

I-B 318 橋梁の地震時破壊メカニズムのモデル化とフェールセーフ化手法に関する一考察

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1月に発生した兵庫県南部地震による多くの橋梁構造物の被害を契機に、道路網の基幹をなす橋梁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、確率モデルの導入により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モデル化し、このモデルを利用してフェールセーフ化手法の観点からの耐震設計に盛り込まれようとしている免震支承の設置などの効果の評価を試みたものである。

2. 損傷の要因分析および部材間の関連性の明確化 本研究では、橋梁を各部位、部材に細分化し、これら部位、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確率を用いて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、兵庫県南部地震による被災状況から各部位、部材ごとの状態、すなわち、橋梁各部位でモデル化する場合の状態変化の最終結果を決定し、つぎに、橋梁各部位、部材の役割を整理して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に構築した橋梁全体構造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¹⁾²⁾ 地震時における橋梁の状態遷移をモデル化する場合、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系としての状態の変化(遷移)を表すという手法を提案する。この手法の手順を以下に示す。

①時刻 t における各部材の状態を、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 $St(t)$ で次式のように表現する。

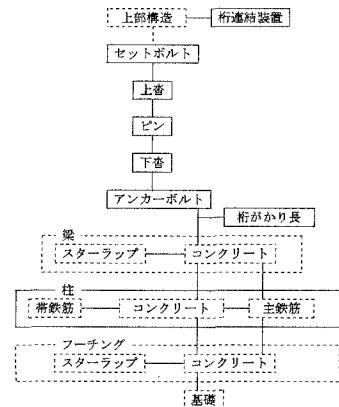
$$St(t) = \{p_1(t), p_2(t), p_3(t), \dots, p_i(t), \dots, p_m(t)\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m p_i(t) = 1.0 \quad \text{ここで、} p_i(t) \text{ は時刻 } t \text{ に状態 } i \text{ である確率 } (i = 1 \sim m)$$

②被災状況の要因分析などから、各部材の地震時損傷の進行程度を予測し、図2のような時刻 t における遷移確率行列 Pt を各部材ごとに定める。なお本研究では、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。

		A	B	C	現在の状態
$Pt =$	A	1.0	0.1	0.0	現在のランクBの状態から次の状態でランクAになる確率
	B	0.0	0.9	0.1	
	C	0.0	0.0	0.9	
	将来の状態				現在のランクCの状態から次の状態でランクCのままの確率

図2 状態遷移確率行列の例(その1)



注) 点線部はモデル化を行っていない

図1 橋梁構造全体のモデル化の一例

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

$$St(t+dt)^T = Pt \times St(t)^T \quad \text{ここで、} T \text{ は転置を表す} \quad (2)$$

④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、上述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。ここでの関連性は、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する。

以上で述べた方法を用いて各部材ごとに手順③に示す計算を繰り返し行い、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を行った結果の一例を表1に示す。これより、地震時の橋梁の破壊経路を各部材の状態確率によって表現できた。

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
ピセットボルト	0.588469	0.276232	0.135298
ン上蓋	0.256797	0.371602	0.371602
支ピン	0.793234	0.156058	0.050718
承下蓋	0.256797	0.371602	0.371602
アンカーボルト	0.588469	0.276232	0.135298
橋形状	基礎	損傷位置	破壊モード
脚丸単柱	杭	柱下部	曲げ
桁間連結装置			
桁がかり長			

4. 免震支承の適用と評価 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一手法であるゴム支承を用いた免震支承の適用とその評価を行ってみる。

4.1 適用方法 免震支承は、従来の鋼製支承と比較した場合、次に挙げる2つの特性を持つ。

(1)地震時に慣性力による上下部構造間の相対変位が非常に大きなものとなる。

(2)慣性力により変形した際、ゴムの弾性により復元する。

(1)の特性については、免震支承の遷移確率行列 Pt をピン支承の各部材のものに比べ大きく変形するように設定することにより表現した。一方、(2)の特性については、前節の手法における手順③の後に、図3のような遷移確率行列 Pt' を用いた以下のような手順③'を追加することにより表現した。

③' 図3に示されるような遷移確率行列を用いて、次式により部材の状態確率行ベクトル St' ($t+dt$) を求めよ。

$$St'(t+dt)^T = Pt' \times St(t+dt)^T \quad \text{ここで } T \text{ は転置を表す} \quad (3)$$

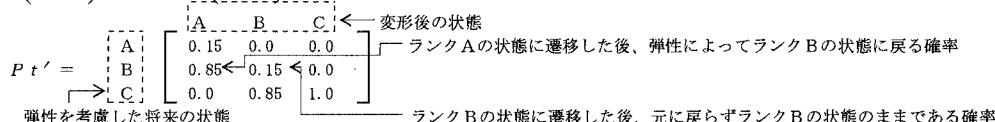


図3 状態遷移確率行列の例（その2）

4.2 適用結果 以上の方法により、免震支承を適

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	0.476139	0.476246
橋形状	基礎	損傷位置	破壊モード
脚丸単柱	杭	柱下部	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

用して計算を行った結果を表2に示す。表1と比較した場合、丸単柱橋脚の損傷がより軽度である状態へ確率が遷移している。また桁間連結装置の損傷状態についてみると、中程度の損傷である状態Bの確率が增大しているものの、重度の損傷である状態Aの確率および、軽度の損傷である状態Cの確率は減少している。この結果からのみでは一概に桁間連結装置の損傷程度がより軽微なものとなったと結論づけることはできないが、桁がかり長に関する遷移確率が軽度な状態に遷移していることから、橋梁が交通路としての機能を失うような最悪の事態の起こる確率は低くなったといえる。また、橋梁が地震を受けた際、各部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、その地震の強さが同じものであれば、橋梁全体で消費する地震エネルギーも同じ量でなければならないはずである。免震支承を適用したこの結果では、他の部位が従来受け持つ地震エネルギーを桁間連結装置と免震支承、もしくは免震支承のみが消費したと受け取ることができる。

このように、橋梁全体系を考慮したフェールセーフ化を考えた従来の構造に新たな部位、部材を追加した場合、上述の手法によるモデルを利用して、それらの効果を評価できることが明らかになった。

5. まとめ 本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

①地震時の橋梁構造の破壊経路を各部位、部材の状態確率の遷移により表現できるようになった。

②①による破壊経路の表現の手法を用いて、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できるようになった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 中島 務・宮本文徳：橋梁構造システムの破壊メカニズムとフェールセーフ化手法、平成8年度土木学会中国支部年講、1996.5