

論文 高強度材料を用いた RC 部材の変形性能について

岡本 大^{*1}・佐藤 勉^{*2}・吉田幸司^{*3}・黒岩俊之^{*4}

要旨：高強度材料をRC部材に適用するためには、耐力や変形性能などの基本的な部材特性を明らかにし、設計に反映させることが必要である。そこで、高強度材料を用いた柱部材の変形性能を評価することを目的として交番載荷試験を行った。検討の結果、高強度材料を用いた部材の荷重-変位関係は、通常強度の材料を用いた部材と同様な設計式によって概ね評価できることが明らかとなった。

キーワード：高強度鉄筋、高強度コンクリート、柱部材、変形性能、耐震性能

1. はじめに

設計想定地震動の増大に伴った鉄筋の太径化、鉄筋本数の増加による過密配筋対策として、あるいは構造物の高耐久化などを目的として、高強度材料をRC部材に適用するための研究開発が行われてきている。

これまでに土木分野において高強度材料を実構造物に適用した事例としては、実験的な検討に基づき高強度鉄筋を帯鉄筋に採用し、帯鉄筋量を減少することで施工性を改善した例などが報告されてきているが¹⁾²⁾、高強度鉄筋を軸方向鉄筋に、あるいは高強度コンクリートを一般的なRC部材に適用した事例は少ない。

高強度材料をRC部材に適用するためには、耐力や変形性能などの基本的な部材特性を明らかにし、設計に反映させることが必要である。そこで、高強度材料を用いた柱部材の変形性能を評価することを目的として交番載荷試験を行った。

本論文では、交番載荷実験により求めた荷重-変位関係の包絡線および履歴曲線の形状をもとに、高強度材料を用いた柱部材の変形性能と現行の設計式の適用性について述べる。

2. 実験の概要

2.1 試験体の形状および諸元

実験を行った試験体の諸元を、表-1 および図-1 に示す。

実験のパラメータを帯鉄筋の強度、軸方向鉄筋の強度、コンクリート強度として、No.1～No.4 の合計 4 体の試験体について実験を行った。試験体の基本的な外形寸法はすべての試験体で同一であり、 $B \times H = 320 \times 320 \text{mm}$ の矩形断面、せん断スパン $L_a = 1200 \text{mm}$ とした。なお、No.1 については他の試験体と使用した載荷装置が異なるため外形が異なっているが、せん断スパン長などの主要な寸法は他の試験体と同一となっている。

試験体の配筋は、比較用の No.1 と帯鉄筋のみに高強度鉄筋を用いた No.2、および帯鉄筋と軸方向鉄筋の両方に高強度鉄筋を用いた No.3 において、曲げ耐力および曲げ・せん断耐力比ができるだけ等しくなるように決定した。No.4 は No.3 と同一配筋とし、目標強度を 80N/mm^2 としたコンクリートを用いたものである。なお、試験体設計時の耐力計算においては、鉄筋強度には規格値を、コンクリート強度

*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室長 工博 (正会員)

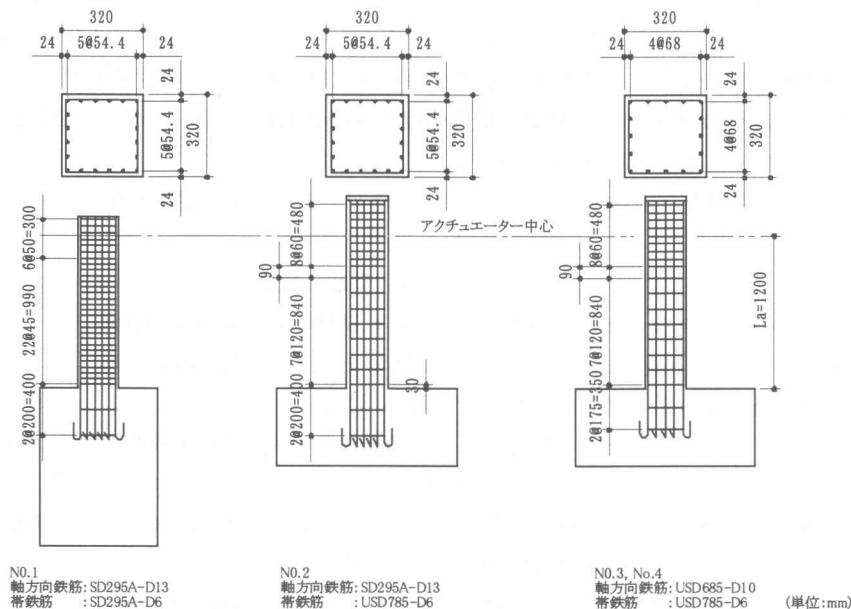
*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修

*4 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 工修 (正会員)

表-1 試験体の諸元

試験体	軸方向鉄筋	本数	p_s (%)	帯鉄筋	間隔 (mm)	p_w (%)	$V_u \cdot La/Mu$
No.1	SD295A-D13	20本	2.68	SD295A-D6 (135° フック定着)	ctc45	0.44	2.33
No.2	SD295A-D13	20本	2.68	USD785-D6 (135° フック定着)	ctc120	0.16	2.32
No.3	USD685-D10	16本	1.20	USD785-D6 (溶接閉合型)	ctc120	0.16	2.06
No.4	USD685-D10	16本	1.20	USD785-D6 (溶接閉合型)	ctc120	0.16	2.25

p_s : 軸方向鉄筋比, p_w : 帯鉄筋比
 V_u : せん断耐力, La : せん断スパン長, Mu : 曲げ耐力



No.1
軸方向鉄筋: SD295A-D13
帯鉄筋 : SD295A-D6

No.2
軸方向鉄筋: SD295A-D13
帯鉄筋 : USD785-D6

No.3, No.4
軸方向鉄筋: USD685-D10
帯鉄筋 : USD785-D6 (単位:mm)

図-1 試験体の配筋

には予測値として, No.1~No.3 に関しては 24N/mm^2 を, No.4 には 80N/mm^2 を用いた。

帯鉄筋に高強度鉄筋を用いることで通常強度のものを用いた場合に比べて, 帯鉄筋比を 0.44% から 0.16% に減少している。また, 軸方向鉄筋に高強度鉄筋を使用することで, 軸方向鉄筋比を 2.68% から 1.20% に減少している。

試験体に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験結果をそれぞれ表-2, 表-3 に示す。

2.2 載荷方法

載荷は, 試験体上部に水平力を加えるカンチレバー式とし, 軸力は載荷していない。

載荷サイクルは, 軸方向鉄筋に SD295A を用いた No.1, No.2 に関しては, $0.5P_y$ (P_y : 降伏荷重の計算値), $0.75P_y$ を正負各 1 回ずつ繰り返す, その後 $1\delta_y$ (δ_y : 降伏変位), $2\delta_y$, $3\delta_y$... と降伏変位の整数倍を各 3 回ずつ繰り返す

表-2 鉄筋の材料試験結果

試験体	呼び名	降伏強度 f_y (N/mm ²)	弾性係数 E_s (N/mm ²)	引張強度 f_{su} (N/mm ²)
No.1	SD295A-D13	355	187000	515
	SD295A-D6	444	192000	576
No.2	SD295A-D13	368	195000	553
	USD785-D6	855	205000	861
No.3	USD685-D10	711	193000	891
	USD785-D6	1070	186000	1232
No.4	USD685-D10	711	193000	891
	USD785-D6	1070	186000	1232

表-3 コンクリートの材料試験結果

試験体	部位	呼び名	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	弾性係数 E_c (N/mm ²)
No.1	柱	18-15-10H	28.3	20400
	ラーチング	21-15-20H	33.9	-
No.2	柱	18-15-10H	17.8	20200
	ラーチング	21-15-20H	32.8	-
No.3	柱	18-15-10H	25.5	28700
	ラーチング	21-15-20H	23.2	-
No.4	柱	目標強度80N/mm ²	81.1	37000
	ラーチング	21-15-20H	23.0	-

す漸増定変位正負交番載荷とした。軸方向鉄筋に USD685 を用いた No.3, No.4 に関しては, 降伏変位が SD295A を用いた試験体に比べ 2 倍程度になることが事前の計算により予測され

たため、降伏以後の繰返しを $0.5\delta_y$ ピッチとして同様な変位における繰返し回数ができるだけ等しくなるようにした。

3. 実験結果

3.1 耐力

各試験体の降伏荷重および最大荷重の実験値と計算値の比較を表一4に示す。耐力計算はファイバーモデルを用いて、以下の条件で行った。

- (1) 降伏耐力は最外縁の軸方向鉄筋が材料試験における降伏ひずみに達した時点とする。
- (2) 鉄筋の降伏強度、弾性係数には、表一2に示す材料試験結果を使用する。
- (3) コンクリート強度には、表一3に示す載荷時点における圧縮強度を使用する。
- (4) コンクリートの終局ひずみは、No.1~No.3については $\epsilon'_{cu}=0.0035$ 、高強度コンクリートを用いた No.4 に関しては $\epsilon'_{cu}=0.0025$ として計算する。

表一4に示すように、高強度鉄筋を使用した No.2 および No.3 に関しても通常の RC 部材と同様な精度で降伏および最大耐力が計算されている。高強度コンクリートを使用した No.4 に関しても他の試験体と同様な精度で耐力を算定できている。

3.2 荷重-変位関係の履歴曲線

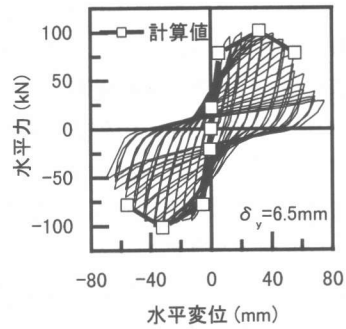
各試験体の荷重-変位履歴曲線の実験値と 3.3 に示す方法により求めた包絡線の計算値を図一2~図一5に合わせて示す。いずれの試験体においても計算値と実験値は概ね整合している。

帯鉄筋にのみ高強度鉄筋を使用した No.2 と No.1 とを比較すると、履歴ループはどちらも紡錘形であり、同様な破壊性状を示した。ただ

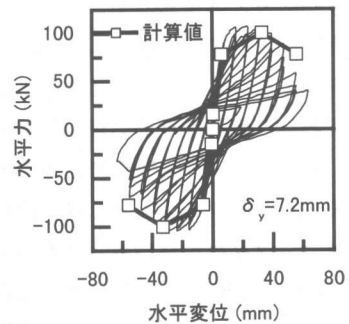
表一4 試験体耐力の実験値と計算値の比較

試験体	降伏荷重			最大荷重		
	Pycal (kN)	Pyexp (kN)	exp/cal	Pucal (kN)	Puexp (kN)	exp/cal
No.1	77.50	88.50	1.14	101.50	99.63	0.98
No.2	77.70	88.25	1.14	100.30	106.75	1.06
No.3	72.60	84.95	1.17	88.10	96.55	1.10
No.4	78.10	85.40	1.09	96.90	98.85	1.02

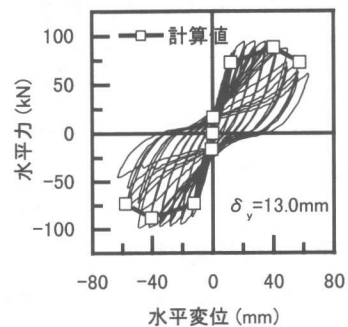
Pycal: 降伏荷重の実験値
 Pyexp: 降伏荷重の計算値
 Pucal: 最大荷重の実験値
 Puexp: 最大荷重の計算値



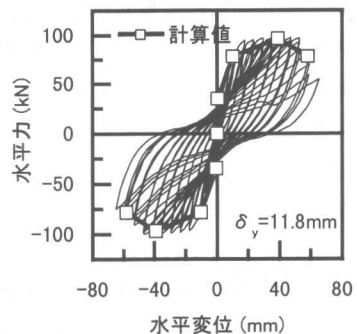
図一2 荷重-変位曲線 (No.1)



図一3 荷重-変位曲線 (No.2)



図一4 荷重-変位曲線 (No.3)



図一5 荷重-変位曲線 (No.4)

し、No.2 の場合には、最大耐力点以後の負勾配域における荷重の低下が No.1 に比べて大きく、計算値に対しても危険側の評価となっている。この原因として、No.2 の帯鉄筋が柱隅角部において 135° フックによりコアコンクリートに定着されており、軸方向鉄筋の座屈開始後に塑性ヒンジ区間の帯鉄筋のフックが抜け出したことが考えられる。No.1 も同様な帯鉄筋形状としているが、帯鉄筋を高強度化して帯鉄筋量を減じる場合、加工形状を溶接閉合型とするなどの対策が必要と考えられる。

軸方向鉄筋に高強度鉄筋を用いた No.3 は、通常強度を用いた No.2 に比べて残留変位が小さくなっており、軸方向鉄筋の違いによるものといえる。また、No.3 は帯鉄筋を閉合型としており、No.2 に比べて最大耐力以後の耐力低下が緩やかで、計算値と良い整合性を示した。

No.4 試験体は高強度コンクリートと高強度鉄筋を併用した試験体であり、No.3 試験体と同様な履歴性状を示している。

また、各試験体の降伏変位は、軸方向鉄筋に高強度鉄筋を使用した No.3、No.4 は、普通鉄筋を用いた No.1、No.2 に比べて径および本数を減じたために曲げ剛性が小さくなり、降伏変位が約 2 倍となった。

3.3 荷重—変位関係の計算

図—2—図—5 に示す計算値は「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」²⁾（以後、耐震標準と記す）にもとづいて M- θ 関係を算定し、これを P- δ 関係に変換したものである。計算値の各折れ点の算定において、高強度鉄筋、および高強度コンクリートを使用することで耐震標準に記される式に関して特別に考慮した点について以下に記す。

(1) 第 1 折れ点 (C 点)

曲げひび割れ発生点であり、曲げモーメントはコンクリートの縁引張応力が「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」³⁾（以後、RC 標準と記す）に示す部材寸法を考

慮した設計曲げ強度に達する時として定義されている。RC 標準では設計曲げ強度の算定式の適用範囲として、 f'_c が 20~50N/mm² のコンクリートとされているが、本検討では $f'_c = 80\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いた No.4 に関しても、RC 標準に示される式を適用した。

(2) 第 2 折れ点 (Y 点)

引張鉄筋が降伏する点である。Y 点を算定するにあたっては、耐震標準に示される考え方をそのまま準用した。

(3) 第 3 折れ点 (M 点)

最大水平変位をほぼ維持できる最大変位点として定義され、M 点の部材角は(1)式により求められる。

$$\theta_m = \theta_{mi} + \theta_{pm} + \theta_{mb} \quad (1)$$

ここに、

θ_m : M 点の部材角

θ_{mi} : M 点の軸方向鉄筋の抜け出しによる部材角

θ_{pm} : M 点の塑性ヒンジ部の回転角

θ_{mb} : M 点の塑性ヒンジ部以外の回転角

このうち、 θ_{mi} 、 θ_{pm} はそれぞれ(2)式および(3)式により算定される。

$$\theta_{mi} = \left\{ (2.7k_{w0} \cdot p_w + 0.22)(1 - N/N'_b) + 1 \right\} \theta_{y1} \quad (2)$$

$$\theta_{pm} = \frac{0.021k_{w0} \cdot p_w + 0.013}{0.79p_t + 0.153} \quad (3)$$

ここに、

k_{w0} : 帯筋強度を考慮する係数、 N' : 作用軸力、

p_w : 帯鉄筋比(%), N'_b : 釣り合い軸力、

θ_{y1} : Y 点の軸方向鉄筋の抜け出しによる部材角、

p_t : 引張鉄筋比(%)

本検討では、高強度帯鉄筋を用いた No.2~No.4 試験体について、 k_{w0} の値として帯筋の降伏強度の規格値 785N/mm² を 345N/mm² で除した値 2.28 を用いた。これは、RC 標準に示されている SD295、SD390 の k_{w0} の値が、SD345 の規格値を基準として決定されており、SD295、SD390 の場合は各々の規格値を 345N/mm² で除した値により定められていることに準じている。

また、 $f'_c \approx 80\text{N/mm}^2$ のコンクリートを使用している No.4 に関しては、M 点の曲げモーメントを算出する際にコンクリートの終局ひずみ ε'_{cu} の値を、「コンクリート標準示方書・設計編」⁴⁾ に準じて 0.0025 とした。

(4) 第 4 折れ点 (N 点)

N 点は、降伏荷重を維持できる最大変位として定義される。N 点を算定するにあたっては、耐震標準に示される式をそのまま準用した。

3.4 等価粘性減衰定数

図—6 に等価粘性減衰定数と水平変位の関係を示す。等価粘性減衰定数は、軸方向鉄筋に普通鉄筋を用いた場合には 20% 程度であるのに対して、軸方向鉄筋に高強度鉄筋を使用した場合には 15% 程度であり、軸方向鉄筋の種類によりはっきりと二分されている。これは、図—2～図—5 に示す各試験体の荷重—変位関係の履歴曲線からもわかるように、高強度軸方向鉄筋を用いた場合には残留変位が小さいために履歴ループの囲む面積が小さくなったことを表している。一方、試験体 No.3 と No.4 を比較すると、等価粘性減衰定数は同様な傾向を示しており、本実験においては高強度コンクリートを使用した影響は小さかった。

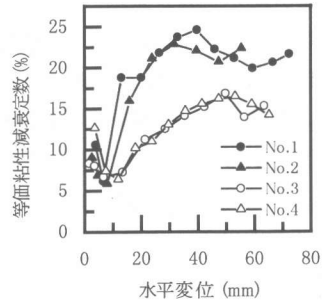
4. 荷重—変位履歴曲線に関する考察

4.1 残留変位

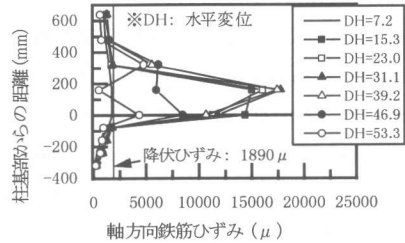
軸方向鉄筋に高強度鉄筋を用いた場合には残留変位が小さくなる傾向を示した。

図—7 および図—8 にそれぞれ試験体 No.2、No.3 の正側載荷時に引張を受ける軸方向鉄筋の柱高さ方向のひずみ分布を示す。

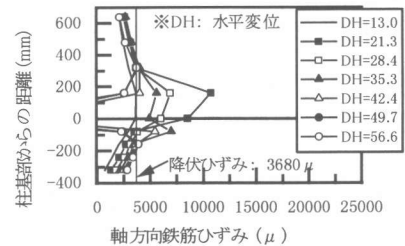
柱部分に関して、軸方向鉄筋に USD685 を用いている No.3 は終局時における降伏範囲が柱基部より約 $1d$ (d : 有効高さ) の区間となっている。これに対して、SD295A を用いた No.2 は、水平変位 $DH=39.2\text{mm}$ の時点で降伏範囲が $1.5d$ 程度であり、No.3 に比べて軸方向鉄筋の降伏範囲が広がっている。一方、フーチング内部



図—6 等価粘性減衰定数



図—7 軸方向鉄筋ひずみの縦断分布 (No. 2)



図—8 軸方向鉄筋ひずみの縦断分布 (No. 3)

のひずみは、No.2 に比べて No.3 の方が全体的に大きくなっている。

フーチング内の軸方向鉄筋のひずみ積分から軸方向鉄筋のフーチングからの抜け出し量を算出すると No.3 の方が大きくなっており、No.3 は No.2 に比べて、水平変位全体のうちの軸方向鉄筋のフーチングからの抜け出しによる変形成分の割合が大きいことが考えられる。

フーチング内部の軸方向鉄筋は、柱部分に比べて降伏している範囲が狭く、降伏している部分に関してもピーク時のひずみ値は塑性ヒンジ区間に比べて小さいため、除荷時の残留ひずみが小さくなると考えられる。そのため、抜け出しの大きい No.3 の方が No.2 に比べて残留変位が小さくなったと考えられる。

4.2 履歴法則

履歴法則として、武田モデル⁵⁾を負勾配域に拡張して適用することを検討した。負勾配は、3.3 に概略を示した耐震標準により算定されるP-δ関係に合致するように降伏剛性に対する剛性倍率を決定することで耐力低下量をモデル化した。除荷開始点は、実験値と一致させ、除荷勾配は式(4)により算定した。

図-9 は軸方向鉄筋に高強度鉄筋を用いた一例として、No.3 の各載荷ステップにおける1サイクル目のエネルギー吸収量の実験値と解析値を比較したものである。剛性低下率βを耐力低下前0.2, 耐力低下後0.5 とすると実験値と解析値は概ね一致しており、適切な除荷剛性を設定することで武田モデルが適用できると考えられる。

$$K_r = K_y \left(\frac{\delta_y}{\delta_{max}} \right)^\beta \quad (4)$$

ここに、 K_r : 除荷剛性
 K_y : 初期剛性
 δ_r : 降伏変位
 δ_{max} : 除荷開始点の変位
 β : 剛性低下率

図-10 はβ=0.5 として荷重-変位関係の実験値と計算値を比較したものであり、良い整合性を示している。復元力モデルは No.3 の変形性能を妥当に評価していると考えられる。

5. まとめ

高強度材料用いたRC柱部材について交番載荷試験を行い、今回実験を行ったパラメータの範囲において以下のことが確認できた。

- (1) 高強度材料を用いた部材の荷重-変位関係は、通常強度の材料を用いた部材と同様な設計式で概ね評価できた。
- (2) 高強度軸方向鉄筋を用いたケースでは、等価粘性減衰定数が通常強度の軸方向鉄筋を用いた場合の75%程度となった。
- (3) 高強度鉄筋を用いて軸方向鉄筋を細径化

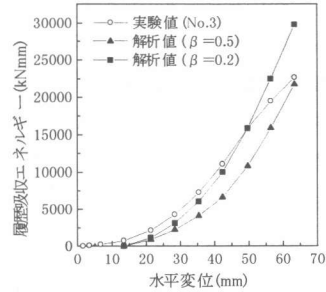


図-9 累積吸収エネルギー

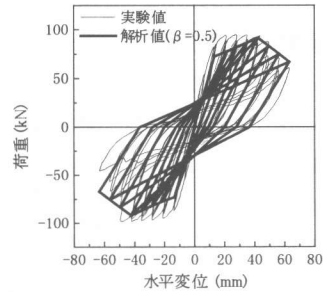


図-10 履歴曲線

したケースでは、水平変位量のうちの抜け出しによる変位成分の占める割合が通常強度軸方向鉄筋を用いたケースに比べて大きくなった。

- (4) 高強度軸方向鉄筋を用いた場合の履歴モデルとして、適切な除荷剛性を設定することで武田モデルが適用できる。

参考文献

- 1) 神川安之助, 津吉毅 : 東北本線赤羽駅付近高架化工事の施工, 日本鉄道施設協会誌, 1998.11月号, pp.864~866, 1998.11
- 2) 鉄道総合技術研究所編 : 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善, 1999.10
- 3) 鉄道総合技術研究所編 : 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善, 1999.10.
- 4) 土木学会編 : 平成8年制定・コンクリート標準示方書 (設計編), 1996
- 5) Takeda.T., Sozen.M.A and Nilsen.N.N. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proceedings of ASCE, Structural Division, pp.2557~2573, 1970