

論文 付着すべりの影響を考慮した高強度 RC 柱の履歴性状の解析

孫 玉平*1・福原武史*2・北島英樹*2

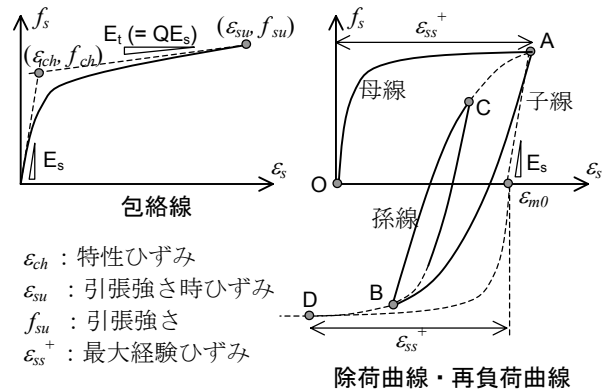
要旨：高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の繰り返し履歴性状を解析するために、材料特に高強度鉄筋の全応力—ひずみ関係モデルを提案したうえ、鉄筋の付着すべりの影響を考慮に入れる解析方法を提案した。既往の実験結果との比較から、本論で提案した材料の履歴モデルと解析方法を用いれば、高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート柱の終局耐力と変形能力のみならず、履歴ループごとにおけるエネルギー吸収能力と残留変形角なども精度よく評価できることが明らかになった。

キーワード：高強度鉄筋，コンクリート柱，付着すべり，履歴性状，エネルギー吸収能力

1. はじめに

高強度材料を鉄筋コンクリート構造に用いれば、構造の耐力増加が期待できるほか、部材断面サイズの縮小ないしそれに伴う地震入力の減少も期待できる。高強度材料の利用をさらに促進するためには、部材の耐力のみならず、性能基盤型耐震設計法が普及されつつあるなか、部材の繰り返し履歴性状を精度良く評価できる算定法の開発が必要となる。これまでに行われてきた数多くの高強度 RC 部材の研究を通じて比較的信頼性の高い終局耐力に関する算定方法が開発されているものの、高強度 RC 部材の繰り返し履歴性状を精度よく評価できる解析手法はまだ確立されていない。

平成 12 年の建築基準法の改正に伴い、鉄筋コンクリート構造の耐震設計は性能基盤型設計法に移行しつつあるなか、部材の性能設計を行う際に、終局耐力のみならず、部材の繰り返し履歴性状の特性を的確に把握することは必要不可欠である。そこで、本研究は、高強度鉄筋を用いた RC 部材の履歴挙動によく観察されているピンチング現象を評価するために、鉄筋の付着すべりの影響を考慮に入れた RC 部材の繰り返し履歴性能を評価するための手法を提案し、その妥当性を検証することを目的とする。



図一 鉄筋の全応力—ひずみ関係曲線

2. 高強度材料の繰り返し構成則の提案

高強度材料を用いた RC 部材の繰り返し履歴性状を解析するためには、材料の構成則、すなわち全応力—ひずみ関係モデルが必要となる。著者らはこれまでに帯筋や鋼板のような横拘束材により拘束されたコンクリートの繰り返し構成則を文献 1 と 2 にて提案してきた。一方、高強度鉄筋の全応力—ひずみ関係モデルについては、文献 3 と 4 に示すような提案がされているが、それらの既往の提案モデルはいずれもやや煩雑なものであることから、本論では、著者らが行った高強度鉄筋の繰り返し載荷試験²⁾に基づき、繰り返し計算を必要としない鉄筋の全応力—ひずみ関係を以下に提案する。

*1 神戸大学 工学部 教授 工博 (正会員)

*2 九州大学大学院 人間環境学府 都市共生デザイン専攻

明瞭な降伏棚を有する高強度鉄筋のそれについては文献3を参照されたいが、ここでは、明瞭な降伏棚を示さない高強度鉄筋の応力—ひずみ関係の包絡線について以下に定義する。

明瞭な降伏棚を持たない高強度鉄筋の応力—ひずみ関係の包絡線（以下母線と称す）は、図—1に示すような Menegotto-Pinto 型関数を用いて式(1)のように表せる。

$$f_s = E_s \varepsilon_s \left\{ Q + \frac{1-Q}{\left[1 + \left| \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{ch}} \right|^N \right]^{1/N}} \right\} \quad (1)$$

式(1)と図—1で、 f_s と ε_s は鉄筋の応力とひずみ、 E_s はヤング係数、 ε_{ch} は特性ひずみ、 Q は応力—ひずみ曲線のピーク点(ε_{su} , f_{su})での接線剛性 E_t と初期剛性 E_s の比、 N は曲線の湾曲度合いまたは曲率を表す湾曲係数である。 Q , N , および ε_{ch} の値は、文献5に従い以下のように定める。

$$Q = \frac{E_t}{E_s} = 0.1(\varepsilon_{su})^{-2.5}, \quad (\varepsilon_{su} \text{ in } \%) \quad (2)$$

$$N = 3 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ch} = \frac{f_{su} - QE_s \varepsilon_{su}}{E_s(1-Q)} \quad (4)$$

式(1)～式(4)より分かるように、高強度鉄筋の応力—ひずみ関係の母線は、引張試験曲線のピーク点の情報と鉄筋のヤング係数さえ分かれば完全に定まる。

除荷・再負荷曲線の式を決めるに先だって、除荷・再負荷曲線の終点の決め方を、①母線上の点Aから除荷・再負荷する場合、②子線上の点Bから除荷・再負荷する場合、および③孫線上の点Cから除荷・再負荷する場合、の三つのケースに分けて述べる（図—1を参照）。

ケース①の場合は、子線の終点は点Aから初期勾配 E_s で下ろした点(ε_{m0} , 0)を始点とする反対側の母線を引き、最大経験ひずみ ε_{ss}^+ の点Dを終点とする。点Dで反対側の母線に戻る。

ケース②の場合は、孫線(BCA)の終点は子線の始点Aとする。点Aで元の母線に戻る。

ケース③の場合は、上層曲線(ABD)の始点B

を終点とする。

除荷・再負荷曲線の終点を上述した方法で定めてから、包絡線と同様に除荷・再負荷曲線も終点をピーク点とする Menegotto-Pinto 型関数により定式化を行う。

本論では精度を損なわない前提で計算効率の向上を図るために、除荷・再負荷曲線の定義に必要なパラメーターである Q , N , ε_{ch} を収束計算のいらぬ方法で求めることを提案する。この方法で諸パラメーターを算定するにあたって、除荷・再負荷曲線の終点での接線剛性は、上層曲線の当該終点でのそれに近いものと仮定した。

除荷・再負荷曲線の始点のひずみを ε_0 、終点のひずみを ε_b 、戻上層曲線の Q を Q_R 、 N を N_R 、 ε_{ch} を $\varepsilon_{ch,R}$ と置くと、除荷・再負荷曲線の接線剛性 E_t は式(1)を微分することによって得られ、これを初期剛性 E_s で割ることにより式(5)から除荷・再負荷曲線の Q の値が求められる。

$$Q = Q_R + \frac{1-Q_R}{\left[1 + \left| \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_0}{\varepsilon_{ch,R} - \varepsilon_0} \right|^{N_R} \right]^{1/N_R}} - \frac{1-Q_R}{\left[1 + \left| \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_0}{\varepsilon_{ch,R} - \varepsilon_0} \right|^{N_R} \right]^{1+1/N_R}} \times \left| \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_0}{\varepsilon_{ch,R} - \varepsilon_0} \right|^{N_R} \quad (5)$$

除荷・再負荷曲線の湾曲係数 N については文献2で述べた試験結果に基づき、試行錯誤で得られた実験式である式(6)より求める。

$$N = \begin{cases} 3.0, & \varepsilon_b \leq 0 \\ 3.0 - 18\varepsilon_b, & \varepsilon_b > 0 \end{cases} \quad (6)$$

また除荷・再負荷曲線の特性ひずみ ε_{ch} は、除荷・再負荷曲線の終点がMenegotto-Pinto型関数のピーク点となるので、式(1)に始点と終点を代入すれば、以下のように求まる。

$$\varepsilon_{ch} = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_0}{\left\{ \left(\frac{1-Q}{\left[\frac{f_b - f_0}{\varepsilon_b - \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{E_s} - Q \right]} \right)^N - 1 \right\}^{1/N}} \quad (7)$$

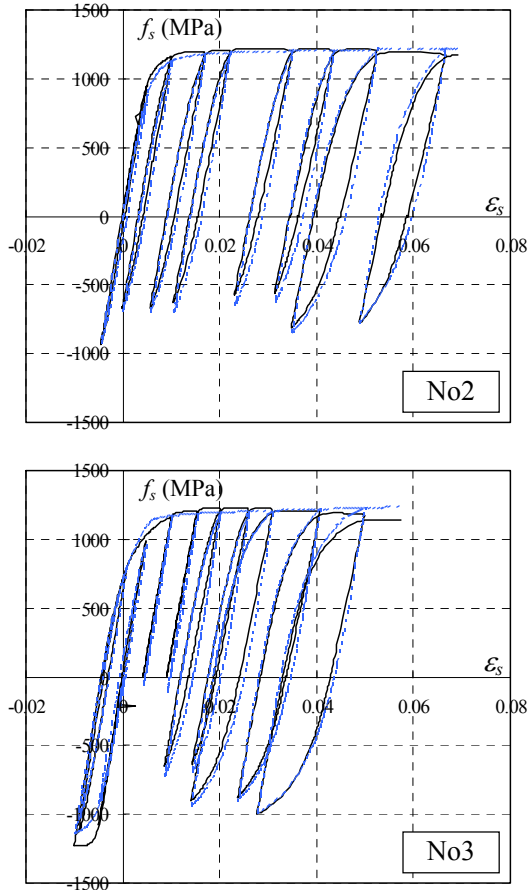


図-2 繰返し応力-ひずみ関係の比較

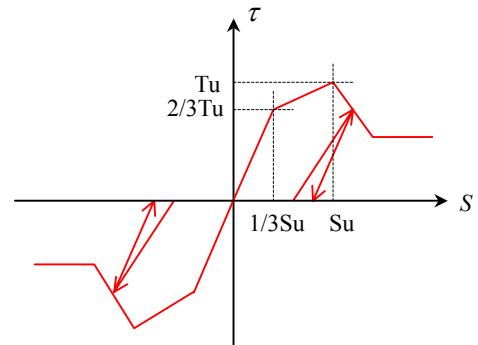
本提案モデルの適応性を検証するため、著者が文献2で述べた KSS785 級異型鉄筋の正負繰返し載荷試験の実験結果を本モデルによる計算結果との比較を図-2に示す。図-2においては、実線は試験結果を、破線は式(1)~式(7)により求めた計算結果を表す。

図-2より分かるように、本提案モデルは降伏棚を有しない高強度鉄筋の繰返し応力-ひずみ履歴性状を精度良く評価できる。

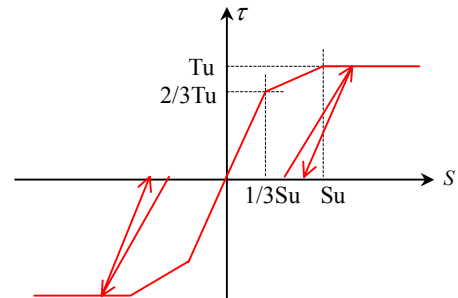
3. 付着すべりの影響を考慮した解析法

3.1 鉄筋の付着応力-すべり関係

鉄筋の付着応力-すべり関係の定式化を行った研究としては、島らによる研究⁶⁾や森田らによる研究⁷⁾等が挙げられる。本論では比較対象試験体は付着長さが比較的長いことから、島らが提案した十分長い付着長を有する鉄筋の付着応力-すべり関係である式(8)を準用して、付着



(a) 帯筋横拘束の場合



(b) 鋼管横拘束の場合

図-3 鉄筋の付着すべり履歴モデル

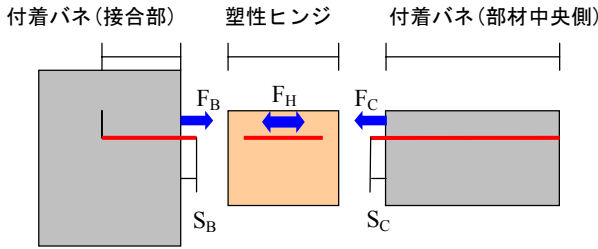
応力-すべり関係曲線のピーク点情報関数の極大値から求めることとする。

$$\tau = 0.9f_c^{2/3} \cdot \left(1 - e^{-40s^{0.6}}\right) \quad (8)$$

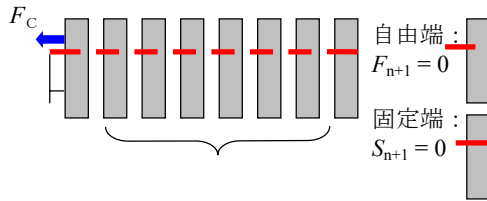
ここで f_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)で、 s は鉄筋のすべり量S(mm)を主筋の公称直径で割った無次元化量である。式(8)から付着強度Tuと付着強度時すべりSuを求めてから、式(8)で定義される付着応力-すべり関係曲線はピーク点後の応力下降現象が表現できないことを踏まえて、本論では、図-3に示すトリリニア付着履歴モデルを帯筋横拘束部材と鋼管横拘束部材にそれぞれ適用することとする。

3.2 付着バネモデル

付着すべりの影響を考慮するために、本論では多田・武田の研究⁸⁾に準じて、部材を材端に一樣な曲率を生じるヒンジ領域および付着性状を取り入れた有限個の付着バネで剛なコンクリートと鉄筋を結合させた付着バネ定着域に分けて、鉄筋の抜け出し量 S_0 からヒンジ域の鉄筋応力 F_0 を求める付着バネモデルを用いる。



(a) 部材の分割



(b) 付着バネ部の分割 (部材側)

図—4 付着バネモデルの概要

図—4には付着バネモデルの概要を示す。このモデルに基づき、付着すべりの影響を考慮に入れたヒンジ領域の主筋応力の算定手順を以下に述べる。

付着部材側から抜け出した部分の鉄筋の応力を F_0 と仮定し、隣接する付着バネ要素の長さを l 、鉄筋の面積を A_s 、鉄筋径を d_s とすれば、隣接する付着バネ要素の鉄筋の応力 F_1 とすべり量 S_1 は以下のように求まる。

$$F_1 = \frac{F_0 \cdot A_s - \tau(S_0) \cdot l \cdot \pi \cdot d_s}{A_s} = F_0 - \tau(S_0) \cdot \frac{4l}{d_s}$$

$$S_1 = S_0 - f_s^{-1}(F_1) \cdot l$$

ここで、 $\tau()$ は図—3に示す鉄筋の付着応力—すべり関数、 $f_s^{-1}()$ は鉄筋の応力からひずみを求める関数である。各バネ要素の力の釣り合いから、 $k+1$ 番目の付着バネ要素の応力 F_{k+1} とすべり量 S_{k+1} は式(9)と式(10)により求めることができる。

$$F_{k+1} = F_k - \tau(S_k) \cdot \frac{4l}{d_s} \quad (9)$$

$$S_{k+1} = S_k - f_s^{-1}(F_{k+1}) \cdot l \quad (10)$$

鉄筋応力 F_0 の収斂計算は、抜け出し側と反対側における鉄筋端点の境界条件（自由端の場合： $F_n = 0$ 、固定端の場合： $S_n = 0$ ）で制御する。

3.3 部材の繰返し履歴性状の解析手順

解析に当たって設ける基本仮定は以下の通りである。1)部材の変形は材端のヒンジ領域に集中する、2)ヒンジ領域長さ L_p は $1.0D$ (D は断面せい)とする、3)ヒンジ領域長にそって各主筋のひずみ分布は一定である、4)コンクリートは断面保持の仮定が成り立つ、5)材料の履歴構成則は本論第2節と文献1で述べたものに従う。

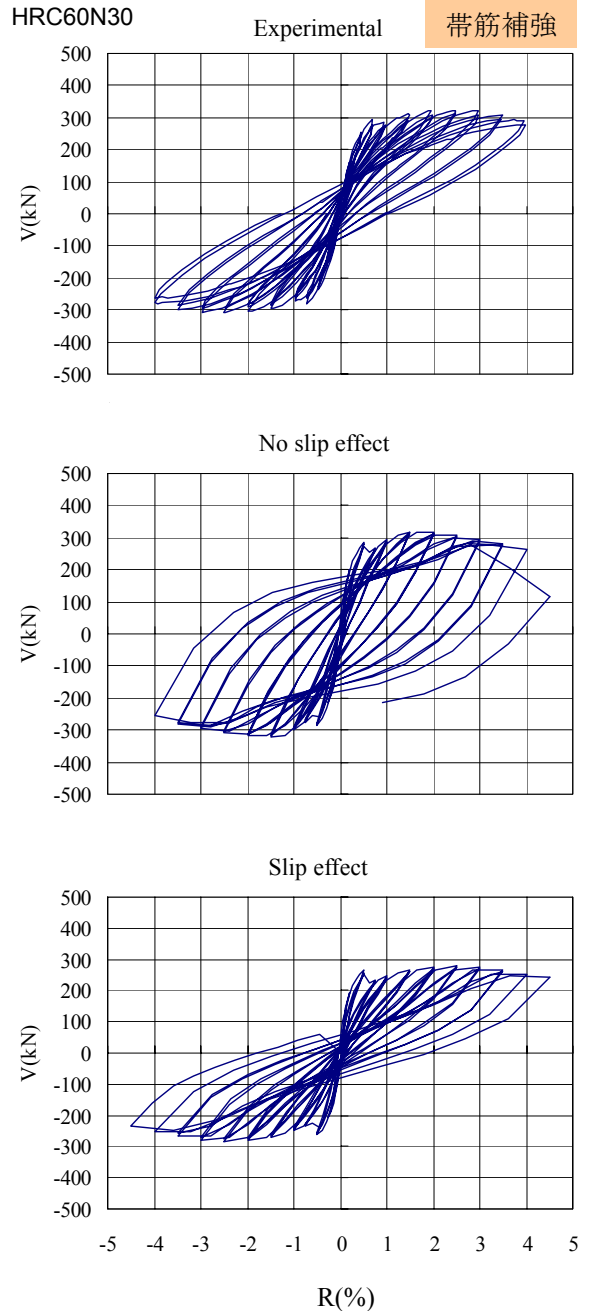
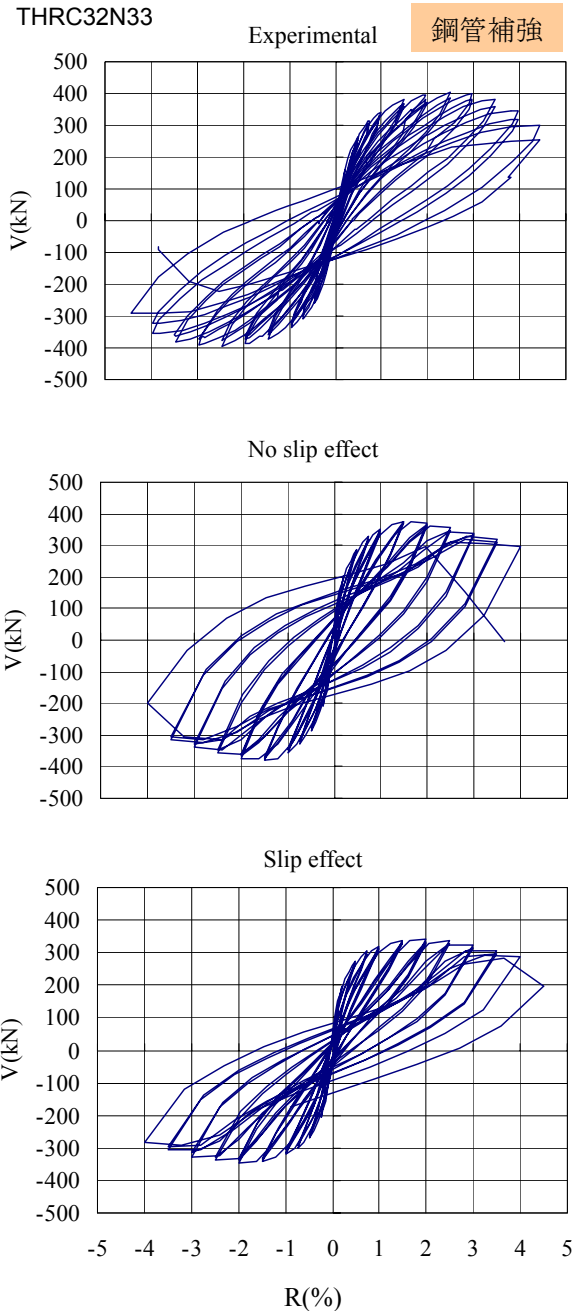
解析手順は次のとおりである。

- 1) 部材の変形角を R として、集中ヒンジモデルを適用すると、塑性ヒンジ領域での曲率 ϕ が次式から得られる。

$$R = \phi \cdot L_p \left(1 - \frac{L_p}{2L} \right)$$

ここで、 L は柱のせん断スパンである。

- 2) ヒンジ領域の断面中央ひずみ ϵ_{c0} を仮定し、1)で求めた曲率から仮定4)に従い、ヒンジ領域のコンクリートのひずみ分布 ϵ_c を得る。
- 3) 基礎側のすべり量 S_B を仮定し、3.2節で示した付着バネモデルにより鉄筋応力 F_B を求める。(図—4(a)を参照)
- 4) $F_H = F_B$ が成立するので、これより塑性ヒンジ領域の主筋ひずみ $\epsilon_s = f_s^{-1}(F_H)$ が得られる。
- 5) 4)で得られた ϵ_s から、次式より S_C を求める。
$$S_C = S_B + (\epsilon_c - \epsilon_s) \cdot L_p$$
- 6) S_C から3)と同様の手順で F_C を得る。
- 7) ここで、主筋の応力は、 $F_B = F_C = F_H$ を満たせば、2)で仮定した断面中央ひずみに対応する主筋のひずみが ϵ_s となる。そうでなければ新しい S_B を仮定し、ステップ3)に戻る。
- 8) 各主筋に対して2)~7)の手順を繰り返せば、全ての主筋のひずみ ϵ_s が得られる。そして、材料の構成則から鉄筋やコンクリートの応力ないし両者が負担する軸力を計算し、断面の軸力の釣り合いを満たせば、次のステップに進むが、そうでないなら新たな断面中央ひずみ ϵ_{c0} を仮定し直して2)へ戻る。
- 9) 以上の手順から得られたヒンジ領域のコンクリートの応力 f_c と主筋の応力 f_s を、式(11)に代入し断面中央のモーメント M を求めて



図—5 高強度RC柱の繰り返し履歴性状の比較

から、式(12)で水平力 V を求める。

$$M = \sum_{i=1}^n A_c \cdot f_c \cdot h_c + \sum_{j=1}^{n_s} A_s \cdot f_s \cdot h_s \quad (11)$$

$$V = \frac{M}{L} - P \cdot R \quad (12)$$

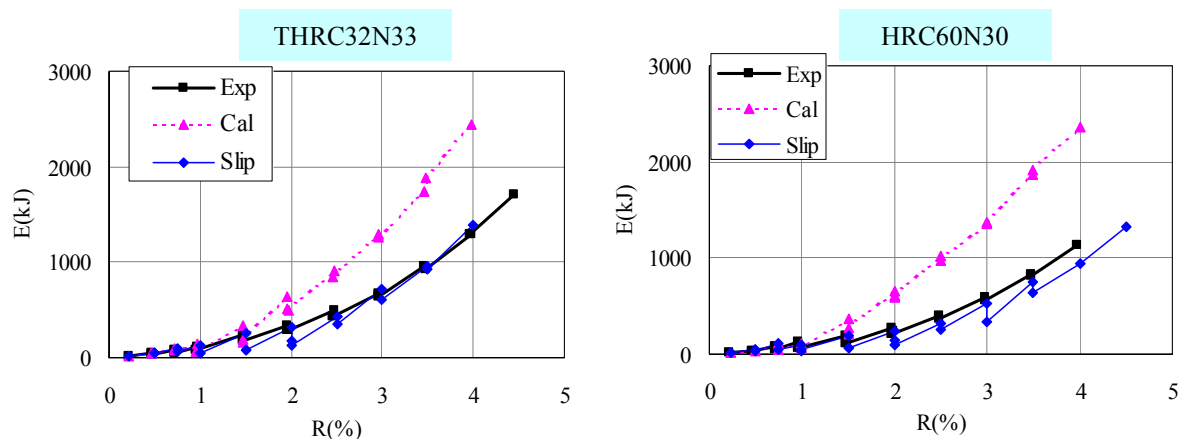
ここで、 h_c は各コンクリートファイバーの断面中央軸までの距離、 h_s は各鉄筋の断面中央軸までの距離、 P は軸荷力である。

変形角 R を所定目標値に達するまで漸増させ

て、1)~9)までの手順を繰り返せば、部材の水平力-部材角関係が求まる。

4. 提案手法の妥当性の検証

本論で提案した解析方法の妥当性を検証するために、既往の実験結果との比較を行う。比較対象試験体は、著者が文献9で述べた、250mm平方の断面でせん断スパン比が 2.5 のRC柱である。圧縮強度が 80MPa のコンクリートと降伏点応力が 930MPa の高強度異形主筋 (KSS785、



図—6 エネルギー吸収能力の比較

D13) を用いて試験体は製作されており、一定軸力下における繰り返し曲げせん断力を受けた。試験体の詳細に関しては文献9を参照されたい。

図—5には水平力—部材角履歴関係の比較結果を示す。上から順に実験結果、付着すべりの影響を無視した計算結果、とその影響を考慮に入れた計算結果がプロットされている。図—5より分かるように、付着すべりの影響を考慮しない場合は、履歴曲線における除荷剛性と残留部材角については実験値との差が顕著であるが、付着すべりの影響を考慮した解析結果は、繰り返し履歴性状と残留変形角のすべての面において、実験結果を精度よく評価している。

付着すべりの影響をより明確に反映したのは図—6に示す各部材角レベルにおけるサイクルごとのエネルギー吸収能力の比較結果である。図—6から分かるように、付着すべりの影響を考慮した場合は、解析が実験結果を精度よく評価できている。一方、付着すべりの影響を考慮しない場合は、高強度材料を用いたRC部材のエネルギー吸収能力が過大に評価されることが分かる。このことはエネルギー吸収能力に基づく現行の性能基盤型耐震性能評価法（限界耐力算定法）を高強度材料を用いたRC構造へ適用する際に、付着すべりの影響を適切に考慮に入れなければ、構造の耐震性能を危険側に評価する恐れがあるので、注意を要する。

結論

付着すべりの影響を考慮に入れた、高強度材料を用いたRC部材の繰り返し履歴性状の解析方法を提案した。既往の実験結果と比較した結果、本提案方法による計算結果は高強度鉄筋の使用に起因する部材の繰り返し履歴性状に見られるピンチング現象のみならず、部材の各変形レベルにおけるエネルギー吸収能力をも精度よく評価できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 崎野健治, 孫玉平: 日本建築学会構造系論文集第461号, pp.95~104, 1994.7
- 2) 北島英樹, 他: 日本建築学会九州支部研究報告第44号, pp.349~352, 2005.4
- 3) J.B. Mander, *Research Report No. 84-2*, Canterbury University, 1984
- 4) V. Ciampi, et al., *Research No. UCB/EERC-82/83*, Earthquake Eng. Re. Center, UC Berkeley, 1982
- 5) 孫玉平, 他: コンクリート工学年次論文集第26巻, No. 2, pp. 769~774, 2004.6
- 6) 島弘, 他: 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.165-174, 1987.2
- 7) 森田司郎, 他: 日本建築学会構造系論文集第229号, pp. 15~24, 1975.3
- 8) 多田 利正, 他: 日本建築学会構造系論文集第351号, pp. 22~30, 1985.5
- 9) 松尾英典, 他: コンクリート工学年次論文集第26巻, No. 2, pp. 775~780, 2004.6