

支承の不確定性を考慮した橋梁構造系 における部材間損傷連関解析と信頼性評価

森川英典¹・高田至郎²・船越寿明³

¹正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

²フェロー 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

³学生員 大学院学生 神戸大学自然科学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

兵庫県南部地震以後、橋梁の耐震設計および耐震診断に関して個々の部位毎ではなく、部材間の関連性を考慮した橋梁構造系としての耐震性能評価の必要性が指摘されている。本稿では、この橋梁構造系としての損傷連関を支配しているものは支承であるとの考えにより、実被害データに基づいて、部材間の強度関係および損傷の関連性などを整理し、それを基に動的解析を行うことで、ある部材の損傷に伴う各部材に作用する慣性力への影響を確率的に評価した。さらに、この結果を各部材間の損傷の関連性について隣接部材の損傷を条件とした「損傷連関マトリックス」により整理した。そして、橋梁構造系の損傷メカニズムについては損傷の順序を考慮した簡便なマトリックス計算による信頼性評価手法を提案した。

Key Words: Bridge Structural System, Damage Correlation Matrix, Diagnosis, Bearing, Reliability

1. はじめに

著者らは兵庫県南部地震以後、主要高速道路橋のデータベースを作成し、橋梁の被災要因分析から耐震診断法を構築してきた¹⁾。そこで本稿では、一般の道路橋の中から危険度の高いせん断破壊型の橋梁グループ(単純桁、T型 RC 単柱橋脚、段落とし有り、せん断スパン比 <2.5)について橋軸直角方向に対する橋梁全体系を考慮した信頼性評価を解析的に試みる。

2. 支承の損傷および支承ヒューズ論の検討

橋梁構造全体系としての部材間の損傷連関メカニズムを考慮する場合、支承の役割およびその不確定性の評価が非常に重要となる。そこでここでは、支承の役割および設計概念などを整理した上で支承被害の特徴について述べていく。

(1) 支承の機能分類²⁾

支承は基本的に可動支承と固定支承に分類されるが、橋軸直角方向の震動単位系ではどちらも固定として働く。このように、橋梁構造系としての損傷メカニズムを議論する場合には、地震動の方向ごとに支承の橋脚に対する機能を考慮することが重要であると考えられる。したがって

本稿では固定機能支承および可動機能支承として以下のように取り扱う。

・固定機能支承

橋軸方向における固定支承、橋軸直角方向における固定および可動支承

・可動機能支承

橋軸方向における可動支承

(2) 部材間の損傷状態の関連性

ここでは、一方の部材の損傷が発生した場合に他方の部材にどのような影響を与えるのかを検討する。

a) 支承部から橋脚への関連性

橋梁構造系を考えた場合、支承は上下部構造の接点に設けられ、地震時には慣性力を伝達する構造部材である。よって、地震時に橋脚に作用する慣性力は支承の損傷状態によって大きく左右されられると考えられる。まず支承の破壊モードとして「靱性的な破壊」と「脆性的な破壊」を考え、さらに脆性的な破壊後の挙動として「滑り」、上部工との「食い込み」の2つの状態を想定した。

それぞれの損傷状態をまとめる。

- ・脆性的な破壊後、滑りとなる場合では支承は下部構造に対して摩擦力のみを伝達する事となり、下部構造への慣性力の伝達を軽減することができる。
- ・脆性的な破壊後、食い込みとなる場合では支承が滑る

ことによって地震エネルギーが吸収され、下部構造への慣性力の伝達を軽減することになる。たとえ完全な食い込みを起こしたとしても支承が健全な状態と同等になり、橋脚の被害を拡大する要因とはならない。

- ・ 靱性的な破壊の場合では、支承が終局強度より大きな慣性力を伝達する事ができない。よって、これは支承の基準降伏強度および終局強度が慣性力より大きな場合と比べると、支承はヒューズの的に作用していると考えられることができる。

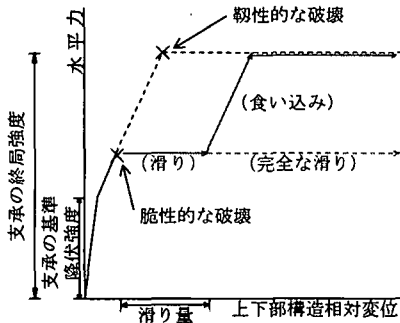


図-1 固定機能支承の損傷後挙動の概念図³⁾

b) 同一桁他端の支承、橋脚から支承への関連性

橋脚がある程度の損傷を受けると、径間の変化および相対変位が大きくなるため、支承が損傷を受け、さらには上部工にも損傷を及ぼすと考えられる。つまり支承の損傷には地震力によるもの以外に、橋脚の損傷に伴うこのようなメカニズムも考慮しておかなければならない。また同一桁他端の支承が損傷することにより、負担する慣性力の変化し、支承が損傷するといったメカニズムも考えられる。

3. 損傷連関マトリックス²⁾の構築

(1) 損傷連関マトリックスの定義とその算定手法

損傷連関マトリックスとは、部材間の損傷連関評価を条件付確率の考え方を適用し整理したものであり、例えば部材 X と Y , Z の損傷連関を考慮する場合、部材 X の損傷度 x_i は A, B, C, D 、部材 Y , Z の損傷度 y_j, z_l は A, B, C, D であるとする。この場合、部材 Y, Z の損傷度による部材 X の損傷度の条件付確率は

$$P_X(x_i|y_j, z_l) = \frac{P_{X,Y,Z}(x_i, y_j, z_l)}{P_Y(y_j) \times P_Z(z_l)} \quad (3a)$$

と表され、本研究では部材間の損傷連関を表すマトリックスとして表現されることから、とくに「損傷連関マトリックス」と定義する。

図-2には損傷連関マトリックス構築のフロー図を示す。本研究では損傷連関を評価するため、まず慣性力増減率を算定する。ここで慣性力増減率とは、(隣接部材が損傷した場合の対象部材の最大水平力) / (隣接部材が健全な場合の対象部材の最大水平力) として定義した。本

研究では橋梁を前章で得られた知見をもとにモデル化し、隣接部材のパラメーターを確率分布として仮定することで、モンテカルロシミュレーションを行い、慣性力増減率を確率変数として算定した。ただしこの際、隣接部材の損傷モデルについてはすべての組み合わせを考え、それぞれの慣性力増減率を求めていく。

最後に求められたそれぞれの慣性力増減率から後述する手法より「支承の損傷状態を条件とした橋脚の損傷確率」および「橋脚の損傷状態と上部桁他端の支承の損傷状態を条件とした支承の損傷確率」を算定し、その結果をクロス集計することで、最終的には橋脚および支承の「損傷連関マトリックス」を構築する。

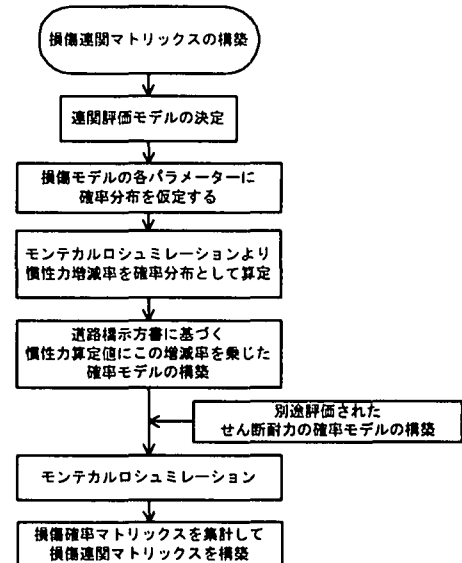


図-2 損傷連関マトリックスの構築フロー

(2) 動的解析による慣性力増減率の算定

はじめに慣性力増減率算定に用いるモデルを提案する。前章で得られた知見から、評価しなければならない事項として以下に示す2つが挙げられる。

- (CASE1) 対象とする橋脚とその橋脚上に設置されている2支承の損傷連関
- (CASE2) 対象とする支承とそれを支持する橋脚および同一桁他端の支承との損傷連関

これらの損傷連関を動的解析により評価するモデルを図-3に示す。CASE1では2つの支承バネの損傷モデルを変化させることによって、橋脚に対する慣性力増減率を評価する。さらにCASE2については支承バネの損傷モデルを変化させることで解析対象とする支承に対する慣性力増減率を評価する。ただし橋脚についてはせん断であるため線形バネとして評価する。また支承バネについては、前章で示した支承の損傷を考慮するため、図-4に示すモデルを用いる。さらにその他の部材については損傷を考慮せず、健全な状態で地震力を伝達すると考え、線形バネとする。

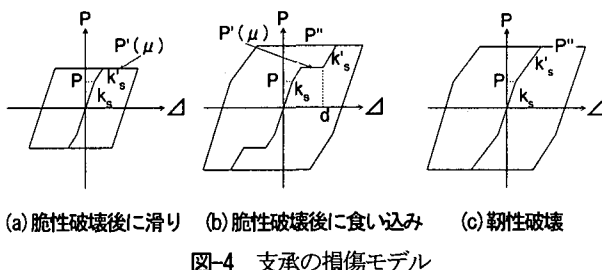
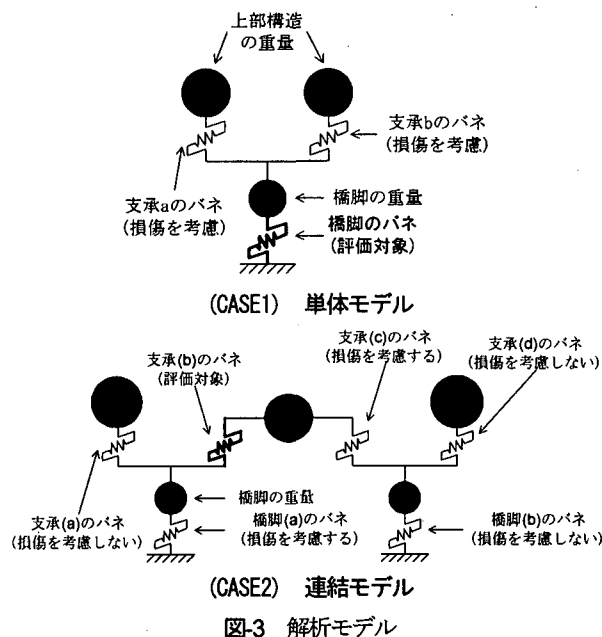
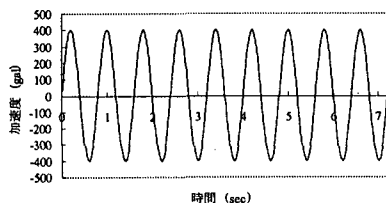


表-1 解析に用いる各パラメーター

	支承降伏耐力P (kN)	支承終局耐力P' (kN)	摩擦係数 μ	滑り量d (m)
平均値 (標準偏差)	161 (35)	322 (35)	0.35 (0.1)	0.075 (0.04)
	橋脚重量 (kN)	上部工重量 (kN)	橋脚バネ定数 (kN/m)	支承バネ定数 (kN/m)
	1350	700	42594	100000

ここで各パラメーターを説明すると、P、P'はそれぞれ支承の基準降伏耐力、終局耐力を示しており、終局耐力は基準降伏耐力の2倍と考えた⁴⁾。また、P'は支承が脆性破壊を起こす場合の耐力を表している。さらに k_s 、 k'_s 、d、 μ については、それぞれ支承が健全な状態におけるバネ定数、支承が降伏した場合のバネ定数、損傷形態が食い込みの場合の滑り量、支承が上部構造と滑りを起こした場合の摩擦係数を示している。表中の括弧内の数値は確率変数の標準偏差を示す。



また、この動的解析に用いる地震波は神戸海洋気象台でとられた強震記録を正弦波に変換したものとした。図

-5には変換した正弦波を示す。ただし、地震動の作用方向は橋軸直角方向とする。

表-2 橋脚の慣性力増減率 (シミュレーション結果の近似値)

	隣り合う支承の損傷状態の組み合わせ				
	滑り、滑り	滑り、食い込み	滑り、靱性	滑り、健全	健全、靱性
平均値	0.747	0.749	0.791	0.769	0.819
標準偏差	0.024	0.025	0.040	0.036	0.051
	健全、食い込み	食い込み、靱性	食い込み、食い込み	靱性、靱性	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
平均値	0.785	0.785	0.752	0.819	
標準偏差	0.040	0.040	0.025	0.051	

表-3 支承の慣性力増減率 (シミュレーション結果の近似値)

	支承の損傷状態		
	滑り	食い込み	靱性
平均値	1.906	1.899	1.000
標準偏差	0.102	0.098	0.001

表-2、3にはモンテカルロシミュレーションにより各部材の損傷状態ごとに試行回数を1万回として求めたシミュレーション結果を正規分布と仮定した場合の平均値および標準偏差を示す。

(4) 損傷連関マトリックスの構築

ここでは前節で求められた慣性力増減率の理論値を道路橋示方書に基づく慣性力算定値に乗じた確率モデルと、別途種々の不確定性を考慮して評価された耐力の確率モデルを用いたモンテカルロシミュレーション⁵⁾により、隣接部材の損傷モデルを条件付きとした各部材の損傷確率を算定し、クロス集計することで損傷連関マトリックスを構築する。橋脚の損傷連関マトリックスを表-4に示す。表-5に橋脚および同一桁他端の支承の被災度を条件付きとした支承の損傷連関マトリックスを示す。

表-4 橋脚の損傷連関マトリックス

橋脚被災度	支承被災度					
	AA	AB	AD	BB	BD	DD
AS	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
A	0.10%	0.34%	0.26%	0.78%	0.78%	0.78%
B	0.08%	0.32%	0.24%	0.73%	0.73%	0.73%
C	99.77%	99.34%	99.49%	98.48%	98.48%	98.48%
D	0.05%	0.01%	0.03%	0.01%	0.01%	0.01%

橋脚被災度	支承被災度					
	AA	AB	AD	BB	BD	DD
AS	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
A	1.66%	4.40%	3.51%	8.31%	8.31%	8.31%
B	0.13%	0.48%	0.37%	1.01%	1.01%	1.01%
C	98.16%	95.11%	96.10%	90.67%	90.67%	90.67%
D	0.05%	0.02%	0.03%	0.01%	0.01%	0.01%

橋脚被災度	支承被災度					
	AA	AB	AD	BB	BD	DD
AS	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
A	0.33%	1.00%	0.78%	2.22%	2.22%	2.22%
B	0.01%	0.04%	0.03%	0.10%	0.10%	0.10%
C	98.98%	98.66%	98.77%	97.50%	97.50%	97.50%
D	0.69%	0.31%	0.43%	0.18%	0.18%	0.18%

表-5 橋脚および同一桁他端の支承損傷モデルごとの支承の損傷連関マトリックス

(パターン1) 設計震度0.23で設計された支承

支 承 (b) 被災度	橋脚(a)被災度			
	AS,A	B,C,D		
		支 承(c)被災度		
		A,B,D	A	B
A	100.00%	49.98%	42.74%	42.76%
B	0.00%	50.00%	49.13%	49.13%
D	0.00%	0.02%	8.13%	8.12%

(パターン2) 設計震度 0.34 で設計された支承

支承 (b) 被災度	橋脚(a)被災度			
	AS,A		B,C,D	
	A,B,D		A	
A	100.00%	49.30%	16.32%	16.33%
B	0.00%	49.97%	39.23%	39.25%
D	0.00%	0.72%	44.45%	44.42%

ただし支承の損傷モードおよび脆性破壊後の滑り，食い込みについては同確率と仮定して集計した。

4. マトリックス演算による信頼性評価

本章では，算定した損傷連関マトリックスを用いて部材の損傷経路に着目した橋梁構造系の信頼性評価手法を提案する。

(1) 橋梁構造系の信頼性評価の演算法

本研究における橋梁構造全体系の信頼性評価の基本的な概念およびその手法を以下に示す。

- ・最終的な損傷状態が同じであっても損傷の経路によって，損傷確率が大きく変化する。
- ・各部材の損傷確率は，その部材と隣接する他の部材との相互作用によって決定される。

実際の手順を説明すると，まず橋梁構造系における損傷経路を仮定し，その経路の順序に沿って各部材の損傷確率の演算を次式により求める。

$$DP(n) = DCM(n) \times DP(n-1) \times DP(n+1) \quad (4.a)$$

n :部材番号

DCM :損傷連関マトリックス

DP :対象部材の損傷段階における損傷確率マトリックス

この式より，考え得るすべての損傷経路について評価対象とする部材の損傷確率を算定し，集計することで橋梁構造全体系を考慮した対象部材の最終的な損傷確率を算出することができる。

(2) 実橋梁の信頼性評価

ここでは前節で提案した橋梁構造系の信頼性評価の演算法を用いて，実橋梁の信頼性評価を行う。評価に用いる2つのモデルと考慮する部材数により分類した3つケースを図-6に示す。

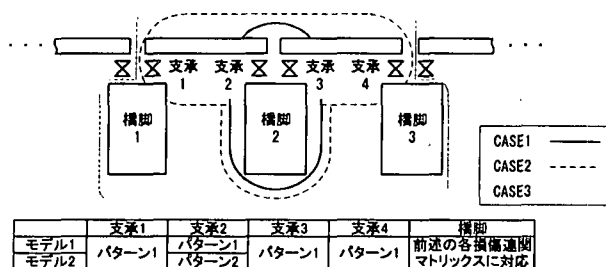


図-6 橋梁構造系の信頼性評価モデル

評価対象は橋脚2とし，それぞれの評価結果および橋

脚単体による損傷確率を表-6に示す。

表-6 橋脚2の損傷確率算定結果

橋脚被災度	モデル1			モデル2			橋脚単体による評価結果
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE1	CASE2	CASE3	
AS	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
A	6.56%	6.53%	6.34%	7.03%	6.93%	6.91%	8.31%
B	0.78%	0.77%	0.75%	0.84%	0.83%	0.82%	1.01%
C	92.65%	92.69%	92.90%	92.11%	92.23%	92.26%	90.67%
D	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.01%

この結果より橋脚単体による結果と比べ橋梁構造系における信頼性評価では損傷確率が低い結果となっている。さらに考慮する部材数を変化させた3ケースではほぼ同程度の損傷確率となっているが，部材数が増えるに従い損傷確率が低くなっている。この原因は支承の損傷連関マトリックスにあると考えられる。パターン1の支承の損傷連関マトリックスでは，隣接部材（とくに同一桁他端）の影響をあまり受けていないことがわかる。隣接部材がどの損傷状態であっても，支承はほぼ同等の損傷確率となるため，支承に隣接する部材の損傷が橋梁構造系に伝達されないこととなる。

またモデル2は部材の損傷連関マトリックスを1つ変更したモデルであるが，どのケースにおいてもモデル1と比べ損傷確率がやや高くなっている。よって橋梁構造系による信頼性評価を行う場合，各部材の強度について十分な検討が要求されることを示唆する結果といえる。

5. まとめ

以上，本稿では損傷連関マトリックスを用いた部材間の損傷連関評価による橋梁構造全体系の信頼性評価手法について提案した。しかし今回は信頼性評価時の損傷経路の重みおよび支承の状態については理想的な仮定を設けており，今後検討すべき課題となっている。

参考文献

- 1) 高田至郎，森川英典，松本正人ら：GIS データベースに基づいた橋梁耐震診断法の構築と損傷確率マトリックスの評価，構造工学論文集 vol. 44A, pp. 689-699, 1998. 3.
- 2) 高田至郎，森川英典，花川和彦ら：被災データに基づく橋梁構造系の損傷連関メカニズムの評価と耐震診断法の構築，第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 3267-3272, 1998. 11.
- 3) 孫利民，林秀侃ら：非線形動的解析によるRC単柱橋脚の被害程度と支承耐力の関連性分析，土木学会第52回年次学術講演会概要集, pp. 722-723, 1997. 9.
- 4) 社団法人 日本道路協会：道路橋支承便覧，平成3年7月。
- 5) 高田至郎，森川英典，井上佳子ら：既存RC橋脚における地震時せん断損傷の確率論的評価と耐震診断への適用，平成11年関西支部年次学術講演会。