

論文 鉄筋コンクリート柱の破壊形式の判定と靱性評価

池谷和之*1・吉川弘道*2・宮城敏明*3・服部尚道*4

要旨： 鉄筋コンクリート柱を対象とし、ファイバーモデルにより曲げ変形解析した荷重-変位曲線上に、大変形に伴うコンクリート劣化過程を考慮したせん断耐力劣化曲線を併記することにより、破壊形式の判定方法と靱性評価手法の提案を行った。加えて、異なる破壊形式を有する鉄筋コンクリート柱の正負交番載荷実験結果との照合を行い、本提案手法の妥当性について検証した。さらに、本提案手法による破壊形式の判定および靱性評価と鉄道設計標準に準拠した設計パラメータとの相関性を把握するため、数値シミュレーションを実施した。

キーワード： 破壊形式の判定, 部材靱性率, ファイバーモデル, せん断耐力劣化曲線

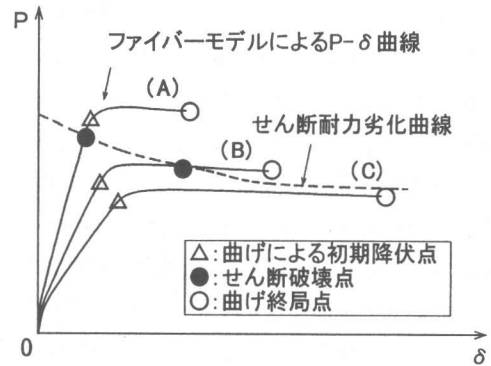
1. はじめに

鉄筋コンクリート柱において、地震時の大変位繰返しによりせん断耐力が低下することが知られている。せん断耐力の劣化が柱の破壊形式および変形性能に及ぼす影響を把握することは、脆性的な破壊を防ぐ上で重要である。

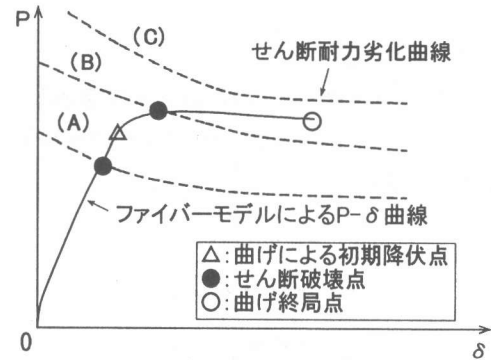
本研究は、鉄筋コンクリート柱を対象とし、拘束効果を考慮したコンクリート構成則を用い、ファイバーモデルにより算出した荷重-変位曲線（以下、 $P-\delta$ 曲線）と、大変形に伴う劣化過程を考慮したせん断耐力劣化曲線を併記させることにより、破壊形式の判定方法と靱性率評価手法を提案した²⁾。そこで、本提案手法の妥当性を検証するため、曲げせん断耐力比が異なる試験体による交番載荷実験を実施した。さらに、曲げせん断耐力比、せん断耐力に対するコンクリート寄与分および曲げ補強強度を設計パラメータとして本提案による数値シミュレーションを実施し、破壊形式の判定および靱性評価と設計パラメータとの相関性について考察した。

2. 破壊形式の分類

鉄筋コンクリート柱部材における破壊形式



(a) 主鉄筋量を変化させた破壊形式の分類



(b) 帯鉄筋量を変化させた破壊形式の分類

図-1 破壊形式の分類

は、せん断破壊、曲げによる初期降伏後のせん断破壊（以下、曲げせん断破壊）、曲げ破壊に

*1 武蔵工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*3 東急建設（株） 技術研究所（正会員）

*4 東急建設（株） 技術研究所 工修（正会員）

分類される。図-1(a)に、主鉄筋量を変化させた場合の破壊形式の分類を示す。図中の実線はファイバーモデルにより算出したP- δ 曲線であり、破線はせん断耐力劣化曲線を示している。せん断耐力劣化曲線がP- δ 曲線と交差した点がせん断破壊となる。曲げによる初期降伏点より早い時期に交差する場合はせん断破壊(A)となり、初期降伏後に交差する場合は、曲げせん断破壊(B)となる。また、両曲線が交差しない場合は曲げ破壊(C)となる。(A)は主鉄筋量が特に多い場合に見られる傾向があり、部材靱性率も1.0未満となり脆性的な破壊に至るものである。このように、変形に伴いせん断耐力が劣化しせん断破壊に至る場合の変形性能評価の指標として、本提案ではせん断靱性率 $\mu_s = \delta_s / \delta_y$ を定義する。ここで、 δ_s はせん断破壊時の変位とし、 δ_y は曲げ挙動のみを考慮した曲げ降伏変位である。また、図-1(b)に、帯鉄筋量を変化させた場合の破壊形式の分類を示す。図-1(a)の場合と同様、(A),(B),(C)の3破壊形式に分類される。当然のことながら帯鉄筋量が特に小さい範囲ではせん断破壊となる。

3. 解析手法

3.1 ファイバーモデルによる曲げ変形解析

ファイバーモデルによる柱の曲げ変形解析のフローチャートを図-2に示す。

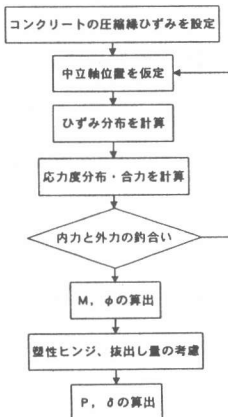


図-2 曲げ変形解析のフローチャート

解析はコンクリートの終局ひずみまで逐次繰返し計算を行った。終局の定義としては、最外縁圧縮鉄筋位置におけるコンクリートひずみが終局ひずみに達した時点とした。

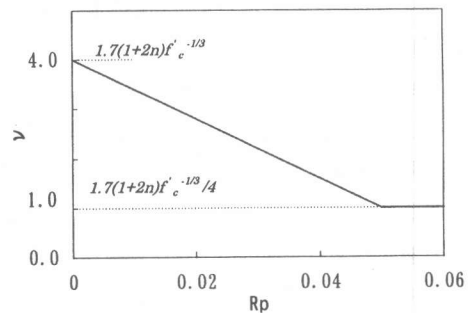
解析条件は、コンクリート構成則には帯鉄筋による拘束効果を考慮した道路橋示方書(H8年改定)³⁾に基づき、鉄筋構成則にはトリリニア型⁴⁾を仮定した。塑性ヒンジ長は曲げ降伏後最大耐力まで1.0d(有効高さをdとする)形成されるモデルとし、主鉄筋の拔出し量は鉄道構造物等設計標準・同解説⁵⁾(以下、鉄道標準)により算出した。

3.2 せん断耐力劣化曲線

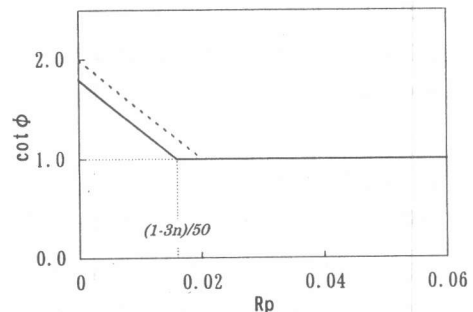
地震時の繰返し荷重に伴うコンクリートの

$$V_s = Bz p_w f_{wy} \cot \phi + B \tan \theta (1 - \beta) (H/2) v f'_c \quad (1)$$

ただし、 B : 断面幅(mm), z : 有効高さ(= jd), p_w : 帯鉄筋比(%), f_{wy} : 帯鉄筋降伏強度(N/mm²), ϕ : トラス機構角度, θ : 圧縮ストラット角度, β : コンクリート圧縮力のトラス機構の負担比率, v : 断面高さ(mm), v : コンクリート有効係数, f'_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²)



(a) 保証ヒンジ回転角と ν の関係



(b) 保証ヒンジ回転角と $\cot \phi$ の関係

図-3 NewRC 指針式におけるパラメータ

劣化過程を考慮したせん断耐力の算定方法として、NewRC 指針式⁶⁾や Priestly らの提案式⁸⁾による方法がある。NewRC 指針式は式(1)に示すように、トラス機構とアーチ機構との合算によりせん断耐力を算出するもので、いくつかの新しい知見が反映されており広範囲な実験データベースとの照合がなされている。特に、柱基部のヒンジ領域においてヒンジ回転角 R_p の増加に伴い、コンクリートの有効係数 ν (図-3 (a)) やトラス機構のコンクリート圧縮ストラットの角度 ϕ (図-3 (b)) を低減させており、劣化過程を考慮したせん断耐力の算定に反映されている。

Priestly らの提案式は、式(2)のように示のようにコンクリートによる負担分、せん断補強筋による負担分、軸力による増加分の合算により算出するものである。せん断耐力の劣化は式(2)におけるコンクリートによる負担分において、図-4に示すように部材靱性率 μ の増加に伴い、コンクリート圧縮強度に対する有効係数 k で低減することで表現されている。

$$V_y = V_c + V_s + V_p \quad (2)$$

ここで

$$V_c = k \sqrt{f'_c} \cdot A_e$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y h \cdot d h \cot \theta}{s}$$

$$V_p = N \tan \alpha$$

V_c : コンクリートによるせん断耐力負担分

V_s : せん断補強筋によるせん断耐力負担分(矩形断面)

V_p : 軸力によるせん断耐力増加分

f'_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm^2), A_e : 柱の有効断面積 (mm^2),
 A_v : せん断補強筋断面積 (mm^2), f_y : 帯鉄筋降伏強度 (N/mm^2),
 dh : 部材断面有効高さ (mm) θ : トラス機構角度, N : 軸力 (N), α :
 軸力による斜め圧縮ストラットと部材軸のなす角度

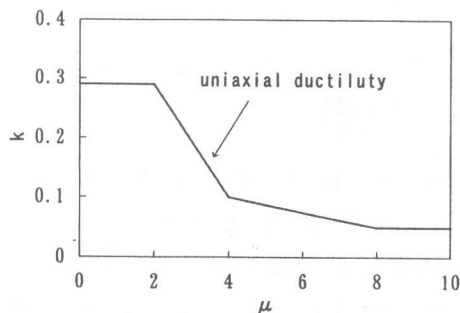


図-4 $\mu - k$ 関係

図-5は後述の載荷実験における C10 試験体を対象とし、NewRC 指針式と Priestly らの提案式によるせん断耐力劣化曲線を示したものである。NewRC 指針式は初期よりせん断耐力を劣化させているのに対し、Priestly は降伏変位の2倍の変位より劣化を開始させており初期のせん断耐力は NewRC 指針式より大きく算出されている。また同図にファイバーモデルによる曲げ解析結果を併記することにより、破壊形式の判定をおこなったものである。 $\delta = 7.5mm$ において主鉄筋が降伏し(Δ)、 $\delta = 15.2mm$ で NewRC 指針式のせん断耐力劣化曲線と交差するため(\bullet)曲げせん断破壊(部材靱性率: 2.03)と判定されるが、Priestly らの提案式では、交差点はなく曲げ破壊と判定される。本論文では Priestly らの提案式の取扱いを検討中のため、NewRC 指針式を後述の載荷実験結果との照合に用いた。

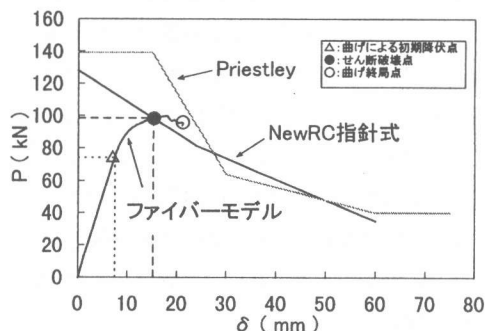


図-5 C10 試験体耐力予測

4. 載荷実験結果と本提案手法との比較

4.1 実験概要

表-1 試験体一覧

C05	C10	C20
D13-SD490 φ6-SR235	D13-SD295A φ6-SR235	D13-SD295A D6-SD295A
せん断破壊型	曲げせん断破壊型	曲げ破壊型

表-2 材料試験結果

径	材質	降伏強度 (N/mm ²)	破断強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D13	SD490	556	825	182
D13	SD295A	356	515	187
φ6	SR235	354	462	191
D6	SD295A	444	576	192

表-3 試験体の耐力予測

試験体	Myd/la (kN)	δy (mm)	Mud/la (kN)	Vyd (kN)	Vyd・la/Mud
C05	119	-	145.2	105	0.72
	118	11.0	144		0.73
C10	77	-	101.5	110	1.08
	74	7.5	100		1.10
C20	77	-	101.9	212	2.08
	76	8.0	117		1.81

上段：鉄道設計標準で算出
下段：ファイバーモデル+NewRC指針式

本提案による破壊形式の判定と靱性率評価方法の妥当性を検証するため、表-1に示す曲げせん断耐力比の異なる試験体の荷重実験結果との比較を行った。試験体の諸元は、断面 320×320mm、せん断スパン長la=1200mm(せん断スパン比=3.75)である。

C05 試験体は主鉄筋に降伏強度 490 N/mm²の鉄筋を使用して、主鉄筋降伏前のせん断破壊をするように設計した。C10 試験体の配筋はC05 試験体と同様であるが、主鉄筋の降伏強度を 295N/mm²として曲げせん断耐力比が 1.0 程度となるようにし、曲げせん断破壊をするように設計した。C20 試験体は帯鉄筋を他の 2 体に比べ密に配筋し、せん断耐力を増加させ、曲げせん断耐力比を 2.0 以上に確保して曲げ破壊を想定した。

荷重方法は降伏変位の整数倍における変位で正負 3 回の交番荷重し、軸力は作用させなかった。表-2 に材料試験結果を示す。また、表-3 に材料試験結果より算出した試験体の耐力予測値を示す。表-3 において、上段には鉄道標準で算出した結果を示し、下段にファイバーモデルと NewRC 指針式により解析した結果を示した。

4.2 実験結果と本提案の比較

試験体の実験結果について以下に示す。写真-1 に各試験体の破壊状況を示す。C05 試験体は主鉄筋が降伏する前に柱中央部においてせん断ひびわれが発生し、せん断破壊に至った。

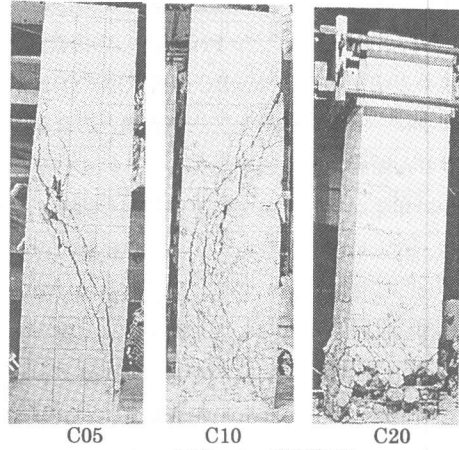


写真-1 破壊状況

表-4 実験結果

試験体	破壊形式	Pv(kN)	δv(mm)	Pu(kN)	δu(mm)	δu(mm)	μs	μ
C05	せん断破壊	110	-	110	12.3	-	-	-
	せん断破壊	118	11.0	144	9.8	-	0.89	-
C10	曲げせん断破壊	73	6.9	97	30.7	-	4.45	-
	曲げせん断破壊	74	7.5	100	15.2	-	2.03	-
C20	曲げ破壊	70	6.8	100	-	57.5	-	8.46
	曲げ破壊	76	8.0	117	-	53.6	-	6.70

上段：実験値
下段：ファイバーモデル+NewRC指針式

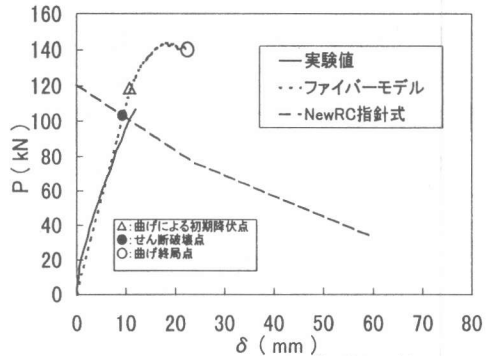


図-6 C05 試験体耐力比較

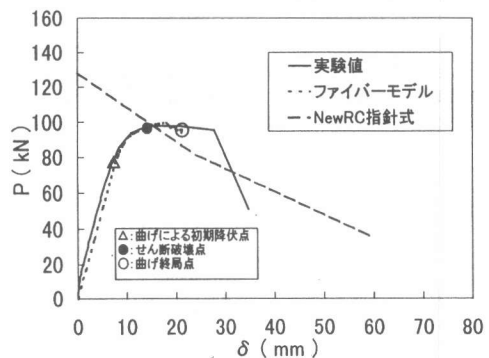


図-7 C10 試験体耐力比較

C10 試験体は主鉄筋降伏後に 4 δy において曲げひび割れがせん断ひびわれに進展し、曲

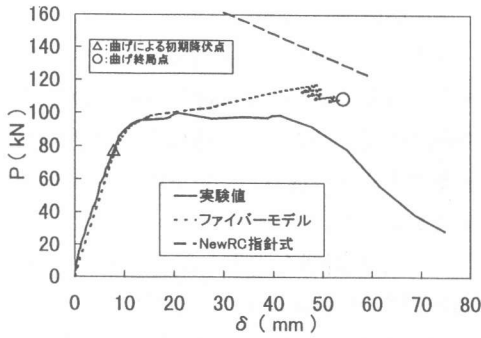


図-8 C20 試験体耐力比較

げせん断破壊に至った。C20 試験体は主鉄筋降伏後柱基部での曲げひびわれが進展し、圧縮側コンクリートが $7\delta_y$ 付近で圧壊すると共に、主鉄筋の座屈により耐力が低下し、曲げ破壊に至った。実験結果と本提案手法との比較を表-4に示す。ここで P_y は降伏荷重、 δ_y は降伏変位、 P_u は終局荷重、 δ_u は終局変位、 μ_s はせん断靱性率、 μ は曲げ靱性率を示している。また、図-6~図-8に本提案による破壊形式の判定と実験値正側の包絡線との比較を示す。図-6において C05 試験体は本提案手法では主鉄筋が降伏する前にせん断破壊(A)が予測されており、実験結果もせん断破壊に至った。図-7において C10 試験体は主鉄筋降伏後の曲げせん断破壊(B)が予測されており、破壊形式は一致したが、変形性能は過小評価している。図-8において C20 試験体は主鉄筋降伏後の曲げ破壊(C)と予測されており、破壊形式は一致したが、主鉄筋モデルにひずみ硬化域を考慮したモデルを用いているため、耐力上昇が予測された。しかし、実験では主鉄筋の座屈により耐力が低下するため、耐力の上昇は見られなかった。また、いずれの試験体においても本提案手法では終局変位に過小評価しているものの、曲げせん断耐力比の違いによる破壊形式を予測可能であることが確認された。

5. 数値シミュレーション

本提案により、曲げ破壊とせん断破壊の両破壊形式を勘案した靱性評価を考察するため、

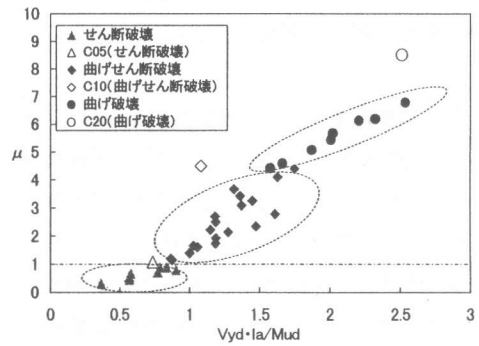
表-5に示すような解析諸元に対し、表-6に示す鉄道標準により算出した曲げせん断耐力比($V_{yd} \cdot I_a / M_{ud}$)、せん断耐力に対するコン

表-5 解析諸元

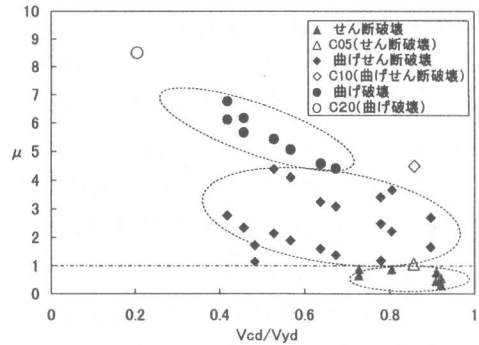
断面 (mm)	せん断スパン (mm)	軸力 (kN)	コンクリート強度 (N/mm^2)
320 × 320	1200	0	24

表-6 数値パラメータ

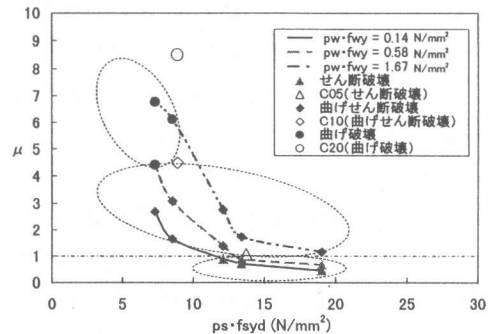
$V_{yd} \cdot I_a / M_{ud}$	V_{cd} / V_{yd}	$p_s \cdot f_{syd}$ (N/mm^2)
0.37 ~ 2.53	0.42 ~ 0.92	7.29 ~ 19.01



(a) 曲げせん断耐力比と靱性率



(b) コンクリート寄与分と靱性率



(c) 曲げ補強度と靱性率

図-9 数値シミュレート結果

クリート寄与分 (V_{cd}/V_{yd}), 曲げ補強度 ($\rho_s \cdot f_{syd}$) をパラメータとして数値シミュレーションを行った。図-9に数値シミュレーション結果を示す。

図-9(a)では、曲げせん断耐力比に対する部材靱性率を示しており、各々の破壊形式でのグループ分けを行っている。この図よりせん断破壊は $V_{yd} \cdot l_a / M_{ud} < 0.8$, 曲げせん断破壊は $0.8 < V_{yd} \cdot l_a / M_{ud} < 1.8$, 曲げ破壊は $1.8 < V_{yd} \cdot l_a / M_{ud}$ となる事がわかる。また、各々の破壊形式における曲げせん断耐力比と部材靱性率の相関は、実験結果とほぼ一致している。

図-9(b)では、せん断耐力に対するコンクリート負担分をパラメータとした場合の部材靱性率を示している。同図では曲げせん断破壊の範囲が $0.4 < V_{cd}/V_{yd} < 0.9$ の範囲に広がっており、曲げせん断耐力比ほど破壊形式を明確に分類することはできない。しかしながら、 $V_{cd}/V_{yd} > 0.7$ では曲げ破壊とならないことがわかる。つまり、図-9(a)および(b)より $V_{yd} \cdot l_a / M_{ud} > 1.8$ かつ $V_{cd}/V_{yd} < 0.7$ では曲げ破壊、 $V_{yd} \cdot l_a / M_{ud} < 0.8$ かつ $V_{cd}/V_{yd} > 0.7$ ではせん断破壊、その他では曲げせん断破壊となるといえる。特に $V_{yd} \cdot l_a / M_{ud} > 1.8$ かつ $V_{cd}/V_{yd} < 0.7$ では繰返しなどによりせん断耐力が劣化したとしても曲げ耐力を下回らないことを示している。

図-9(c)は帯鉄筋量を一定とした場合における曲げ補強度 $\rho_s \cdot f_{syd}$ が部材靱性率に与える影響を示している。この図より、主鉄筋補強度が増加するに従い靱性率が低下し、せん断破壊しやすくなっている。また、 $\rho_s \cdot f_{syd} < 12$ では主鉄筋補強度の増加に対し部材靱性率はほぼ一定となる。以上より、本提案手法により行った解析結果を曲げせん断耐力比、せん断耐力に対するコンクリート負担分および曲げ補強度に着目して解析することにより、コンクリート柱の破壊形式に対応した各パラメータの概略値を算出した。

6. 結論

鉄筋コンクリート柱を対象とし、ファイバーモデルによる $P-\delta$ 曲線にせん断耐力劣化曲線を併記することで破壊形式の判定と靱性評価する手法を提案し、以下に示す事項について確認した。

(1) せん断耐力劣化曲線として NewRC 指針式や Priestly らによる提案式について数値解析結果を例示し、両提案式によるせん断耐力劣化挙動を確認した。

(2) 本提案手法の妥当性を検証するため、曲げせん断耐力比の異なる試験体の正負交番載荷実験を実施し実験結果と照合を行った。靱性評価については、本提案手法の終局変位および部材靱性率が実験結果に対し過小な値を示す結果となったが、曲げせん断耐力比の違いによる破壊形式の判定については予測可能であることが確認された。

(3) 本提案手法による破壊形式の判定および部材靱性率と鉄道設計標準による設計パラメータ ($V_{yd} \cdot l_a / M_{ud}$, V_{cd}/V_{yd} , $\rho_s \cdot f_{syd}$) との相関性を把握するため、数値シミュレーションを実施した。その結果、本提案手法による破壊形式に対し、設計パラメータの概略値を算出した。

参考文献

- 1) 土木学会：阪神大震災被害分析と靱性率評価式、コンクリート技術シリーズ12, 1996.7
- 2) 吉川弘道・池谷和之・宮城敏明・増田芳久・岡本大：RC柱における破壊形式の判定と靱性評価、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集V-281, 1997
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善株式会社, 1996.12
- 4) 島弘・周礼良・岡村甫：異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性, 土木学会論文集 No.378/V-6, 1987.2
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善株式会社, 1992.11
- 6) 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, 丸善株式会社, 1990
- 7) 平成4年度構造性能分科会報告書, 高強度鉄筋分科会報告書(建設省総合技術開発プロジェクト・鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発), (財)国土開発技術研究センター, 1993.3
- 8) Priestley, M.J.N. and Paulay, T.: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley & Sons, 1995.10