

地震動および材料強度の不確実性を考慮した RC 橋脚の耐震信頼性評価

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 わが国では兵庫県南部地震以降、橋梁の耐震設計に用いる地震動として、TYPE I (プレート境界型地震) と TYPE II (内陸直下型地震) の地震動が使用されるようになり、必要に応じて動的解析による安全性照査が行われている。文献<sup>1)</sup>でも各種地盤上で得られた TYPE I および TYPE II の地震動を 3 波形程度選び、それらに対する応答量 (変位や断面力など) の平均値によって橋梁の安全性を評価することが規定されている。しかし、耐震設計の国際標準<sup>2)</sup>を視野に入れば、この方法は将来に渡ってベストな安全性照査法であるとは言い難い。すなわち、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べきであると考ええる。

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、材料強度のばらつき<sup>3)</sup>によっても変動するものと考えられ、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。

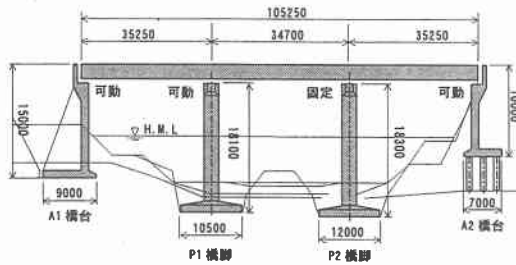


図-1 対象橋梁

単位: mm

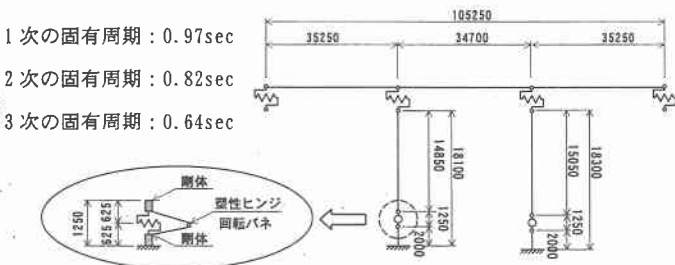


図-2 動的解析モデル

2. 解析概要 本研究では、現在の耐震設計の思想とは異なる考え方で設計された RC 橋脚を有する既設橋の構造信頼性について、地震時保有水平耐力法および全体系に対する非線形動的解析法によって検討した。なお、非線形動的解析法は、これまで多くの研究者に利用された実績のある汎用有限要素動的解析プログラムである TDAP III によって行った。時刻歴応答解析では Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta=0.25$ ) を用いた。

対象とした既設鉄筋コンクリート橋梁を図-1 に示す。本橋梁における建設地点の地域区分は B、地盤種別は I 種、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、塑性ヒンジ部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。

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<sup>4)</sup>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。実地震動としては、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。

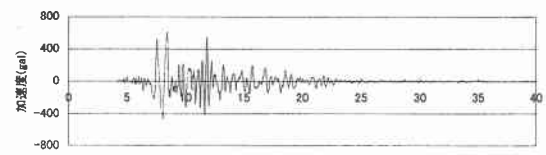


図-3 神戸海洋気象台記録 E-W 成分

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 <sup>2</sup>
		平均値	29.9N/mm <sup>2</sup>
		変動係数	13.9%
	弾性係数	強度に依存	
	せん断弾性係数	強度に依存	
鉄筋	降伏点	設計基準	294N/mm <sup>2</sup>
		平均値	320N/mm <sup>2</sup>
		変動係数	5.0%
	弾性係数	2.06 × 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	

材料強度のばらつきは、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。

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 材料強度の不確実性を考慮した場合における RC 橋脚の変形性能

表-2 は、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、ひび割れ回転角, 降伏回転角,

表-2 ひび割れ・降伏・終局回転角の平均値および変動係数

	ひび割れ回転角(rad)			降伏回転角(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	基準値	平均値	変動係数
P1橋脚	1.20E-04	1.26E-04	8.1%	1.37E-03	1.43E-03	5.2%	8.50E-03	9.28E-03	6.1%
P2橋脚	1.17E-04	1.23E-04	4.8%	1.50E-03	1.58E-03	5.1%	6.70E-03	7.14E-03	4.8%

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。因みに、表中の基準値は、材料強度の特性を設計規準強度とした場合の結果である。表より、ひび割れ・降伏・終局回転角すべてでその変動係数は 5.0~8.0%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。これは、コンクリート強度のばらつきが RC 橋脚の変形性能に及ぼす影響は、それ自身のばらつきに比べてそれほど大きくないことを示している。

#### 3.2 地震動および材料強度の不確実性を考慮した場合における応答解析結果

表-3 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の平均値および変動係数を示したものである。

因みに、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結果である。表より、最大回転角

	最大回転角(rad)		
	基準値	平均値	変動係数
P1橋脚	1.30E-03	1.34E-03	17.9%
P2橋脚	5.86E-03	5.58E-03	30.2%

の変動係数はおよそ 20~30%であり、表-2 における変動係数と比較するとかなり高い値を示している。なお詳細な分析までには至っていないが、最大回転角の基準値と平均値にそれほど大きな差は見られない。

#### 3.3 P1, 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、ひび割れ・降伏・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の結果を表-4 に示す。

表-4 P1, P2 橋脚における破壊確率

	ひび割れ回転角に対する破壊確率	降伏回転角に対する破壊確率	終局回転角に対する破壊確率
P1橋脚	1.00	0.46	0.00
P2橋脚	1.00	1.00	0.14

表より、当然ではあるが、ひび割れ回転角・降伏回転角に対する破壊確率は非常に高く、最大加速度の期待値が 550gal である地震動が対象橋梁に生じた場合、健全な機能を確保することは非常に困難である。また、終局回転角に対する P2 橋脚の破壊確率は 0.14 であり、この値が危険なのか、安全なのか判断するのは意見が分かれると思われる。しかし、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、その値は P2 橋脚で約 0.59 となり、現行の道路橋の耐震設計という観点から言えば危険と判断できる。

### 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することを目的とした。得られた結果をまとめると以下ようになる。

1) 材料強度のばらつきが RC 橋脚の変形性能に及ぼす影響は、材料強度ばらつきの度合いと比較すれば、それほど大きくない。2) P2 橋脚の終局回転角に対する破壊確率は 0.14 であり、最大加速度の期待値が 550gal である地震動に対する対象橋梁の耐震信頼性は低い。

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<sup>5)</sup>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) 日本規格協会：ISO2394 構造物の信頼性に関する一般原則, 2000。
- 3) 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。
- 4) 藤原豪紀・中山隆弘：位相の非正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。
- 5) 岡原美智夫：変化への対応, 橋梁と基礎, vol134, No9, p.1, 2000.9。