

地震動および材料強度の不確実性を考慮した既設橋梁の耐震信頼性に関する一考察

広島工業大学工学部 正会員 中山 隆弘 (株) 梶谷エンジニア 正会員 藤原 豪紀
 広島工業大学大学院 学生会員 ○竹本 康弘 広島工業大学大学院 学生会員 熊高 慎二

1. はじめに

わが国における現在の道路橋示方書(耐震設計編)¹⁾では、今までに観測された最大規模の地震動を設計用地震動とする考え方が取り入れられている。したがって、新設橋梁はもちろん、既設橋の耐震補強における耐震性レベルも、一応、それらの地震動を念頭に置かなければならない。しかし、将来の地震の発生や地震動特性の予測には大きな不確実性が存在することを十分に認識し、耐震設計基準にそのことを反映させることが望ましい。

一方、鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能や地震時における橋梁の挙動は、材料強度によっても変動するものと考えられる。材料特性、特にコンクリートの圧縮強度はこれまでの研究²⁾によって大きくばらつくことが明らかにされており、その影響が橋梁の動的信頼性にどのように及ぶのかを明らかにしておくことは重要である。

本研究はそのような問題意識の下で行ったもので、既設橋梁の耐震信頼度が地震動の加速度や位相、および材料強度の不確実性にどのような影響を受けるのかを検討したものである。

2. 解析概要

対象とした既設鉄筋コンクリート橋梁を図-1に示す。本橋梁は昭和43年3月に改訂された「道路橋下部構造設計指針」に従って設計されたものであり、上部工重量は1607.7tfである。また、現行の道路橋示方書の分類に従えば、建設地点の地域区分はB、地盤種別はI種(洪積地盤)、橋梁の重要度は1級である。図-2に動的解析モデルを示す。モデル化においては、上部工とフーチング部を線形はり要素、橋脚を非線形はり要素、橋脚基部に生じる塑性ヒンジを非線形ばね要素でモデル化した。なお、はり要素の非線形特性については、静的解析である保有水平耐力法によって算定した「曲げモーメント-曲率関係」を、ばね要素については「曲げモーメント-回転角関係」をTri-linearモデルで評価し、その履歴特性はTri-linear型武田モデルで与えられるものとした。減衰については、Rayleigh型の減衰モデルを用い、上部工に3%、橋脚に2%、フーチング部に10%を与えた。

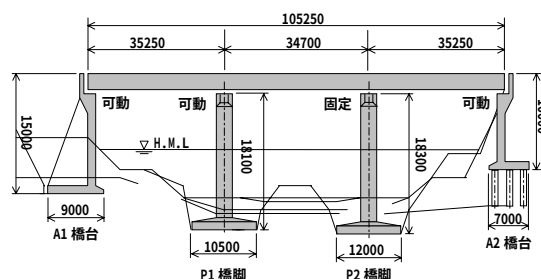


図-1 対象橋梁

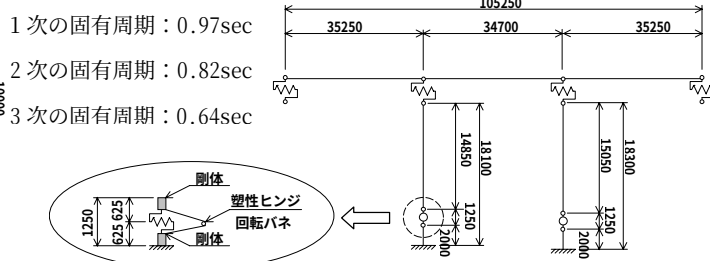


図-2 動的解析モデル

次に、入力地震動については、構造信頼性との関係を検討するために、非定常スペクトル理論³⁾に基づいて求めた実地震動の非定常スペクトルと時間に依存する位相を用いて、100波形の模擬地震動をシミュレートした。今回は、実地震動として、最大加速度の期待値が550galになるように振幅調整を行った兵庫県南部地震の際の神戸海洋気象台記録 E-W成分(図-3)を用いた。

材料強度のばらつきについては、コンクリートの圧縮強度と鉄筋の降伏点に着目した。表-1にそれらの諸量をまとめて示す。

なお、解析数は、上述の100波の模擬地震動とモンテカルロ法でシミュレートした両材料の強度とを組み合わせた450ケースである。

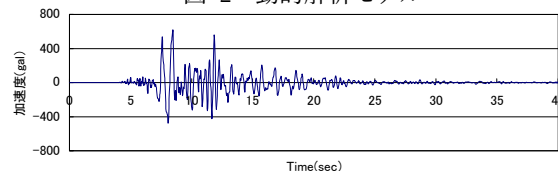


図-3 神戸海洋気象台記録 E-W成分

表-1 材料強度の特性値

コンクリート	圧縮強度	設計基準	23.5N/mm ²
		平均値	29.9N/mm ²
		変動係数	13.9%
	弾性係数		強度に依存
鉄筋	降伏点	設計基準	294N/mm ²
		平均値	320N/mm ²
		変動係数	5.0%
	弾性係数		2.06 × 10 ⁵ N/mm ²

キーワード：模擬地震動, RC 橋脚, 材料強度, ばらつき, 破壊確率
 住所 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1 TEL 082-921-3121(428) FAX 082-923-7083

3. 解析結果と考察

3.1 地震動の不確実性のみを考慮した場合

この場合の終局回転角 θ_{cr} と、地震動の初期位相の不確実性を考慮した場合の P1, P2 両橋脚基部の塑性ヒンジ部に生じる最大回転角 θ_{max} の平均値および変動係数を表-2 に示す。ただし、この場合のシミュレーション回数は 100 回であり、表中の基準値は、入力地震動を兵庫県南部地震(図-3)、材料強度の特性を設計規準強度とした場合の解析結果である。表より、最大回転角の変動係数はおよそ 25~30% であり、地震動の初期位相の不確実性が橋脚の変形性能に及ぼす影響はかなり大きいものであることが分かる。

表-2 最大・終局回転角の平均値および変動係数

	最大回転角(rad)			終局回転角 (rad)
	基準値	平均値	変動係数	
P1橋脚	1.30E-03	1.60E-03	28.5%	8.50E-03
P2橋脚	5.86E-03	5.88E-03	25.1%	6.70E-03

3.2 材料強度の不確実性のみを考慮した場合

表-3 は、材料強度の不確実性のみを考慮した場合の P1, P2 橋脚における最大回転角および終局回転角の平均値および変動係数を示したものである。ただし、この場合のシミュレーション回数は 50 回である。表より、最大回転角、終局回転角ともその変動係数は 5.0% 前後となり、コンクリート強度の変動係数 13.9% をかなり下回った。

表-3 最大・終局回転角の平均値および変動係数

	最大回転角(rad)			終局回転角(rad)		
	基準値	平均値	変動係数	基準値	平均値	変動係数
P1橋脚	1.30E-03	1.33E-03	7.0%	8.50E-03	9.28E-03	6.1%
P2橋脚	5.86E-03	5.61E-03	4.9%	6.70E-03	7.14E-03	4.8%

表-4 最大・終局回転角の平均値および変動係数

	最大回転角(rad)			終局回転角(rad)		
	基準値	平均値	変動係数	基準値	平均値	変動係数
P1橋脚	1.30E-03	1.34E-03	17.9%	8.50E-03	9.53E-03	6.5%
P2橋脚	5.86E-03	5.58E-03	30.2%	6.70E-03	7.44E-03	6.8%

3.3 地震動および材料強度の不確実性を考慮した場合

表-4 は、地震動および材料強度の不確実性を考慮した場合の P1, P2 橋脚における最大回転角、終局回転角の平均値および変動係数を示したものである。表より、最大回転角の変動係数はおよそ 20~30% であり、傾向として表-3 よりも表-2 に近い値を示している。なお詳細な分析までには至っていないが、表 2~4 すべてにおいて、最大回転角の各基準値とそれに対応する各平均値にそれほど大きな差は見られない。

3.4 P2 橋脚における破壊確率の比較

性能関数を $Z = \theta_{cr} - \theta_{max}$ として、最大回転角を Gumbel 分布、終局回転角を正規分布に当てはめて、1 次ガウス近似法により算定した破壊確率と、シミュレーションによって算定した破壊確率とを比較した結果について、地震動の不確実性のみを考慮した場合、材料強度の不確実性のみを考慮した場合、地震動および材料強度の不確実性を共に考慮した場合に分けて表-5 に示す。

表-5 P2 橋脚の破壊確率

	地震動のみ	材料強度のみ	地震動および材料強度
シミュレーションによる破壊確率	0.29	0.00	0.15
1次ガウス近似法による破壊確率	0.25	0.00	0.14

表より、まず地震動の不確実性のみを考慮した場合、地震動および材料強度の不確実性を考慮した場合に比べ、破壊確率が約 1/2 となることが分かる。これは、材料強度の不確実性を考慮することにより、橋脚の変形性能の平均値が表-2 に示した終局回転角よりもかなり大きくなるためである。また、材料強度の不確実性のみを考慮した場合に破壊確率が 0.00 となったのは、設定した地震動の動的特性の影響が大きいためである。因みに、終局回転角を許容回転角に置き換えて破壊確率を算定すると、期待値が 550gal であるにも関わらず、その値は地震動の不確実性のみ考慮した場合で約 0.73、材料強度の不確実性のみを考慮した場合で 0.99、地震動および材料強度の不確実性を考慮した場合で約 0.59 と極めて高い値になる。

4. まとめ

本研究では、地震動および材料強度の不確実性に着目して、その不確実性が橋梁の安全性に及ぼす影響を定量的に検討し、確率論的に橋梁の安全性を照査する方法の重要性を示した。今後は、より多くの橋梁に対する耐震信頼度の評価、さらに建設地点の地震危険度に基づく信頼度の評価により、橋梁に対する耐震信頼性設計⁴⁾の可能性を検討する必要がある。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12 月。
- 2) 中埜良昭：信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 東京大学博士論文, pp.124-147, 1989。
- 3) 藤原豪紀・中山隆弘：位相の非定常性を考慮した地震動シミュレーション法の開発, 土木学会論文集, pp119-132, 2000.10。
- 4) 岡原美智夫：変化への対応, 橋梁と基礎, vol134, No9, p.1, 2000.9。