

# 論文 スパイラル溝を有する超高強度鉄筋の付着特性のモデル化と柱部材の履歴解析への応用

船戸 佑樹\*1・孫 玉平\*2・竹内 崇\*3・蔡 高創\*4

**要旨:** スパイラル状の溝を有する超高強度鉄筋の付着性状を調べるために、載荷履歴、鉄筋の表面形状、付着長を実験変数とした付着引抜き試験を実施し、実験結果を元に付着の完全履歴モデルの構築を行った。また、提案した付着履歴モデルを主筋の付着すべりの影響を考慮できる分割要素解析法へ応用させた結果、本提案モデルを用いれば、スパイラル溝を有する超高強度鉄筋を用いた RC 柱の履歴挙動のほか、残留変形やエネルギー吸収性能などが精度良く評価できることが明らかになった。

**キーワード:** 引抜き, 付着特性, 超高強度鉄筋, 履歴解析, 付加拘束

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、構造設計では安全性だけでなく地震後の修復性及び使用性等の性能も重視されるようになってきている。著者らは、修復性に優れた RC 部材の開発を目的として、スパイラル状の溝を有する超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱の履歴性状に関する実験的研究を行い、そのような柱は高い原点指向性を有することを示した<sup>1)-3)</sup>。しかし、柱の性能解析においては、主筋に用いたスパイラル状の溝を有する超高強度鉄筋の付着履歴特性が把握されていないこと等から、履歴性状を適切に評価できていなかった。

本論では上述したことを踏まえ、まずスパイラル状の溝を有する鉄筋の付着特性を調べることを目的に、鉄筋の表面形状を主な実験変数とした付着引抜き試験を行う。次に、その実験結果に基づき部材の性能解析に必要な付着応力-すべり量関係の履歴モデルを構築する。さらには、構築したモデルを RC 柱部材の付着すべりを考慮した解析方法に応用し、既往の研究<sup>3)</sup>との比較により、モデルの妥当性の検証を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

本実験で用いた試験体の一覧を表-1 に、試験体寸法及び載荷装置を図-1, 図-2 にそれぞれ示す。また、表-2, 表-3 に材料特性を示す。足立らの研究<sup>4)</sup>を参考に、変位計を設置し、自由端すべり量を測定することを目的とした開口部を持つ試験体を作成した。付着区間は開口部に挟まれた部分とし、付着区間の両端部に 50mm の付着を除去した非定着域を設けた。試験体の両端部は塩ビ管により付着を除去している。

実験変数は鉄筋の表面形状、載荷履歴、付着長さである。鉄筋は図-3 に示すように、スパイラル状の溝を有する RB12.6 の超高強度鉄筋 SBPDN1275/1420 (以降、SBPDN 鉄筋) と、その比較対象である U12.6 の SBPDN 鉄筋にネジを径 13.1mm、ピッチ 1.5mm で転造したもの (以降、SBPDN-TR 鉄筋) 及び、D13 の異形鉄筋を焼き入れし、降伏点を上昇させた鉄筋 (以降、USD 鉄筋) の 3 種である。載荷履歴は単調載荷と漸増繰返し載荷の 2 種で、繰返し載荷でのすべり量は  $S=\pm 0.5, \pm 1.0, \pm 1.5, \pm 2.0$ ,

表-1 試験体一覧と主な実験結果

試験体	鉄筋種類	載荷履歴	付着長	$\tau_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$S_{\tau_{max}}$ (mm)
SN-M-10d	SBPDN	単調	10d (126mm)	0.56	0.008
SN-C-10d		繰返し		1.14	0.011
SN-M-30d		単調	30d (378mm)	3.15	0.023
SN-C-30d		繰返し		2.30	0.016
SNTR-M-10d	SBPDN	単調	10d	21.8	0.194
SNTR-C-10d	-TR	繰返し	(126mm)	18.7	0.212
USD-M-10d	USD	単調	10d	14.1	0.552
USD-C-10d		繰返し		(130mm)	15.8

ここに、 $\tau_{max}$ : 最大付着応力,  $S_{\tau_{max}}$ : 最大付着応力時すべり量, d: 鉄筋径

表-2 コンクリート材料特性

$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )
41.1	3.08	33.8

ここに、 $f'_c$ : コンクリートシリンダー強度,  $f_t$ : 引張割裂強度,  $E_c$ :  $1/3 f'_c$  割線弾性係数

表-3 鉄筋材料特性

	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )
SBPDN	1425	1475	198.4
SBPDN-TR	1450	1509	212.0
USD	968	1034	182.5

ここに、 $f_y$ : 0.2%オフセット降伏点応力,  $f_u$ : 引張強度,  $E_s$ : 初期弾性係数

- \*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)
- \*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)
- \*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)
- \*4 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

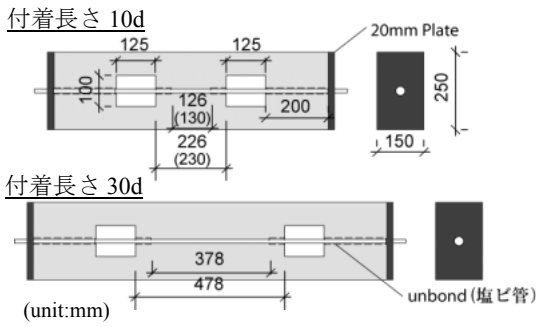


図-1 試験体詳細

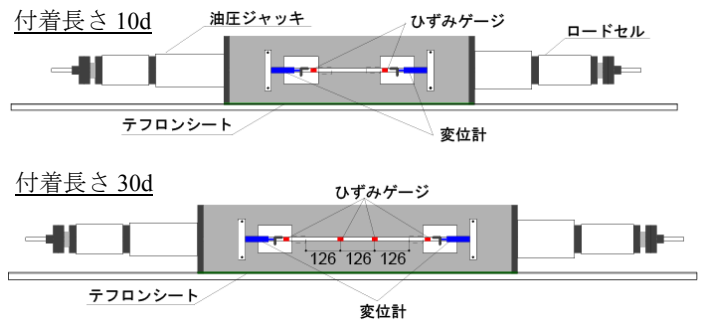


図-2 荷重装置及び計測装置



(a) SBPDN 鉄筋



(b) SBPDN-TR 鉄筋



(c) USD 鉄筋

図-3 使用した鉄筋の表面形状

±2.5, ±3.0, ±3.5 及び±4.0mm とした。また既往の付着実験研究では、鉄筋は荷重端近傍において付着強度が小さくなること<sup>2)</sup>や、端面近傍では付着の乱れが発生しやすいこと<sup>3)</sup>が報告されていることを踏まえ、試験体の変数として付着長さ 10d (d: 鉄筋径)に加えて、30d も設定した。付着長さ 30d の試験体は上述の影響を少なくするため、その中央部区間 126mm (10d) を測定区間とした。

## 2.2 荷重方法及び測定方法

図-2 に荷重装置及び計測装置の配置状況を示す。試験体の端部に配置した油圧ジャッキにより、鉄筋に軸引張力を作用させ、引抜き試験を行った。繰返し荷重時は、油圧ジャッキを試験体の両側に配置し、交互に荷重を行った。荷重端の反対側(引き抜かれる側)の支持条件は自由端となるようにした。

本実験では、ロードセルを用いてジャッキ位置での、開口部の鉄筋にひずみゲージを貼付することにより同位置での鉄筋のひずみを測定した。また、付着長さ 30d の試験体は図-2 に示す位置にひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは 1 か所につき表裏 2 枚貼付し、各位置におけるひずみの値は 2 枚の平均値を取った。開口部にはそれぞれの中央で鉄筋に金属製アングルを取り付け、試験体に取り付けられた変位計固定器具との相対変位を測定した。変位計は開口部 1ヶ所につき 2 個を取り付けた。

## 2.3 付着応力(τ)とすべり量(S)の計算方法

付着応力 $\tau$ は 2 点間の鉄筋ひずみの差から求めた。付着長さ 10d の試験体については両開口部での鉄筋ひずみの測定値を、付着長さ 30d の試験体については試験体中央部 2ヶ所の鉄筋ひずみの測定値を用いた。付着応力はひずみの測定点の間で一様に分布していると仮定すれば、式(1)により求めることができる。

$$\tau = \frac{\Delta \varepsilon_S \cdot E_S \cdot A_S}{\pi \cdot L \cdot D_S} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_S$ : 2か所の鉄筋ひずみの差、 $E_S$ : 鉄筋の初期弾性係数、 $A_S$ : 鉄筋の公称断面積、 $L$ : 測定区間長さ、 $D_S$ :

鉄筋の公称直径である。

すべり量 $S$ はコンクリートを剛とみなして、試験体中央での鉄筋の移動量とし、式(2)に示すように自由端すべり量にひずみ積分値を加えることで求めた。ここで、ひずみは直線分布と仮定した。自由端すべり量は開口部に取り付けられた変位計の平均値とした。なお、自由端側のひずみはほぼ 0 であることを確認した。

$$S = S_0 + \int_0^l \varepsilon_S dx \quad (2)$$

ここで $S_0$ : 自由端すべり量、 $\varepsilon_S$ : 鉄筋ひずみ、 $l$ : 自由端から測定区間中央部までの長さである。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 付着応力(τ)ーすべり量(S)関係

図-4 に実験で得られた各試験体の付着応力(τ)ーすべり量(S)関係を、表-1 に最大付着応力 $\tau_{max}$ 及び最大付着応力時のすべり量 $S_{\tau_{max}}$ を示す。

#### (a) SBPDN 鉄筋 (図-4(a)~(d))

単調荷重を受ける SBPDN 鉄筋では、付着応力が最大値に達した直後、すべり量が急増する現象が見られた。その後、すべり量の増大に従い徐々に付着応力が低下した。また、繰返し荷重では、一度付着応力が最大値を経験すると負側初期荷重時に十分な付着抵抗を発揮できない現象が見られた。これは、SBPDN 鉄筋の最大付着応力が鉄筋とコンクリートの接着作用によって決定されており、負側初期荷重時には、接着作用がなくなり摩擦作用が付着抵抗の主たるものとなったためと考えられる。

繰返し荷重の試験体の $\tau$ - $S$ 関係は、第 2, 第 4 象限において付着応力が概ね一定の値に収束し、再負荷時には $S=0$ mm 付近から剛性が回復する傾向を示している。また図 4-(b)より、すべり量が大きくなるにつれて付着応力が一定の値に収束していく傾向が見られる。これは、接着作用が完全に失われ、付着抵抗が摩擦作用のみとなったためと推測される。

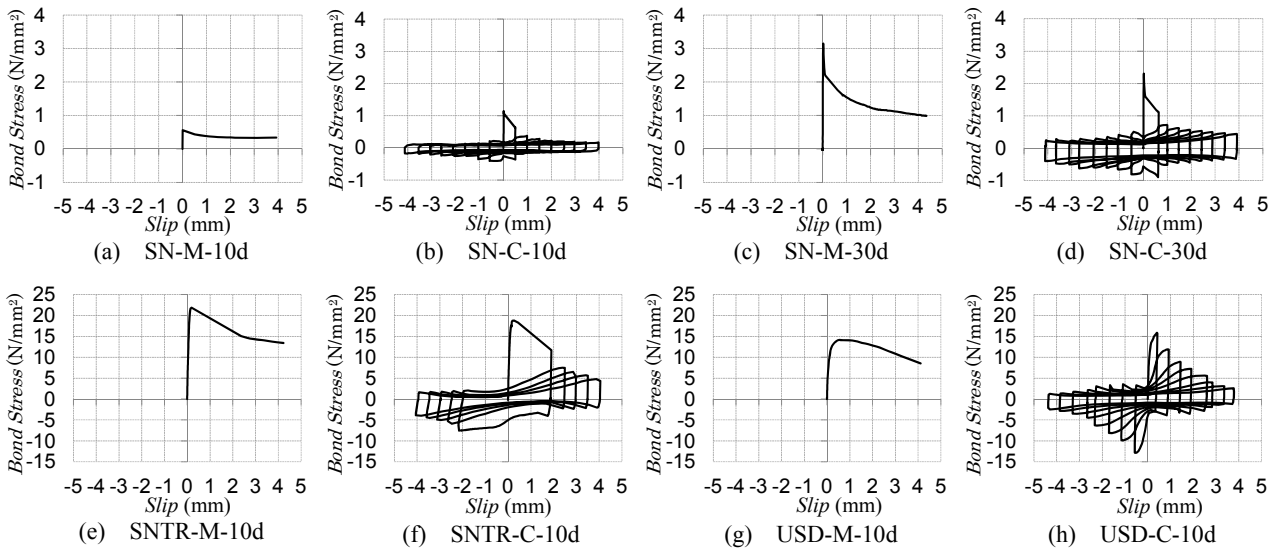


図-4 付着応力-すべり量関係

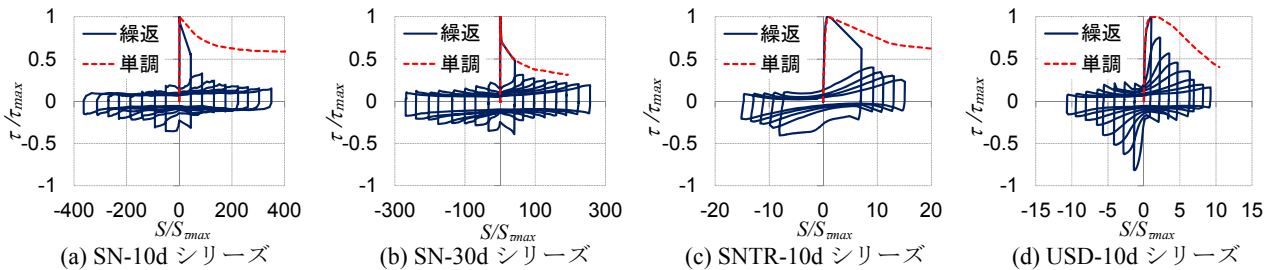


図-5 正規化した付着応力-すべり量関係

また、30dの試験体の $\tau_{max}$ が10dの試験体のそれより大きい値を示した。これは、付着長さの違いによる影響や、付着長さ30dでは試験体中央部で測定したことで、端面近傍の付着の乱れの影響を除去できたためと思われる。実部材における鉄筋の付着性状を加味すれば、検長30dの試験体の $\tau_{max}$ をSBPDN鉄筋の付着強度とすることが妥当であるといえる。

#### (b) SBPDN-TR 鉄筋 (図-4(e), (f))

SBPDN-TR鉄筋では、付着応力が $20\text{N/mm}^2$ 付近で最大値に達した直後、すべり量が急激に増加する現象が見られた。SNTR-C-10dでは、最大値を経験した後にすべり量が $2.0\text{mm}$ 付近まで急増したため、所定の繰返し荷重を行うことができず、 $2.0\text{mm}$ からの漸増荷重とした。SNシリーズと同様に、繰返し荷重試験体の負側初期荷重時には正側初期荷重時に比べ十分な付着抵抗を発揮しなかった。また、荷重ピーク後に、反対側に荷重する場合は $S=\pm 1.0\text{mm}$ 付近で付着応力が最少となり、そこから徐々に剛性が回復する傾向が見られた。

SBPDN-TR鉄筋はネジが転造されていることから、鉄筋の付着機構はネジとコンクリートのかみ合い作用が支配的となり、付着強度の大幅上昇につながったと考えられる。しかし、ネジ間隔が異形鉄筋のふし間隔に比べ非常に小さいことから、ネジの外縁に沿って付着せん断破壊が発生し、急激なすべり量の増加、及び負側初期荷重

時の付着抵抗の低下につながったと推測される。

#### (c) USD 鉄筋 (図-4(g), (h))

USD鉄筋では、付着応力が $15\text{N/mm}^2$ 付近で最大値を迎えてから、単調荷重では緩やかに付着応力が低下した。繰返し荷重では、負側初期荷重においても十分な付着抵抗が発揮されている。逆方向荷重時には $S=0\text{mm}$ 付近から剛性を回復していく傾向が見られた。USDシリーズでは、すべり量の増大に従い、付着応力が緩やかに低下していくことから、ふし間のコンクリートの局部圧縮破壊が支圧によって進行していったものと考えられる。

### 3.2 鉄筋の表面形状が $\tau_{max}$ と $S_{\tau_{max}}$ に及ぼす影響

表-1より、ふしのあるUSD鉄筋に比べると、SBPDN鉄筋はふしとコンクリートの機械的かみ合いがないことから、 $\tau_{max}$ 及び $S_{\tau_{max}}$ が非常に小さいことがわかる。一方、ネジを転造したSBPDN-TR鉄筋の $\tau_{max}$ はUSD鉄筋に比べ大きい、 $S_{\tau_{max}}$ はUSD鉄筋に比べ小さかった。

### 3.3 荷重履歴による影響

図-5に $\tau_{max}$ 及び $S_{\tau_{max}}$ で除することによって、正規化した $\tau$ - $S$ 関係を示す。繰返し荷重試験の $\tau$ - $S$ 関係は、繰返し荷重による付着劣化のために、単調荷重試験結果と比べて、ピーク点後の付着抵抗が低くなっている。このことは $\tau$ - $S$ 関係のモデル化において、単調荷重曲線と繰返し荷重時の包絡線モデルを区別する必要があることを示唆している。

#### 4. SBPDN 鉄筋の付着応力-すべり量関係のモデル化

SBPDN 鉄筋を主筋に用いた RC 柱の耐震性能を把握するためには、前節の実験より得られた  $\tau$ - $S$  関係を計算に便利な形でモデル化する必要がある。本節では、SBPDN 鉄筋の  $\tau$ - $S$  関係を実験結果に基づき、文献 5) を参考に直線群によってモデル化を行う。

##### 4.1 包絡線

本論で提案する単調載荷時の  $\tau$ - $S$  関係及び繰返し載荷時の包絡線を図-6(a)に示す。前述したように、一度付着応力が最大値を経験すると、付着劣化のためにそれ以降の  $\tau$ - $S$  関係包絡線が単調載荷時の  $\tau$ - $S$  関係まで復帰しない。従って、本論では繰返し載荷の包絡線は単調載荷の曲線と異なるものとして、付着応力が最大値を経験した後の繰返し載荷時には、その包絡線に移行するものとする。単調及び繰返しの載荷時の  $\tau$ - $S$  関係を制御する特性点 A, B, C, D の座標は次のように定義する。

$$A (S, \tau) = (1/3S_{\tau_{max}}, 2/3\tau_{max})$$

$$B (S, \tau) = (S_{\tau_{max}}, \tau_{max})$$

$$C (S, \tau) = (5S_{\tau_{max}}, 3/5\tau_{max})$$

$$D (S, \tau) = (1/5S_{\tau_{max}}, 2/5\tau_{max})$$

なお、下り勾配は  $\tau_{max}/1000S_{\tau_{max}}$  とし、下り勾配直線の終点の  $y$  座標を  $\tau = \alpha \cdot \tau_{max}$  とする。その後の包絡線は  $\tau = \alpha \cdot \tau_{max}$  の水平軸に平行な直線となる。

##### 4.2 ピーク点を迎えるまでの除荷及び再負荷経路

図-6(b)にピーク点を迎えるまでの除荷・再負荷経路を示す。包絡線上の任意の点 E から除荷する場合、点 F ( $\tau = -\alpha \cdot \tau_{max}$ ) まで初期剛性で降下し、その後  $S$  軸 (水平) に平行に移動し、反対側の包絡線に復帰する。(経路例: E→F→G→A')

除荷経路中に再負荷の場合は、初期剛性に沿って包絡線に復帰する。(経路例: E→F→H→I→B)

なお、 $\alpha$  の値は  $\tau$ - $S$  関係の第 2, 第 4 象限における付着応力及び、第 1, 第 2 象限における付着応力の漸近線を表すもので、実験結果から  $\alpha$  を 0.13 とする。

##### 4.3 ピーク点後の除荷及び再負荷

図-6(c)にピーク点後の除荷・再負荷経路を示す。除荷は初期剛性に従い、点 K ( $\tau = -\alpha \cdot \tau_{max}$ ) まで降下する。過去に負側 (初期載荷が負側なら正側) 載荷が行われていない場合は  $S$  軸に平行に移動した後、第 1, 第 3 象限において繰返し載荷の包絡線を移動する。(経路例: J→K→L→D'→M)

過去に載荷が行われている場合は、経験最大すべり量を繰返し包絡線の式に代入し、得られた付着応力の値を  $\beta$  倍した点 Q と  $\tau$  軸切片の点 O をつなぐ直線を移動し、繰返し包絡線に戻る。(経路例: M→N→O→Q→P)

点 Q は過去の最大すべり点 J ( $S_j, \tau_j$ ) から求める。点 J は図では単調載荷の包絡線上であるが、繰返し包絡

線の場合でも同様である。この時、点 Q は直線 JK 上にあり、点 Q の付着応力  $\tau_Q$  は式(3)で表される。

$$\tau_Q = \beta \cdot f_{cycle}(S_j) \quad (3)$$

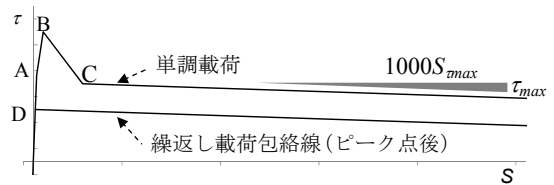
ここで、 $f_{cycle}()$  は繰返し包絡線の数式を表す。また、 $\beta$  の値は同じすべり量における付着応力の低下率を表し、実験結果から  $\beta$  を 0.8 とする。

除荷中に再負荷を行う場合は、初期剛性で再負荷を行い、直線 OP に乗る。(経路例: J→K→R→S→Q→P)

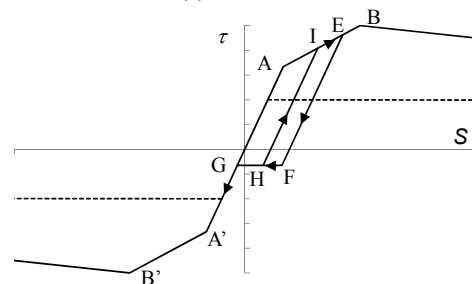
図-6(d)のようにすべり量が大きくなると  $\tau = \pm \alpha \cdot \tau_{max}$  に付着応力が漸近すると考え、直線 XY の勾配を 0 にする。これは解析上で図-6(c)における直線 OP の勾配が負になる場合、つまり  $\tau_Q < \alpha \cdot \tau_{max}$  となる場合を回避するケースと考えるとよい。(経路例: T→U→V→W→X→Y)

#### 4.4 提案モデルと実験結果の比較

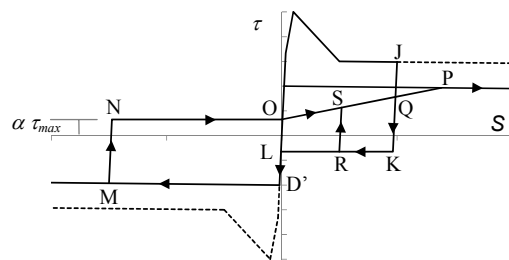
構築した履歴モデルと試験体 SN-C-10d 及び試験体 SN-C-30d の実験結果を比較した  $\tau$ - $S$  関係を図-7に示す。



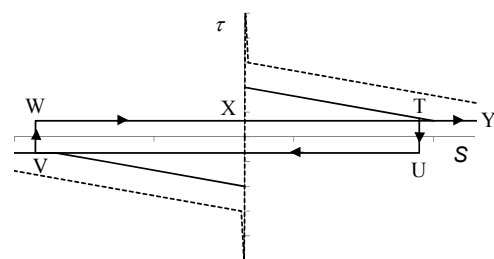
(a) 包絡線



(b) ピーク点を迎えるまでの除荷・再負荷経路例



(c) ピーク後の除荷・再負荷経路例



(d) ピーク点後の除荷・再負荷経路例 (付着応力漸近後)

図-6 付着応力-すべり量関係のモデル化

同図より、履歴モデルが実験結果を精度よく評価できることがわかる。

## 5. 柱部材の履歴挙動の解析への応用

### 5.1 解析概要

本節では既往の柱の実験<sup>3)</sup>を対象に、前節で提案した SBPDN 鉄筋の  $\tau$ - $S$  関係のモデルを分割要素解析<sup>6)</sup>に用いて主筋の付着すべりの影響を考慮した耐震性能の評価を行う。解析対象試験体は主筋に SBPDN 鉄筋を用い、曲げ型の破壊をした正方形 RC 柱で、軸力比 0.33、主筋比 2.4%、せん断スパン比 2.5 である。その他の試験体詳細及び解析仮定は文献 3) を参照されたい。解析に必要なコンクリートの応力-ひずみ関係は、NewRC 式<sup>7)</sup>により包絡線を定め、履歴モデルは北島らによって提案されたモデル<sup>8)</sup>を、主筋の応力-ひずみ関係には、Menegotto-Pinto 式に基づく履歴モデル<sup>7)</sup>を用いた。

前節で述べたように  $\tau_{max}$  及び  $S_{\tau_{max}}$  が分かれば SBPDN 鉄筋の  $\tau$ - $S$  関係は完全に決まる。本論では表-1 及び文献 2) で述べた付着引抜き試験結果に基づき、 $\tau_{max}=3.0\text{N/mm}^2$ 、 $S_{\tau_{max}}=0.015\text{mm}$  とした。一方で、鉄筋径やコンクリート強度、定着長さ等の影響により  $\tau_{max}$  及び  $S_{\tau_{max}}$  にばらつきが生じる可能性が考えられる。そこで  $\tau_{max}$  と  $S_{\tau_{max}}$  のばらつ

きによる影響を検討するために比較対象試験体に対して、 $\tau_{max}$  と  $S_{\tau_{max}}$  をパラメータとした履歴性状の比較解析を行った。図-8 と図-9 はその包絡線である。それらの図より  $\tau_{max}$  と  $S_{\tau_{max}}$  のばらつきが復元力特性に及ぼす影響は小さいことがわかる。特に  $S_{\tau_{max}}$  の影響は極めて小さい結果となった。従って、前述のピーク点を用いることで、柱部材の復元力特性を適切に予測できると考えられる。

### 5.2 解析結果と実験結果との比較

図-10 に主筋の付着すべりの影響を考慮した解析結果と実験結果の水平力-部材角関係、等価粘性減衰定数、残留部材角、鉄筋ひずみを比較したものと、及び解析により得られた主筋の  $\tau$ - $S$  関係を示す。図-10 には比較として完全付着の場合の解析の結果も載せている。図-10(a) より、付着すべりを考慮した解析は実験で得られた原点指向型の履歴性状を追跡できていることが分かる。また、等価粘性減衰定数や残留部材角、鉄筋ひずみについては実験結果を高精度に評価することができた。また図-10(e)より、SBPDN 鉄筋はすべりが非常に大きいこと、 $\tau$ - $S$  関係モデルの応力下降後部分が柱の繰返し性状に主なる影響を及ぼしていることが伺える。

完全付着の解析は実験耐力を過大評価しているのに対して、本解析は全体的に実験耐力を安全側に評価する結

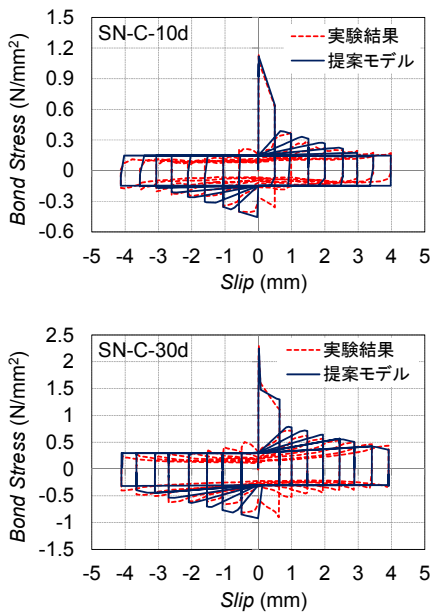


図-7 履歴モデルと実験結果との比較

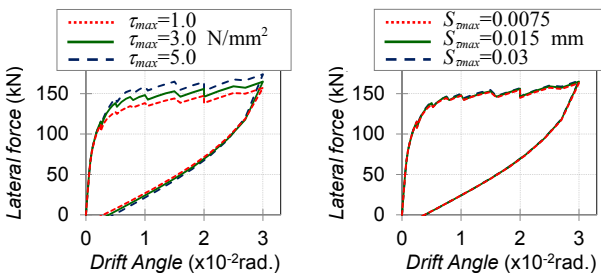
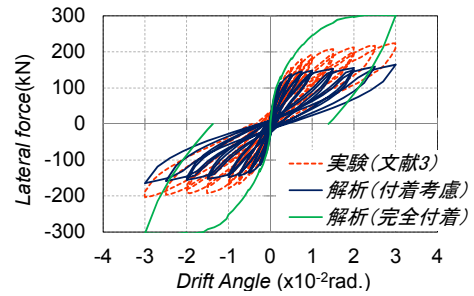
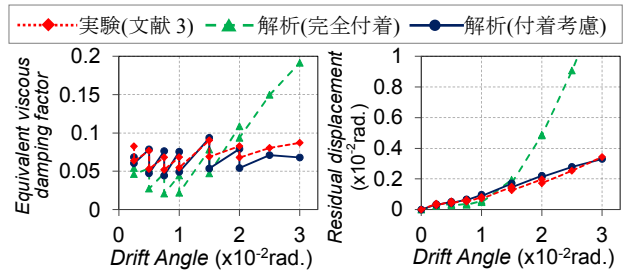


図-8  $\tau_{max}$  の影響

図-9  $S_{\tau_{max}}$  の影響

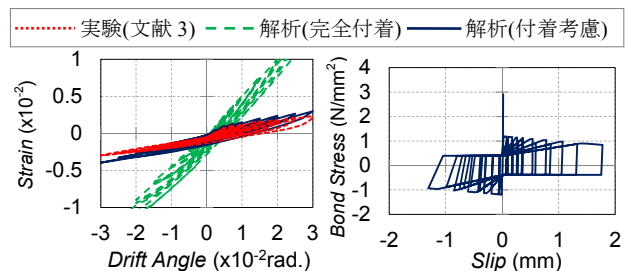


(a) 水平力-部材角関係



(b) 等価粘性減衰定数

(c) 残留部材角(正負平均)



(d) 鉄筋ひずみ

(e) 主筋の  $\tau$ - $S$  関係

図-10 解析結果と実験結果の比較

果となった。図-10(d)より主筋のひずみが評価できていることから、安全側の耐力評価の原因はコンクリートの性状に柱端部にある剛なるスタブの付加拘束の影響<sup>9)</sup>を考慮しなかったためと考えられる。

### 5.3 付加拘束の影響に対する検討

本節ではこの付加拘束の影響を検討してみる。付加拘束効果を考慮する方法としては、危険断面が材端から移動するものと考え、見かけ上のせん断スパンを用いて、計算された曲げ耐力を拡大する方法<sup>10)</sup>がある。しかしながら、このような方法は付加拘束の影響をコンクリートのみならず、鉄筋にも及ぼすという欠点がある。そこで本論では、その問題点を改善するため、付加拘束効果はコンクリートだけに影響を及ぼすものとして、文献9)に示される付加拘束による耐力上昇係数を、式(4)に示すように NewRC 式におけるコンクリートの強度上昇係数  $K$  の補正係数に置換することで、付加拘束効果を柱の履歴挙動解析において考慮する。

$$\frac{K_m}{K} = \begin{cases} 1.10 & n < 0.3 \\ 1.10 + 0.8(n - 0.3)^2 & n \geq 0.3 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $K$  は NewRC 式のコンクリート強度上昇係数計算値、 $K_m$  は補正後の強度上昇係数、 $n$  は軸力比である。

図-11 に付加拘束の考慮の有無を比較した、水平力-変位関係の包絡線を示す。同図は、付加拘束を考慮することで曲げ耐力をより精度良く評価する傾向を示す。このことは、付着強度の低い主筋を用いた RC 柱の曲げ耐力を的確に算定するためには付加拘束の影響を考慮する必要があることを示唆している。

## 6. まとめ

本論では、SBPDN 鉄筋の付着特性を実験により把握し、数値計算に必要なモデル化を行ったうえ、得られた履歴モデルを柱部材の履歴性状の解析に応用し、柱部材の実験結果と比較した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) SBPDN 鉄筋はふしのある鉄筋に比べ付着強度が低く、最大付着応力を経験すると反対側載荷時に発揮する付着耐力が低下する。また繰返し載荷の包絡線は単調載荷を受ける場合の  $\tau$ - $S$  曲線を下回る。
- 2) 実験結果をもとに、SBPDN 鉄筋の  $\tau$ - $S$  関係の履歴モデルの構築を行い、提案モデルは実験結果を精度よく評価することができる。
- 3) 提案した付着モデル及び付加拘束の効果を考慮した解析により、SBPDN 鉄筋を主筋に用いた RC 柱の履歴性状を精度よく追跡することが可能である。

以上が本論の結論であるが、 $\tau$ - $S$  関係則に用いる特性値  $\tau_{max}$ 、 $S_{\tau_{max}}$  は鉄筋径やコンクリート強度、定着長さなど様々な実験因子によって影響を受けると考えられる。これらの定量化は今後の課題である。

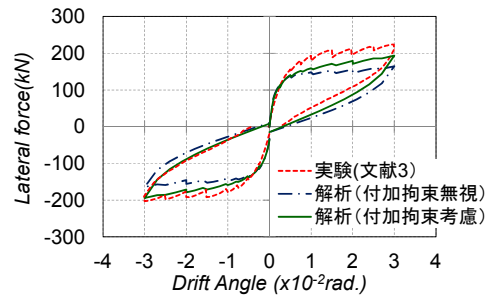


図-11 付加拘束の有無による影響

## 謝辞

試験体に使用した鉄筋は JFE テクノワイヤ株式会社、高周波熱錬株式会社、東京鐵鋼株式会社よりご提供頂いた。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 橘高将義, 他: 超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱部材の曲げせん断性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.79-84, 2010.7
- 2) 船戸佑樹, 他: 高復元性を有する高強度 RC 柱部材の付着すべりを考慮した履歴性状の解析, 第9回日中構造技術交流会論文集, pp.953-962, 2010.9
- 3) 仲井士門, 他: 主筋比及び軸力比が超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱の耐震性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.157-162, 2011.7
- 4) 足立将人, 他: PC 鋼より線の付着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.22, No.3, pp.865-870, 2000.6
- 5) 森田司郎, 他: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第229号, pp.15-24, 1975.3
- 6) 孫玉平, 他: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.619-624, 2006.7
- 7) 崎野健治, 他: 直線型横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, 第461号, pp.95-104, 1994.7
- 8) 北島英樹, 他: 高強度 RC 柱部材の耐震性能評価法の提案, 日本建築学会九州支部研究報告, 第44号, pp.349-352, 2005.3
- 9) 孫玉平, 他: Flexural behavior of High-Strength RC Columns Confined by Rectilinear Reinforcement, 日本建築学会構造系論文集, 第486号, pp.95-106, 1996.8
- 10) 福原武史, 他: 高強度鉄筋を用いた高強度 RC 部材および骨組みの耐震性能評価法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.195-196, 2005.9