

繰り返し水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の 挙動と終局耐力に関する実験と解析

THE ULTIMATE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER REPEATED TRANSVERSE LOAD

渡辺 浩*, 崎元 達郎**, 新田 晃久***, 大石 研一郎****

Hiroshi WATANABE, Tatsuro SAKIMOTO, Akihisa NITTA and Kenichiro OISHI

* 工修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科 (〒860 熊本市黒髪2丁目 39-1)

** 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860 熊本市黒髪2丁目 39-1)

*** 工修 住友建設(株) 大阪支店 (〒541 大阪市中央区北浜 5-22)

**** 工修 福岡県 (〒812 福岡市博多区東公園 7-7)

Experimental and analytical study on the failure behavior and ultimate strength of reinforced concrete columns under repeated transverse load with constant axial load is carried out. Test specimens are inverse-T cantilever models. Times of repeated load, magnitude of constant axial load, and pitch of hoop reinforcement were varied to investigate these effects. FEM analysis based on a uni-axial stress-strain relation of concrete and steel is carried out. Good agreement is obtained on the behaviors prior to local buckling of reinforcement between the results of the experiment and the analysis.

Keywords: Reinforced concrete, Repeated load, FEM analysis

1. まえがき

鉄筋コンクリート (以下、RC と略す) を用いた橋脚は、経済性に優れており、またメンテナンスの容易さなどからも広く用いられるようになってきている。しかし 1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震では、これら RC 橋脚の倒壊が各所に見られ、その耐震性能に対する定量化が改めて問われているところである。

そこで本研究ではまず、橋脚を模擬した逆 T 型 RC 供試体に一定軸力と漸増繰り返し水平力を与える実験を行い、種々のパラメータを変化させた場合の履歴挙動と終局耐力の特性を調べた。

一方で RC 構造物の解析にあたっては、鉄筋とコンクリートの付着、すべりや、コンクリートのひびわれの扱い方など RC 構造特有の問題がある。これらをミクロにモデル化する手法は、計算機の発達につれ近年盛んになってはいるが、それでも計算量は膨大となるため、適用範囲は局所的な挙動の解明に限られている。また、これらをマクロにモデル化する手法は、計算が容易ではあるが、経験則に基づいたものが多いため解明されなければなら

ない問題も多い。

本研究では、後者にあたるファイバー要素を用いた解析法を用いて、実験に対する解析を行った。本手法は、その仮定上、せん断変形や他次元応力場を考慮することは不可能であるが、終局状態が曲げ変形に支配されるような構造の挙動解析には十分に適用可能であると考えられており、その簡便性から簡易解析手法として広く用いられてきている。

本研究ではこの解析にあたって、

- (1) 帯鉄筋により拘束されるコンクリート (以下、拘束コンクリートという) にはその拘束効果を考慮した応力-ひずみ関係を適用する
- (2) RC 構造物の終局状態を決定する主鉄筋の座屈現象を考慮した応力-ひずみ関係を主鉄筋に適用する
- (3) 小型試験体で顕著となる基部鉄筋の引き抜けの影響を考慮する

という 3 点について新たに検討を加えて、RC 柱の終局状態に至るまでの挙動を求め、実験結果と比較して検討を行った。

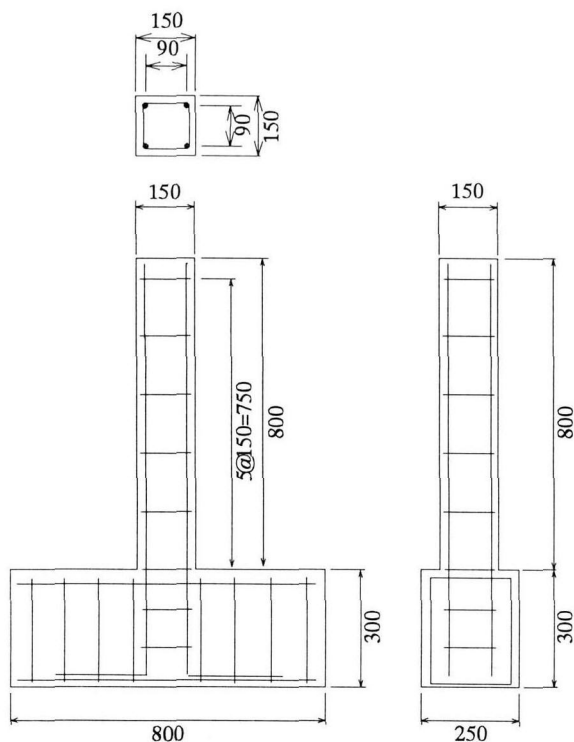


Fig. 1 Details of Test Specimens (C series)

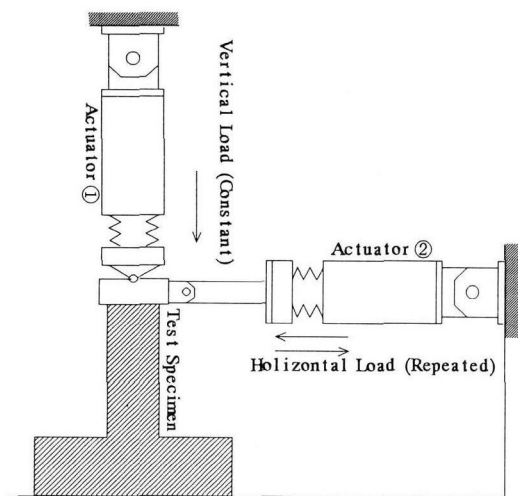


Fig. 2 Test Specimen and Set up

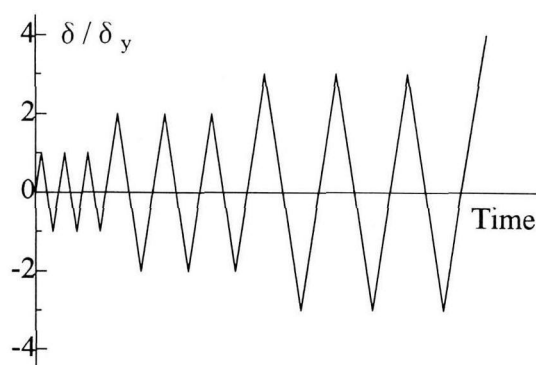


Fig. 3 Repeated Load

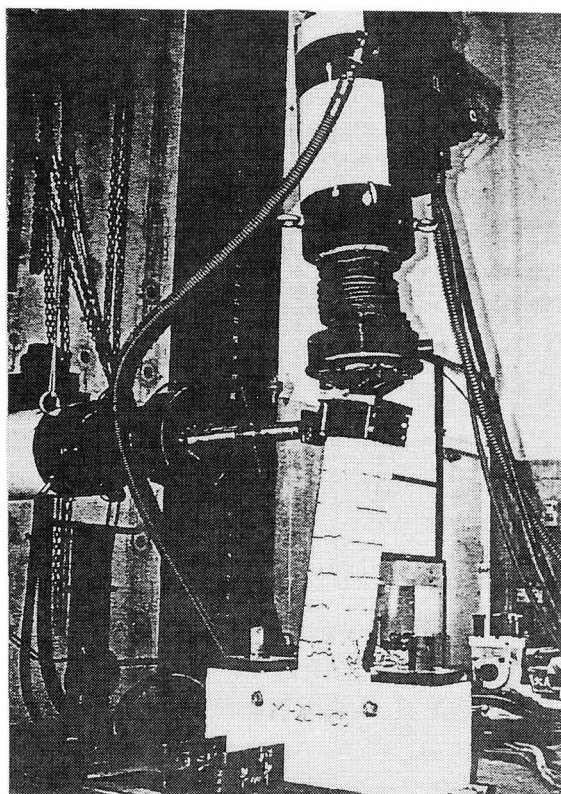


Fig. 4 View of Experiment

2. RC 橋脚のモデル実験

2.1 実験の概要

本実験では、後述のファイバー要素を用いた解析と比較検討を行うため、曲げ破壊が卓越して発生するような供試体として、Fig. 1 に示すような断面 150×150 (mm)、主鉄筋間隔 90 (mm)、柱の有効高さ 750 (mm) の供試体を作製した。主鉄筋は D10 (降伏応力 4207 kgf/cm^2) を、また帯鉄筋は $\phi 4$ を用いた。

載荷方法は Fig. 2 に示すとおり、RC 柱に一定軸力を与えながら繰り返し水平荷重を与えるものとした。ここで一定軸力の大きさは、実橋脚の場合を想定して柱強度の 10% としたが、比較のため 20% および載荷なしとした実

験も実施した。また水平荷重は Fig. 3 のように同一振幅に対して正負方向にそれぞれ 3 回ずつの載荷としたが、比較のため 10 回とした試験も実施した。ここで Fig. 3 中の δ_y とは水平力の載荷により基部の断面の鉄筋が降伏するときの載荷点での水平変位を理論的に求めたものである。さらに帯鉄筋間隔を 75, 100, 150 (mm) の 3 種類とし、結果の比較を行った。

以上のパラメータ、すなわち帯鉄筋間隔、一定軸力の大きさ、および水平力の繰り返し回数を考慮して作製した 6 体の供試体の名称、パラメータ、およびコンクリートの材料試験結果が Table 1 に示されている。供試体名は、頭の A, B, C は帯鉄筋間隔 75 mm, 100 mm, 150 mm を、続

Table 1. Details of Test Specimens and Material Properties of Concrete

Name	Times of Repeated Load r	Axial Stress Ratio n	Pitch of Hoop Reinforcement s (mm)	Horizontal Disp. at Yielding	Ratio of Hoop Reinforcement (%)	Concrete		
						Young's Modulus (kgf/cm ²)	Compressive Stress (kgf/cm ²)	Poisson's Ratio
A1-3	3	0.1	75	0.50	0.67	240,000	215	0.16
B1-3	3	0.1	100	0.50	0.50	240,000	204	0.15
C1-3	3	0.1	150	0.50	0.34	240,000	184	0.19
B0-3	3	0	100	0.45	0.50	240,000	222	0.16
B2-3	3	0.2	100	0.56	0.50	240,000	207	0.17
C1-10	10	0.1	150	0.50	0.34	240,000	184	0.19

く 0, 1, 2 は軸力なし、軸力比 10%, 20%を、-の後は繰り返し回数を示している。Fig. 4 は実験風景を示す写真である。

2.2 結果の整理

本実験装置は Fig. 2 に示すように、アクチュエーター①の上端をピンで固定しているため、水平方向への変位によりアクチュエーター①にはわずかながら傾きが生じる。この影響については、軸力に関しては今回の最大の変位を与えてもその影響は 0.2% 程度であることから無視できるとした。一方水平方向へは、アクチュエーター②で測定された水平荷重にアクチュエーター①による軸方向荷重の水平成分を補正することとした。これらにより軸力載荷用アクチュエーターを常時鉛直方向に保持することができる装置を備えた試験装置と同等の結果が得られるものと考えられる。

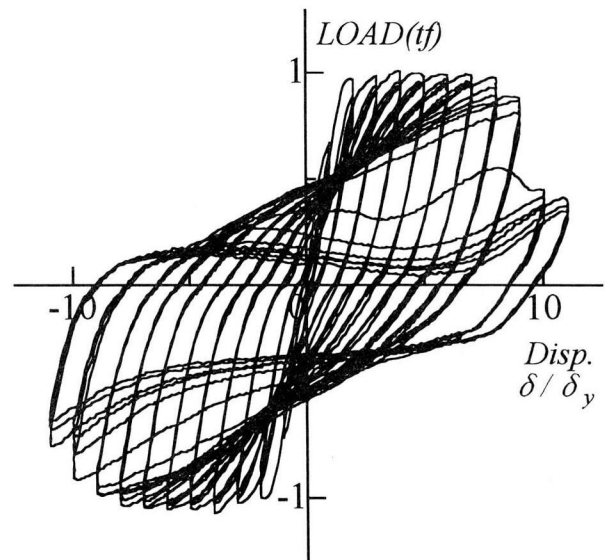
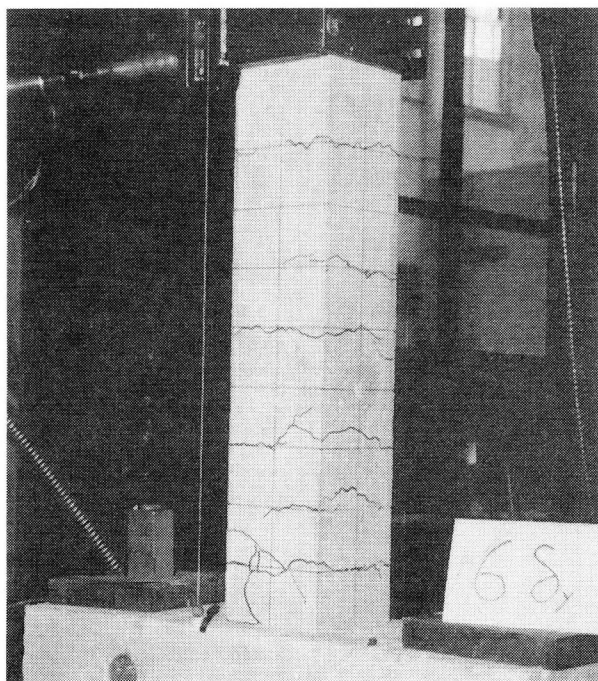
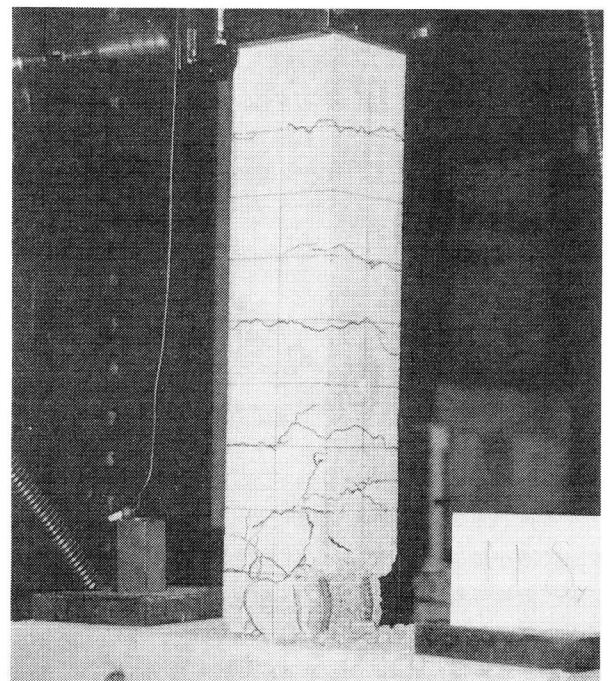


Fig. 5. Horizontal Load and Displacement Relation (B1-3, Experiment)



(a) $\delta/\delta_y = 6$



(b) $\delta/\delta_y = 11$

Fig. 6. States under Testing (A1-3)

2.3 実験結果

Fig. 5はB1-3の水平荷重－水平変位関係を表している。この供試体の破壊に至るまでの過程は以下のとおりであった。まず、載荷するとすぐに水平方向の微小なひびわれが帯鉄筋の位置などに周方向に発生した。このうち最も基部に近い帯鉄筋上のひびわれからは、斜め下方にひびわれが進行しやがて基部に達した。さらにこの後斜め方向のひびわれは急激に成長し、やがて圧縮側鉄筋に座屈が発生しコンクリートが剥落して耐力が急激に失われた。なお、これらの過程はいずれのモデルでもほぼ共通で、鉄筋の座屈が発生する繰り返し回数が増減する程度であった。Fig. 6はA1-3の供試体の実験中の様子を示している。

これらをわかりやすくするため、それぞれの包絡線により繰り返し回数、軸力、帯鉄筋間隔について比較するとFig. 7のようになる。なお、施工誤差により主鉄筋の配置位置に若干のずれが生じていたため、実験結果には圧縮側と引張側で荷重の異なるモデルがいくつか存在するが、その大きさは±3 mm程度であり、崩壊に至るメカニズムに与える影響は小さいと考えられるため、縦軸方向に平行移動することにより平均化し、検討を加えている。

まず、帯鉄筋間隔の違いを比較したFig. 7 (a)によると、最大耐力においてはその違いはほとんどみられなかった。しかし、帯鉄筋間隔が大きいほど耐力を失う変位は小さく、鉄筋の座屈しやすさの影響が表れている。一方、Fig. 7 (b)は軸力の大きさについて比較している。軸力が大きい方が最大耐力では勝るが終局状態に至るのも早いという傾向がみられる。これは載荷の初期の段階においては軸力が大きいことによりひびわれが抑制されるが、同時に圧縮側の破壊を早める結果になるということを意味している。また、Fig. 7 (c)は繰り返し回数による比較である。繰り返し回数の多い方が最大耐力は勝るが終局状態に至るのも早いという傾向がみられるが、これは繰り返しを多くすると鉄筋のひずみ硬化の影響で一時的に耐力が向上するが、コンクリートの劣化も進行しているためであると考えられる。

3. ファイバー要素を用いた解析

3.1 解析手法の概要

本研究ではファイバー要素を用いて解析を行う。鉄筋およびコンクリートの応力－ひずみ関係は、鉄筋の座屈や引き抜け、コンクリートの圧壊、ひび割れ、帯鉄筋による拘束効果等の影響を考慮して後述のように定義する。断面は微小要素に分割し、その断面の剛性は各分割要素面積に接線係数 E_t を乗じた積分値として、また断面力は応力の積分値として求める。また、移動座標による増分手法により有限変位も考慮する。

定式化は増分移動座標法を用いた増分ひずみエネルギー

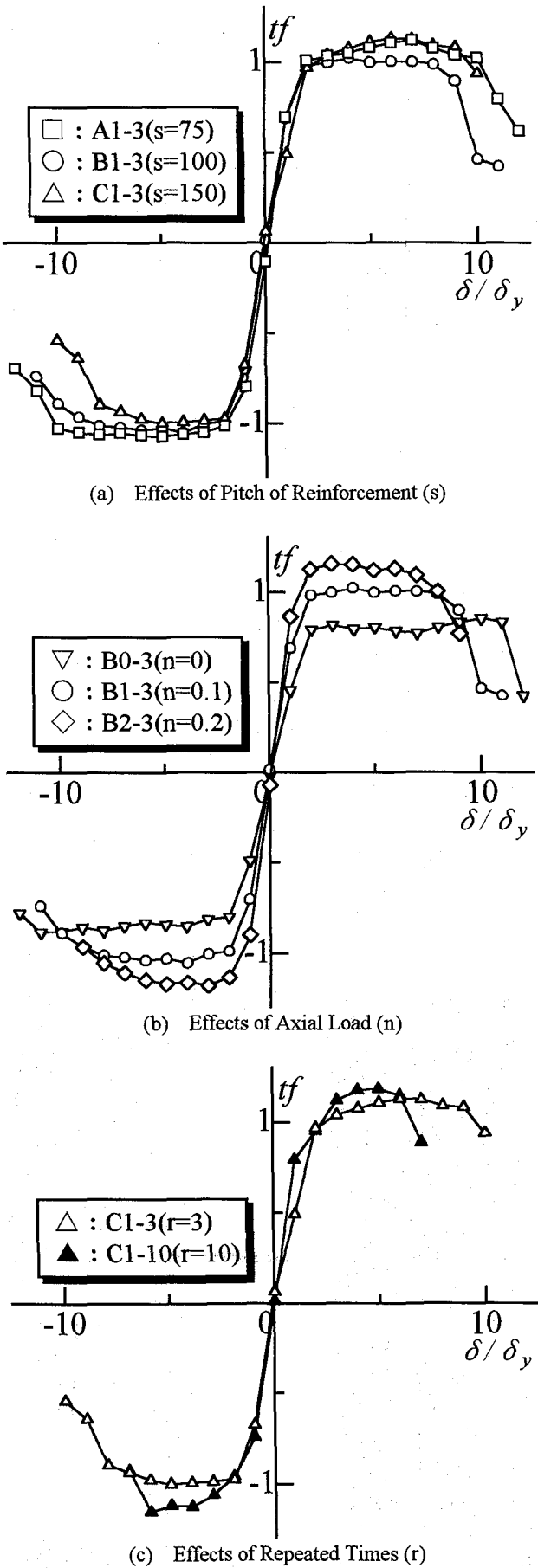


Fig. 7. Envelopes of Horizontal Load and Displacement Relations

一停留原理により行う¹⁾。断面分割により材料的非線形性を、また断面力を要素とする初期応力マトリックスにより幾何学的非線形性を考慮できる。詳細の記述はここでは避けるが、つりあい方程式は以下のとおりである。

$$(K_{ep} + K_g) \cdot U = P - (T \cdot \bar{f} - \bar{P}) \quad (1)$$

ここで、 K_{ep} : 塑性の影響を考慮した
微小変位の剛性マトリックス
 K_g : 初期応力マトリックス
 U : 節点変位増分ベクトル
 P : 節点外力増分ベクトル
 T : 座標変換マトリックス
 $\bar{f}$: 部材座標系による全断面力ベクトル
 $\bar{P}$: 全外力ベクトル

各部材におけるこの方程式を全部材について重ね合わせることにより構造全体のつりあい方程式を得ることができる。また、定式化における線形化や荷重増分途上での塑性化に起因する不つりあい力($T \cdot \bar{f} - \bar{P}$)は繰り返し計算により消去する。なお、解析上の必要性から以下の仮定を設けるものとする。

- ① 鉄筋とコンクリートの間にはすべりは生じない
- ② 断面の一部が塑性化した後も曲げに対して平面は保持される
- ③ セン断力が降伏、および変形に及ぼす影響は無視する

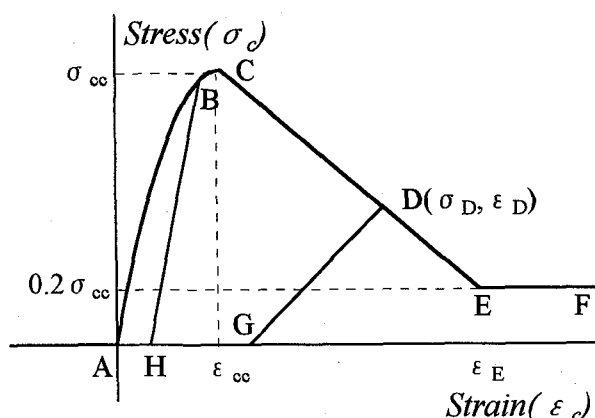
3.2 コンクリートの応力-ひずみ曲線

平成8年10月に示された道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 第2次案²⁾では、拘束コンクリートの圧縮挙動が下記のように定義されている。

これによると、

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \quad (2a)$$

$$\sigma_c = \sigma_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (\varepsilon_{cc} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \quad (2b)$$



(a) Confined Concrete

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - \sigma_{cc}}$$

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 0.76 \rho_s \sigma_{sy}$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.0132 \rho_s \sigma_{sy} / \sigma_{ck}$$

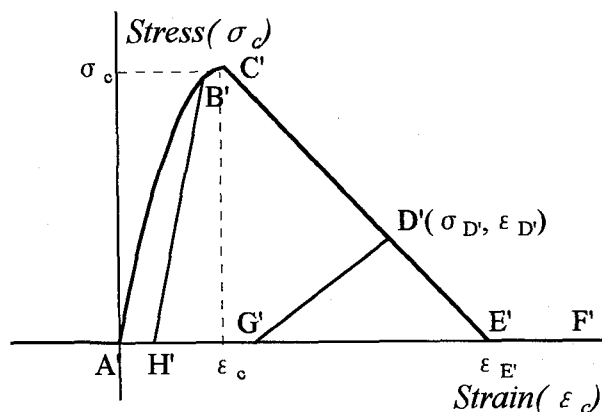
$$E_{des} = 112 \frac{\sigma_{c0}^2}{\rho_s \sigma_{hy}}$$

ただし、 σ_c : コンクリートの応力度
 σ_{cc} : 拘束コンクリートの強度
 σ_{ck} : コンクリート強度
 ε_c : コンクリートのひずみ
 ε_{cc} : 最大圧縮応力時ひずみ
 ε_{cu} : 拘束コンクリートの終局ひずみ
 E_c : コンクリートのヤング係数
 E_{des} : コンクリートの下降勾配
 ρ_s : 帯鉄筋(体積)比(≤ 0.018)
 A_{ss} : 帯鉄筋断面積
 σ_{sy} : 帯鉄筋の降伏強度
 σ_{c0} : コンクリート強度

本論文では以上の関係を拘束コンクリートに適用する。ただし、応力下降域の適用範囲は示方書案では $0.8\sigma_{cc}$ までとされているが、本論文では崩壊近傍までの解析を行うために Fig. 8(a)のように $0.2\sigma_{cc}$ まで拡張し、それ以降は $0.2\sigma_{cc}$ を保つとした。

また、圧縮域から除荷が行われたときは、例えば Fig. 8(a)のB点からはB→Hのように初期弾性係数の傾きにより除荷され、D点からはD→Gのように $2 \cdot \sigma_D / \varepsilon_D$ なる傾きにより除荷されるとした³⁾。なお、ひびわれの考慮、および履歴ループの簡略化のため、引張応力は無視するものとした。

一方、かぶりコンクリートについては、帯鉄筋による拘束がないことから、Fig. 8(b)のように、圧縮強度までは放物線で、軟化域は直線で与えられるとし、最終的には圧縮応力は負担しないものとした。C'点は円柱供試体より求め、E'点のひずみ $\varepsilon_{E'}$ については ε_E に等しいとした。



(b) Unconfined Concrete

Fig. 8 Stress - Strain Relations of Concrete

履歴に関する規則は拘束コンクリートと同様とした。

3.3 鉄筋の応力-ひずみ曲線

3.3.1 単調載荷時の挙動と座屈

曲げ破壊が発生する RC 構造の耐力低下の主原因は主鉄筋の座屈であるため、この座屈現象を定量的に評価することは RC 構造物の終局挙動解析には不可欠な要因であると考えられる。しかし、この主鉄筋の座屈についてはかぶりコンクリートや帯鉄筋の挙動が複雑に関与するために、その開始ひずみや座屈後の挙動の定量化は容易ではない。

中村らは、帯鉄筋間隔と一致する座屈発生区間での平均応力 σ_s - ひずみ ε_s 関係は両端固定条件における鉄筋単体の解析で十分に模擬できるとして、以下のような近似式を提案している⁴⁾。

$$\sigma_s = \sigma_{sy} \left\{ 0.17(s/d)^2 (\varepsilon_s - \varepsilon_{sb}) \right\} \quad (4)$$

ただし、 σ_{sy} : 鉄筋の降伏応力

s : 帯鉄筋間隔

d : 鉄筋径

ε_s : 鉄筋のひずみ

ε_{sb} : 座屈開始ひずみ ($= \varepsilon_{sy}$)

本研究ではこの関係式を、鉄筋の圧縮側の挙動として Fig.9 (a) のように定義した。

一方、引張側では Fig.9 (a) のように通常のバイリニア型とし、降伏点以後はヤング係数の 1/100 の傾きを持つものとした。

3.3.2 繰り返し載荷時の挙動

繰り返し載荷時の鉄筋の挙動の一例を Fig.9 (b) に示す。座屈発生後の B 点において除荷される場合は、応力が 0

となる C 点まではヤング係数と等しい傾きで移動し、引張降伏点である D までは、

$$E_s' = -E_s \cdot \log_{10}(\varepsilon - \varepsilon_{sy}) / 6 \quad (6)$$

ただし、 E_s : 鉄筋のヤング係数

ε_{sy} : 降伏ひずみ

なる傾き E_s' で移動³⁾する。D 点からはひずみ硬化に従い、 $(1/100)E_s$ の傾きで移動する。

ひずみ硬化域の E 点から除荷される場合は、B→C→D と同様のルールで E→F→G と移動し、以後は G→H のように、式(5)により定義された座屈曲線に沿って移動するとした。この座屈曲線は ε_{sy} を ε_G に平行移動したものであるが、過去の座屈の履歴を考慮して G 点の応力は、B 点の応力に等しいとした。

3.4 主鉄筋の引き抜けによる補正

本論文で対象としている実験供試体は小型であるため、水平力による変位のうち、基部鉄筋の引き抜けによる剛体回転量が載荷が進むに従ってかなりの割合を占めるものと予想される。そこで引き抜け量算定式を用いてこれを補正することを試みる。

松本らは、マッシュプなコンクリートに埋め込んだ鉄筋の引き抜き試験より、引き抜け量 δ は、弾性域での引き抜け量 δ_e と塑性域での引き抜け量 δ_p の和として、下記のように算定できるとしている⁹⁾。

$$\delta = \delta_e + \delta_p$$

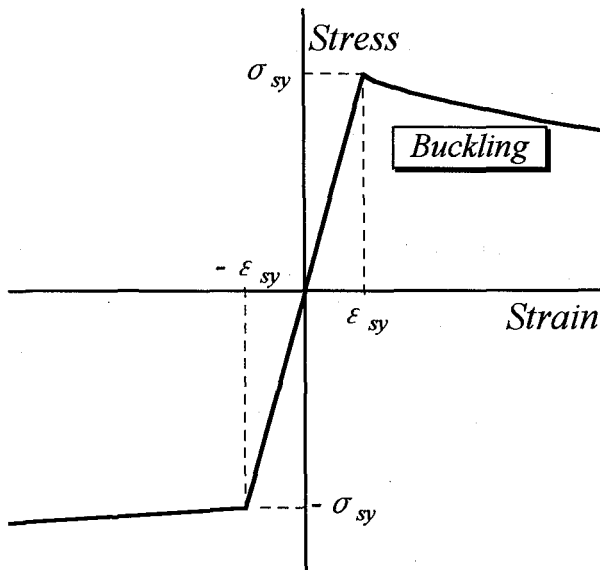
$$\delta_e = \varepsilon_s \cdot l_e / 2 \quad (7)$$

$$\delta_p = (\varepsilon_s + \varepsilon_{sh}) \cdot l_p / 2$$

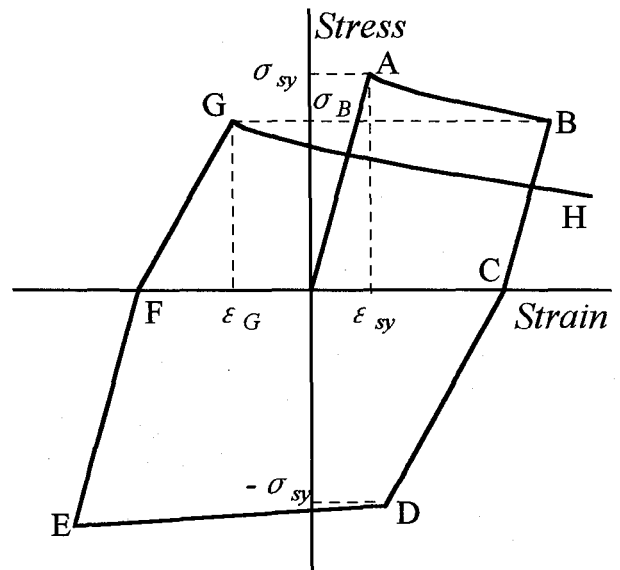
ただし、 $l_e = 59.1d \cdot \sqrt{E_s \varepsilon_s^2 / \sigma_c}$

$$l_p = 4.92d \left\{ 3\sigma_{sy} + E_h(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) \right\} (\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) / \sigma_c$$

δ_e : 弾性域での引き抜け量



(a) Behavior under Monotonic Load



(b) Behavior under Cyclic Load

Fig. 9 Stress-Strain Relations of Steel Bar

δ_p : 塑性域での引き抜き量
 l_e : 弾性域の引き抜き分布長
 l_p : 塑性域の引き抜き分布長
 d : 鉄筋径
 ε_s : 鉄筋のひずみ
 ε_y : 鉄筋の降伏ひずみ
 ε_{sh} : 鉄筋のひずみ硬化開始ひずみ
 σ_{sy} : 鉄筋の降伏応力
 σ_c : コンクリートの圧縮強度
 E_{sh} : 鉄筋のひずみ硬化域での弾性

係数

鉄筋の引き抜きにより、供試体には剛体回転が発生する。そこで本研究では、解析結果の変位に剛体回転分の変位を加えることで実験結果と比較することとした。すなわち、以下に示す解析結果では、横軸に対し

$$\Delta = \delta \cdot l / d_h \quad (8)$$

ただし、 l : 供試体長さ

d_h : 中立軸から引張側主鉄筋までの距離

なる Δ を加えて整理している。

なお、この引き抜き量産定式については、繰り返し載荷での考察がなされていないが、本研究ではこれを繰り返し載荷でも適用できるものと仮定して解析を行った。

3.5 解析におけるモデル化

断面は Fig. 10 のように 24 層に分割し、鉄筋もその断面積 A_s を断面幅 W で除した値を厚さを有した層として取り扱った。またコンクリートに関しては、帯鉄筋により囲まれる部分に対して、Fig. 8 に示した帯鉄筋による拘束を考慮した応力-ひずみ関係を適用した。

供試体長手方向の分割は、基部の要素長を帯鉄筋間隔として合計 6 分割とした。

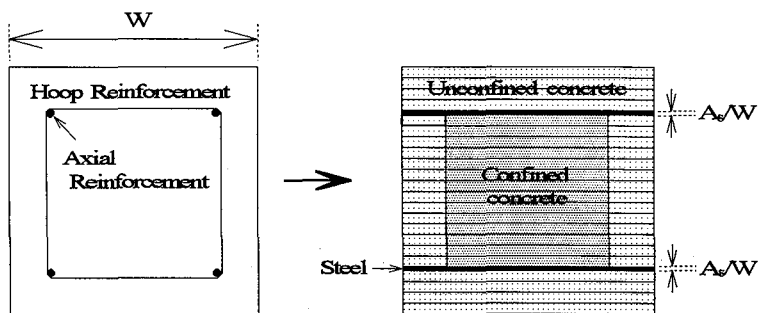


Fig. 10 Cross Section and Division

4. 解析結果と実験との比較

解析の一例として実験供試体 B1-3 を対象として解析を行い、検討した。実験パラメータによる解析結果の違いについての考察などは別の機会に発表したい。Fig. 11 (a) は実験結果であり、(b), (c), (d) はそれに対する解析結果である。なお、解析では実験と同様に同一の δ/δ_y に対して 3 回ずつの載荷を行っている。

まず、Fig. 11(b) は鉄筋の座屈を考慮しない場合の解析結果である。これによると、繰り返し載荷によっても劣化はほとんど見られない。これにより、終局状態に至るまでの挙動を解析するためには、座屈の考慮は不可欠であることがわかる。

次に Fig. 11(c) は鉄筋の座屈を考慮した場合の解析結果である。これによると、特に終局状態における耐力が実験結果とよく一致しており、本解析手法により RC 柱の劣化挙動を求めうることが示されている。

一方で(c)では、解析結果での大きく耐力を失うタイミングが実験結果と比較してかなり早いことがわかる。これは解析では鉄筋の座屈発生を実験よりも早期に判定しているためである。そこで、鉄筋の座屈開始ひずみについて下記の考察を行った。中村らの研究によると、鉄筋

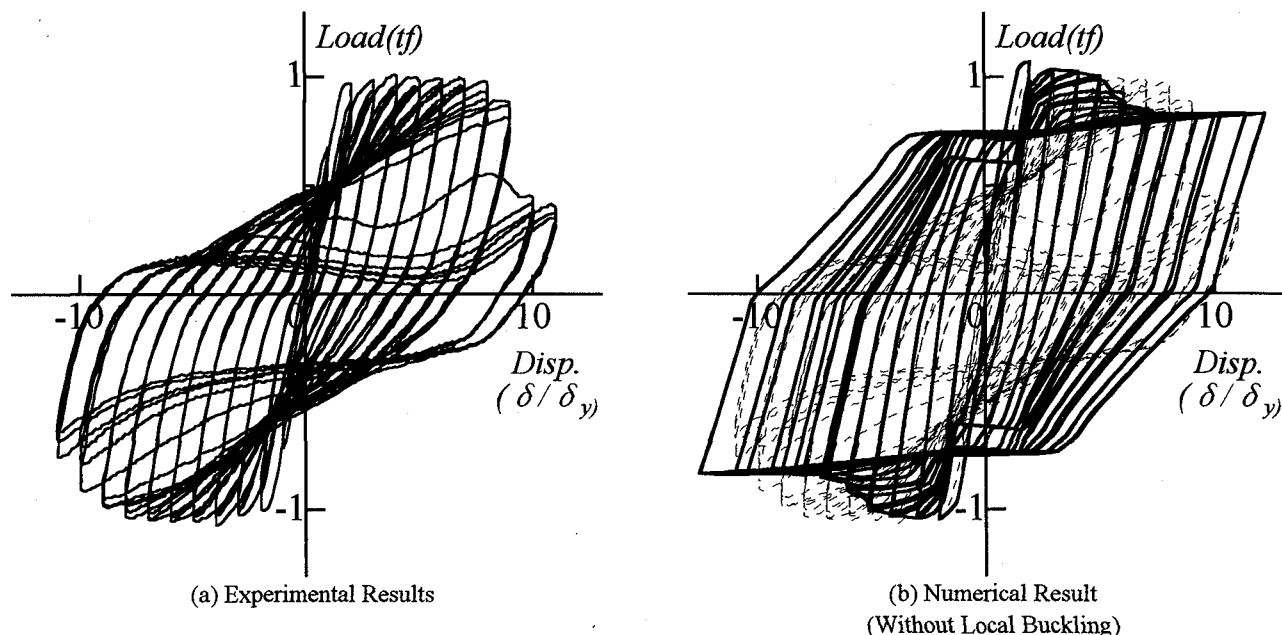
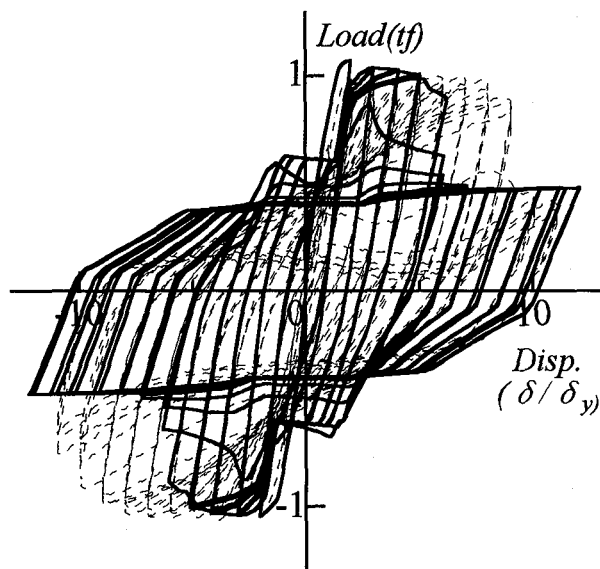
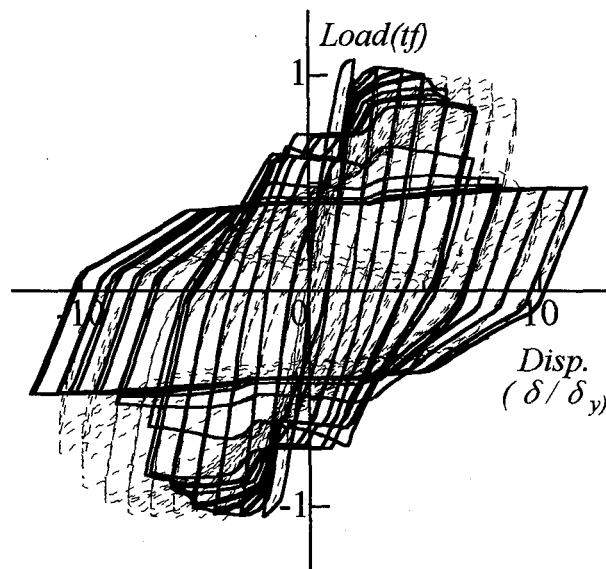


Fig. 11 Horizontal Load and Displacement Relation (B1-3)



(c) Numerical Result
(Initiation of Local Buckling at $\varepsilon_{sb} = \varepsilon_y$)



(d) Numerical Result
(Initiation of Local Buckling at $\varepsilon_{sb} = b/s+0.2/100$)

Fig. 11 Horizontal Load and Displacement Relation (B1-3)

の座屈開始ひずみは降伏ひずみであるとされている。しかし、鉄筋が降伏ひずみに達する時点では鉄筋の周囲のコンクリートはようやく圧縮強度に達したばかりであり、降伏と同時に鉄筋が座屈するとは考えにくい。

軸力と曲げを受ける RC 部材の座屈開始ひずみについて、例えば吉田らによると、

$$\varepsilon_{sb} = (b/s+0.2)/100$$

ただし、b : 断面の幅

s : 帯鉄筋間隔

で表現することができるとしている。これを実験モデル B1-3 に適用すると座屈開始ひずみは $8.6\sigma_y$ となる。これを用いて解析を行った結果が Fig. 11(d) である。(c) と比較すると大きく耐力を失うタイミングは改善されているが、実験と比較するとまだ座屈発生 の判定が早く、これら詳細については今後の課題である。

5. 結果のまとめ

本研究では、曲げ破壊を発生する RC 柱脚供試体を作製し、帯鉄筋間隔、軸力および繰返し回数をパラメータとして繰返し載荷実験を行い、その特性を調べた。

また、ファイバー要素を用いた簡易解析法について

- (1) 拘束コンクリートにはその拘束効果を考慮する
- (2) 主鉄筋の座屈現象を考慮した応力-ひずみ関係を用いる
- (3) 基部鉄筋のひきぬけの影響を考慮する

の 3 点を新たに考慮して実験モデルに適用した結果、いくつかの課題はあるものの、その崩壊に至る挙動を考

めることが可能であることがわかった。

本解析法は、Fig. 11 の解析例をとっても普及型のパーソナルコンピュータを用いて容易に解析を行うことができるため、曲げ破壊を発生して崩壊に至るまでの橋脚の簡易解析法として十分に実用性があることがわかった。

参考文献

- 1) S. Komatsu, T. Sakimoto : Nonlinear Analysis of Spatial Frames Consisting of Members with Closed Cross Sections, Proc. of JSCE, No.252, pp.143-157, 1976.8
- 2) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 第 2 次案, 平成 8 年 10 月
- 3) 中村 光, 二羽 淳一郎, 田辺 忠顕 : 鉄筋コンクリート柱の終局変位に関する解析的研究, 土木学会論文集 No.420/V-13, pp.115-124, 1990.8
- 4) 中村 光, 二羽 淳一郎, 田辺 忠顕 : 鉄筋の座屈が RC 構造のポストピーク挙動に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.337-342, 1992.6
- 5) 松本 進, 出口 秀史 : 鉄筋とコンクリートの相対引き抜け量の算定方法について, コンクリート工学, Vol.24, No.8, 1986.8
- 6) 吉田 徳雄, 畑中 重光, 上田 英明 : RC 柱・梁部材の圧縮筋の座屈開始ひずみについて

(1996 年 9 月 6 日受付)