

## 地震リスクを考慮した設計地震動強度の構造形式間の比較について

北海学園大学大学院 学生員 ○阿部 淳一 北海学園大学 正会員 杉本 博之  
北武コンサルタント(株) 正会員 渡邊 忠朋

**1. 研究目的** 地震動の発生は不確実的な現象であり、構造物の供用期間中には種々の地震動強度を受ける可能性がある。そこで、耐震設計に種々の地震動強度による損失を考慮した地震リスクを導入すれば、合理的な設計が可能ではないかという観点のもとで、筆者らは耐震設計に地震リスクを導入する一試みとして、地震リスクを考慮した設計地震動強度の算定に関する提案を行ってきた<sup>1)</sup>。地震リスクは地震発生確率と、種々の地震動強度による構造物の損傷や崩壊による損失から算定される。そのため、提案する地震リスクを考慮した設計地震動強度は、地震発生確率の違いや、構造物の損傷や崩壊過程の違い、すなわち構造形式ごとに固有のものとして算定されると考え計算を行ってきた。そしてこれまでの検討結果では、地震発生確率の違いにより、同一の構造形式でも設計地震動強度はそれぞれ異なることが確認された。

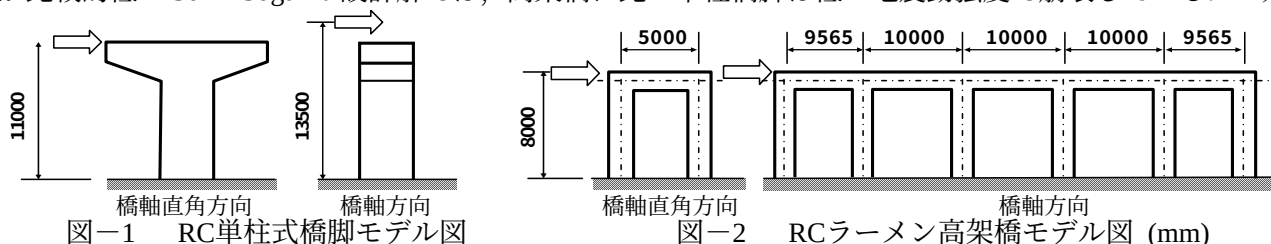
本論文では同一の地震発生確率のもとに、2つの異なる構造形式に対して設計地震動強度の算定を行い、得られた結果を構造形式間で比較、検討を試みる。

**2. 検討モデル** 本研究が対象としたのは図-1に示す RC 単柱式橋脚（以下、単柱橋脚）<sup>1)</sup>、および図-2に示す RC ラーメン高架橋（以下、高架橋）である。非線形性を考慮するのは、単柱橋脚は柱下端部、高架橋は柱上下端部、および上層梁とし、モデル化はそれぞれ  $M-\theta$  関係<sup>2),3)</sup>とした。

本研究が提案する設計地震動強度の算定のためにまず、0～1000gal の地震動強度を 50gal 刻みに分割する。そして、各地震動強度に対する最適設計をそれぞれ行い、初期設計を算定する。初期設計における目的関数は初期建設コストのみ<sup>1)</sup>とした。設計の対象とするのは、柱、および上層梁の断面とし、柱は正方形断面、上層梁は長方形断面である。それぞれの断面寸法と鉄筋量を設計の対象とし、これらは単柱橋脚、および高架橋で同様とした。制約条件は各部材のせん断力の照査、および回転角の照査を行う。

設計地震動強度の算定には、次に各初期設計の地震リスクを算定する。地震リスクは各初期設計に対して、50gal 刻みの地震動強度をすべて入力し、各部位の損傷度を算定する。損傷に対する補修コスト、あるいは崩壊に関するコスト（ここでは、初期建設コストの 1.5 倍）を求め、地震発生確率を乗じて地震動強度で数値積分することにより算定される<sup>1)</sup>。構造物の崩壊は全ての柱部材の下端部が終局回転角を超えた場合とした。各初期設計に対する地震リスクと初期建設コストの和からトータルコストを算定する。このトータルコストが最小となる地震動強度を、ここでは設計地震動強度と定義する。最適設計、および地震リスク算定における入力地震動は内陸型地震動<sup>2)</sup>、地震リスクの算定には 0.84 フラクタイルハザード曲線<sup>4)</sup>を用いた。

**3. 計算結果** 各構造形式別の計算結果を示す。表-1に各初期設計の損傷マトリクスを構造形式別に示す。損傷マトリクスは各地震動強度における各部位の中で最大の損傷度を用いてマトリクス表記している。表は縦軸に設計入力地震動強度、横軸に入力地震動とした。表は白色が無損傷で赤色が崩壊を表している。また太線より右側の領域は設計に用いた地震動よりも高い地震動が入力された場合の損傷度を表す。設計入力地震動強度が比較的低い 50～450gal の設計解では、高架橋に比べ単柱橋脚は低い地震動強度で崩壊している。一方、5



キーワード 地震リスク 最適耐震設計 設計地震動強度 RC 構造物

連絡先 〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目 北海学園大学工学部 TEL 011-841-1161

00gal 以上の設計入力地震動強度による設計解では高架橋の方が崩壊は早く、850gal 以上の設計解では両形式共に崩壊していない。

設計入力地震動強度と初期建設コスト、および地震リスクコストとの関係を形式別に図-3 に示す。図は棒グラフが初期建設コスト、折れ線グラフが地震リスクコストで、橙色が単柱橋脚、青色が高架橋の結果である。地震リスクコストを比較すると、地震動強度が50～750gal では高架橋の方が高い。表-1 より 50～500gal の地震動強度では高架橋の方が崩壊する地震動強度は高いが、高架橋は複数の非線形部材を有し補修コストが高いために、地震リスクコストは高くなったと考えられる。一方、800gal 以上の設計入力地震動強度に対する地震リスクコストは関係が逆転している。これは、図-3 の高架橋の初期建設コストより、800gal 以上の地震動強度は初期建設コストが非連続的に高くなり、高架橋の各部位の損傷が小さくなったため、単柱橋脚の地震リスクの方が高くなったと考えられる。

次に、設計入力地震動強度とトータルコストの関係を図-4(単柱橋脚)、5(高架橋)に示す。図は白色が初期建設コスト、黄色が地震リスクコストで、矢印がトータルコスト最小となる設計地震動強度である。設計地震動強度は単柱橋脚が 450gal、高架橋は600gal で、同じ地震発生確率でも 150gal の差となった。

本計算例で対象とした構造形式は橋脚と高架橋であるため使用目的等が大きく異なり、また上載荷重の種類も異なることから、トータルコストの比較によって構造形式の優劣を判断することは適切でない。しかし、損傷や崩壊過程が異なる構造形式の違いにより、本研究の設計地震動強度はそれぞれ異なることを示唆していると考えられる。

**4. まとめ** 地震リスクを考慮した設計地震動強度算定に関する筆者らの提案を、同一の地震発生確率の基に異なる構造形式で計算を行った。計算結果は高架橋が単柱橋脚よりも高い設計地震動となり、構造の違いにおいても設計地震動強度が異なる結果が得られた。本計算例では補修に対するリスクのみを扱ったが、今後は構造物を使用するユーザーが受ける損失や営業損失などを含めて検討したいと考える。

**参考文献** 1)阿部,杉本,渡邊:耐震設計に用いる地震動強度に関する一考察,土木学会北海道支部論文報告集,第 63 A-66,2007. 2)土木学会:コンクリート標準示方書,2002. 3)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計,1999. 4)土木学会地震工学委員会・レベル 2 地震動研究小委員会:レベル 2 地震動研究小委員会の活動成果報告書,2000.

表-1 損傷マトリクス

|           |      | リスク算定地震動強度 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|-----------|------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|           |      | 50         | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 |
| 設計入力地震動強度 | 50   | 単柱橋脚       | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 100  | 単柱橋脚       | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 150  | 単柱橋脚       | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 200  | 単柱橋脚       | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 250  | 単柱橋脚       | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 300  | 単柱橋脚       | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 350  | 単柱橋脚       | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 400  | 単柱橋脚       | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 450  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 500  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 550  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 600  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 650  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 700  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 750  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 800  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 850  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 900  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 950  | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           | 1000 | 単柱橋脚       | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |
|           |      | 高架橋        | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2    |

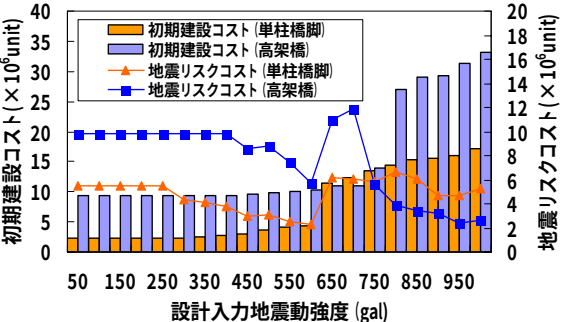


図-3 構造形式別の地震リスクコスト

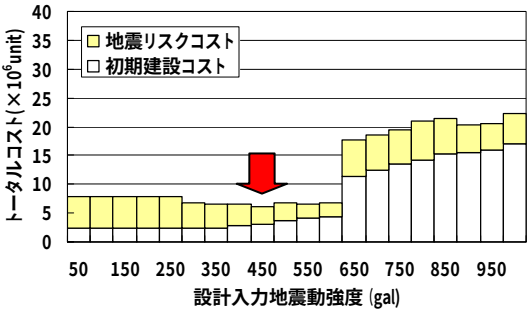


図-4 設計入力地震動強度とトータルコスト (RC 単柱式橋脚)

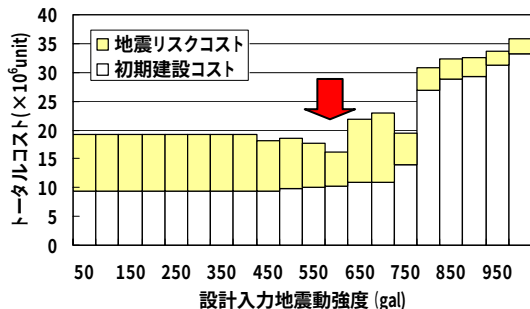


図-5 設計入力地震動強度とトータルコスト (RC ラーメン高架橋)