

地震時保有水平耐力法に基づく高強度鉄筋コンクリート 橋脚の変形性能評価方法に関する検討

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

著者らはこれまでにコンクリート強度が60MPa程度、鉄筋の強度がUSD685相当の高強度材料を用いた道路橋の鉄筋コンクリート(RC)橋脚を対象として、その耐力および変形性能の評価方法に関して、主にコンクリートの応力-ひずみ関係に着目し、検討を行ってきた¹⁾。

高強度材料を用いたRC橋脚の実験結果との比較から、変形性能については、現行の道路橋示方書V編²⁾(以下、道示)の評価式をそのまま高強度材料に拡張して適用した場合と比較して、コンクリートの応力-ひずみ関係に建設省総合技術開発プロジェクト³⁾で開発されたモデル(以下、NewRC)を用い、終局ひずみを応力が最大応力の80%まで低下した点と設定して評価すると実験による荷重-変位関係をより良く評価できることを確認した。

本稿では、高強度材料を用いた拘束コンクリートの一軸圧縮荷重実験の結果に基づいて、道示と同様の方法で評価したコンクリートの応力-ひずみモデルを用いて正負交番荷重実験の変形性能を評価した。ここでは特に、応力-ひずみ関係における最大応力発生後の下降勾配に着目し検討を行った。

2. コンクリートの応力-ひずみ関係

道示では、式(1)に示すようにコンクリートの応力-ひずみ関係を応力上昇域と下降域に分け、最大応度(σ_{cc})、最大応度時のひずみ(ε_{cc})、応力下降域の下降勾配(E_{des})を用いて評価する。また、 σ_{cc} 、 ε_{cc} 、 E_{des} は、それぞれ式(2)～式(4)に示すように、コンクリートの設計強度(σ_{ck})、帯鉄筋の降伏応力(σ_{sy})、帯鉄筋体積比(ρ_s)を用いて算出される。

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} & (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \\ \sigma_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) & (\varepsilon_{cc} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad \text{式(1)}$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - \sigma_{cc}}$$

ここで、

σ_c 、 ε_c : コンクリートの応力度(N/mm²)、ひずみ
 σ_{cc} 、 ε_{cc} : 最大応度、最大応度時ひずみ
 E_c : コンクリートのヤング係数(N/mm²)

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8 \alpha \rho_s \sigma_{sy} \quad \text{式(2)}$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033 \beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \quad \text{式(3)}$$

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} \quad \text{式(4)}$$

ここで、

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)
 ρ_s : 帯鉄筋体積比
 σ_{sy} : 帯鉄筋の降伏応力(N/mm²)
 α : 断面補正係数 (円形=1.0, 矩形=0.2)
 β : 断面補正係数 (円形=1.0, 矩形=0.4)

ここで、道示式の適用範囲は、コンクリート強度が40MPaまでとされており、著者らが想定している強度が60MPaの高強度コンクリートは適用範囲外となる。これを踏まえた上で道示式を高強度材料に適用した場合には、文献1)のように荷重-変位関係の評価を適切に行うことができなかった。

高強度材料を対象としたコンクリートの応力-ひずみ関係のモデルには、NewRCのほかに秋山ら⁴⁾や中澤ら⁵⁾の研究があるが、本稿では、実験供試体の

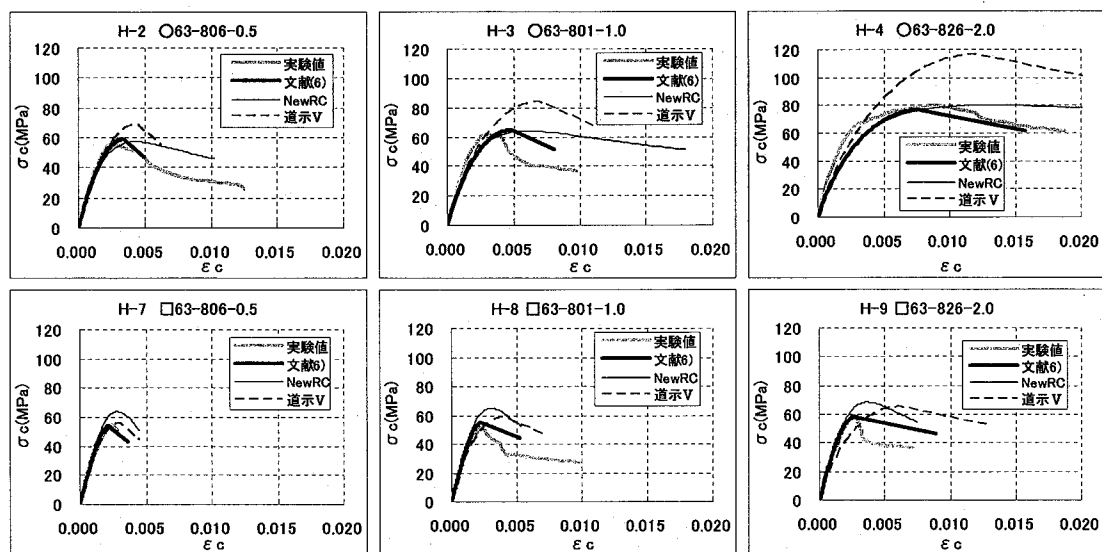


図-1 応力-ひずみ関係の比較

材料強度の緒元が著者らが想定している強度に近く、この種の実験では大型の供試体を用いて行われた、高強度材料を用いた拘束コンクリートの一軸圧縮載荷実験の結果⁶⁾から得られたモデルを対象とした検討を行った。

拘束コンクリートの一軸圧縮載荷実験における供試体は表-1に示す8体で、円形断面のものは直径が500mm、矩形断面のものは一辺が500mmで、試験区間の高さはいずれの断面形状の場合も1000mmである。文献6)によれば、高強度材料を用いた場合の応力-ひずみモデルとして、道示式の断面補正係数 α および β を、円形断面では $\alpha=0.37$ 、 $\beta=0.57$ 、矩形断面では $\alpha=0.09$ 、 $\beta=0.06$ とすることを提案している。また、文献6)では、下降勾配については、道示と同様の式(4)を用いて評価しているが、表-2に示す土木研究所で行われた正負交番載荷実験の供試体とは下降勾配を決定する物理量 $(\sigma_{ck}^2/\rho_s \cdot \sigma_{sy})$ の範囲が異なっていることに注意が必要である。

文献6)の応力-ひずみ関係の計算結果の比較を図-1に示す。図中には、道示式とNewRC式で評価した場合の計算結果を合わせて示している。ここで、文献6)と道示の計算値はコンクリート強度として、無補強供試体(H-1, H-6)の最大圧縮強度(53.6MPa, 52.5MPa)を、帯鉄筋の強度として材料試験の結果を利用したものである。

図より、円形断面の場合には、最大応力(σ_{cc})や最大応力時のひずみ(ε_{cc})について、文献6)やNewRC式は概ね評価できている。道示式の場合は ρ_s の増加に対する σ_{cc} 、 ε_{cc} の増加が他の評価式に比較してかなり大きく評価されていることがわかる。また、最大応力発生後の応力下降域の勾配は、New

表-1 一軸圧縮試験供試体緒元

試験体名	断面形状 (mm)	高さ (試験区間) (mm)	コンクリート 強度 (MPa)	帯鉄筋			$\sigma_{ck}^2/\rho_s \cdot \sigma_{sy}$
				径	ピッチ (mm)	降伏強度 (MPa)	
H-1	円形 $\phi 500$	1500 (1000)	63.4	-	-	-	0.0
H-2				D10	114	806	0.5
H-3				D13	101	801	1.0
H-4				D16	79	826	2.0
H-6	矩形 500×500	1500 (1000)	63.4	-	-	-	0.0
H-7				D10	114	806	0.5
H-8				D13	101	801	1.0
H-9				D16	79	826	2.0

*コンクリート強度・帯鉄筋降伏強度は試験結果

*軸方向鉄筋はUSD685で、円形の場合D16-10本、矩形の場合D16-12本

表-2 正負交番載荷実験供試体緒元

試験体名	断面形状 (mm)	コンクリート 強度 (MPa)	軸方向鉄筋		帯鉄筋		$\sigma_{ck}^2/\rho_s \cdot \sigma_{sy}$
			降伏強度 (MPa)	鉄筋比 (%)	降伏強度 (MPa)	鉄筋比 (%)	
05-1	円形 $\phi 600$	58.9	740	0.99	706.3	0.32	1512
05-2		60.7	740	0.99	329.3	0.32	3445
06-1		60.2	762	0.99	704.8	0.24	2111
03-HLL	矩形 600×600	60.5	713	0.99	319.0	0.32	3532
04-2		69.3	749	0.99	746.0	0.32	1982
04-3		70.6	749	0.99	746.0	0.97	686

*柱基部から水平力載荷点までの高さは3010mm

*コンクリート強度・鉄筋降伏強度は試験結果

RC式の場合に実験値より小さく(勾配が緩く)評価されている。

矩形断面の場合には、 σ_{cc} および ε_{cc} に着目した場合、NewRC式と道示式において実験値より大きくなる傾向が見られる。応力下降域の勾配に着目した場合、 $\rho_s=2\%$ のH-9供試体において、すべての評価式が実験値より小さな勾配となっているが、他の供試体については概ね評価できていることがわかる。

これらの結果は、高強度コンクリートを用いた場合には、帯鉄筋体積比の増加に伴う最大応力、最大応力時のひずみの増加割合が普通強度のコンクリートを用いた場合に比較して小さくなるという、文献5)の結果とも一致しており、文献6)ではこれを断面補正係数を普通強度の場合より低減することで評価している。

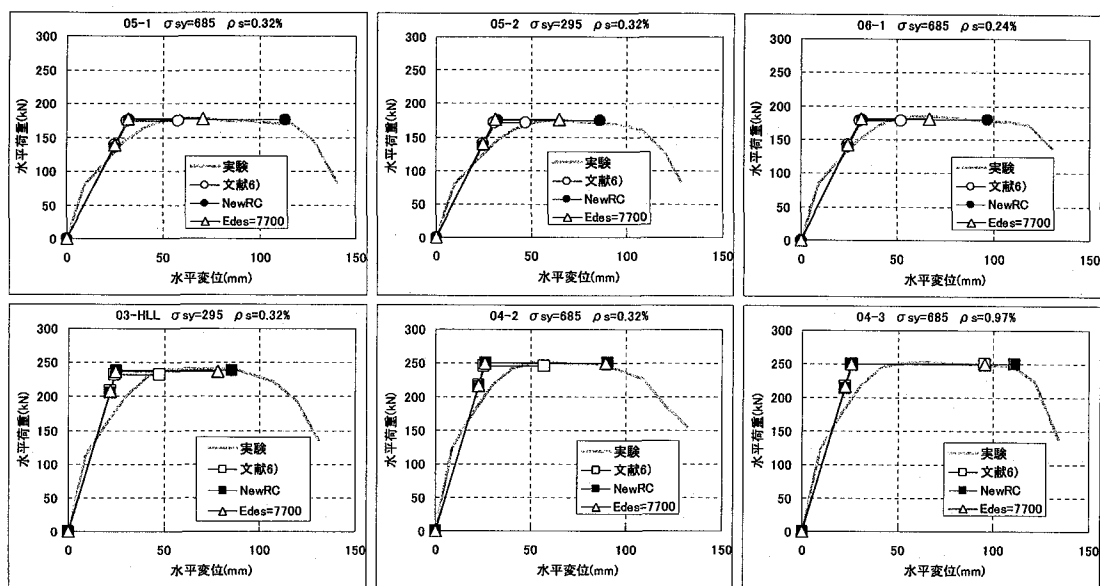


図-2 荷重-変位関係の比較

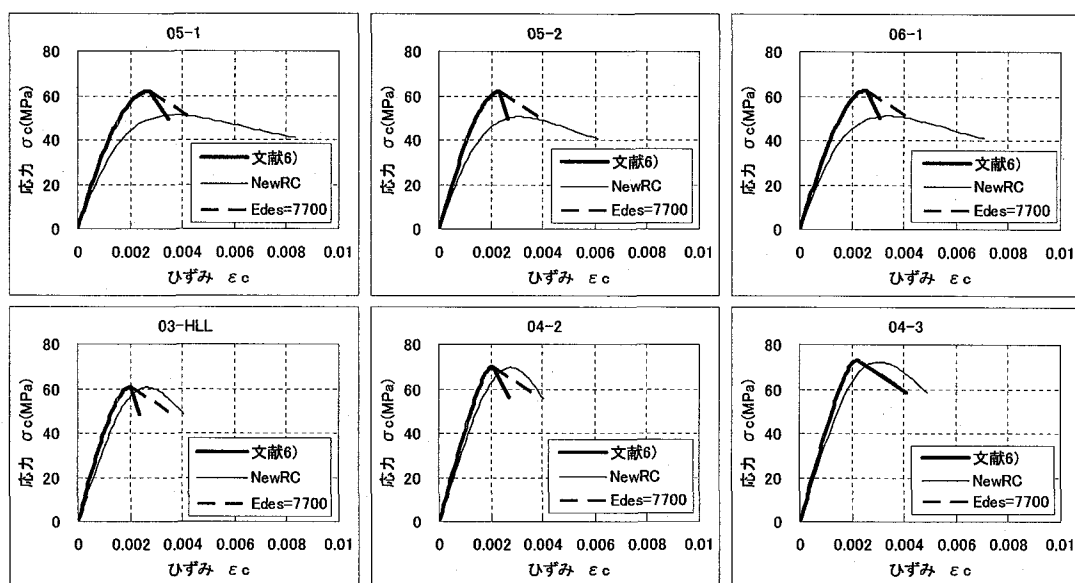


図-3 応力-ひずみ関係の比較

3. 正負交番载荷実験の評価への適用

土木研究所で行った正負交番载荷実験の供試体の緒元を表-2に示し、地震時保有水平耐力法に基づいて荷重-変位関係を評価した結果を図-2に示す。図中の評価式は、コンクリートの応力-ひずみ関係に、文献6)を用いた場合とNewRC式を用いた場合、後述する文献6)の下降勾配を変更した場合を示した。いずれの場合も終局は、圧縮側の軸方向鉄筋位置のひずみがコンクリートの終局ひずみ（最大応力の80%まで低下したときのひずみと設定）に達したときとしている。また、図-3に荷重-変位関係の評価に用いた応力-ひずみ関係の比較を示す。

実験では、円形断面の場合、帯鉄筋強度の増加に

よる変形性能の増加が10%程度見られ、帯鉄筋体積比の増加に伴う変形性能の増加については体積比の変化量も小さいことから、ほとんど見られなかった。また、矩形断面の場合には、帯鉄筋強度の増加による変形性能の変化はほとんど見られず、高強度帯鉄筋を用いた場合の帯鉄筋体積比の増加により、変形性能は10%程度の増加が見られた。

実験結果と計算結果を比較すると、コンクリートの応力-ひずみ関係に文献6)を用いた場合には、帯鉄筋強度がUSD685、帯鉄筋体積比が0.97%の04-3供試体を除いて終局変位を小さく評価する傾向にある。

RC橋脚部材に作用する拘束効果は、帯鉄筋や中間帯鉄筋によるものの他に、軸方向鉄筋、かぶりコンクリートによるものなどがあるが、高強度コンクリ

ートをを用いた場合、かぶりコンクリートによる拘束力が大きくなり、帯鉄筋による拘束効果が相対的に小さくなっていることが考えられる。

図-3より、矩形断面の場合、文献6)に比較してNewRC式では終局ひずみが大きく示され、その差は帯鉄筋がSD295で体積比が0.32%の03-HLL供試体の場合に最も大きく、帯鉄筋がUSD685で体積比が0.97%の04-3供試体の場合にはほぼ同程度となることがわかる。また、円形断面の場合にも矩形断面の場合と同様に終局ひずみがNewRC式で大きくなり、応力下降域の勾配が大きく異なることから、その差は矩形断面の場合より顕著になる。文献6)とNewRC式の終局ひずみの比は、図-2における終局変位の比にはほぼ対応し、応力-ひずみ関係の終局ひずみの設定が荷重変位関係の終局変位の算定に大きく影響することがわかる。また、文献6)のモデルを用いた場合の終局ひずみの値は、下降勾配が支配的となる。

4. 下降勾配の検討

これまでの検討により、変形性能の評価にはコンクリートの応力-ひずみ関係における下降勾配が大きな影響を与えることがわかった。一方で、正負交番載荷実験による変形性能は、実験範囲の帯鉄筋強度や帯鉄筋体積比ではほとんど変化していないことから下降勾配を一定値として検討を行った。すなわち、文献6)における下降勾配は、式(4)により算定されるが、ここでは、正負交番載荷実験の供試体における $\sigma_{ck}^2/\rho_s \cdot \sigma_{sy}$ の範囲(約680~3530)では、一定の下降勾配を持つものとして検討を行った。

ここで、上限値の設定は、正負交番載荷実験の評価において、変形性能を最も良く評価した04-3供試体の緒元から求め、その値は $\sigma_{ck}^2/\rho_s \cdot \sigma_{sy}=686$ のとき $E_{des}=約7700$ である。 $E_{des}=7700$ として、荷重-変位関係を評価した計算結果を図-2に示す。

図より、計算結果は矩形断面の場合の実験結果を概ねよく評価できることがわかる。また、円形断面の場合には文献6)の計算値より推定精度は向上するものの、実験の終局変位に対しては50~60%程度の値となることがわかる。

これは、普通強度材料を用いたRC橋脚の円形断面の場合、終局判定位置として最外縁圧縮鉄筋位置を設定した場合、解析での終局変位が実験により求められた水平耐力が低下する時の変位を40%程度小さく評価するという、堺ら⁷⁾による報告と一致し、断面形状と終局判定位置の影響を含だものと考えることができる。

5. まとめ

高強度材料を用いたRC柱の一軸圧縮載荷実験と正負交番載荷実験の結果から、変形性能評価方法に関する検討を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 文献6)を用いて正負交番載荷実験の変形性能を評価した場合、帯鉄筋体積比が1%程度の場合は実験結果を概ね評価できるが、帯鉄筋体積比が0.3%程度の場合は変形性能を小さく評価する。
- 2) コンクリート強度が60MPa程度のRC橋脚において、 $\sigma_{ck}^2/\rho_s \cdot \sigma_{sy}$ が約680~3530の範囲では、応力-ひずみ関係の下降勾配を、 $E_{des}=7700$ の一定値として変形性能を評価することで、正負交番載荷実験により得られた変形性能を、比較的精度よく、安全側に評価できる。

参考文献

- 1) 佐藤，西田，運上：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，第9回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，399-402，2006.2
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書同解説V耐震設計編，2002.
- 3) (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
- 4) 秋山，渡邊，阿部，崔，前田，鈴木：一軸圧縮を受ける高強度RC柱の破壊性状および力学特性に関する研究，土木学会論文集E，Vol.62 No.3，477-496，2006.8
- 5) 中澤，川島，渡邊，堺：円形断面高強度コンクリートの横拘束モデルの開発，土木学会論文集No.787/I-71，117-136，2005.4
- 6) 独立行政法人土木研究所：高じん性鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究報告書(その2)，2005.2
- 7) 堺，運上：円形断面鉄筋コンクリート橋脚の変形性能評価法の高度化，土木技術資料，Vol.48 No.8，54-59，2006.8