論文 低強度コンクリートを用いた RC 柱の中心圧縮性状

八十島 章^{*1}·谷口博亮^{*2}·伊東康貴^{*2}·荒木秀夫^{*3}

要旨:コンクリート圧縮強度が設計基準強度を下回る低強度コンクリート建物の耐震限界性能を評価することを目的として、コンクリート強度、横補強筋比、主筋の有無、載荷方法、エポキシ樹脂注入による補修の 有無を実験因子とし、低強度コンクリートを用いた RC 柱の中心圧縮実験を行った。実験の結果から、コン クリート強度による応力--ひずみ関係の違い、低強度コンクリートに対する横補強筋の拘束効果、補修によ る強度上昇効果を把握した。また、横補強筋による拘束効果を考慮した Popovics 式を用いて、拘束された低 強度コンクリートの応力--ひずみ関係をモデル化した。

キーワード:低強度コンクリート,中心圧縮,拘束効果,補修, Popovics 式

1. はじめに

耐震診断基準¹⁾では、コンクリート圧縮強度の適用下 限値を 13.5N/mm²とし、それ以下の低強度コンクリート の場合は基本的に耐震診断および改修の対象外として いる。しかし、既存 RC 造建物のコンクリート強度が設 計基準強度を下回り、10N/mm²程度の低強度である建物 が多く存在することは確認されており²⁾、診断基準の適 用範囲外の場合においても現行の評価式を適宜外挿し て耐力評価および靱性能評価を行い、診断や改修を実施 していることがある。そのため、耐震診断や耐震補強を 実施する以前に、低強度コンクリートである構造部材、 特に柱部材の構造性能を把握し、定量的に評価すること が急務であり、基礎的資料の蓄積は不可欠である³⁾。

本研究では、低強度コンクリート建物の構造安全限界 を適切に評価することを目的とし、低強度コンクリート を用いた RC 柱部材の中心圧縮実験を実施し、コアコン クリートの力学的性質、横補強筋による拘束効果、応力 とひずみの関係を検討した。また、ある程度損傷した後 エポキシ樹脂で補修したコアコンクリートの補修効果 についても検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状および配筋を図-1 に,試験体一覧を表 -1に示す。試験体の断面は 185×185mm,高さ 550mm とし、上下 125mm 区間は横補強筋を多量に配筋し、中 央の 300mm を試験区間としている。全ての試験体にお いて、柱断面内のコアコンクリートの応力-ひずみ関係 を得るために、かぶりコンクリートを除いた。実験因子 は、コンクリート強度(目標圧縮強度 10MPa, 30MPa)、 横補強筋比(*p*_w=0.00, 0.30, 0.60, 0.90%),主筋の有無, 載荷方法(単調、一方向繰返し)、エポキシ樹脂による 補修の有無とし、試験体数は計 18 体である。なお、横 補強筋比は、かぶりコンクリートを有する柱断面 220× 220mm に換算して設定した。横補強筋は拘束効果の検討 のため SD295 の異形鉄筋 D6 を全試験体共通で使用し、 主筋は既存建物を想定して SR295 の丸鋼¢13 を用い、主 筋のない試験体は細径の丸鋼¢3 で横補強筋を配筋した。

また,エポキシ樹脂により補修する試験体は,竣工後 に長い年月を経てやや大きな地震を受けたことを想定 し,拘束されていないコンクリートにひび割れが発生す



*3 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 准教授 工博(正会員)

	断面	コンクリ	主筋		横補強筋		補修	載荷
試験体名*1	$b \times D$ (mm)	ート強度 (MPa)	配筋 (鉄筋比)	強度	配筋	横補強筋 比 ^{*2} (%)	の有無	
LN00-NM		10	_	_	_	0.00		単調
LN30-NM					2-D6@96	0.30		
LN60-NM					2-D6@48	0.60		
LN90-NM					2-D6@32	0.90		
HN30-NM					2-D6@96	0.30		
HN60-NM		30			2-D6@48	0.60	無	
HN90-NM					2-D6@32	0.90		
LN30-NC		10			2-D6@96	0.30		编译]
LN90-NC	195 \(\col_195	10			2-D6@32	0.90		飛返し
LR60-NM	185×185	10 4- <i>ø</i> 13	SD 205	2 D(@49	0.60		民調	
HR60-NM		30	$(p_g = 1.05\%)$	SR295	2-D6@48	0.00		半神
LN30-RMa					2 D(@06	0.20		
LN30-RMb					2-D0@90	0.30		
LN60-RM		10	—	—	2-D6@48	0.60		
LN90-RMa					2 D(@22	0.00	有	単調
LN90-RMb					2-D6@32	0.90		
LR60-RM		10	4- <i>ø</i> 13	SD 205	2 DG@49	0.60		
HR60-RM		30	$(p_g = 1.05\%)$	SK293	2-D0@48	0.00		

表-1 試験体一覧

*1:試験体名は、コンクリート強度(L,H)、主筋の有無(R,N)、横補強筋比、補修の有無(R,N)、載荷方法(M,C)の順 *2: 柱断面 220×220mm に対する横補強筋比

表-2 調合計画

₩7%跆座	水セメン		単	位量(kg/m ²	細骨材率	空気量	スランプ		
呼い強度	ト比 (%)	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	(%)	(%)	(cm)
$F_c 10$	140	154	215	941	881	2.31	53.0	4.5	18.0
$F_{c}30$	52	356	185	849	900	4.45	48.9	4.5	18.0

る程度の圧縮力として,目標圧縮強度に断面積を乗じた 軸力(呼び強度10MPaの試験体は軸応力9MPaの300kN, 呼び強度30MPaの試験体は軸応力29MPaの1000kN)で 5 回繰返し載荷して損傷を与えた後,エポキシ樹脂を注 入することにより補修した。なお,横補強筋比0.3%の LN30-RM と0.9%のLN90-RMの実験は,2体ずつ行った ため,試験体名の末尾にaとbを付加して区別した。

2.2 使用材料

使用したコンクリートの調合計画を表-2 に示す。目 標圧縮強度 10MPa の調合は、JASS5 の水セメント比算定 式⁴⁾を外挿させて水セメント比 140%とし、混和剤により 打設時の材料分離を抑制している。コンクリートの材料 試験結果を表-3 に、鉄筋の引張試験結果を表-4 に示 す。なお、コンクリートの養生条件は現場封緘養生とし、 材料強度は試験体加力の前後に行った各々3 体ずつの 100 ϕ ×200mm シリンダーによる材料試験結果の平均値 とした。また,補修で使用したエポキシ樹脂の材料強度 は圧縮強度 88MPa,曲げ強度 59MPa,ヤング係数 2GPa である。

表-3 コンクリートの材料試験結果

設計 強度 (MPa)	養生 条件	圧縮 強度 (MPa)	割裂 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	
10	封緘	9.1	1.2	18.7	
30	封緘	28.0	2.9	27.3	

表-4 鉄筋の引張試験結果

AH- 65	降伏	弾性	降伏	破断				
<u></u>	強度	係数	ひずみ	伸び				
俚积	(MPa)	(GPa)	(μ)	(%)				
D6	410*	184	2231	15.4				
<i>ø</i> 13	321	196	1640	26.6				
a second a second for								

*:0.2%オフセット耐力

2.3 補修方法

設定圧縮力で損傷させた試験体に下地処理を施し、図 -1に示す樹脂注入位置に直径 7mm,深さ 50mm の穿孔 を行う。その後、スプリング方式の注入加圧器具を取り 付け、エポキシ樹脂(使用量 1.0kg)を 0.06N/mm²で加 圧注入し、72時間養生し硬化させて補修完了とした。

2.4 加力·計測方法

加力方法は 5MN 圧縮試験機を用い,単調および一方 向繰返し載荷とした。繰返し載荷は,最大まで 100kN ず つで,最大以降は 50kN ずつで載荷・除荷を 1 回繰返す ことを目標とした。計測項目は,軸圧縮力,図-1 に示 す4面に設置した試験区間の軸方向変位,主筋のひずみ 値である。軸方向変位の計測区間は,降伏機構における 柱せい程度の降伏ヒンジの形成を想定して試験区間と 同一の 300mm とし,各試験体の比較検討を行うために 全試験体共通とした。なお,試験区間の軸方向変位を計 測区間で除した平均ひずみを軸ひずみとして定義した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

代表的な最終破壊状況を図-2 に示す。主筋のない試 験体は、軸ひずみが 0.3%前後で縦方向の微細なひび割れ が生じた後に隅角部のコンクリートが圧壊し、その後最 大荷重に達するとほぼ同時に多数のひび割れが発生し た。軸ひずみが進行するに伴い表面のコンクリートが剥 落し内部コンクリートが膨らみ拘束が失われることで 最終破壊に至った。横補強筋比が 0.3%の試験体では横補 強筋の間のコンクリートにおいて圧壊が集中し激しい 損傷と剥落で破壊に至ったが,横補強筋比が 0.9%の試験 体では損傷がある領域に集中せず試験区間全体となっ ていた。主筋のある試験体は,最大荷重までは主筋のな い試験体とほぼ同様な破壊経過であったが,最大荷重以 降において主筋の座屈が発生すると共に隅角部と表面 コンクリートの剥落が生じ荷重低下を起こして最終破 壊に至った。また,破壊経過はコンクリート強度,補修 の有無,載荷方法による違いはほとんど見られなかった。



図-2 最終破壊状況

3.2 応力-ひずみ関係

全試験体の軸応力-軸ひずみ関係を図-3 に,実験結 果一覧を表-5 に示す。図中には主筋の降伏時を○で, 補修時を●で示し,シリンダーによる材料試験結果の応 カーひずみ関係も示した。なお,主筋のある試験体は, 主筋の応力-ひずみ関係を完全弾塑性として全体荷重



公 / 入水和木 兄								
試験体名	基準化 横拘束応力 <i>p_wσ_{wy}/σ_B</i>	最大荷重 P _{max} (kN)	最大応力 <i>o_{cm}</i> (MPa)	最大応力時 ひずみ <i>Ecm</i> (<i>µ</i>)	1/3 割線 弾性係数 (GPa)	最大の 80%時 ひずみ (µ)	補修前の 残留ひず み (µ)	Popovics 式の曲線 形状係数 n
LN00-NM	0.00	253	7.1	4103	12.0	11139		1.95
LN30-NM	0.14	342	9.6	10377	14.3	30902		1.63
LN60-NM	0.27	391	10.9	20280	11.1	57978		1.41
LN90-NM	0.41	488	13.3	32177	10.0	104446		1.31
HN30-NM	0.04	937	26.2	3437	20.7	7595		1.77
HN60-NM	0.09	1057	29.0	4777	19.7	11402	_	1.60
HN90-NM	0.13	1162	31.4	6103	18.5	16391		1.49
LN30-NC	0.14	300	8.4	8227	10.0	26723		
LN90-NC	0.41	510	14.1	40263	7.2	87377		
LR60-NM	0.27	574	11.4	23950	13.2	36281		
HR60-NM	0.09	1180	28.3	5747	19.1	13381		
LN30-RMa	0.14	377	10.4	7997	14.0	23511	2433	
LN30-RMb	0.14	408	11.5	22967	9.4	34220	16895	—
LN60-RM	0.27	445	12.3	16063	10.1	53483	2740	
LN90-RMa	0.41	565	15.6	47607	7.5	130047	3122	
LN90-RMb	0.41	566	15.7	33183	13.2	108816	3007	
LR60-RM	0.27	609	12.4	21810	11.6	50643	1817	
HR60-RM	0.09	1247	30.1	5860	17.5	12823	1795	

表-5 実験結果一覧

から主筋負担分を除いた。いずれのコンクリート強度に おいても、横補強筋比の増加に伴い、最大応力および最 大応力時のひずみが増大していることが確認できる。弾 性係数は,横補強筋比が増加すると若干低下しているが, 密な配筋における打設の影響や材料のばらつきが関係 していると考えられる。低強度コンクリートの試験体は, 横補強筋のない試験体で曲線形状が材料試験結果と同 様の傾向を示し、最大応力以降の応力低下が横補強筋比 の増加に伴って緩やかになっており、横補強筋比 0.9%の LN90-NM は軸ひずみ 7%程度まで最大応力を保持してい る。一方, 普通強度コンクリートの試験体は, 横補強筋 比が増大しても軸ひずみ 5%程度までの応力低下勾配が ほとんど変わっていない。そのため、低強度と普通強度 では最大応力以降において拘束効果が異なると考えら れ,低強度コンクリートは最大応力付近から横方向に大 きくはらみだして破壊領域を拡大させるため拘束効果 が発揮されやすいと思われる。また、主筋のある試験体 は、軸ひずみ4%程度まで主筋のない試験体と同等の結 果であるが、それ以降は主筋座屈のために主筋のない試 験体よりも応力が小さくなっている。一方向繰返し載荷 のLN30-NC およびLN90-NC は、単調載荷の試験体とほ ぼ同じであり、繰返しによる負担圧縮応力低下の影響は ほとんど見られない。さらに、補修した試験体は、無補 修の試験体よりも圧縮強度が若干上昇していることが

確認できる。LN30-RMb は補修前の5回繰返し加力にお いて,圧壊により軸ひずみが2%まで進行し荷重低下し たが,補修後は補修前および無補修の試験体より強度上 昇している。

3.3 拘束効果

無補修で単調載荷の試験体について,最大応力と横拘 束応力の関係を図-4 に,最大応力時のひずみと横拘束 応力の関係を図-5 に示す。最大応力は,横拘束応力の 増大に伴って大きくなっており,その増加率はコンクリ ート強度によらずほぼ同じ傾向を示している。一方,最 大応力時のひずみは,コンクリート強度によって増加傾 向が異なり,低強度コンクリートは普通強度コンクリー トに比べて横拘束応力の増大によるひずみ増加率が大 きくなっている。





3.4 補修効果

補修の有無による最大応力の比較を図-6 に示す。エ ポキシ樹脂で補修した試験体は、コンクリート強度およ び横補強筋比の違いによる影響はほとんどなく、いずれ の試験体も圧縮強度で 10%ほど強度上昇した。ただし、 最大応力以降の圧縮軟化領域については、図-3 に示さ れるように補修の有無で明確な差は見られず、エポキシ 樹脂補修による拘束効果は期待できないことが確認で きる。



4. 応カーひずみ関係のモデル化

低強度コンクリートは横補強筋の拘束効果により軸 ひずみが大きく増大し、応力-ひずみ曲線も普通強度の 場合と異なるため、図-3 に示されるように普通強度コ

無補修で単調載荷の試験体について、シリンダーの圧 縮強度で基準化した最大軸応力と横拘束応力の関係を 図-7 に、シリンダーの強度時ひずみで基準化した最大 応力時ひずみと横拘束応力の関係を図-8 に示す。また、 実験で得られた最大値で基準化した曲線から回帰計算 によって求めた、表-5 に示される曲線形状を表す値 n と横拘束応力の関係を図-9 に示す。

最大応力および最大応力時のひずみをシリンダーの 材料強度の上昇量として評価し、横補強筋の拘束効果を 最小二乗法により回帰計算した結果、同図中の式(2) および式(3)を得た。なお、横拘束効果のないかぶり コンクリートの圧縮強度は、一般的に使用されるシリン ダー圧縮強度の0.85倍とした。また、シリンダーの圧縮 強度時のひずみ*ε*。は、文献8)および文献9)の提案に基 づき、本材料試験結果との対応がよいことから式(5) ~(7)で表現することとした。

Popovics 式の曲線形状係数nは、横補強筋量が増大す るほど低下し、コンクリート強度の増加により若干大き くなっている。そのため、低強度コンクリートで横補強 筋量が多い場合では、曲線形状を表す値nが1に近似し、 曲線の形状が剛塑性に近づくことになる。ただし、式(1) が成立するためには曲線形状を表す値nは常に1以上で あることが必要なため、横補強筋量の増加に伴いn = 1に近似するように回帰分析を行うこととした。最小二乗 法による回帰計算から図-9に示す結果を得た。



以上の検討によるモデルと実験結果の比較を図-10 に示す。モデルは圧縮軟化域まで実験結果を概ね表現で きている。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cm}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cm}} \cdot \frac{n}{n - 1 + (\varepsilon/\varepsilon_{cm})^n} \tag{1}$$

$$\sigma_{cm} = 0.85 \cdot \sigma_B + 1.50 \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \tag{2}$$

$$\varepsilon_{cm} = \varepsilon_o \cdot \left(1 + 27.8 \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} / \sigma_B \right) \tag{3}$$

$$n = 1 + 0.88 \cdot \exp\left(-3.07 \cdot p_w \cdot \sigma_{wv} / \sigma_B\right) \tag{4}$$

$$\varepsilon_o = \frac{\sigma_B}{E_c \cdot (1 - 1/n_o)} \tag{5}$$

 $E_c = 33.5 \times 10^3 \cdot (\gamma/24)^2 \cdot (\sigma_B/60)^{1/3}$ (6)

$$n_o = \exp(0.0256 \cdot \sigma_B) \tag{7}$$

ここで,

$$\sigma, \varepsilon$$
:拘束コンクリートの応力,ひずみ

$$\sigma_{cm}$$
: 拘束コングリートの圧縮強度

- ε_{cm} :拘束コンクリートの圧縮強度時のひずみ
- σ_B :シリンダーの圧縮強度 (MPa)
- ε_o :シリンダーの圧縮強度時のひずみ
- *p*_w : 横補強筋比
- σ_{wv} :横補強筋の降伏強度(MPa)
- E_c :シリンダーのヤング係数
- γ : コンクリートの単位体積重量 (kN/m³)
- n。:シリンダーの応力-ひずみ曲線を表す値⁹⁾



図-10 実験結果とモデルの比較

5. まとめ

低強度コンクリート建物の構造性能を評価すること を目的とし、低強度コンクリートを用いた RC 柱部材の 中心圧縮実験を行い、拘束されたコンクリートの力学的 性質および横補強筋による拘束効果について、コンクリ ート強度、横補強筋量、載荷方法による違いを把握した。 また、損傷させた後にエポキシ樹脂注入による補修を行 い、補修効果を確認した。さらに、横補強筋の拘束効果 を定量化し、低強度コンクリートから普通強度コンクリ ートまで対応した拘束コンクリートの応力-ひずみ関 係を Popovics 式を用いてモデル化した。モデルは実験結 果を概ね表現できることを示した。

謝辞

本実験の試験体の補修にあたって, SG エンジニアリ ング(株)の協力を得た。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 日本建築防災協会:2001 年改訂版 既存鉄筋コンク リート造建築物の耐震診断基準,耐震改修設計指 針・同解説,2001
- 5) 坂巻健太,広沢雅也ほか:既存鉄筋コンクリート造 建築物のコンクリート強度に関する研究,日本建築 学会大会学術講演梗概集,C-2 構造W,pp.801-804, 2001.9
- 伊藤嘉則, 槇谷榮次, 沢崎詠二:種々の方法で耐震 補強された低強度コンクリート RC 柱の補強効果に 関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.613, pp.97~104, 2007.3
- 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(2003), 2003.2
- 加藤大介:角形補強筋で拘束されたコンクリート柱の軸方向応力度-歪度関係に関する研究,日本建築学会構造系論文集,No.422, pp.65~74, 1991.4
- 6) 崎野健治,孫玉平:直線型補強材により拘束された コンクリートの応力-ひずみ関係,日本建築学会構 造系論文集,No.461,pp.95~104,1994.7
- S.Popovics : A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 村上聖:鉄筋コンクリート梁の終局せん断強度算定 式に関する一考察,日本建築学会構造系論文集, No.533, pp.143-150, 2000.7
- 9) 八十島 章,谷口博亮,荒木秀夫:低強度コンクリートを用いた RC 部材の耐震性能,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.931~936, 2007.7