変形角 (%)	最大ひび割れ幅 (mm)	水平耐力比 (%)	鉛直耐力比 (%)	剥落	圧壊	主筋の座屈	損傷度
FS27CA	0.0625	-	劣化なし	劣化なし	無	無	無	I
	0.125	-	劣化なし	劣化なし	無	無	無	I
	0.25	-	劣化なし	劣化なし	無	無	無	II
	0.5	-	劣化なし	劣化なし	無	無	無	II
	1.0	-	96	99	有	無	無	II
	2.0	-	83	98	有	有	無	III
FS36CA	0.0625	0.08	劣化なし	劣化なし	無	無	無	I
	0.125	0.10	劣化なし	劣化なし	無	無	無	I
	0.25	0.35	劣化なし	劣化なし	無	無	無	II
	0.5	0.80	劣化なし	劣化なし	無	無	無	II
	1.0	1.80	95	99	有	無	無	III
	2.0	12.00	90	99	有	有	無	III
FS36NC	0.0625	0.04	劣化なし	劣化なし	無	無	無	I
	0.125	0.15	劣化なし	劣化なし	無	無	無	I
	0.25	0.40	劣化なし	劣化なし	無	無	無	II
	0.5	0.80	劣化なし	劣化なし	無	無	無	II
	1.0	5.00	96	99	有	無	無	III
	2.0	10.00	89	99	有	有	無	III

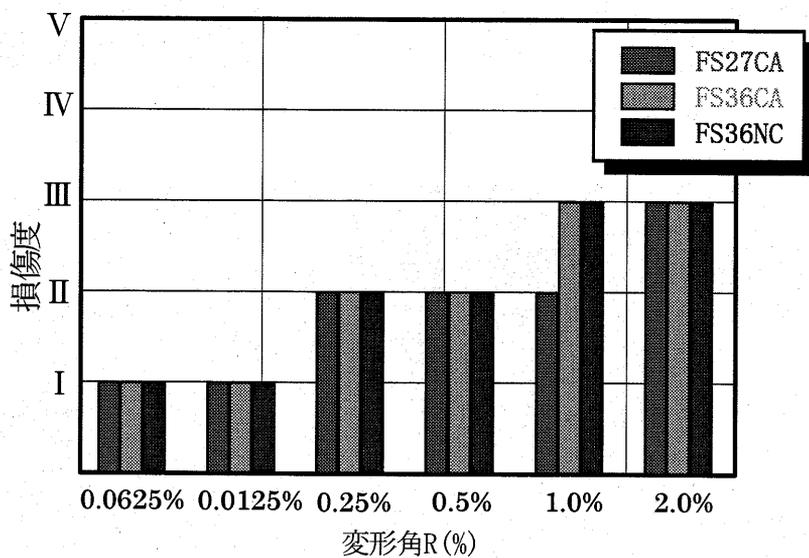
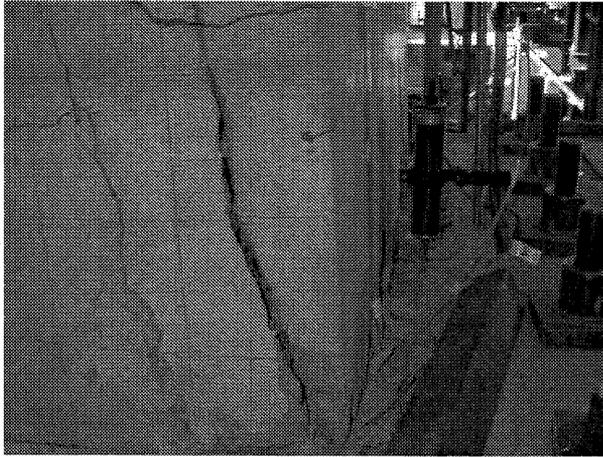
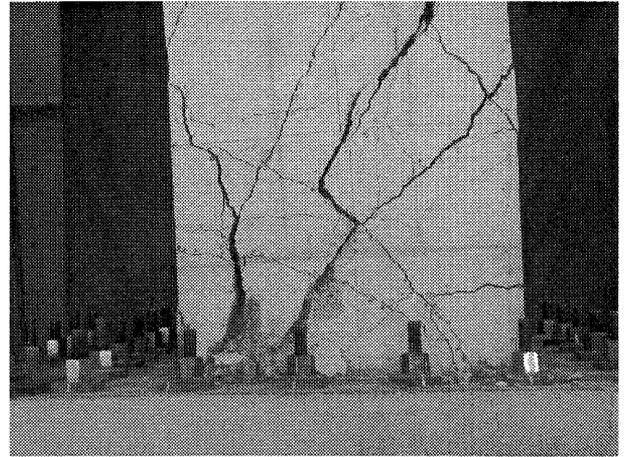


図 3-37 変形角と損傷度の関係

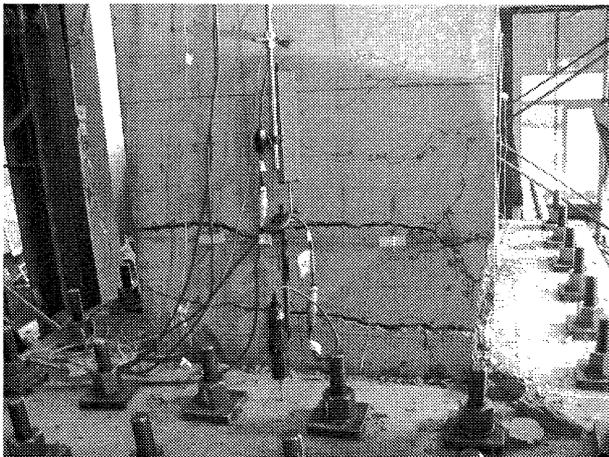


R=2%

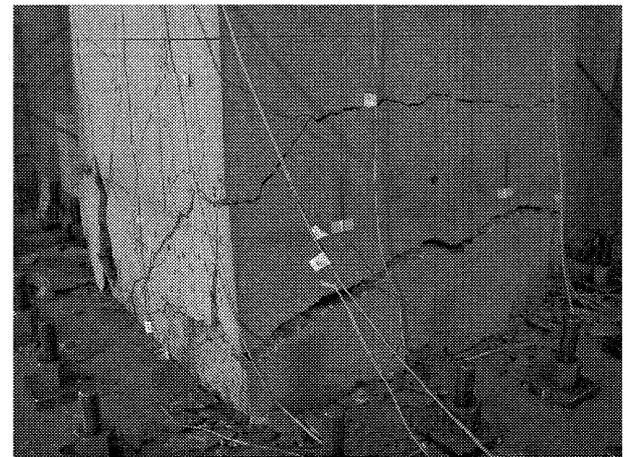


終局時

FS27CA



R=2%



終局時

FS36CA



R=2%



終局時

FS36NC

写真 3-14 変形角 R=2%および終局時における損傷状況

(2) 履歴包絡線

水平力-水平変形角履歴曲線の包絡線を図 3-38 に示す。同図中には、実験中に正負の載荷で観測した最初の曲げひび割れ発生点（曲げひび割れ点），最初の曲げせん断ひび割れ発生点（曲げせん断ひび割れ点），最初のせん断ひび割れ発生点（せん断ひび割れ点），いずれかの主筋が最初に降伏した点（曲げ降伏点），最大の水平力を記録した点（最大耐力点）の実験値をプロットしている。また，表 3-13 にそれぞれの点における変形角 R との水平力実験値 Q と曲げ終局耐力計算値 cQ_{MU} の比率を示す。曲げ終局耐力計算値 cQ_{MU} は表 3-10 中に示した二段目の主筋まで考慮した場合の値である。曲げひび割れ点については変形角，耐力比ともに試験体による差が無くほぼ一定であるが，曲げせん断ひび割れ点，せん断ひび割れ点，曲げ降伏点，最大耐力点については，他に比較し FS2CA で変形角，耐力比ともに小さい値となっている。この原因は軸力レベルの相違によるものと推察される。ただし，FS36CA と FS36NC ではいずれの点も変形角，耐力比ともに同一レベルで推移しており，水平荷重の増大に対して，石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は普通コンクリートによる場合と同様の履歴経過を辿ったことが確認できる。

表 3-13 水平耐力点の比較

試験体名	ひび割れ						曲げ降伏点		最大耐力点	
	曲げ		曲げせん断		せん断		R(%)	Q/cQ _{MU}	R(%)	Q/cQ _{MU}
	R(%)	Q/cQ _{MU}	R(%)	Q/cQ _{MU}	R(%)	Q/cQ _{MU}				
FS27CA	0.07	0.38	0.15	0.62	0.19	0.71	0.19	0.71	0.19	0.71
	-0.08	-0.37	-0.14	-0.50	-0.20	-0.63	-0.20	-0.63	-0.20	-0.63
FS36CA	0.06	0.40	0.25	0.83	0.29	0.89	0.29	0.89	0.29	0.89
	-0.09	-0.41	-0.25	-0.79	-0.40	-0.95	-0.40	-0.95	-0.40	-0.95
FS36NC	0.07	0.37	0.22	0.79	0.31	0.90	0.31	0.90	0.31	0.90
	-0.06	-0.42	-0.20	-0.73	-0.32	-0.87	-0.32	-0.87	-0.32	-0.87

□ 曲げひび割れ点, ○ 曲げせん断ひび割れ点
 △ せん断ひび割れ点, ⊕ 曲げ降伏点, * 最大耐力点

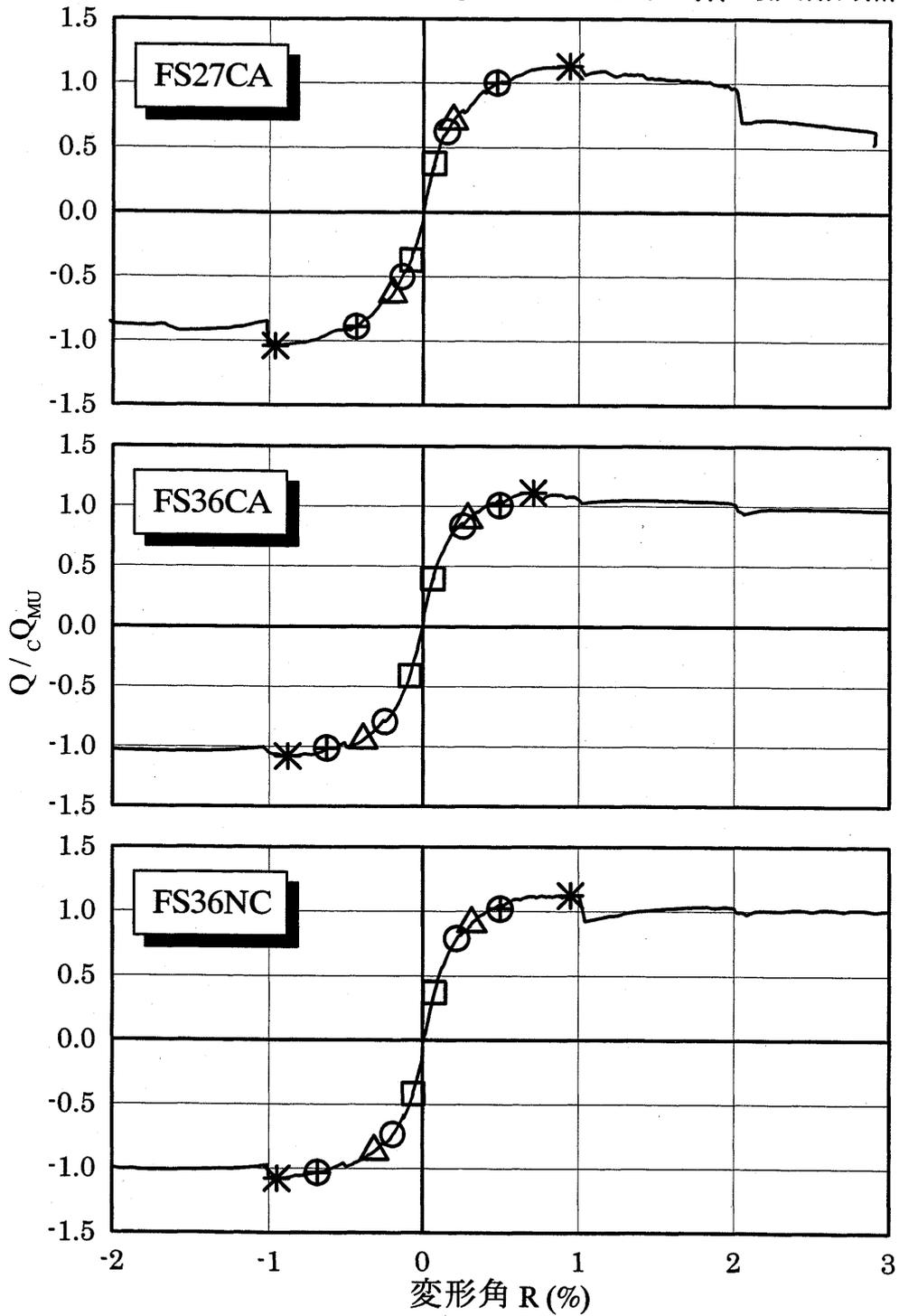


図 3-38 履歴包絡線の比較

(3) エネルギー吸収能力

試験体の履歴特性をより詳細に検討するために、各履歴ループから等価粘性減衰定数 h_{eq} を図 3-39 に示す方法に基づいて算出した。得られた結果を変形角との関係として図 3-40 に示す。同図中では各変形角の 1 サイクル目を単色記号、2 サイクル目を白抜き記号でプロットしている。いずれの試験体とも変形角 $R=0.5\%$ までは等価粘性定数 h_{eq} は 7% 付近に分布しており、主筋の降伏開始後に変形角の増大につれて大きな値となっている。なお、変形角 $R=2\%$ の 1 サイクル目において、FS36CA と FS36NC の等価粘性減衰定数 h_{eq} は FS27CA に対して小さな値を示している。これは軸力比の大きい FS36CA と FS36NC では顕著なピンチングが起こり、履歴面積が減少したためと推察される。ただし、変形角 $R=2\%$ の 2 サイクル目には、いずれの試験体も同程度の値となっている。FS27CA が 1 サイクル目に多大な損傷を受け、2 サイクル目の履歴面積が減少したためと推察される。

以上のことから石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は、普通コンクリートによる場合と同様に、十分なエネルギー吸収能力を有していることが確認できた。

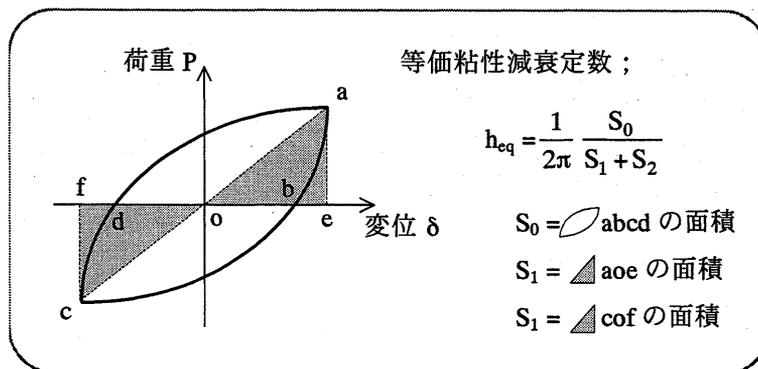


図 3-39 等価粘性減衰定数 h_{eq} の算出方法

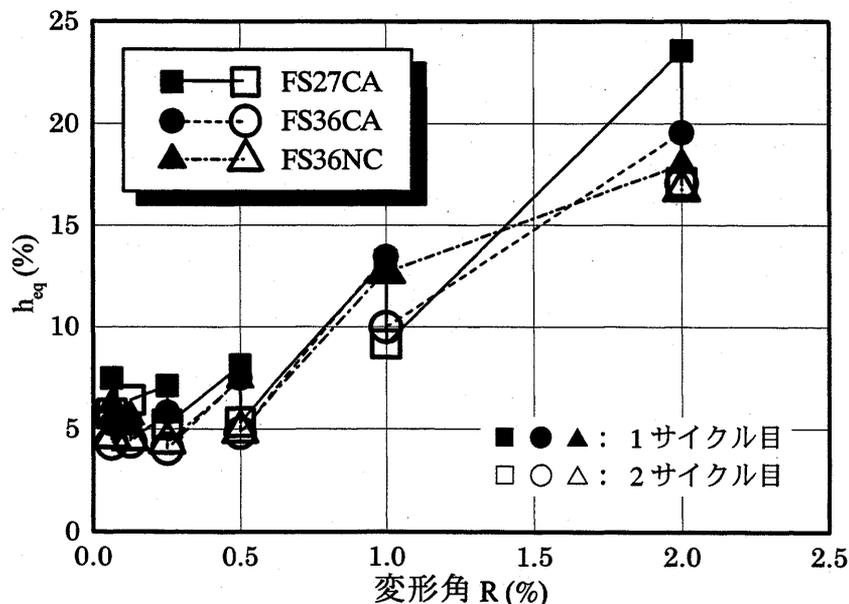


図 3-40 等価粘性減衰定数 h_{eq} の推移

(4) 既往の水平耐力評価式の適用

ひび割れ耐力

各試験体の載荷実験から得られた曲げひび割れ発生点の水平耐力実験値 $E_{Q_{BC}}$ 、曲げせん断ひび割れ発生点の水平耐力実験値 $E_{Q_{BSC}}$ 、せん断ひび割れ発生点の水平耐力実験値 $E_{Q_{SC}}$ を文献²²⁾に基づき算定した試験体の曲げひび割れ耐力計算値 $c_{Q_{BC}}$ 、曲げせん断ひび割れ耐力計算値 $c_{Q_{BSC}}$ 、せん断ひび割れ耐力計算値 $c_{Q_{SC}}$ との比率として表 3-14 にそれぞれ示す。各算定式を同表の脚注に記す。同表から、FS27CA のせん断ひび割れ点でやや大きな開きがあるが、その他の耐力は 1 割程度の差で概ね評価できていることがわかる。

従って、石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱の各ひび割れ点耐力は普通コンクリートを用いた部材に対する既往の耐力評価式で精度良く評価可能である。

表 3-14 ひび割れ耐力評価式の適用

試験体名	実験値ひび割れ耐力 (kN)			計算値ひび割れ耐力 (kN)			実験値/計算値		
	曲げ	曲げせん断	せん断	曲げ	曲げせん断	せん断	曲げ	曲げせん断	せん断
	$E_{Q_{BC}}$	$E_{Q_{BSC}}$	$E_{Q_{SC}}$	$c_{Q_{BC}}$	$c_{Q_{BSC}}$	$c_{Q_{SC}}$	$\frac{E_{Q_{BC}}}{c_{Q_{BC}}}$	$\frac{E_{Q_{BSC}}}{c_{Q_{BSC}}}$	$\frac{E_{Q_{SC}}}{c_{Q_{SC}}}$
FS27CA	458	758	858	453	890	1038	1.009	0.851	0.826
	-450	-608	-770	-453	-890	-1038	0.993	0.682	0.742
FS36CA	717	1499	1595	771	1377	1421	0.930	1.088	1.122
	-723	-1422	-1701	-771	-1377	-1421	0.938	1.033	1.197
FS36NC	687	1471	1681	789	1443	1555	0.870	1.019	1.081
	-774	-1363	-1609	-789	-1443	-1555	0.981	0.944	1.035

[計算値 $c_{Q_{BC}}$ 、 $c_{Q_{BSC}}$ 、 $c_{Q_{SC}}$ の算出方法]

$c_{Q_{BC}}$: 曲げひび割れ耐力

$$c_{Q_{BC}} = 2 M_{BC} / h$$

$$M_{BC} = 0.56 \sqrt{\sigma_B} Z_e + N Z_e / A_c$$

ここで、 σ_B : コンクリートの圧縮強度、 Z_e : 鉄筋を考慮した断面係数、 N : 作用軸力、

A_c : 柱の断面積、 h : 柱の高さ

$c_{Q_{BSC}}$: 曲げせん断ひび割れ耐力

$$c_{Q_{BSC}} = 0.265 b d \sqrt{\sigma_B} + M_{BC} / (M/Q - d/2)$$

ここで、 b : 柱断面の幅、 d : 柱断面の有効せい、 M/Q : シアスパン長

$c_{Q_{SC}}$: せん断ひび割れ耐力

$$c_{Q_{SC}} = k_1 \sqrt{\sigma_B} b D (1 + \sigma_0 / \sigma_t)^{k_2} \cdot [M / (QD)]^{k_3}$$

ここで、 σ_t : コンクリートの引張強度、 $k_1 = 0.97$ 、 $k_2 = 0.41$ 、 $k_3 = -0.63$ 、

σ_0 : 平均軸応力度 ($\sigma_0 = N / (bD)$)、 D : 柱断面の全せい

終局耐力

それぞれの試験体について、曲げ終局耐力計算値 $c_{Q_{MU}}$ をこれまでに提案されている 7 種類の式から算出したせん断終局耐力計算値と比較し、両者の比であるせん断余裕度を併せて表 3-15 にまとめた。同表中の $c_{Q_{SU}}$ は文献²⁰⁾の修正荒川式によるせん断終局耐力計算値、 $c_{Q_{A1}}$ と $c_{Q_{A2}}$ は文献¹⁹⁾の A 法による韌性式と非韌性式による計算値、 $c_{Q_{B1}}$ と $c_{Q_{B2}}$ は同文献の B 法による韌性式と非韌性式による計算値、 $c_{Q_{S1}}$ と $c_{Q_{S2}}$ は文

献²³⁾の靱性式と非靱性式による計算値である。なお、非靱性式には $R_p=0\%$ 、靱性式には $R_p=2\%$ を考慮した。図3-41にコンクリートの圧縮強度とそれぞれの算定式の関係を示し、実験結果の最大水平耐力をプロットする。同図から、いずれの場合も非靱性型では適切に評価できていない。FS27CAの実験値には cQ_{SU} 、 cQ_{A2} 、 cQ_{S2} が近接しており、実験ではせん断補強筋の一部が降伏していることからせん断耐力は最大水平耐力実験値と近似する値と考えると、この3つの式によりFS27CAのせん断耐力を評価できると推察される。一方、FS36CAとFS36NCにおいては、 cQ_{SU} 、 cQ_{A2} 、 cQ_{S2} の式が近接しているが、実験によるせん断補強筋のひずみは最大で降伏ひずみの40%程度であったことを考えると、FS36CAとFS36NCはこの3つの式より大きなせん断耐力を持つと考えられる。

表 3-15 最大耐力と既往耐力評価式

試験体名	cQ_{MU}	cQ_{SU}	cQ_{A1}	cQ_{A2}	cQ_{B1}	cQ_{B2}	cQ_{S1}	cQ_{S2}
FS27CA	1232	1341	2123	1227	2108	1698	1968	1316
		1.088	1.723	0.996	1.710	1.378	1.597	1.068
FS36CA	1797	1938	2826	1279	2803	2274	2821	1889
		1.078	1.573	0.712	1.560	1.266	1.570	1.051
FS36NC	1859	2090	3581	1674	3670	2977	2821	1889
		1.124	1.926	0.900	1.974	1.601	1.517	1.016

上段；計算値(kN)，下段；せん断余裕度

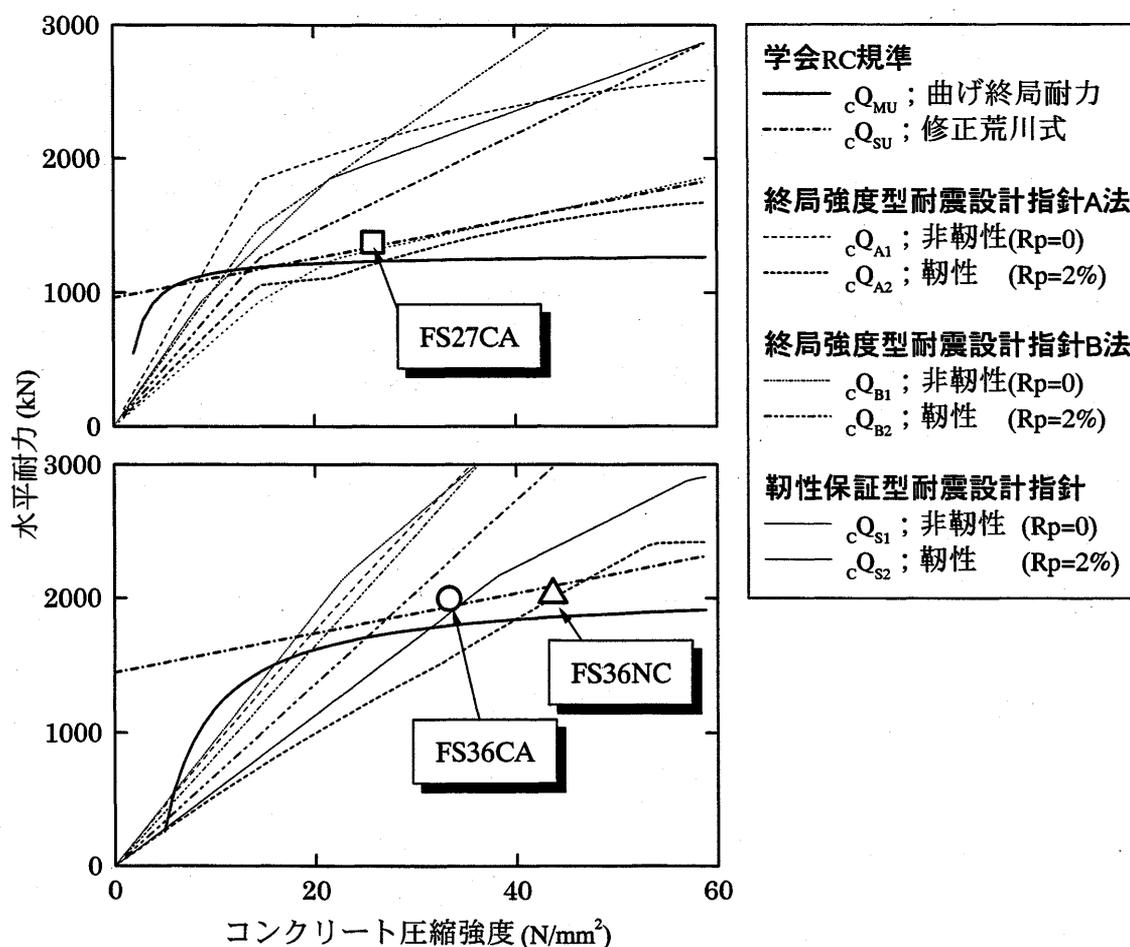


図 3-41 既往耐力評価式との比較

(5) 除荷時の残留変形と変形性能

各試験体について、それぞれの変形角の除荷時における残留変形角 R_Y を図 3-42 に示す。変形角 $R=2\%$ において FS36CA と FS36NC では残留変形角 R_Y が FS27CA に比較して著しく小さい値となっている。その原因は、FS36CA と FS36NC では帯筋の降伏強度が高くかつ中子筋を配しているため、大変形時においても水平抵抗性能の劣化が少なかったためと考えられる。文献²⁴⁾では性能設計法における使用限界状態は変形角 $R=0.5\%$ 以内と定められているが、本実験においては変形角 $R=0.5\%$ ですでに降伏している主筋もあることから、変形角 $R=0.4\%$ が概ね使用限界状態に対応すると考えられる。修復限界状態はひび割れ幅、残留変形などを考慮して、概ね弾性限度である変形角 $R=0.7\%$ が対応した。

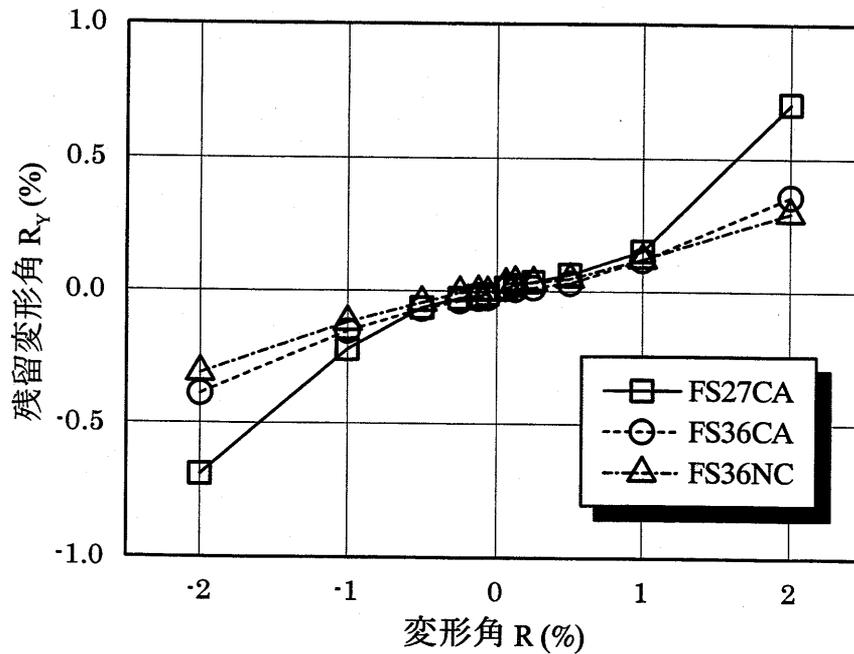


図 3-42 除荷時の残留変形

6) 傾きによる水平変形性状の検討

試験体の水平変形性状について、高さごとの傾きとして検討する。図 3-43 に示す方法により求めた試験体各高さの傾きを図 3-44 に示す。また、試験体高さ $h=2,400\text{mm}$ を全水平変位 δ で除した傾きを基準として表 3-16 に示し、同図中に直線として表す。変形角 $R=0.5\%$ 以下の時は基準の傾きと良好な対応が見られることから、試験体はいずれも高さ位置によらず直線的に変形していることがわかる。変形角 $R=1\%$ を超えると試験体が端部で顕著に傾き、直線的に変形しない一般的な曲げ変形の特徴が表れている。各試験体とも傾きの進展は同様の傾向を示しており、水平変形性状に石炭灰混入による影響は見られない。

表 3-16 基準の傾き

変形角 (%)	標準の傾き ($\times 10^{-3}$)
0.0625	0.625
0.125	1.25
0.25	2.5
0.5	5.0
1.0	10.0
2.0	20.0

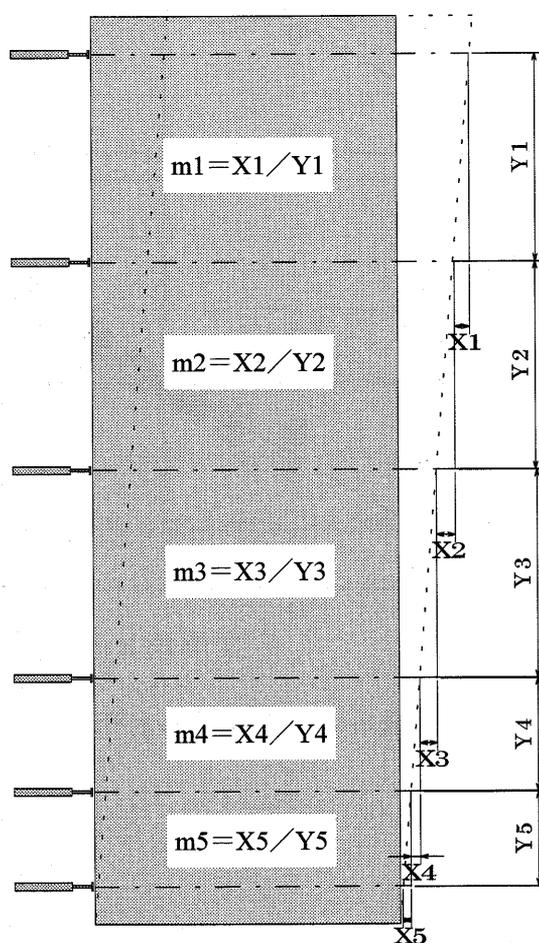


図 3-43 傾きの算出方法

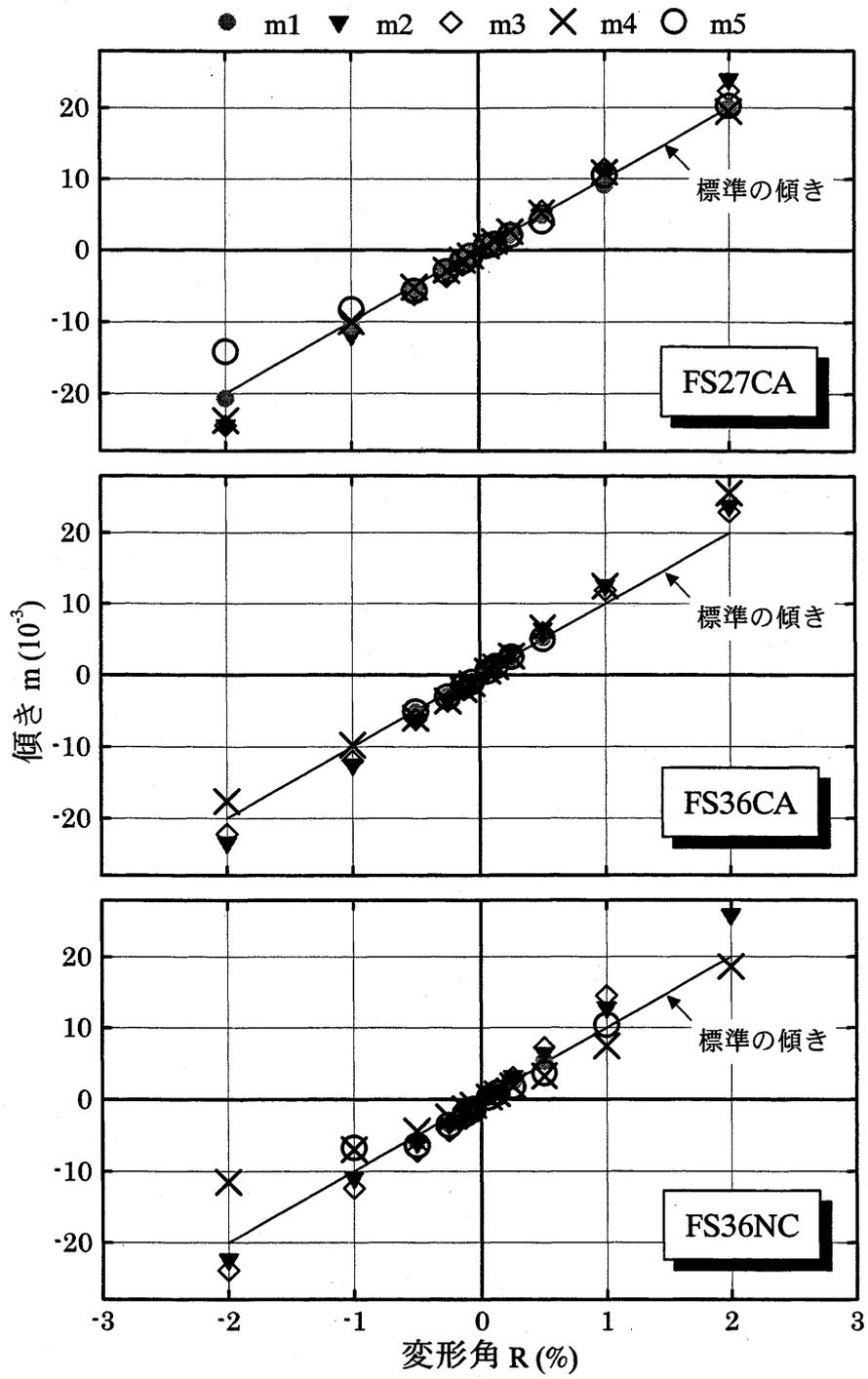


図 3-44 傾きによる水平変形性状

(7) 曲げ変形性状の検討

本実験における試験体の曲げモーメント分布と曲率分布の概念を図 3-45 (a) (b) に示す。各試験体について柱頭および柱脚における曲げモーメントと曲率の関係を図 3-46 に示す。いずれの試験体ともに柱頭と柱脚の曲げモーメント-曲率関係は同様の性状を示しており、試験体に逆対称加力を実施されていることがわかる。なお、FS27CA では柱脚の変位計設置位置が異なることから、他の試験体と比較して、曲率がやや小さな値となっている。FS36CA と FS36NC の試験体では全く同様の性状を示した。このことから石炭灰を混入した試験体は普通コンクリートによる場合と同等の曲げ変形性能を持つことがわかる。

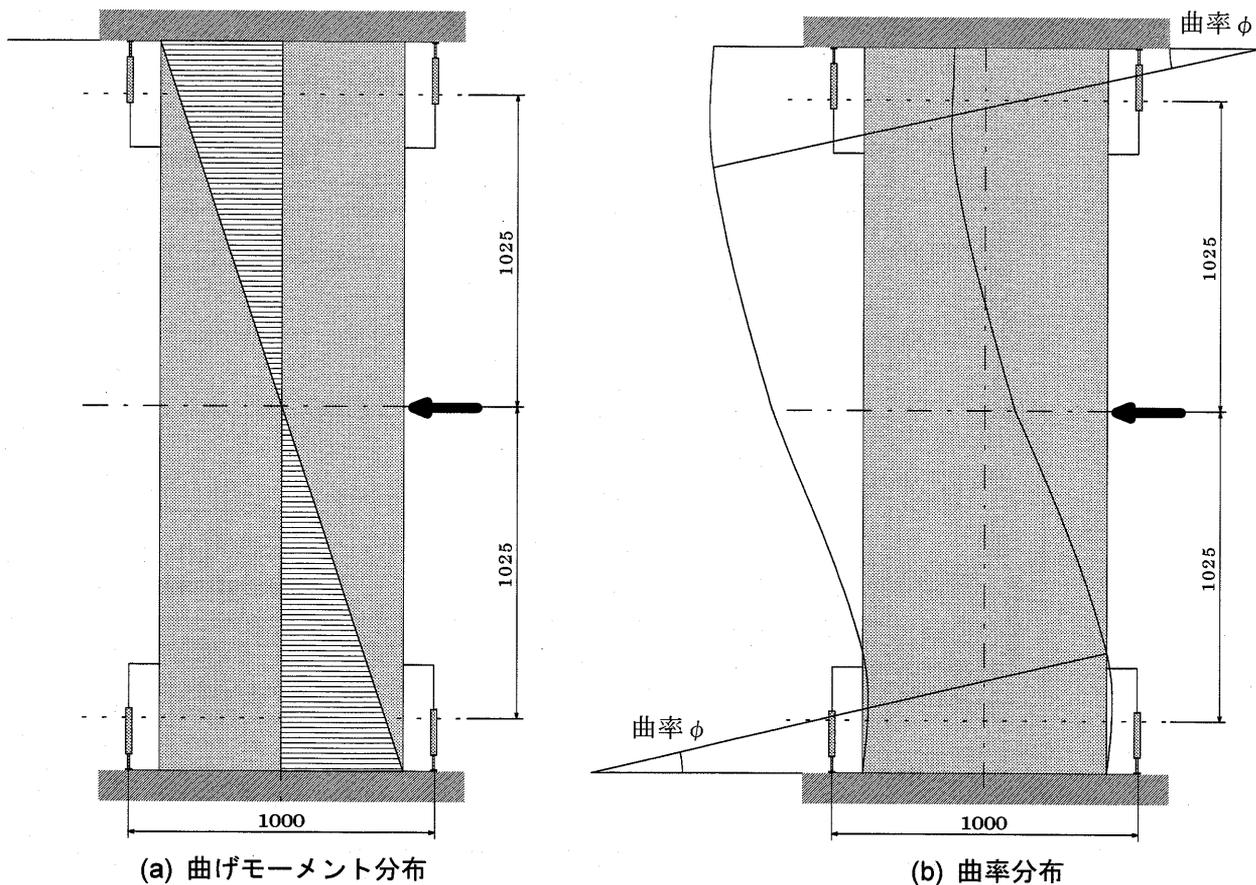


図 3-45 曲げモーメント分布と曲率分布

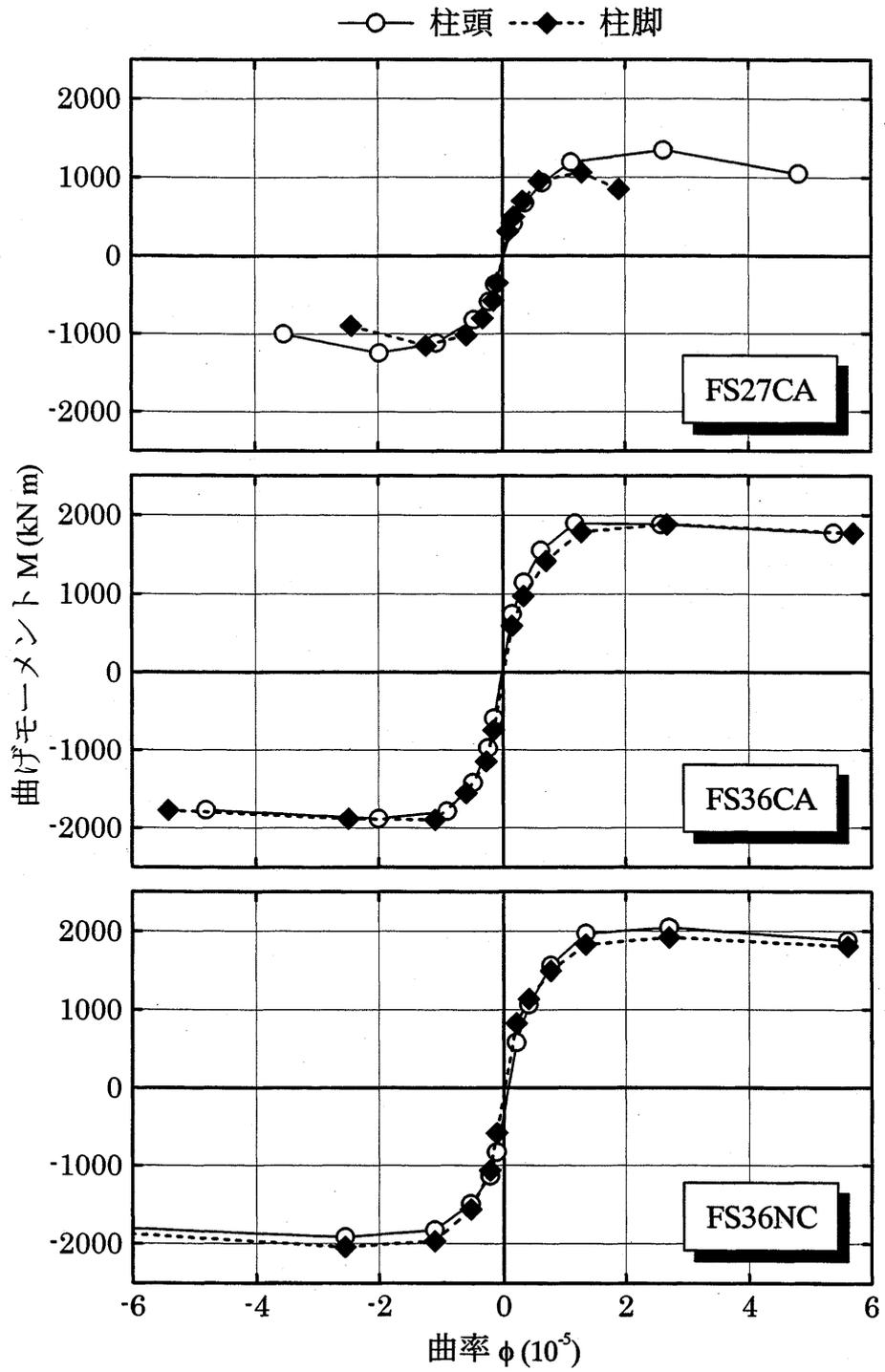


図 3-46 曲げモーメント M -曲率 ϕ 関係

3-4-4 寸法効果に関する考察

(1) ヤング係数

本実験の実大鉄筋コンクリート柱と文献²⁵⁾の実大無筋コンクリート柱の圧縮荷重実験（概要を付録に示す）から得られたヤング係数およびコンクリート供試体の材料試験で得られたヤング係数の関係を図 3-47 に示す。上図では試験体を実大鉄筋コンクリート柱（図中、実大 RC と記載）と実大無筋コンクリート柱（図中、実大無筋と記載）の 2 つに分類し、下図では石炭灰を混入したコンクリート（図中、石炭灰混入と記載）および普通コンクリート（図中、普通コンと記載）の 2 つに分類し、それぞれ最小二乗法を用いて回帰直線を求めた。両図から、石炭灰混入の有無に関わらず、実大鉄筋コンクリート柱と実大無筋コンクリート柱のヤング係数はコンクリート供試体のヤング係数と良好な対応が見られる。

したがって実大柱の弾性時ヤング係数はコンクリート供試体のヤング係数からほぼ評価することができ、鉄筋の有無、寸法効果および石炭灰混入の影響による有意な差はない。

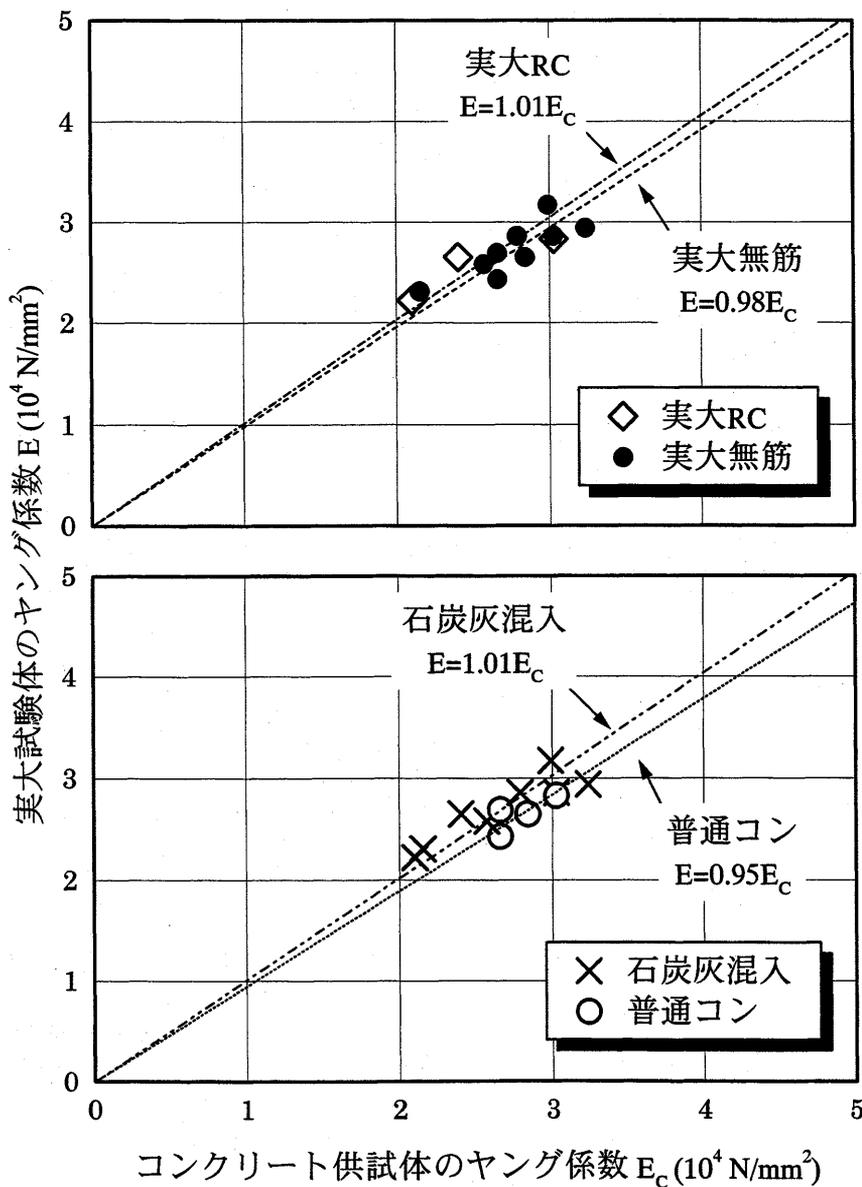


図 3-47 ヤング係数の関係

(2) ポアソン比

本実験の実大鉄筋コンクリート柱と文献²⁵⁾の実大無筋コンクリート柱の圧縮荷重実験から得られたポアソン比およびコンクリート供試体の材料試験で得られたポアソン比の関係を図 3-48 に示す。上図では試験体を実大鉄筋コンクリート柱（図中、実大 RC と記載）と実大無筋コンクリート柱（図中、実大無筋と記載）の 2 つに分類し、下図では石炭灰を混入したコンクリート（図中、石炭灰混入と記載）および普通コンクリート（図中、普通コンと記載）の 2 つに分類し、それぞれ最小二乗法を用いて回帰直線を求めた。上図から実大鉄筋コンクリート柱のポアソン比はコンクリート供試体の値より大きくなる傾向があることがわかる。実大無筋コンクリート柱のポアソン比はばらつきがあるものの、コンクリート供試体のポアソン比と同程度の値となっている。下図から、ばらつきはあるものの、いずれの試験体ともコンクリート供試体のポアソン比よりやや大きな値となっている。しかしその比率は 1.05 程度と大きくないことから、実大柱試験体の弾性時におけるポアソン比はコンクリート供試体のポアソン比から評価することができ、寸法効果および石炭灰混入の影響は小さいと判断できる。

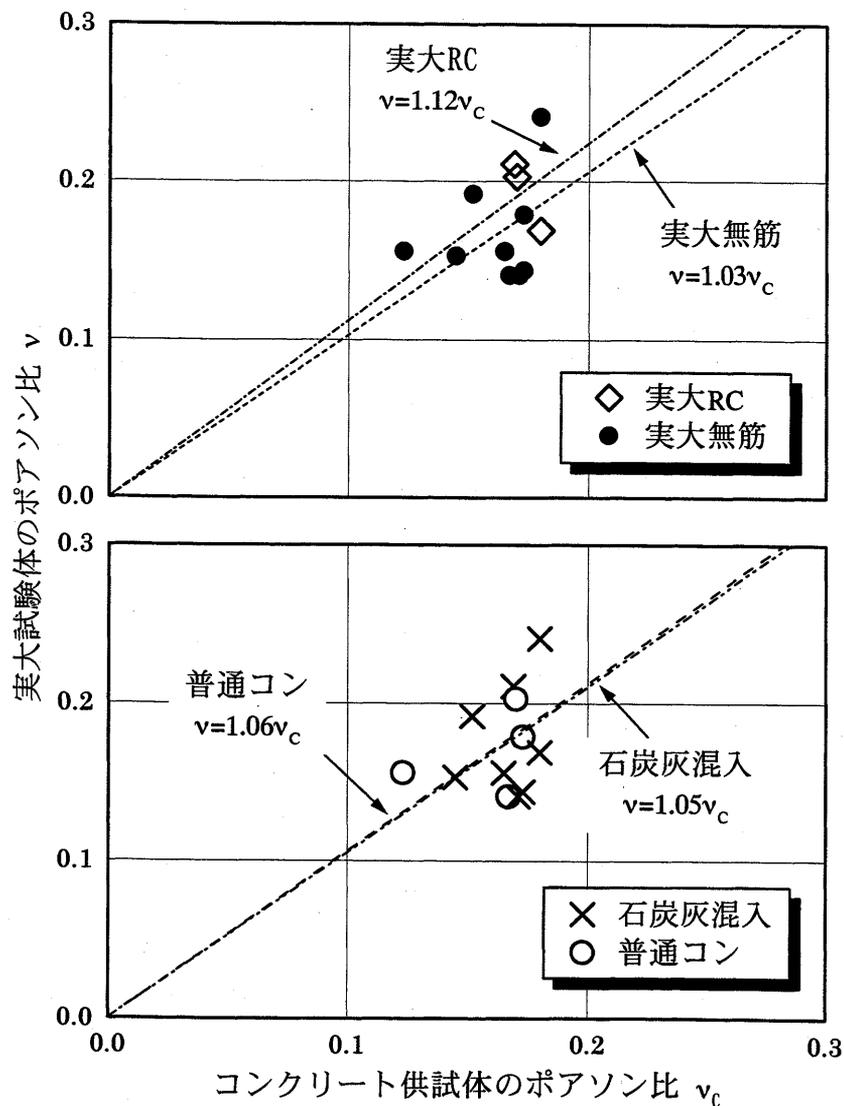


図 3-48 ポアソン比の関係

(3) 最大水平耐力

本研究における実大鉄筋コンクリート柱（断面 800mm 角）の載荷実験，既往の研究²⁵⁾における石炭灰を使用した準実大鉄筋コンクリート柱（断面 400mm 角）の載荷実験（概要を付録に示す），およびせん断スパン比，軸力比，使用材料の力学的特性が同程度の香取らの載荷実験²⁶⁾で得られた縮小鉄筋コンクリート柱（断面 200mm 角）の最大水平耐力実験値 E_{QU} と曲げ終局耐力計算値 $C_{Q_{MU}}$ の比率を柱の断面せい D との関係として図 3-49 に示す。同図では石炭灰を混入したコンクリート（図中，石炭灰混入と記載）および普通コンクリート（図中，普通コンと記載）の 2 つに分類し，それぞれ最小二乗法を用いて回帰直線を求めた。普通コンクリートの場合に比較し，石炭灰を混入した場合は回帰直線の勾配がやや異なっており，寸法効果の影響による鉄筋コンクリート部材の水平耐力の変動が石炭灰混入の影響を受ける可能性がある。ただし，この結果は本実験における推定であり，この現象を定性的に把握するためには更なるデータ蓄積による検討が必要である。

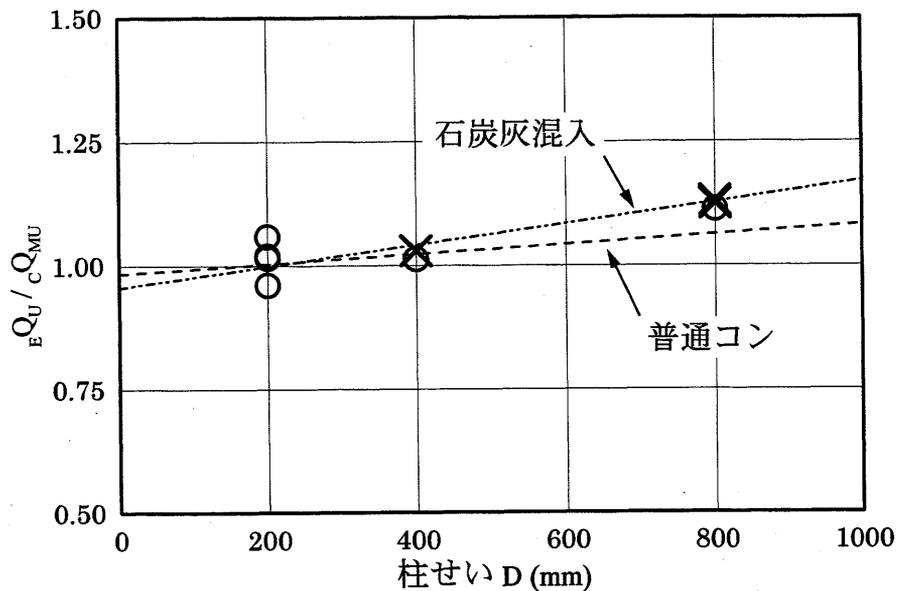


図 3-49 最大水平耐力の関係

3-5 まとめ

石炭灰を活用したコンクリートの建設工事における施工性を検証するために、施工試験として一般的な施工手順に準じて実大サイズの鉄筋コンクリート柱のコンクリート打設を実施した。試験体数は3体で、石炭灰混入の有無とコンクリートの設計基準強度を変数としている。その結果から得られた知見をまとめる。

- ・石炭灰を混入したコンクリートについても、適切な調合設計を実施することで目標の品質を確保でき、生コンプラントで製造したレディーミクストコンクリートとしての提供が可能である。
- ・石炭灰を混入したコンクリートの打設においても、普通コンクリートの場合と同様にコンクリートの充填性は良好であり、顕著なブリージングは認められなかった。
- ・石炭灰を混入した場合も、フレッシュコンクリートのワーカビリティを損なうことなく打設を実施でき、施工性は従来の普通コンクリートによる場合と同様であり、ポンプ圧送車によるコンクリート打設が可能であることを確認した。

施工試験で製作した3体の実大鉄筋コンクリート柱を試験体として、弾性範囲内での軸圧縮載荷実験を行い、その際の軸圧縮性能を検討した。更に、軸力を一定に保持しつつ、水平方向に正負漸増繰り返し載荷を破壊に至るまで加え、実大鉄筋コンクリート柱の水平抵抗性能を検証した。その結果の検討および考察から得られた知見を以下にまとめる。

- ・実大鉄筋コンクリート柱と同時に作製し標準水中養生したコンクリート供試体の材料試験から、石炭灰を混入したコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係、圧縮強度とヤング係数の関係、圧縮強度と圧縮強度時のひずみの関係、圧縮強度とポアソン比の関係は、普通コンクリートに対する既往の評価式および提案式と良好に対応することを確認した。
- ・コンクリートの圧縮強度に関して、石炭灰を混入した場合は設計基準強度に近い値となったのに対して、普通コンクリートでは設計基準強度を超えて大きな余裕率を示した。石炭灰を混入するコンクリートの調合設計強度を定める際の設計基準強度に対する余裕率に関して更なる検討が必要である。
- ・実大鉄筋コンクリート柱の弾性時におけるヤング係数は、石炭灰の混入に関わらず、コンクリート供試体試験の結果と同等で、普通コンクリートのための既往の算定式で評価できる結果となった。また、実大鉄筋コンクリート柱の弾性時におけるポアソン比も、石炭灰の混入に関わらず、コンクリート供試体試験の結果と同等で、普通コンクリートのための既往の提示範囲で評価できる結果となった。ただし、本実験では軸力比で0.1もしくは0.2までの軸力までしか載荷していないことを付記する。
- ・試験体の各変形角における損傷性状に関して、石炭灰の混入による有意な差は見られず、石炭灰を混入した試験体は普通コンクリートと同様の性状を示した。
- ・石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は、普通コンクリートによる場合と同様に、既往の終局せん断耐力式による計算値を上回るせん断耐力を有していることを確認した
- ・石炭灰混入の有無、コンクリート強度および軸力比の相違に関わらず、実験による最大水平耐力は曲げ終局耐力計算値を約1割上回る値となった。その原因としては、主筋の降伏後のひずみ硬化による強度上昇が挙げられる。

- ・水平力-水平変形角履歴曲線，水平変位分布，曲率分布に関して，試験体の実大鉄筋コンクリート柱は同様の性状を示しており，石炭灰混入による顕著な影響は認められなかった。
- ・各試験体ともに高さ方向に関する主筋のひずみ分布性状は，ややばらつきはあるものの，曲げモーメント図の形状と類似しており，試験体による大きな差は見られなかった。主筋の降伏した部分をヒンジ領域と見なすと，変形角 $R=2\%$ 時点において，部材両端部から部材せいに等しい高さ部分がヒンジ領域となっていることを示した。
- ・帯筋および中子筋のひずみ分布性状の検討から，石炭灰混入の有無に関わらず，いずれの試験体においても変形角 $R=0.5\%$ のサイクル以降で中子筋および帯筋がせん断力を負担し，拘束効果を発揮していることを確認した。
- ・既往の文献に基づく鉄筋コンクリート柱の損傷度判定の結果から，石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱の水平載荷に対する損傷レベルは，普通コンクリートによる場合と同程度であることを確認した。
- ・コンクリート強度と軸力比の等しい試験体では，石炭灰混入の有無に関わらず，曲げひび割れ点，曲げせん断ひび割れ点，せん断ひび割れ点，曲げ降伏点，最大耐力点のいずれの点ともに同レベルの変形角および耐力比で推移したことから，水平荷重の増大に対して，石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は普通コンクリートによる場合と同様の履歴経過を辿ったことが確認できた。
- ・各履歴ループについての等価粘性減衰定数の検討から，石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は，普通コンクリートによる場合と同様に，十分なエネルギー吸収能力を有していることを確認した。
- ・石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱の曲げひび割れ点，曲げせん断ひび割れ点，せん断ひび割れ点の耐力は普通コンクリートを用いた部材に対する既往の耐力評価式により精度良く評価できることを確認した。
- ・変形角 $R=0.4\%$ の時点での損傷程度が性能設計法における使用限界状態に概ね対応し，変形角 $R=0.7\%$ の時点で修復限界状態に相当した。
- ・曲げモーメントと曲率の分布性状の検討から，石炭灰を混入した試験体は普通コンクリートによる場合と同等の曲げ変形性能を持つことを確認した。
- ・寸法効果の影響に関して既往の研究を含めて検討し，実大柱の弾性時におけるヤング係数はコンクリート供試体のヤング係数から評価することができ，鉄筋の有無，寸法効果および石炭灰混入の影響による有意な差がないことがわかり，実大柱の弾性時におけるポアソン比はコンクリート供試体のポアソン比から評価することができ，寸法効果および石炭灰混入の影響は小さいが，鉄筋による補強の影響を受ける可能性があることを示した。
- ・寸法効果の影響による鉄筋コンクリート部材の水平耐力の変動が石炭灰混入の影響を受ける可能性がある。ただし，この結果は極小数のデータに基づく推定であり，この現象を定性的に把握するためには更なるデータ蓄積による検討が必要である。

第4章 結語

石炭火力発電所から排出される産業廃棄物であり、環境保全および資源リサイクルの観点から有効利用の拡大が緊急課題とされている石炭灰を、建築構造材料として有効活用する資源循環型技術の実用化を目指し、本研究では、石炭灰を大量に混入した鉄筋コンクリート建築物の構造性能、耐震性能および施工性を実大サイズの部材レベルで把握することを目的として、下記の試験および実験を実施した。

- (1) 実大サイズのコンクリート試験体からコア抜きしたコンクリート供試体の素材試験
- (2) 実際の建設工事に準じた手順による実大鉄筋コンクリート柱の施工試験
- (3) 実大鉄筋コンクリート柱の載荷実験

それぞれの試験および実験の概要および結果から得られた知見を以下にまとめる。

実大サイズのコンクリート試験体からコア抜きしたコンクリート供試体の素材試験

石炭灰を活用したコンクリートによる実大サイズの柱型試験体に関して、材料特性の分布性状を把握するために構造体各所からコア抜きしたコンクリート供試体の素材試験を実施した。その結果の検討、および柱型構造体と同時に作製し標準水中養生したコンクリート供試体の試験結果との比較から得られた知見を以下に列記する。

- ・比重は上層部になるにつれて小さくなり、特に最上層で顕著に小さい。断面位置、材令による有意な差は見られない。
- ・圧縮強度は上層部になるにつれて低くなる傾向を示し、いずれの材令においてもコンクリート試験体の上端から $1/3$ 以下の部分で、標準水中養生したコンクリート供試体の結果より大きな値を示した。同一断面内において、コンクリート試験体の柱中心軸から遠ざかるにつれて圧縮強度がやや小さくなる傾向が一部で認められた。
- ・ヤング係数に関しては、断面位置および材令に依らず、上層部になるにつれて値が小さくなる傾向を示し、コンクリート試験体の中間以下の部分で標準水中養生したコンクリート供試体の結果と同等かやや上回る値を示した。
- ・ポアソン比に関しては、高さ位置による有意な差はないが、長期材令時に増加する傾向が見られた。高さ位置、断面位置、材令に依らず、標準水中養生したコンクリート供試体の結果をやや下回る値となった。
- ・引張強度に関しては、ばらつきが大きいものの、高さ方向による差は見られず、総体的に標準水中養生したコンクリート供試体の結果をやや上回る値となった。
- ・コンクリート試験体のポアソン比を除く各力学的特性は特に試験体下部において標準水中養生したコンクリート供試体の結果を上回る傾向にあり、その原因として、骨材の下部への沈降および試験体内部での発熱によるポゾラン反応増進が考えられる。

実際の建設工事に準じた手順による実大鉄筋コンクリート柱の施工試験

石炭灰を混入したコンクリートを建設工事で実用する場合の施工性を検証するために、施工試験として一般的な施工手順に準じて実大サイズの鉄筋コンクリート柱についてのコンクリート打設を実施した。試験体数は3体で、石炭灰混入の有無とコンクリートの設計基準強度を変数としている。その結果から得られた知見を以下に列記する。

- ・石炭灰を混入したコンクリートについても、適切な調合設計を実施することで目標の品質を確保でき、生コンプラントで製造したレディーミクストコンクリートとしての提供が可能である。
- ・石炭灰を混入したコンクリートの打設においても、普通コンクリートの場合と同様にコンクリートの充填性は良好であり、顕著なブリージングは認められなかった。
- ・石炭灰を混入した場合も、フレッシュコンクリートのワーカビリティを損なうことなく打設を実施でき、施工性は従来の普通コンクリートによる場合と同様であり、ポンプ圧送車によるコンクリート打設が可能であることを確認した。

実大鉄筋コンクリート柱の載荷実験

施工試験で製作した3体の実大鉄筋コンクリート柱を試験体として、弾性範囲内での軸圧縮載荷実験を行い、その際の軸圧縮性能を検討した。更に、軸力を一定に保持しつつ、水平方向に正負漸増繰り返し載荷を破壊に至るまで加え、実大鉄筋コンクリート柱の水平抵抗性能を検証した。実験変数は石炭灰混入の有無とコンクリート設計基準強度および載荷する軸力比である。その結果の検討および考察から得られた知見を以下に列記する。

- ・実大鉄筋コンクリート柱と同時に作製し標準水中養生したコンクリート供試体の材料試験から、石炭灰を混入したコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係、圧縮強度とヤング係数の関係、圧縮強度と圧縮強度時のひずみの関係、圧縮強度とポアソン比の関係は、普通コンクリートに対する既往の評価式および提案式と良好に対応することを確認した。
- ・コンクリートの圧縮強度に関して、石炭灰を混入した場合は設計基準強度に近い値となったのに対して、普通コンクリートでは設計基準強度を超えて大きな余裕率を示した。石炭灰を混入するコンクリートの調合設計強度を定める際の設計基準強度に対する余裕率に関して更なる検討が必要である。
- ・実大鉄筋コンクリート柱の弾性時におけるヤング係数は、石炭灰の混入に関わらず、コンクリート供試体試験の結果と同等で、普通コンクリートのための既往の算定式で評価できる結果となった。また、実大鉄筋コンクリート柱の弾性時におけるポアソン比も、石炭灰の混入に関わらず、コンクリート供試体試験の結果と同等で、普通コンクリートのための既往の提示範囲で評価できる結果となった。ただし、本実験では軸力比で0.1もしくは0.2までの軸力までしか載荷していないことを付記する。

- ・試験体の各水平変形角におけるひび割れ等の損傷性状に関して、石炭灰の混入による有意な差は見られず、石炭灰を混入した試験体は普通コンクリートと同様の性状を示した。
- ・石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は、普通コンクリートによる場合と同様に、既往の終局せん断耐力式による計算値を上回るせん断耐力を有していることを確認した
- ・石炭灰混入の有無、コンクリート強度および軸力比の相違に関わらず、実験による最大水平耐力は曲げ終局耐力計算値を約1割上回る値となった。その原因としては、主筋の降伏後のひずみ硬化による強度上昇が挙げられる。
- ・水平力-水平変形角履歴曲線、水平変位分布、曲率分布に関して、試験体の実大鉄筋コンクリート柱は同様の性状を示しており、石炭灰混入による顕著な影響は認められなかった。
- ・各試験体ともに高さ方向に関する主筋のひずみ分布性状は、ややばらつきはあるものの、曲げモーメント図の形状と類似しており、試験体による大きな差は見られなかった。主筋の降伏した部分をヒンジ領域と見なすと、変形角 $R=2\%$ 時点において、部材両端部から部材せいに等しい高さ部分がヒンジ領域となっていることを示した。
- ・帯筋および中子筋のひずみ分布性状の検討から、石炭灰混入の有無に関わらず、いずれの試験体においても変形角 $R=0.5\%$ のサイクル以降で中子筋および帯筋がせん断力を負担し、せん断補強としての役割と拘束効果を発揮していることを確認した。
- ・既往の文献に基づく鉄筋コンクリート柱の損傷度判定の結果から、石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱の水平荷重に対する損傷レベルは、普通コンクリートによる場合と同程度であることを確認した。
- ・コンクリート強度と軸力比の等しい試験体では、石炭灰混入の有無に関わらず、曲げひび割れ点、曲げせん断ひび割れ点、せん断ひび割れ点、曲げ降伏点、最大耐力点のいずれの点ともに同レベルの水平変形角および耐力比で推移したことから、水平荷重の増大に対して、石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は普通コンクリートによる場合と同様の履歴経過を辿ることを確認した。
- ・各履歴ループについての等価粘性減衰定数の検討から、石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱は、普通コンクリートによる場合と同様に、十分なエネルギー吸収能力を有していることを確認した。
- ・石炭灰を混入した実大鉄筋コンクリート柱の曲げひび割れ点、曲げせん断ひび割れ点、せん断ひび割れ点の耐力は普通コンクリートを用いた部材に対する既往の耐力評価式により精度良く評価できることを確認した。
- ・水平変形角 $R=0.4\%$ の時点で損傷程度が性能設計法における使用限界状態に概ね対応し、水平変形角 $R=0.7\%$ の時点で修復限界状態に相当した。
- ・曲げモーメントと曲率の分布性状の検討から、石炭灰を混入した試験体は普通コンクリートによる場合と同等の曲げ変形性能を持つことを確認した。
- ・寸法効果の影響に関して既往の研究を含めて検討し、実大柱の弾性時におけるヤング係数はコンクリート供試体のヤング係数から評価することができ、鉄筋の有無、寸法効果および石炭灰混入の影響による有意な差はなかった。実大柱の弾性時におけるポアソン比はコンクリート供試体のポアソン比から評価することができ、寸法効果および石炭灰混入の影響は小さいが、鉄筋による補強の影響を受ける可能性があることがわかった。

- ・寸法効果の影響による鉄筋コンクリート部材の水平耐力の変動が石炭灰混入の影響を受ける可能性がある。ただし、この結果は本実験のデータに基づく推定であり、この現象を定性的に把握するためには更なるデータ蓄積による検討が必要である。

本研究の実施により、石炭灰を活用した鉄筋コンクリート部材が普通コンクリートによる場合と同等の構造性能および耐震性能を保有していることを実大サイズで検証し、また、従来の工法により実施工が可能であることを確認した。従って、石炭灰を多量に使用した鉄筋コンクリート建築物が構造安全性および施工性の面から実現できることを示した。しかしながら、本研究における試験および実験は限られた手法によるもので、また、その試験体数も充分とは言えない。従って、実用化に向けて更なる実験データの拡充および検討項目の充足が必要不可欠である。

本研究の成果が石炭灰の建築分野における多量活用技術の早期実用化に向けた基礎となり、環境保全および資源リサイクルによる循環型社会の実現に貢献できることを切望する。

謝 辞

本研究を行う際に中国電力（株）技術研究センターの協力を得ました。また、実大実験を遂行するにあたり広島大学大学院工学研究科耐震工学研究室，福山大学ハイテクリサーチセンターおよび同大学工学部南研究室の大学院生，卒論生に多大なる協力を得ました。ここに併せて深謝いたします。特に広島大学平成 13 年度修論生黒河勝之氏（現竹中工務店），同平成 14 年度修論生中谷誠氏（現積水ハウス）には学生諸君の牽引的役割を果たしていただきました。特に名を挙げて感謝の意を表します。

試験体製作にあたっては，材料をご提供いただきました高周波熱錬（株）許斐光生様に感謝いたします。また，試験体製作から実験実施にあたり貴重な助言をいただきました長岡鉄工建設（株）坪島薫社長に深謝いたします。

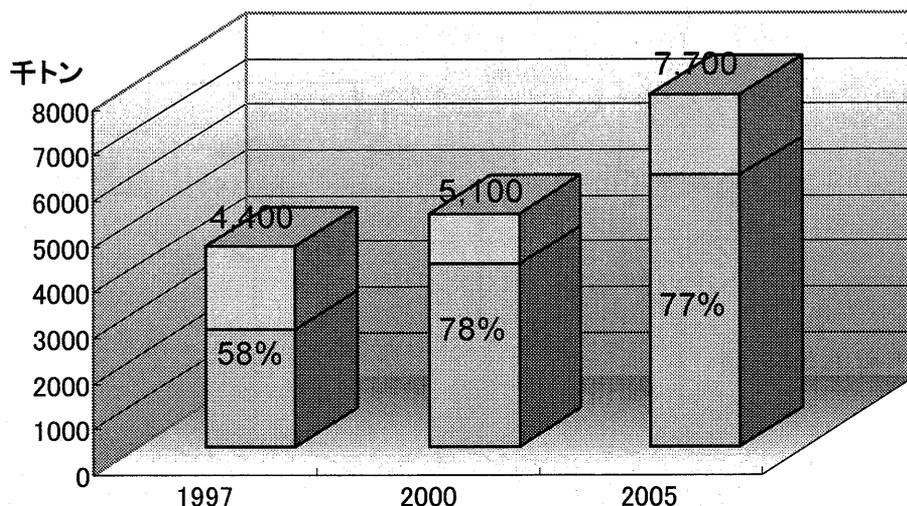
参考文献

- 1) 中国電力 (株) 技術研究センター資料, 2000 年
- 2) 環境技術協会: 石炭灰ハンドブック (平成 7 年版), 1995 年
- 3) Helmuth, R.: Fly Ash in Cement and Concrete, PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, pp.203, 1987
- 4) 国分正胤: フライアッシュおよびフライアッシュセメント, セメントコンクリート, 1961 年
- 5) Malhotra, V.M.: CANMET Investigations dealing with High-Volume Fly Ash Concrete, pp.433-470, Sept. 1992
- 6) Malhotra, V.M.: Investigations of High-Volume Fly Ash Concrete Systems, EPRITR-10315 Project 3176-66 Final Report, Oct. 1993.
- 7) 川口修宏, 河野清, 森内誠司: フライアッシュを多量に使用したコンクリートの基礎研究, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.120-125, 1995 年 12 月
- 8) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 長滝重義: フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.91-96, 1998 年
- 9) 平岡伸哉, 河野清, 石丸啓輔, 川田修: 生コン工場で製造したハイボリュームフライアッシュコンクリートの諸性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.109-114, 1998 年
- 10) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 長滝重義: 石炭灰を多量に用いた新しい硬化体製造方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.223-228, 1997 年
- 11) Ghafoori, N. and Bucholtz J.: Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete, ACI material Journal/March-April, pp.90-101, 1997.
- 12) 中武幹男, 松藤泰典, AFSHIN Hassan: 石炭灰を大量使用した高強度軽量骨材コンクリートに関する研究 Part 1. フレッシュコンクリートの性状, Part2. 硬化コンクリートの性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料, pp.757-760, 1998 年
- 13) 馬越唯好, 濱先修: 非 JIS 灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.133-138, 1998 年
- 14) 山本兼太郎, 嶋津孝之, 荒木秀夫, 椋山健二, 山本昌則, 福島恒和: 石炭灰を使用した鉄筋コンクリート部材の力学的特性 その 1. コンクリートの素材特性, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 23 号, pp.33-36, 2000 年 3 月
- 15) 荒木秀夫, 椋山健二, 黒河勝之, 菅野俊介: 石炭灰を用いたコンクリートの素材特性, 「廃棄資源のコンクリート材料への有効利用」に関するシンポジウム論文集 (日本コンクリート工学協会中国・四国支部), CD-ROM, 6 ページ, 2001 年
- 16) Kenji Kabayama, Hideo Araki and Tsunekazu Fukushima: Seismic Performance of RC Columns Containing High Volume Coal Ash, Proc. of 3rd International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment & Loading, Vol.1, pp.652-659, June 2001.

- 17) Hideo Araki, Kenji Kabayama and Tsunekazu Fukushima: Experimental Study on Seismic Performance of RC Members Containing High Volume Coal Ash, Proc. of 2nd International Conference on Engineering Materials 2001, Vol.1, pp.465-472, August 2001.
- 18) Hideo Araki, Shunsuke Sugano, Kenji Kabayama: Utilization of The Coal Ash to Reinforced Concrete Members for Building Structures, Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, ST-15 (CD-ROM), July 2002
- 19) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，丸善，1990年
- 20) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 一許容応力度設計法一，丸善，1999年
- 21) 日本建築防災協会：震災建物等の被災度判定基準および復旧技術指針（鉄筋コンクリート造編），日本建築防災協会，1991年
- 22) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料，丸善，1990年
- 23) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性設計保証型耐震設計指針（案）・同解説，丸善，1997年
- 24) 建築研究振興協会：鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン，技報堂出版，2000年
- 25) 荒木秀夫：科学研究費補助金成果報告書「石炭灰を多量に使用した鉄筋コンクリート部材の耐震特性に関する研究」（平成11～12年度，基盤研究(C)(2)，課題番号11650587），2001年
- 26) 香取慶一，林静雄ほか：高軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の変形性能に関する実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.799-802，1993年

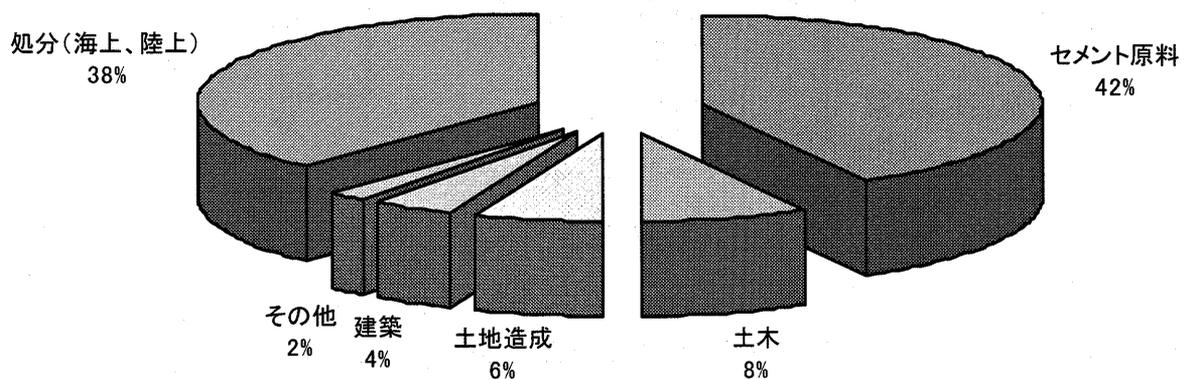
付録-1 石炭灰に関する資料

電気事業において石炭火力発電が原子力に次ぐベース供給力として位置づけられ、石炭火力発電所の新設とあわせて石油火力発電所の石炭火力への転換が進んでいる。そのため、石炭火力発電所から生ずる石炭灰の発生量は、付図 1-1 に示す通り、1997年には約 440 万 t であったものが 2000年には 510 万 t に、さらに 2005年には 770 万 t を超し、急増することが確実視されている。現在その 50%~80%が有効利用されているが、その他は灰捨場に埋立て処分されている。



付図 1-1 石炭灰の発生量推移と有効利用の現状

石炭灰の有効利用について、付図 1-2 に示す通り、分野別では石炭灰の有効利用全体の約 70%をセメント・コンクリート分野が占め、続いて土木・建築分野 農林・水産分野となっている。地球環境問題と資源リサイクルの観点から 1991年には「再生資源の利用促進に関する法律」が制定され、石炭灰は指定副産物に定められたことからその有効利用の開発が一層求められる情勢になってきている。



付図 1-2 再資源化の内訳

発生箇所による分類

フライアッシュ

微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから集塵機で採取された石炭灰。

シンダアッシュ

微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスが空気予熱器・節炭器などを通過する際に落下採取された石炭灰。

ボトムアッシュ

微粉炭燃焼ボイラの炉底に落下採取された石炭灰。

製品別による分類

原粉

フライアッシュとシンダアッシュの混合物。

JIS フライアッシュ

原粉を分級選別した細粉で JIS A 6201 に適合するもの。

粗粉

原粉を分級し粒度調整をした粗いもの。

クリンカアッシュ

クリンカホッパに落下した灰を収集し、破碎・脱水・粒度調整したもの。

本研究における石炭灰の名称は、製品別による分類による名称を使用する。一般的に「原粉」を石炭灰、「JIS フライアッシュ」をフライアッシュと表す。

石炭灰の性質について物理的、化学的性質に分けて説明する。

(1) **物理的性質**

1) **色と形状**

石炭灰の色は大部分が灰白色であるが、灰中の未燃炭素が増えるにしたがって黒みを帯びてくる。さらにそれぞれの発生箇所によって形状の違いが生ずる。

2) **比重**

ボトムアッシュ、フライアッシュともに 1.9~2.3 の範囲であるが、かさ比重は 0.8~1.0 である。

3) **粒度分布**

ボトムアッシュの大部分は 1.0~10mm 粒径範囲のものがあるが、粒度分布はかなり広く、0.1~1mm が 50%、1mm 以上が 50%程度である。シンダアッシュの粒径は 0.1~1mm、フライアッシュは 0.1mm 以下の粒径である。

(2) **化学的性質**

1) **鉱物組成**

石炭灰は各化学成分が単独で介在するものではなく、融解によって化合物となって存在する。その結晶質鉱物の主なものはクォーツ（石英 SiO_2 ）、ムライト（ $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ）、マグネタイト（ Fe_3O_4 ）などである。また、非結晶質のガラス分が多量に存在している。

2) **化学成分組成**

石炭灰の化学成分組成は、炭種の違いにより多少の差異は認められるが、主な化学組成はシリカ（ SiO_2 ）、アルミナ（ Al_2O_3 ）が全体の 70~80%を占め、その他の成分は微量の Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O などの酸化物となっている。

3) **微量成分組成**

石炭中の灰分は、根源植物中の無機質と石炭生成時に混入した粘土や岩石からなっているため、産炭地によって異なるが、全水銀、カドミウム、鉛、ヒ素などの金属が微量に含まれている。

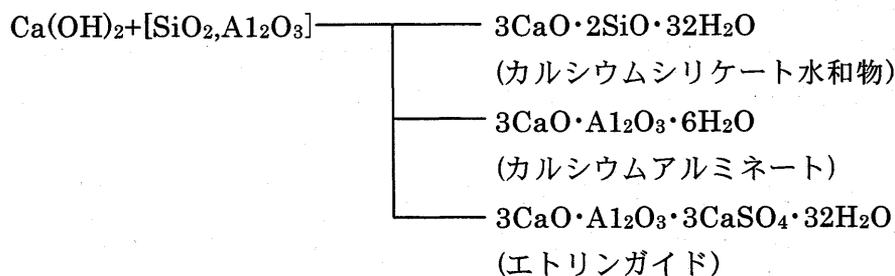
石炭灰の特徴を生かしコンクリートの混和材として利用したとき、他の素材には見られない(1)~(8)の特長を以下に述べる。

(1) 長期強度の増進

セメントに石炭灰を入れる混合した場合、セメント中のカルシウムと石炭灰のシリカによってポゾラン反応が長期間継続するため、セメントだけの場合よりも長期強度が増進し、耐久性に富んだ構造物ができる。

ポゾラン反応

石炭灰をコンクリートの混和材として使用した場合、ガラス状のシリカ (SiO_2) やアルミナ (Al_2O_3) がセメントの水和によって生成される水酸化カルシウム [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] と徐々に反応して、カルシウムシリケート水和物等を生成する。この反応は、ポゾラン反応と呼ばれ、生成された水和生成物と類似した化合物となり、コンクリートの耐久性や水密性を高める。こうした一連の反応は次のように表せる。



(2) 乾燥収縮の減少

石炭灰を混合したコンクリートは、石炭灰の代替率が増加するほどセメント量の減少により硬化後の収縮率が小さくなり、ひび割れ減少が起こりにくく堅牢な構造物となる。

(3) アルカリ骨材反応の抑制

石炭灰の使用によるアルカリ骨材反応の抑制が証明されている。石炭灰には、けい酸ソーダの生成反応を抑制し、アルカリ骨材反応を阻止する性質がある。

アルカリ骨材反応

骨材中のある種の反応性シリカ鉱物が、セメント中のアルカリ成分と骨材表面にけい酸ソーダを生成し、周囲から水分を吸収して膨張し、骨材周辺のセメントペーストに浸透圧による水圧を与えて、ひび割れが発生する現象である。

(4) 水和熱の減少

セメントに石炭灰を混合すると、コンクリートの水和に伴う熱の発生を緩和するのに有効である。この温度上昇は代替率が増加するほど減少する。

(5) 水密性の向上

セメントに石炭灰を混合すると、セメント中の遊離石灰と石炭灰のシリカやアルミナとが結合して、不溶性の固い物質を作り、コンクリートの組織を緻密にして、その水密性を増し日時の経過とともに著しく効果を発揮する。

(6) 化学抵抗性の向上

セメントに石炭灰を混合するとポゾラン反応の際に生成されるけい酸カルシウム水和物が組織を緻密にするとともに、反応によって遊離した不安定な水酸化カルシウムが石炭灰の成分と結合するので、硫酸塩、海水、薬液等に対して顕著な効果を発揮する。

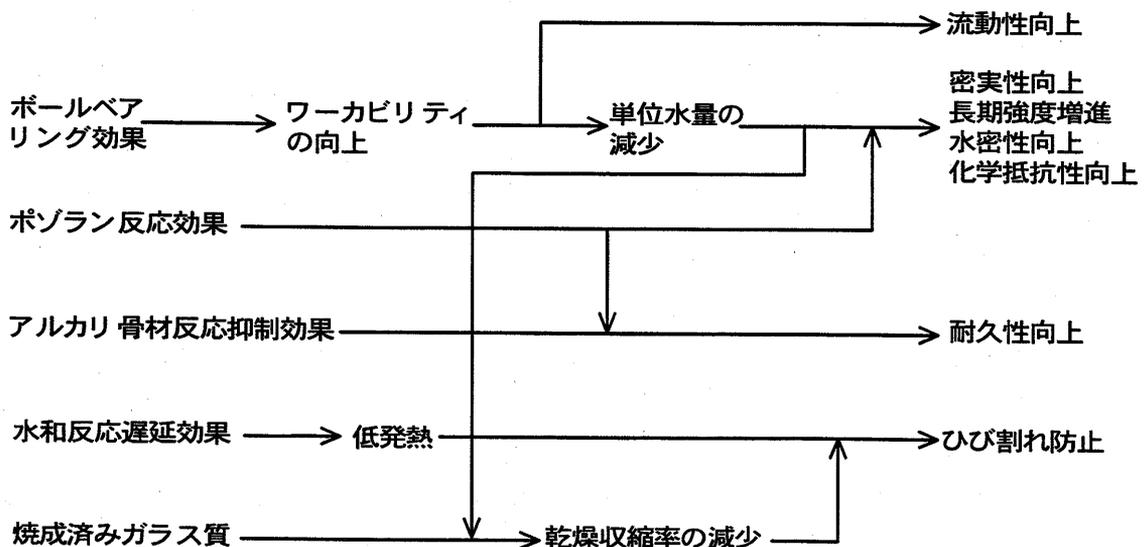
(7) 耐熱性の向上

石炭灰中に含まれるセノスフィアと呼ばれる中空灰は、中空であるため密度が小さく、熱伝導率が小さいため熱に対する抵抗力がある。

(8) ワークビリティーの向上および単位水量の減少

石炭灰は微細な球形をしており、これを混合すると流動性が著しく改善されるため、コンクリートの打設が効果的に行え、填隙性がよくなり、仕上がり面が滑らかで美しくなる。また、同一スランプを得るための所要水量は石炭灰の代替率に比例して減少する。

石炭灰を使用したコンクリートの特徴を簡単にまとめたものを付図 1-4 に示す。



付図 1-4 石炭灰を使用したコンクリートの特徴

石炭灰の製品別による分類における JIS フライアッシュは、原粉を分級選別した細粉であり、製品として均一性が高いため 1950 年頃から資源としての有効性を着目されコンクリート混和材としての研究がはじまった。その結果、信頼性を特に要求されるダムに活用され始め、そこで良好な性能と経済性が実証され、現在ではダム、橋梁、水力、火力、原子力発電所など大型構造物に大量に使用されるに至っており、また建材、道路材料、肥料、地盤改良など身近なものにも活用されている。

JIS フライアッシュは、コンクリートまたはモルタルに混和することで①流動性の改善および単位水量の減少、②水和熱の減少、③長期強度の増進、④乾燥収縮の減少、⑤水密性および耐久性の向上、⑥アルカリ骨材反応の抑制などの効果をもつことが、これまでに多くの調査や研究によって明らかにされ、従来から以下の分野で広く活用されている。

(1) フライアッシュセメントの混合材

コンクリートの単位セメント量内の一部をフライアッシュで代替する（内割混合）方法

(2) コンクリートの混和材

単位セメント量を変えずに骨材の一部をフライアッシュで代替する（外割混合）方法

フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）では、混和材として使用したフライアッシュの質量が、結合材中に占める割合を原則ポルトランドセメントの 10～30%としている。また、普通ポルトランドセメントに混合剤としてあらかじめ含まれているフライアッシュの質量の割合は、JIS において 5%以下であれば混合してもよいと規定されている。以上のように、各セメントにおいてフライアッシュ使用目的ごとの混入量の最大値が JIS で定められている。

近年、より大量のフライアッシュを有効利用するための研究が行われており、その一例の使用用途として、コンクリートの細骨材代替材として有効利用する研究が行われている。この方法では今までの利用法よりも大量のフライアッシュを有効利用することができるため資源の有効利用、環境問題にも対応している。

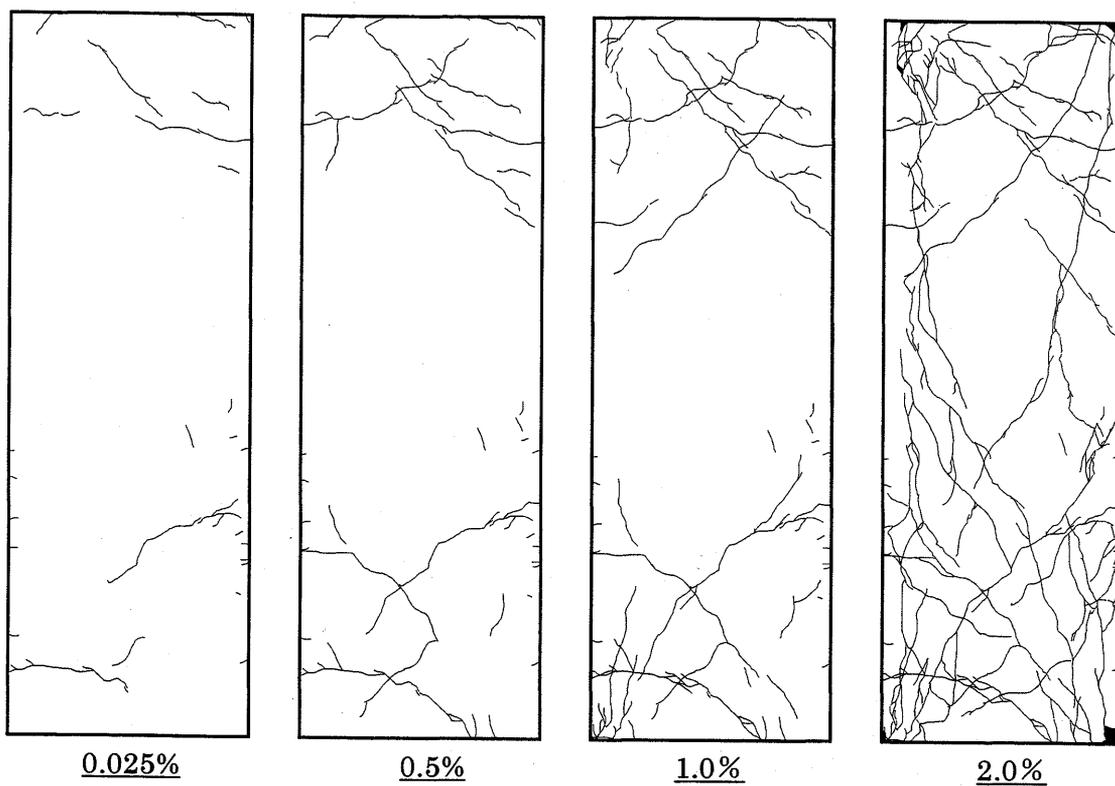
羽原らは、コンクリート中の細骨材の一部をフライアッシュなどにより置換したコンクリートの組織形成および構造は、通常のコンクリートと本質的な違いはないと述べている。

黄らはフライアッシュをコンクリート中の細骨材の一部として使用し、そのフレッシュ性状、硬化後の圧縮強度と中性化特性について検討を行っている。その結果、フライアッシュをセメントまたは細骨材の一部として使用したいずれの場合も、中性化深さと水セメント比または単位セメント量との間にはよい相関性が認められていると述べている。

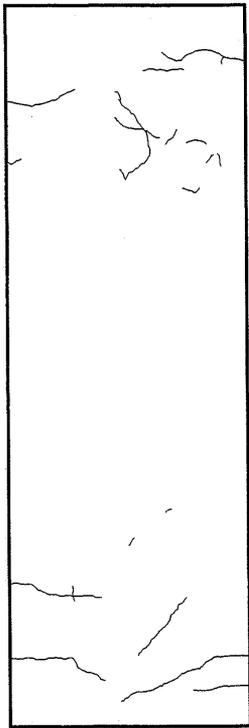
以上のように、近年フライアッシュについては様々な有効利用に関する研究が行われているが、それ以外の石炭灰を用いた研究についてはほとんど行われていないのが現状である。さらに、より大量の石炭灰を有効利用できるコンクリートの細骨材代替材としての研究もほとんど行われていない。そのため今後、フライアッシュ以外の石炭灰の有効利用、より大量の石炭灰を有効利用できる新規用途開発についての更なる研究が必要である。

付録-2 実大鉄筋コンクリート柱のひび割れ図

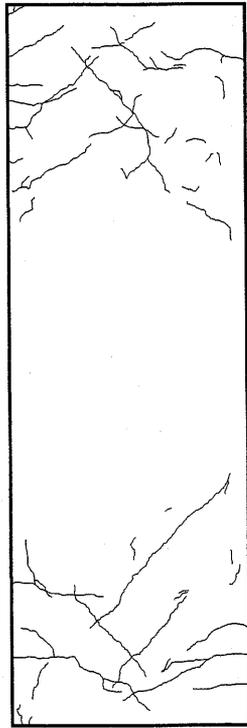
変形角 $R=0.25\%$, 0.5% , 1.0% , 2.0% における各面のひび割れ図を付図 2-1～付図 2-9 に示す。同図中における塗りつぶし部分はコンクリートが剥落したことを表している。



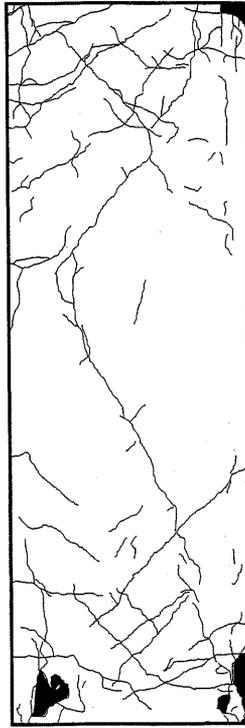
付図 2-1 FS27CA 東面



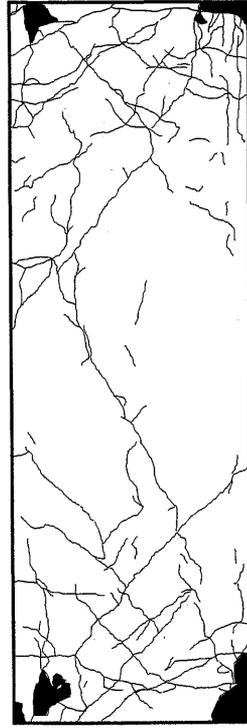
0.025%



0.5%

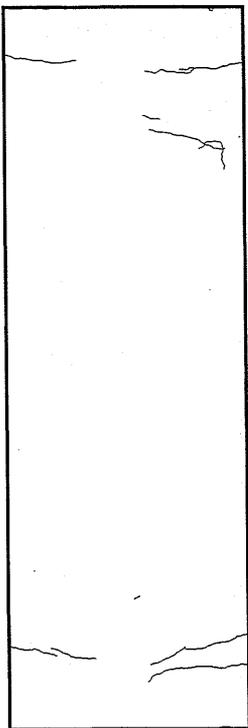


1.0%

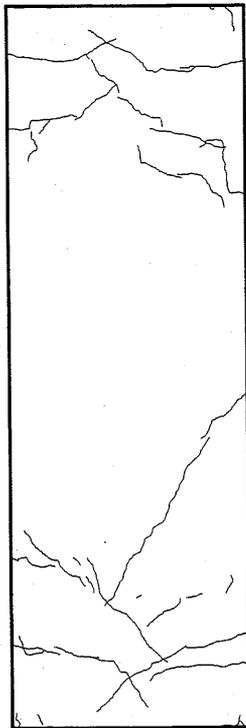


2.0%

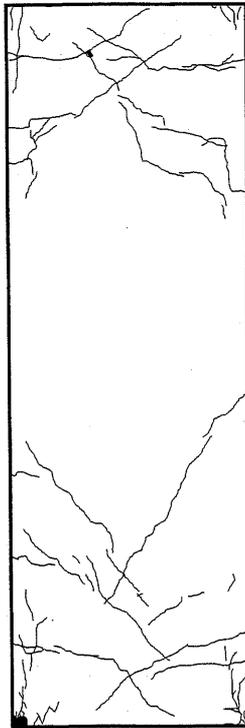
付図 2-2 FS36CA 東面



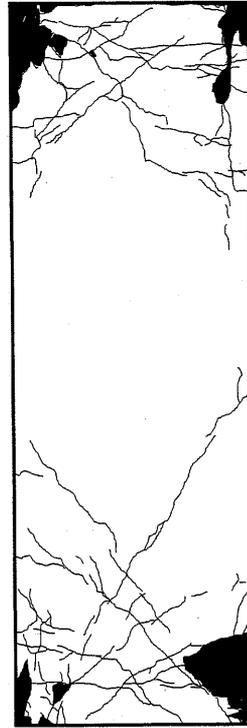
0.025%



0.5%

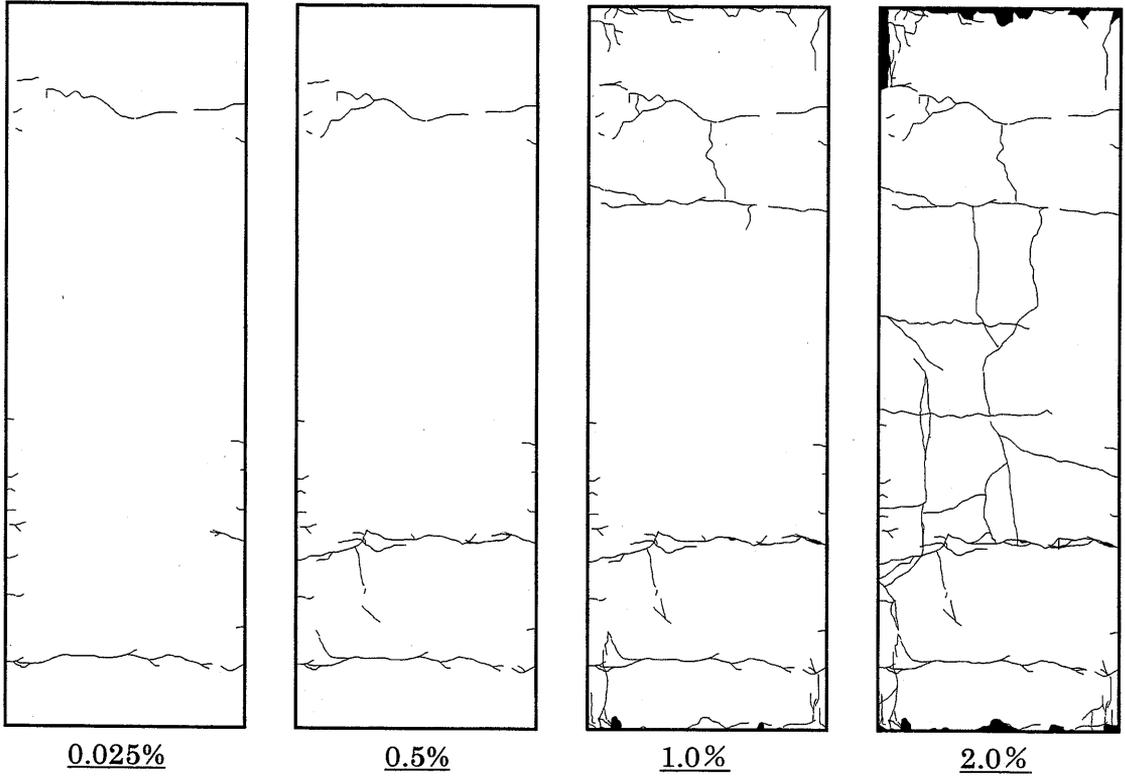


1.0%

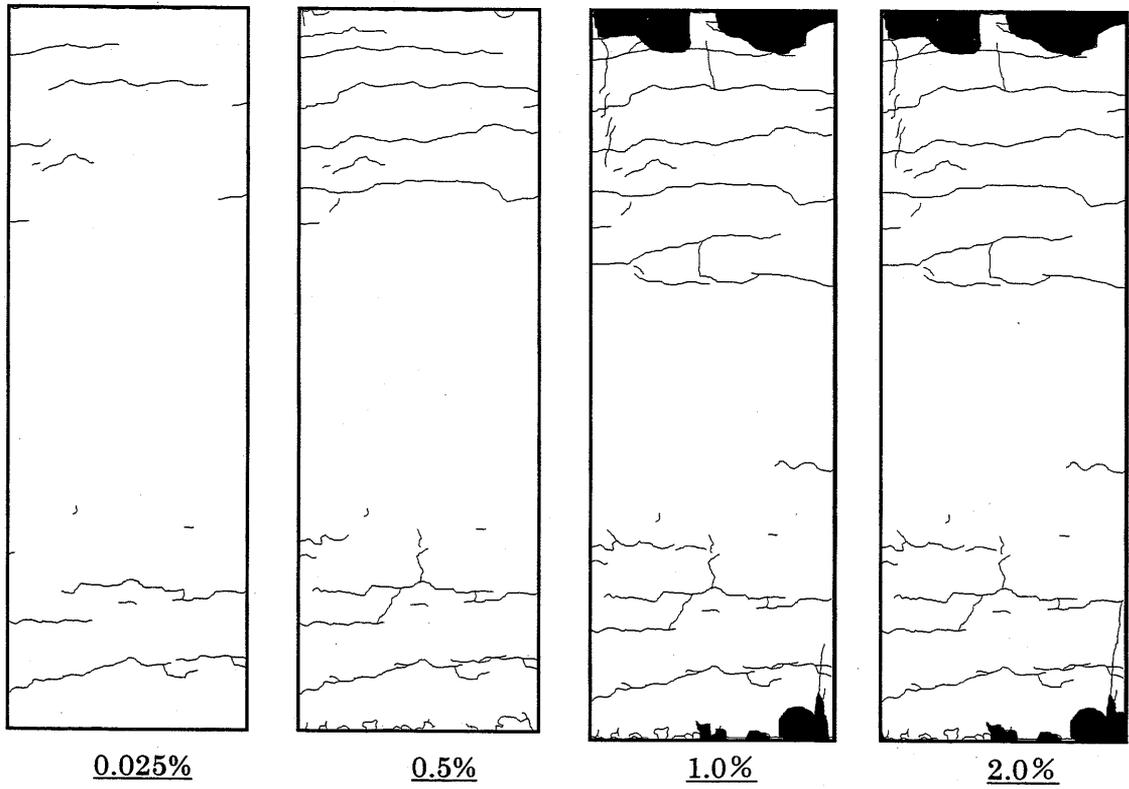


2.0%

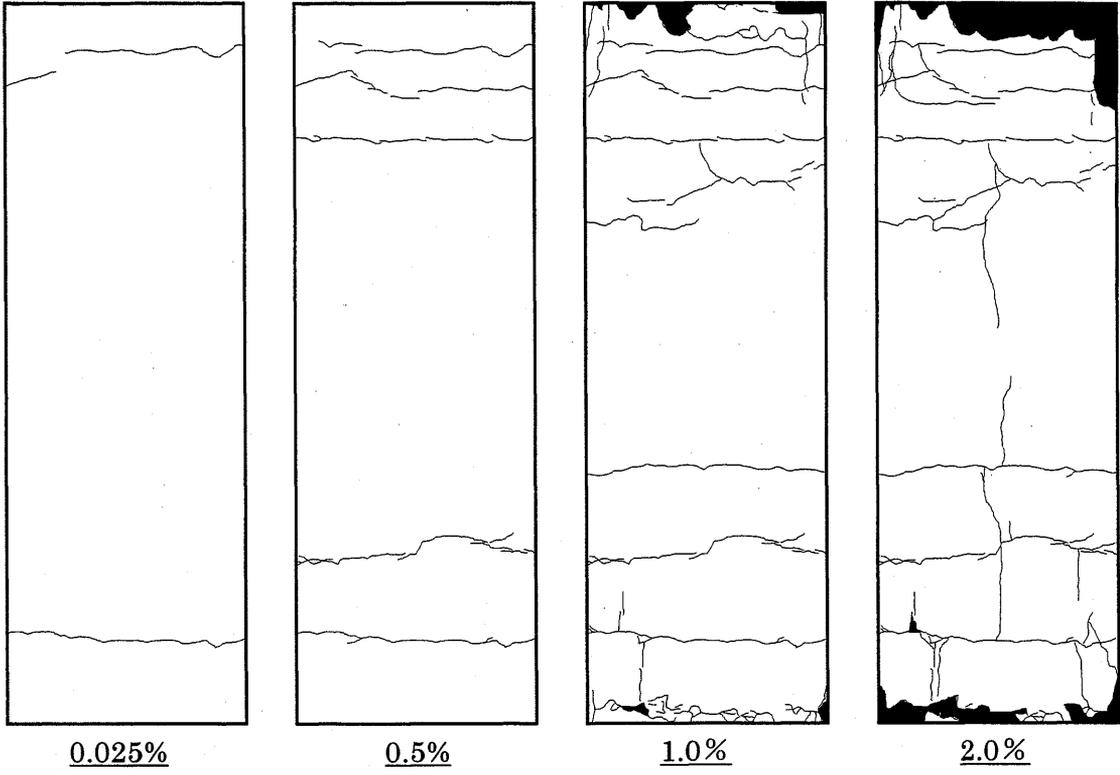
付図 2-3 FS36NC 東面



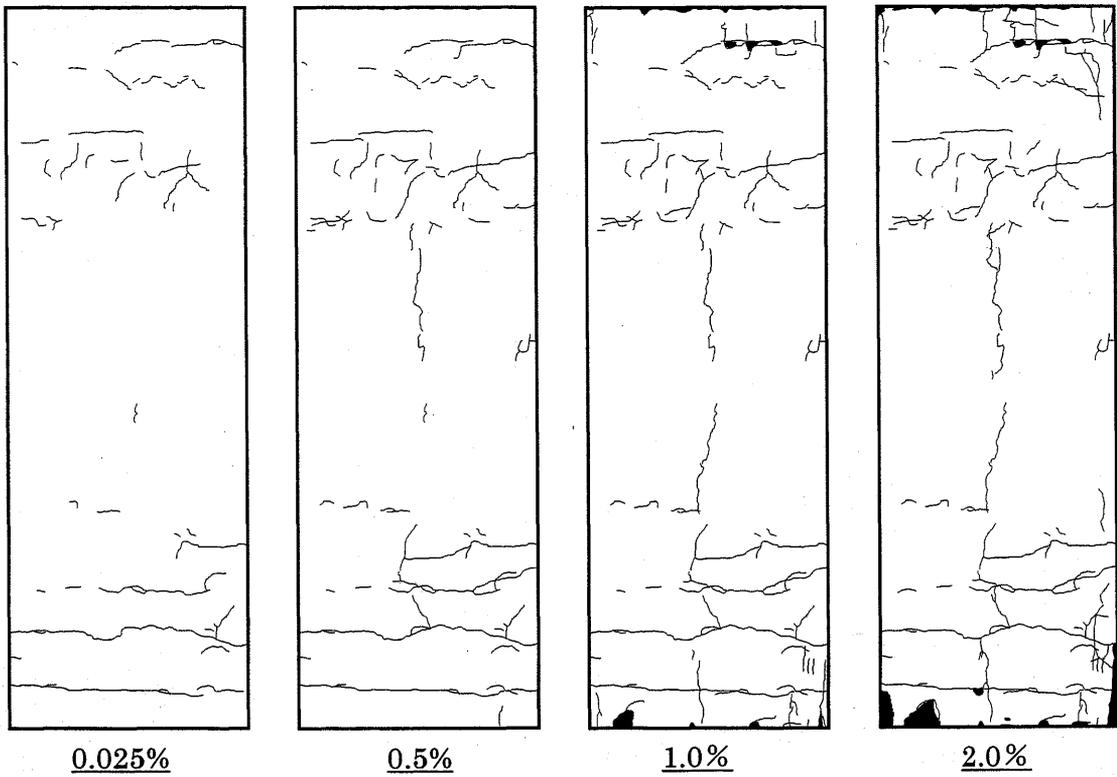
付图 2-4 FS27CA 南面



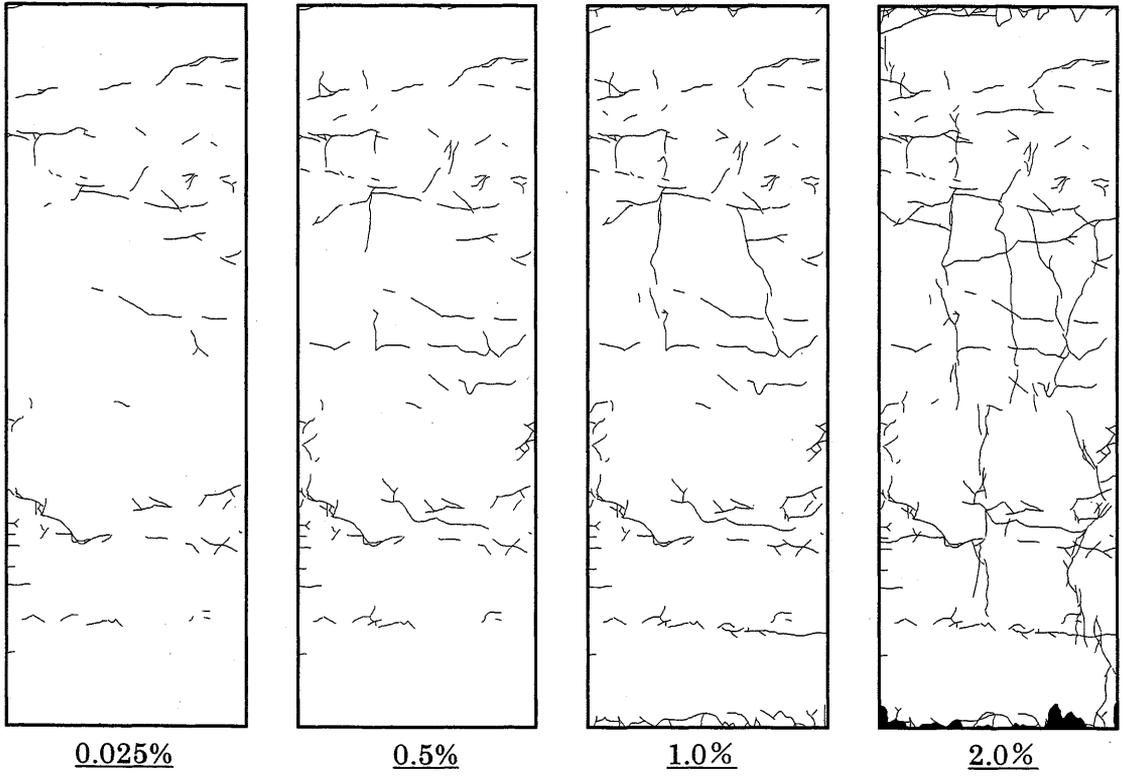
付图 2-5 FS36CA 南面



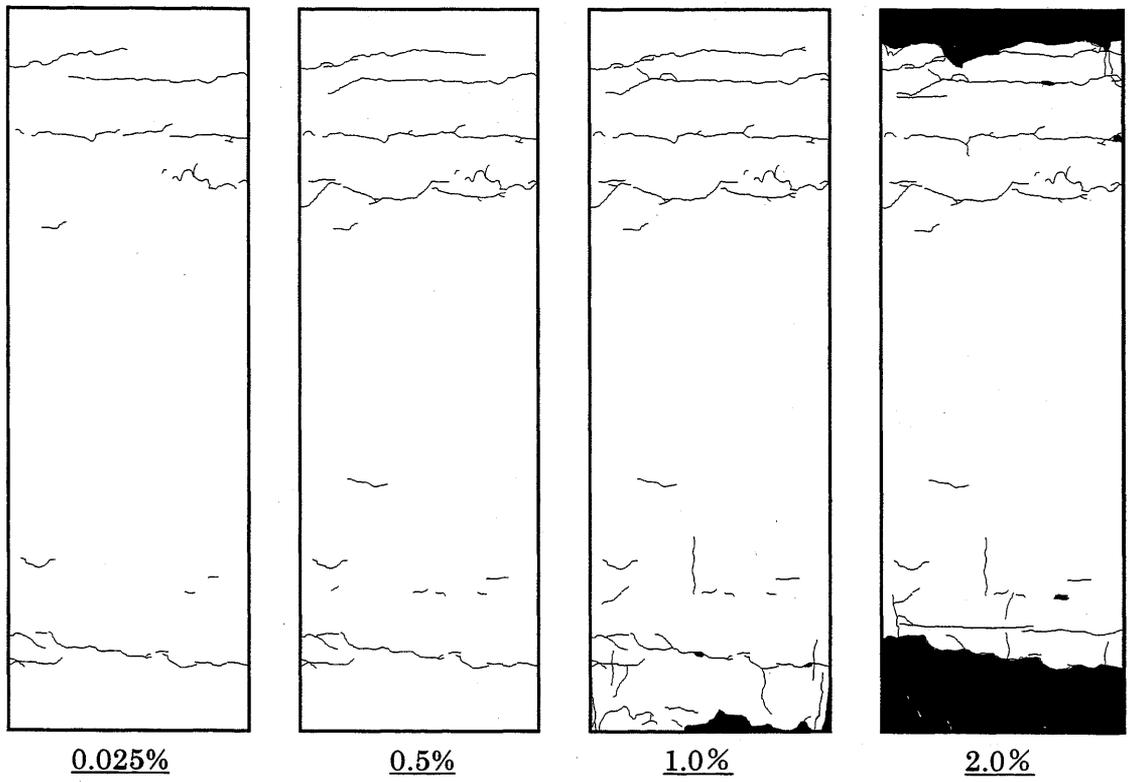
付图 2-6 FS36NC 南面



付图 2-7 FS27CA 北面



付图 2-8 FS36CA 北面



付图 2-9 FS36NC 北面

付録-3 石炭灰を活用した実大無筋コンクリート柱の実験概要

1. はじめに

本研究は石炭灰を多量に混入したコンクリートという新材料を建築物の構造部材等に適用することを目的とし、石炭灰を含んだコンクリートの力学的特性を明らかにしようとするものである。本研究では石炭灰の混入方法を実験変数として、シリンダー型テストピースを用いた圧縮試験と割裂試験、実大スケールの無筋コンクリート柱を試験体とした圧縮荷重実験を実施し、石炭灰を混入しない同形状の普通コンクリートと力学的特性について比較検討を行った。その結果、石炭灰の混入による特性の劣化は見られず、石炭灰を多量に使用したコンクリートの建築構造材料への早期実用化に向けて有用な基礎的データが得られた。

2. 使用材料と実験変数

2-1 石炭灰

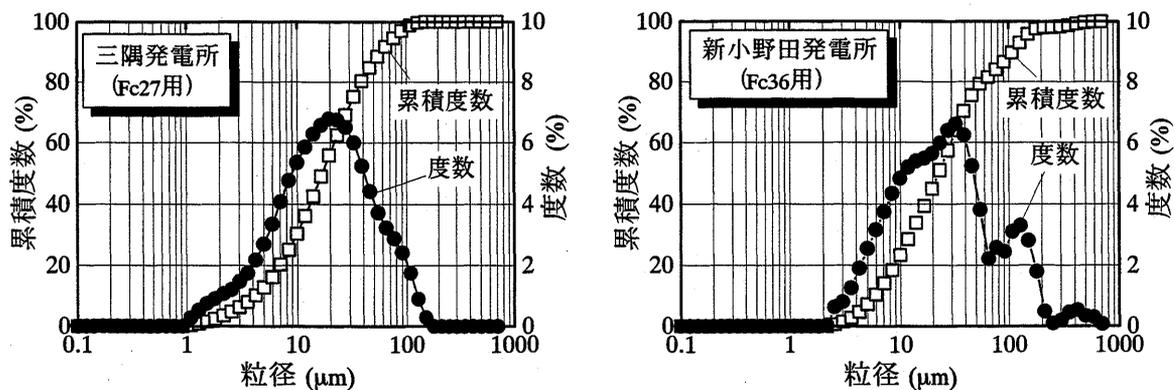
使用した石炭灰は中国電力(株)新小野田発電所および三隅発電所で産出された2種類の原粉である。前者をコンクリート強度($F_c=36\text{N/mm}^2$ 以下 F_c36)、後者を $F_c=27\text{N/mm}^2$ (以下 F_c27)の場合に使用している。その各種性状は付表 3-1 に示す通りで、原粉ではあるが新小野田産は JIS フライアッシュ II 種に、三隅産は III 種に相当する。粒度分布を比較すると付図 3-1 に示すように度数は粒径 $100\mu\text{m}$ あたりに差がみられるものの、累積度数に差異はない。

2-2 実験変数と調査設計

実験変数は石炭灰の混入方法および設計強度とした。付表 3-2 に示すように混入方法として石炭灰を混入しない普通コンクリート(NC)、石炭灰を細骨材置換材として混入するコンクリート(CA20, CA40)、粉体代替材として混入する高流動コンクリート(HF)の4種類を設

付表 3-1 使用した石炭灰の性

産出發電所	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm^3)	ブレン値 (cm^2/g)	フロー値比 (%)	MB吸着量 (mg/g)	備考
新小野田	0.1以下	3.2	2.13	3,200	101	0.44	Fc36用
三隅	0.1以下	2.3	2.16	2,840	91	0.47	Fc27用



付図 3-1 石炭灰の粒度分布

定した。4週の設定強度に対して Fc36 および Fc27 の 2 種類を設定し、空気量 4.5%，NC と CA20，CA40 はスランプ 18cm，HF はスランプフロー65cm を目標に試験練を行い調合を決定した。調合表を付表 3-3 に示す。細骨材置換材とする場合には、細骨材体積の 20%を石炭灰で代替したもの(CA20)と 40%で代替したもの(CA40)の 2 種類とした。既往の研究で施工性の面から限界値とされている 20%とその倍の場合の特性を把握するためである。粉体代替材として混入する HF では既往の研究に基づき、粉体重量の 50%程度を石炭灰で代替している。なお、セメントには普通ポルトランドセメント、砂には砕砂(表乾比重 2.58, 吸水率 1.01%, FM3.13)と陸砂(表乾比重 2.58, 吸水率 1.51%, FM1.68)の混合物、粗骨材には碎石(表乾比重 2.72, 吸水率 1.01%, FM6.74)を使用しており、混和剤は AE 剤(サンフローAE-9)と高性能減水剤(HS-700S)を使用し、粉体重量(セメント+石炭灰重量)に対して添加した。

付表 3-2 試験体名と石炭灰混入方法

試験体	コンクリート種類	石炭灰混入方法
NC	普通コンクリート	なし
CA20	石炭灰コンクリート(20%)	細骨材置換(体積比20%)
CA40	石炭灰コンクリート(40%)	細骨材置換(体積比40%)
HF	石炭灰コンクリート(高流動)	粉体代替(重量比約50%)

付表 3-3 コンクリートの調合表

試験体	設計強度	単体量(kg/m ³)					混和剤(%)	
		水	セメント	石炭灰	細骨材	粗骨材	AE剤	高性能減水剤
NC	36 N/mm ²	187	435	0	748	921	1.2	-
CA20		180	360	121	591	1022	6.0	1.0
CA40		180	330	247	475	1016	2.3	1.2
HF		175	285	285	694	789	2.0	1.9
NC	27 N/mm ²	186	358	0	810	927	0.5	-
CA20		180	300	124	569	1062	12.2	0.7
CA40		180	300	259	452	1051	3.6	1.2
HF		175	250	300	697	791	7.2	1.9

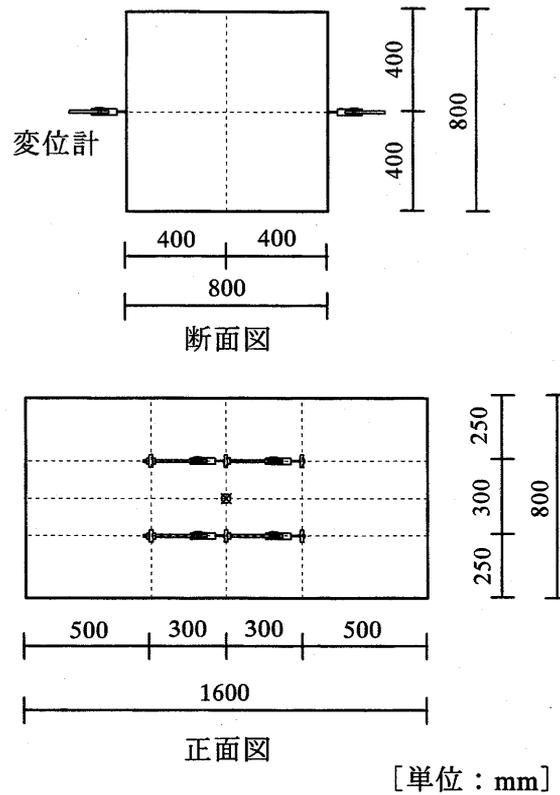
3. テストピースの材料試験

直径 100mm，高さ 200mm のシリンダー型テストピースは打設後 3 日で脱型し，気中養生した。所定の材齢時においてアムスラー試験機を用いて 2～3 本の圧縮試験を行い，圧縮強度，ヤング係数(1/3 強度時の等価剛性)およびポアソン比(コンプレッソメーターを使用)を算定した。また同時に割裂試験を実施し引張強度を求めた。

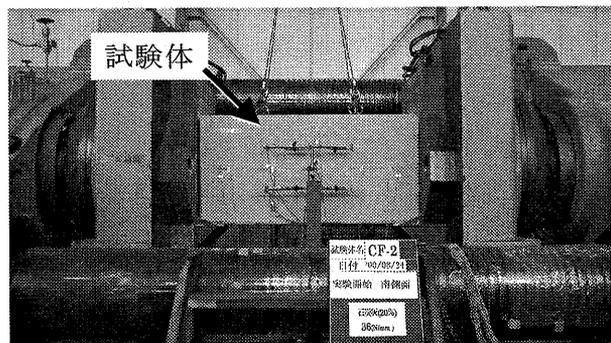
4. 実大無筋コンクリート柱の圧縮載荷実験

実大試験体は実構造物の柱を想定した付図 3-2 に示す断面 800×800mm，長さ 1600mm の無筋コンクリート柱である。試験体の作製にあたって，生コンはプラントからミキサー車で搬送し，鋼製型枠を用いて横打ちで打設した。3 日後脱型し気中養生した。Fc36 の試験体数は前項で述べたコンクリート種別に従って 4 体である。Fc27 の試験体は普通コンクリートを 2 体とし計 5 体，併せて試験体総数 9 体である。

載荷実験は同試験体と同時に打設したテストピースが設計強度に達した時点で、広島大学所有の 30MN 大型強度試験装置を使用して実施した。付図 3-3 に示すように試験体を横置きとし、単調増加の圧縮力を加え、破壊に至るまで載荷した。変位計を付図 3-2 に示したように検長区間 30cm で試験体両側面に 4 本ずつセットし、ひずみゲージも試験体表面に適宜貼付している。荷重は大型強度試験装置の圧力ゲージから直接取り出して記録した。試験体が横置きであるため重力の影響を受けていることが考えられるが、各荷重段階のひずみ分布状況は試験体断面および長さ方向にほぼ均一であり、重力による有意な影響は無いと判断した。



付図 3-2 試験体形状および変位計の設置位置



付図 3-3 大型強度試験装置

5. 実験結果

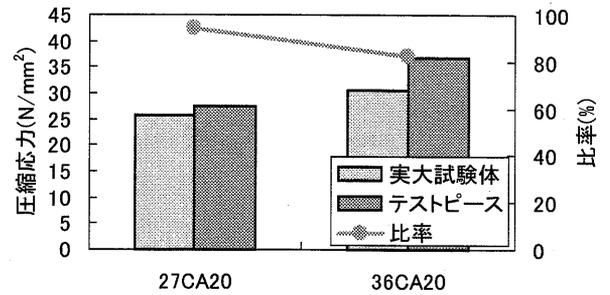
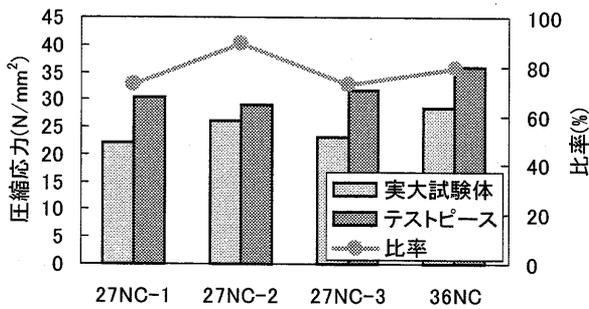
実験結果の一例として、各試験体の最大応力 σ_{max} とテストピースの材料試験により得られた材料強度 σ_B を比較して付図 3-4 に示す。同図から最大応力が寸法効果の影響を受けていることがわかる。

普通コンクリート

試験体名	σ_{max}	σ_B	σ_{max}/σ_B
27NC-1	22.06	30.35	0.73
27NC-2	26.05	29.10	0.90
27NC-3	23.09	31.74	0.73
36NC	28.59	36.00	0.79

石炭灰コンクリート(20%)

試験体名	σ_{max}	σ_B	σ_{max}/σ_B
27CA20	25.81	27.36	0.94
36CA20	30.44	36.88	0.83

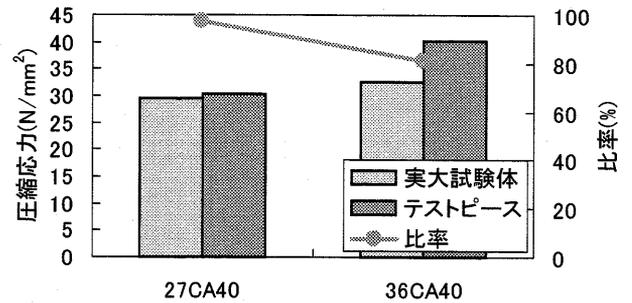
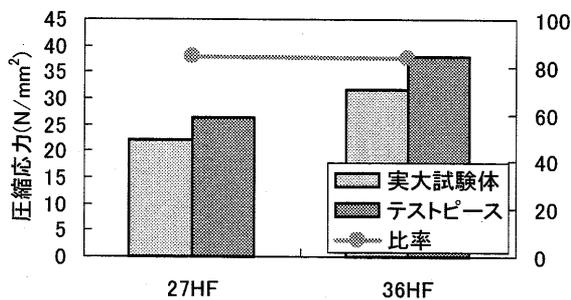


石炭灰高流動コンクリート

試験体名	σ_{max}	σ_B	σ_{max}/σ_B
27HF	22.03	26.19	0.84
36HF	31.81	37.97	0.84

石炭灰コンクリート(40%)

試験体名	σ_{max}	σ_B	σ_{max}/σ_B
27CA40	29.42	30.27	0.97
36CA40	32.54	40.05	0.81



付図 3-4 最大応力の検討

6. まとめ

石炭灰の混入方法およびコンクリート設計強度を変数として、実大無筋コンクリート柱の圧縮荷重実験を実施した。実験結果の検討およびテストピースの材料試験結果との比較から、コンクリート種類のそれぞれにおいて最大応力および最大応力時のひずみが寸法効果の影響を受ける、ヤング係数には寸法効果の影響は見られない等の知見を得た。

付録-4 石炭灰を活用した準実大鉄筋コンクリート柱の実験概要

1. はじめに

本実験は石炭火力発電所で排出される廃棄物である石炭灰を再生資源として有効利用することを背景として、石炭灰を使用した鉄筋コンクリート部材の耐震性能を把握することを目的としている。まず、曲げ降伏先行型の準実大鉄筋コンクリート柱を作成し、載荷実験から曲げ特性を検証した。実験変数は石炭灰の混入方法とし、柱型試験体に一定軸力を加えながら水平方向の変位漸増正負交番繰り返し載荷を行った。ひび割れの進展や水平耐力等に関して実験結果を比較検討したところ、石炭灰を混入した場合も普通コンクリートと同等の性能を示しており、鉄筋コンクリート部材への適用の有効性を確認することができた。

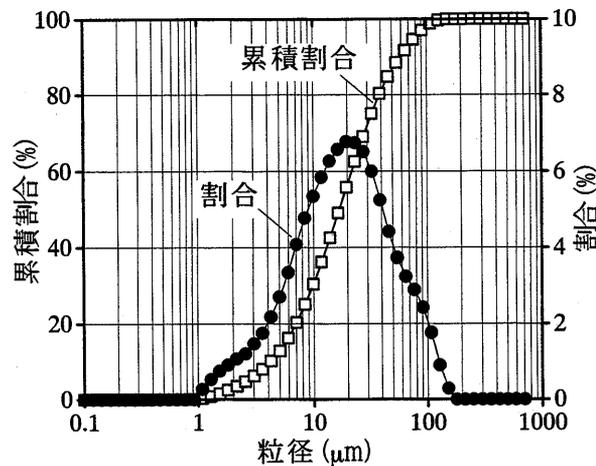
2. 使用材料と実験変数

2-1 石炭灰

石炭灰には中国電力（株）三隅発電所で産出された原粉を使用した。その各種性状を付表 4-1 に、粒度分布を付図 4-1 にそれぞれ示す。

付表 4-1 使用した石炭灰の性状

測定項目	単位	石炭灰	試験の方法	JIS規格
湿分	%	0.1以下	JISA2601	—
強熱減量	%	2.3	"	5以下
比重	g/cm ³	2.16	"	1.95以上
比表面積	cm ² /g	2,840	"	2400以上
70-値比	%	91	"	—
MB吸着量	mg/g	0.47	JCAS161	—



付図 4-1 使用した石炭灰の粒度分布

2-2 実験変数と調合設計

実験変数は石炭灰の混入方法とし、付表 4-2 に示すように石炭灰を混入しない NC（普通コンクリート）、細骨材置換して混入する CA（石炭灰コンクリート）、粉体代替とし

て混入する HF（石炭灰高流動コンクリート）の 3 種類を設定し、それぞれ 28 日強度 27N/mm^2 、空気量 4.5%、スランプ値 18cm、スランプフロー値 65cm を目標に調合設計を行った。調合表を付表 4-3 に示す。既往の研究に基づき、CA では細骨材体積の 2 割を、HF では粉体重量の 5 割強を石炭灰で代替している。なお、セメントには普通ポルトランドセメント、砂には加工砂と陸砂の混合物、粗骨材には碎石を使用しており、混和剤として AE 剤と高性能減水剤を添加した。

付表 4-2 試験体一覧

試験体名	コンクリート種別	石炭灰混入方法
NC	普通コンクリート	なし
CA	石炭灰コンクリート	細骨材置換率 (20%)
HF	石炭灰高流動コンクリート	粉体代替

付表 4-3 コンクリート調合表

試験体名	セメント (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	石炭灰 (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)	混和剤 (%)
NC	358	186	0	810	927	1.01
CA	300	180	124	569	1062	12.9
HF	250	175	300	697	791	4.8

2-3 材料特性

試験体と同時に作成したコンクリートシリンダの実験実施日の力学的特性を付表 4-4 に示す。NC と HF に比べ CA は強度発現に時間を要した。これは石炭灰のポゾラン反応を考慮して、調合でセメント量を減少させたことが原因と考えられる。

試験体柱部分の鉄筋には D6, D16, D19 の 3 種類を用いた。力学的特性を付表 4-5 に示す。

付表 4-4 実験実施時のコンクリート力学的特性

試験体名	材令 (日)	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	引張強度 σ_t (N/mm^2)	ヤング係数 E_c (kN/mm^2)	ポアソン比 ν
NC	15	27.7	3.05	25.8	0.190
CA	28	26.3	2.88	22.9	0.170
HF	15	27.9	2.25	24.0	0.170

付表 4-5 鉄筋の力学的特性

種類	降伏応力度 σ_{SY} (N/mm^2)	最大応力度 σ_{SU} (N/mm^2)	ヤング係数 E_S (kN/mm^2)
D6	383	552	174
D16	393	558	187
D19	356	511	156

3. 実験方法

3-1 試験体

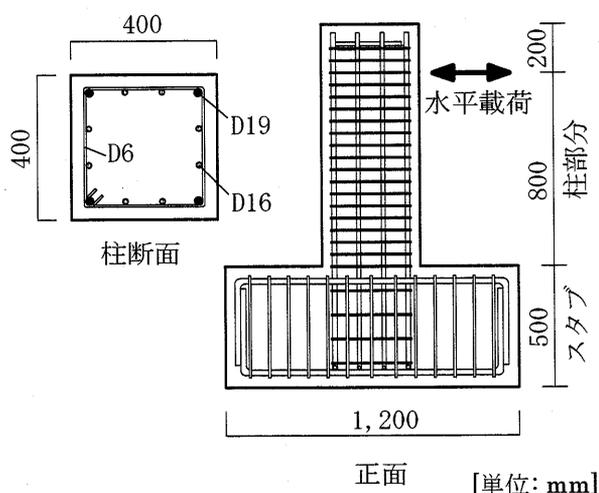
試験体は付図 4-2 に示すように断面 40cm 角、高さ 1m の準実大（約 2/3 スケール）の柱と固定用のスタブから成る。柱の主筋には 8 本の D16 と 4 本の D19 を組み合わせて使用し、帯筋には D6 を 50mm 間隔（帯筋比 $p_w=0.32\%$ ）で配しており、曲げ破壊先行型となるよう設計している。試験体の製作においてコンクリートの打設は木製型枠を使用し縦打ちとした。

3-2 載荷方法

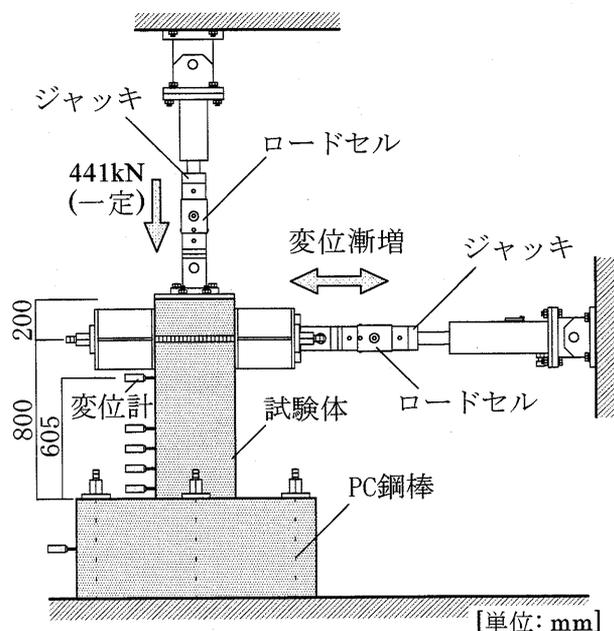
載荷は付図 4-3 に示すようにスタブを反力床に PC 鋼棒にて緊結し、2 基の油圧ジャッキにより行った。柱の軸方向力は 441kN で一定としており、低層建物における軸力比 0.1 程度に相当する。水平方向は変位制御の正負交番繰り返し載荷とした。水平ジャッキが押す方向を正、引く方向を負とする。ジャッキ能力の限界から 1/50 は正加力 1 回のみとし、その後に押し抜いた。なお、本実験では水平変位測定用変位計のうち最上部に設置した変位計の測定値をその変位計の高さ 605mm で除した値を柱の変形角 R とした。

3-3 計測方法

荷重は付図 4-3 に示したように各ジャッキに設置したロードセルにより、試験体の水平変位は同図にあるように柱 5 点とスタブ 1 点について設置した変位計により測定した。この他にも柱の軸方向変位および曲率を測定するための変位計を設置しており、また、主筋および帯筋の約 50 点にひずみゲージを貼付し鉄筋のひずみの進展状況を計測している。これらのデータはスイッチボックスとデータロガーを介してパソコンに収録した。



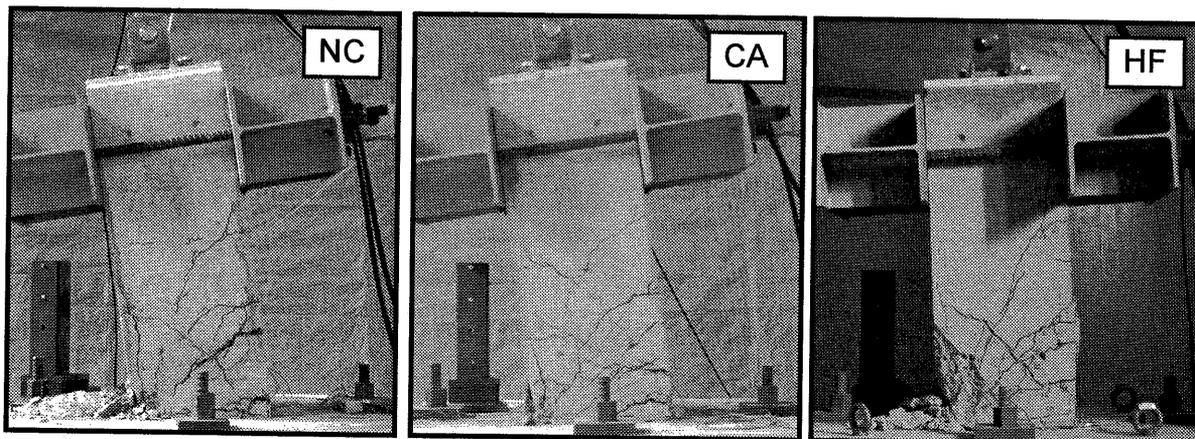
付図 4-2 試験体の外形と配筋詳細



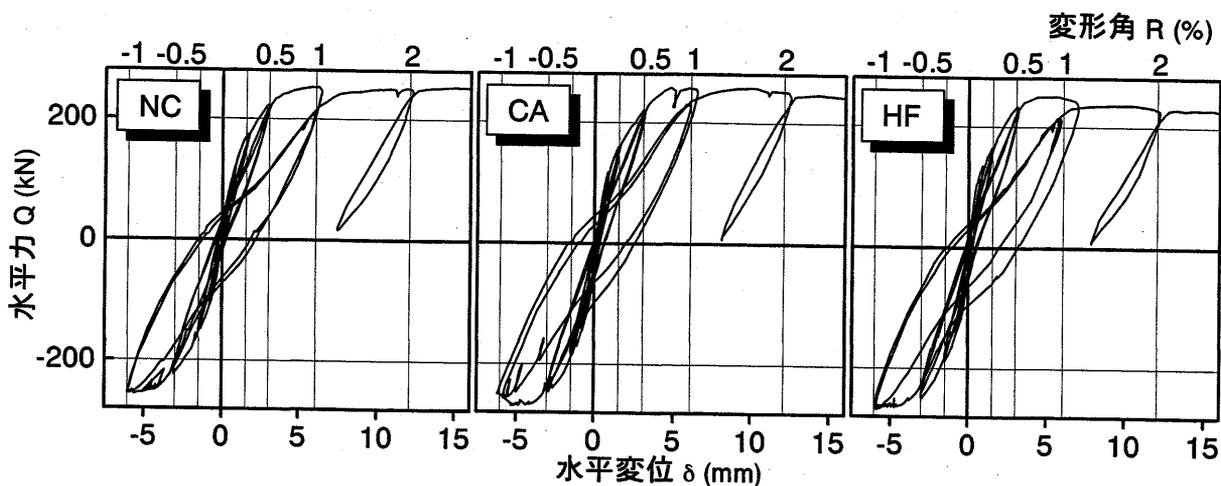
付図 4-3 実験装置（正面）

4. 実験結果

実験結果の一例として、最終損傷状況の比較を付図 4-4 に、水平力-水平変位履歴曲線の比較を付図 4-5 にそれぞれ示す。いずれの試験体ともに正負両方向に大きな斜め方向のせん断ひび割れが発生したが、せん断破壊や急激な耐力低下を起こすことなく、実験終了に至るまで安定した履歴性状を示した。図からわかる通り、損傷状況および水平力-水平変位履歴曲線において、石炭灰の混入による有意な差は見られなかった。



付図 4-4 最終損傷状況



付図 4-5 水平力-水平変位履歴曲線

5. まとめ

コンクリートへの石炭灰の混入方法を実験変数として、曲げとせん断が作用する準実大鉄筋コンクリート柱を試験体とした静的載荷実験を実施した。ひび割れ性状、履歴曲線、最大耐力等の実験結果を検討し、石炭灰の混入による耐震性能の劣化は起こらず、普通コンクリートの場合と同等の性能を発揮できることを確認した。