遷移確率行列を用いた橋梁構造システムの損傷メカニズムの推定

山口大学大学院　学生員　○安元　隆　　山口大学工学部　正会員　中村秀明
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

阪神・淡路大震災に代表される大地震においては，橋梁が倒壊または落橋することで道路網がその機能を失う事例が数多く報告されている．これらの被害は，従来の橋梁の耐震設計が部材単位での耐震性照査の積み重ねによっておこなわれていたことに起因している．そこで，本研究では橋梁全体系で耐震性の照査を行うために，橋梁の損傷の過程をモデル化する手法について提案した．さらにそのモデルに様々な耐震対策を適用し，その状態の変化から橋梁全体系の耐震性の評価を行うことで耐震対策の有効性について検討を行った．

2. 橋梁全体系の状態遷移のモデル化

橋梁全体系での状態遷移をモデル化するために，まず橋梁の部材ごとの状態に注目し，地震によりこの状態が遷移したと仮定する．そこで，まず始めに，部材の損傷の概要をもとに各部材の状態遷移のモデル化を行う．次に，各部材の関連性（図 1）から部材間の影響を特定し，橋梁全体系での状態遷移のモデル化を行う．ただし，図 1 において点線によって示されている部材および部材間の関連性はモデルの簡略化のため本研究では考慮していない．また，この図にはピン支承を適用したモデルを示したが，支承部を図 2 に示す他の支承の関連性に置き換えることにより他の支承にも適用することができる．

2.1　部材の状態の遷移方法[1)]　地震時における部材の損傷の進行を状態の遷移と考え以下のような手順でモデル化する．

時刻 t における部材の状態をそれぞれの状態である確率を要素とする状態行ベクトル $S_i(t)$ で以下のように示す．

$$S_i(t) = \{p_1(t), p_2(t), p_3(t), \cdots, p_i(t), \cdots, p_n(t)\} \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{n} p_i(t) = 1.0 \tag{2}$$

次に各部材の損傷の進行を次のような遷移確率行列により求める．ここで，P_{ij} は微少時間に状態 i が状態 j に遷移する確率である．

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & \cdots & p_{n1} \\ p_{12} & p_{22} & \cdots & p_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1n} & p_{2n} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

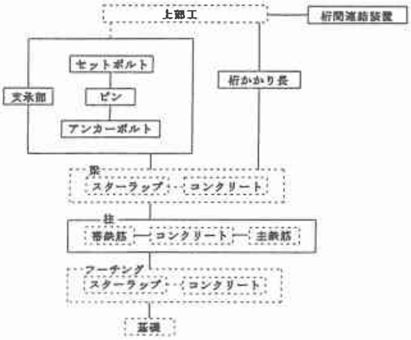
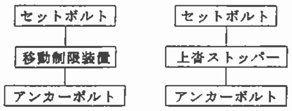


図 1　モデルの関連図



a）線支承モデル　b）高力黄銅支承板モデル
図 2　支承部の関連図

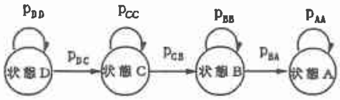


図 3　状態遷移の概念図

なお，本研究では部材の状態を地震時に生じる損傷の程度（変位，移動量など）によって 4 段階に評価できるものと仮定し，損傷の大きいものから順に A，B，C，D とした．また，部材の状態は図 3 に示すように 1 段階ずつ遷移するものと仮定した．

時刻 t における状態行ベクトルを $S_i(t)$，遷移確率行列を P_i としたときに，単位時間 dt 後の状態行ベクトル $S_i(t+dt)$ は式(4)から求める．また，式(4)を繰り返し計算することにより各遷移回数ごとの状態行ベクトルを求める．

$$S_i(t+dt)^T = P_i \times S_i(t)^T \tag{4}$$

2.2　非線形遷移モデルの導入[2)]　不規則振動論における初期超過確率（破壊確率）を遷移確率行列を複数用いることにより近似させ非線形の遷移を行う．ここでいう初期超過確率とはある閾値を初めて超過する確率である．部材の状態ごとにこの閾値を設定し初期超過確率を求める．次にこの初期超過確率により図 4 に示すように状態が生起する時刻と生起しなくなる時刻において状態遷移を分割し，遷移確率行列を求める．この複数の遷移確率行列を用いることによって非線形の状態遷移を行った．

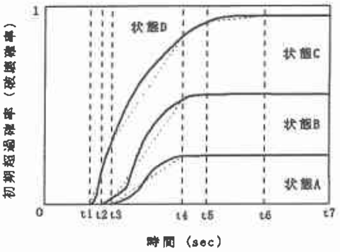


図 4　状態遷移の分割

2.3　モデルの計算結果[3)]　各部材の関連性を遷移確率行列を変更することにより表し，橋梁構造のモデルの計算をした結果を表 1 に示す．なお，対象とする橋梁構造はピン支承，橋脚（柱形状：丸単柱，杭形式：杭基礎，破壊モード：せん断），桁間連結装置で構成される．これにより，地震時の橋梁全体系の損傷状態を各部材の状態確率により表現することができる．

表 1　橋梁構造モデルの計算結果の一例

		状態A	状態B	状態C	状態D
	セットボルト	0.163254	0.004987	0.059291	0.772467
ピン支承	ピン	0.222717	0.01555	0.004263	0.757471
	アンカーボルト	0.005533	0.000117	0.016604	0.977746
橋脚		0.126434	0.368455	0.358466	0.146645
桁間連結装置		0.049595	0.151623	0.367304	0.431479
桁かかり長		0.04991	0.165982	0.417931	0.497432

3. 耐震対策案への適用と評価

3.1　耐震対策案への適用　耐震対策案を遷移確率行列を変更することにより橋梁モデルに適用する．適用する耐震対策は，橋脚補強の案，免震支承の案，落橋防止装置の案である．この３案を単体もしくは複数併用して適用する．免震支承の案を適用した結果を表 2 に示す．

表 2　免震支承の導入によるモデルの計算結果

	状態A	状態B	状態C	状態D
免震支承	0.023931	0.333303	0.547533	0.095232
橋脚	0.139972	0.34995	0.356917	0.153161
桁間連結装置	0.26212	0.276172	0.302028	0.159679
桁かかり長	0.043863	0.145799	0.368335	0.442002

3.2　耐震対策の有効性の評価　表 1 と表 2 の比較から免震支承を適用することにより橋脚の損傷がより軽度である確率が上昇し，また桁間連結装置ではより著しい損傷である確率が上昇している．また，桁かかり長では微少ではあるが損傷がより軽度である確率が上昇している．橋梁が地震を受けた際，各部材が損傷することによって地震エネルギーを消費すると考えた場合，耐震対策適用前と適用後に橋梁に作用する地震エネルギーは同一であるため免震支承を適用したこの結果では，他の部位が従来負担する地震エネルギーを桁間連結装置および免震支承が消費したと考えることができる．以上の結果から橋梁が交通路としての機能を失う，落橋および橋脚の倒壊という最悪の事態の起こる確率は低くなったと言える．この点で免震支承を適用する耐震対策案は有効であると評価できる．

以上のように，橋梁全体系を考慮することにより耐震対策の有効性を評価できることが明らかになった．

4. まとめ

本研究でえられた成果と今後の課題を以下にまとめる．

①地震時の橋梁全体系の損傷の進行を不規則振動論における初期超過確率と遷移確率行列の概念を用いてモデル化した．

②このモデルに様々な耐震対策を適用した時の遷移結果を比較することにより耐震対策の有効性について評価を行った．

③今後の課題として，さまざまな橋梁の耐震性の評価を実現するため，閾値の変更を考慮した遷移モデルを作成することが必要である．

参考文献

1)木谷守，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.
2)星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島研究所出版会，pp.153-154，1974.8.
3)（社）日本コンクリート工学協会近畿支部：『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』，1995.12.