

地震時保有水平耐力法と性能評価型設計法の比較

構造材料工学研究室 高梨 雅史  
指導教員 吉川 弘道

1.はじめに

大規模地震によって何度となく被害を受けてきたわが国において耐震設計は重要な意味を持つ。新たに改定された道路橋示方書は性能評価型設計法を強く意識したものになっている。したがって耐震設計は今後仕様規定に基づく設計から性能評価型設計法へと以降すると考えられる。ここでは道路橋示方書に示される地震時保有水平耐力法と性能評価型設計法との相関性を調べることで、地震時保有水平耐力法による照査を満足する程度に応じた構造物の被害を推定し耐震性能を明確にするとともに新たな設計法の特徴を考える。

2.地震時保有水平耐力法<sup>1)</sup>

地震時保有水平耐力法とは大地震時に生じる地震動を設計地震力として見込み、構造物の非線形挙動を適切に考慮し、動的耐力や靱性に基づいて耐震設計するものである。耐震性能の照査は式(1)で行う。地震時保有水平耐力  $P_a$  とは地震動を受けた時の構造物の持っている耐力である。

$$P_a \geq k_{hc} W \tag{1}$$

地震時保有水平耐力法はこれを満足することが目標となる。ここで  $k_{hc}$ :設計水平震度,  $W$ :等価重量(tf)である。

3.損傷度期待値の算定

損傷度期待値とは、ある大きさの地震動が地震ハザード曲線により表される確率で発生し、構造物が図1の Damage Index Curve:  $DI(\alpha)$ により表される損傷を受けるとした条件の基での構造物の平均的な損傷度指標である。ここで式(2)は損傷度指標  $DI(\alpha)$ の算定式である。 $\mu_{resp}$  は応答塑性率,  $\mu_u$  は終局変位靱性率,  $E_h$  は履歴吸収エネルギー,  $\beta$  は部材断面形状に関するもので本論では 0.15 とし算定をおこなった。

$$DI = \frac{m_{resp} - 1}{m_u - 1} + \frac{\beta \cdot E_h}{P_y (d_u - d_y)} \tag{2}$$

構造物の損傷度期待値密度  $ed_i(\alpha)$  は地震ハザード曲線を微分することにより求まる発生確率密度  $p_i(\alpha)$  と損傷度指標  $DI(\alpha)$  の積である式(3)より求まる。そして損傷度期待値密度  $ed_i(\alpha)$  の面積として、損傷度期待値  $ED$  を式(4)より求める。

$$ed_i(\mathbf{a}) = DI(\mathbf{a}) \cdot p_i(\mathbf{a}) \tag{3}$$

$$ED = \int_0^{+\infty} ed_i(\mathbf{a}) d\mathbf{a} = \int_0^{+\infty} DI(\mathbf{a}) \cdot p_i(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \tag{4}$$

4.イベントツリー解析を用いた地震リスク評価<sup>2)</sup>

本論のイベントツリーは、P.G.A.  $\alpha$  Gal の地震動を発端事象とし破壊モードは曲げ破壊、曲げ降伏後のせん断破壊(曲げせん断破壊)、せん断破壊の3事象を、損傷レベルは5事象を設定した。損傷レベル1は、構造物が地震動を受けても弾性範囲内で留まる状態であり、構造被害が生起しない損失率  $x_1=x_4=x_7=0$  を想定する。最終帰結は8つとなる破壊モード、構造被害、損傷レベルの各生起確率は鉄筋コンクリート単柱式橋脚の物性値より信頼性理論に基づき算出する(図3)。本論

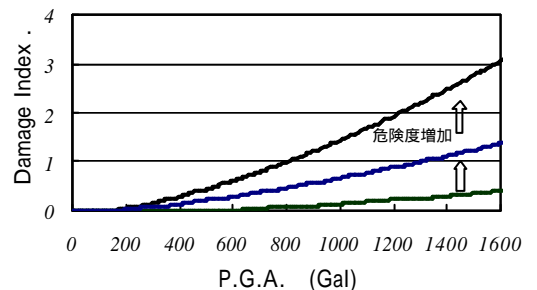


図1 Damage Index Curve

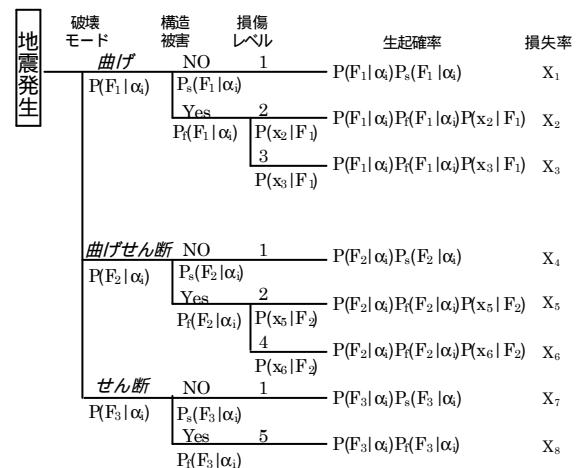


図2 本論におけるイベントツリー

で用いる地震リスクに基づく性能関数は  $Z=V_y/V_m$  と  $Z=\delta_R/\delta_K$  であり、 $K$  は降伏と終局の限界状態を表す．ここで  $V_y$  はせん断耐力、 $V_m$  は曲げ耐力、 $\delta_R$  は応答変位量、 $\delta_K$  は限界状態  $K$  の変位量である．以上よりイベントツリーの分岐点における各生起確率を文献2)に基づき算出し、最終帰結の生起確率は図2に示す式で算出する．鉄筋コンクリート単柱式橋脚の期待損失率は、P.G.A.  $\alpha$  に対して次式より算出される．

$$E[x|\mathbf{a}_i] = P(F_1|\mathbf{a}_i) \left[ P_s(F_1|\mathbf{a}_i)x_1 + P_f(F_1|\mathbf{a}_i) \sum_{k=2}^3 P(x_k|F_1)x_k \right] + P(F_2|\mathbf{a}_i) \left[ P_s(F_2|\mathbf{a}_i)x_4 + P_f(F_2|\mathbf{a}_i) \sum_{k=5}^6 P(x_k|F_2)x_k \right] + P(F_3|\mathbf{a}_i) \left[ P_s(F_3|\mathbf{a}_i)x_7 + P_f(F_3|\mathbf{a}_i)x_8 \right] \quad (5)$$

予想し得る全ての P.G.A.  $\alpha_i$  Gal に対して期待損失率を算出し、鉄筋コンクリート単柱式橋脚の地震リスクが評価される．

### 5. 結果とまとめ

比較の際に地震時保有水平耐力の照査式を危険度という形で表す．これは  $R_p$  1 で構造物は安全を保つことを意味する．

$$R_p = \frac{K_{hc}W}{P_a} \geq 0 \quad (6)$$

まずこの地震時保有水平耐力法の危険度と損傷度期待値との相関性を調べる．本論では鉄筋コンクリート橋脚 8 種を使用し、それぞれについて地震時保有水平耐力法と損傷度期待値算定法による解析を行い、その結果をプロットした(図5)．相関係数  $R$  が 0.98 と非常に強い相関性を見てとれる．よってここから地震時保有水平耐力法による照査を満たす限界は定性的に評価すると中程度の被害であることが確認された．

次に地震時保有水平耐力の危険度とイベントツリー解析による評価法の相関性を調べる．対象構造物は先の算定に用いた橋脚と同様のものとした．比較は地震時保有水平耐力法とイベントツリー解析を各橋脚ごとに行い、その結果をプロットし行った(図6)．結果は相関性がほとんどないものとなった．この原因としてイベントツリー解析だけが他の2つの設計法とは違い確率論を用いた解析であるということも大きいですが、せん断耐力に占めるコンクリート負担分の関係が期待損失率に大きな影響を与えていることがわかった．表1に示す様に地震時保有水平耐力法と損傷度期待値算定法においてせん断耐力はまったく解析結果には反映されず主として降伏耐力や靱性率によって左右される．しかしイベントツリー解析においてせん断耐力は最初の分岐点である破壊モードの算定にも用いられるなど、重要な要因の1つである．よって今回相関性が得られなかった原因としてこの様な設計法自体の性質の違いが考えられる．

#### 【参考文献】

- 1) 社団法人 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 耐震設計編
- 2) 大井幸太:鉄筋コンクリート単柱式橋脚を対象とした地震防災対策案の最適化, 武蔵工業大学修士論文, 2003.3

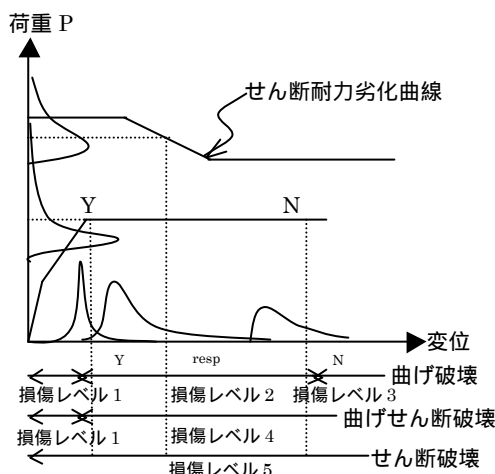


図3 破壊モード、損傷レベル生起確率の算出概念図

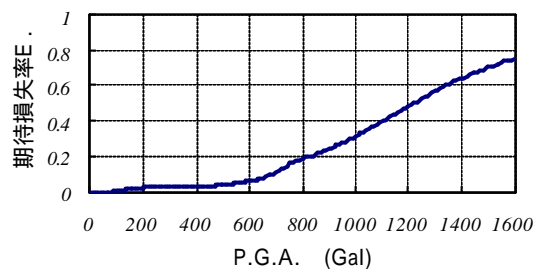


図4 Seismic Damage Function

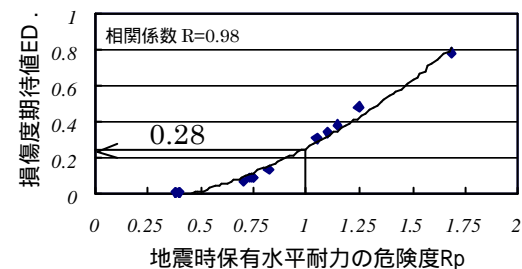


図5 地震時保有水平耐力と損傷度期待値

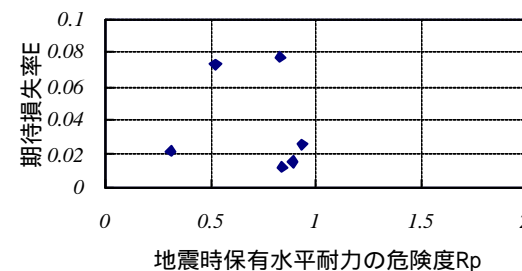


図6 地震時保有水平耐力とイベントツリー解析

表1 設計法の重要な要素

設計法	重要な要素
地震時保有水平耐力法	$P_y$ (降伏耐力), $W$ (重量)
損傷度期待値算定法	$P_a(=P_y)$ , 靱性率
イベントツリー解析	せん断耐力, 靱性率, 変位