

高強度材料を使用した鉄筋コンクリート柱の 変形性能に関する考察

佐藤大¹・西田秀明²・運上茂樹³

¹正会員 工修 (独)土木研究所 耐震研究グループ 耐震チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
²正会員 工修 (独)土木研究所 耐震研究グループ 耐震チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
³正会員 工博 (独)土木研究所 耐震研究グループ 耐震チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

1. はじめに

道路橋における鉄筋コンクリート橋脚（RC橋脚）の断面縮小や施工の省力化，建設コストの縮減などを期待し高強度材料を使用することが考えられ，施工例も増えつつある．しかしながら，現行の道路橋示方書¹⁾に示されている許容応力度は，コンクリート強度が30N/mm²まで，鉄筋はSD345までとなっており，道路橋にこれ以上の強度の材料を使用する場合には，別途検討が必要となるなど一般的に使用するには至っていない．この理由としては，RC橋脚に高強度材料を使用した場合の破壊メカニズムや終局限界算定式の適用性に関する検証が十分でないことなどがあげられる．

著者らは，道路橋のRC橋脚を対象に，コンクリート強度が60N/mm²程度まで，鉄筋の強度がUSD685相当までを対象とした変形性能評価方法を確立することを目的とした検討を進めている．本文では，高強度材料を使用したRC橋脚模型の正負交番載荷実験の結果²⁾³⁾を対象に，高強度RC橋脚の耐力および変形性能に対する道路橋示方書ならびに高強度まで適用可能とされている評価式の適用性を検討した．

2. 実験の概要

表-1 に検討に用いた試験体の諸元を，図-1 に実験概要および試験体断面図を示す．試験体は，柱高さを3010mmとし，一辺を600mmとした矩形断面のものが3体，直径を600mmとした円形断面のものが2体である．すべての試験体において，コンクリートの設計基準強度は60N/mm²，軸方向鉄筋にはUSD685の高強度材料を用いている．また，軸方向鉄筋は，すべての試験体で鉄筋比が0.99%となるようにD13を矩形断面では28本配筋し，円形断面で

表-1 試験体諸元

試験体名	(N/mm ²)				
	S-1	S-2	S-3	C-1	C-2
断面形状	矩形 600mm×600mm			円形 φ600mm	
コンクリート (σ _{ck} -60)	60.5	69.3	70.6	60.7	58.9
弾性係数	4.23×10 ⁴	4.10×10 ⁴	4.07×10 ⁴	4.03×10 ⁴	3.92×10 ⁴
降伏強度	713	749		737	
弾性係数	1.90×10 ⁵	1.93×10 ⁵		1.90×10 ⁵	
軸方向鉄筋 (USD685)	0.99%			0.98%	
降伏強度	319(SD295)	746(USD685)		327(SD295)	665(SD685)
弾性係数	1.72×10 ⁵	1.90×10 ⁵		1.68×10 ⁵	1.88×10 ⁵
横拘束筋体積比	0.33%			0.33%	

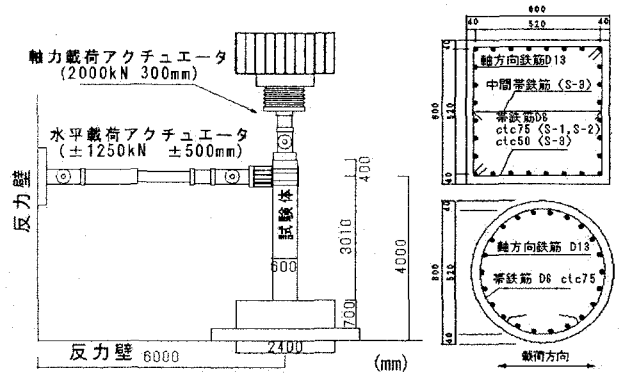


図-1 実験概要および試験体断面図

は22本配筋している．S-1 および C-1 は，横拘束筋にSD295を75mm間隔で配筋し，横拘束筋体積比が0.33%である．S-2 および C-2 は，それぞれ同一断面形状のS-1 および C-1 と同じ配筋で，横拘束筋にUSD685を用いたものである．S-3 は，横拘束筋にUSD685を50mm間隔で配筋し，さらに中間拘束筋を配筋していることで横拘束筋体積比が0.98%である．

正負交番載荷実験は，アクチュエーターによる変位制御により行い，基準変位δ₀ (11mm)の整数倍の水平変位を各ステップに対して3回ずつ繰り返す漸増載荷方式で行っている．ここで，試験体に与えた軸力は，軸応力度が1.0N/mm²となるよう載荷している．

3. 実験結果

図-2 に実験より得られた水平荷重－水平変位関係の包絡線を示す。包絡線は、各サイクル1回目の荷重における正側と負側の最大変位時の荷重を平均値で示した。

矩形断面に着目した場合、 $8\delta_0$ 程度まではすべての試験体で同様の性状を示していることがわかる。S-1 および S-2 では、 $9\delta_0$ 以降に基部のかぶりコンクリートの剥離が生じて徐々に荷重が低下し、最終的には軸方向鉄筋の破断が生じた。両者の損傷進展状況や包絡線に顕著な違いはなく、帯鉄筋の高強度化による変形性能の向上は見られなかった。S-3 では、 $10\delta_0$ 程度まで最大荷重程度を維持した後に荷重が低下しており、横拘束筋体積比の増加による変形性能の向上が見られた。

円形断面試験体に着目した場合、 $9\delta_0$ 程度まで両者は同様の性状を示すことがわかる。その後、C-1 では基部のかぶりコンクリートの剥離が進行するとともに荷重が低下し、C-2 では $11\delta_0$ 程度まで最大荷重程度を維持した後に荷重が低下している。円形断面の場合は、帯鉄筋の高強度化により変形性能の向上が見られた。また、C-1 では帯鉄筋および軸方向鉄筋の破断が見られたが、C-2 では帯鉄筋の破断は見られなかった。

4. 実験結果の評価手法

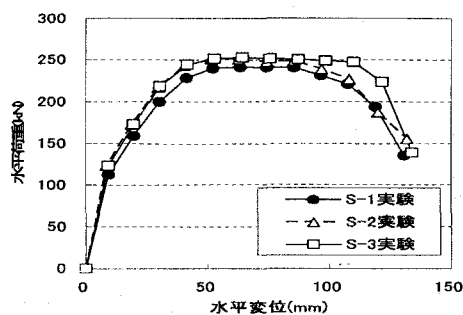
高強度 RC 橋脚の耐力および変形性能の評価を検討するため、今回の実験を以下の手法で評価した。

(1) 手法1：道路橋示方書・解説V耐震設計編¹⁾

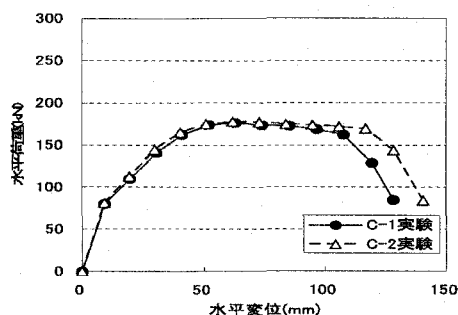
現行の道路橋示方書では、コンクリートの材料モデルの適用範囲が 40N/mm^2 までとなっているなど、今回の実験試験体は評価式の適用範囲外である。しかし、ここでは評価式がそのまま使えるものと仮定して耐力および変形性能を評価した。終局状態は、最外縁圧縮鉄筋位置のコンクリートのひずみが終局ひずみ（コンクリートの応力度が最大応力度の 80% まで低下した時のひずみ）に達する時としている。

(2) 手法2：NewRC 式⁴⁾

手法1において、コンクリートの材料モデルに建設省総合技術開発プロジェクト⁴⁾で提案されたコンファインドコンクリートのモデルを用いて評価した。このプロジェクトで対象とされたコンクリート強度の範囲は、 $30\sim 120\text{kN/mm}^2$ であり、実験試験体は適用範囲内である。なお、終局状態については明確な定義がないため、ここでは手法1と同様とした。



(a) 矩形断面



(b) 円形断面

図-2 水平荷重－水平変位包絡線

(3) 手法3：コンクリート標準示方書⁵⁾

手法3の評価式におけるコンクリートの材料モデルは、適用範囲が $18\sim 80\text{N/mm}^2$ であり、実験試験体は適用範囲内となる。また、このモデルでは「主に終局耐力を算定するためのモデルであり、終局状態に至る変形までを検討する場合は別に応力－ひずみ関係を仮定する必要がある」と条件付けされているが、ここでは評価式をそのまま用いて評価した。手法3では、断面の圧縮縁ひずみがコンクリートの終局ひずみに達した時を最大耐荷力点として計算し、終局変位に相当する点として、降伏荷重点を維持できる変位を計算式により算出する。

今回用いた手法の特徴は、手法1および手法2では、コンクリートの材料モデルに横拘束効果を考慮して断面の終局曲率を仮定し変形性能を評価するのに対し、手法3では、コンクリートや鉄筋の強度、鉄筋量などを算定式に代入することで塑性ヒンジ区間の回転角を評価することなどである。また、手法1および手法2では、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しによる影響が塑性ヒンジ区間の算定式に含まれており、手法3では、伸び出しによる影響を分けて算出できる。

図-3 に各手法に用いる材料の応力度－ひずみ関係を示す。図より、手法1および手法2では、横拘束筋による拘束効果をコンクリートの材料モデルに考慮するため、最大応力度時のひずみ(ϵ_{cu})や終局時のひずみ(ϵ_{cu})が試験体により変化することがわ

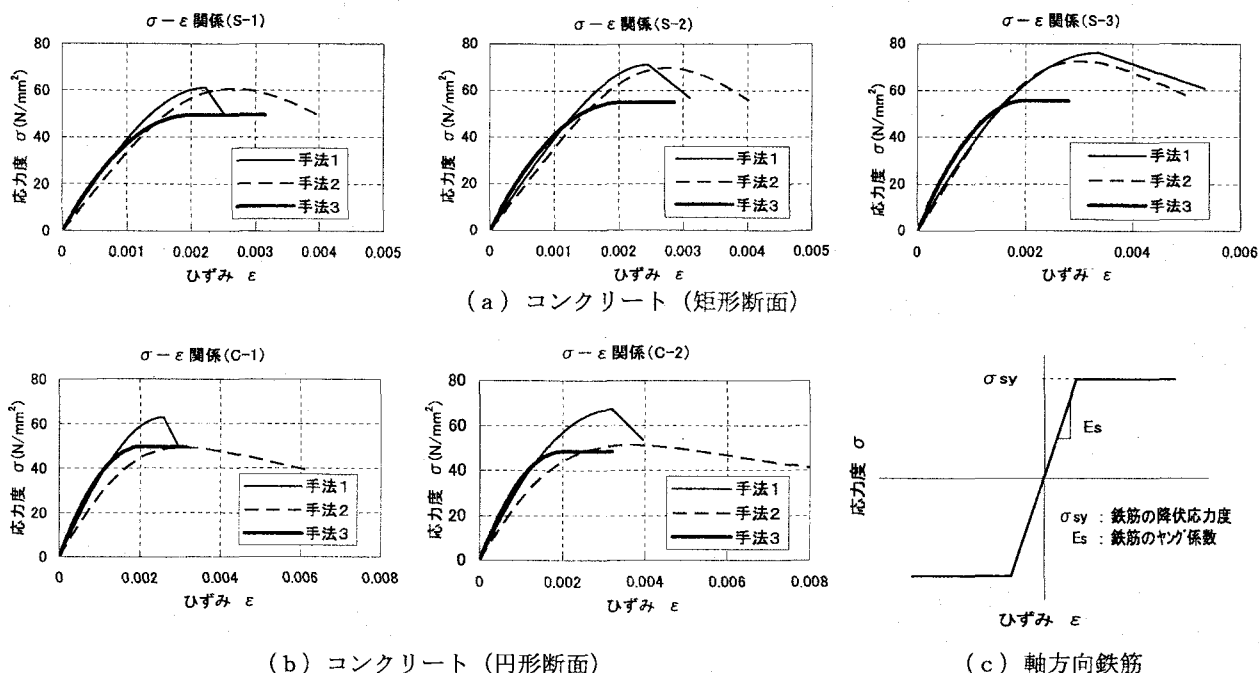


図-3 材料の応力度-ひずみモデル

かる。矩形断面に着目した場合、手法1と手法2を比較すると、拘束効果による ε_{cc} や ε_{cu} の増大は、手法1が手法2に比較して顕著に現れている。円形断面に着目した場合、手法2では、最大応力度後の下降勾配が小さく ε_{cu} が他に比較して大きくなるのがわかる。また、鉄筋の材料モデルは、すべての手法において同一で、降伏点を折れ点としたバイリニア型とした。

5. 実験結果と計算結果の比較

表-2 に試験体の耐力および変形性能を各手法で評価した場合の計算結果を、また、図-4 に計算結果を実験から得られた包絡線と比較して示す。表中の「最大荷重程度を維持できる変位」の計算値には、手法1および手法2における終局限界点の変位と、手法3における最大荷重点の変位をそれぞれ示した。

矩形断面において、初降伏荷重および初降伏変位は、手法3で他に比較して大きくなる傾向にある。最大荷重は、すべての試験体において評価手法による大きな差はなく、かつ実験結果との差が5%未満となり、実験結果を精度良く評価している。最大荷重程度を維持できる限界の変位は、S-1 では、手法1の計算結果が実験値より小さく評価されるのに対し、手法2および手法3は、実験値を概ね良く評価している。また、S-2 では手法1の計算結果は、実験結果より小さく評価され、手法3の計算結果は、実験結果より若干大きく評価されている。さらに、

S-3 では手法1および手法3の計算結果は、実験値より若干大きく評価される。手法3では最大荷重点以降の下降勾配も評価しているが、S-2 および S-3 における終局点は、実験値よりも大きく評価される。

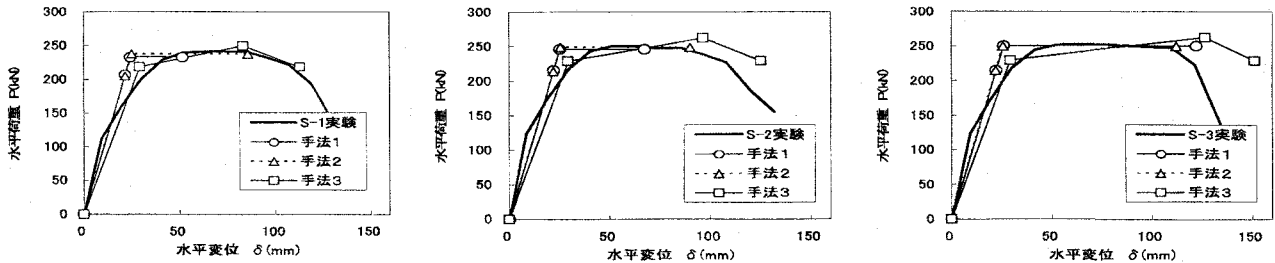
円形断面において、最大荷重については矩形断面の結果と同様に評価手法による大きな差はなく、耐力については実験結果を精度良く良く評価していることがわかる。変形性能に着目した場合、手法1の計算結果は、両方の試験体で実験結果より小さく評価され、その傾向は矩形断面のS-1 およびS-2 の場合よりも顕著である。手法2および手法3の計算結果は、実験結果の包絡線を概ね良く評価している。

以上のことから、高強度 RC 柱の最大荷重は、断面形状によらず、今回用いたすべての手法で評価可能で、図-3 に示したようなコンクリートの応力-ひずみ関係のモデルは、耐力の算定には大きく影響しないことがわかる。また、変形性能については、手法1の計算結果は、横拘束筋体積比が0.33%程度の場合、高強度 RC 柱の変形性能を小さく評価し、その傾向は円形断面の場合に顕著になった。コンクリートの材料モデルをNewRC式とした手法2の計算結果は、断面形状によらず実験結果を概ね良く評価できた。ただし、今回はコンクリートの材料モデルの終局条件を最大応力度の80%と設定したが、図-3 のように横拘束筋の強度や体積比によっては最大応力点以降の下降勾配が小さくなり、終局条件の設定により ε_{cu} は大きく変化することがある。このため終局状態の定義については詳細に検討する必要がある。

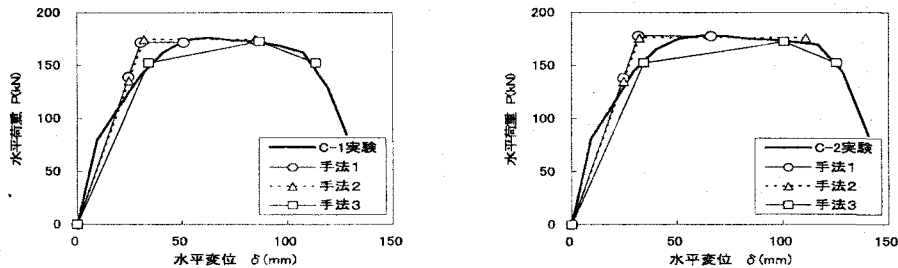
表-2 計算結果一覧

	矩形断面試験体												円形断面試験体											
	S-1				S-2				S-3				C-1				C-2				実験	手法1	手法2	手法3
	実験	手法1	手法2	手法3	実験	手法1	手法2	手法3	実験	手法1	手法2	手法3	実験	手法1	手法2	手法3	実験	手法1	手法2	手法3				
初降伏荷重(kN)	-	207	205	219	-	216	215	230	-	215	215	230	-	139	136	152	-	138	135	152	-	-	-	-
		(1.00)	(0.99)	(1.05)		(1.00)	(0.99)	(1.06)		(1.00)	(1.00)	(1.07)		(1.00)	(0.98)	(1.10)		(1.00)	(0.98)	(1.10)				
初降伏変位(mm)	-	21.7	21.8	29.3	-	22.4	22.3	29.6	-	22.4	22.2	29.5	-	24.8	24.9	34.3	-	24.7	24.8	34.4	-	-	-	-
		(1.00)	(1.01)	(1.35)		(1.00)	(1.00)	(1.32)		(1.00)	(0.99)	(1.32)		(1.00)	(1.01)	(1.39)		(1.00)	(1.01)	(1.39)				
最大荷重(kN)	242	233	238	250	251	247	249	263	253	251	250	263	176	173	175	173	178	178	176	172	-	-	-	-
	(1.00)	(0.96)	(0.98)	(1.03)	(1.00)	(0.98)	(0.99)	(1.04)	(1.00)	(0.99)	(0.99)	(1.04)	(1.00)	(0.98)	(0.99)	(0.98)	(1.00)	(1.00)	(0.99)	(0.97)				
最大荷重点を維持できる変位(mm)	85.3	51.4	85.6	83.1	85.4	67.3	90.0	96.5	109.9	122.1	112.1	126.6	96.6	50.9	84.9	86.9	117.0	66.1	111.1	100.9	-	-	-	-
	(1.00)	(0.60)	(1.00)	(0.97)	(1.00)	(0.79)	(1.05)	(1.13)	(1.00)	(1.11)	(1.02)	(1.15)	(1.00)	(0.53)	(0.88)	(0.90)	(1.00)	(0.57)	(0.95)	(0.86)				
終局荷重(kN)	-	-	-	219	-	-	-	230	-	-	-	230	-	-	-	152	-	-	-	152	-	-	-	-
終局変位(mm)	-	-	-	112.8	-	-	-	125.3	-	-	-	151.3	-	-	-	113.8	-	-	-	125.4	-	-	-	-

※ () は各値の手法1に対する比
※ [] は各値の実験値に対する比



(a) 矩形断面



(b) 円形断面

図-4 計算結果と実験結果包絡線の比較

ある。手法3では、今回はコンクリートの材料モデルをそのまま用いて評価した。その結果によれば、円形断面では実験値を概ね良く評価できるが、矩形断面では最大荷重点以降の変位を算出する際に横拘束筋の強度や横拘束筋量の増加による変形性能の向上効果を実験値より大きく見込むことがある。

6. まとめ

高強度材料を使用したRC柱模型の正負交番載荷実験の水平荷重-水平変位関係を現行の各種基準で評価した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 今回用いたすべての手法は、高強度RC柱の耐力を適切に評価できる。
- 2) 現行の道路橋示方書におけるコンクリートの材料モデルの適用範囲を無視して算定した場合、S-3を除いて高強度RC柱の変形性能を小さく評価し、その傾向は円形断面の場合に顕著になる。
- 3) コンクリートの材料モデルを高強度材料にも適用できるNewRC式に置換え、道路橋示方書の算定式を準用することで、矩形断面模型および円形断面模

型の場合とも実験結果を概ね良く再現できる。

- 4) コンクリート標準示方書の算定式で算定した場合、円形断面については実験結果を概ね良く再現できたが、矩形断面については最大荷重点以降の変位が実験結果より大きくなる傾向がみられた。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書同解説V 耐震設計編, 2002.
- 2) 西田秀明, 運上茂樹：帯鉄筋強度の違いが高強度材料を用いたRC橋脚の変形性能に及ぼす影響, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, I-191, 2004.
- 3) 西田秀明, 運上茂樹：帯鉄筋強度の違いが高強度材料を用いた円形RC橋脚の耐力・変形性能に及ぼす影響, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, I-105, 2005.
- 4) (財)国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト, 平成4年度NewRC研究開発概要書, 1993.3
- 5) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕, 2002.