

Multi State System に基づいた道路橋梁系の耐震性能照査型設計

株式会社オリエンタルコンサルタンツ 正会員 大川真一郎 パシフィックコンサルタンツ株式会社 正会員 森崎 啓
 香川大学工学部 正会員 白木 渡 関西大学環境都市工学部 正会員 堂垣正博

1. まえがき

わが国の道路橋の耐震設計体系¹⁾によれば、橋梁を構成する構造要素の設計基準は個々に定められ、個々の要素が十分な耐震性能を保有するように設計される。また、限定された構造要素には致命的な機能喪失にならない程度の損傷を許し、性能と費用とのバランスをある程度保証した設計法となっている。

しかし、橋梁を個々の要素からなる系と考えた場合、系の耐震性能が合理的に発揮できるように設計する基準にはなっていないので、個々の構造要素が橋梁全体の耐震性能に及ぼす影響度は定かではない。それゆえ、現行の耐震設計基準に準拠し、個々に構造要素を設計しても、構造システム全体の耐震性能は必ずしもバランスよく設計されているかどうか分からない²⁾。

本研究では、橋梁系の耐震設計に Multi State System (以下、MSS と略す)³⁾を適用し、損傷過程を考えた個々の構造要素の重要度、すなわち、損傷配分について検討する。

2. 橋梁システムの解析モデルと解析条件

解析対象の橋梁を、RC 橋脚で支持された 5 径間連続高架橋⁴⁾とした。ここに、部材の終局限界と性能発揮率の定義や、表 - 1 に示す Case 0~Case 3 の場合のゴム支承のせん断剛性の定義は文献⁵⁾に譲る。

2.1 数値解析モデル

対象橋梁を図 - 1 のようにモデル化した⁴⁾。非線形応答を示す RC 橋脚の鉄筋とコンクリートをソリッド要素、桁と橋台をはり一柱要素、支承と基礎~地盤系をバネ要素にモデル化した。数値解析に汎用有限要素解析プログラム“MARC2005r3”を用い、図 - 1 に示す载荷点に 1 ステップ当り 3 mm の増分水平変位を作用させて非弾性有限変位応答を求めた。

表 - 1 支承バネ定数一覧表

検討ケース	幅 W (cm)	奥行 B (cm)	高さ H (cm)	バネ定数 K (MN/m)
Case 0	70.00	70.00	9.60	23.601
Case 1	63.35	63.35	15.3	12.508
Case 2	46.22	46.22	10.0	8.844
Case 3	43.66	43.66	10.4	8.332

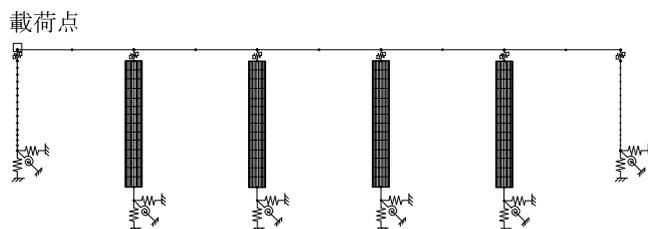


図 - 1 数値解析モデル

2.2 適切な耐震性能レベルのあり方

震災後の緊急車両や物資の輸送車両の通行および修復性の観点から、構造要素の重要度順を橋脚、落橋防止装置、支承とした。過去の地震被災記録から、桁と基礎の損傷が直接原因で落橋した例が極めて少ない。それゆえ、それらの性能は常に満たされているとした。

3. 数値解析結果に基づく MSS による信頼性評価

3.1 状態確率の算出

MSS の信頼性指標の計算に必要な状態確率は図 - 2 に示す方法で計算される。すなわち、過去の地震データ⁶⁾(地震エネルギー (M) とその発生頻度の関係)を解析対象橋梁の応答加速度~発生頻度の関係に換算し、2. の数値解析結果との関係を分析することによって状態確率が求められる。たとえば、状態確率①は、

$$p_1 = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} f(\alpha) d\alpha$$

から求められる。なお、解析対象橋梁の固有周期は 1.5 (s)、地盤種別は II 種地盤、震央からの距離は 20 km 未満を想定した。2. で得られた各構造要素の性能発揮率 (g_k) と状態確率 (p_k) を表 - 2 に示す。

キーワード：橋梁システム, Multi State System, 状態確率, 信頼性指標, 弾塑性有限変位応答

連絡先：〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 TEL.06-6368-0882 FAX.06-6368-0882

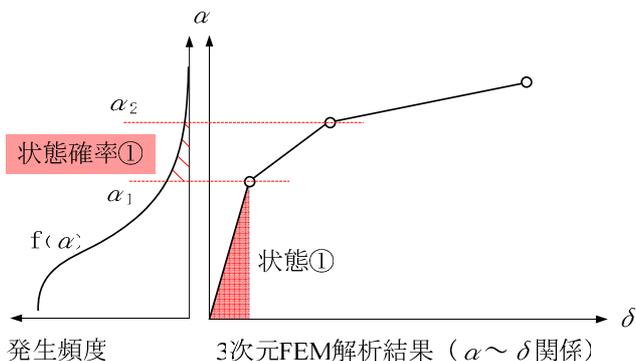


図 - 2 状態確率の算出方法

表 - 2 性能発揮率と状態確率の関係

	要素	g_k	p_k (%)
Case 0	Pier	1.0	0.67
	Shoe	2.19	0
	Cable	1.56	0.018
Case 1	Pier	1.0	0.075
	Shoe	3.21	0
	Cable	1.03	0.16
Case 2	Pier	1.0	0.075
	Shoe	0.633	4.72
	Cable	0.795	0.63
Case 3	Pier	1.0	0.056
	Shoe	0.626	4.46
	Cable	0.758	0.96

3.2 信頼性指標の算出

MSS の信頼性指標すなわち稼働率と期待性能率は

$$A(w) = \sum_{k=1}^K p_k 1(F(g_k, w) \geq 0) \quad (1)$$

$$E_{\infty} = \sum_{k=1}^K p_k g_k \quad (2)$$

から求められる。表-2 に示す関係を用いれば、MSS の信頼性指標（稼働率、期待性能率）が表-3 と表-4 のように得られる。同表から、部分的な損傷が生じたシステムの修復性を重要視したり、平均的に高い耐荷性能を期待したりする時には、Case 3 のような損傷過程と各要素の重み付けが理想的である。

表 - 3 Case 0～Case 3 の稼働率

Case	稼働率 (%)
0	0.69
1	0.24
2	5.43
3	5.48

表 - 4 Case 0～Case 3 の期待性能率

Case	期待性能率 (%)
0	0.70
1	0.24
2	3.56
3	4.04

4. あとがき

本研究では、橋梁系を構成する構造要素の橋梁全体への適切な貢献度、すなわち、適切な耐震性能レベルのあり方について検討し、橋梁系の耐震性能の最適化を図った。この場合、支承のせん断剛性をパラメータとした。また、システム信頼性の観点から、状態確率の具体的な算出法を示し評価した。その結果、MSS の考えを道路橋梁系の耐震設計に応用し、橋梁系と個々の構造要素の多状態を容認することで、システム全体の耐震性能に対する各構造要素の影響度が適切に評価され、橋梁系としての耐震性能が向上させられることを示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、過去の地震データをご提供頂いた防災科学技術研究所に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002.
- 2) 長尚：基礎知識としての構造信頼性設計，山海堂，1995.4.
- 3) A. Lisnianski and G. Levitin：Multi-state System Reliability - Assessment, Optimization and Applications-, World Scientific, 2003.
- 4) 日本道路協会編：道路橋の耐震設計に関する資料，1996.3.
- 5) H. Morisaki, S. Okawa, W. Shiraki, N. Ito, and M. Dogaki：Evaluation of seismic performance rate of each structural element of highway bridge system using Multi state system approach, ICOSAR 2009, pp.2187-2194, 2009.9.
- 6) 防災科学技術研究所 HP 強震観測網 K-NET：<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>