

# 地震時における橋梁全体系の損傷推移のモデル化と損傷度および耐震性評価

山口大学大学院 学生員○中山英志 (株) 鴻池組 正会員 金好昭彦  
山口大学工学部 正会員 中村秀明 山口大学工学部 正会員 宮本文穂  
(株) NTT コミュニケーションウェア 安元 隆

## 1. はじめに

近年橋梁の耐震設計法の見直しが行われ、橋梁全体系で耐震性を評価する必要性が述べられてきている。この評価手法の確立を目的として著者らは従来より、橋梁を上部工、支承、下部工などによって構成される構造システムとして捉え、地震力が作用した場合、各部位部材がお互いに影響を与え合い損傷していく過程を状態遷移確率行列を用いモデル化し、損傷推移の結果として得られる構成要素の損傷状態確率によって損傷を評価、また比較することで耐震性の評価を行ってきた<sup>1)</sup>。しかしながら、損傷状態確率の比較では耐震性を一義的に評価することができないため、本研究では構成要素および全体系の損傷の程度を表す指標について提案し、実橋梁へ適用し損傷の評価を行った。

## 2. 損傷の評価方法

本研究では橋梁の曲げ損傷に着目し多段階に分類された構成要素の損傷状態確率に基づいて橋梁システムの代表的な構成要素である橋脚の損傷度と橋梁全体系の損傷度について評価することとした。

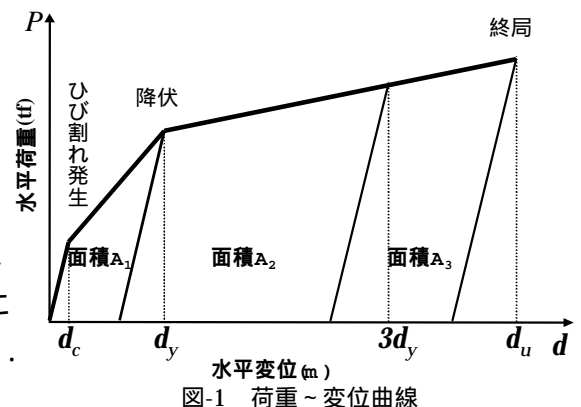
### 2.1 橋脚の損傷度

地震力作用により損傷する程度が地震作用期間中に橋脚に累積される塑性歪みエネルギー（以下、損傷エネルギー）で表されるという観点から、損傷推移モデルから算定される損傷状態確率と損傷分類を代表する損傷エネルギーとの期待値から損傷度の算定を行い評価を行う。ここで用いるエネルギーは便宜上、橋脚の荷重～変位骨格曲線によって囲まれる面積（図-1）で算定されるエネルギーである。なお、損傷分類はA（損傷：大）、B、C、D（損傷：小）の4段階とし、各損傷分類間の境界レベルは $d_u$ （終局変位）、 $3d_y$ 、 $d_y$ （降伏変位）を仮定し、各損傷分類を代表する損傷エネルギーを次式で表現した。

$$\begin{aligned} E(A) &= A_1 + A_2 + A_3 \\ E(B) &= A_1 + A_2 \\ E(C) &= A_1 \\ E(D) &= 0.0 \end{aligned} \quad (1)$$

なお、橋脚が破壊に至るまでに吸収できるエネルギー（以下、限界損傷エネルギー） $E_{MAX} = E(A)$ と仮定した。そして、損傷エネルギーと限界損傷エネルギーを下式により比較することによって、部位部材の損傷の度合いを損傷度として定義した。

$$D = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot E_i) / E_{MAX} \quad (2)$$



ここで、 $n$ ：損傷状態の分類数、 $P_i$ ：地震作用期間中の任意時刻での損傷状態  $i$  の損傷状態確率、 $E_i$ ：損傷状態  $i$  になるために必要な各損傷分類を代表する損傷エネルギーとした。

### 2.2 橋梁全体系の損傷度

地震により損傷した橋梁の損傷指標として橋梁の機能が考えられる。この機能という点に着目し、FTA（Failure Tree Analysis）を損傷程度ごとに構築し、機能損失の生起確率を損傷度として算定した。機能の点に着目し分類した損傷程度は以下の通りである。

キーワード：構造システム、耐震対策、損傷度、FTA

〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1 TEL：0836-35-9484 FAX：0836-35-9484

損傷状態 A：桁の落下による落橋および橋脚の崩壊，倒壊といった損傷で，車両の通行が不可能である損傷程度．

損傷状態 B：損傷状態 A には至らないが被災後に仮受等応急処置を橋梁に対して施すことにより制限付きではあるが車両の走行が可能であるレベルの損傷程度．

損傷状態 C：被災後に走行可能なレベルで橋梁の健全性を損なわない程度の損傷程度．

FTA の構築方法は損傷状態 (A, B, C) をトップ事象とし，その原因となる事象 (損傷状態) を下位レベルに向かって損傷程度と損傷状態の間の関連を木の形に展開する (図-2 参照)<sup>2)</sup>．この木をもとに損傷程度の生起する確率を損傷度として算定する．

### 3. 実橋梁への適用

#### 3.1 橋脚の損傷度評価の適用

道路高架橋に神戸海洋気象台波形を入力した場合の状態遷移モデルより算定された橋脚の損傷状態確率の経時変化の例を図-3 に示す．これらの結果をもとに損傷度を算定すると橋軸直角方向では 0.89，橋軸方向では 0.95 を得た．両方向ともに 0.9 程度とかなり高い値を示していた．また，兵庫県南部地震後に専門家による被害調査が行われており，この橋脚は最も損傷しているレベルに分類されていた<sup>1)</sup>ことより本損傷度は妥当な結果を出力していると思われる．

#### 3.2 橋梁全体系の損傷度評価の適用

耐震対策 (橋脚曲げ補強の適用，免震支承の適用，両案の併用) を導入した橋梁の損傷推移結果に適用し評価を行った (図-4 参照)．各種耐震対策を施すことにより無対策よりも大幅に耐震性能を向上させていることがわかった．しかし，損傷状態 B の発生は避けられないこともうかがえる．

### 4. まとめ

本研究では，損傷の大きさを定量的に表す指標として橋梁全体系および構成要素の損傷度を算定する方法について提案し，橋梁の耐震性を評価する事を試みた．本研究で得られた成果を以下に示す．

損傷推移モデルから算定される損傷状態確率からでは橋梁システムの構成要素の損傷程度を一義的に評価することが行えなかったが，損傷度の概念を適用することにより耐震性の評価が行えるようになった．

FTA により，橋梁全体系での耐震性評価が定量的に行えるようになった．また，この結果をもとに耐震対策の選定を行えるようになった．

#### 参考文献

- 1) 金好昭彦，宮本文穂，古家武士，中島募：橋梁構造システムの耐震性能評価に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.613 / - 42，pp31 - 42，1999.2
- 2) 赤木新介：システム工学 / エンジニアリングシステム解析と計画，東京共立出版，1992.11

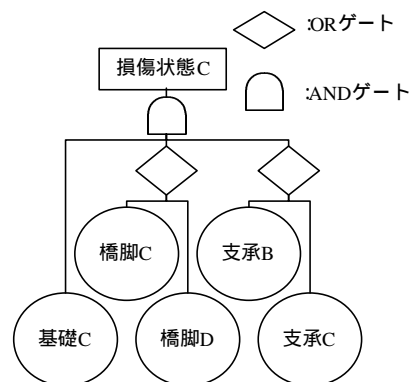


図-2 故障樹木の作成

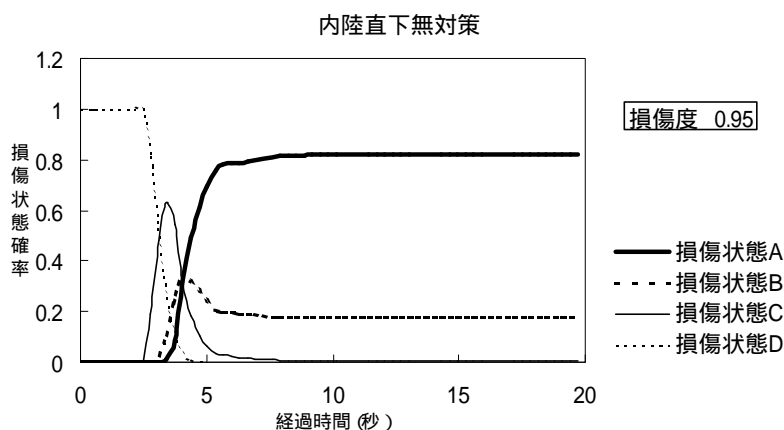


図-3 橋脚の損傷状態確率と損傷度 (無対策, 橋軸方向)

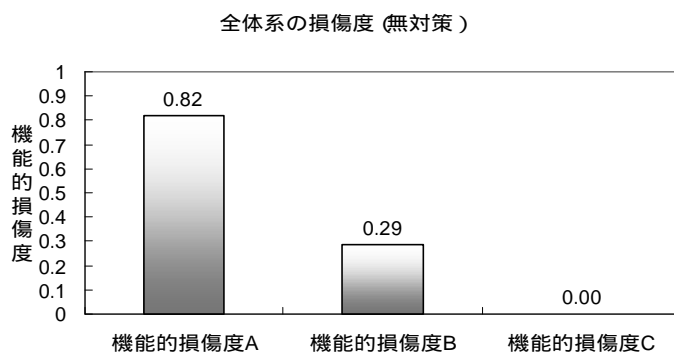


図-4 適用橋梁の機能的損傷度 (無対策, 橋軸方向)