

破壊による損失を考慮した最適耐震設計に関する研究

京都大学 正員 山田善一

京都大学 正員 古川浩平

広島県 正員 福原真嗣

1. まえがき

本論文では、地震外力をうける吊橋タワーピア系の将来の破壊による損失を考慮した最適設計を行なった。従来の最適設計においては、地震に対する信頼性レベルの最適な設定が、十分なされているとは言えないので、ここでは、破壊率を仮定し、損失の期待値として修理費のみに着目したタワーピア系の最小重量設計を行ない、地震による損失が、タワーピア系の初期建設費に与える影響を考察し、破壊率を用いた最適化のプロセスが、最適な信頼性レベルの設定に有効かどうか検討した。

2. 損失を考慮した目的関数の設定

構造物の破壊の損失を考えた費用の期待値は、

$$X = M + F$$

(1)

M : 初期建設費 F : 破壊による損失
と表せる。いま、破壊時の修理費と再建設費の比を破壊率(Damage Ratio)と定義すれば、 F は、破壊率の期待値と再建設費の積で表せる。この破壊率を、構造物の最大応答値入の関数としてFig.1のように仮定する。すなわち、

$$D_r(\lambda) = \begin{cases} 0 & (\lambda < Y_d) \\ \left(\frac{\lambda - Y_d}{C - Y_d} \right)^v & (Y_d \leq \lambda < C) \\ 1 & (\lambda \geq C) \end{cases} \quad \begin{array}{l} Y_d: \text{許容限界値} \\ C: \text{崩壊限界値} \\ v: \text{構造物の強度特性による定数} \end{array} \quad (2)$$

構造物の最大応答値の確率分布 $F(y)$ は、応答値の初期超過の問題から推定できるから、破壊率の期待値は、

$$\bar{D}_r(\lambda) = \int_{Y_d}^C \left(\frac{\lambda - Y_d}{C - Y_d} \right)^v \frac{d}{dy} F(y) dy + \int_C^{\infty} \frac{d}{dy} F(y) dy \quad (3)$$

一方、Fig.2のタワーピア系の運動方程式は、

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = -[\tilde{M}]\ddot{Z}_0 \quad (4)$$

過去の地震記録から母集団の統計的特性を推定して得た地震動モデルを入力し、モーダルアナリシスにより、構造物の応答変位、応答も速度の統計量として σ_x , $\sigma_{\dot{x}}$ が求まる。そして、最大応答値の限界値 y の初期超過がポアソン過程に従うとすれば、初期超過確率は、

$$F_e(y) = 1 - \exp \left\{ -\frac{T}{\pi \sigma_x} \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_x^2} \right) \right\} \quad (5)$$

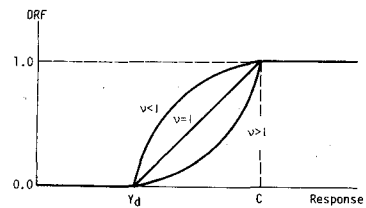


Fig.1 Damage Ratio Function

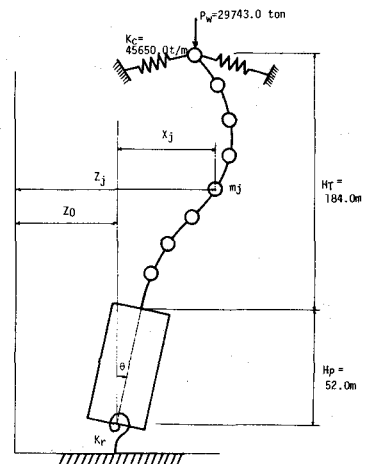


Fig.2 Structural Model

と表される。タワー-ピア系を *weakest-link-type* システムと考えれば、構造物全体では、

$$F(y) = \sum F_e(y) \quad (6)$$

式(6)で、 y を変数とみなせば、最大応答値の確率分布を与えるから、結局、目的関数は、

$$X = M + C_{rep} \left\{ \int_{y_d}^c \left(\frac{\lambda - y_d}{c - y_d} \right)^{\nu} \frac{d}{dy} F(y) dy + \int_c^{\infty} \frac{d}{dy} F(y) dy \right\} \quad C_{rep}: \text{再建設費} \quad (7)$$

と表される。式(6)の最小化を行なえば、破壊率の最適値を算定できる。

3. 数値計算例

設計変数として、タワー断面二次モーメントおよび、ピア橋軸方向幅を選び、タワー重量とピア換算重量の和を初期建設費とした。破壊モードとしては、タワー-8質点とタワー最下点の繰応力およびピア変位を考え、前者の y_d , C 値は、それぞれ、26,000 (kg), 46,000 (kg) とした。ピア変位の限界値の設定は困難でしか、その破壊率が全体の破壊率に占める割合が大きいの重要であるが、 y_d 値は 0.042 m, C 値は y_d 値の 1.8 倍とした。入力地震波の最大加速度は 180 gal, 定常部の継続時間を 16.0 秒とした。これらの値は、本田連絡橋の設計基準をもとにした。また、破壊率関数の ν の値は 2 とした。以上を用いて、タワー-座底、ピア転倒を制約条件として、SUMT 法により最適化を行なった。Fig.3 および Fig.4 は、損失率をパラメータとして、破壊率の変化を示したものであるが、入力地震波による差異は、ほとんどなく、損失率の増加に従い、破壊率は順次減少している。Fig.5, Fig.6 は、損失率をパラメータとして、目的関数および損失率と破壊率の積を示したものである。目的関数の値は損失率に応じて増加しているが、損失率と破壊率の積は 6~10% で、一定値に近い。したがって、損失率に応じて、信頼性レベルとしての破壊率の最適な設定が可能である。

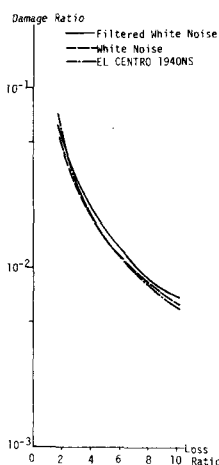


Fig. 3 Damage Ratio ($ES=100000(t/m^2)$, $C/Y_d=1.8$)

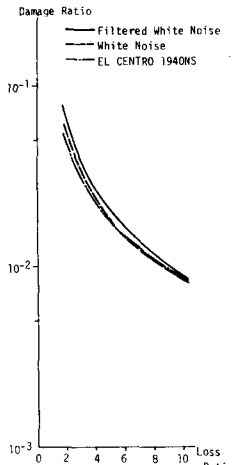


Fig. 4 Damage Ratio ($ES=300000(t/m^2)$, $C/Y_d=1.8$)

$$\text{Loss Ratio} = \frac{\text{Replacement Cost}}{\text{Construction Cost}}$$

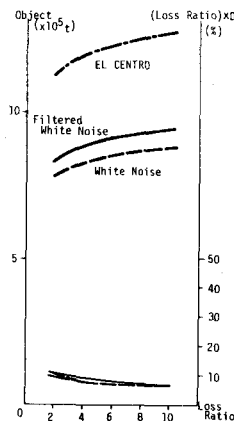


Fig. 5 Object and (Loss Ratio) x Dr ($ES=100000(t/m^2)$, $C/Y_d=1.8$)

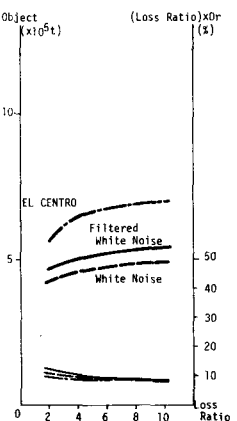


Fig. 6 Object and (Loss Ratio) x Dr ($ES=300000(t/m^2)$, $C/Y_d=1.8$)

References

- 1) Vanmarcke, E., C.A. Cornell, R.V. Whitman and J.W. Reed, 1973, "Methodology for Optimum Seismic Design", Proc. 5th World Conference on Earthquake Engineering
- 2) 山田善一・古川浩平 "長大ブリッジタワー-ピア系の耐震設計における最適化手法の応用" Proceedings of The 5th Japan Earthquake Engineering Symposium-1978 pp1233-1240