

論文 信頼性理論に基づく橋梁システムの地震時安全性評価法に関する研究

山崎康紀*1・松中亮治*2・秋山充良*3・鈴木基行*4

要旨：本研究では、信頼性理論に基づき地震時の橋梁システムの安全性照査を目的とした。すなわち、著者が先に提案した構造系信頼性評価法をもとに、支承—RC橋脚—杭基礎から構成される橋梁システムを対象として地震時の各部位・部材の限界状態到達確率（破壊確率）の推移を把握することのできる評価法を構築した。そして、この信頼性評価法を用いて、地震応答解析を実施し、橋梁システムとしての破壊確率と各部位・部材の破壊確率の相互関係について検討した。その結果、本提案法を用いることにより橋梁系の安全性照査だけでなく各部材の破壊確率および対象橋梁系の支配的な限界状態を把握することができた。

キーワード：信頼性理論, 橋梁システム, 破壊確率, 耐震設計, 地震応答解析

1. はじめに

支承—橋脚—杭基礎から構成される橋梁システムは、橋脚と杭基礎間の相対的な耐力の差や、動的相互作用などの影響により、地震時に生じる損傷箇所やその程度が異なることが知られている。このため橋梁の耐震設計は、橋梁全体が所定の安全性を満足するように、各部位・部材を設計することが望ましい。しかしながら、現行の耐震設計法は、各部材毎の安全性を確保することを目標としており、しかも橋脚の曲げ破壊先行型などのように、支配的な破壊モードに対してのみ、安全性照査を行っている。この場合には、橋梁全体としての安全性が明確でなく、しかも、設計で想定していない破壊モードの生起確率の影響が無視されている。

一方、橋梁システムの安全性照査を地震応答解析などにより実施する場合には、そこに介在する不確定要因の影響を考慮する必要がある。例えば、動的解析より得られる各応答値や、橋脚や杭基礎の保有耐力などである。これらは、確率論に基づき、その不確定要因の大きさを適切に評価する必要がある。

以上の状況を踏まえ、本研究では、信頼性理

論を用いて様々な不確定要因の大きさを考慮し、しかも複数の限界状態を同時に考慮することで橋梁系全体としての安全性評価を行なった。その際には、地震時の橋梁系に生じる各部材間の相互作用を考慮するため、著者の提案した構造系信頼性評価法¹⁾をもとに破壊確率を逐次算定する手法を構築した。そして、この提案した手法を用い、橋梁系システムの地震時安全性評価を実施し、橋梁系全体を考慮した耐震設計法を構築するための基礎的研究を行った。

2. 破壊確率算定法

2.1 概説

本研究では、橋梁システムの地震時安全性を把握するために応答値の時間的推移を破壊確率に反映させた。各時間ステップ毎の破壊確率は、構造系信頼性評価法を用いることとし、任意の時間経過後の破壊確率を評価する手法を提案する。

2.2 各時間ステップ毎の橋梁システムの破壊確率

橋梁システムの破壊確率は、以下に示す方法により算定した。

*1 (株)大林組, 工修 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*3 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻, 工修 (正会員)

*4 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻, 工博 (正会員)

はじめに、各限界状態から構造系信頼性評価法を用い部材の破壊確率を算定した。この部材の破壊確率は、各限界状態の構造変数がもつ不確定性を考慮している。

つぎに橋梁系を支承、RC 橋脚、および場所打ち杭の3つの部材から成り立つ直列システムと仮定し、各部材の破壊確率から橋梁システムの破壊確率を算定した。

2.3 逐次破壊確率算定手法

ある時間 t_i に算定される破壊確率 $P_f(t_i)$ は、時間 t_i まで破壊しておらず、 $t_i + \Delta t$ で破壊する条件付確率であると仮定する。したがって、この条件付確率は、式(1)のように表わすことが出来る。

$$P_f(t) = \frac{\text{Prob}[t < T \leq t + \Delta t]/dt}{R(t)} = \frac{-dR(t)}{R(t) \cdot dt} \quad (1)$$

ここに、 $P_f(t)$: 瞬間破壊確率、 $\text{Prob}[t]$: 時間 t における破壊確率、 $R(t)$: 信頼性

この微分方程式より、時刻 t_i までの対象構造系の累積破壊確率 PF は、式(2)より算出できる²⁾。

$$PF = 1 - \exp\left[-\int_0^{t_i} P_f(t) dt\right] \quad (2)$$

3. 橋梁システムの耐震安全性解析法

3.1 解析対象橋梁および解析モデル

本研究で解析対象とした橋梁は、「道路橋の耐震設計に関する資料」³⁾に示されている5径間連続鋼Iげた橋の中間RC橋脚とこれを支持する杭基礎である。橋脚は、RC橋脚で、断面5.0m × 2.2m、高さ10.0mであり、地震時保有水平耐力は4.50MN、せん断耐力は7.08MNである。杭基礎は、杭径1.2mの場所打ち杭基礎とした。また、この杭基礎の降伏震度は、0.70である。支承は免震支承を想定した。

地震波は、兵庫県南部地震で観測された基盤波形とみなせるポートアイランド地下-32mで観測された加速度波形を用いた。これを図-1に示す解析対象地盤の基盤面に最大加速度を500galに縮小して入力した。

地震応答解析は、図-2に示すペンゼンモデルをもとに行った。この時、動的解析モデルに作

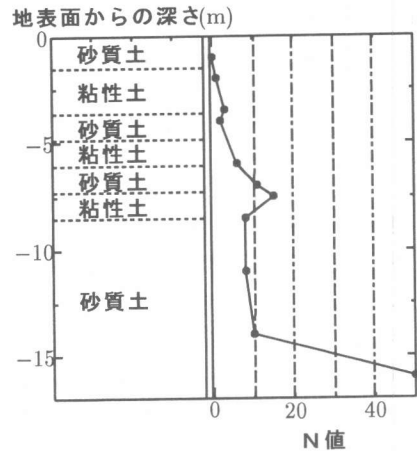


図-1 解析対象地盤のN値

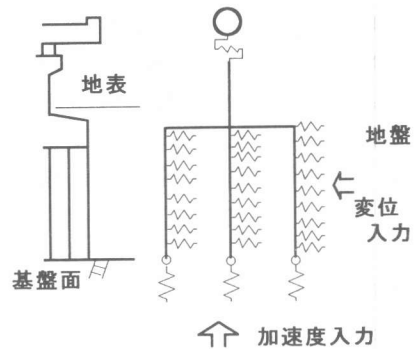


図-2 解析対象モデル

用させる自然地盤の応答変位は、重複反射理論を用いて算定し杭基礎-地盤間の相互作用ばねを介して入力した。

各部材のモデル化は、次のように仮定した。免震支承はバイリニア型の復元力特性を有する非線形バネモデルとし、表-1に示すように各折点を設定した。橋脚と杭基礎は、非線形梁要素でモデル化し、復元力特性としては、武田モデルを与えた。基礎-地盤間は、非線形バネとし、完全弾塑性型の復元力特性を道路橋示方書⁴⁾に従い設定した。

減衰定数は、免震支承は0%、橋脚および杭基礎は2%、基礎-地盤間は逸散減衰を見込んで20%とした。また、フーチングは剛体振動をするため0%とし、Rayleigh型の減衰を用いた。

表-1 免震支承のバイリニアモデル

一次剛性	二次剛性	降伏荷重
47.54 MN/m	9.07 MN/m	0.77 MN

表-2 確率変数の平均値および変動係数

部材	確率変数	平均値	変動係数
支承	σ_a, τ_a, S_E	設計値	10%
	$\sum_{i=1}^n t_i$	応答値	30%
	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	1	10%
橋脚	M_u, V_s	算定値	8%
	V_c, δ_y	算定値	10%
	N, N_B	算定値	5%
	M_{S1}, δ	応答値	30%
	$\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$	1	10%
杭基礎	M_y, V_s	算定値	8%
	V_c	算定値	10%
	$q_d A$	算定値	58%
	$U \sum L_i f_i$	算定値	41%
	M_{S2}, P, P_H	応答値	30%
	α_7	1	10%
	α_8, α_9	1	20%

3.2 限界状態式の設定

橋梁システムの終局限界状態を支承、橋脚、および杭基礎に対し定義した。前述したように、本研究ではこれらの各終局状態を、橋梁システムの終局と考えている。そして、「耐力項」-「外力項」で定義される各限界状態に対する余裕度を表す限界状態式を式(3)～式(11)のように設定した。

(1) 支承の限界状態

支承の終局限界状態として支承取付部のボルトの破断、ゴム支承に生じるせん断ひずみが破断ひずみに達した時、橋脚と上部構造の相対変位が桁かかり長を越えた時と定義し、これらの各限界状態式をそれぞれ式(3)～式(5)のように設定した。

$$g_{Shoe1} = 1.2 - \alpha_1 \left\{ \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_a} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

ここに、 σ_s : ボルトに作用する引張応力度、 σ_a : 許容引張応力度、 τ : ボルトに作用するせん断応力度、 τ_a : 許容せん断応力度、 α_1 : 算定式が持つ不確定性を考慮する補正係数。

断応力度、 τ_a : 許容せん断応力度、 α_1 : 算定式が持つ不確定性を考慮する補正係数。

$$g_{Shoe2} = 4.0 \alpha_2 \sum_{i=1}^n t_i - \delta_{Shoe} \quad (4)$$

ここに、 $\sum_{i=1}^n t_i$: 免震支承のゴムの高さ、 δ_{Shoe} : 支承の変位、 α_2 : 算定式が持つ不確定性を考慮する補正係数。なお、免震支承の破断ひずみは、400%と仮定した。

$$g_{Shoe3} = \alpha_3 S_E - \delta_{Shoe} \quad (5)$$

ここに、 S_E : 桁かかり長または支承中央から下部構造頂部縁端までの距離、桁かかり長は $S_E = 70 + 0.5l (l \leq 100m)$ 、 $S_E = 80 + 0.4l (l \geq 100m)$ で算出。 δ_{Shoe} : 支承の変位、 α_3 : 算定式が持つ不確定性を考慮する補正係数。

(2) 橋脚の限界状態

橋脚の各限界状態は、曲げ耐力、せん断耐力、および変形能により照査することとした。この時、これらの各限界状態式はそれぞれ式(6)～式(8)のように設定した。

$$g_{Pier1} = \alpha_4 M_u - M_{S1} \quad (6)$$

$$g_{Pier2} = \alpha_5 (V_c + V_s) - \frac{M_{S1}}{a} \quad (7)$$

$$g_{Pier3} = \alpha_6 \left[\frac{N}{N_B} + \left(1 - \frac{N}{N_B} \right) \left\{ 12 \left(\frac{0.5V_c + V_s}{M_u/a} - 3 \right) \right\} - \frac{\delta}{\delta_y} \right] \quad (8)$$

ここに、 M_u : 橋脚の曲げ耐力、 V_c : コンクリートの負担するせん断耐力、 V_s : 帯鉄筋が負担するせん断耐力、 N : 軸圧縮力、 N_B : 釣合破壊時の軸圧縮力、 δ_y : 降伏変位、 a : せん断スパン、 M_{S1}, δ : 動的解析より得られる作用曲げモーメントおよび応答変位、 α_4, α_5 : 耐力算定式のもつばらつきを考慮する補正係数、 α_6 : 韌性率算定式のもつばらつきを考慮する補正係数。

(3) 杭基礎の限界状態

杭基礎の終局限界状態は、杭の曲げ降伏耐力、せん断耐力、そして軸方向の押込み支持力により照査することとした。これらの各限界状態式は、それぞれ式(9)～式(11)のように設定した。

$$g_{Pile1} = \alpha_7 M_y - M_{S2} \quad (9)$$

ここに、 M_{S2} ：中央列杭の作用曲げモーメント、 M_y ：杭の曲げ降伏耐力、 α_7 ：耐力算定式のもつばらつきを考慮する補正係数。

$$g_{Pite2} = \alpha_8(V_c + V_s) - P \quad (10)$$

ここに、 V_c ：コンクリートの負担するせん断耐力、 V_s ：鉄筋の負担するせん断耐力、 P ：杭が受ける水平外力、 α_8 ：耐力算定式のもつばらつきを考慮する補正係数。

$$g_{Pite3} = \alpha_9(q_d A + U \sum L_i f_i) - P_H \quad (11)$$

ここに、 q_d ：杭先端における単位面積当りの極限支持力、 A ：杭先端断面積、 U ：杭の周長、 L_i ：周面摩擦力を考慮する層の層厚、 f_i ：周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度、 P_H ：杭体にかかる押込み力、 α_9 ：算定式が持つ不確定を考慮する補正係数。

(4) 各限界状態式の確率変数

設定した限界状態式から、2.で述べた手法により破壊確率を算定するためには、各変数の変動係数や確率分布形を設定する必要がある。そこで本研究では、全ての確率変数は正規分布に従うと仮定し、各パラメータは表-2のように設定した。ここで、杭の押込み支持力の変動係数は岡原等⁵⁾の杭の鉛直載荷試験データを用いて設定し、その外の変動係数は文献1)を基に仮定した。

3.3 耐震安全性解析法

本研究では、2.で示した橋梁システムの破壊確率算定手法と、3.1で示した解析対象橋梁の動的解析から橋梁システムの地震時安全性を検討する。その解析手順を以下に示す。

- (1) 解析対象橋梁および解析対象地盤を選定する。
- (2) 限界状態式を設定する。
- (3) 地震応答解析を実施する。
- (4) 地震応答解析より算出された応答値を用い、各限界状態式の破壊確率を算定する。
- (5) 構造系信頼性評価法を用い、式(3)～式(5)から支承の破壊確率を、式(6)～式(8)から橋脚の破壊確率を、式(9)～式(11)から杭基礎の破壊確率を算定する。

(6) 橋梁システムを直列システムと仮定することで、各部材（支承、橋脚、杭基礎）の破壊確率から橋梁システムの破壊確率を算定する。

(7) (4) から (6) を各時間ステップ毎に繰り返す。

4. 提案法で算出した破壊確率と地震応答解析結果との比較

解析対象橋梁に対して、地震応答解析を行い、破壊確率を評価するための各応答値を算出した。応答値が最大を示す地震外力作用開始時間3秒から6秒までの橋脚基部の作用曲げモーメントを図-3に示す。これより、4.75秒付近で、橋脚および杭頭部に最大作用曲げモーメントが発生していることがわかる。

そこで、この橋梁システムに対し、信頼性理論に基づく提案手法を用いて、橋脚に対する破壊確率の算定を行った。結果を図-4に示す。

両図を比較すると、橋脚基部における作用曲げモーメントが最大となる時刻に橋脚の曲げに対する破壊確率が急増し、他の時間帯では、破壊確率の増加はほとんど見られない。これより、本研究の提案法で逐次算定された破壊確率は橋梁システムの挙動を正確に捕らえており、提案法を用いて橋梁システムの安全性評価を行うことができる。

5. 地震時の橋梁システムを構成する部材の安全性評価

橋脚と杭基礎に着目し、橋梁システムを構成する部材の安全性評価を行う。そこで、橋脚としての破壊確率と橋脚の各限界状態の破壊確率の推移を図-4に、杭基礎としての破壊確率と杭基礎の各限界状態の破壊確率の推移を図-5に示す。ここで、図-4および図-5のせん断に対する破壊確率が図示されていないが、これは両者の安全性が他の限界状態に比べて高いためである。

図-4より橋脚の破壊確率は、曲げ耐力に対する限界状態式から算定される破壊確率にほぼ一致していることがわかる。これより、橋脚の支配的な限界状態は、曲げ耐力に対する限界状態であることがわかる。

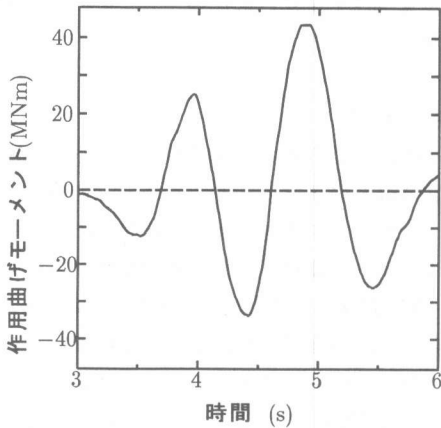


図-3 橋脚基部の作用曲げモーメント

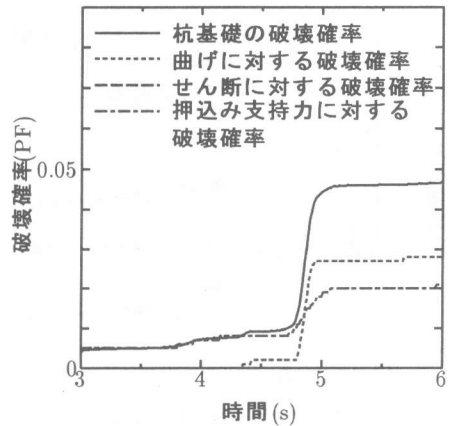


図-5 杭基礎の各限界状態の破壊確率の推移

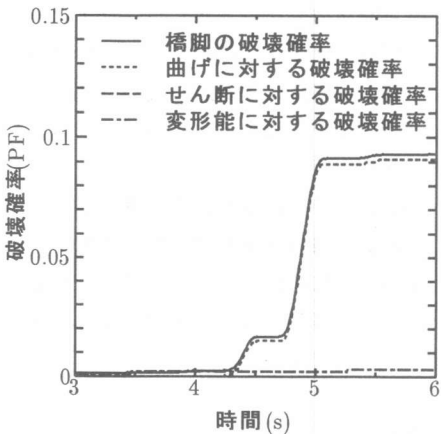


図-4 橋脚の各限界状態の破壊確率の推移

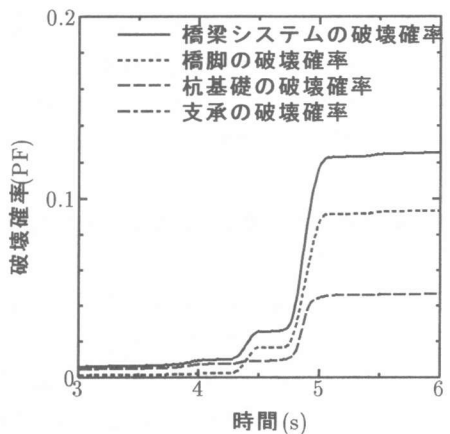


図-6 橋梁システムと各部材の破壊確率の推移

また、図-5より杭基礎の破壊確率は、杭体の曲げ降伏および押し込み支持力に対する限界状態式から算定される破壊確率の影響を受けていることがわかる。押し込み支持力の破壊確率は、耐力側の不確定性が非常に大きいいため他の破壊確率よりも長時間破壊が進行していく結果となった。これより、杭基礎の破壊確率は、杭体の曲げ降伏および押し込み支持力に対する限界状態を同時に考慮する必要がある。

6. 地震時の橋梁システムの安全性評価

提案法を用い、任意の時間経過時の橋梁システムおよび各部材の破壊確率の相互関係を検討

した。結果を図-6に示す。これより、地震外力作用開始時間が4.0秒までは杭基礎の破壊が支配的であり、4.0秒から6.0秒までの間は橋脚と杭基礎の破壊が橋梁システムの破壊確率に影響を及ぼしていることがわかる。

この橋梁システムは、橋脚の曲げ破壊が支配的な限界状態となるように設計されたものである。しかし、図-6より杭基礎の破壊確率は橋脚の破壊確率に比べ小さいが、橋梁システムの破壊確率を橋脚の破壊確率とすることができない。そのため、確定論的には橋梁システムの支配的な限界状態が橋脚の曲げ破壊であっても、様々な不確定性を考慮することにより橋梁システム

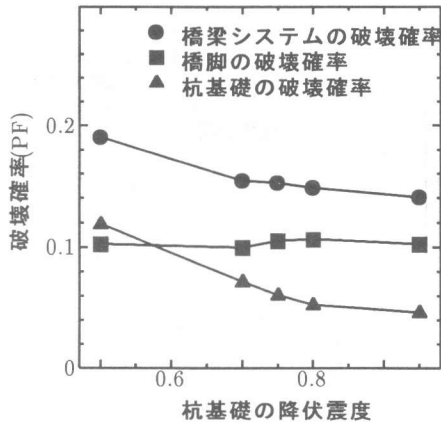


図-7 設計震度の変化による橋梁システムおよび各
部材の破壊確率の推移

に影響を及ぼす他の限界状態が存在してくる。これより、橋梁システムの地震時安全性は、複数の限界状態とそこに介在する様々な不確定性を同時に考慮する必要があることがわかる。

7. 杭基礎耐力が橋梁システムの安全性に与える影響

ここでは、杭基礎の軸方向鉄筋を変化させることで、様々な降伏震度を持つ杭基礎を試設計し、杭基礎耐力の違いが橋梁システムの安全性に与える影響について考察した。図-7は杭基礎の各降伏震度に対する地震波入力が終了した時点での橋梁システム及び各部材の破壊確率を示したものである。

これより、杭基礎の降伏震度を上昇させると杭基礎としての破壊確率の減少に伴い、橋梁システムの破壊確率も低下する。これは橋梁システムの地震時安全性に影響を及ぼしていた杭体の曲げ降伏耐力に対する安全性が、杭の軸方向鉄筋を増加させることで上昇し、結果的に、橋梁システムの支配的な破壊モードが橋脚の曲げ耐力に対する限界状態に漸近したためである。

橋脚と杭基礎の保有耐力の相対的な差により、橋梁系に生じる地震時の損傷箇所や損傷程度は異なるが、本研究で提案した確率論的な評価法に基づけば、橋梁系に介在する不確定性の影響を考慮した上で、図-6に示すように橋梁システ

ムの安全性を定量的に把握でき、その際の支配的な破壊モードを抽出できる。

8. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 構造系信頼性解析法をもとにし、破壊確率を逐次算定できる手法を提案した。提案した手法で算定された破壊確率は、非線形応答の結果と同じ傾向を示すことがわかった。
- (2) 逐次破壊確率算定法を用いて橋梁システムの破壊確率を算定することにより、各部材の破壊確率の推移および部材の支配的な限界状態を把握することができる。
- (3) 提案法を耐震設計に用いることにより、材料強度や耐力算定式などがもつ不確定性と各部材毎の安全性が橋梁システムに与える影響度を考慮し、橋梁システムの地震時安全性および支配的な限界状態を把握できる。これにより、総合的な橋梁システムの設計が可能となる。
- (4) 橋梁システムの支配的な限界状態として橋脚の曲げ破壊と杭基礎の曲げ降伏が存在する場合、杭基礎の剛性をあげると橋梁システムと杭基礎の破壊確率が低下し、橋梁システムは安全になった。

参考文献

- 1) 鈴木基行・秋山充良・山崎康紀：構造系の安全性評価法およびRC橋脚の耐震設計への適用に関する研究，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.71-87，1997.11
- 2) 岡村弘之：強度設計における安全率と信頼性，日本機会学会誌，第73巻，第621号，pp.56-64，1970.10
- 3) 道路橋の耐震設計に関する資料，日本道路協会，平成9年3月
- 4) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編平成8年12月
- 5) 岡原美知夫・中谷昌一・田口敬二・松井謙二：軸方向押込み力に対する杭の支持特性に関する研究，土木学会論文集，第418号/III-13，pp.257-266，1990.6