

## 各基準による曲げ破壊型 RC 橋脚の終局耐力・変形性能の推定精度の比較

○独立行政法人土木研究所 正会員 西田 秀明  
独立行政法人土木研究所 正会員 運上 茂樹

## 1. はじめに

現在、道路橋の耐震設計の部分係数設計法への移行を目指し検討が進められているが、耐震信頼性の評価やそれに基づく部分係数の設定において、材料特性や評価式等の各種不確定性をどのように考慮するかが重要となる。そこで、このような不確定性の一つである曲げ破壊型 RC 橋脚における終局時の耐力及び変形性能に対して、正負交番載荷実験結果と各基準に基づく計算値と比較し、その推定精度について定量的な評価を行った。

## 2. 評価対象供試体

評価対象とした供試体は、土木研究所等で実施した、実大の橋脚相当のものから縮小模型までを含む曲げ破壊型矩形断面 RC 橋脚を想定した全 8 体である(表-1)。いずれも、正負交番載荷実験で用いたものであり、基準変位(引張側最外縁軸方向鉄筋降伏時の変位)の整数倍の変位に対して各 3 回繰返す変位漸増載荷である。

## 3. 終局耐力・変形性能の評価方法

実験結果と比較とする基準として道路橋示方書耐震設計編<sup>1)</sup>、Caltrans<sup>2)~4)</sup>及び Eurocode<sup>5)6)</sup>を対象に、それぞれの評価法に基づき耐力及び変形性能を算出した。いずれの基準でも、平面保持と終局時においてコンクリートの引張応力を無視する仮定のもとで M- $\phi$  関係を算出している点は同じであるものの、降伏と終局の定義や、塑性ヒンジ長の取り方等が異なっている。例えば、材料の応力ひずみ関係に着目すると、鉄筋の降伏後のひずみ硬化について、道路橋示方書ではゼロとしているが、Caltrans 及び Eurocode ではモデル化の詳細は異なるがこれを見込んでいる。また、コンクリートのモデル化では、いずれも内部コンクリートに対して拘束効果を見込んでいるが、かぶりコンクリートの扱いは異なっている。さらに、M- $\phi$  関係から算出される値に加え、Caltrans 及び Eurocode では P- $\delta$  効果を考慮している。これらを含め、評価法の概略を表-2 に示す。

## 4. 評価結果

実験及び各基準に基づいて評価した終局耐力及び変位の比較を表-3 に示す。ここで、実験の終局は、水平荷重-水平変位の包絡線において水平荷重が急激に低下する時とし、おおむねかぶりコンクリートの剥落時に対応している。終局耐力については、終局時における実験値を計算値で割った比(以下、「実験計算値比」と呼ぶ)は、いずれもほぼ 1 程度の値となっている。また、実験計算値比のばらつきが対数正規分布に従う仮定して求めた対数平均及び対数標準偏差によると、Caltrans の対数標準偏差がやや大きいとその他は同程度である。終局変位については、日本の基準による計算値が実験値より小さく、逆に欧米の基準では大きく評価する傾向がある。実験計算値比の対数標準偏差は、Eurocode が若干大きい、それ以外はいずれも 0.2 程度であり、終局耐力と比べると 1 オーダー大きなばらつきを有していることがわかる。

表-1 評価対象供試体諸元

供試体No.	1	2	3	4	5	6	7	8
載荷方向長さ(mm)	2400	2400	1200	1200	1200	600	600	600
載荷直角方向長さ(mm)	2400	2400	1200	1200	1200	600	600	900
供試体高さ(mm)	9600	9600	4800	4800	4800	3010	3010	3010
かぶり厚(mm)	102	102	50	50	50	40	40	40
軸方向鉄筋の種類	SD345 D35	SD345 D35	SD295 D13	SD295 D13	SD295 D16	SD295 D10	SD295 D10	SD295 D10
軸方向鉄筋間隔(mm)	122	122	50	50	50	43.3	43.3	41
軸方向鉄筋比(%)	1.20	1.20	0.81	0.81	1.27	0.95	0.95	0.95
横拘束筋間隔(mm)	300	150	120	75	75	75	75	75
横拘束筋有効長(mm)	2196	854	1100	370	370	520	520	275
帯鉄筋の種類	SD345 D19	SD345 D19	SD295 D6	SD295 D10	SD295 D10	SD295 D6	SD295 D6	SD295 D6
作用軸応力度(MPa)	0	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
材料特性(単位:MPa)								
コンクリート圧縮強度	33.5	32.6	38.1	37.4	39.5	36.4	37.4	38.8
コンクリート弾性係数 ( $\times 10^4$ )	2.91	2.88	2.66	2.76	2.84	2.99	2.97	2.97
軸方向鉄筋降伏点	424	424	374	374	375	372.6	372.6	397.6
軸方向鉄筋引張強度	639	639	535	535	542	503.2	503.2	544.9
軸方向鉄筋弾性係数 ( $\times 10^5$ )	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.72	1.72	2.02
横拘束筋降伏点	344	344	323	336	336	362.2	362.2	361.4
横拘束筋引張強度	528	528	515	476	476	532.6	532.6	495.1
横拘束筋弾性係数 ( $\times 10^5$ )	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.74	1.74	1.78

キーワード：RC 橋脚，終局耐力，終局変位

連絡先：〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6 TEL 029-879-6773 FAX 029-879-6736

表-2 各基準による耐力・変形性能の評価方法

	道路橋示方書 V 耐震設計編 <sup>1)</sup>	Caltrans <sup>2),3),4)</sup>	Eurocode <sup>5),6)</sup>
降伏・終局の定義	・初降伏 橋脚基部断面の最外線にある軸方向引張鉄筋が降伏時 ・終局 軸方向圧縮鉄筋位置においてコンクリートのひずみが終局ひずみに達する時	・降伏 橋脚基部断面の最外線にある軸方向引張鉄筋が降伏時 ・終局 横拘束筋によって拘束されたコアコンクリートの圧縮ひずみ（軸方向圧縮鉄筋位置）が終局ひずみ $\epsilon_{cu}$ に達する時	・降伏 橋脚基部断面の最外線にある軸方向引張鉄筋が降伏時 ・終局 圧縮側最外線のかぶりコンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみ $\epsilon_{cu2}$ に達する時
耐力-変形関係			
降伏時の耐力・変位	降伏水平耐力 $P_y = \frac{M_u}{h}$ 降伏水平変位 $\delta_y = \frac{M_u}{M_y} \delta_{y0}$ $M_u$ : 橋脚基部断面の軸方向圧縮鉄筋位置においてコンクリートのひずみが終局ひずみに達する時の曲げモーメント $h$ : 橋脚基部断面から上部構造の慣性力作用位置までの距離 $M_{y0}$ : 橋脚基部断面の最外線にある軸方向引張鉄筋が降伏する時の曲げモーメント $\delta_{y0} = \int \phi_y dy \approx \sum_{i=1}^n (\phi_{yi} + \phi_{i-1}) \cdot L_i / 2$	降伏時水平耐力 $P_y = \frac{M_u - P_{dl} \times \delta_y^{col}}{L}$ 降伏時水平変位 $\delta_y^{col} = \frac{L^2}{3} \times \phi_y$ $M_y^{col}$ : 右図参照 $L$ : 上部構造物重量作用高さ $\phi_y$ : 降伏時曲率 $\phi_y$ : 初降伏時曲率 $M_y$ : 初降伏時曲げモーメント $P_{dl}$ : 橋脚上端に作用する軸力	降伏時の水平耐力 $F_y = \frac{M_u - F_d \times d_y}{L}$ 降伏時の水平変位 $d_y = \frac{L^2}{3} \times \phi_y \times \frac{M_u}{M_y}$ $F_d$ : 橋脚上端に作用する軸力 $M_u$ : 終局時の曲げモーメント $M_y$ : 降伏時の曲げモーメント $L$ : 橋脚高さ
終局時の耐力・変位	終局水平耐力 $P_u$ 終局水平変位 $\delta_u = \delta_{y0} + (\phi_u - \phi_y) \cdot L_p \cdot (h - L_p / 2)$ $L_p$ : 塑性ヒンジ長 $L_p = 0.2h + 0.1D$ ただし $(0.1D \leq L_p \leq 0.5D)$ $D$ : 断面高さ (円形の場合は直径、矩形の場合は解析方向に対する断面寸法) $\phi_y$ : 橋脚基部断面における降伏曲率 $\phi_u$ : 橋脚基部断面における終局曲率	終局時水平耐力 $P_u = \frac{M_u - P_{dl} \times \delta_u}{L}$ 終局時水平変位 $\delta_u = \delta_y^{col} + \delta_p$ $\delta_p = \theta_p \cdot (L - L_p / 2)$ $\theta_p = L_p \times \phi_p$ $\phi_p = \phi_u - \phi_y$ $L_p = 0.08L + 0.022f_y d_{st}$ ( $L_p \geq 0.044f_y d_{st}$ ) $L_p$ : ヒンジ長 $\delta_p$ : 橋脚脚付による変位 $\theta_p$ : 塑性ヒンジによる変位 $\phi_p$ : 塑性曲率-降伏曲率 $\phi_u$ : コアコンクリートの圧縮ひずみが $\epsilon_{cu}$ に達した時、帯鉄筋が $\epsilon_{st}$ に達した時の曲率 $\theta_p$ : 塑性回転量 $d_{st}$ : 軸方向鉄筋の径 $f_y$ : 軸方向鉄筋の降伏強度	終局時の水平耐力 $F_u = \frac{M_u - F_d \times d_u}{L}$ 終局時の水平変位 $d_u = \mu_d \times d_y$ $\mu_d = (\mu_c - 1)(3\lambda(1 - 0.5\lambda)) + 1$ $\mu_c = \frac{\phi_u}{\phi_y}$ $\lambda = L_p / L$ $L_p = 0.08L + 0.022D, f_y$ $L = (0.4 \sim 0.6)h$ $\mu_c$ : 変位じん性率 $\mu_s$ : ヒンジの曲率じん性率 $L_p$ : ヒンジ長 $D$ : 軸方向鉄筋径 $f_y$ : 軸方向鉄筋の降伏応力度 $h$ : 断面高さ
軸方向鉄筋応力-ひずみ関係			
コンクリート応力-ひずみ関係			

表-3 終局時の耐力及び変位結果

供試体No.	1	2	3	4	5	6	7	8	(実験値/計算値)に対する統計量			
○終局耐力(kN)										対数正規分布を仮定した場合		
実験値	3469	3321	669.0	634.0	888.0	142.0	240.0	213.0	平均値	対数平均	対数標準偏差	
道示TypeI	3339	3352	621.5	624.2	886.5	133.1	222.8	212.3	1.034	0.0328	0.0345	
道示TypeII	3343	3355	621.9	624.6	887.5	133.3	223.2	212.5	1.033	0.0317	0.0344	
Caltrans	3495	3836	609.2	610.8	878.0	125.7	230.6	200.3	1.030	0.0267	0.0808	
Eurocode	3626	3619	655.2	654.4	928.9	140.9	245.5	224.3	0.969	-0.0316	0.0340	
○終局変位(m)										対数正規分布を仮定した場合		
実験値	0.2009	0.3142	0.0660	0.1069	0.1244	0.0673	0.0342	0.0835	平均値	対数平均	対数標準偏差	
道示TypeI	0.1316	0.1891	0.0670	0.1060	0.0892	0.0493	0.0248	0.0577	1.346	0.2824	0.1877	
道示TypeII	0.1509	0.2974	0.0724	0.1730	0.1399	0.0608	0.0313	0.0808	1.005	-0.0159	0.2256	
Caltrans	0.4009	0.9340	0.1381	0.3642	0.3161	0.1734	0.0701	0.2162	0.408	-0.9116	0.1890	
Eurocode	0.2307	0.2267	0.1224	0.1202	0.1106	0.0796	0.0323	0.0820	0.967	-0.0652	0.2758	

※道示:道路橋示方書

参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 2) <http://www.dot.ca.gov/hq/esc/techpubs/manual/othermanual/other-engine-manual/seismic-design-criteria/sdc.html>, 2004
- 3) N.J.N.Priestley, F.Seible, G.M.Calvi著,川島一彦監修: 橋梁の耐震設計と耐震補強, 技報堂, pp138-143, 1998
- 4) Wai-Fah Chen, Lian Duan: BRIDGE ENGINEERING HANDBOOK, CRC PRESS, pp36-9~36-17, 2000
- 5) EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION: Eurocode2: Design of concrete structures-Part 1-1:General rules and rules for buildings, pp25-40,pp81-83, 2003.12
- 6) EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION: Eurocode8 - Design provisions for earthquake resistance of structures - Part2:Bridges, pp21-23,pp76-77, 1994.12