

論文 超高強度コンクリートを用いたRC柱の繰返し圧縮性状

岡田 直子*1・今井 和正*2・小室 努*3・寺嶋 知宏*4

要旨: 圧縮強度 150 N/mm²級の超高強度コンクリートを用いた無筋コンクリート試験体および鉄筋コンクリート柱試験体の多数回繰返し圧縮実験を行った。短期許容圧縮応力度を上限応力とした 200 サイクル繰返し圧縮加力では、いずれの試験体も繰返しによる破壊は生じないことを確認した。また、無筋の試験体と鉄筋コンクリート柱試験体では、繰返し加力により破壊する上限応力比に違いが見られた。

キーワード: 超高強度コンクリート, 繰返し加力, 短期許容圧縮応力度

1. はじめに

コンクリートの短期許容圧縮応力度は、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹⁾において、多数回繰返し加力実験等を参考に設計基準強度 F_c の 2/3 と規定されている。しかしながら、同規準では F_c 60 N/mm²以下のコンクリートが対象とされており、超高層建物の下層階柱に使用されている F_c 100 N/mm²を超えるような超高強度コンクリートに関する規定はない。一方、これらの超高層建物が、プレート境界型巨大地震で発生が懸念されている長周期地震動を受けた場合、下層階柱は相当回数繰返し応力を受けると考えられる。

こうした中、近年、超高強度コンクリートを対象とした繰返し加力実験が報告されるようになった^{2)~5)}が、いずれも無筋のコンクリート試験体を対象としており、自己収縮によって生じる内部応力や微細なひび割れの影響を考慮した鉄筋コンクリート（以下、RC）部材として検討されていない。本論文では、この点に着目して実施したRC柱の多数回繰返し圧縮実験の結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表-1 および表-2 に示す。基礎的な繰返し性状を把握するための無筋のコンクリート試験体 ϕ 100×200 mm と、RC柱の性状把握を目的としたRC柱試験体を計画した。同時に、各々のシリーズについて

表-1 試験体一覧（コンクリート試験体）

	収縮低減剤	加力方法		
		上限応力	周期 (sec.)	応力速度 (N/mm ² /sec.)
C-0-67-H-1~3	なし	0.67 σ_B	23	8.8
C-0-80-H-1~3		0.80 σ_B	23	10.6
C-0-67-L-1~3		0.67 σ_B	226	0.9
C-0-80-L-1		0.80 σ_B	226	1.1
C-0-85-L-1		0.85 σ_B	240	1.1
C-0-90-L-1		0.90 σ_B	231	1.2
C-1-67-H-1~3	あり	0.67 σ_B	23	8.8
C-1-80-H-1~3		0.80 σ_B	23	10.6
C-1-67-L-1~3		0.67 σ_B	226	0.9
C-1-80-L-1		0.80 σ_B	226	1.1
C-1-85-L-1		0.85 σ_B	240	1.1
C-1-90-L-1		0.90 σ_B	231	1.2

※下限応力: 0.05 σ_B

表-2 試験体一覧（RC試験体）

No.	断面 (mm)	収縮低減剤	主筋		補強筋		加力方法	
			配筋	ρ_g (%)	配筋	ρ_w (%)		
RCA-1	□220	なし	4-D16	1.6	□-U6.4-@30	0.91	単調加力 (かぶり破壊まで)	
RCA-2	□220		8-D16	3.3				
RCA-3	□220		4-D25	4.2				
RCA-4	□220	あり	4-D16	1.6	□-U6.4-@30	0.91		
RCA-5	□220		8-D16	3.3				
RCA-6	□220		4-D25	4.2				
RCB-1	□220	なし	8-D16	3.3	□-U6.4-@30	0.91	繰返し加力	
RCB-2	□220		8-D16	3.3	□-U6.4-@30	0.91		
RCB-3	□280		8-D25	5.2	□-U7.1-@30	0.95		
RCB-4	□220		8-D16	3.3	□-U6.4-@30	0.91		
RCB-5	□220		あり	8-D16	3.3	□-U6.4-@30		0.91
RCB-6	□280			8-D25	5.2	□-U7.1-@30		0.95

※下限応力: 0.05 σ_B

- *1 大成建設 (株) 技術センター 研究員 工修 (正会員)
- *2 大成建設 (株) 技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)
- *3 大成建設 (株) 設計本部 プロジェクトリーダー 博士(工学) (正会員)
- *4 大成建設 (株) 設計本部 プロジェクト・エンジニア 工修

単調圧縮実験を行い、圧縮強度を把握した。無筋の試験体の繰返し加力では、加力方法（2.2 節に詳述）をパラメーターとした。RC柱試験体については、単調加力（RCA シリーズ）では主筋量を、繰返し加力（RCB シリーズ）では加力方法（2.2 節に詳述）と断面寸法をパラメーターとした。

コンクリートの配合を表-3 に示す。目標圧縮強度は全試験体共通で 150 N/mm² とした。収縮による内部応力やひび割れが RC 部材の力学性状に影響を及ぼす可能性がある⁶⁾ため、収縮低減剤の有無を実験パラメーターの一つにした。また、図-1 に示すφ150×300 mm のコンクリート試験体を作製し、鉄筋周囲に生じるとされる収縮による法線ひび割れ⁷⁾の影響をその割裂試験により把握する計画とした。割裂試験体では、収縮低減剤のほか、養生方法（現場封緘養生と簡易断熱養生）、鉄筋の有無および鉄筋径（D16 と D25）をパラメーターとし、同一条件の試験体をそれぞれ 5 体ずつ用意した。

RC柱試験体の形状・寸法を図-2 に示す。なお、硬化時に発生する鉄筋の拘束応力を把握するため、打設時から加力実験時までの鉄筋ひずみを計測した他、別途用

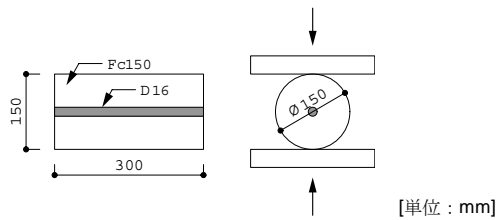


図-1 割裂試験体

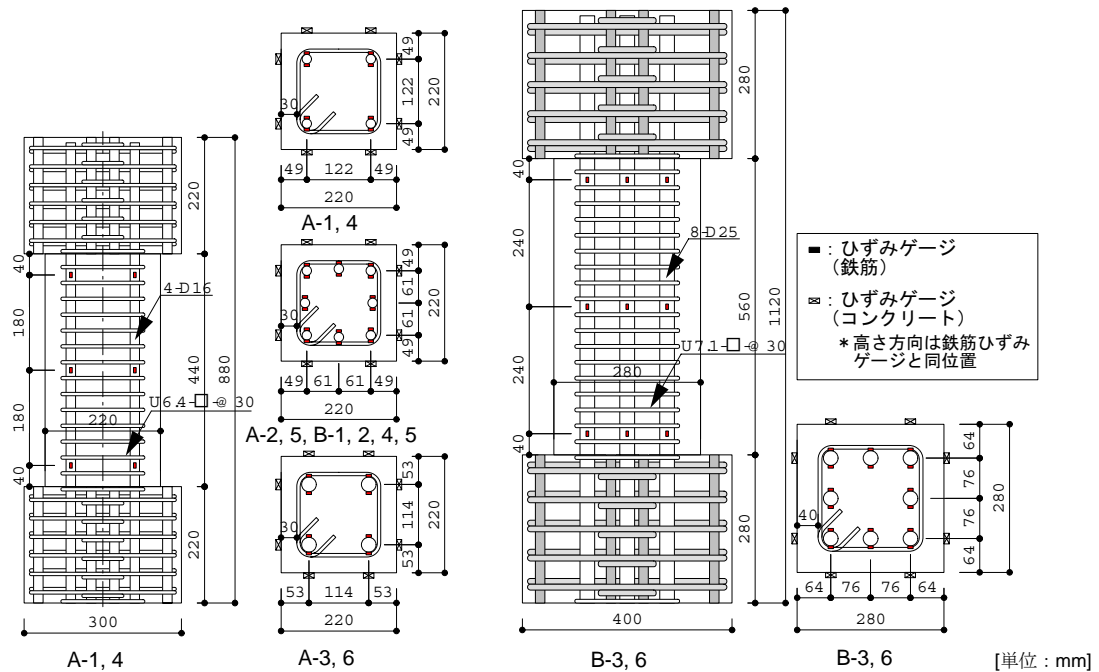


図-2 RC柱試験体

表-3 コンクリートの配合

水結合材比 W/B (%)	水 W (kg/m ³)	結合材*1 B (kg/m ³)	細骨材*2 S (kg/m ³)	粗骨材*3 G (kg/m ³)	化学 混和剤*4 SP (%×B)	収縮 低減剤*5 SRA (kg/m ³)
15.0	150	1000	493	811	1.7	(7)*6

*1：普通ポルトランドセメント：スラグせつこう系混和材：シリカフューム=7:2:1（質量比）
*2：安山岩系砕砂、*3：安山岩系砕石（6号）
*4：ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤
*5：低級アルコールアルキレンオキッド付加物（「収縮低減剤あり」試験体のみを使用）
（*4、*5はいずれも単位水量Wに対して内割り）
*6：収縮低減剤ありの場合には（ ）内の数値、収縮低減剤なしの場合には0とする

表-4 使用材料の強度試験結果

(a) コンクリート

(a-1) 収縮低減剤なし

材齢 [日]	圧縮強度 [N/mm ²]		ヤング係数 [kN/mm ²]		ポアソン比	
	現場 封緘	簡易 断熱	現場 封緘	簡易 断熱	現場 封緘	簡易 断熱
72 (実験前)	153	167	41.0	41.9	0.25	0.24
148 (実験後)	154	—	41.8	—	0.24	—

(a-2) 収縮低減剤あり

材齢 [日]	圧縮強度 [N/mm ²]		ヤング係数 [kN/mm ²]		ポアソン比	
	現場 封緘	簡易 断熱	現場 封緘	簡易 断熱	現場 封緘	簡易 断熱
71 (実験前)	151	162	41.1	41.6	0.25	0.24
147 (実験後)	149	—	42.7	—	0.24	—

(b) 鉄筋

	降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]	ヤング率 [×10 ⁵ N/mm ²]
D16 (USD685)	761	977	11.8	1.93
D25 (USD685)	707	865	12.3	1.93
U6.4 (SBPD1275/1420)	1364	1423	7.8	2.04
U7.1 (SBPD1275/1420)	1418	1483	8.2	2.14

意した 100×100×400 mm の角形コンクリート供試体を用い、自由収縮を中央部に埋設した埋込型ひずみ計により計測した⁸⁾。角形供試体の養生は、打込みから脱型までを湿潤養生とし、材齢約 24 時間で脱型し、全面をアルミ箔粘着テープでシールする 20℃封緘養生としている。同時に温度も測定し、実測ひずみから温度ひずみ(線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定)を差し引いて自由収縮ひずみを求めた。

コンクリートと鉄筋の強度試験結果を表-4(a)および(b)にそれぞれ示す。収縮低減剤を添加したことによりコンクリートの圧縮強度がわずかに低下している。以後の検討で用いるコンクリートの単調加力圧縮強度 σ_B は、実験前と実験後の現場封緘養生の結果の平均値として、収縮低減剤なしの場合には 153 N/mm^2 、収縮低減剤ありの場合には 150 N/mm^2 を採用した。

2.2 加力・計測方法

無筋の試験体およびRC柱試験体の加力方法を前掲の表-1 および表-2 に示す。繰返し加力の上限応力比 σ_{\max}/σ_B を、無筋の試験体では 0.67~0.90、RC柱試験体では 0.67~0.80 の範囲でそれぞれ変化させ、下限応力比 σ_{\min}/σ_B は 0.05 とし、全試験体共通とした。加力は 200 サイクルを上限とした三角波とし、それまでに破壊しない試験体については引き続いて単調加力を行った。RC柱試験体の繰返し加力時の応力速度は試験機の制約から $1 \text{ N/mm}^2/\text{sec}$ 程度となっており、想定される超高層建物の固有周期に対して載荷周期は極端に長いものとなっている。なお、無筋の試験体については、2 水準の応力速度を採用してその影響を把握する計画とし、試験体両面の縦ひずみを検長 60 mm のひずみゲージで計測した。RC柱試験体については、前掲の図-2 に示した位置で鉄筋とコンクリートのひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 収縮ひずみ

打設日から加力実験前までのRC柱試験体の主筋の圧縮ひずみ変化を図-3 に示す。養生条件や寸法・形状がRC柱試験体と異なるため一概には比較できないが、参考のため、角形供試体により計測したコンクリートの自由収縮ひずみも同時に示す。

同一断面で比較して、収縮低減剤ありの試験体の方が収縮低減剤なしの試験体より小さいひずみに収まっており、収縮低減剤添加によりコンクリートの自己収縮が低減され、コンクリートに作用する引張応力は小さくなっているといえる。

3.2 割裂強度

割裂強度(5体の平均値)を収縮低減剤の有無、養生条件、鉄筋量別に図-4 に示す。なお、同一条件の5体

の試験体の割裂強度は平均値に対して 7~32% のばらつきを有する。

鉄筋径が強度へ与える影響は明確ではないが、無筋の試験体に比べて、鉄筋を有する試験体は強度が 5~31% 低下している。また、同じ養生条件、鉄筋量の試験体において、収縮低減剤なしの場合よりも収縮低減剤ありの場合の方が強度が若干高く、収縮によるひび割れや引張応力が割裂強度へ与える影響を示している。なお、鉄筋量や収縮低減剤の有無が割裂強度に与える影響の養生条件による差異は明確ではない。

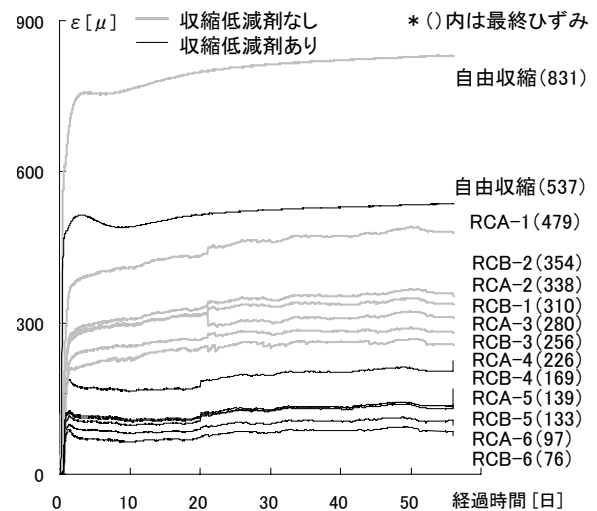


図-3 収縮により生じる主筋の圧縮ひずみ

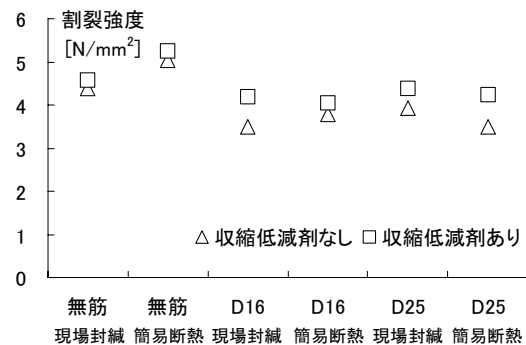


図-4 割裂強度

3.3 圧縮性状

(1) コンクリート試験体

無筋の試験体の繰返し圧縮実験結果について述べる。 σ_{\max}/σ_B が 0.85 以下の試験体では全て 200 サイクルの繰返し加力中に破壊は生じなかった。一方、 σ_{\max}/σ_B が 0.90 の場合、収縮低減剤なしの試験体は 69 サイクル目、収縮低減剤ありの試験体は 67 サイクル目に破壊した。 σ_{\max}/σ_B と破壊サイクル数 n の関係を図-5 に示す。図中には、文献 9) における n と σ_{\max}/σ_B および σ_{\min}/σ_B の

関係,

$$\log n = K \cdot (1 - \sigma_{\max}/\sigma_B) / (1 - \sigma_{\min}/\sigma_B) \quad (1)$$

を示す。なお、係数 K は、気中の普通コンクリートに用いる 17 を採用した。本実験では、式(1)により求められる n と同程度の繰返しサイクル数で破壊している。

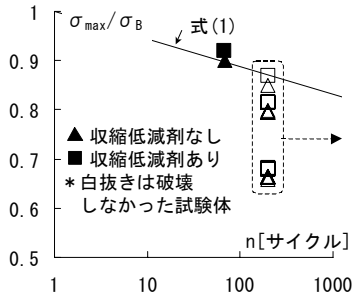


図-5 上限応力比-破壊サイクル数関係

繰返し加力中に破壊しなかった試験体の繰返し加力後の圧縮強度 σ_{TP} と σ_B の比 σ_{TP}/σ_B を図-6 に示す。 σ_{TP} は σ_B に対して 1.0~1.1 倍程度で、本実験では繰返し加力によるその後の圧縮強度低下は見られなかった。また、応力速度や収縮低減剤の有無が繰返し加力後の圧縮強度に与える影響は確認されなかった。

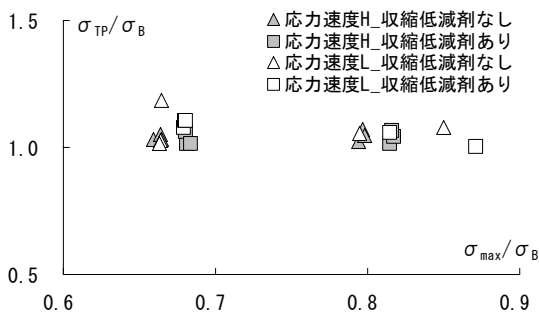


図-6 繰返し加力後の圧縮強度 (コンクリート試験体)

応力比 σ/σ_B とひずみ ϵ の関係を包絡線で表示したものを図-7(a)に、 σ_{\max}/σ_B と累積ひずみ $\Delta\epsilon$ の関係を図-7(b)に、 σ_{\max}/σ_B と $\Delta\epsilon/\epsilon_1$ の関係を図-7(c)に示す。ここで、累積ひずみ $\Delta\epsilon$ は繰返し最終サイクルの上限応力時ひずみ ϵ_{last} と 1 サイクル目の上限応力時ひずみ ϵ_1 の差である。なお、各試験体のひずみは、2 点のゲージのうち、繰返し最終サイクルの上限荷重時ひずみが大きい方の値を用いている。応力速度の影響は明確ではなかった。

収縮低減剤が破壊サイクル数へ及ぼす影響は小さいが、 ϵ_{last} や $\Delta\epsilon$ は収縮低減剤ありの方が若干小さくなっており、収縮低減剤添加により繰返し加力によるひずみの蓄積が低減される傾向が確認できる。

繰返し加力中に破壊しなかった σ_{\max}/σ_B 0.85 以下の試験体は、 σ_{\max}/σ_B が大きくなるほど $\Delta\epsilon$ および $\Delta\epsilon/\epsilon_1$ が大きくなっている。また、上限応力比 σ_{\max}/σ_B 0.67 の場合では、収縮低減剤なしの試験体の $\Delta\epsilon/\epsilon_1$ 平均値は 0.15、収縮低減剤ありの試験体では 0.13 となっており、共に低い値で収まっている。

(2) RC柱試験体

RCA シリーズの圧縮強度 σ_{RCA} および RCB シリーズの繰返し加力後の圧縮強度 σ_{RCB} の σ_B に対する比 σ_{RCA}/σ_B および σ_{RCB}/σ_B を図-8 に示す。 σ_{RCA} および σ_{RCB} は、載荷軸力 N から主筋負担軸力 N_s を減じて求めたコンクリート負担軸力 N_c を、コンクリートの断面積で除して求めた。 N_s は主筋の応力-ひずみ関係を完全バイリニアと仮定して、図-3 に示した収縮を考慮して算出した。

RCA シリーズの単調加力における σ_{RCA}/σ_B は 0.85~0.92 の範囲にあり、収縮低減剤の有無や主筋比が圧縮強度へ及ぼす影響は小さい。なお、RCA シリーズの全ての試験体で、圧縮強度 σ_{RCA} が σ_B より小さくなっているが、その低下率 σ_{RCA}/σ_B は、超高強度コンクリートの寸法効果による強度低下率¹⁰⁾と同程度である。

RCB シリーズの繰返し圧縮実験の結果については、 σ_{\max}/σ_B 0.67 の試験体では 200 サイクルの繰返し加力中

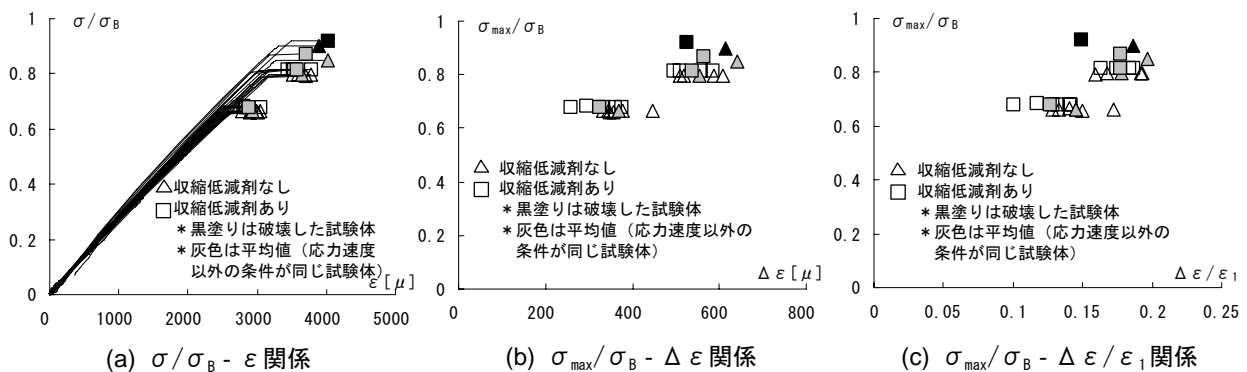


図-7 応力比 - ひずみ関係 (コンクリート試験体)

には破壊は生じず、コンクリートのひび割れ、剥落および主筋の降伏は確認されなかった。 σ_{max}/σ_B 0.80 の試験体では収縮低減剤なしの場合には 138 サイクル目、収縮低減剤ありの場合には 59 サイクル目にかぶりコンクリートが破壊した。先述のように、無筋の試験体では上限応力比 0.80 の場合は繰返し破壊は生じておらず、RC 柱試験体の方が低い上限応力比で繰返し破壊する結果となっている。繰返し中に破壊しなかった RCB-2 および RCB-5 の σ_{RCB} は、同一条件の単調加力試験体 RCA-2 および RCA-5 の σ_{RCA} の 0.97 倍で、繰返し加力とその後の圧縮強度に与える影響は小さい。

上限荷重時のコンクリートと主筋の軸力負担割合 N_s/N および N_c/N の変化を RCB-5 を例にとって図-9 に示す。 n が増すごとに N_c/N が減少し、 N_s/N が増加している。また、これらの軸力負担割合の変化は初期の繰返しサイクルのうちに顕著に見られる。

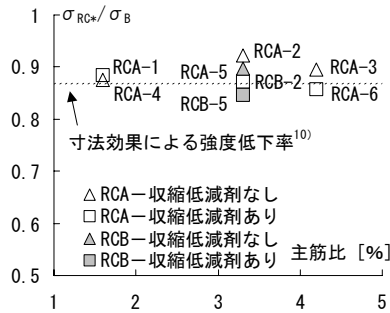


図-8 圧縮強度 (RCA, RCB シリーズ)

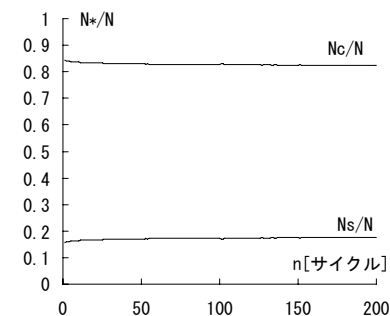


図-9 応力負担割合の変化 (例: RCB-5)

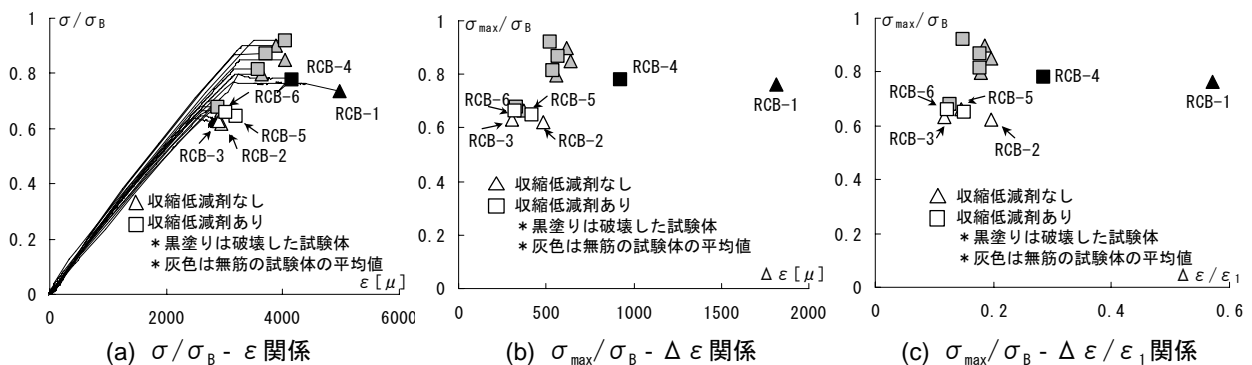


図-10 応力比 - ひずみ関係 (RCB シリーズ)

σ/σ_B と ϵ の関係、 σ_{max}/σ_B と $\Delta\epsilon$ の関係、 σ_{max}/σ_B と $\Delta\epsilon/\epsilon_1$ の関係を図-10 に示す。ここでも、無筋の試験体の検討と同様に、各試験体のコンクリートに貼付したひずみゲージの中で繰返し最終サイクルの上限荷重時ひずみが最も大きいゲージの値を検討に用いた。

繰返し加力中に破壊した σ_{max}/σ_B 0.80 の ϵ_{last} や $\Delta\epsilon$ は無筋の試験体に比べて大きい。また、繰返し加力中に破壊しなかった σ_{max}/σ_B 0.67 の試験体では収縮低減剤の有無による ϵ_{last} や $\Delta\epsilon$ の違いは顕著ではないが、繰返し加力中に破壊した σ_{max}/σ_B 0.80 の試験体では収縮低減剤ありの場合よりも、収縮低減剤なしの場合の方が ϵ_{last} や $\Delta\epsilon$ が大きい。上限応力比 σ_{max}/σ_B 0.67 の試験体の $\Delta\epsilon/\epsilon_1$ は 0.12~0.20 であり、無筋の試験体と同様に、低い値に収まっている。

4. まとめ

150 N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた無筋コンクリート試験体および RC 柱試験体の多数回繰返し圧縮実験を行い、以下に示す知見を得た。

- 短期許容圧縮応力度 (2/3F_c) を上限応力とした繰返し圧縮実験では、いずれの試験体においても、200 サイクルの繰返し圧縮により破壊は生じなかった。また、繰返し加力後の圧縮強度は単調加力圧縮強度と同程度であった。
- 短期許容圧縮応力度を上限応力とした場合、繰返し圧縮によるコンクリートの 200 サイクル目の累積ひずみは、1 サイクル目のひずみに対しておよそ 20% 以下であった。
- 収縮低減剤添加により収縮ひずみは低減されるが、繰返し加力中に破壊する上限応力比および繰返し加力後の圧縮強度に及ぼす影響は小さかった。
- 無筋の試験体では上限応力比 0.90、RC 柱試験体では上限応力比 0.80 で繰返し加力中に破壊が生じ、繰返し圧縮により破壊する上限応力比に違いが見られた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999.11
- 2) 小坂 英之，山中 久幸：高強度コンクリートの高応力下の低サイクル疲労について，高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会 報告書・論文集，日本コンクリート工学協会，pp.404-407，2006
- 3) 西田 浩和，片寄 哲務，佐藤 幸博，寺岡 勝：定荷重繰返し圧縮荷重を受ける高強度コンクリートの損傷評価の試み，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1181-1186，2006
- 4) 佐藤 幸博，片寄 哲務，西田 浩和，佐々木 仁：動的繰返し圧縮荷重を受ける高強度コンクリートの力学的性質に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.57-58，2007
- 5) 長谷川 弘明，森 恭平，市岡 有香子，坂下 雅信，河野 進，渡邊 史夫：100MPa を超える高強度コンクリートの低サイクル疲労に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.201-202，2008
- 6) 高森 直樹，林 和也，佐藤 幸博，佐々木 仁，寺岡 勝：ひび割れ対策を施した超高強度コンクリートを用いたRC柱・梁接合部架構の実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.629-630，2007
- 7) 片寄 哲務，高森 直樹，西田 浩和，寺岡 勝：高強度コンクリートの若材齢時における力学特性と自己収縮挙動，高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会 報告書・論文集，日本コンクリート工学協会，pp.416-425，2006
- 8) 黒岩 秀介，渡邊 悟士，陣内 浩，並木 哲：150N/mm² 級コンクリートの自己収縮と拘束応力について，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.389-390，2005
- 9) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.37-38，2008.3
- 10) 遠藤 芳雄，熊谷 仁志，塚越 英夫，三橋 博巳：超高強度鉄筋コンクリート構造 (Fc=120N/mm²) の開発 (その 8 中心圧縮実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.453-454，2002