

## 部材間損傷連関解析に基づく橋梁構造系の耐震信頼性評価

兵庫県 正 員 ○船越 寿明  
 神戸大学工学部 正 員 森川 英典  
 神戸大学工学部 フェロー 高田 至郎

**1.はじめに** 著者らは、既存橋梁の耐震診断システム策定に関する研究の一環として、橋梁構造系をシステムとして捉え、実被害データに基づいた被災メカニズムおよび損傷連関メカニズムの推定を通じて橋梁構造系としての信頼性評価手法の確立を行ってきた<sup>1)</sup>。このような背景のもと、本稿では実被害データの蓄積より統計的に判断された被災メカニズムに基づき、既存橋梁に対して損傷連関解析に基づく橋梁構造系の損傷経路を考慮した信頼性評価を行った。

## 2.慣性力伝達システムの破壊特性と損傷連関の考察

橋梁構造系の損傷連関メカニズムを考慮するため、本稿では支承および落橋防止構造を「慣性力伝達システム」と定義し、その破壊特性および損傷連関について整理する<sup>1)</sup>。本研究では図-1に示すように、慣性力伝達システムの損傷形態として「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。それぞれの損傷形態をまとめる。

(a)滑り…慣性力伝達システム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。

(b)食い込み…慣性力伝達システムが脆性破壊後に食い込みを起こした場合、橋脚へさらに水平力を伝達するが、慣性力伝達システム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。よって橋脚の被害を拡大する要因とはならない。

(c)靱性的な破壊…慣性力伝達システム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、この場合でも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、支承はヒューズ的に作用していると考えられる。

ただし、慣性力伝達システムの耐力は支承または落橋防止構造の強度の高い部材のものとする。

**3. 解析モデルおよび評価対象橋梁** ここでは、損傷連関評価に用いる解析モデル(図-2)について述べる。橋脚はせん断破壊型の破壊モードであるため、線形バネを用いた。次に支承の損傷モデルを図-3に示す。ここで図中の $P, P', P'', \mu$ はそれぞれ降伏耐力、終局耐力、脆性破壊時の耐力、摩擦力を表している。評価対象キーワード：橋梁構造系、損傷連関、慣性力伝達システム

連絡先：森川 英典 神戸大学工学部 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL：078-803-6027

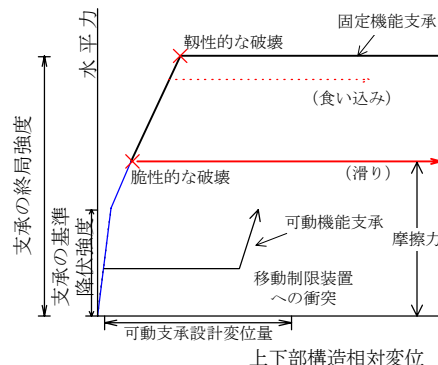


図-1 慣性力伝達システムの損傷後挙動の概念図<sup>1)</sup>

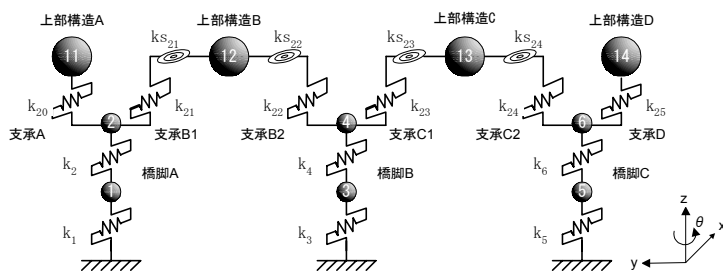
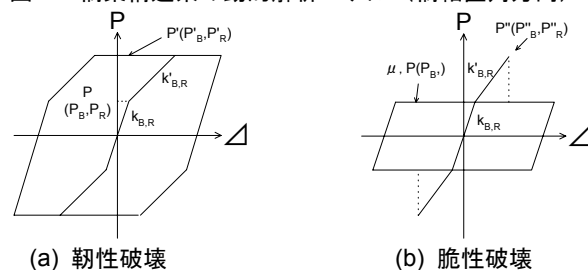


図-2 橋梁構造系の動的解析モデル（橋軸直角方向）



(a) 靱性破壊 (b) 脆性破壊  
 図-3 慣性力伝達システムの損傷モデル

表-1 評価対象橋梁の構造細目

|           |                              |                          | 平均値   | 標準偏差  |
|-----------|------------------------------|--------------------------|-------|-------|
| 慣性力伝達システム | 支承                           | 降伏耐力 <sup>*</sup> $P_R$  | 0.23  | 0.01  |
|           |                              | 終局耐力 <sup>*</sup> $P'_R$ | 0.46  | 0.02  |
|           | 落橋防止構造                       | 降伏耐力 <sup>*</sup> $P_R$  | 0.46  | 0.02  |
|           |                              | 終局耐力 <sup>*</sup> $P'_R$ | 0.92  | 0.04  |
|           | 脆性破壊確率                       |                          | 37.2% | 2.0%  |
| 橋脚        | 食い込み確率                       |                          | 28.4% | 1.0%  |
|           | コンクリート強度(N/mm <sup>2</sup> ) |                          | 20.6  | 2.06  |
|           | 鉄筋強度(N/mm <sup>2</sup> )     |                          | 490.0 | 49.00 |
| 上部構造      | 重量(kN)                       |                          | 1254  | —     |
|           | 重量(kN)                       |                          | 1352  | —     |
|           | 支間長(m)                       |                          | 33.6  | —     |
|           | 幅員(m)                        |                          | 6.0   | —     |

\*は震度係数換算値

橋梁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脚を有する橋梁構造系（多径間単純鋼桁，T型RC単柱橋脚，段落とし有り，せん断スパン比<2.5）を選定した．対象橋梁の構造細目を表-1に示す．地震動については図-4に示す兵庫県南部地震（JR 鷹取駅構内）において観測された加速度波形を橋軸直角方向に入力する．最後に橋脚，慣性力伝達システムおよび橋梁構造系の損傷判定基準をそれぞれ表-2～

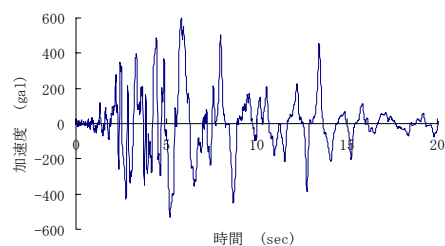


図-4 入力地震動

4に示す．ただし橋脚のせん断耐力の算定には二羽式<sup>2)</sup>を用いる．

**4.診断結果** 表-5に診断結果を示す．ここで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．ただし，このケースでは地震動レベルが非常に高いため，慣性力伝達システムは全て脆性破壊または靱性破壊のいずれかに至っており，慣性力伝達システム間の損傷連関は見られなかった．よって，ここでは慣性力伝達システムから橋脚への損傷連関マトリックスのみを示している．また表中の橋脚の損傷確率は，この損傷連関マトリックスに慣性力伝達システムの損傷確率を掛け合わせるにより算定した．

この診断結果より，兵庫県南部地震クラスの地震動に対しては，高い確率で落橋および倒壊が生じることが示唆される．また橋脚の損傷連関マトリックスから慣性力伝達システムの損傷が橋脚に対してヒューズ的に作用していることがわかる．しかし，地震動レベルが非常に高かったため，ヒューズ効果が発揮されたものの橋脚の自重による慣性力が過大となり損傷に至ったことが予想される．また橋脚単体の評価では，被災度ASとなることは少ないが，支承の被災度との組み合わせにより橋梁構造系では高い確率で被災度ASとなることがわかる．この場合では，橋梁構造系の損傷確率は橋脚および支承の両方の影響が支配的となっている．ここで支承のみを補強したと想定すると，橋脚へ伝達する慣性力が増加し，橋脚の損傷確率が高くなることが予想される．よって，このような場合では橋脚，支承および落橋防止構造の耐震補強バランスの検討が重要となる．

**5.まとめ** 本稿では既存橋梁に対してその耐震性能を評価した．その結果，橋脚，支承および落橋防止構造に甚大な被害が生じることがわかった．さらに，この結果より支承の損傷は橋脚に対してはヒューズ的に作用するが，橋梁構造系としては被害を拡大するとの考え方が示された．

（参考文献）1) 高田至郎，森川英典，花川和彦：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．

2) 二羽淳一郎：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究，土木学会論文集，No.508/V-26，pp.79-88，1995.2．

表-2 橋脚の損傷度判定基準

| 被災度 | 被害状況 | 判定基準                                            |
|-----|------|-------------------------------------------------|
| AS  | 崩壊   | 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( $V'_c+V'_s$ )を上回る |
| 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          |

表-3 慣性力伝達システムの損傷度判定基準

| 被災度 | 被害状況 | 判定基準                        |
|-----|------|-----------------------------|
| A   | 大被害  | 脆性的な破壊に致している                |
| 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-4 振動単位系の損傷度判定基準

|        |    | 慣性力伝達システムの被災度 |         |
|--------|----|---------------|---------|
|        |    | A             | B, C, D |
| 橋脚の被災度 | AS | AS            | AS      |
|        | A  | AS            | A       |
|        | B  | A             | B       |
|        | C  | A             | C       |
|        | D  | A             | D       |

表-5 診断結果

（慣性力伝達システム→橋脚の損傷連関マトリックス）

|       |    | 当該橋脚上の慣性力伝達システムの被災度 |       |       |       |
|-------|----|---------------------|-------|-------|-------|
|       |    | BB                  | BA    | AB    | AA    |
| 橋脚被災度 | AS | 0.1%                | 0.0%  | 0.0%  | 0.0%  |
|       | A  | 94.1%               | 3.4%  | 3.4%  | 0.0%  |
|       | B  | 5.8%                | 71.9% | 71.9% | 3.7%  |
|       | C  | 0.0%                | 24.8% | 24.8% | 68.1% |
|       | D  | 0.0%                | 0.0%  | 0.0%  | 28.2% |

（橋梁構造系の損傷確率）

| 被災度 | 落橋防止構造 | 支承  | 橋脚    | 橋梁構造系 |
|-----|--------|-----|-------|-------|
| AS  | —      | —   | 0.1%  | 16.9% |
| A   | 37%    | 37% | 48.9% | 48.5% |
| B   | 63%    | 63% | 37.0% | 23.2% |
| C   | 0%     | 0%  | 12.4% | 11.3% |
| D   | 0%     | 0%  | 1.6%  | 0.0%  |