

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/mm^2 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/mm^2 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 $185 \times 185\text{mm}$ 、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 $220 \times 220\text{mm}$ 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 $\phi 13$ を用い、主筋のない試験体は細径の丸鋼 $\phi 3$ 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

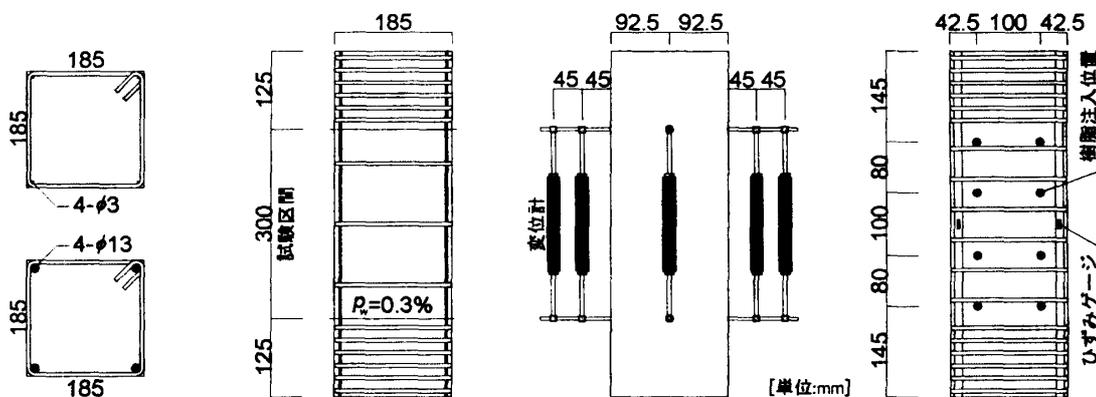


図-1 試験体形状、変位計位置、樹脂注入位置

*1 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 助教 博士（工学）（正会員）

*2 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 大学院生（正会員）

*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）

表-1 試験体一覧

試験体名 ^{*1}	断面 $b \times D$ (mm)	コンクリート強度 (MPa)	主筋		横補強筋		補修の有無	載荷方法		
			配筋 (鉄筋比)	強度	配筋	横補強筋比 ^{*2} (%)				
LN00-NM	185 × 185	10	-	-	-	0.00	無	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					2-D6@48	0.60				
HN90-NM		2-D6@32	0.90							
LN30-NC		10	-	-	2-D6@96	0.30	無	繰返し		
LN90-NC					2-D6@32	0.90				
LR60-NM		10	4-φ13 ($p_g=1.05\%$)	SR295	2-D6@48	0.60	無	単調		
HR60-NM		30								
LN30-RMa		10	-	-	2-D6@96	0.30	有	単調		
LN30-RMb					2-D6@48	0.60				
LN60-RM									2-D6@32	0.90
LN90-RMa										
LN90-RMb										
LR60-RM	10				4-φ13 ($p_g=1.05\%$)	SR295			2-D6@48	0.60
HR60-RM	30									

*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

呼び強度	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					細骨材率 (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤			
F_c10	140	154	215	941	881	2.31	53.0	4.5	18.0
F_c30	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 100φ×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

鉄筋種類	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏ひずみ (μ)	破断伸び (%)
D6	410*	184	2231	15.4
φ13	321	196	1640	26.6

*: 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载荷とした。繰返し载荷は、最大まで100kNずつで、最大以降は50kNずつで载荷・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、载荷方法による違いはほとんど見られなかった。

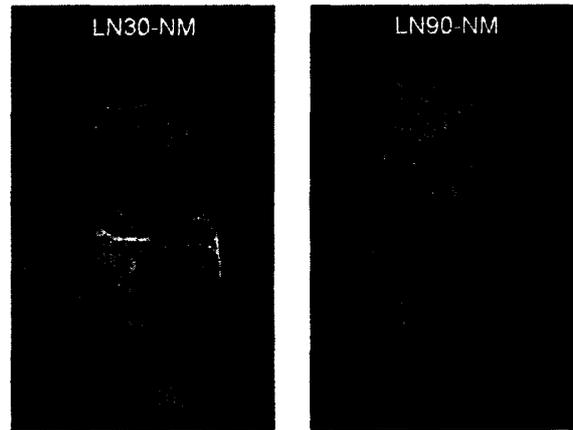


図-2 最終破壊状況

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力-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

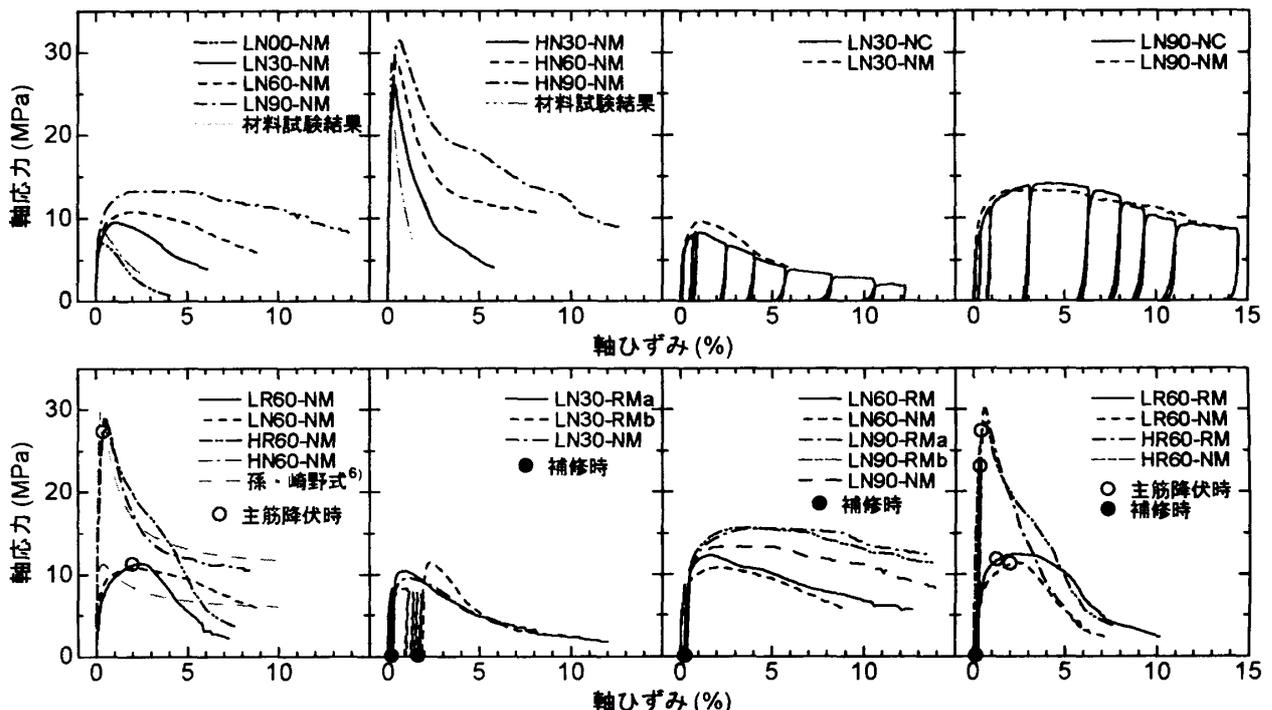


図-3 応力-ひずみ関係

表-5 実験結果一覧

試験体名	基準化 横拘束応力 $p_w \sigma_{wy} / \sigma_B$	最大荷重 P_{max} (kN)	最大応力 σ_{cm} (MPa)	最大応力時 ひずみ ϵ_{cm} (μ)	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	

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。一方向繰返し载荷の LN30-NC および LN90-NC は、単調载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

無補修で単調载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。

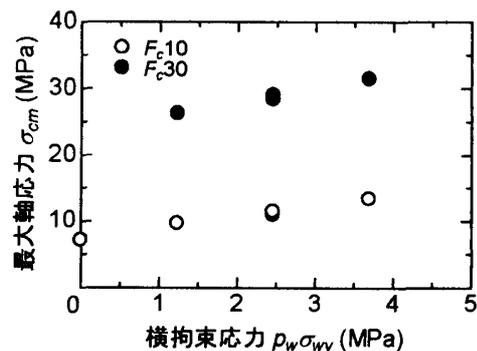


図-4 最大応力と横拘束応力の関係

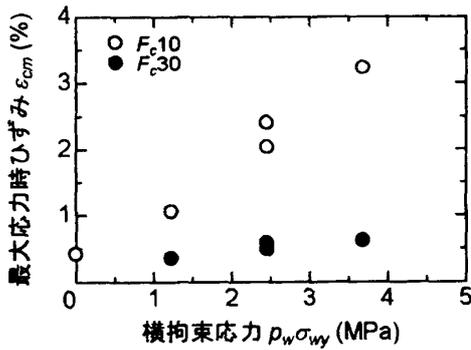


図-5 最大応力時のひずみと横拘束応力の関係

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。

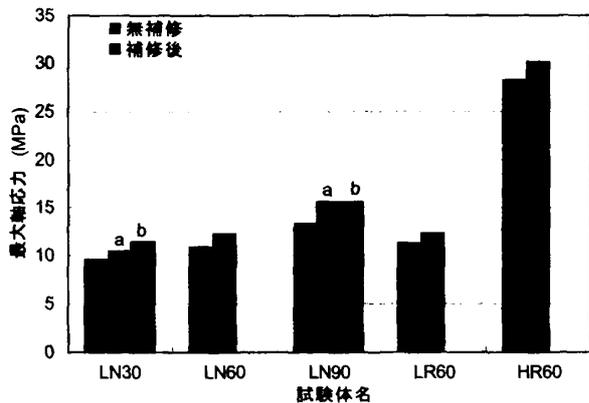


図-6 補修の有無による最大応力の比較

4. 応力-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

ンクリートに対して提案されているモデル^{例えば5,6)}では精度よく表現できない。そこで、簡易な形式で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できる拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係をモデル化する。モデルは、応力上昇域と下降域を連続的に表現でき簡易な式である Popovics 式⁷⁾を用いる。Popovics 式は、式 (1) で表されるもので、最大応力、最大応力時のひずみ、曲線形状を決定する値 n で決定されるため、各々において横補強筋の拘束効果を取り入れることとした。なお、曲線形状は、主筋の座屈や載荷履歴の影響を受けず、横補強筋のみで拘束され、単調載荷の応力-ひずみ関係を対象とした。

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_0 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のため、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。

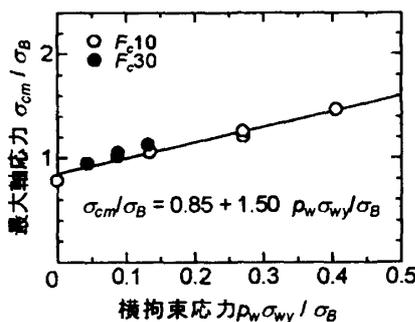


図-7 基準化した最大応力と横拘束応力の関係

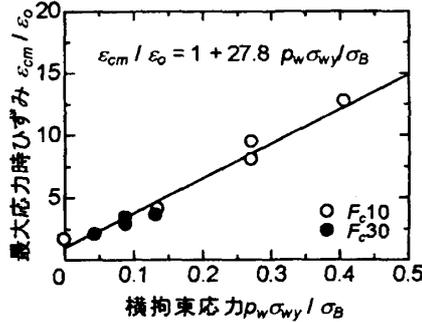


図-8 基準化した最大応力時ひずみと横拘束応力の関係

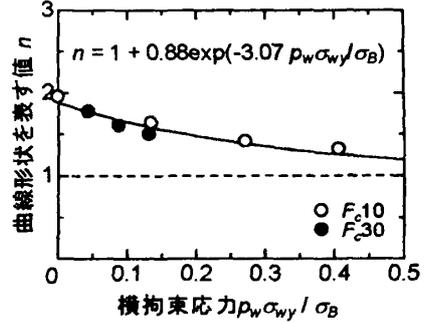


図-9 曲線形状を表す値 n と横拘束応力の関係

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。

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

$$\sigma_{cm} = 0.85 \cdot \sigma_B + 1.50 \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \quad (2)$$

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

$$n = 1 + 0.88 \cdot \exp(-3.07 \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} / \sigma_B) \quad (4)$$

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

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

$$n_o = \exp(0.0256 \cdot \sigma_B) \quad (7)$$

ここで、

- σ, ε : 拘束コンクリートの応力, ひずみ
- σ_{cm} : 拘束コンクリートの圧縮強度
- 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_{wy} : 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_o : シリンダーの応力-ひずみ曲線を表す値⁹⁾

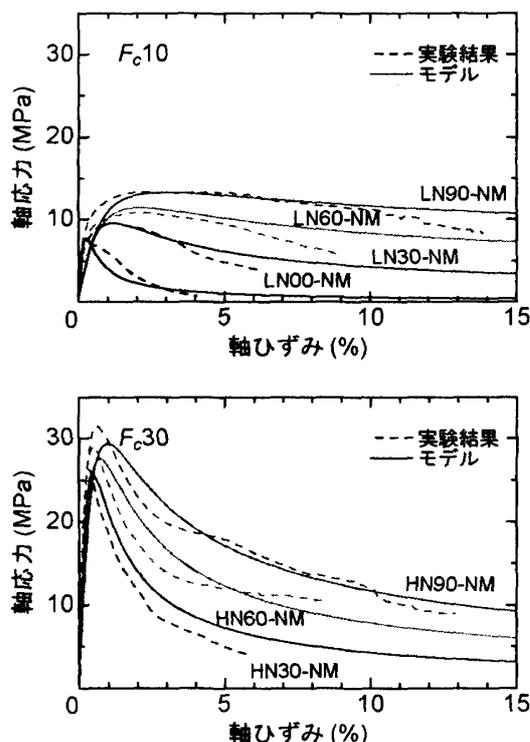


図-10 実験結果とモデルの比較

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

- 1) 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
- 2) 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IV，pp.801-804，2001.9
- 3) 伊藤嘉則，楨谷榮次，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
- 4) 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
- 5) 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
- 7) S.Popovics：A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 8) 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