

## 模擬地震動と非線形動的解析に基づく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 フクヨシエンジニアリング 正会員 藤原 豪紀  
 コンサルタンツ大地 正会員 竹本 康弘 広島工業大学大学院 学生員 熊高 慎二

### 1. はじめに

構造設計における国際標準（ISO2394）を視野に入れれば、わが国における現行の道路橋示方書（耐震設計編）で謳われている安全性照査法にはやや問題があると考えざるを得ない。すなわち、大地震に対する橋梁の信頼性には、地震動の特性のみならず、使用される材料の力学的特性に大きく依存するが、いずれにも、設計時には避けたい不確実性が存在している。ただ、実務において多量の応答解析を行うことは、コンピュータの性能が飛躍的に向上した時点ではともかく、現時点では現実的に困難である。そこで、本研究では、これまでの研究成果を活かして、地震動および材料強度の不確実性をともに考慮して評価するRC橋脚の耐震信頼度と、シミュレーション回数との関係について、具体的な解析結果によって検討することを主たる目的とした。

### 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、上部工質量は1607.7t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、示方書に従って、上部工に3%、橋脚に2%、フーチング部に10%を与えた。

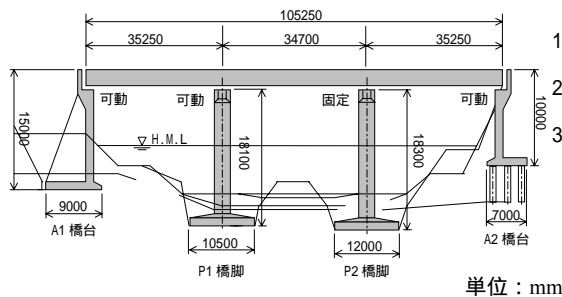


図-1 対象橋梁

1 次の固有周期：0.97sec  
 2 次の固有周期：0.82sec  
 3 次の固有周期：0.64sec

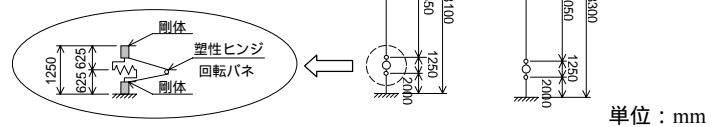


図-2 動的解析モデル

次に、入力地震動については、非常スペクトル理論<sup>1)</sup>に基づいて求めた実地震動の非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。さらに、コンクリートの圧縮強度や弾性係数と鉄筋の降伏点のばらつきについては、文献<sup>2)</sup>等の研究を参考にして、表-1のように仮定した。

なお、解析数は、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強度等を組み合わせた500ケースである。

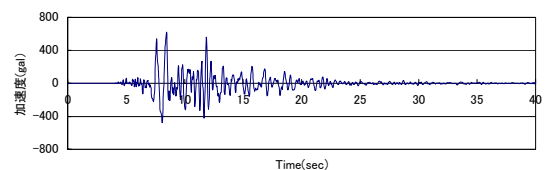


図-3 神戸海洋気象台記録 E-W 成分

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 <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	
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>	

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 P1, P2 橋脚の破壊確率

性能関数を  $Z = \frac{cr}{\max}$  として、最大回転角  $\max$  を Gumbel 分布、ひび割れ・降伏・終局回転角  $cr$  をいずれも正規分布に当てはめて、1 次ガウス近似法により橋脚の破壊確率を算定した。

結果を表-2 に示す。この表より、ひび割れ回転角・降伏回転角に対する破壊確率は 0.46～1.00 と非常に高く、最大加速度の期待値が 550gal である地震動を想定した場合、橋脚は健全な機能を維持する可能性は極めて低いと判断される。一方、終局回転角に対する P2 橋脚の破壊確率は 0.17 である。この値を、地震動の最大加速度の期待値（550Gal）との関係を考えて判断するとき、果たして不具合な値と考えるかどうかについては、最低限、橋梁の耐用年数や地震動の発生確率を考慮した検討が必要であるが、現時点では、そこまでには至っていない。因みに、許容回転角を超過する確率は約 0.59 であり、この値はかなり高い値であると思われる。

#### 3.2 解析ケース数と耐震信頼度の収束性

次に、500 ケースの解析結果の中からランダムに何ケースかのデータを取り出し、そのデータをもとに、Gumbel 分布の母数を算出してみた。そして、その母数をもとに破壊確率の算定を行った。取り出すデータ数（以下、単にデータ数と称する）は 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400 の 9 ケースで、各ケースとも 10 回の試行によって、破壊確率の平均値と変動係数を求めた。結果をそれぞれ図-4、図-5、表-3 に示す。

図-4 より明らかなように、ややばらつきはあるものの、平均値はデータ数にかかわらず 500 ケースで求めた破壊確率である 0.17 に近い値（0.16～0.20）を示している。しかし、変動係数については、20 ケースの場合が約 40%、400 ケースの場合が約 6% で、かなり大きな差があることが分かる。

次に、視点を変えて、求めた破壊確率が、0.17 を含み、0.15～0.20 の範囲に入った回数  $N$  を、まとめて表-4 に示す。

表 4 より、データ数が 20, 40 の場合、破壊確率が 0.15～0.20 の範囲に入ったのは 10 回の試行中 2 回であり、データ数が 60, 80 以上になると、100 の場合以外は、いずれも、その回数が 7 回を超えていることが理解できる。すなわち、あくまで今回の解析モデルに対する結果ではあるが、大地震を受けて破壊確率が 0.1 を上回るような場合には、60 ケース程度の動的解析を行えば、ある程度信頼性のある耐震信頼性評価を行い得ると判断できる。

#### 4. まとめ

本研究では、地震動および材料強度の不確実性をともに考慮して、ある既設 RC 橋脚の破壊確率とシミュレーション回数との関係について検討した。その結果、破壊確率が 0.1 を超えるような地震動に対しては、60 ケース程度の動的解析を行えば、信頼できる信頼性評価が可能であることを示すことができた。

#### <参考文献>

- 1) 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,pp.119-132,2000.10.
- 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.

表-2 P1,P2 橋脚の破壊確率

	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	0.17

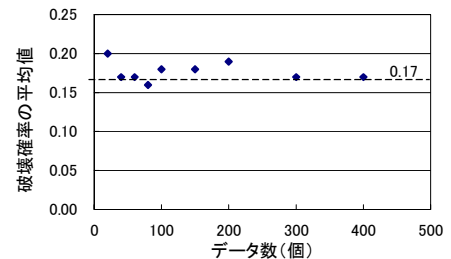


図-4 解析数と破壊確率の平均値との関係

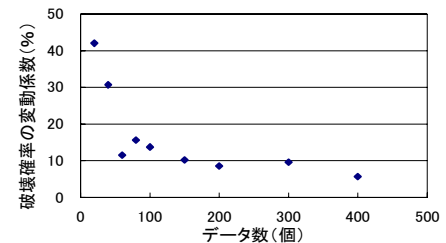


図-5 解析数と破壊確率の変動係数との関係

表-3 解析数と破壊確率の平均値および変動係数

データ数(個)	20	40	60	80	100
破壊確率の平均値	0.20	0.17	0.17	0.16	0.18
変動係数(%)	42.0	30.7	11.5	15.6	13.7

データ数(個)	150	200	300	400
破壊確率の平均値	0.18	0.19	0.17	0.17
変動係数(%)	10.2	8.5	9.6	5.7

表-4 破壊確率が 0.15～0.20 の範囲に入った回数

データ数(個)	20	40	60	80	100
N(回)	2	2	7	7	5

データ数(個)	150	200	300	400
N(回)	8	7	9	10