

I - B 88

損傷推移モデルによる橋梁構造システムの耐震性能評価に関する基礎的研究

山口大学大学院 学生員 安元 隆 (株) 鴻池組 正会員 金好昭彦
 (株) 日経 BP 正会員 中島 募 山口大学工学部 正会員 宮本文穂
 山口大学工学部 正会員 中村秀明

1. はじめに

現在、兵庫県南部地震における都市内道路高架橋の落橋、倒壊といった被害を教訓に、橋梁構造物の各構成部位部材の機能に支障が無い程度の損傷を許すことで、橋梁全体系の耐震性を合理的に向上させる検討が行われているが、その方法は確定論的な動的解析を介して行うものであり、地震動による損傷の不確定性要因については言及していない。したがって本研究では橋梁構造をシステムとして捉え、地震時における損傷推移を状態遷移確率行列によってモデル化し、その耐震性能を各構成部位部材の損傷状態確率によって把握するとともに、各種耐震対策を実施した際の耐震性向上の評価が行える手法の確立を試みた。

2. 橋梁全体系の損傷推移のモデル化¹⁾

2.1 モデル化の対象と関連性

実現象において橋梁構造は地震力の作用する方向によってその挙動が異なり、また相互に影響しあう構成部位部材も異なってくる。したがって本研究では損傷推移のモデル化を行う際、橋軸方向と橋軸直角方向を別々に考慮するとともに、各部位部材間の相互の影響を関連性で表現し、図-1に示すように方向別に設定した。

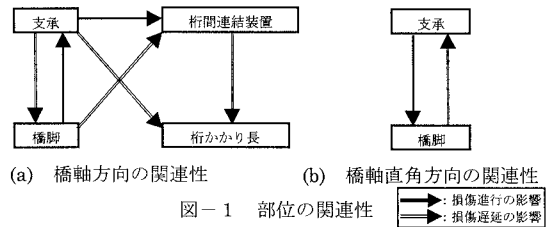


図-1 部位の関連性

→: 損傷進行の影響
 ⇨: 損傷遅延の影響

2.2 遷移確率行列の構築

地震時における橋梁構成部位・部材の損傷推移をモデル化するため、各部位部材の状態遷移確率行列を以下の手順で構築する。なお今回は損傷指標として、橋脚については柱基部に発生する曲げモーメントと柱基部に対する橋脚天端の相対水平変位を、支承については支承部に発生する反力を採用した。

- ① 解析の応答値に不規則振動論²⁾を適用、初通過破壊確率を導出する。
- ② 各損傷状態を区分する閾値に対する初通過破壊確率の経時変化に基づいて各損傷状態確率を算出する。
- ③ 状態遷移の単位時間ごとの損傷状態確率を抽出し状態遷移確率行列の構築を行う。

2.3 損傷推移のモデル化

(1) 部位部材単体の状態遷移

各部位部材の状態を、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 $S_i(t)$ で次式のように表す。この状態ベクトルの初期値 $S_i(0)$ は、初期の状態にある確率を 1.0 とし、他の状態の確率を 0 とする確定ベクトルとする。

$$S_i(t) = \{s_1(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_i(t), \dots, s_n(t)\}$$

$$\sum_{i=1}^n s_i(t) = 1.0 \quad s_i(t): \text{時刻 } t \text{ に状態 } i \text{ である確率}$$

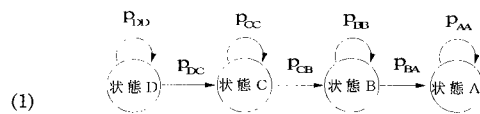


図-2 状態遷移の概念図

次に状態遷移は遷移確率が現在の状態のみに依存し、かつ離散的な時刻に発生するマルコフ連鎖に従うものとして状態を地震時における橋梁構成部材の損傷の程度によって4段階(A,B,C,D)にランク分けし、図-2に示すように1段階づつ遷移を行うこととする。また、式(2)に示される遷移確率行列を用い、式(3)によって時刻 $t + \Delta t$ の状態行ベクトルを算出する。

キーワード：構造システム、遷移確率行列、耐震対策

〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2557 TEL: 0836-35-9951 FAX: 0836-35-9951

$$\mathbf{P}(t, t + \Delta t) = \begin{bmatrix} p_{AA}(t + \Delta t) & p_{BA}(t + \Delta t) & 0 & 0 \\ 0 & p_{BB}(t + \Delta t) & p_{CB}(t + \Delta t) & 0 \\ 0 & 0 & p_{CC}(t + \Delta t) & p_{DC}(t + \Delta t) \\ 0 & 0 & 0 & p_{DD}(t + \Delta t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{S}(t + \Delta t)^T = \mathbf{P}(t, t + \Delta t) \times \mathbf{S}(t)^T \quad (3)$$

（2）システムの状態遷移

前項で示した手法により状態遷移を行う際、図-1で設定した各部位部材間の関連性を式(4)の状態遷移確率行列変更式により表現する。なお、 $\alpha \sim \iota$ は関連性の強さを表す-1.0～1.0の変数で、同条件における遷移過程では一定である。

$$\begin{bmatrix} p_{AA} & p_{BA} + \gamma \times p_{BB} & 0 & 0 \\ 0 & p_{BB} - \gamma \times p_{BB} & p_{CB} + \beta \times p_{CC} & 0 \\ 0 & 0 & p_{CC} - \beta \times p_{CC} & p_{DC} + \alpha \times p_{DD} \\ 0 & 0 & 0 & p_{DD} - \alpha \times p_{DD} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. 実橋梁への損傷推移モデルの適用

兵庫県南部地震において損傷した橋脚を3基選定し、状態遷移を行った結果の一例として、橋軸方向、橋軸直角方向の橋脚と支承の損傷状態確率の最終値を図-3, 4に示す。この図から橋軸では橋脚よりも支承の損傷が著しいのに対し、橋軸直角方向では支承の損傷よりも橋脚の損傷が著しい傾向にある。これは橋軸方向では支承が先行して破壊することで橋脚にかかる上部工の慣性力が低減され、橋脚の損傷が遅延したのに対し、橋軸直角方向では橋脚の方が先行して破壊したため、上記のような支承のヒューズの機能が有効に働かなかったことが原因であると思われる。

4. 耐震対策の実施と耐震性能向上の評価

耐震対策については、橋軸方向に対しては免震支承の設置と橋脚曲げ補強を、橋軸直角方向に対しては、支承のヒューズの機能の導入と橋脚曲げ補強とを実施した。なお、各対策の効果については、式(4)の状態遷移確率行列変更式を使用して、遷移ステップごと各状態遷移確率行列を変更することで表現した。耐震対策の実施結果の一例として免震支承の設置、橋脚曲げ補強を実施した後の損傷状態確率の最終値を図-5に示す。

図-3の最終値と比較してみると、免震支承設置では橋脚の損傷について状態Aである確率が30～60%にまで低減されている。また免震支承の損傷は軽微であったため、橋梁全体系の耐震性は大幅に向上している。次に橋脚曲げ補強の実施後では、橋脚の損傷状態については特にP-2、P-3橋脚について免震支承の設置以上の効果が得られている。しかしながら支承の損傷の低減は、図られておらず、むしろ数値的には多少の損傷増大の傾向がみられた。したがって橋脚曲げ補強実施後は橋脚の倒壊の危険性は低くなったが、落橋の危険性は低減されず、橋梁全体系の耐震性能の向上は免震支承ほど図られていない。

5. まとめ

- ① 状態遷移確率行列変更用変数を設定し、より柔軟性の高い関連性の影響を表すことが可能となった。
- ② 現在実施されている橋脚曲げ補強や免震支承等の耐震対策の効果を検証することができた。
- ③ 行列変更用変数の画一性の照査を行うことによって、今後様々な構造形式に適用できると考えられる。

参考文献

- 1) 金好昭彦, 宮本文穂, 古家武士, 中島 募: 橋梁システムの耐震性評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集V投稿中
- 2) 北村泰寿, 金好昭彦: 確率過程レベル超過問題の道路交通振動への応用, 土木学会論文集, No. 287, pp23-31, 1979. 7

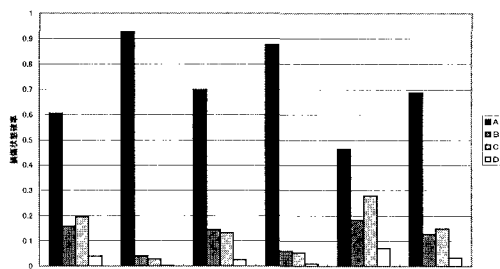


図-3 橋脚の損傷状態確率の最終値(曲げモーメント)

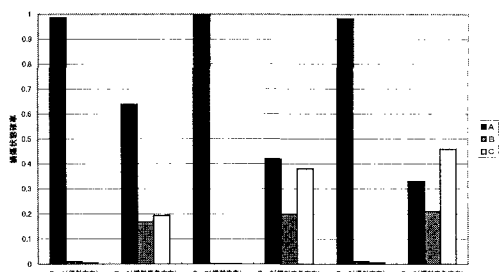


図-4 支承の損傷状態確率の最終値

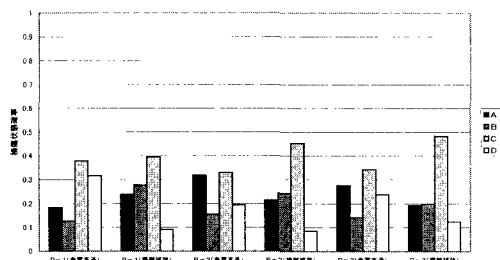


図-5 対策実施後の橋脚(橋軸方向)の損傷状態確率