

多段階補強水準を選択できる耐震対策と復旧対策の最適組み合わせ

武蔵工業大学 学生会員 青木 勇

正会員 小池 武

1. はじめに

耐震投資を考えたとき、どのような耐震対策と復旧対策の組み合わせが最も合理的かを明確化するため、本研究では対象とする構造物、耐震対策と地震被害パターン、復旧対策パターンを想定し、損失の期待値が最小となるパターンはどれであるかを比較・検討する。

2. 構造物の震後残存強度

(1) 対象構造物

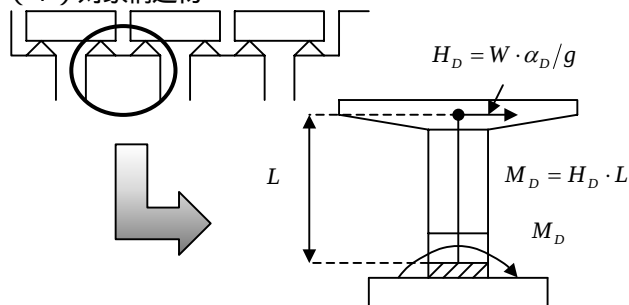


図-1 対象構造物

対象構造物：橋梁下部

初期強度： R_0 初期荷重： S_0

経年劣化パラメーター： $f(T)$

地震損傷度パラメーター： $\psi(\alpha)$ (α は加速度)

時刻 T での強度（地震非経験）： $R(T) = f(T) \cdot R_0$

時刻 T での震後強度： $R(T|\alpha) = \psi(\alpha) \cdot R(T)$

(2) 初期強度： R_0

図-1より設計限界応力を、設計加速度 α_D のときとし、
 $\sigma_D = M_D / I_D \cdot W / 2 \dots (1)$ 初期強度はひずみである
 と考え、 $R_0 = \varepsilon_D = M_D / EI_D \cdot W / 2 \dots (2)$ また、 S_0
 については、加速度 α のときとし、 R_0 と同様にひずみであ
 ると考え、 $S_0 = \varepsilon = M / EI_D \cdot W / 2 \dots (3)$

(3) 経年劣化パラメーター： $f(T)$

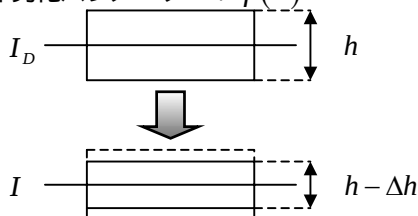


図-2 経年劣化による橋脚の変化

図-2より、 $I/I_D = f(T) \dots (4)$

(4) 地震損傷度パラメーター： $\psi(\alpha)$

過去の地震データを用いて、非線形1自由度のバイリニア地震応答解析を行った。得られた履歴曲線から、平均剛性勾配 E と初期剛性勾配 E_0 を読み取り、その比 E/E_0 を縦軸に、

個々の地震データの最大加速度を横軸にプロットしたものを劣化特性曲線とし図-3に示す。

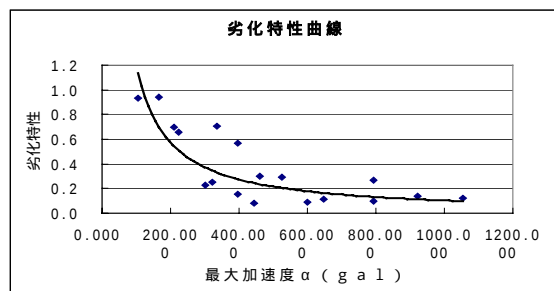


図-3 劣化特性曲線

図-3中の計測点を回帰分析し次式を得る。

$$E[\psi(\alpha)] = 163.15\alpha^{-1.0668} \dots (5)$$

$$COV[\psi(\alpha)] = 0.307 \dots (6)$$

(5) 破壊確率の算定

本研究では、破壊確率を図-4より以下のように考える。

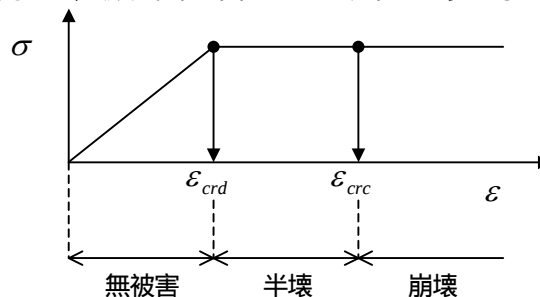


図-4 ひずみの関係

無被害時 ($1 - pf_d - pf_c$): $pf = P[\varepsilon < \varepsilon_{crd}]$

半壊時 (pf_d): $pf_d = P[\varepsilon_{crd} < \varepsilon < \varepsilon_{crc}]$

崩壊時 (pf_c): $pf_c = P[\varepsilon_{crc} < \varepsilon]$

破壊確率は次式から求まる。

$$pf = P[\psi(\alpha) \cdot \varepsilon_D \leq \varepsilon] = \Phi \left[- \frac{E[\psi(\alpha) \cdot \varepsilon_D] - E[\varepsilon]}{\sqrt{(\mu_{\varepsilon_D} \cdot \mu_{\psi(\alpha)})^2 \cdot (\delta_{\psi(\alpha)}^2 + \delta_{\varepsilon_D}^2) + \sigma_{\varepsilon}^2}} \right] \dots (7)$$

(6) 地震発生確率を考慮した、破壊確率 $P_i(T)$ の算定

a) 崩壊時

$P_2^c(T_{MAX}) = P$ [供用期間 T_{MAX} の間に、少なくとも1回レベル2地震動が発生し、その時構造物が損傷 k を起こす確率]

$$P_2^c(T_{MAX}) = P[major \cdot damage \cdot k | EQ_2] \cdot P[EQ_2] \dots (8)$$

$$= \int_{\alpha_{2min}}^{\infty} P[\varepsilon > \varepsilon_{crc} | \alpha] \cdot f_{A_2}[\alpha; T_{MAX}] d\alpha$$

b) 半壊時

$$P_2^d(T_{MAX}) = \int_{\alpha_{2min}}^{\infty} P[\varepsilon_{crd} < \varepsilon < \varepsilon_{crc} | \alpha] \cdot f_{A_2}[\alpha; T_{MAX}] d\alpha$$

・・・(9) ここで、議論を簡便にするために地震動の大きさを α_2 に固定する。

3. 地震リスク評価

(1) 評価方法

期待損失額 V は、耐震性能 S に関する条件付き破壊確率 $P_i(T|S)$ を用い、耐震対策費 C_0^* と地震時損害額 C_I 、補強対策費 C_H の期待値の和として次式により求められる。ここで、耐震性能 S は耐震化メニューを選択することで所要の耐震性能を確保することができるものとする。

$$V = C_0^* + P_i(T|S) \cdot (C_I + C_H) \cdots (10)$$

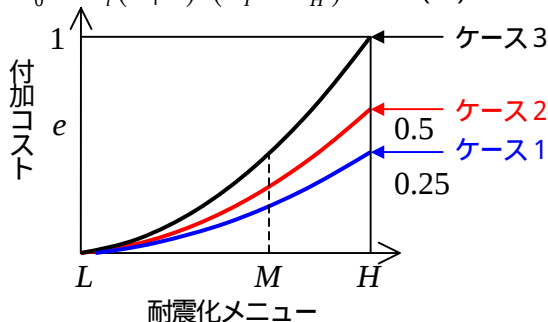


図-5 付加コスト

図-5より、 $C_0^* = C_0 \cdot (1+e) \cdots (11)$ とする。

(2) 耐震対策費 C_0^* の考え方

耐震化メニュー S を以下の3パターンとした。

$$H : Pf \leq 10^{-6} \quad M : Pf \leq 10^{-4} \quad L : Pf \leq 10^{-2}$$

さらに、付加コスト e の値を、メニュー毎にまとめたものを表-1に示す。

表-1 耐震化メニュー

	H	M	L
ケース3	1.000	0.500	0.000
ケース2	0.500	0.250	0.000
ケース1	0.250	0.125	0.000

(3) 機能的損害額 C_I の考え方

C_I は、便益と初期建設費 C_0 が等しいと考え、表-2に示すような3パターンに分類する。

表-2 地震時損害額

破壊モード	コスト
無被害	$C_1 / C_0 = 0\%$
半壊	$C_d / C_0 = 50\%$
崩壊	$C_c / C_0 = 100\%$

(4) 復旧対策費 C_H の考え方

C_H は以下の3パターンに分類する。

パターンX： C_X ・・・地震発生後に初期強度と同じ強度を持つように復旧対策を行う。

パターンY： C_Y ・・・地震発生後に地震発生前の強度に戻す復旧対策を行う。

パターンZ： C_Z ・・・全く復旧対策を行わない。

このとき、 C_0 を初期建設費とし、 $C_X / C_0 = 60\%$ 、 $C_Y / C_0 = 30\%$ 、 $C_Z / C_0 = 0\%$ とする。

4. 数値検討事例

図-6に、実施した復旧対策別にまとめた、初期建設費 C_0 に対する、期待損失額 V の割合（ V/C_0 ）を示す。

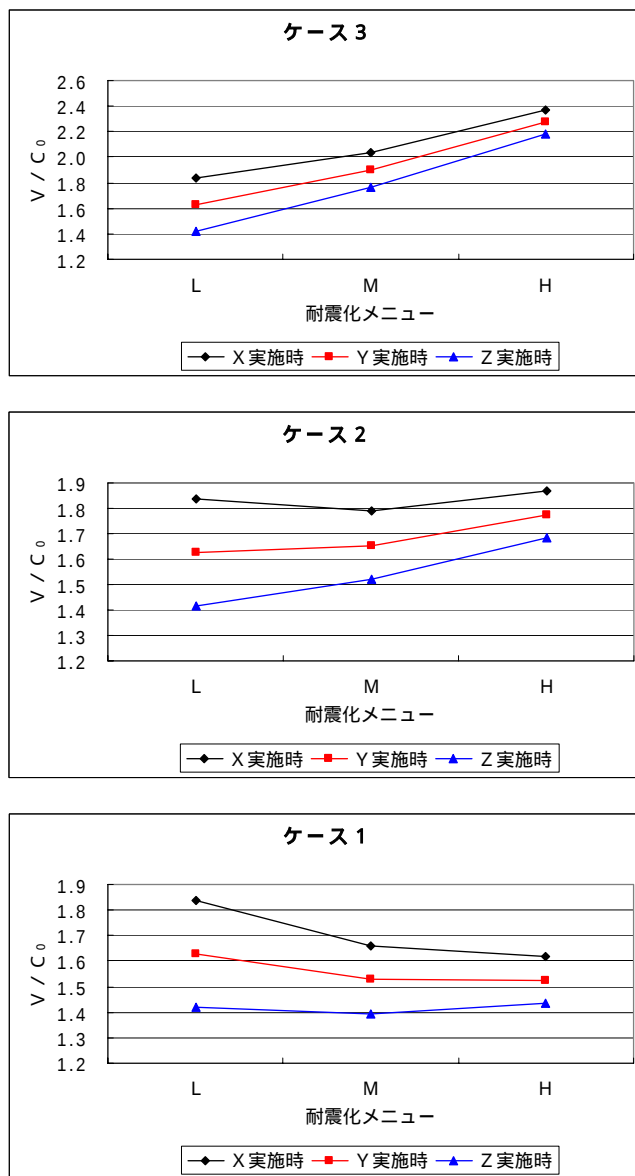


図-6 期待損失額の算定結果

5. 結論

ケース3では、どの復旧対策を実施したとしても、耐震化への投資を最小にすることが最も望ましい。ケース2では、復旧対策に十分な投資をするのであれば、耐震化には中程度の費用を投資し、復旧対策に十分な投資をしないのであれば、耐震化への投資は最小にすることが、最も望ましい組み合わせである。ケース1では、復旧対策に中程度以上の費用を投資するのであれば、耐震化には十分な投資を、復旧対策に投資しないのであれば、耐震化には中程度の投資をすることが、最も望ましい組み合わせであるといえる。

参考文献

- 1) 構造物の信頼性設計法、星谷 勝、石井 清
- 2) 基礎知識としての構造信頼性設計、長 尚、山海堂
- 3) 地震動・動的物性、技報堂出版