

材料特性のばらつきを考慮した RC 橋脚の耐震信頼性評価

Seismic Performance Evaluation of RC Bridge Columns in consideration of Variation of Material Properties

西田秀明*, 運上茂樹**

Hideaki Nishida and Shigeki Unjoh

*修(工) 研究員 独立行政法人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)

** 工博 上席研究員 独立行政法人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)

The paper presents the seismic performance evaluation of RC bridge columns in consideration of the variation of material properties based on reliability theory. Event tree analysis was carried out to consider plural limit states simultaneously on the seismic performance of RC columns. Damage probabilities were evaluated for ten flexural failure type RC columns which were designed according to the seismic design specifications of highway bridges. Moreover, sensitivity of safety factors for each limit states was analyzed. These results indicated that current limit states were satisfied over 90% when the variation of material properties was considered. It was also found that the failure mode depends on the assumption of material properties interrelation between longitudinal and hoop bars considerably. Safety factor for flexural strength is the most sensitive to reduce the damage probability of RC columns.

Key Words: Reliability theory, Material properties, Safety factor, RC bridge column

キーワード: 信頼性理論, 材料特性, 安全係数, RC 橋脚

1. はじめに

国際標準規格 (ISO2394: 構造物の信頼設計基準) では, 構造物の性能評価は確率を考慮した限界状態設計法に基づいて行うこととしている¹⁾. このような国際化の動きに伴い, 道路橋示方書²⁾においても, 部分安全係数を考慮した限界状態設計法への移行が検討されており, 各構造部材の非線形特性を考慮し, 橋全体系の耐震性能を評価できる設計体系の構築が必要となっている.

一般に, ある限界状態に対する耐震性能評価は, 耐力 (抵抗) と作用力 (荷重) の大小関係に基づいて行う. この際, 部材に要求される評価項目は一つだけでないことから, 複数の限界状態を同時に考慮する必要がある. また, 橋全体系を対象とした場合, 橋脚の他に基礎や支承・上部構造に関する限界状態をも同時に考慮するとともに, キャパシティデザインの概念に基づきある部位に確実に所定の損傷を誘導する場合には, 部材間あるいは部材内の耐力階層化についても考慮する必要がある. さらに, 大規模地震を想定する場合は, 部材の非線形性も考慮する必要もある. このような評価を確率を考慮した信頼性理論に基づいて構造物設計時に逐一行うことが理想的であるが, 非常に煩雑になることから, あらかじめ信頼性理論に基づいて設定した部分安全係数や耐力階層化係数を用いて, 要求耐震性能を満足するようにすることが実用的である.

材料特性や評価式等の不確定性を考慮し信頼性理論に

基づいた耐震信頼性評価手法としては, 単独の限界状態に対してはモンテカルロシミュレーション法や一次近似二次モーメント法 (FORM: First-Order second-moment Reliability Method) などがあり, これを基に現行設計による耐震信頼性評価と部分安全係数を試算した事例は比較的多く存在する^{例えば³⁾}. しかし, 複数の限界状態を同時に考慮した例としては, 地震 PSA による手法や^{例えば⁴⁾}, 複数の限界状態から構成される破壊事象から構造系としての破壊確率を算定する構造系信頼性評価法と逐次 2 次計画法に基づく構造最適化手法を組み合わせた研究⁵⁾, 耐力階層化を含んだ研究としては, RC 橋脚と場所打ち杭基礎を対象とした研究⁶⁾や RC 橋脚と支承・上部構造を対象とした研究⁷⁾などがあるものの, まだ評価手法として一般化するにはさらに研究が必要な状況である.

以上のような背景から, 複数の限界状態を同時に考慮した耐震信頼性評価法の確立とそれに基づく部分安全係数の設定が必要とされている. そこで, 本研究では, 道路橋示方書において耐震性能 2 を満足するように設計した曲げ破壊型 RC 橋脚を対象に, Event Tree とモンテカルロシミュレーションに基づく個々の限界状態に対する耐震信頼性を組み合わせ, 材料特性のばらつきを考慮した際の複数の限界状態を考慮した耐震信頼性評価を行った. さらに, 各限界状態に対する安全係数の設定が, 橋脚の耐震信頼性に及ぼす影響について感度分析を行った.

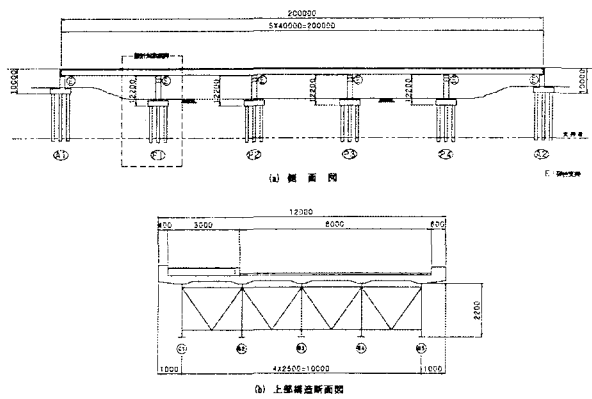


図-1 想定した橋梁

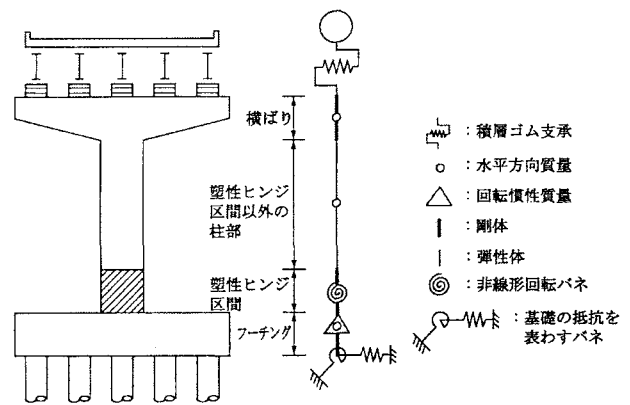


図-2 動的解析モデル

表-1 橋脚および支承の試設計結果

(1)BP 支承

橋梁No.		1	2	3	4	5	
固有周期(秒)		橋軸	1.06	0.74	1.02	0.60	1.64
		橋軸直角	1.21	0.74	1.08	0.56	1.69
橋脚	断面高(m)	橋軸	4.50	2.50	3.50	2.00	5.00
		橋軸直角	4.50	5.00	17.50	8.50	6.50
	柱高(m)		19.5	11.5	17.5	8.5	26.5
	軸方向鉄筋 径と本数	橋軸	D35-36本×2	D32-34本×2	D32-39本×2	D32-51本	D35-51本
		橋軸直角		D32-17本	D32-34本×2	D32-15本	D35-33本
	横拘束筋径 と本数	橋軸	D16-8本	D13-6本	D16-6本	D16-8本	D13-8本
		橋軸直角		D13-5本	D16-7本	D16-4本	D13-6本
	支承	支承幅(mm)		800	600	600	540
支承高(mm)		315	250	250	230	230	
アンカー径と本数		φ 70(M68)×4	φ 70(M68)×4	φ 65(M64)×4	φ 60(M60)×4	φ 55(M52)×4	

(2)ゴム支承

橋梁No.			6	7	8	9	10
固有周期(秒)		橋軸	1.43	1.38	1.43	1.30	1.60
		橋軸直角	1.35	1.23	1.29	1.15	1.49
橋脚	断面高(m)	橋軸	4.50	2.50	3.50	2.00	5.00
		橋軸直角	4.50	5.00	17.50	8.50	6.50
	柱高(m)		19.5	11.5	17.5	8.5	26.5
	軸方向鉄筋 径と本数	橋軸	D29-36本	D32-35本×2	D35-39本	D29-43本×2	D32-51本
		橋軸直角		D32-18本	D35-27本	D29-13本	D32-39本
	横拘束筋径 と本数	橋軸	D13-6本	D16-6本	D16-6本	D16-8本	D13-8本
		橋軸直角		D16-5本	D16-5本	D16-5本	D13-7本
	支承	支承有効幅(mm)		650	720	680	730
支承高(mm)		21.0×7	22.0×8	21.0×7	23.0×7	25.0×8	
鋼板の鋼材と厚さ(mm)		SS400 3mm					

2. 解析対象橋脚の試設計

図-1 に示すⅡ種地盤上の5区間連続鋼桁橋⁸⁾のP1 橋脚を対象に、基礎や上部構造は損傷が生じないだけの十分な耐力を有すると仮定して、RC 橋脚（コンクリート設計基準強度 24N/mm²、鉄筋 SD345）と支承（水平力分散ゴム支承およびBP 支承）の諸元を変更し、現行道路橋示方書の耐震性能 2 に対する照査を満足するように試設計した。RC 橋脚は、曲げ破壊型となるようにするとともに、固有周期が適度にばらつくように断面諸元と橋脚高さを

変更し、支承タイプにつきそれぞれ5基（計10基）を試設計した。

水平力分散ゴム支承を有する橋梁の場合は、道路橋示方書に基づく動的解析に基づく照査が必要であるため、全体系（設計振動単位レベル）を図-2のようにモデル化し、橋脚の塑性ヒンジ区間でのモーメント-回転角関係をトリリニア武田モデル、全体系の減衰を Rayleigh 減衰（1次固有振動数と10Hzで5%）として動的解析した。照査は、レベル2タイプⅡ地震動のⅡ種地盤に対する標準波3波²⁾に対する応答値の平均で行った。

BP 支承を有する橋梁の場合は、死荷重反力等の条件が同じである単純桁橋を想定し、静的解析による照査を満足するように試設計した。

以上の条件に基づいて試設計した結果を表-1 に示す。

3. RC 橋脚の耐震信頼性評価手法と安全係数の感度分析

3. 1 RC 橋脚の限界状態と安全係数の設定

道路橋示方書における静的解析に基づく RC 橋脚の照査は、破壊形態の判定とそれに応じた耐力や変形に関する限界状態の判定から成り立っている。破壊形態の判定も限界状態の一つと考えると、RC 橋脚の照査で考慮する限界状態は6つとなる。これを（耐力／荷重）の形式で示すと以下ようになる。

$$P_s / P_u \geq \gamma_{b1} \quad (1)$$

$$P_{s0} / P_u \geq \gamma_{b2} \quad (2)$$

$$P_u / (k_{hc} \cdot W) \geq \gamma_{b3} \quad (3)$$

$$P_u / (k_{hc0} \cdot W) \geq \gamma_{b4} \quad (4)$$

$$P_{s0} / (k_{hc0} \cdot W) \geq \gamma_{b5} \quad (5)$$

$$\delta_{Ra} / \delta_R \geq \gamma_{b6} \quad (6)$$

ここで、

P_u ：終局水平耐力

P_s ：荷重交番繰返し作用を考慮したせん断耐力

P_{s0} ：荷重交番繰返し作用を考慮しないせん断耐力

W ：等価重量

k_{hc} ：レベル2 地震動の設計水平震度

k_{hc0} ：レベル2 地震動の設計水平震度の標準値

δ_{Ra} ：許容残留変位（橋脚基部から上部構造慣性力作用位置までの高さの 1/100）

δ_R ：残留変位

式(1)は曲げ破壊型かせん断破壊型かの判定、式(2)は曲げせん断破壊型かせん断破壊型かの判定、式(3)～(5)はそれぞれ曲げ破壊型、曲げせん断破壊型およびせん断破壊型となる時の耐力に対する照査、式(6)は残留変位に対する照査に対応する。ここで、式の右辺の γ_{bi} ($i=1\sim6$)は本研究で考慮した安全係数であり、 $\gamma_{bi}=1$ の時は現行道路橋示方書の照査式と一致する。部分安全係数は通常荷重係数と抵抗係数を分離して表す場合が多いが、ここでは各限界状態に対して両者を含んだ形で 1 つの係数で代表させているものもあるため、単に安全係数とよぶこととする。なお、荷重側のばらつきを考慮しない場合は、これは抵抗係数を意味する。

3. 2 各限界状態に対する安全裕度と生起確率の算出方法

各限界状態に対して、材料強度や評価式等の不確実性を考慮すると、各限界状態がしきい値を超えるか否かは確率

表-2 材料特性に関する統計量 (N/mm²)

	コンクリート		鉄筋	
	圧縮強度	弾性係数	降伏強度	弾性係数
平均値	29.3	2.45×10^4	383	2.00×10^5
変動係数	11%	圧縮強度に依存	5%	降伏強度に依存

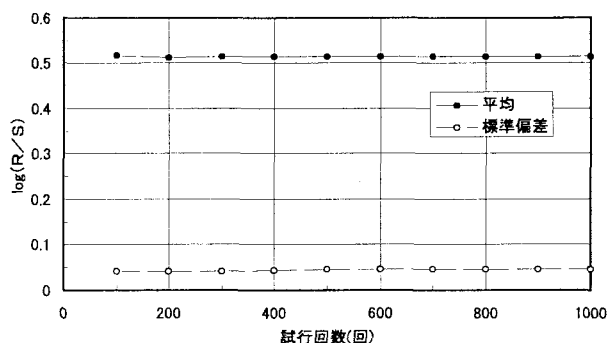


図-3 モンテカルロシミュレーションの試行回数と R/S のばらつきの関係¹⁰⁾

量として表現される。限界状態を式(1)～(6)の左辺のように表すと、これは一般には耐力（限界値）R と荷重（応答値）S の比（R/S）を意味していることから、R/S を安全裕度と定義する。ここで、式(1)～(6)で $\gamma_{bi}=1$ とすると、R/S が1未満となる確率が、しきい値を超えない確率（損傷確率）となる。

この確率は、不確定要因のばらつきの分布形状に依存するため正確かつ簡便に求めることは難しいが、ここでは R/S は対数正規分布に従うものと仮定した。よって、R/S が1未満の確率は、R/S の対数が0未満の確率と等しくなる。

不確定要素として、表-2 に示す材料特性（コンクリートおよび鉄筋）のばらつきを考慮し、各統計量のばらつきは正規分布に従うものとした。ここで、材料強度の設計値が実際のものと比較して小さく設定されていることから、平均値は、実際の材料強度が 95%確率で設計値を上回るとして、式(7)により評価した。

$$S_{ck} = \mu \times (1 - 1.645\xi) \quad (7)$$

ここで、

S_{ck} ：設計値

μ ：材料強度の平均値

ξ ：変動係数

変動係数は文献⁸⁾によった。弾性係数、曲げ応力度、せん断応力度は道路橋示方書に基づいて基準強度との関係から評価するとともに^{2),9)}材料強度と完全相関であるとした。また、鉄筋とコンクリートは完全独立とした。これら以外は全て確定量として取り扱った。なお、静的解析に用いる設計水平震度は、材料特性のばらつきによる固有周期の違いで変化しうるが、設計で用いた固有周期に固定して求めた。

各限界状態に対してこのばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションを行い、R/S が対数正規分布に従う

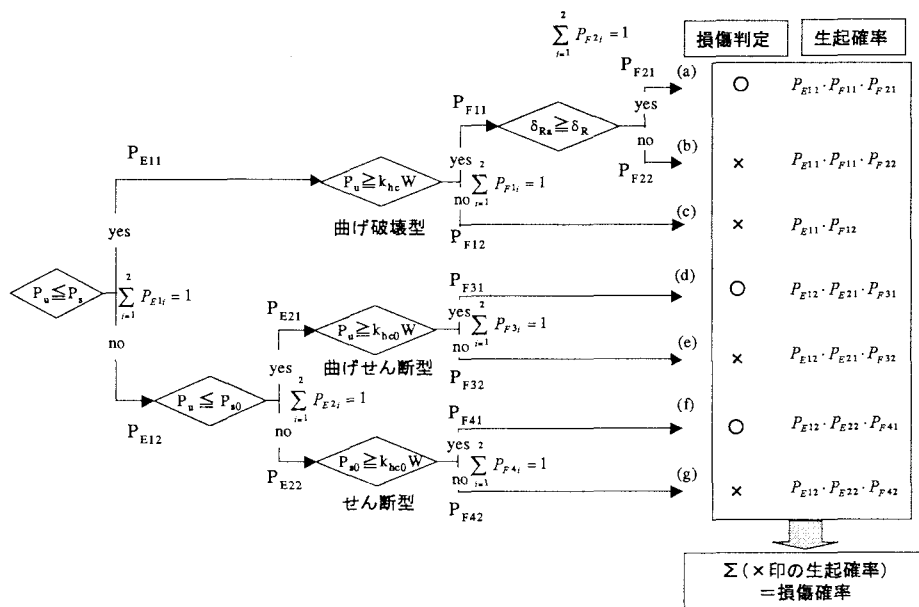


図-4 耐震性能2に対するRC橋脚のEvent Tree (静的解析による照査の場合)

との仮定の下で平均値と標準偏差を求め、 $\log(R/S)$ が0を下回る部分の面積から損傷確率を評価した。モンテカルロシミュレーションは静的解析では1,000回、動的解析では地震波1波あたり100回とした。試行回数を100回から1,000回まで変えた時の R/S (対数)のばらつき(平均値と標準偏差)の関係の例を図-3に示す。これより、分布形状を仮定している場合、試行回数を100回程度行えば平均値と標準偏差を安定した十分な精度の解として求められるといえる。この結果から、特に解析に時間を要する動的解析での試行回数を最小限にするために、動的解析では100回とした。

3.3 耐震信頼性評価法

一つの限界状態に対する耐震信頼性評価の場合と異なり、複数の限界状態を同時に考慮して耐震信頼性評価を行うには、限界状態間の相関関係を考慮する必要がある。考慮すべき限界状態が少なければモンテカルロシミュレーションや限界状態間の相関係数を仮定して耐震信頼性評価も可能だが、多くなると、試行回数が膨大になることや高次の事象に対する相関の評価が困難になることから現実的とはいえない。また、これらの方法では複数の限界状態のうち、ある一つの限界状態に関する条件が変わっただけでも全て再計算する必要が生じる。このことから、各限界状態に対し個別に評価した耐震信頼性の組み合わせにより評価することができれば望ましいと考えられる。

そこで、個別に評価した耐震信頼性の組み合わせによる評価法として、Event Treeを用いて各限界状態の生起確率の条件付き確率として求める方法の適用性について検討した。また、モンテカルロシミュレーションにより損傷と判定された回数から損傷確率を判定する方法に比べ試行回数が少なくすむ手法として、複数の限界状態を考慮して求めた安全裕度の最小値の分布に基づく耐震信頼性評価法についても検討し、評価手法の違いを比較した。

表-3 複数の限界状態を考慮した損傷確率評価法

試行回数	安全裕度 R/S			健全性評価 ○：健全 ×：損傷	安全裕度 min
	限界状態1	限界状態2	限界状態3		
1	1.2	0.7	1.3	×	0.7
2	2.0	1.5	2.2	○	1.5
3	0.8	0.7	0.7	×	0.7
・	・	・	・	・	・
n	・	・	・	・	・

(1) Event Treeを用いた耐震信頼性評価法

式(1)～(6)を道路橋示方書の静的解析による照査手順に合わせてEvent Treeで示すと図-4のようになり、考え得る生起事象は(a)～(f)までの7つあることがわかる。各限界状態の生起確率 P を図に示すようにすると、各事象の生起確率は、各限界状態の生起確率をもとにその条件付き確率として求められる(図の右側の列)。各生起事象の確率の和は当然のことながら1となる。このうち、損傷と判定される(b)、(c)、(e)、(g)の確率の和からRC橋脚の損傷確率を求めることができる。この方法を静的解析に基づいて照査を行うBP支承を有する橋脚に対して適用した。また、動的解析による照査を行う水平力分散ゴム支承を有する橋脚は、橋脚が曲げ破壊型となることを前提として解析モデルを組んでいることから、曲げ破壊型に関する限界状態のみ((a)～(c))を考慮した。ただし、曲げ耐力にかわり塑性率に関する限界状態(式(8))で評価した。

$$\mu_a / \mu_r \geq \gamma_{b7} \quad (8)$$

ここで、

μ_a : RC橋脚の許容塑性率

μ_r : RC橋脚の最大応答塑性率

(2) 安全裕度の最小値の分布に基づく耐震信頼性評価法

表-3の一番右の列のように、複数の限界状態に対して、

モンテカルロシミュレーションの各試行回における安全裕度 R/S が最小となる値を抽出した。表-3 の試行回1では限界状態2において R/S が1を下回っており、構造システムとしてみると損傷を意味する。また、試行回3でも全ての限界状態に対して1を下回っており同様にシステムとしては損傷となる。複数の限界状態の損傷確率は、限界状態間に相関（ある限界状態Aが損傷となるとその一定割合で別の限界状態Bも損傷となる関係）がある場合、各限界状態に対する損傷確率の和から、相関分（積集合）を割り引いて評価する必要がある。しかし、限界状態間の相関度合いを予め設定することは一般に困難である。ここで、同一試行回において R/S が最小の限界状態（つまり、当該試行回において一番クリティカルな限界状態）だけを抽出とすると、積集合部分において相対的に近い限界状態の集合に属すると判断することになるため、相関度合いを予め設定しなくとも適切にシステムの損傷確率を評価することが可能である。以上より、 R/S が最小となる値の集合が和集合とみなすことができるので、この分布が対数正規分布に従うとして、0を下回る確率分布から、RC橋脚の損傷確率を評価した。ここで対象となる限界状態は損傷形態の判定を除いた式(3)~(6)である。また、動的解析による照査をおこなう水平力分散ゴム支承を有する橋脚は、前述同様に、曲げ破壊型に対する限界状態（式(3)と(6)、ただし式(3)は式(8)に置き換え）のみを考慮した。

3. 4 安全係数の感度分析

道路橋示方書に基づいて曲げ破壊型となるように設計したRC橋脚において、耐震信頼性に及ぼす感度が大きい（安全裕度が相対的に小さい）と考えられる限界状態（式(1),(3),(6),(7)）に対する安全係数 γ_b を変更し、その照査を満たすように必要に応じて再設計した。これらの橋脚に対し、式(1)~(7)の安全係数のうち1つを1.0（この係数が全て1.0の時は、現行道路橋示方書による照査と同等になる）、1.1、1.2を橋軸および橋軸直角方向同時に変化させた場合にRC橋脚の耐震信頼性に及ぼす影響について感度分析を行った。なお、ここでの対象はBP支承を有する橋脚5基（表-1の橋梁No.1~No.5）とし、モンテカルロシミュレーションの試行回数は1,000回とした。

4. 解析結果

4. 1 RC橋脚の耐震信頼性評価結果

材料特性に関するばらつきを考慮した場合のRC橋脚の損傷確率 P_f と耐震信頼性指標 β の評価結果（橋軸及び橋軸直角方向共に考慮した耐震信頼性評価結果）を表-4に示す。表中、Event Treeから求めた場合をA法、安全裕度の最小値の分布から求めた場合をB法とする。また、表-3中の健全性評価の項目で損傷と判定された個数を試行回数で除しても損傷確率を得ることができるのでC法として示す。ただし、この方法では、損傷確率が小さい場合は相当数の試行回数が必要となるので、ここでは参考程度に示す。 β は R/S の対数平均 μ と標準偏差 σ から $N(\mu, \sigma)$ で定義した

表-4 RC橋脚の耐震信頼性評価結果

(1)BP支承を有する橋脚

橋梁No.		1	2	3	4	5
A法	P_f	0.3%	7.7%	6.6%	$\approx 0\%$	0.1%
	β	0.3%	7.7%	5.8%	$\approx 0\%$	0.1%
B法	P_f	0.3%	7.7%	5.8%	$\approx 0\%$	0.1%
	β	2.7	1.4	1.6	6.6	3.1
C法	P_f	0.6%	8.8%	6.8%	0.0%	0.1%

(2)ゴム支承を有する橋脚

橋梁No.		6	7	8	9	10
A法	P_f	6.7%	8.1%	2.5%	2.8%	$\approx 0\%$
	β	6.1%	3.1%	2.3%	1.1%	$\approx 0\%$
B法	P_f	6.1%	3.1%	2.3%	1.1%	$\approx 0\%$
	β	1.5	1.9	2	2.3	7.3
C法	P_f	6.0%	0%	0%	0.3%	0%

表-5 各限界状態の生起確率

橋梁No.		1	2	3	4	5
橋軸方向	P_{E11}	1	1	1	1	1
	P_{E21}	1	1	1	1	1
	P_{F11}	1	0.923	0.996	1	0.999
	P_{F21}	1	≈ 1	0.99	≈ 1	1
	P_{F31}	0	0	0	0	0
	P_{F41}	0	0	0	0	0
橋軸直角方向	P_{E11}	1	1	1	1	1
	P_{E21}	1	1	1	1	1
	P_{F11}	0.997	1	0.943	1	1
	P_{F21}	1	1	1	≈ 1	1
	P_{F31}	0	0	0	≈ 0	0
	P_{F41}	0	0	0	≈ 0	0

※0は 10^{-20} 以下、1は $(1-10^{-20})$ 以上を指す

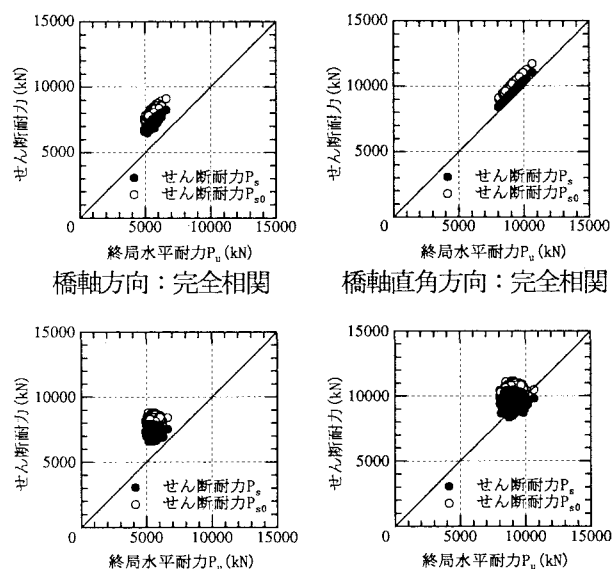


図-5 軸方向鉄筋と帯鉄筋の相関の有無による曲げ及びせん断耐力分布の違い

ものである。

さらに、BP支承を有する橋脚の場合について各限界状態に対する生起確率を表-5に示す。ここで、表中の確率Pは図-4に対応するものである。

Event Treeから求めた場合と安全裕度の最小値の分布が

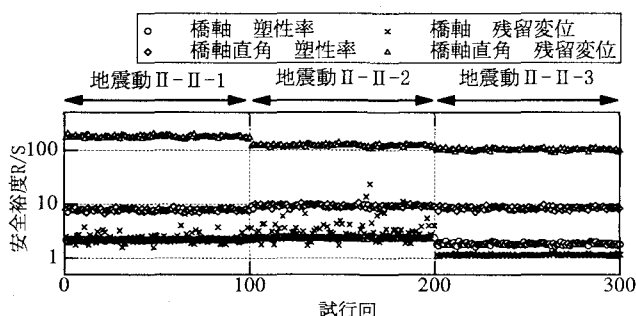


図-6 入力地震動と安全裕度の関係の例 (橋梁 No.7)

表-6 安全係数を変更した場合に再設計が必要となる橋脚

橋脚 No.	γ_{b1}			γ_{b3}			γ_{b6}		
	1.0	1.1	1.2	1.0	1.1	1.2	1.0	1.1	1.2
1	○	○	○	○	△	△	○	○	○
2	○	○	△	○	▲	×	○	○	○
3	○	○	○	○	×	×	○	○	▲
4	○	○	△	○	○	○	○	○	○
5	○	○	○	○	▲	▲	○	○	○

再設計 ○：不要 ▲：橋軸 △：橋軸直角 ×：両方向

表-7 安全係数を変更した場合の再設計結果 (灰色は変更箇所)

(1)橋梁 No.1

γ_{b3}		軸方向鉄筋		帯鉄筋, 中間帯鉄筋	
橋軸	橋軸直角	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向
1.0	1.0	D35×36 本(2 段)	D35×36 本(2 段)	D16×8 本	D16×8 本
1.1	1.1	D35×36 本(2 段)	D35×44 本(2 段)	D16×8 本	D16×8 本
1.2	1.2	D35×36 本(2 段)	D35×52 本(2 段)	D16×8 本	D16×8 本

(2)橋梁 No.2

γ_{b1}		軸方向鉄筋		帯鉄筋, 中間帯鉄筋	
橋軸	橋軸直角	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向
1.0	1.0	D32×34 本(2 段)	D32×17 本(1 段)	D13×6 本	D13×5 本
1.1	1.1	D32×34 本(2 段)	D32×17 本(1 段)	D13×6 本	D13×5 本
1.2	1.2	D32×34 本(2 段)	D32×17 本(1 段)	D13×6 本	D13×6 本
γ_{b3}		軸方向鉄筋		帯鉄筋, 中間帯鉄筋	
橋軸	橋軸直角	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向
1.0	1.0	D32×34 本(2 段)	D32×17 本(1 段)	D13×6 本	D13×5 本
1.1	1.1	D32×39 本(2 段)	D32×17 本(1 段)	D13×7 本	D13×5 本
1.2	1.2	D32×43 本(2 段)	D32×21 本(1 段)	D13×7 本	D13×5 本

(3)橋梁 No.3

γ_{b3}		軸方向鉄筋		帯鉄筋, 中間帯鉄筋	
橋軸	橋軸直角	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向
1.0	1.0	D32×39 本(2 段)	D32×27 本(1 段)	D16×6 本	D16×7 本
1.1	1.1	D32×42 本(2 段)	D32×34 本(1 段)	D16×6 本	D16×7 本
1.2	1.2	D32×46 本(2 段)	D32×41 本(1 段)	D16×6 本	D16×7 本
γ_{b6}		軸方向鉄筋		帯鉄筋, 中間帯鉄筋	
橋軸	橋軸直角	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向
1.0	1.0	D32×39 本(2 段)	D32×27 本(1 段)	D16×6 本	D16×7 本
1.1	1.1	D32×39 本(2 段)	D32×27 本(1 段)	D16×6 本	D16×7 本
1.2	1.2	D32×43 本(2 段)	D32×27 本(1 段)	D16×6 本	D16×7 本

(4)橋梁 No.5

γ_{b3}		軸方向鉄筋		帯鉄筋, 中間帯鉄筋	
橋軸	橋軸直角	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向
1.0	1.0	D35×51 本(1 段)	D35×33 本(1 段)	D13×8 本	D13×6 本
1.1	1.1	D35×58 本(1 段)	D35×33 本(1 段)	D13×8 本	D13×6 本
1.2	1.2	D35×68 本(1 段)	D32×35 本(1 段)	D13×8 本	D13×6 本

ら求めた場合を比較すると、橋梁 No.7 と No.9 を除き、評価法にさほど依存せずほぼ同等の損傷確率となった。また、損傷判定個数を試行回数で除して得られた損傷確率でも BP 支承の場合はおおむね同等の評価結果となった。この

ことは、全ての限界状態に対して試行回毎に最小値を抽出してその分布を求めなくても、個別の限界状態に対して生起確率を算出し、それを図-4 のような形式で組み合わせれば耐震信頼性を同等に評価できることを示している。つ

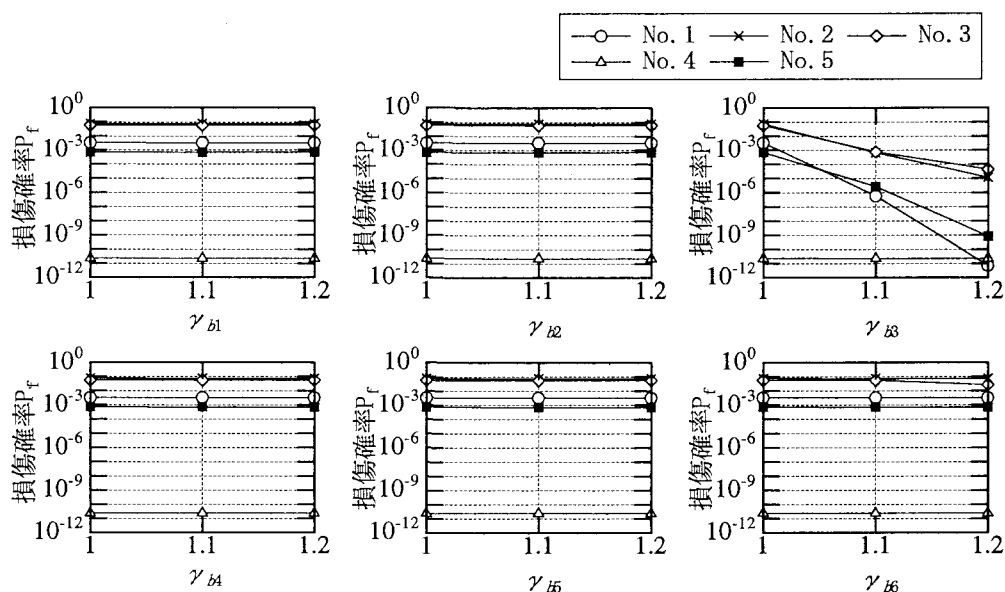


図-8 各安全係数がRC橋脚の耐震信頼性に及ぼす感度分析結果

まり、ある限界状態の定義が変わっても、全ての限界状態に対して試算をして分布形状を求めるのではなく、その限界状態に関わる生起確率だけ再評価すれば構造システムの耐震信頼性を評価できることを意味しているといえる。

BP 支承を有する橋脚では、損傷確率が最大 7.7% となったが、橋梁 No.2,3 を除くと 1% 未満と小さい。最大となった No.2 では橋軸方向の、No.3 では橋軸直角方向の曲げ耐力が、他のケースおよび限界状態の生起確率より大きく、損傷に対する支配的な要因であることがわかる。また、試算範囲では、せん断破壊モードとなる確率はほぼ 0 となった。これは、軸方向鉄筋と帯鉄筋の強度が完全相関であるとしたことにより、せん断耐力と曲げ耐力の相関性が高くなったためと考えられる。しかし、実際には、軸方向鉄筋と帯鉄筋は一般に同一ロッドから製作されるのではないことから、むしろ独立関係にあると考えられる。そこで、No.2 を対象に、軸方向鉄筋と帯鉄筋の強度を独立として取り扱い耐震信頼性を評価した結果、23% がせん断破壊モードとなるとともに、損傷確率もほぼ 0 から 23% と大きくなった。この時の曲げ耐力とせん断耐力分布を図-5 に示す。軸方向鉄筋と帯鉄筋を完全相関の時は、全てのケースでせん断耐力が曲げ耐力を上回った。これに対して、独立と仮定した場合は、橋軸方向は全てせん断耐力が曲げ耐力を上回ったものの、橋軸直角方向では逆転しているケースも相当数存在し、曲げ破壊型からせん断破壊型もしくは曲げせん断破壊型へ移行するケースが存在する結果となった。このことから、統計量の相関の取り扱いが耐震信頼性評価に大きく影響することがわかる。

ゴム支承を有する橋脚では、A 法による損傷確率が No.6 で 6.7%、No.7 で 8.1% とやや高く、それ以外でも 3% 程度 BP 支承の場合と比べて損傷確率が高くなった。また、地震動によっても耐震信頼性の評価結果が大きく異なったケースもあった。橋梁 No.7 に対する例を図-6 に示す。橋軸直角方向の残留変位に対する安全裕度 R/S が 100 程度

以上、橋軸直角方向の塑性率が 10 程度と大きく、橋軸方向の 2 つの限界状態に対する R/S は 1~10 程度と低い。また、地震動 II-II-1 と II-II-2 はいずれの限界状態とも R/S にそれほど差はないが、II-II-3 では安全裕度が全体的に小さくなっている。前 2 波では、橋軸方向に関する限界状態はほぼ同程度の安全裕度となっているが、II-II-3 では特に残留変位の安全裕度が 1.0 に近くまで小さくなっている。また、地震動 II-II-2 の橋軸方向の残留変位に関するばらつきが、他の 2 波に比べると大きい。このことから、応答スペクトルがほぼ同じであっても、地震動の位相特性が各限界状態の安全裕度に及ぼす影響は相当程度存在し、結果として構造システムの耐震信頼性評価にも影響することがわかる。

以上より、試算の範囲において、橋脚の材料特性のばらつきを考慮した場合、軸方向鉄筋と帯鉄筋の材料強度が完全相関とすると、支承タイプの違いによらず道路橋示方書の照査を 9 割以上の確率で満足する結果となった。ただし、道路橋示方書の照査式で用いる耐力および荷重項は、すでに安全係数を含んでいることから、安全係数を除いた真の限界状態を対象に耐震信頼性を評価すると、損傷確率はより小さくなるものと考えられる。

4.2 安全係数が RC 橋脚の耐震信頼性に及ぼす影響

安全係数を変更した場合に再設計が必要になったケースを表-6 に示す。このうち橋梁 No.4 は、他の安全係数の安全裕度が大きく、 γ_{B1} が耐震信頼性に及ぼす感度が低いことから再設計しないものとした。これ以外のケースにおける再設計結果を表-7 に示す。再設計は鉄筋量のみを調節して行ったため鉄筋に関する諸元のみを示す。安全係数が RC 橋脚の耐震信頼性に及ぼす影響に関する感度分析結果を図-7 に示す。曲げ耐力に関する安全係数 γ_{B3} を変更して設計した場合、 $\gamma_{B3}=1.2$ の時は 1.0 の場合と比べ軸方向鉄筋量が 2 割程度増える結果となっている。

各安全係数を変化させて、材料特性の不確定性を考慮した場合の耐震信頼性評価結果を図-8に示す。現行の道路橋示方書の設計に基づく、せん断耐力を終局耐力以上とすれば、せん断破壊型の破壊が生じる確率は0であるため、曲げ破壊型に関する安全係数である γ_{b3} と γ_{b6} のみが耐震信頼性に対して感度を持つこととなる。このため、他の安全係数の設定はRC橋脚システムの損傷確率には影響を及ぼさず、損傷確率が一定となっている。曲げ耐力と残留変位に関して感度の比較をすると、 γ_{b6} が耐震信頼性に及ぼす感度は、これに関する設計変更を行った橋梁 No.3 において損傷確率が小さくなっているものの、その程度は安全係数が1.2までの範囲では1オーダーも下らない程度である。これに対し、 γ_{b3} が耐震信頼性に及ぼす感度は、安全係数0.1の増加につき2オーダー程度と高いことがわかる。このことから、材料特性の不確定性のみを考慮した場合、道路橋示方書に基づいて曲げ破壊型となるようにしたRC橋脚が、道路橋示方書の照査に対して目標とする耐震信頼性を確保するには実質 γ_{b3} のみを変化させればよいといえる。

5. まとめ

現行設計で曲げ破壊型となるRC橋脚を対象として、材料特性に関するばらつきを考慮した場合の耐震信頼性の評価、ならびに部分係数が耐震信頼性に及ぼす影響を検討し、以下の結論を得た。

- Event Treeを用いて各限界状態の生起確率の条件付き確率から求めた耐震信頼性評価法および複数の限界状態を考慮して求めた安全裕度の最小値の分布から求めた耐震信頼性評価法を用い、現行設計において曲げ破壊型となるRC橋脚に適用した。材料特性に関するばらつきを考慮して評価した結果、いずれの方法もほぼ同等の結果となり、支承タイプによらず道路橋示方書の照査を9割以上の確率で満足することがわかった。ただし、道路橋示方書の照査式で用いる耐力及び荷重項は、すでに安全係数を含んでいることから、安全係数を除いた真の限界状態を対象に耐震信頼性を評価すると、損傷確率はより小さくなるものと考えられる。
- しかし、軸方向鉄筋と帯鉄筋の材料特性を独立として評価した事例では、完全相関とした場合はほぼ0であったものが2割強でせん断破壊型の損傷を生じる結果となった。このことは、統計量の相関の取り扱いが耐震信頼性評価に大きく影響することを示している。

- 安全係数に関する感度分析を行った結果、曲げ耐力に関する安全係数 γ_{b3} に関する感度が、安全係数0.1の増加につき損傷確率が2オーダー程度下がり大きくなった。このことから、 γ_{b3} を大きくすることが道路橋示方書に基づいて曲げ破壊型となるようにしたRC橋脚の、道路橋示方書の照査に対する耐震信頼性向上に有効であることがわかった。

本研究では、不確定要因として材料特性のみを対象とし、他の要因については確定量として扱った。しかし、実際には入力地震動や耐力評価式などにもばらつきがあり、その中でも特に入力地震動のばらつきが大きい。よって、これらのばらつきも同時に考慮した場合と、ここで示した耐震信頼性評価では定量的な数値については変わると考えられる。よって、本研究に示した評価法により、他の不確定要因を含めた検討を今後進める必要があるといえる。

参考文献

- 1) ISO2394: General Principles on Reliability for Structures, 1998.
- 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) 大住道生, 運上茂樹：道路橋の耐震信頼性の評価に関する解析的検討, 土木技術資料, Vol.43, No.7, pp.58-63, 2001.
- 4) 福岡博：安全性評価への新しい接近法：地震PSA, 鉄道総研報告, Vol.8, No.7, pp.1-6, 1994.
- 5) 秋山充良, 土井充, 松中亮治, 鈴木基行：構造系の信頼性を考慮したRC橋脚の耐震設計に用いる安全係数の試算, 土木学会論文集 No.718/V-57, pp.1-17, 2002.
- 6) 秋山充良, 土井充, 松中亮治, 鈴木基行：構造系信頼性評価法と構造最適化手法を用いたRC橋脚と場所打ち杭基礎間の耐力階層化に関する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol.47A, pp.743-752, 2001.
- 7) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.
- 8) (社)土質工学会：土質データのばらつきと設計, p.69, 1988.
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説I 共通編, 2002.
- 10) 独立行政法人土木研究所：鉄筋コンクリート橋脚—支承系の耐震信頼性評価業務報告書, 2003.

(2004年9月17日受付)