

入力地震動の不確定性が免震橋梁に与える 影響に関する一考察

松尾龍吾¹・高森麻有美²・松田泰治³

¹学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科博士前期課程(〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 八王子土木技術センター(〒192-0073 東京都八王子寺町)

³正会員 博(工) 熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生工学専攻(〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

1. はじめに

現在は、構造材料の基準強度を安全率で除した許容応力度に基づく仕様規定型設計法から、構造物に要求される性能を規定することでより合理的な設計を目指す性能照査型設計法への移行期にある。構造物に要求される性能を規定するためには、構造設計における様々な不確定要因を確率変数として取り扱うことが必要であると考えられる。

構造物の強度や耐力は、構造材料の物性値の統計的変動性や製作精度の変動性などの様々な不確定要因を含んでいる。したがって荷重と構造形に介在する様々な不確定要因を合理的かつ定量的に取り扱うことが必要である。

免震橋梁においては、免震支承の復元力特性のばらつきが、免震橋梁の動的特性に大きく影響を及ぼすため免震橋梁の地震時の安全性確保や機能維持に対する信頼性を左右する。また、橋脚基部の塑性化も副次的であるが認められている。

免震橋梁の地震時信頼性を確認する場合には、それらの免震支承と橋脚の復元力特性のばらつきを支配する不確定要因と、地震力のばらつきを支配する不確定要因を考慮した検討を行う必要があると考えられる。

本研究では免震橋梁の動的特性に影響を及ぼす免震支承、および橋脚基部の非線形性を規定する構造パラメータ、および入力地震動を変動させたモンテカルロシミュレーションを実施し、免震橋梁における橋脚の非線形挙動と免震支承の非線形挙動に関する分布特性を明らかにした。さらに、免震橋梁を構成する各部位の健全度レベルの定義に基づき、各部位の適切な強度バランスの確率論的考察を行った。

2. 解析条件

構造物のモデル化については確率変数として取り扱うことが難しいので、本研究では確定的に取り扱うものとする。

道路橋示方書同解説、耐震設計編(以下道路橋示方書)に示されるⅠ種地盤A地域において支承条件を固定として断面設計された鉄筋コンクリート製の単中式免震橋脚(直接基礎)、鋼桁および高減衰積層ゴム支承から構成される構造物を検討対象とした。図-1にその構造概要と解析モデルを示す。

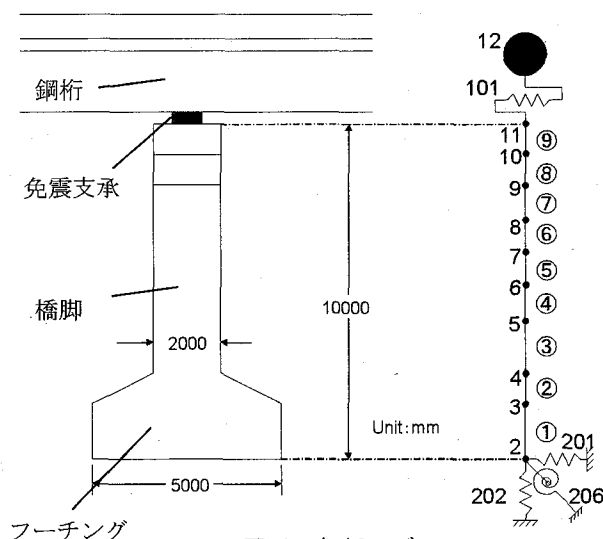


図-1 解析モデル

鋼桁は桁の重心で一質点にモデル化し(節点12)、フーチングを含むRC橋脚は2次元はり要素でモデル化した。フーチングを除いたRC橋脚全体を7分割し、橋脚基部(要素③)の塑性ヒンジの領域は2次元非線形はり要素により考慮した。

免震支承はバイリニア型（図-2）の水平ばねで置き換え、鉛直方向は剛とした。水平ばねは、既往研究^{1), 2)}で提案された免震支承の形状設計の手順に従って、I種地盤用で目標設計変位を20cm, 30cm, 40cmとして設計した場合の免震支承を用いた。

橋脚基部の2次元はり要素の非線形性はトリリニア型の武田モデル（図-3）により考慮した。また、フーチングの下端には地盤ばねを考慮した。地盤ばねは道路橋示方書に基づき水平ばね、鉛直ばねおよび回転ばねでモデル化した。免震支承の水平ばねの減衰定数は0%とし、地盤ばねの減衰定数は全て20%とした。橋脚基部の2次元はり要素に対する減衰定数は基部の非線形はり要素が2%、その他の線形はり要素は全て5%とした。

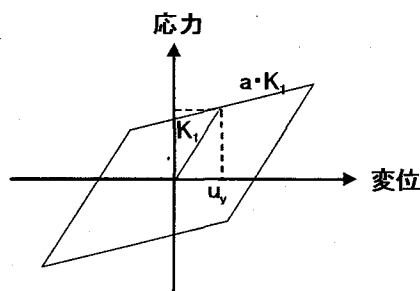


図-2 バイリニアモデル

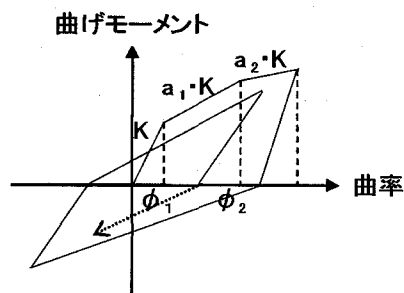


図-3 武田モデル（トリリニア型）

3. 不確定性を考慮した構造パラメータと入力地震動

免震橋梁の構造部材のうち、非線形となる橋脚基部のはり要素および免震支承の水平ばねのふたつの部位を規定する構造パラメータに対し不確定性を考慮した。免震支承に関しては第一剛性、第一剛性に対する第二剛性の低下率、降伏変位の三要因を、橋脚基部非線形はりについてはひび割れ曲率、降伏曲率、第一剛性、第一剛性に対する第二剛性の低下率（剛性低下率1）、第一剛性に対する第三剛性の低下率（剛性低下率2）の5要因、計8つを不確定要因として考慮した。ばらつきは正規分布を仮定し、それぞれ変動係数10%とした。入力地震動に関する不確

定性は、道路橋示方書に記載されている標準加速度応答スペクトル（タイプI-I-1）を平均値とし、10%と25%の変動係数を与えてターゲットスペクトルの加速度を変動させた。ばらつきは正規分布を仮定した。表-1に考慮した不確定要因の平均値と変動係数を示し、図-4にターゲットスペクトルの概念図を示す。既往研究³⁾によれば免震支承の設計変位20cm、入力地震波タイプI-I-1の場合において1000, 5000, 10000回として検討した結果、免震支承の応答変位と橋脚基部の応答曲率の分布形状はほぼ同じものが得られ、さらにそれぞれの応答値の平均値と変動係数についてもほぼ同値が得られた。したがって本研究では試行回数1000回として以後の検討を行った。なお、各パラメータ間の相関は考慮していない。

表-1 各構造パラメータの平均値と変動係数

不確定要因			平均値			変動係数
			20cm*	30cm*	40cm*	
免震支承 水平ばね	第一剛性(MN/m)	K_1	74.7	37.9	23.3	10%
	剛性低下率	a	0.210	0.196	0.187	10%
	降伏変位(m)	u_y	0.0116	0.0154	0.0190	10%
橋脚基部 非線形はり	第一剛性(MN・m)	K	2.35×10^6			10%
	剛性低下率1	a_1	0.251			10%
	剛性低下率2	a_2	0.000433			10%
	ひび割れ曲率(1/m)	Φ	0.0000996			10%
入力地震動	降伏曲率(1/m)	Φ_y	0.00109			10%
	加速度応答レベル		標準加速度応答スペクトル			10.25%

*免震支承の目標設計変位

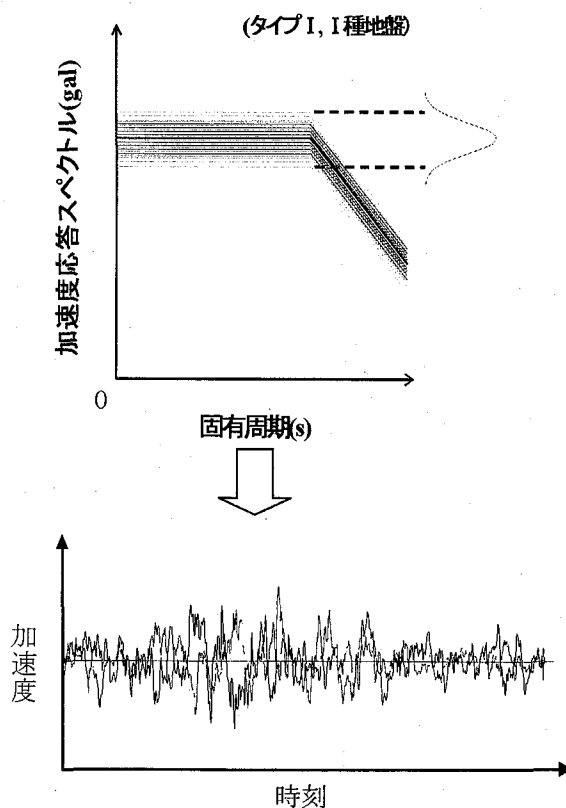


図-4 ターゲットスペクトルの概念図

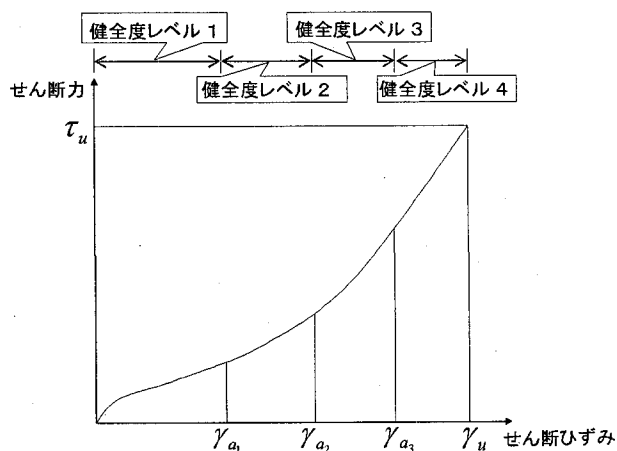
4. 健全度レベルに基づく性能水準

モンテカルロシミュレーション（試行回数は1000回）を行い検討する際、既往の研究⁴⁾を参考に、応答値である免震支承の変位と橋脚基部の曲率について地震作用に対する部材の健全性や、損傷状態の度合いを示す健全度レベルの組み合わせに基づく性能水準を、表-2のように設定した。

表-2 免震橋梁の各評価対象部位の耐震性に関する健全度レベル

目標性能水準	使用限界状態	損傷限界状態		終局限界状態
	性能水準1	性能水準2	性能水準3	性能水準4
免震支承	健全度レベル1 せん断ひずみ 150%未満 *図-5参照	健全度レベル2 せん断ひずみ 150%以上 250%未満 *図-5参照	健全度レベル3 せん断ひずみ 250%以上 350%未満 *図-5参照	健全度レベル4 せん断ひずみ 350%以上 *図-5参照
下部構造 (RC橋脚)	健全度レベル1 弾性域	健全度レベル2 *図-6参照	健全度レベル2 *図-6参照	健全度レベル4 *図-6参照

ただし、免震支承の変位については、健全度レベル1として、ハードニングの起こらないせん断ひずみ0%から150%までの範囲、健全度レベル2としてハードニングは起こるが、剛性は著しく変化しないせん断ひずみ150%から250%までの範囲、健全度レベル3として、ハードニングと剛性変化の起こりうるせん断ひずみ250%から350%までの範囲、最後に健全度レベル4として、破断も起こりうるせん断ひずみ350%以上の範囲を設定した。



γ_{a1} : せん断ひずみ 150%

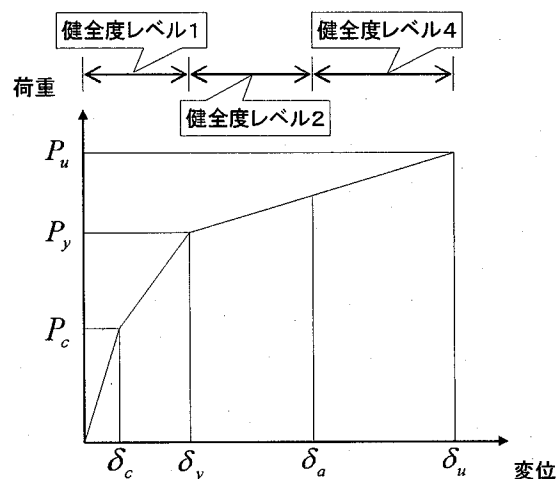
γ_{a2} : せん断ひずみ 250%

γ_{a3} : せん断ひずみ 350%

γ_u : 終局ひずみ

図-5 免震支承にかかるせん断力とせん断ひずみの関係における健全度レベル

道路橋示方書では、免震橋梁の設計において橋脚基部の安全係数を通常の2倍に割り増すことによって橋脚基部が副次的非線形にとどまることを保障している。しかしながら、この方法では免震支承の主たる塑性化に対する橋脚基部の副次的塑性化の定義が不明確であり、橋脚基部の挙動が弾性範囲内におさまる安全側の設計となっているケースが多い。本来、健全度レベルとは部材ごとの限界状態を定めるもので、非免震橋梁における健全度レベルと同等のものであると考えられる。したがって、本研究では、免震橋梁においても非免震橋梁の健全度レベルの照査の際に用いる安全係数を用いることとした（表-3参照）。さらに、ここでは応答値がそれぞれの健全度レベルの範囲に存在するときの確率を「存在確率」と定義した。



$$\delta_a = \delta_y + (\delta_u - \delta_y) / \alpha$$

δ_a : 損傷限界状態の限界値となる許容変位

δ_y : 降伏変位

δ_u : 終局変位

α : 安全係数(表-3参照)

図-6 曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚の荷重と変位の関係における健全度レベル

表-3 橋脚の健全度レベル2と健全度レベル4の限界値を設定する上での安全係数

目標とする性能水準	健全度レベル	安全係数 α	
		タイプⅠ	タイプⅡ
性能水準2	健全度レベル2	3	1.5
性能水準3	健全度レベル2	2.4	1.2
性能水準4	健全度レベル4	1.0	1.0

5. 不確定性を考慮した免震橋梁の耐震信頼性評価

本研究では、構造パラメータのばらつきと入力地震動のばらつきの影響について、合理的かつ定量的に比較するため、構造データと入力地震動の不確定要因のうち 1) 構造データのみを不確定としたケース、2) 入力地震動のみを不確定としたケース、3) 構造データと入力地震動の両方を不確定としたケースの3ケースについて検討した。

まず、ケース 1) の検討結果について考察する。免震橋梁の橋脚基部の降伏耐力を低減させた場合における免震支承と橋脚の相対的な損傷バランスを、各健全度レベルでの存在確率を比較することにより評価する。このため、橋脚基部の降伏耐力の低減率を 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 (倍) と変化させ解析を行った。モンテカルロシミュレーションによって得られた 1000 ケースの解析結果を、表-2 の健全度レベルと照合し、その存在確率を算定した。ただし、橋脚基部に関しては、応答曲率に基づき評価・検討を行った。例として地震波タイプ I-I-1 における、免震支承の目標設計変位 30cm の結果を図-7、図-8 に示す。

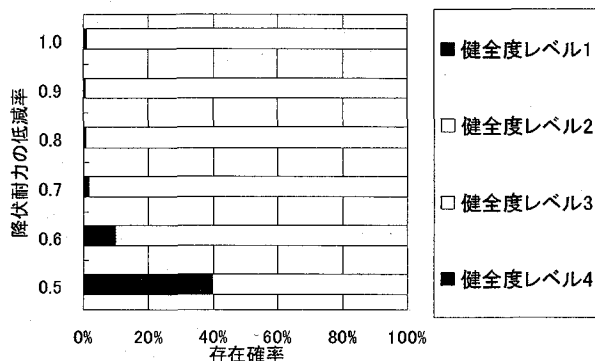


図-7 免震支承における応答値の健全度レベルごとの存在確率 (タイプ I-I-1)

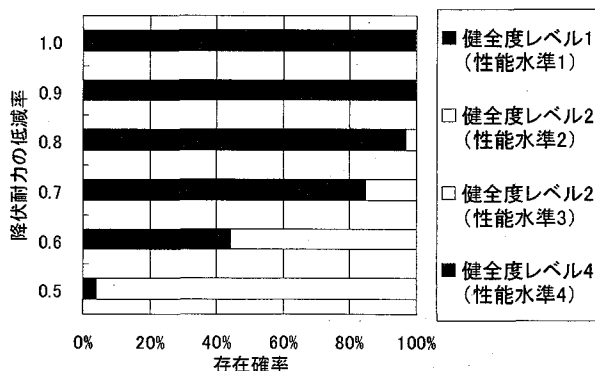


図-8 橋脚基部における応答値の健全度レベル (性能水準) ごとの存在確率 (タイプ I-I-1)

全体的に橋脚基部の降伏耐力の低減率が小さくなるにつれて、つまり橋脚基部の降伏耐力が減少するにつれて、免震支承の応答変位は減少し、健全度レベルでより安全な領域に存在する確率が増加し、逆に橋脚基部非線形はりの応答曲率は増加し、健全度レベルでより危険な領域の存在確率が増加する傾向が認められた。

次に、橋脚全体において主たる非線形を考慮する免震支承と副次的非線形を考慮する橋脚基部の耐震信頼性に関する耐力バランスについて確率論的に考察を行った。本研究では、上記の二つの部位について、健全度レベル 2 における主たる非線形と副次的非線形の存在確率を比較することによって、免震橋梁の耐力バランスの評価を行った。一般的な設計においては、副次的非線形を考慮する橋脚基部よりも主たる非線形を考慮する免震支承のほうが、非線形の挙動範囲である健全度レベル 2 の存在確率が相対的に高くなるように設計されていることが想定される。図-7 と図-8 を比較すると、免震支承における健全度レベル 2 の存在確率が橋脚基部の存在確率より大きくなっていることがわかる。

ここでは、まず、健全度レベル 2 における存在確率において、主たる非線形と副次的非線形の比を 10:1 であると仮定する。これは、免震支承に比べて橋脚基部の応答は副次的非線形であるので相対的に安全側であると仮定したものである。現行の設計の考え方に近いと考えられる。本研究では 10:1 の存在確率を導入した場合に、橋脚基部の降伏耐力をどこまで低減できるか検討した。表-4 に図-7、図-8 における健全度レベル 2 (性能水準 2) の存在確率の比を示す。

表-4 健全度レベル 2 (性能水準 2) における存在確率 (%) と免震支承に対する橋脚基部の存在確率の比

低減率*	30cm		
	健全度レベル2(性能水準2)		(b)/(a)
	(a)免震支承	(b)橋脚基部	
1.0	98.2	0.0	0.00
0.9	98.4	0.8	0.01
0.8	98.6	5.5	0.06
0.7	95.3	21.0	0.22
0.6	87.1	57.2	0.66
0.5	58.6	91.9	1.57

*1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 は橋脚基部の低減率

表-4 の (b)/(a) の値が 0.1 以下となるところまで低減率を下げることで、免震支承の設計変位を 30cm としたケースでは橋脚基部の降伏耐力

の低減率を 0.8 まで下げることが可能であるという結果となった。同様に免震支承の設計変位が 40cm の場合では橋脚基部の降伏耐力の低減率を 0.7 まで下げることが可能であるという結果となった。また、これらの結果はタイプⅡ-I-1 の地震波でも同様の結果が得られた。以上のことから、確率論的に検証すると、免震支承の設計変位を 30cm、40cm として設計した際には、橋脚基部の降伏耐力を現行の規定より低減できる可能性が示唆された。

次にケース2)、3) について考察する。

入力地震動のばらつきは、道路橋示方書に記載されている標準加速度応答スペクトル(タイプⅠ-I-1)を平均値とし、10%と25%の変動係数を与えてスペクトルを変動させたものをターゲットスペクトルに対してスペクトル適合法(図-4参照)により、模擬地震波をそれぞれ1000波作成し、不確定性を考慮した。

表-5~8 に免震支承の目標設計変位を 30cm としたときの不確定性の組合せ別の健全度レベル、平均値、変動係数、最大値、最小値を示した。表-5、6 が入力地震動の変動係数を 10%、表-7、8 が 25%

とした結果である。入力地震動の不確定性を考慮した際、免震支承の応答変位の変動係数の増加に比べ橋脚基部の変動係数が大きく増加している。これは、本研究で橋脚基部にかかる荷重と応答曲率の関係を、塑性化する際に剛性が著しく低下するトリリニア型(図-3)で考慮しているため、橋脚基部に作用する荷重が荷重軸方向に大きくばらつくと塑性域に達し、応答曲率が著しく増加してしまうためだと考えられる。

また入力地震動の不確定性を考慮することによって、入力地震動の変動係数が 10%、25%のどちらの状況でも、免震橋梁における免震支承と橋脚基部の応答曲率の平均値および変動係数が大きくなる傾向が認められた。

以上の結果より、入力地震動の不確定性は、健全度レベルに大きく影響することが明らかとなった。

7. まとめ

免震橋梁の動的特性に影響を及ぼす、橋脚及び免震支承の構造パラメータおよび入力地震動の不確定

表-5 入力地震動の変動係数を 10%とした場合の、各ケースごとの免震支承の存在確率

	性能水準1 健全度レベル1	性能水準2 健全度レベル2	性能水準3 健全度レベル3	性能水準4 健全度レベル4	平均値(m)	変動係数	最大値(m)	最小値(m)
1)構造パラメータ:不確定 入力地震動:確定	10	990	0	0	0.215	0.0365	0.265	0.187
2)構造パラメータ:確定 入力地震動:不確定(10%)	348	635	17	0	0.215	0.210	0.393	0.106
3)構造パラメータ:不確定 入力地震動:不確定(10%)	378	593	29	0	0.216	0.238	0.399	0.0993

表-6 入力地震動の変動係数を 10%とした場合の、各ケースごとの橋脚基部の存在確率

	性能水準1 健全度レベル1	性能水準2 健全度レベル2	性能水準3 健全度レベル2	性能水準4 健全度レベル4	平均値 (1/m)	変動係数	最大値(1/m)	最小値(1/m)
1)構造パラメータ:不確定 入力地震動:確定	997	3	0	0	0.000549	0.201	0.00124	0.000320
2)構造パラメータ:確定 入力地震動:不確定(10%)	998	2	0	0	0.000598	0.238	0.00118	0.000250
3)構造パラメータ:不確定 入力地震動:不確定(10%)	988	12	0	0	0.000612	0.318	0.00234	0.000200

表-7 入力地震動の変動係数を 25%とした場合の、各ケースごとの免震支承の存在確率

	性能水準1 健全度レベル1	性能水準2 健全度レベル2	性能水準3 健全度レベル3	性能水準4 健全度レベル4	平均値(m)	変動係数	最大値(m)	最小値(m)
1)構造パラメータ:不確定 入力地震動:確定	10	990	0	0	0.215	0.0365	0.265	0.187
2)構造パラメータ:確定 入力地震動:不確定(25%)	398	472	117	0	0.224	0.391	0.597	0.0501
3)構造パラメータ:不確定 入力地震動:不確定(25%)	403	451	133	13	0.225	0.400	0.616	0.0502

表-8 入力地震動の変動係数を 25%とした場合の、各ケースごとの橋脚基部の存在確率

	性能水準1 健全度レベル1	性能水準2 健全度レベル2	性能水準3 健全度レベル2	性能水準4 健全度レベル4	平均値 (1/m)	変動係数	最大値(1/m)	最小値(1/m)
1)構造パラメータ:不確定 入力地震動:確定	997	3	0	0	0.000549	0.201	0.00124	0.000320
2)構造パラメータ:確定 入力地震動:不確定(25%)	939	61	0	0	0.000790	1.71	0.0184	0.000100
3)構造パラメータ:不確定 入力地震動:不確定(25%)	923	77	0	0	0.000863	1.85	0.0197	0.000090

性を考慮したモンテカルロシミュレーションを実施し、免震橋梁を構成する各部位の健全度レベルの定義に基づき、各部位の適切な強度バランスをの確率論的検討を行った。不確定性を考慮した構造パラメータの変動係数を10%と、入力地震動の不確定性を25%と仮定した条件で得られた知見を以下に示す。

1. 橋脚基部の降伏耐力を低減させるにつれて、免震支承は応答変位が小さくなり、健全度レベルが高い領域に存在する確率が増加し、逆に橋脚基部は応答曲率が大きくなり、健全度レベルのより低い領域に存在する確率が高まっていく傾向が認められた。
2. 橋脚全体における主たる非線形と副次的非線形について確率論的に考察を行った結果、健全度レベル2における存在確率の比を10分の1と仮定すると、免震支承の設計変位を30cmとした場合には橋脚基部の降伏耐力の低減率を約0.8まで、免震支承の設計変位を40cmとした場合には約0.7まで低減できる可能性を示した。
3. 入力地震動の不確定性を考慮することによって、免震支承の目標設計変位 30cm、40cm のケースでは、免震橋梁における免震支承の応答変位と橋脚基部の応答曲率の平均値および変動係数が大きくなる傾向が認められた。ただし、免震支承の目標設計変位 20cm のケースに関しては傾向が異なり応答の平均値は小さくなり、変動係数は大きくなった。

参考文献

- 1) 松田泰治, 大塚久哲, 楊光遠, 山口斉: 免震橋梁の固有周期決定及び免震脊の簡易設計法に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 44, pp. 711-718
- 2) 松田泰治, 大塚久哲, 神農誠, 入江達雄: 変形制御型の道路橋の免震設計法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 907-916, 2000
- 3) 高森麻有美, 松田泰治, 大塚久哲: 免震支承における橋脚基部の副次的非線形に関する確率論的考察, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 669-676, 2005.
- 4) 土木学会: 橋の動的耐震設計, 土木学会, 2003
- 5) 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, No578/V-37, pp. 71-87, 1997.
- 6) 白木渡, 井面仁志, 今井慈郎, 伊藤則夫, 石川浩: 地震時保有水平耐力を用いた終局限界状態に対する鋼製ラーメン橋脚の耐震信頼性評価, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 389-396, 1999.
- 7) 足立幸郎, 運上茂樹: じん性設計を行った鉄筋コンクリート橋脚の耐震信頼性評価, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 777-788, 2000.
- 8) 内藤伸幸, 松田泰治, 大塚久哲: 不確定要素を含む構造の信頼性評価と設計への適用に関する研究, 土木学会西部支部講演概要集, I-47, pp. A90-91, 2000.
- 9) 松田泰治, 高森麻有美, 松尾龍吾, 大塚久哲: 不確定性を考慮した免震橋梁の性能評価に関する一考察, 構造工学論文集, vol. 53A, 2007. (投稿中)