

道路橋の耐震信頼性評価に関する研究

大住 道生¹・運上 茂樹²・足立 幸郎³・星隈 順一²

¹正会員 工修 建設省土木研究所耐震研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所耐震研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 工修 阪神高速道路公団工務部設計課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)
(前建設省土木研究所耐震研究室)

1. はじめに

従来の土木構造物の耐震設計法は、各種の不確定性の内在する事象を一義的に定義し、これに対してある安全率を有するように設計する許容応力度設計法が主流であった。しかしながら、ISO2394—構造物の信頼性に関する一般原則では信頼性を考慮した構造設計法を採用することが求められている。また、信頼性を考慮した構造設計法では、各設計変数の不確定性を要因毎に考慮して、最適な余裕度の配分をした設計を行うことが可能となることから、合理的に構造物の信頼性をコントロールすることが可能になる。こうした信頼性を考慮した設計法としては、信頼性の確率的な取り扱い方法に応じていくつかのレベルがあるが、不確定性の要因毎に部分係数を用いてそれぞれの信頼性を考慮する部分係数形式の設計法が実務的と考えられている。

しかしながら、構造物の耐震信頼性という観点での部分係数の設定法に関する研究は必ずしも十分でないのが実状である。そこで、本研究では、一般的な道路橋橋脚を対象に信頼性指標を試算するとともに、これを基本に目標信頼性を仮定した場合に、橋脚形式、破壊モードに応じた部分係数の算定を試みた結果をまとめたものである。

2. 現行道路橋示方書における信頼性指標の試算

(1) 設計条件

試算に用いる構造物としては、本研究では、曲げ破壊タイプのRC橋脚、せん断破壊タイプのRC橋脚、コンクリート充填鋼製橋脚を対象にした。平成8年道路橋示方書に従って、示方書の求める耐震性能とほぼ同じになるように試設計を行い、構造諸元を定めた。各構造諸元をそれぞれ表-1、表-2、表-3に示す。これらの表

に示すように、地震動はレベル2のタイプIおよびタイプIIの2種類を考え、曲げ破壊先行型RC橋脚では橋脚断面を3種類、固有周期をそれぞれ2種類、せん断破壊型RC橋脚では橋脚断面3種類、コンクリート充填鋼製橋脚では橋脚断面2種類と変化させて構造諸元を設定した。各橋脚断面の設計は現状の設計と同様に、各パラメータ値は確定値として取り扱った。

表-1 曲げ破壊型RC橋脚の構造諸元

ケース	地震動レベル	橋脚断面	T	V ₀	W	δ _y	μ _a	k _{he}	P _a	k _{he} ·W
			sec	kN	kN	cm			kN	kN
1	タイプII	壁式I	0.57	7100	7782	5.99	3.923	0.669	5205	5205
			0.33	7100	9309	1.13	12.890	0.400	3723	3723
		正方形	0.59	7100	6135	8.31	2.844	0.808	4959	4959
			0.32	7100	10907	1.04	10.690	0.400	4363	4363
		円形	0.59	7100	6755	10.18	2.056	0.992	6700	6700
			0.30	7100	7215	1.68	3.406	0.726	5237	5237
7	タイプI	壁式I	0.62	7100	7470	3.35	2.009	0.489	3654	3654
			0.33	7100	9311	1.13	4.586	0.400	3724	3724
		正方形	0.61	7100	5713	5.58	1.854	0.517	2952	2952
			0.32	7100	10911	1.041	3.626	0.400	4364	4364
		円形	0.60	7100	7342	5.231	1.886	0.511	3749	3749
			0.32	7100	8682	1.213	2.212	0.459	3988	3988

表-2 せん断破壊型RC橋脚の構造諸元

ケース	地震動レベル	橋脚断面	W	k _{he}	P _s	k _{he} ·W
			kN		kN	kN
1	タイプII	壁式直角	15724	1.15	18100	18080
2		正方形	10080	1.05	13035	13020
3		円形	5250	1.00	8553	8539
4	タイプI	壁式直角	10200	1.00	12058	12048
5		正方形	9000	1.00	10026	10006
6		円形	10057	0.85	8553	8549

表-3 コンクリート充填鋼製橋脚の構造諸元

ケース	地震動レベル	橋脚断面	T	V ₀	W	δ _y	μ _a	k _{he}	P _a	k _{he} ·W
			sec	kN	kN	cm			kN	kN
1	タイプII	正方形	0.69	10390	10670	5.82	3.762	0.685	7309	7309
2		円形	0.59	15600	17860	4.44	4.768	0.599	10700	10700
3	タイプI	正方形	0.87	10390	13660	7.14	2.385	0.438	5936	5936
4		円形	0.83	15600	19930	6.33	2.776	0.398	7941	7942

(2) 試算条件

性能関数 $g(\cdot)$ は式(1)に示すとおりとした。

$$g(\cdot) = R/S - 1 \geq 0 \quad (1)$$

ここに、

$g(\cdot)$: 性能関数

R : 曲げに対しては終局塑性率、せん断に対してはせん断耐力

S : 曲げに対しては応答塑性率、せん断に対しては作用せん断力

本研究で仮定した各確率変数の基準値（公称値）、平均値（実勢値）、変動係数をそれぞれ表-4、表-5、表-6に示す。なお、地震による慣性力は確定値として取り扱い、その変動の影響は考慮していない。

また、曲げに対する構造物の応答はエネルギー一定則に基づいて算出したが、エネルギー一定則のばらつきは非線形地震応答解析で算出された213成分の応答塑性率をそれぞれ線形補完したものの平均値、変動係数から対数正規分布を仮定した⁵⁾。

信頼性指標は、AFOSM法(Advanced First-Order Second-Moment Method)により、確率変数を標準化空間に変換し、座標原点から限界状態到達曲面までの最短距離を求めることにより算出した¹²⁾。

(3) 試算結果

現行の道路橋示方書に従って設計された橋脚の信頼性指標をそれぞれ表-7、表-8、表-9に示す。

まず表-7および表-9から、曲げ破壊型では同じ橋脚同士を比較すると、タイプ1地震動に対する信頼性指標の方がタイプ2地震動に対する信頼性指標に比べて高いことが分かる。これは、タイプ1地震動に対する設計の方が、許容塑性率を算出する場合の安全係数 α が大きいことによると考えられる。

また、表-7を見ると信頼性指標がばらついているが、この理由としては、固有周期が異なるとエネルギー一定則に基づくリダクションファクターの平均値や変動係数が異なることや、ケース毎に断面や配筋が異なるためにP- δ 曲線が異なることにより、各変動要素の影響度合いが異なっているものと考えられる。特に曲げ破壊型RC橋脚のケース2、4、8、10では、設計に用いる等価水平震度が下限値規定により定まっていることにより、信頼性指標が相対的に高くなっていると考えられる。等価水平震度の下限値規定は、耐力が極度に低い橋脚を設計することを防ぐために規定されているが、この規定により曲げ破壊という破壊モードに対しては、より安全側の設計となっているものと考えられる。

また、表-7および表-8から、せん断破壊型の信頼性指標が曲げ破壊型の場合に比べて高いことがわかる。この理由としては、せん断耐力の設計式は脆性的な破壊

表-4 曲げ破壊型RC橋脚の確率変数

ばらつき要因	基準値	平均値	標準偏差	変動係数	参考文献
コンクリート強度	24.0 N/mm ²	126%	3.51 N/mm ²	11.2%	2), 3)
コンクリート弾性係数	2.5×10 ⁴ N/mm ²	100%	-	1%	
鉄筋降伏点強度	345 N/mm ²	114%	16.7~21.6	4.5%	2), 4)
鉄筋断面積	公称値	97%	-	1%	2), 6)
鉄筋弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²	97%	-	1%	6)
作用軸力	死荷重反力	100%	-	5%	6)
断面寸法	設計寸法	100%	-	1%	6)
配筋位置	設計寸法	100%	-	1%	6)
終局 δu 評価式	設計 δu	110%	-	31.9%	7)

ばらつき要因	
エネルギー一定則	対象とする固有周期とリダクションファクターに対し、非線形地震時応答解析で算出された213成分の応答塑性率をそれぞれ線形補完したものの平均値と変動係数から正規あるいは対数正規分布を仮定 ⁵⁾

表-5 せん断破壊型RC橋脚の確率変数

ばらつき要因	基準値	平均値	変動係数	参考文献
コンクリート強度	23.5 N/mm ²	126%	11.2%	2), 3)
鉄筋降伏点強度	345 N/mm ²	114%	4.5%	2), 4)
主鉄筋鉄筋断面積	公称値	97%	1%	2), 6)
拘束鉄筋鉄筋断面積	公称値	97%	1%	主鉄筋断面積と同じと仮定
鉄筋弾性係数	2.06×10 ⁵ N/mm ²	97%	1%	6)
作用軸力	死荷重反力	100%	5%	6)
断面寸法	設計寸法	100%	1%	6)
せん断耐力評価式	設計 τc	175%	24.7%	8), 9), 10)

等価重量	死荷重反力	100%	5%	作用軸力と100%相当
------	-------	------	----	-------------

表-6 コンクリート充填鋼製橋脚の確率変数

ばらつき要因	基準値	平均値	標準偏差	変動係数	参考文献
コンクリート強度	24.0 N/mm ²	126%	3.51 N/mm ²	11.2%	2), 3)
鋼材降伏点強度	360 N/mm ²	119%	-	5%	2), 11)
鋼材断面積	公称値	97%	-	1%	6)
鋼材弾性係数	2.1×10 ⁵ N/mm ²	97%	-	1%	6)
作用軸力	死荷重反力	100%	-	5%	6)
断面寸法	設計寸法	100%	-	1%	6)
終局 δu 評価式	設計 δu	104%	-	14.7%	11)

ばらつき要因	
エネルギー一定則	対象とする固有周期とリダクションファクターに対し、非線形地震時応答解析で算出された213成分の応答塑性率をそれぞれ線形補完したものの平均値と変動係数から正規あるいは対数正規分布を仮定 ⁵⁾

を避ける必要があることから、せん断耐力を安全側に評価しており、設計式自体に安全率が含まれていたことによる。また、せん断破壊型では信頼性指標のばらつきが小さいのに対して、曲げ破壊型では信頼性指標のばらつきが大きいことが分かる。これは、せん断破壊の場合はせん断耐力のばらつきの影響であるのに対して、曲げ破壊の場合は、降伏耐力のばらつきの影響に加えて、終局変位のばらつき、およびリダクションファクターのばらつきの影響があることによると考えられる。

また表-7と表-9を比較すると、コンクリート充填鋼製橋脚ではRC橋脚に比べて全体的に信頼性指標が高いことが分かる。これは、鋼製橋脚の固有周期が長いこ

とによりリダクションファクターの平均値が大きくなったことと、鋼製橋脚の終局変位の評価式の変動係数がRC橋脚のものに比較して小さいことが主な原因であると考えられる。

本論文における試算では、橋脚の信頼性指標は1.3～5程度である。耐震設計においてどの程度の信頼性を有していれば妥当であるかという点については、現状では確たる論拠がないが、例えば日本建築学会の建築物の限界状態設計指針(案)¹³⁾、あるいは鋼構造物限界状態設計指針¹⁴⁾のように、地震に対する50年間の目標信頼性指標は、終局限界に対して $\beta_T=1.5$ を例示しているものもある。本論文における信頼性指標は地震荷重を確定値として取り扱っているため、再現期間の概念が入らないが、取り扱っている地震動はレベル2地震動であり、この地震動の再現期間が数百年以上であることを考慮すると、50年間で評価するともう少し大きな信頼性指標を有していると考えられる。

3. 部分係数の試算

エネルギー一定則の確率変数を正規分布と仮定し、目標信頼性指標を1.0、1.5、2.0、2.5としたときの材料係数、構造解析係数、部材係数を試算した。なお、本論では曲げ破壊型RC橋脚のケース3(タイプII地震動、正方形断面、固有周期約0.6s)の場合を例に取り、試算結果を示す。試算にあたっては、目標信頼性指標を調整するために断面寸法を変化させた。

各部分係数の定義は以下の通りである。ここに、上線は平均値、上添字*は目標信頼性指標を再現した設計点での値を示す。

$$\gamma_{mc} \equiv \frac{\overline{\sigma_{ck}}}{\sigma_{ck}^*}$$

$$\gamma_{ms} \equiv \frac{\overline{\sigma_{sy}}}{\sigma_{sy}^*}$$

$$\gamma_a = \frac{\mu_R^*}{\mu_R}$$

$$\gamma_b = \frac{\overline{\mu_u}}{\mu_u^*}$$

- ここに、 γ_{mc} ：コンクリートの材料係数
 γ_{ms} ：鉄筋の材料係数
 γ_a ：構造解析係数
 γ_b ：部材係数
 σ_{ck} ：コンクリートの設計基準強度

表-7 曲げ破壊型RC橋脚の信頼性指標

ケース	地震動	躯体断面	固有周期(sec)	終局(u)	
				β	Pf
1	タイプII	壁式	0.57	1.767	0.0386
2			0.33	2.225	0.0131
3		正方形	0.59	1.712	0.0435
4			0.32	1.878	0.0302
5		円形	0.59	1.370	0.0853
6			0.30	1.277	0.1008
7	タイプI	壁式	0.62	2.086	0.0185
8			0.33	2.617	0.0044
9		正方形	0.61	2.001	0.0227
10			0.32	2.380	0.0087
11		円形	0.60	1.955	0.0253
12			0.32	1.844	0.0326

表-8 せん断破壊型RC橋脚の信頼性指標

ケース	地震動	躯体断面	β	Pf
1	タイプII	壁式	2.393	0.008
2		正方形	2.345	0.010
3		円形	2.230	0.0129
4	タイプI	壁式	2.265	0.0118
5		正方形	2.225	0.0130
6		円形	2.222	0.0131

表-9 コンクリート充填鋼製橋脚の信頼性指標

ケース	地震動	躯体断面	β	Pf
1	タイプII	正方形	3.642	1.4×10^{-4}
2		円形	3.461	2.7×10^{-4}
3	タイプI	正方形	5.058	2.1×10^{-7}
4		円形	5.350	4.4×10^{-8}

σ_{sy} ：鉄筋の降伏点
 μ_R ：応答塑性率
 μ_u ：終局塑性率

表-10に試算した部分係数を示す。この結果を見ると、コンクリートの材料係数、鉄筋の材料係数ともに目標信頼性指標の値に関わらずほぼ1.0であることが分かる。このことから、材料のばらつきは設計結果の信頼性指標に対してはあまり影響がないと言える。また、構造解析係数は、0.76から0.79とほとんど変化していない。構

表-10 目標信頼性指標に対する部分係数

	β	Pf	h^*	μ_u^*	μ_R^*	μ_u	μ_R	γ_{mc}	γ_{ms}	γ_b	γ_a
目標 $\beta=1.0$	1.004	0.158	0.888	2.415	2.363	3.001	3.012	1.008	1.003	1.24	0.78
目標 $\beta=1.5$	1.499	0.067	0.961	2.070	2.070	3.582	2.609	1.009	1.003	1.73	0.79
目標 $\beta=2.0$	2.003	0.023	1.064	1.722	1.722	4.620	2.187	1.011	1.002	2.68	0.79
目標 $\beta=2.5$	2.500	0.006	1.241	1.297	1.296	7.145	1.711	1.008	1.001	5.51	0.76

対象：曲げ破壊型RC橋脚ケース3

造解析係数は本論ではエネルギー一定則による応答推定のばらつきにかかる係数であるから、構造解析係数が1より小さいということは、エネルギー一定則が安全側の評価となっているので割り戻した方が最適な設計ができることを示している。一方、部材係数は目標信頼性指標の増加とともに増加している。部材係数は橋脚の終局変位の算定にかかる係数である。すなわち、本論で考慮した一連のばらつきの中で、橋脚の終局変位の推定の部分に余裕度をとることで最も効率よく構造全体の信頼度を上げることができていることが分かる。

4. まとめ

道路橋橋脚を対象に、現行道路橋示方書に従って耐震設計を行った構造物の信頼性指標を試算し、さらに目標信頼性指標を満たすように各部分係数を試算した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 現行道路橋示方書に従って、設計された壁式、正方形断面の橋脚のレベル2地震動に対して終局限界状態の信頼性指標は、地震力を確定値として試算した場合1.3~5程度である。
- (2) 本論で対象とした橋脚については、設定した4つの部分係数の内、コンクリートの材料係数、鉄筋の材料係数はどの目標信頼性指標に対してもほぼ1.0となった。
- (3) 本論で対象とした橋脚については、構造解析係数は0.76から0.79と目標信頼性指標の変化に対して余り変化せず、一様にエネルギー一定則による余裕度を割り戻した方が最適な設計になるとの試算結果が得られた。
- (4) 本論で対象とした橋脚については、部材係数は目標信頼性指標を高くするに従って、大きくなった。すなわち、本論で考慮した一連のばらつきの中で、橋脚の終局変位の推定の部分に余裕度をとることで最も効率よく構造全体の信頼度を上げることができていることが分かった。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、1996年12月
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリートの靱性保証型耐震設計指針・同解説、P.39、1997
- 3) 高橋利一：受託試験におけるコンクリートの圧縮強度に関する調査、昭和59年度GBRC、(財)日本建築総合試験所、39号、1985
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度に関する資料、1987
- 5) 足立幸郎・運上茂樹：材料強度のばらつきが鉄筋コンクリート橋脚の地震応答特性に及ぼす影響、コンクリート構造系の安全性評価研究委員会報告書・論文集、(社)日本コンクリート工学協会、1999
- 6) 中埜良昭：信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究、東京大学博士論文、1988
- 7) 浅津・運上・星隈・近藤：軸方向鉄筋の座屈長がRC橋脚の塑性ヒンジ長に与える影響、地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム、(社)土木学会、1999
- 8) 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室：大型RCはり供試体のせん断強度に関するデータ集、土木研究所資料第3426号、1996
- 9) 井畔瑞人・塩屋俊幸・野尻陽一・秋山輝：等分布荷重下における大型コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究、土木学会論文集第348号、1984
- 10) 丹羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村甫、せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集第372号、1986
- 11) 建設省土木研究所他：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書、1999
- 12) 長尚著：基礎知識としての構造信頼性設計、1995
- 13) 限界状態設計法小委員会：建築物の限界状態設計指針(案)第1版、1999.3
- 14) 日本建築学会：鋼構造物限界状態設計指針・同解説、1998