

論文 RC 橋脚を有する橋梁構造系の耐震信頼性評価

船越 寿明^{*1}・森川 英典^{*2}・高田至郎^{*3}

要旨：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，それをもとに地震応答解析を行うことで，ある部材の損傷に伴い発生する他部材の損傷への影響を「損傷連関マトリックス」の形で評価した。そして，各部材の損傷連関マトリックスを用いた橋梁構造系の信頼性評価手法を提案した。

キーワード：橋梁構造系，耐震診断，部材間損傷連関，損傷連関マトリックス

1. はじめに

著者らは，橋梁構造系を考慮した地震時における信頼性評価を行うため，兵庫県南部地震における実被害データをもとに，部材間の強度関係および損傷の関連性などを統計的に整理してきた¹⁾。その結果，橋梁構造系における被害を評価する上で，支承の破壊特性が橋脚に対して複雑な影響を与えていることが示唆された。そこで本稿では，既往の研究¹⁾に基づき，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（昭和39年道路橋示方書準拠，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 ）を選定し，橋軸直角方向に対する橋梁構造系の損傷連関を考慮した信頼性評価を解析的に試みる。

2. 支承部の損傷および支承ヒューズ論の検討

橋梁構造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。本研究では，その機能および設計概念などを整理した上で橋梁構造系の損傷メカニズムについてまとめる。

2.1 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。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

2.2 橋梁構造系の損傷連関メカニズム

(1) 支承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ることが考えられる。また支承は基本的に可動支承と固定支承に分類されるが，本稿では橋軸直角方向の震動単位系における信頼性評価を行うため，どちらも固定として働くと考ええる。本稿では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を「滑り」，「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。

（滑り）…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

*1 兵庫県 工修（正会員）

*2 神戸大学助教授 工学部建設学科 工博（正会員）

*3 神戸大学教授 工学部建設学科 工博（正会員）

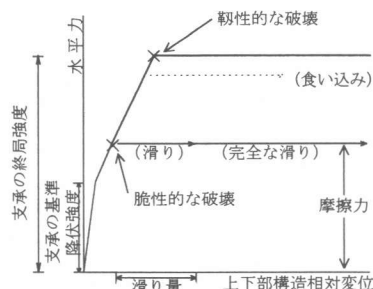


図-1 固定機能支承の損傷後挙動の概念図

伝達を軽減することができる。

(食い込み) …支承は橋脚へさらに水平力を伝達するが、支承部が損傷しているため伝達可能な水平力は終局耐力よりも小さくなると考えられる。

(靱性的な破壊) …支承が終局強度に達し、それより大きな慣性力を伝達する事ができない状態である。よって、この場合でも慣性力に対して支承の終局強度が十分に大きな場合と比較すると、支承はヒューズの的に作用していると考えることができる。

(2) 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、負担する慣性力が変化し、支承が損傷するといったメカニズムも考えられる。

2.3 被災度の定義

本稿における支承および橋脚の被災度の定義を表-1, 2 に示す。橋脚については阪神・淡路大震

表-1 支承の被災度判定基準

被災度	被害状況	判定基準
A	大被害	脆性的な破壊に致っている
B	中被害	終局耐力に達し、靱性的な破壊により残留変位が生じている
C	小被害	降伏耐力に達している
D	無被害	無被害

表-2 せん断破壊型 RC 橋脚の被災度判定基準

被災度	被害状況	判定基準
AS	落橋	慣性力がコンクリート+鉄筋のせん断耐力 (V_c+V_s) を上回る
A	大被害	慣性力が安全率を考慮したコンクリート+鉄筋のせん断耐力を ($V'_c+V'_s$) 上回る
B	中被害	慣性力がコンクリートのせん断耐力 (V_c) を上回る
C	小被害	慣性力が安全率を考慮したコンクリートのせん断耐力 (V'_c) を上回る
D	無被害	慣性力が安全率を考慮したコンクリートのせん断耐力 (V'_c) を下回る

災調査報告⁴⁾の損傷度判定ランクを参考に定義した。支承については2.2で述べた損傷形態による定義となっている。

2.4 橋梁構造系の損傷状態推移の仮定

本研究では橋梁構造系の様々な損傷状態は、各部材に強度のばらつきがあり、その組み合わせが複雑に絡み合った結果により生じると考える。震災以後、様々な支承の被災度と橋脚の被災度の連関評価が行われてきたが、いずれも支承ヒューズ論は明確ではない結果となっている。しかし、支承部が損傷を受ければ上部工の慣性力が伝わらず、橋脚の損傷が低減されるのは当然のことである。花川ら²⁾は問題は最終的に得られている各部材の損傷度を一律に「支承が損傷を受け、橋脚も損傷した」という考えにあるとし、損傷状態の推移を仮定することにより支承ヒューズ論に対する考察がなされている。本研究はこの考え方を踏襲するものであり、橋梁の損傷メカニズムには①橋脚の損傷の影響を受けたグループ、②支承の損傷状態の影響を受けたグループの2つがあると考えられる。これら2つの損傷メカニズムを整理するため、図-2に本研究における橋梁構造系に対する損傷状態の推移の仮定を示す。橋梁構造系に対する

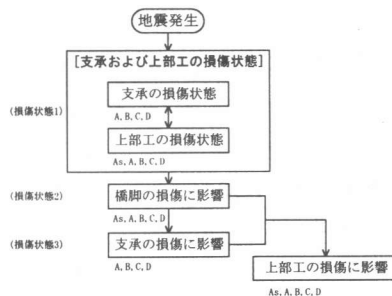
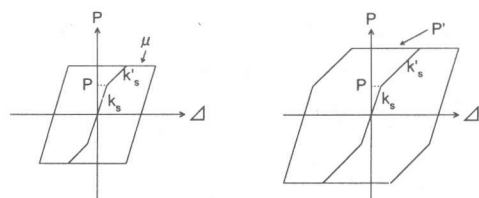


図-2 状態推移の仮定

損傷状態の推移は、まず支承の損傷から始まるものとする。損傷状態2とは先に述べたグループ②を示し、支承の甚大な損傷により、橋脚の損傷が低減された橋梁を考慮する。さらに損傷状態3はグループ①を考慮したもので、橋脚が損傷したために径間の変化および相対変位が大きくなり、支承に損傷を及ぼした状態である。



(a) 脆性破壊後に滑り (b) 靱性破壊
図-4 支承の損傷モデル

3. 損傷連関マトリックスの構築

ここでは前章で得られた知見に基づく地震応答解析のモンテカルロシミュレーションより、支承損傷の各部材への影響を損傷連関マトリックス²⁾を用いて確率論的に評価する。

3.1 損傷連関マトリックスの定義

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る。例えば部材Xの損傷度 x_i をA,B,C,D、部材Y,Zの損傷度 y_i, z_i をA,B,C,Dであるとした場合、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

$$P_X(x_i|y_i, z_i) = \frac{P_{X,Y,Z}(x_i, y_i, z_i)}{P_Y(y_i) \times P_Z(z_i)} \quad (1)$$

と表される。

3.2 モンテカルロシミュレーションを用いた地震応答解析モデル

図-3に動的解析に用いる解析モデルを示す。解析モデルでは評価対象が段落としを有するせん断破壊型の橋脚であるため、2つの質点および線形バネとし、支承については前章で述べた破壊形態を表現する図-4に示す非線形バネを考慮した。ここで支承モデルにおける P, P', μ はそれぞれ降伏耐力、終局耐力、摩擦力を表している。支承の滑りモデルについては一般に構造解析の分野では、鉄とコンクリート間の摩擦力は支承の耐力と

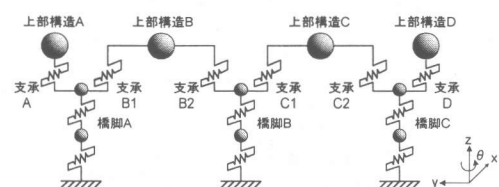


図-3 解析モデル

ほぼ同等かそれ以下³⁾であるとの判断から、支承破壊後の挙動を摩擦型の復元力モデルと仮定した。

3.3 地震応答解析パラメータ

表-3にモンテカルロシミュレーションを用いた地震応答解析の各パラメータを示す。

橋脚のコンクリート強度についてはコンクリート強度と変動係数に関わる推定式⁶⁾を参考に標準偏差を設定し、対数正規分布とした。鉄筋についても分布形状を対数正規分布と考え、平均値に対して5%の標準偏差を見込んだ。

支承の耐力に関しては、材料特性より終局耐力を基準降伏耐力の2倍と考えた⁵⁾。また、脆性破壊を起こす支承については滑りのみを考慮した。支承は一般に許容応力度設計法であり、かつ安全率1.7および割増し係数1.5が見込まれている。よって支承の降伏耐力は、設計震度0.2に1.7を乗じ、さらに1.5で除して0.23(震度係数換算)となる。さらに「平均値-3×標準偏差」が設計レベル(0.2)以上の強度であるように標準偏差を0.1と仮定した。

表-3 解析に用いる各パラメータ

	橋脚A, B, C			
	段落とし部		基部	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
重量 (kN)	524		763	
バネ定数 (kN/m ²)	6.81×10^6	確定値	6.98×10^6	確定値
減衰係数	5%		5%	
コンクリート強度 (N/mm ²)	20.6	4.8	20.6	4.8
鉄筋強度 (N/mm ²)	490.0	24.5	490.0	24.5

	支承A~D		上部構造A, D	上部構造B, C
	平均値	標準偏差		
重量 (kN)	—		676	1352
バネ定数 (kN/m ²)	1.0×10^6	確定値	—	—
減衰係数	0%		5%	
終局耐力 (震度係数換算)	0.46	0.02	—	
基準降伏耐力 (震度係数換算)	0.23	0.01		

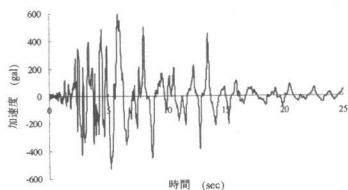


図-5 動的解析に用いた地震波

入力地震波は震度7を想定して、図-5に示す兵庫県南部地震においてJR 鷹取駅構内で観測された地震記録を用いる。ただし、地震動の作用方向は橋軸直角方向とする。

3.4 支承パラメータの感度特性の検討

地震応答解析により損傷連関マトリックスを作成する前に、ここでは支承パラメータの感度特性について評価する。これにより部材間の損傷連関を評価するにあたって、どの部材までの関連性を考慮する必要があるかを決定できる。

図-6には支承B2,B1,Aの終局耐力をそれぞれ約20%変動させた場合の橋脚Bに作用する慣性力の変化を示す。さらに図-7では支承A,B2,C1の終局耐力を同様に変動させた場合の支承B2への影響を評価した。この結果より当然であるが、橋脚に対しては支承B2の耐力が支配的であり、支承A,B1の影響は小さいことがわかる。支承A,B1の影響が伝達しない要因として、地震動レベルが支

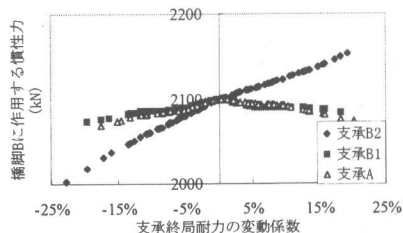


図-6 橋脚Bに対する感度解析結果

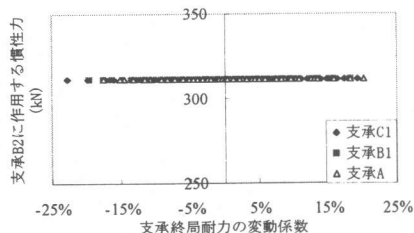


図-7 支承B2に対する感度解析結果

承耐力に比べ、非常に大きいことが挙げられる。そのため、支承B2が支承B1,Aの影響を伝達する前に終局耐力に達し、ヒューズの役割をしたと考えられる。よって本稿では、支承から橋脚への損傷連関のみを損傷連関マトリックスにより評価する。

3.5 支承の不確定性に関する検討

橋梁構造系の信頼性を大きく左右する要因として支承の各損傷形態の発生確率が挙げられる。本章では兵庫県南部地震において被災した実橋の被害データ（橋軸方向への損傷データを除く）より脆性破壊の発生確率について検討する。上部構造および支承形式の影響を排除するため、ここではとくに評価対象橋梁と同じ単純桁、支承板支承について評価を行った。

(1) 分析の仮定

図-8には支承の損傷形態の分類フローおよび分析の仮定を以下に示す。

仮定(a) 橋梁損傷メカニズムの整理

橋梁の損傷メカニズムを損傷状態推移の仮定より①橋脚の損傷の影響を受けたグループ、②支承の損傷状態の影響を受けたグループの2パターンに分類する。

仮定(b) 単純桁を支持する橋脚被災度A以上に關する判定

橋脚の被災度A以上については、橋脚が先に損傷を受けた可能性が大とする。したがって橋脚に損傷を与える時点では支承は破壊に至っていない状態であり、その後、橋脚の損傷の影響によって支承が損傷する可能性があると考える。よって橋脚被災度がA以上である場合、支承の損傷度を

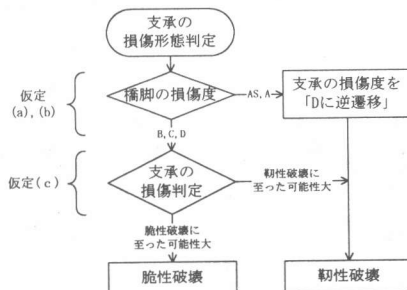


図-8 支承部の損傷形態の分類フロー

「Dに逆遷移」させて評価を行うこととする。

仮定(c) 靱性破壊および脆性破壊の定義

分析に用いる支承の被災データは土木学会・阪神淡路大震災調査報告⁴⁾に示される支承の被災度判定基準に基づいており、2.3で定義した判定基準とは異なる。そのため、被災データを本稿で扱う支承被災度に適用するための仮定を設ける。各被災度に存在する脆性破壊の割合を宮城県沖地震における支承の被害状況別件数⁵⁾より推定する。ただし、本論における損傷形態に分類が困難なデータが存在しており、これらを全て靱性破壊として見積もった場合では、支承に対して危険側の判断となり、逆に脆性破壊として見積もれば安全側の判断と考えられる。本稿ではこれらのデータを不確定要因と考え、各被災度における脆性破壊の発生確率として、安全側および危険側の算定値を最大、最小とした正規分布と仮定する。表-4に各支承被災度毎の脆性破壊の発生確率を示す。

表-4 各被災度毎の脆性破壊発生確率

		支承被災度		
		A	B	C
脆性破壊	平均値	100%	68%	15%
	標準偏差	0%	8%	5%

(2) 脆性破壊の発生確率の検討

(1)の仮定に基づき支承の脆性破壊発生確率を評価するため、まず表-5に示す支承の損傷確率マトリックスを作成した。損傷確率マトリックスは各部材の構造条件毎に損傷度と設定地震動をクロス集計して求めた。ただし地震動レベルの評価指標として、平成7年度に阪神地域と淡路島において実施したアンケート調査により算出された「アンケート震度」⁷⁾を用いる。また、仮定(b)より橋脚被災度 A 以上については支承被災度を D に逆遷移させている。表-5 および仮定(c)で検討し

表-5 支承板支承の損傷確率マトリックス

支承被災度	アンケート震度					
	5	6	7	7	7	7
A	0%	0	15%	38	23%	7
B	11%	2	15%	37	19%	6
C	33%	6	12%	29	10%	3
D	56%	10	58%	146	48%	15

表-6 各条件における脆性破壊の発生確率

	アンケート震度		
	5	6	7
平均値	12.5%	27.0%	37.2%
標準偏差	2.5%	1.7%	2.0%

表-7 橋脚B基部の損傷連関マトリックス

		支承の被災度		
		AA	AB	BB
橋脚被災度	AS	0.0%	0.0%	0.0%
	A	0.0%	0.0%	7.3%
	B	20.9%	94.5%	92.7%
	C	79.1%	5.5%	0.0%
	D	0.0%	0.0%	0.0%

表-8 支承の損傷確率の算定結果

支承被災度	損傷確率
A	38.1%
B	61.9%
C	0.0%
D	0.0%

た各支承被災度に存在する脆性破壊の発生確率から、表-6に地震動レベル毎の各損傷形態の発生確率を算定した。

3.6 損傷連関マトリックスの算定

前項までに述べた解析モデルおよび条件に基づきモンテカルロ法により、損傷連関マトリックスを構築する。

表-7には橋脚B基部の損傷連関マトリックスの算定結果を示す。試行回数を1万回とし、支承B2,C1の各損傷形態の組み合わせを条件として、各条件ごとに算定を行った。よって、損傷連関マトリックスの列は支承B2,C1の被災度の組み合わせを示している。また支承被災度C,Dは本解析結果では見られなかった。さらに表-8には支承の損傷確率を示す。ただし、損傷形態の判別については表-6中の震度7における脆性破壊の発生確率を用いた。

4. 橋梁構造系における信頼性評価

橋梁構造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。

この考え方をもとに評価の手順を説明すると、まず橋梁構造系における損傷経路および経路の重みを仮定し、その経路に沿って各部材の損傷確率の演算を次式により求める。

$$D_{PM}(n) = \sum_{X=1}^N (\alpha(X) \times D_{CM}(n) \times D_P(n-1) \times D_P(n+1)) \quad (2)$$

ここで $D_P(n)$: 部材 n の各段階における損傷確率、 n : 部材番号、 N : 損傷経路の総数、 X : 損傷経路番号、 $\alpha(X)$: 損傷経路 X の重み、 D_{CM} : 損傷連関マトリックス

この式により考え得るすべての損傷経路について、対象部材の損傷確率を算定し、損傷経路ごとの重みを付けて集計することで橋梁構造系を考慮した損傷確率を算出することができる。ただし、本稿の評価対象橋梁は橋脚の耐力が支承と比べ非常に大きかったため、ここで扱う損傷経路は支承が先行して損傷する場合のみとする。この条件の下で式(2)により算定した信頼性評価結果および橋脚単体による評価を表-9に示す。橋脚単体による評価とは支承の損傷状態がすべて靱性破壊と仮定したものである。

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。よって支承の損傷条件の違いによる橋脚の信頼性への影響が解析的に評価され、支承の不確定性を考慮することで、より実現象をとらえた耐震性能評価となることが示された。本稿では橋脚の損傷確率の算定にとどまっているが、今後、2章で述べたような橋脚から支承への連関評価、支承の食い込みモデルおよび各部材の最終的な損傷度の組み合わせから橋梁構造系の損傷度を評価する必要がある。

表-9 橋脚Bの損傷確率算定結果

橋脚被災度	橋梁構造系による評価	橋脚単体による評価
AS	0.0%	0.0%
A	2.8%	7.3%
B	83.1%	92.7%
C	14.1%	0.0%
D	0.0%	0.0%

5. まとめ

以上、本稿で検討した項目についてまとめる。

- (1) 支承の損傷形態を整理し、橋梁構造系の損傷メカニズムについて検討を行った。
- (2) 橋梁構造系の損傷連関評価モデルを提案し、支承パラメータの感度特性の検討を行うとともに、モンテカルロ法により損傷連関マトリックスを構築した。
- (3) 損傷連関マトリックスを用いた橋梁構造系の信頼性評価手法を提案し、実橋梁へ適用することで、支承の不確定性の影響を解析的に示した。今後の課題として、支承損傷の影響が同一桁他端の支承に伝達する場合や落橋防止構造を考慮した場合といった各条件への適用および橋梁構造系の損傷度評価が挙げられる。

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, 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) 土木学会: 阪神・淡路大震災調査報告, 橋梁, 1996.12.
- 5) 日本道路協会: 道路橋支承便覧, H.3.7.
- 6) 森川英典, 小林秀恵, 小林大輔: 非破壊試験に基づく既存RC橋脚の強度分布推定とせん断耐荷性能の評価, 建設工学研究所論文報告集第41号, 1999.11
- 7) 高田至郎, 嘉島崇志: 兵庫県南部地震における人的被害の要因分析と救急治療, 日本自然災害学会年次学術講演会, 1996