

論文 高強度材料を用いた RC 部材の変形性能評価方法の検討

近藤眞生*1・三島徹也*2・下野一行*3・佐藤勉*4

要旨: 高強度コンクリート, 高強度鉄筋を用いた RC 部材の変形性能の定量化を目的とし, 計 10 体の柱試験体の正負交番載荷試験を実施した. 変形性能を, 靱性率とせん断余裕率¹⁾の関係で評価する方法と, コンクリート, 鉄筋の強度や塑性ヒンジ等を考慮して算出される絶対変形量で評価する方法とで検討を行った結果, 高強度材料を用いた場合, 前者の評価方法では鉄筋の降伏強度の影響を受け, 的確な評価方法を見出せなかったのに対し, 後者の評価方法は材料強度に関わらず部材の変形性能を評価できることがわかった.

キーワード: 変形性能, 高強度材料, 絶対変形量, 靱性率

1. はじめに

兵庫県南部地震以後, RC 構造物の耐震設計法が様々な機関において議論され, また耐震性能に優れた構造物の開発も活発に行われている.

被災後の耐震設計法の見直しによる耐力の増加や, 経済性の追求に伴う断面の減少により, 従来の RC ラーメン高架橋の部材接合部では過密配筋が行われており, 施工性にも問題が生じている. これら問題に対し高強度コンクリートおよび高強度鉄筋の使用は, 耐力の増加が可能であり, かつ配筋も合理化できることから非常に有効であると考えられる.

本研究ではこれまで, 高強度材料を用いた部

材の変形性能の定量化を目的とし構造実験を行っており, 計 10 体の試験体中 8 体に関しては報告済みである²⁾. 今回は新たに追加した試験体 2 体に関する報告と, 高強度材料を用いた部材の変形性能の評価方法に関して報告をする.

2. 試験体

表-1 に試験体一覧を示す. 追加した試験体は No.8 試験体と No.9 試験体である. No.8 試験体は No.4 試験体との比較試験体で, せん断余裕率 2.0, 軸方向鉄筋比 1.0%とし, せん断補強鉄筋として USD1275 をらせん状に加工して用いた. No.9 試験体は No.0 試験体との比較試

表-1 試験体一覧

試験体	柱部 断面寸法 (mm)	コンクリート 強度 (N/mm ²)	軸方向鉄筋			帯鉄筋				作用軸力 (N/mm ²)	せん断 余裕率	
			呼び径	ps (%)	種類	呼び径	ピッチ (mm)	pw (%)	種類			
0	500 × 500	30	D25	1.0	SD295	D10	60	0.476	SD345	3	1.5	
1			D25	1.0	USD685	D10	60	0.476	USD785		6	1.5
2			D25	0.5		D10	90	0.317				1.5
3			D29	1.5		D13	75	0.676				1.5
4			D25	1.0		D13	75	0.676				2.0
5			D25	1.0		D13	45	1.126				3.0
6		D25	0.5	SD345	D10	140	0.204	1.5				
7		100	D25	1.0	USD685	D10	60	0.476	USD1275	10	1.5	
8			D25	1.0	USD685	D13	120	0.422			6	2.0
9	D25		1.0	D10		90	0.396	USD785			4.6875	1.5

*1 前田建設工業 (株) 技術本部 技術研究所 第一グループ 研究員 (正会員)

*2 前田建設工業 (株) 技術本部 技術研究所 第一グループ 課長代理 (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 技師 (正会員)

*4 (財) 鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 主幹技師 (正会員)

験体であり、柱断面を No.0 試験体が 500×500mm であるのに対し、400×400mm とした。ただし、曲げ耐力、せん断余裕率、せん断スパン、軸力は No.0 試験体と同一としており、せん断補強鉄筋はらせん状に加工したものをを用いた。

3. 試験結果

3.1 柱基部曲げモーメントー変位関係

図-1、図-2 に、追加した No.8 試験体と No.9 試験体の柱基部曲げモーメントー変位関係図をそれぞれ比較対象の No.4 および No.0 試験体と合わせて示す。

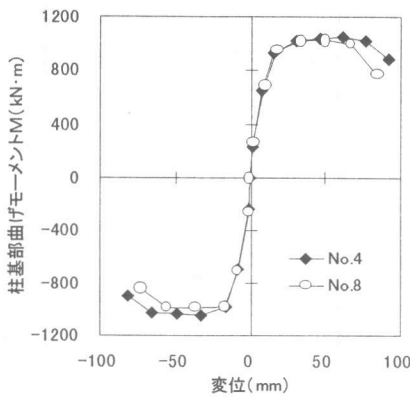


図-1 曲げモーメントー変位関係図 (その 1)

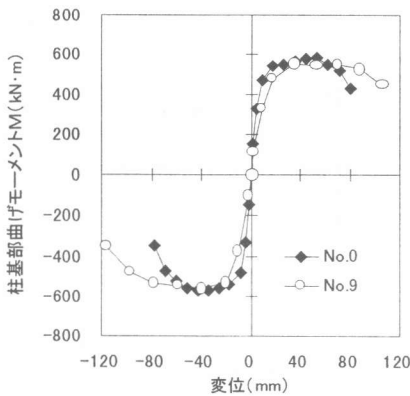


図-2 曲げモーメントー変位関係図 (その 2)

図-1 より、USD1275 を用いた No.8 試験体は、No.4 試験体のせん断余裕率と同等であるが、変形性能は No.4 より低くなっている。これは、

No.8 試験体のせん断補強鉄筋量が No.4 試験体に比べて低いためと考えられる。

図-2 より、No.9 試験体は No.0 試験体とほぼ同等の曲げ耐力を有するよう断面を縮小したが、No.0 試験体より変形性能が向上していることがわかる。これより、本実験における No.0 試験体と No.9 試験体との比較において、高強度材料を用いて断面を縮小しても、同等以上の変形性能が得られると考えられる。

3.2 他試験体との整合性の検討

図-3 に、せん断余裕率と部材靱性率の関係を示す。部材靱性率に関しては、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物¹⁾(以下、旧指針と呼ぶ)」に算定式である式(1)が示されており、図-3 中に No.0 試験体に関する算定結果を示した。また実験における部材靱性率は、実験より得られる降伏変位、終局変位を用いて算出し、降伏変位 δ_y は軸方向鉄筋が引張降伏ひずみに達した時点における載荷点位置での正負平均水平変位とし、終局変位 δ_u は柱部材基部のモーメントが最大モーメント以降、降伏モーメントを下回った時の載荷点での正負平均水平変位と定義した。

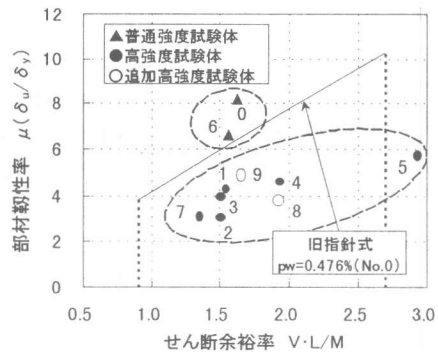


図-3 せん断余裕率と部材靱性率

$$\mu = \delta_u / \delta_y = (\mu_0 \cdot \delta_{y0} + \delta_{u1}) / (\delta_{y0} + \delta_{y1}) \quad (1)$$

μ : 部材靱性率

δ_u : 終局変位

δ_y : 降伏変位

μ_0 : 軀体の靱性率

δ_{y0} : 降伏時の軀体変形による変位

δ_{y1} , δ_{u1} : 降伏時, 終局時の軸方向鉄筋の抜出しによる回轉變位

図-3より, No.8およびNo.9試験体は他の高強度材料を用いた試験体と同様に軸方向鉄筋が普通強度のNo.0, No.6試験体との相関関係が認められない。このことから, 靱性率を用いた変形性能の評価方法は, 軸方向鉄筋の強度による区分を考慮する必要があると言える。

図-4に, せん断余裕率と終局時部材角の関係を示す。図中には図-3同様No.0試験体の算定結果を示し, また, 全試験体の回帰線を示した。図-4より, せん断スパン比の異なるNo.9試験体のみ特に変形性能に優れているが, No.8試験体に関しては他の試験体同様材料強度に関わらず相関関係が認められる。また, No.2, No.6試験体に関しては, 軸方向鉄筋量および帯鉄筋量の少ないことが変形性能に影響を及ぼしたと思われる。

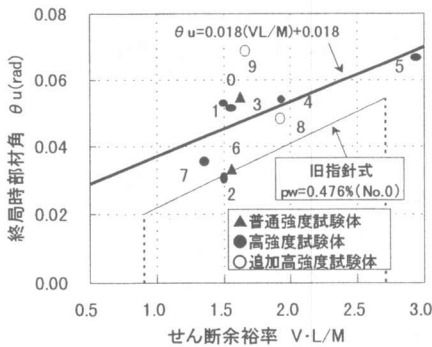


図-4 せん断余裕率と終局時部材角

4. 新変形性能算定式による評価

4.1 全変形量での評価

全変形量での評価に関しては, 平成11年制定予定である「鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計(案) 3) (以下, 新指針と称する)」に示される変形性能算定式への適用性を検討する。図-5に新指針に示される曲げモーメント-部材角の関係図を示した。また図-5におい

て各点における部材角算定の概要を以下に示す。

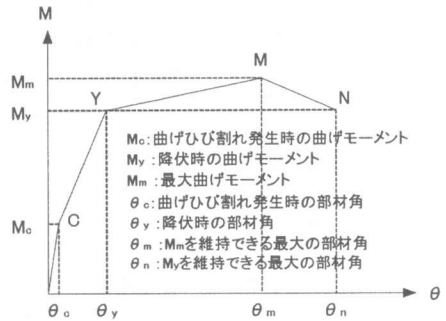


図-5 部材端部の曲げモーメントと部材角

① Y点における部材角 θ_y

引張鉄筋が降伏するときの部材角とし, 部材接合部からの軸方向鉄筋の抜出しの影響を考慮し, 式(2)により算定する。

$$\begin{aligned} \theta_y &= \theta_{y0} + \theta_{y1} \\ &= \delta_{y0}/L_a + \theta_{y1} \end{aligned} \quad (2)$$

θ_y : Y点における部材角

θ_{y0} : Y点におけるく体変形による部材角
($= \delta_{y0}/$ せん断スパン L_a)

δ_{y0} : く体変形による変位で, ひび割れ発生モーメント以下の断面は全断面有効, それ以上は引張側のコンクリートを無視して曲率を算定し, それを2階積分することにより求める

θ_{y1} : 軸方向鉄筋の抜出しによる回轉變位

② M, N点における部材角 θ_m , θ_n

図-6に示すように, く体の曲げ変形による部材角 θ_{m0} , θ_{n0} と, 部材接合部からの軸方向鉄筋の抜出しによる部材端部の回转角 θ_{m1} , θ_{n1} の和で, 式(3)により表される。

$$\begin{aligned} \theta_{m,n} &= \theta_{m0,n0} + \theta_{m1,n1} \\ &= \delta_{m0,n0}/L_a + \theta_{m1,n1} \end{aligned} \quad (3)$$

$\theta_{m,n}$: M, N点における部材角

$\theta_{m0,n0}$: M, N点におけるく体変形による部材角
($= \delta_{m0,n0}/$ せん断スパン L_a)

$\delta_{m0,n0}$: く体変形による変位で, 式(4)により算定する

$$\delta_{m0,n0} = \delta_{mb,nb} + \delta_{mp,np} \quad (4)$$

$\delta_{mb,nb}$: M, N 点におけるく体変形のうち、塑性ヒンジ部以外の曲げ変形による変位で、ひび割れ発生モーメント以下の断面は全断面有効、それ以上は引張側のコンクリートを無視して曲率を算定し、それを2階積分することにより求める

$\delta_{mp,np}$: M, N 点におけるく体変形のうち、塑性ヒンジ部の曲げ変形による変位で塑性ヒンジ長は以下の式により算出する

$$\text{等価塑性ヒンジ長 } L_p = 1.0D$$

D: 断面高さ

$\theta_{m1,n1}$: 軸方向鉄筋の抜出しによる回転変位

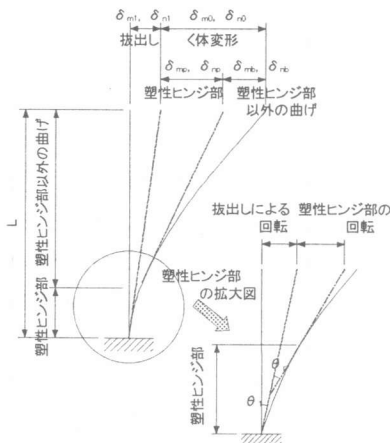


図-6 M, N 点における変位の算定

表-2 に、新指針の変形性能算定式に基づく計算値と実験値とをあわせて示す。ここで、算定に際し用いる帯鉄筋強度を考慮する係数 K_w ³⁾ は、鉄筋引張試験により得られた実降伏強度を用い、SD345 で $K_w=1.0$ とした実降伏強度比により算出した。ただし新指針では SD390 までの規定となっているが、本検討では帯鉄筋の全強を用いて評価した。そのため、全強を用いることの適用性の検討は別途行う必要がある。

図-7~図-9 に、No.0, No.1, No.9 試験体の柱基部曲げモーメント-変位関係に表-2 に示

す計算値を重ね合わせたものを示す。

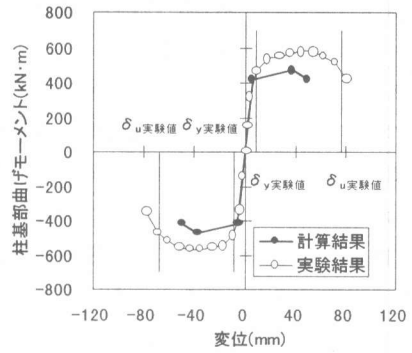


図-7 曲げモーメント-変位関係図 (No. 0)

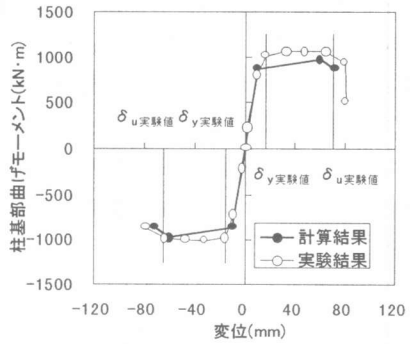


図-8 曲げモーメント-変位関係図 (No. 1)

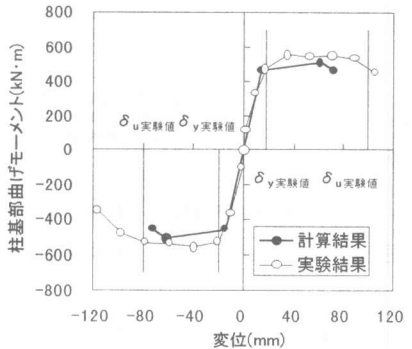


図-9 曲げモーメント-変位関係図 (No. 9)

図-7~図-9 より、新指針の変形性能算定式による高強度材料を用いた部材の全体変形量(く体変形量+軸方向鉄筋抜出しによる回転変形量)は概ね妥当に評価されており、絶対変形量を指標とした変形性能算定式である新指針式

表-2 新指針の変形性能算定式による計算値（帯鉄筋は全強で評価）

試験体	計算値									実験値	
	δ_{y0}	δ_{y1}	δ_y	δ_{m0}	δ_{m1}	δ_m	δ_{n0}	δ_{n1}	δ_n	δ_{yexp}	δ_{uexp}
No.0	3.67	2.60	6.27	31.87	5.47	37.35	43.97	5.47	49.44	8.80	72.27
No.1	6.28	3.25	9.53	49.96	10.44	60.39	61.29	10.44	71.73	15.94	67.69
No.2	5.44	2.46	7.90	40.02	6.34	46.36	55.80	6.34	62.14	13.25	40.49
No.3	6.72	4.48	11.19	38.22	16.04	54.26	47.28	16.04	63.32	17.68	69.40
No.4	6.38	3.74	10.12	55.41	13.46	68.87	67.43	13.46	80.89	15.87	79.85
No.5	6.24	3.53	9.77	55.38	13.16	68.54	67.99	13.16	81.15	15.28	87.66
No.6	3.19	1.30	4.49	32.03	2.81	34.84	50.76	2.81	53.56	6.68	44.14
No.7	6.16	2.79	8.95	49.85	8.69	58.54	62.18	8.69	70.87	15.27	46.98
No.8	6.31	3.44	9.74	55.37	12.30	67.67	66.83	12.30	79.13	17.05	63.76
No.9	8.60	5.72	14.33	44.36	17.23	61.59	55.00	17.23	72.23	18.52	90.58

への適用は可能であるといえる。

4.2 軸方向鉄筋の抜け出し量の評価

次に、式(2)における抜け出し量の算定式に関する妥当性の検討を行う。実験による抜け出し量は、No.4 および No.8 試験体において計測を行っているため、No.4, No.8 試験体の実験値を用いて検討する。

式(5)～式(7)に、新指針による軸方向鉄筋の抜け出し量の算定式を示す。式(5)～式(7)を用いて高強度材料を用いた部材への適用を試みた。

① Y点における抜け出し量 ΔL_y

$$\Delta L_y = \frac{35\alpha \cdot \varepsilon_y (6 + 3500 \varepsilon_y) \phi}{f'_{fd}{}^{2/3}} \quad (5)$$

ΔL_y : 降伏時の部材接合部からの軸方向鉄筋の抜け出し量

ε_y : 引張鉄筋の降伏ひずみ

ϕ : 引張鉄筋の直径(cm)

f'_{fd} : 部材接合部のコンクリート圧縮強度の設計用値(kgf/cm²)で、材料係数 $\gamma_c = 1.0$ として求めてよい

α : 鉄筋間隔の影響を及ぼす係数で、一段配筋の場合は式(6)により算定する

$$\alpha = 1 + 0.9e^{0.45(1 - Cs/\phi)} \quad (6)$$

Cs: 引張鉄筋の中心間隔(cm)

② M, N点における抜け出し量 $\Delta L_m, \Delta L_n$

M点における抜け出しによる回転変位 θ_{m1} は式(7)により算出され、N点での θ_{n1} も同様に式(7)より算出する。抜け出し量 $\Delta L_m, \Delta L_n$ は、 θ_{m1} , 中立軸位置および有効高さから算出する。

$$\theta_{m1} = \left\{ (2.7K_w P_w + 0.22)(1 - N'/N'_b) + 1 \right\} \theta_{y1} \quad (7)$$

ただし、 $2.7K_w P_w + 0.22 \leq 3.7$

θ_{y1} : 降伏時の軸方向鉄筋の抜け出しによる回転変位

$$\theta_{y1} = \Delta L_y / \text{せん断スパン } L_a$$

$N'/N'_b \leq 1.0$

P_w : 帯鉄筋比(%)

K_w : 帯鉄筋強度を考慮する係数で、SD345を1.0とし強度比で与えられる。

N'/N'_b : 釣り合い軸力比

N' : 部材に作用する軸力

N'_b : 釣合軸力

図-10, 図-11に、上記式より算定した抜け出し量と実験値とを重ねて示す。また、図-10, 図-11中の①, ②に、旧指針による降伏時、終局時の軸方向鉄筋の抜け出し量を示し、③, ④に、新指針式による降伏時抜け出し量および終局時抜け出し量の計算値を示す。旧指針の算定式は、降伏時、終局時ともに鉄筋径と鉄筋間隔の関数であり、旧指針による計算値は実験値に比べて、引張鉄筋降伏時の抜け出し量が過小評価されていること、引張鉄筋降伏以後の抜け出し量が、実験値では部材端部での変位の増加に伴い抜け出し量も増加しているのに対し過小評価されていること等が挙げられる。新指針による降伏時抜け出し量は、申・島式⁴⁾に基づいた評価方法で、普通強度コンクリート、普通強度鉄筋によるものであるため、本研究に用いた高強度コンクリート、およびふし形状の異なる鉄筋についての適用性は検討されていないが、計算値および実験値を比較すると安全側でよく評価されており、同様

に終局時拔出し量に関しても計算値は実験値に比べ安全側によく評価されており、高強度材料を用いた部材の拔出し量は、新指針式の拔出し量算定式への適用が可能であると言える。

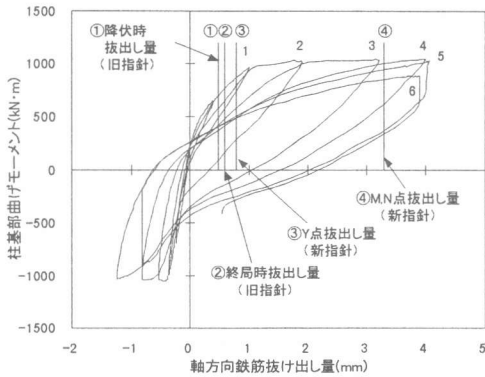


図-10 軸方向鉄筋の抜け出し量 (No. 4 試験体)

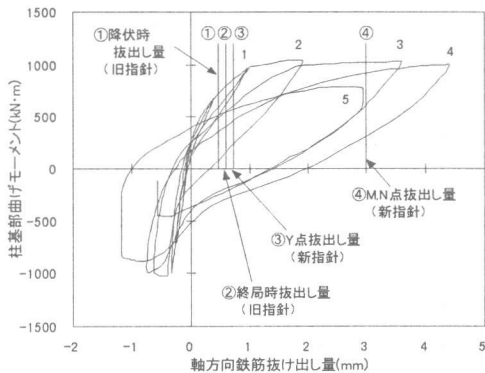


図-11 軸方向鉄筋の抜け出し量 (No. 8 試験体)

5. まとめ

本研究により、高強度材料を用いた柱部材の変形性能および変形性能評価方法に関し、以下のことがいえる。

- ① 高強度材料を用いた部材の変形性能の評価は、旧指針に従い靱性率を用いた場合、普通強度の部材との相関関係が認められない傾向を示した。
- ② No.0 試験体と No.9 試験体との比較において、高強度材料を用いて断面を縮小しても、同等以上の変形性能が得られると考えられる。

③ 新指針による変形性能算定式に従い、柱部材の絶対変形量で評価すれば、その全体変形量は概ね妥当に評価されている。このことから、高強度材料を用いた部材の変形性能の予測は新指針式を適用することが可能であると思われる。

④ 新指針式による軸方向鉄筋の拔出し量算定式は、新指針式の算定値と実験値との比較からも、高強度材料を用いた部材への適用は可能であると思われる。

6. おわりに

今後は、本実験結果と変形性能評価式の更なる検討はもちろん、高強度材料を適用した場合の拔出しに関する詳細試験や、高強度鉄筋の定着や継手に関する試験を併せて行う予定である。

なお、本研究は S.Q.C 構造物開発・普及協会耐震部会の研究活動の一環として実施したものであり、構成会社は以下のとおりである。

(50 音順)

青木建設、熊谷組、銭高組、ダイコンサルタント、鉄建建設、鉄道総合技術研究所、飛鳥建設、間組、フジタ、不動建設、日産建設、前田建設工業
(株)、(財)省略

参考文献

- 1) (財) 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、1992.10
- 2) 鈴木顕彰・三島徹也・佐藤勉・渡辺忠朋：高強度材料を用いた柱部材の変形性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.3, pp.265-270, 1998.6
- 3) (財) 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 (案)、1998.11
- 4) 岡村甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991
- 5) S.Q.C 構造物開発・普及協会編：「超高性能コンクリート構造物」に関するシンポジウム論文集、1998.8