

山口大学大学院 学生員 ○中島 募
山口大学工学部 正会員 宮本文穂

1. はじめに 1995年に発生した兵庫県南部地震で高架橋を始めとする多くの構造物が未曾有の被害を受けたことを契機として、特に橋梁の耐震設計法の見直しの中で、制震、免震および連結構造の導入により桁の落下もしくは橋脚の倒壊といった、橋梁が交通路としての機能を失うような最悪の事態を回避するフェールセーフ化手法が注目されつつある。本研究は、地震時における橋梁を構成する各部位の状態を確率モデルを導入することによって表現し、橋梁の全体構造をシステム工学的に考えた場合の橋梁の終局状態に至る破壊メカニズムを明らかにするとともに、現在検討されている耐震設計案等を適用した場合の問題点を解決することによって、フェールセーフ化手法の確立を目指すものである。

2. 兵庫県南部地震による被災状況からの要因分析と橋梁構造の各部位、部材の役割の整理

本研究では、地震時における橋梁の破壊メカニズムを明らかにするために、橋梁を単一の構造物の集まりではなく、各部位、部材の連なりからなるシステムとして取り扱う手法を導入する。これを可能にするため、橋梁を各部位、部材に細分化し、これらの部位、部材の連なりが地震時にどのような順序でどのような状態に至るかをモデル化することにより、橋梁全体の状態変化を表現するという方法を提案する。このため、まず、兵庫県南部地震による鉄道、道路高架橋の被災状況から、橋梁各部位、部材の損傷位置、損傷程度の統計量を明らかにする¹⁾ことにより、被災後の各部位、部材ごとの状態、すなわち、橋梁各部位でモデル化する際の状態変化の最終結果を決定した。つぎに、橋梁各部位、部材の役割を整理し、これら相互間の関連性を明確にすることにより、細分化した部位、部材を橋梁構造全体を構成するモデルとして再構築した。図1に構築した橋梁構造全体のモデル化の一例を示す。

3. 地震時における橋梁構造の状態遷移のモデル化

地震時における橋梁の状態遷移をモデル化する際、橋梁の部材ごとの状態に注目し、これらが地震を受けて時々刻々と遷移することによって橋梁全体としての状態の変化(遷移)を表すという手法を提案する。

3.1 各部位の状態の遷移方法²⁾

①時刻 t における各部位の状態を、それぞれの状態である確率を要素とする状態ベクトル $S(t)$ で次式のように表現する。

$$S(t) = \{p_1(t), p_2(t), p_3(t), \dots, p_i(t), \dots, p_m(t)\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m p_i(t) = 1.0$$

ここで、 $p_i(t)$ は時刻 t に状態 i である確率 ($i = 1 \sim m$)

②被災状況の要因分析などから、各部位の地震時損傷の進行程度を予測し、次式のような時刻 t における遷移確率行列 $P(t)$ を各部位ごとに定める。

$$P(t) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & & & a_{ij} & & a_{im} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mj} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで a_{ij} は状態 j から状態 i に移る確率

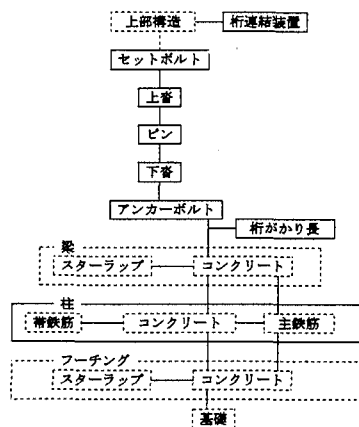


図1 橋梁構造全体のモデル化の一例

③時刻 t の時の状態ベクトルを $S_t(t)$ 、遷移確率行列を P_t としたとき、単位時間 dt 後の状態ベクトル $S_t(t+dt)$ を次式で求める。

$$S_t(t+dt)^T = P_t \times S_t(t)^T \quad (3)$$

ここで T は転置を表す

本研究では、部材の状態を、一例として定性的ではあるが各部材の終局状態に至る破壊モード（例えば、変形、移動など）の程度によってA(大)、B(中)、C(小)の3段階とした。

3.2 状態遷移と吸収エネルギーとの対応

地震エネルギーが部材の変形、移動によって吸収されると仮定して、図2と対応させた次式により時刻 t における吸収エネルギー $en(t)$ を求めるものとする。

$$en(t) = \sum_{i=1}^m A_i \times p_i(t) \quad (4)$$

ここで A_i は状態 i における荷重-変位曲線の面積

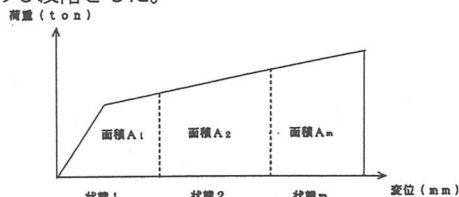


図2 荷重-変位曲線

3.3 橋梁構造の状態遷移 橋梁構造全体としての状態遷移モデルを、モデル化した各部位、部材で再構築する際、前出のように個々の部材の役割を考慮して、部材間の関連性を付与する。ここで関連性とは、例えば I という部材が著しい損傷をうけたならば、その部材に直接、もしくは間接的に接する部材 J 、 K も何らかの影響を受けるという考え方である。このような部材間の関連性を、状態遷移過程において影響を受けると思われる部位、部材の遷移確率行列を変更することによって表現した。

3.4 計算結果 以上で述べた方法を用いて、図1に示したピン支承、RC丸単柱橋脚、桁間連結装置などで構成される橋梁構造全体の状態遷移による計算を行った結果の一例を表1に示す。この結果により、地震時における橋梁構造の破壊経路を各部材の状態確率によって表現できた。なお、ここでは被害状況の要因分析の結果より、上部構造および基礎についてはそれら自身が受ける損傷が橋梁全体系には影響を及ぼさないと仮定した。

4. フェールセーフ化手法の検討 これまでに作成した橋梁構造全体のモデルに、耐震設計法の見直し案に盛り込まれているゴム支承を用いた免震支承を適用して計算した結果の一例を表2に示す。この結果から、免震支承が大きく変形することによって地震のエネルギーを吸収し、橋脚や桁がかり長の損傷が軽度となったと考えることにより、この対策工が地震エネルギーの伝播を考慮した橋梁構造全体のフェールセーフ化手法として適するものの一つであるといえる。なお、ここではゴム支承の非弾性挙動を計算に反映させるため、ピン支承に比べ大きく変形するように状態遷移行列を設定し、また復元を表す状態遷移行列により再び遷移させるように計算を行った。

表1 橋梁構造のモデルの計算結果の一例

	状態A	状態B	状態C
ピン支承			
上巻	0.589469	0.276232	0.135298
ピン	0.256797	0.371602	0.371602
下巻	0.793224	0.156058	0.050718
アンカーボルト	0.256797	0.371602	0.371602
橋脚	0.589469	0.276232	0.135298
形状			
基礎			
損傷位置			
破壊モード			
丸単柱	0.281402	0.299001	0.419597
枕	0.193434	0.443864	0.362703
柱下部	0.101895	0.329305	0.568800
曲げ			
桁間連結装置			
桁がかり長			

表2 免震支承の導入によるモデルの計算結果の例

	状態A	状態B	状態C
免震支承	0.047613	0.476130	0.476246
橋脚			
形状			
基礎			
損傷位置			
破壊モード			
丸単柱	0.235121	0.296466	0.469424
枕	0.180478	0.763877	0.076644
柱下部	0.029380	0.719712	0.751447
曲げ			
桁間連結装置			
桁がかり長			

免震支承の導入により変更される部分を網掛けで示す

5. 結論 本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

- ①確率モデルの導入により、地震時における橋梁構造の破壊経路を表現することが可能になった。
- ②地震エネルギーが部材の変形、移動などにより吸収されるという概念に着眼点を置くことにより、既存の耐震設計法をフェールセーフ化手法の観点から評価することができるようになった。

参考文献

- 1) 『JCI近畿支部「土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会」中間報告書』、社団法人 日本コンクリート工学会近畿支部、1995.12
- 2) 水谷 守・足立 幸郎・小塚 幹夫：経年劣化構造物の維持管理補修計画最適化に関する研究、JCOSSAR、1995.8