

地震動により曲げ圧縮を受けるRC橋脚の 内部性状に関する解析的検討

亀田好洋¹・鈴木森晶²・水野英二³

¹ 学生会員 修（工） 岡崎市役所土木建設部・名工大大学院（〒444-8601 岡崎市十王町2丁目9番地）

² 正会員 博（工） 愛知工業大学准教授 工学部都市環境学科土木工学専攻
（〒470-0392 豊田市八草町八千草1247番地）

³ 正会員 Ph.D. 中部大学教授 工学部都市建設工学科（〒487-8501 春日井市松本町1200番地）

1. はじめに

1995（平成7）年に発生した兵庫県南部地震（マグニチュード7.3）における阪神高速3号線での鉄筋コンクリート（RC）橋脚が倒壊した光景は記憶に新しい。震災後に行われた被害分析から、RC橋脚が倒壊した要因として、1）内部コンクリートへの横拘束筋の定着長さが不足していたこと、および2）横拘束筋量が圧倒的に不足していたこと、などにより、内部コンクリートへの横拘束筋による拘束効果が十分に発揮できなかったことが指摘されている¹⁾。

当該地震による構造物の被災を受けて、マグニチュード7クラスの地震動にも耐えうる構造物を構築すべく、塑性化を考慮した設計を行うための道路橋示方書（以下、道橋示）の改訂が平成8年に行われた。その1つとして、地震時保有水平耐力法による性能照査において、部材の塑性変形領域での「横拘束筋による拘束効果を見込んだコンクリート構成モデル」が新たに採用された^{2), 3)}。

道橋示に採用されている、横拘束筋による拘束効果を見込んだコンクリートの構成モデル（以下、道路橋モデル）は、異なる横拘束性状（横拘束筋の径、間隔および定着方法）に加え、断面形状、柱高さおよびコンクリートの一軸圧縮強度を変化させたRC柱供試体に対する一軸圧縮載荷実験結果を基として、解析的手法により、横拘束されたコンクリートの構成関係を定式化している。

しかし一方で、道路橋モデルの汎用性について、十分な検証が行われておらず、また、当該モデルを使用する上での注意点が道橋示に明記されていない。例えば、1）道橋示の水平耐力照査はファイバーモデルを用いることになっているが、解析上、コンクリートの軟化勾配に影響を与える要素分割は、分割数の目安についての記述はあるものの、1要素の長さに対して言及されていないこと、2）一般に、曲げを受けるRC柱部材の面内の応力分布は、単純圧

縮のそれと比較して大きく異なっているのに対し⁴⁾、道橋示では境界条件の違いによる影響について言及していないこと、などが挙げられる。それゆえ、道路橋モデルを用いた解析によって求められる解により、実際のRC橋脚の耐震性能を精度良く評価できるかについて検証する必要がある。

本研究では、まず、有限要素解析プログラムFEAP⁵⁾を用いて、RC柱に対する一定軸力下でのプッシュオーバー解析を行う。ここでは、道橋示で規定されるコンクリート構成モデルを含めた、各種構成モデルを組み合わせた解析結果と筆者らが行ったRC柱供試体に対する繰返し載荷実験結果⁶⁾とを比較・考察することにより、「水平耐力照査に用いる構成モデルの適応性」について論ずる。さらに、星隈らが行った実大RC橋脚への繰返し載荷実験結果⁷⁾に対する解析を実施し、断面寸法の違いが解析結果に与える影響についても検討する。

2. 解析手法の概要

本研究においては、解析手法として有限要素解析プログラムFEAP⁵⁾を採用した。本解析手法は、以下に述べる仮定を採り入れたファイバーモデルに基づいており、当該プログラムのエレメントサブルーチンに材料構成モデルとともに組み込まれている。

- 1) Bernoulli-Eulerのはりの理論が成り立つ。
- 2) 応力は軸応力のみが断面に作用する。
- 3) 局部座屈は考慮しない。
- 4) 有限要素解析にて、はりの変形はHermitian 三次形状関数を用いて表現した。
- 5) Greenのひずみを導入した近似更新ラグランジアン法を用いて仮想仕事の原理により定式化した。

3. 材料構成モデル

3.1 鋼材の構成モデル

本解析では、軸方向筋（鋼材）要素に対して、鉄

筋の引張試験から求めた「ひずみ硬化型」の応力-ひずみ関係に加え、道橋示に基づき、降伏後、応力が一定となる「弾完全塑性型」の応力-ひずみ関係を採用した（図-1 参照）。

3.2 コンクリートの構成モデル

(1) 道路橋モデル

RC 柱の横拘束効果に関する研究として、Kent-Park⁸⁾ および Mander⁹⁾ らによる知見が知られている。しかし、供試体の配筋状況が我が国の土木構造物の現況と異なっていること、また、同じであったとしても、実験における载荷条件が複雑であること、などを理由として、星隈らが RC 柱に対する単純圧縮実験結果を基として構築したものが、ここで示す「道路橋モデル（図-2 参照）」である¹⁰⁾。以下に、各応力状態での詳細を示す。

硬化域：コンクリートのポアソン変形に対する横拘束筋による受動拘束圧により、コンクリートの最大圧縮応力（以下、ピーク応力） σ_{cc} とともに、そのひずみ（以下、ピークひずみ） ε_{cc} が増加するものと考え、次式（1）～（3）により定式化している。

・硬化域の関係式

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} \quad (1)$$

・最大圧縮応力 σ_{cc}

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha\rho_s\sigma_{sy} \quad (2)$$

・ピークひずみ ε_{cc}

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s\sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \quad (3)$$

ここで、 E_c ：コンクリートのヤング係数 [kN/mm²]， n ：別式で求められる定数， σ_{ck} ：コンクリートの設計基準強度 [N/mm²]， α ， β ：断面補正係数， ρ_s ：体積横拘束筋比 [%]， σ_{sy} ：横拘束筋の降伏強度 [N/mm²] である。

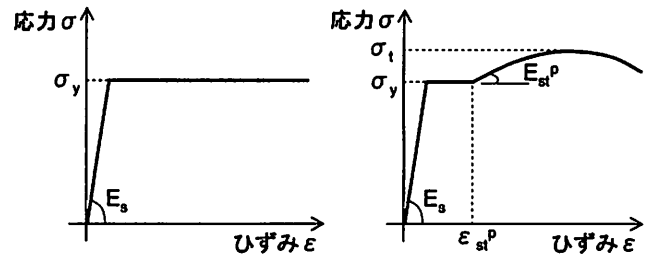
軟化域：道路橋モデルでは、最大圧縮応力 σ_{cc} 以降、その 8 割、すなわち $0.8\sigma_{cc}$ で解析が終了するようになっているが、その間も十分な横拘束効果により、靱性に富んだ変形を生ずるものと考え、終局ひずみ ε_{cu} および応力の下降勾配 E_{des} を式（4）～（6）により定式化している。

・軟化域の関係式

$$\sigma_c = \sigma_{cc} - E_{des}(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (4)$$

・応力の下降勾配 E_{des}

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s\sigma_{sy}} \quad (5)$$



(a) 弾完全塑性型

(b) ひずみ硬化型

図-1 解析に適用した鋼材の応力-ひずみ関係

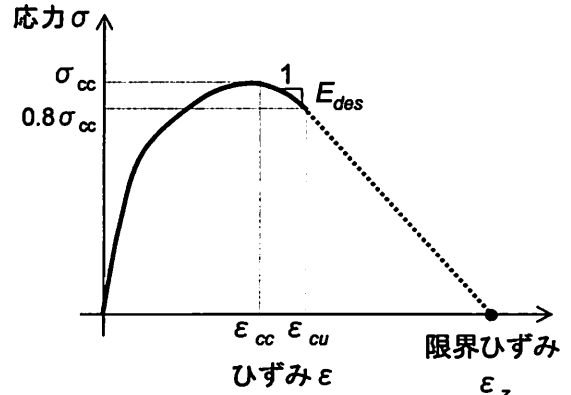


図-2 水平耐力照査に用いる応力-ひずみ関係（コンクリート、道路橋モデル）

・終局ひずみ ε_{cu}

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.2\sigma_{cc}}{E_{des}} \quad (6)$$

なお、道路橋モデルの適用範囲は、体積横拘束筋比 $\rho_a = 1.8\%$ 以下、コンクリート強度 $f_{ck} = 40$ MPa 以下とされている。しかし本研究では、モデルの適用限界について把握することを目的として、コンクリート強度 $f_{ck} = 60$ MPa を有する RC 柱の解析にも本モデルを適用したことを付記する。

(2) ひずみ軟化型構成モデル

道路橋モデルを用いた解析結果と比較・検討するため、水野らが既往の研究¹¹⁾で多く用いてきている「ひずみ軟化型モデル（図-3 参照）」についても採り挙げることにした。

ここでは、筆者らがこれまでに実施してきた RC 柱およびコンクリート充填鋼管長柱に対する解析から得た、「一定荷重下で横方向力により曲げ変形するような RC 柱では断面内にひずみ勾配が生じるため、载荷初期の段階から拘束効果による圧縮強度などの増加は見られない」という知見¹²⁾を基として、コンクリートは非拘束供試体と同等の一軸圧縮強度まで硬化し、その後、或る程度の拘束効果を受けて軟化挙動を示すものと仮定した。以下にその詳細を示す。

硬化域：硬化域の応力 σ - ひずみ ε 関係式を式（7）のように定義した。

$$\sigma = f'_c \left\{ 2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^p_{c0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^p_{c0}} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

ここで、 f_c : ピーク応力 $[\text{N/mm}^2]$, ε_{c0} : ピークひずみである。

軟化域：横拘束筋による拘束を受ける内部コンクリートの軟化域での応力-ひずみ関係は、拘束を受けないコンクリートのそれと比較して、靱性能に富むことは知られている。それゆえ水野らは、文献¹³⁾において繰り返し曲げを受ける RC 柱部材の逆解析を行い、RC 部材の力学的挙動をポストピーク領域まで精度良く再現可能で、かつ要素長さ依存性を排除した、応力ゼロ時でのひずみを「最適限界ひずみ ε_f (図-3 参照)」とし、式 (8) により同定した。

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{c0}^p \left[\alpha (\rho_a m)^\beta + 1 \right] \cdot \left(\frac{\gamma}{l_{elm}^2} + \frac{\delta}{l_{elm}} + \lambda \right) \quad (8)$$

ここで、 ρ_a : 面積鉄筋比 [%], m : 強度比 (σ_{sy}/f'_c), l_{elm} : 一要素長, $\alpha = -1.071 \times 10^{-3}$, $\beta = 1.030 \times 10^{-1}$, $\gamma = -54.22$ [cm²], $\sigma = 23.18$ [cm], $\lambda = 7.675 \times 10^{-2}$ である。

なお、設計およびコンサルタントの現場での数値解析における性能照査をより簡便なものとすることを目的に、本解析では、1) いずれの構成モデルを用いた場合でも、引張側のコンクリート強度はゼロとして扱ったこと、また2) 横拘束筋内部のコンクリートとかぶりコンクリートには同一の構成関係を用いたこと、を付記する。

4. 供試体および解析モデル

本研究では、前述した通り、筆者らが文献 6) で得た RC 柱供試体への繰返し載荷実験結果と、星隈らが文献 7) で得た RC 橋脚への繰返し載荷実験結果との 2 実験結果に対する解析を行う。以下にそれぞれの供試体の概要を示す。

4.1 RC 柱供試体の実験概要⁶⁾

一例として、実験で用いられた RC 柱供試体（横拘束筋間隔 $s = 90 \text{ mm}$ ）の配筋図を図-4 に示す。実験では、断面 $200 \times 200 \text{ mm}$ 、柱有効高さ 1000 mm 、せん断スパン比 5 を有する RC 柱供試体を用いた。供試体は曲げ破壊先行型となるように、軸方向筋には D10 (SD295A) を 8 本、横拘束筋には D6 (SD295A) を柱基部 2D 区間 (D: 柱幅) において間隔 $s = 35, 50, 65, 90, 105, 120$ および 150 mm でそれぞれ配筋した。打設コンクリートには、設計基準強度 $f_{ck} = 20, 40$ および 60 MPa を有する普通コンクリートを用いた。

載荷は、仮想上部工重量として、累加軸耐力 5 %
 相当の軸力を鉛直油圧ジャッキにより作用させた後、

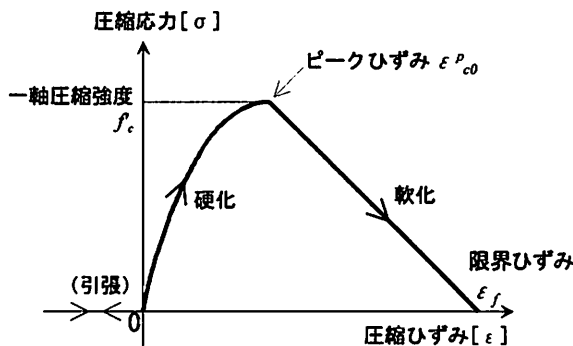


図-3 ひずみ軟化型構成モデル（コンクリート）

変位制御により、水平荷重を作用させた。水平荷重は、降伏変位 δ_y (δ_y : 初期載荷引張側の軸方向筋が 2,000 μ に到達したときの水平変位をいう) を基準として、等比倍の変位量を 1 または 2 サイクルずつ繰り返し載荷した後、荷重ゼロとなるまでプッシュオーバー載荷を行った。

ここで、載荷実験時に行った材料試験から得た、軸方向筋、横拘束筋およびコンクリートの材料定数を表-1 に示す。

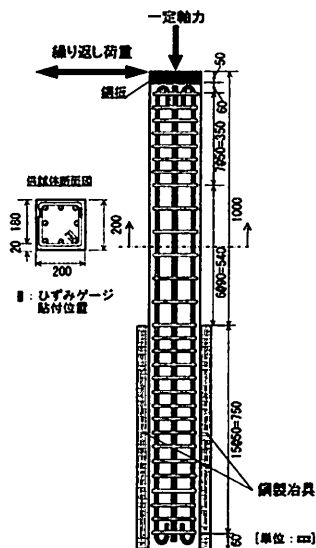


圖-4 RC柱供試體

4.2 RC 橋脚の実験概要⁷⁾

一例として、実験で用いられた RC 橋脚の断面図を図-5 (a) および (b) に示す。実験では、断面 $2,400 \times 2,400$ mm、柱有効高さ 9,600 mm、せん断スパン比 4 を有する RC 橋脚を用いている。軸方向筋には D35 (SD345) を 74 本、横拘束筋には D19 (SD345) を使い、横拘束筋量の少ない L1 供試体では間隔 $s = 300$ mm で、横拘束筋量の多い L2 供試体では、中間帯鉄筋も含め間隔 $s = 150$ mm で配置 (図-5 (b) 参照) している。

載荷は、供試体寸法が大きいため、軸力は載荷せず、部材降伏までは荷重制御により、それ以降は変位制御により水平荷重を載荷している。水平荷重は、降伏変位 δ_y (δ_y : 事前に算定された降伏荷重に、水平荷重が到達したときの変位をいう) を基準として、その整数倍の変位量を 3 サイクルずつ載荷し、軸方向筋の破断等の損傷が生じるまで載荷を継続している。ここで、文献 7) に掲載される軸方向筋、横拘束筋およびコンクリートの材料定数を表-2 に示す。なお、コンクリートのヤング係数については日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準による関係式¹⁴⁾により算定し、ピークひずみについて

表-1 RC 柱供試体の材料定数一覧

横拘束筋 間隔 s [mm]	コンクリート			軸方向筋 (平均)		横拘束筋 (平均)	
	設計基準・圧縮強度 [MPa]			降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]
	20	40	60				
35	19.5	46.7	71.0	351	519	315	512
50	24.0	46.7	71.0				
65	18.5	43.6	61.8				
90	24.0	40.5	61.8				
105	25.8	39.8	59.2				
120	19.5	43.6	59.7				
150	25.8	40.5	59.7				

表-2 RC 橋脚の材料定数一覧

供試体名	コンクリート		軸方向筋		横拘束筋	
	圧縮強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]
L1	33.5	424	639	344	528	
L2	32.6					

は、式 (7) により逆算し、それぞれ求めた。

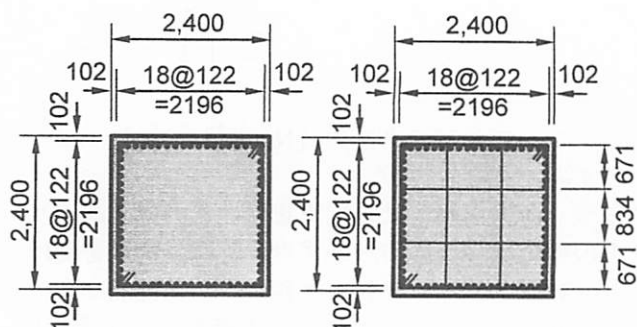
4.3 解析モデル

本解析では、図-6 で示すように、実験時と同様の荷重形態となるようにモデル化してある。一定軸力は RC 柱供試体の場合、実験で荷重したものと同値を、RC 橋脚の場合は解析の収束性を促すため 1N を、それぞれ頂部に作用させ、水平荷重を変位制御により作用させている。1 解析解あたりの変位量は、柱高さの 1% 以内とし、RC 柱供試体では 150 mm まで、RC 橋脚の場合は 320 mm 程度までそれぞれブッシュオーバー解析を行った。

本解析で用いた分割モデルを図-7 (a) および (b) に示す。RC 柱供試体の分割モデルでは全区間において、RC 橋脚の分割モデルでは柱基部から 4,000 mm までの区間で

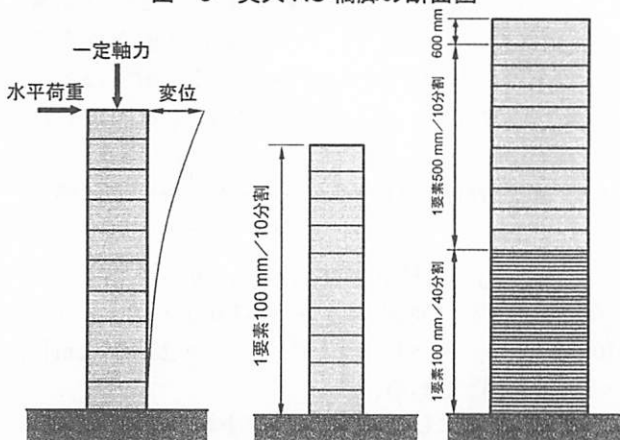
1 要素長 100 mm で分割している。実験結果より、RC 橋脚は基部から 4,000 mm 以上に目立った損傷が見られないため、1 要素長 500 mm (最終要素のみ 600 mm) で分割し、不均等分割となっている。なお、要素長さの決定に当たっては、一般的なコンクリートの一軸圧縮試験で求められる応力-ひずみ関係には、コンプレッソメータにより求められる、端面摩擦の影響が生じやすい両端 50 mm を取り除いて計測された区間での平均化ひずみが用いられることを参考とした。それゆえ、当該ひずみを計測する区間の長さ (100 mm) を 1 要素長とすることにより、試験から得た材料定数を解析に適用する上での妥当性を確保した。また、断面分割については、軸方向筋の位置を正確に再現した上で、RC 柱供試体は 484 分割、RC 橋脚は 801 分割することとした。断面分割図を図-8 に示す、なお、図中の黒色の要素は、軸方向筋 (鋼材) を表している。

5. 鋼材要素に適用する構成モデルの違いが解析結果に与える影響



(a) L1 供試体 (b) L2 供試体

図-5 実大 RC 橋脚の断面図⁷⁾

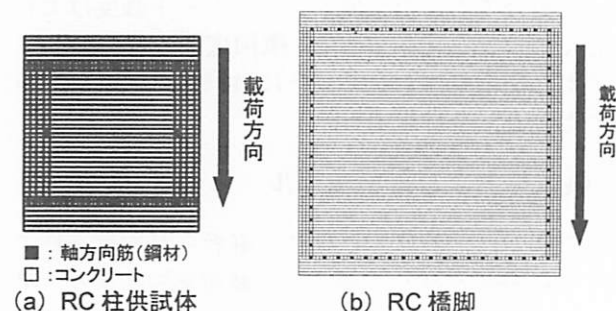


(a) RC 柱供試体

(b) RC 橋脚

図-6 解析モデル

図-7 要素分割図



(a) RC 柱供試体

(b) RC 橋脚

図-8 断面分割図

コンクリートの構成関係を「道路橋モデル」に固定し、鋼材の構成関係を「弾完全塑性型」ならびに「ひずみ硬化型」とに変化させた解析結果と横拘束筋間隔 $s = 35$ mm、コンクリート一軸圧縮強度 (以下、コンクリート強度) $f_{ck} = 20$ MPa の実験結果とを図-9 に示す。なお、ここでの解析結果は、水平耐力照査の規定に基づき、なお、最外縁のコンクリート要素の応力が $0.8 \sigma_{cc}$ に到達した時点で解析を終了していることを付記する。

図より、最大耐力に至るプレピーク領域における挙動に鋼材の構成関係が与える影響はさほど大きくないものと考えられる。しかし、鋼材に「ひずみ硬化型」を用いた解析結果 (実線・黒色) は、実験結果と比較して、ピーク耐力直後のポストピーク領域で高い耐力を示すことが確認できる。一方で、鋼材に「弾完全塑性型」を適用した解析結果 (実線・灰色) は、同じポストピーク領域での耐力が若干、低

くなる傾向を示すものの、その下降勾配は実験結果の軟化勾配と概ね一致した挙動を呈する。以上の考察から、鋼材の構成関係には「弾完全塑性型」を適用した方が、実験結果を精度良く再現できるものと考えられる。

6. 道橋示で定められる水平耐力照査に基づいた解析結果に対する考察

ここでは、筆者らの実験から得た繰返し曲げ実験結果の包絡線と解析結果とを比較・考察し、道橋示に掲載されるコンクリート構成モデル（道路橋モデル）の妥当性について検証する。

一例として、横拘束筋間隔 $s=35$ および 150 mm、コンクリート強度 20 および 60 MPa を有する RC 柱供試体に対する解析結果を図-10 (a) ~ (d) にそれぞれ示す。ここでは、道橋示の規定および 5. の知見に基づき、鋼材：「弾完全塑性型」とし、コンクリート：「道路橋モデル」を用いた数値解析を実施した。なお、5. と同様に、最外縁のコンクリート要素の応力が $0.8 \sigma_{cc}$ に到達した時点で解析を終了している。

図から分かるように、いずれの解析結果も概ね実験結果の最大耐力と一致する傾向を示しており、当該照査法を用いた解析では、耐荷性能は十分評価できるものと推察される。しかし、横拘束筋間隔 $s=35$ mm、コンクリート強度 20 MPa の供試体を除き、いずれの供試体も最大耐力に達した直後に、最外縁のコンクリートが圧壊し、解析が終了する傾向を示した（シンボル▼）。文献 6) によれば、実験において耐力が低下するのは軸方向筋の座屈が顕著となる $+8\delta$ （変位：65 mm 付近）以降の領域であり（シンボル▽）、実験結果で生じた現象を解析結果が満たしているとは言い難い。また、道橋示が定義する耐力的な観点での RC 橋脚の塑性化の限界状態は、「橋脚の水平耐力が大きく低下し始める状態」である。このことから、当該照査法では、限界状態までの挙動を精度良く再現できないと推察される。それゆえ、RC 橋脚の塑性限界状態を精度良く再現可能とするため、当該照査に用いるコンクリート

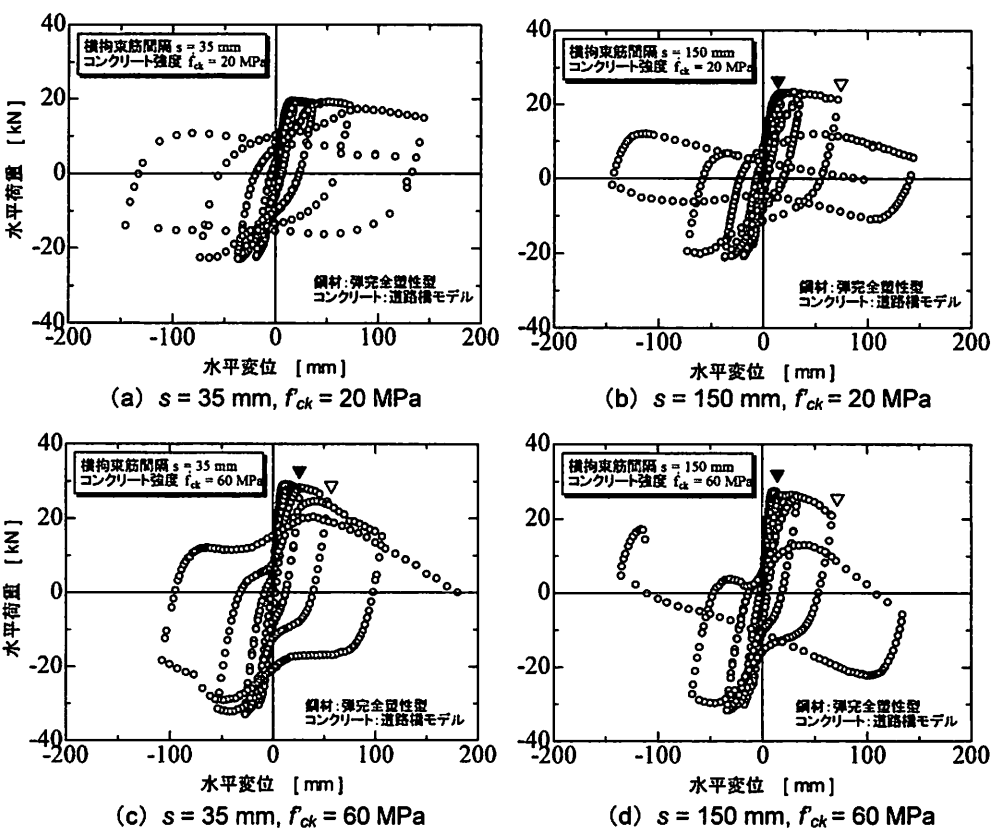


図-10 水平耐力照査法に基づく解析結果

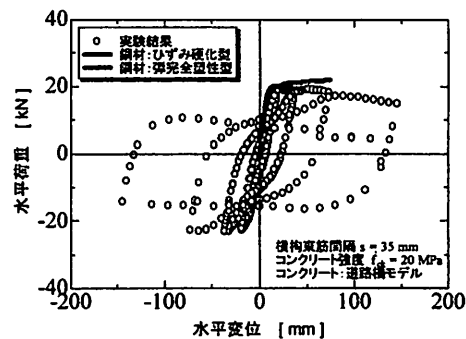


図-9 鋼材の構成モデルの影響

構成モデルの問題点について検討することとした。

7. コンクリート要素に適用する構成モデルの違いが解析結果に与える影響に関する検討

本章では、横拘束筋間隔 $s=35$ および 150 mm、コンクリート強度 20 および 60 MPa を有する RC 柱の実験結果の包絡線（以下、実験結果）に対する解析結果に、コンクリート要素に構成モデルの違いが与える影響について検証する。なお、いずれの解析も鋼材の構成関係には、前章に引き続き「弾完全塑性型」を適用した。

7.1 「道路橋モデル」を適用した場合

本節では、コンクリート要素に「道路橋モデル」の構成関係を適用し、解析結果に与える影響について検証した。なお、本節以降の道路橋モデルを適用した解析結果では、RC 部材の終局状態までの追従性についても検証するため、応力ゼロ時でのひず

み：限界ひずみ ε_z
 (図-2 および表-3 参照) を相似関係により求め、道路橋モデルを応用した構成関係を適用した解析を実施したことを付記する。

一例として、横拘束筋間隔 $s = 35$ および 150 mm, コンクリート強度 20 および 60 MPa の実験結果 (シンボル○) に対する解析結果を図-11 (a) ~ (d) に実線 (灰色) で示す。図より、横拘束筋間隔 $s = 35$ mm, コンクリート強度 20 MPa の供試体に対する解析結果は、概ね実験結果を再現できていることが分かる。しかし、それ以外の供試体に対する解析結果は、実験結果と比較して、低変位レベルで耐力低下が生じていることが分かる。また、その傾向は、コンクリート強度が高く、かつ横拘束筋間隔が大きくなるに従い、より顕著であることが確認できる。よって、コンクリート要素に「道路橋モデル」を適用した解析では、RC 柱の変形性能を実験結果よりも脆性的に捉える傾向があり、ポストピーク挙動を含めた塑性域の変形性能を評価する上で留意する必要がある。

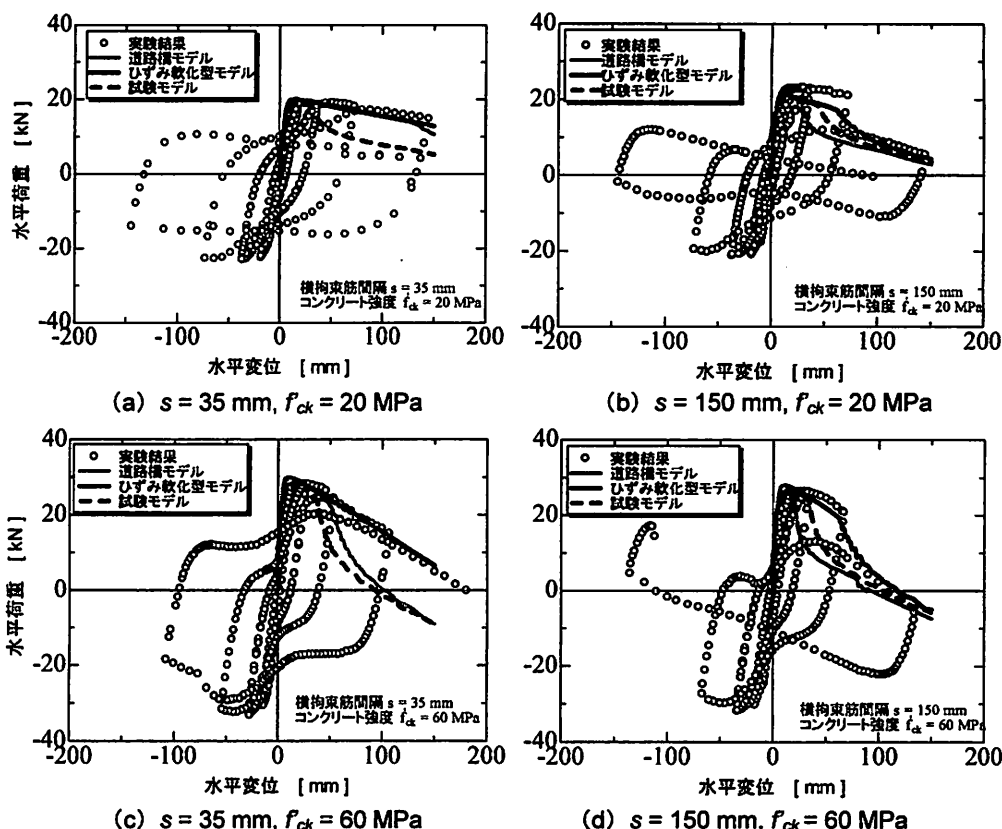


図-11 コンクリート構成モデルが解析結果に与える影響

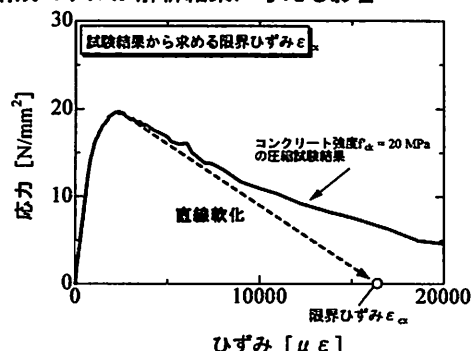


図-12 試験モデルの概要

示し、その傾向はコンクリート強度が高い供試体に対する解析結果の方が、より顕著な傾向にあることを確認した。一軸圧縮試験結果から同定された試験モデルには、横拘束筋による拘束効果が見込まれていない。よって、本解析結果より、道路橋モデルを適用した解析では、横拘束筋間隔が大きく、かつコンクリート強度が高い供試体ケースでの解析では、横拘束筋による拘束効果によるピーク応力以降の圧縮破壊エネルギーの増分を過少評価する傾向があるものと考えられる。また、道路橋モデルでは、横拘束筋による拘束効果により、ピーク応力とピークひずみとの増加を見込んでいるが、本解析結果からはそれによる影響はほとんど無いものと推察される。

7.2 「材料試験結果に基づいたモデル (試験モデル)」を適用した場合

本節では、図-12 に示すように、ピーク応力に到達後、直線的に軟化するという仮定の下で、コンクリートの一軸圧縮試験から得た応力-ひずみ関係のピーク応力直後の軟化勾配を基として、相似関係により算定した応力ゼロ時でのひずみ: ε_{α} (表-3 参照) を用いて同定した応力-ひずみ関係 (以下、試験モデル) を適用した解析結果への考察を行う。

一例として、横拘束筋間隔 $s = 35$ および 150 mm, コンクリート強度 20 および 60 MPa の実験結果 (シンボル○) に対する解析結果を図-11 (a) ~ (d) に破線で示す。図より、コンクリート強度の違いに関わらず、横拘束筋間隔 $s = 35$ mm の供試体に対する解析では、道路橋モデルを適用した解析結果と比較して、脆性的な挙動を示した。それに対し、横拘束筋間隔 $s = 150$ mm の供試体に対する解析では、試験モデルを適用した解析結果の方が延性的な挙動を

7.3 「最適限界ひずみの式を用いたひずみ軟化型モデル」を適用した場合

本節では、式 (8) で算定される最適限界ひずみ ε_f (表-3 参照) を用いたひずみ軟化型構成モデル

を適用した解析結果に対する考察を行う。

一例として、横拘束筋間隔 $s = 35$ および 150 mm 、コンクリート強度 20 および 60 MPa の実験結果（シンボル○）に対する解析結果を図-11 (a) ~ (d) に実線（黒色）で示す。図より、いずれの供試体ケースにおいても、解析結果が実験結果を精度良く再現できることを確認した。最適限界ひずみ ϵ_f を適用した解析結果と比較して、道路橋モデルを適用した解析結果の方が脆性的な挙動を示す要因として、1) 当該モデルは、ポストピーク領域での横拘束筋による内部コンクリートへの拘束効果を過少評価していること、および 2) ファイバー解析が有する要素長さ依存性を排除した構成関係となっていないこと、などが要因として考えられる。

8. 要素長さの違いが解析結果に与える影響

本章では、コンクリート要素に「道路橋モデル」を適用し、限界ひずみ ϵ_z を固定することにより、構成則上のコンクリートの圧縮破壊エネルギーを一定として、要素分割数 n_{elm} を変化した解析を行う。なお、鋼材要素には「弾完全塑性型」を適用した。

一例として、要素分割数 $n_{elm} = 5, 10, 15$ および 20 分割とを変化させた（図-13 参照）、横拘束筋間隔 $s = 35 \text{ mm}$ 、コンクリート強度 $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ の供試体の実験結果（シンボル○）に対する解析結果を図-14 に示す。図より、要素分割数 $n_{elm} = 5$ の場合、実験結果を概ね再現できることが分かる。しかし、分割数が多くなるに従い、部材の軟化勾配が大きくなる傾向を呈する。この要因として、有限要素解析を用いた場合、要素長さが短くなる（分割数が多くなる）に従い、要素に入力されるエネルギー量が小さくなるためであると推察される。それゆえ、道路橋モデルを適用した解析では、要素長さの影響が伏在していることに留意する必要がある。

9. 断面寸法の違いが解析結果に与える影響

前章までの知見を基に、星隈ら⁷⁾の実大 RC 橋脚の実験結果に対する解析を行った。L1 供試体（体積横拘束筋比 $\rho_s = 0.2\%$ ）および L2 供試体（体積横拘束筋比 $\rho_s = 0.8\%$ ）の実験結果と解析結果との比較を図-15 (a) および (b) に示す。なお、ここで示す実験結果（実線）は、繰り返し載荷曲線の正（+）側での包絡線を描いたものである。

図から分かるように、L1 供試体に対する解析結果では剛性勾配などで若干の差異は見られるものの、コンクリート要素に、ひずみ軟化型構成モデルを用いた解析結果は、概ね実験結果を精度良く再現可能であることが分かった。本解析結果より、最適限界ひずみ ϵ_f により同定される圧縮破壊エネルギー量に、断面寸法の違いが与える影響はさほど大きくは

表-3 解析に用いた各構成モデルにおける定数
単位（応力：MPa、ヤング係数：GPa）

設計強度 f_{ck}	間隔 s	構成則	ピーク応力 σ_{∞}/f_c	ピークひずみ $\epsilon_{\infty}/\epsilon_{c0}$	ヤング係数 E_c	限界ひずみ $\epsilon_z, \epsilon_{\infty}, \epsilon_f$
20	35	道路橋	24.9	0.005775	8.63×10^3	0.04746
		試験	19.5	0.002423	21.4×10^3	0.01599
	150	軟化型	27.1	0.002811	19.3×10^3	0.1183
		試験	25.8	0.002093	29.2×10^3	0.008847
	60	道路橋	76.4	0.003231	47.3×10^3	0.02002
		試験	71.0	0.002322	36.5×10^3	0.02891
60	35	軟化型	61.0	0.002360	51.7×10^3	0.01288
		試験	59.7	0.002408	35.0×10^3	0.01100
	150	道路橋	33.5	0.002837	28.1×10^3	0.02175
		試験	32.6	0.002323	27.7×10^3	0.004899
	橋脚	軟化型				0.01025
		軟化型				0.01932

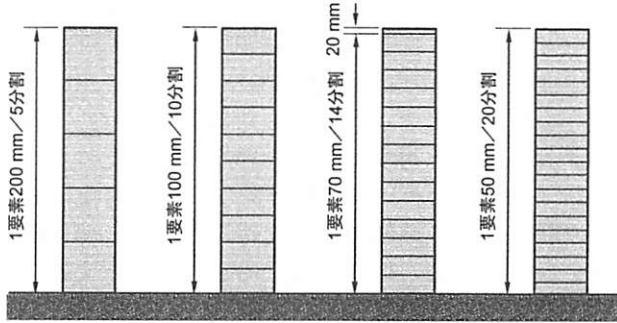


図-13 要素分割（5、10、15 および 20 分割）

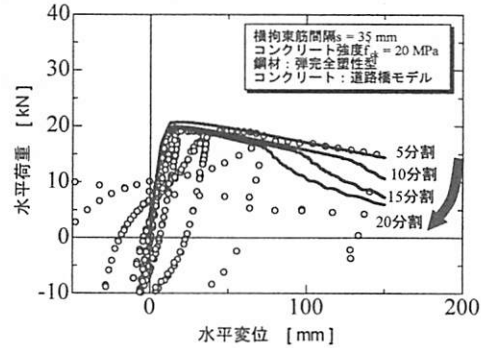


図-14 分割数の違いが解析結果に与える影響

ないものと推察される。ただし、本解析結果から、実大 RC 橋脚の実験結果の最大耐力の 7 割程度までの挙動は再現可能であることは確認できたが、それ以下の耐力レベルで、どのような挙動を呈するかについては不明である。したがって今後、検討してゆく余地があるものと考えられる。

10. まとめ

本研究では、地震時保有水平耐力照査を行う際に採り入れるコンクリートの構成モデルの適応性について検証した。ここでは、有限要素解析プログラム FEAP によりモデル化した RC 柱および RC 橋脚モデルに対し、構成モデルをパラメトリックに変化させたプッシュオーバー解析結果と実験結果との比較・考察を行い、以下の知見を得た。

1) 軸方向筋に適用する鋼材の構成モデルは、道橋

示と同様、「弾完全塑性型」を用いた方が、精度良く実験結果を再現できることが分かった。

- 2) コンクリート要素に「道路橋モデル」を適用した場合、横拘束筋が大きく、かつコンクリート強度が高い供試体ケースの解析では、実験結果と比較して、脆性的な挙動を示すことが分かった。

- 3) コンクリートの一軸圧縮試験結果から算定した応力ゼロ時でのひずみを用いて同定した構成関係を適用した解析結果から、横拘束筋間隔の大きい供試体ケースの場合、道路橋モデルでは横拘束筋による拘束効果を過少評価する傾向があることを確認した。
- 4) コンクリート要素に最適限界ひずみ ϵ_f を用いたひずみ軟化型モデルを適用した解析結果は、実験結果を精度良く再現できることを確認した。
- 5) 同一の構成関係の下、要素長さのみを変化させた解析から、道路橋モデルを用いた場合、要素長さ依存性の影響が伏在していることに注意する必要があることを確認した。
- 6) コンクリート要素にひずみ軟化型モデルを適用し、実大 RC 橋脚を対象とした解析から、最大耐力の 7 割程度までのポストピーク挙動を精度良く再現できることを確認した。これにより、最適限界ひずみ ϵ_f を用いた場合、断面寸法の違いが圧縮破壊エネルギー量に与える影響はさほど大きくはないものと考えられる。

以上の観点から、道橋示に基づいて RC 橋脚の照査を行う上での問題点が明らかとなった。加えて、鋼材要素に「弾完全塑性」、コンクリート要素に「最適限界ひずみ ϵ_f を用いた軟化型モデル」を適用した解析では、精度良く実験結果を再現できることが分かった。しかし、最適限界ひずみ ϵ_f にもいくつかの問題がある。具体的には、1) 断面形状の違い（例えば、円形や小判型など）による拘束性状の変化を反映できないこと、および 2) 拘束方法の違い（例えば、スパイラル筋など）による影響を反映できないこと、などが挙げられる。

今後は、これら課題に対する詳細な検証を行い、より汎用性の高い、水平耐力照査手法および構成モデルの構築が望まれる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、平成 22-23 年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C）22560488 代表：水野英二）、中部大学特別研究費 A（研究代表者：水野英二）および愛知工業大学耐震実験センター研究助成金の助成を得た。ここに記して、謝意を表す。

参考文献：

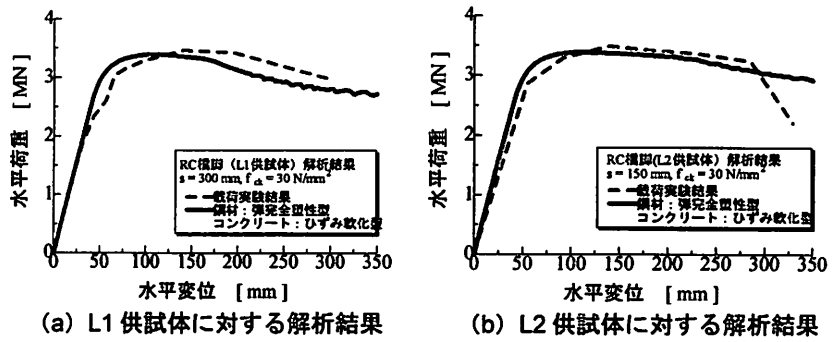


図-15 断面寸法の違いが解析結果に与える影響

- 1) 土木学会編：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式 [阪神大震災調査研究特別委員会 WG 報告]，コンクリート技術シリーズ No.12, 1996.8.
- 2) 佐藤昌志ら：RC 橋脚の地震時保有水平耐力の照査，開発土木研究所月報，No.512，pp.32-37, 1996.1.
- 3) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 [V 耐震設計編]，2002.3.
- 4) 大迫 亘・塩屋晋一ら：力学的対称性を利用するコンクリート柱の曲げ圧縮応力分布の測定実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.3, pp.769-774, 2000.
- 5) Zienkiewicz, O.C. : The Finite Element Method, Third Ed., (吉織雅夫，山田嘉昭監訳「マトリックス有限要素法」)，培風館，pp.672-796, 1984.
- 6) 亀田好洋・水野英二・鈴木森晶・梅原秀哲：一方向繰返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.2, pp.139-144, 2009.7.
- 7) 星隈順一・運上茂樹・長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響，土木学会論文集，No.669 / V-50, pp.215-232, 2001.2.
- 8) Park, R., Kent, D.C. and Sampson, A. : Reinforced Concrete Member with Cyclic Loading, J. of Structural Division, Proc. of ASCE, Vol.98, No.ST7, 1341-1360, July, 1972.
- 9) Mander, J.B., Proestley M. J. N. and Park, R. : Theoretical Stress - Strain Model for Confined Concrete, J. of the Structural Engineering, Proc. of ASCE, Vol.114, No.8, 1804-1826, Aug., 1988.
- 10) 星隈順一・川島一彦・長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.520 / V-28, pp.1-11, 1995.8.
- 11) 水谷圭吾・水野英二・畑中重光：一定軸力ならびに水平力を受ける RC 柱の破壊影響領域に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.2, pp.79-84, 2003.
- 12) 水野英二・鶴飼康行・川村淳史：繰返し荷重を受けるコンクリート充填鋼管柱のエネルギー吸収特性，平成 12 年第 55 回年次学術講演会講演概要集第 1 部 (A)，I-A315, 土木学会（東北大学）。
- 13) 水野英二ら：繰返し載荷を受ける鉄筋コンクリート柱のポストピーク挙動解析，コンクリート工学論文集，Vol.13, No.3, pp.47-60, 2002.9.
- 14) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準」，1999.