

# 多段階補強水準を選択できる耐震対策と地震保険の最適組み合わせ

武蔵工業大学 学生会員 青木 勇 正員 小池 武

## 1. はじめに

耐震補強対策費を決定するにあたり、どのような補強対策と地震保険の組み合わせが、経営判断として最も合理的かを明確化するために、本研究では対象とする構造物、補強対策と地震被害パターン、地震保険条件を想定し、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

対象構造物：橋梁下部 初期強度： $R_0$

経年劣化パラメーター： $f(T)$

地震損傷度パラメーター： $\psi(\alpha)$  ( $\alpha$ 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： $R_0$

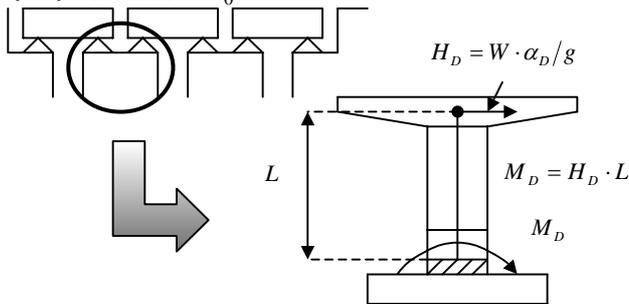


図 1

初期強度は、図 1 より設計限界応力を、設計加速度  $\alpha_D$  のときとし、 $\sigma_D = M_D / I_D \cdot W / 2$  とする。さらに、 $\varepsilon_D = M_D / EI_D \cdot W / 2$  とし、 $R_0$  はひずみであると考え、 $R_0 = \varepsilon_D$  とする。また、荷重  $S$  については、加速度  $\alpha$  のときとし、 $\varepsilon = M / EI_D \cdot W / 2$  とした。

### (3) 経年劣化パラメーター： $f(T)$

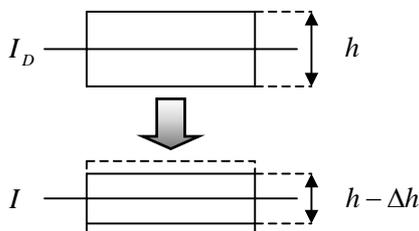


図 2

図 2 より、 $I / I_D = f(T)$  と定義する。

### (4) 地震損傷度パラメーター： $\psi(\alpha)$

キーワード 地震保険、破壊確率

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。

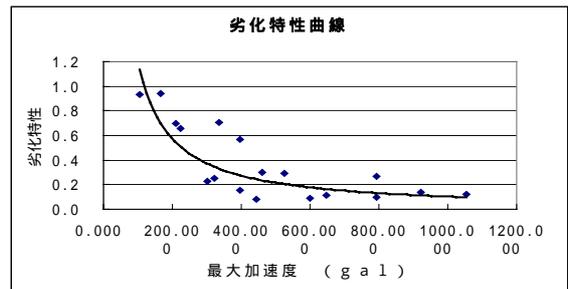


図 3

図 3 中の計測点を回帰分析すると、回帰式として次式を得る。 $E[\psi(\alpha)] = 163.15x^{-1.0668}$ 、 $Var[\psi(\alpha)] = 0.307$

### (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。

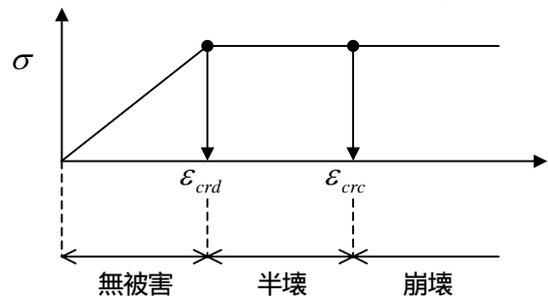


図 4

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。

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

### (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

$P_1^c(\Delta T) = P$  [ 供用期間  $\Delta T$  の間に、少なくとも 1 回レベル 1 地震動が発生したとき、構造物が損傷  $k$  を起こす確率 ]

$$P_1^c(\Delta T) = P[\text{damage} \cdot \text{state} \cdot k | EQ_1] \cdot P[EQ_1]$$

$$= P[\varepsilon > \varepsilon_{crc} | \alpha = \alpha_1] \cdot P[A_1; \Delta T]$$

$$\text{ここで、} P[A_1; \Delta T] = 1 - \exp\left[-\nu \cdot \frac{n_1}{n} \cdot \Delta T\right]$$

b) 半壊時

$$P_1^d(\Delta T) = P[\varepsilon_{crd} < \varepsilon < \varepsilon_{crc} | \alpha = \alpha_1] \cdot P[A_1; \Delta T]$$

### 3. 地震リスク評価

(1) コストの考え方

コストは破壊確率  $P_i(T)$  と、地震損害額  $C_i$ 、補強対策費  $C_H$  さらに、地震保険に加入したとすると、補償額  $Y_c$ 、支払う保険料  $m \cdot Y_c$  から、期待損失額を以下のように考える。  
 $C = P_i(T) \cdot (C_i + C_H - Y_c) + m \cdot Y_c$

(2) 地震時損害額  $C_i$  の考え方

$C_i$  は、初期建設費を  $C_0$  として表 1 に示すように3パターンに分類する。

表 1

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	$C_c / C_0 = 100\%$

(3) 補強対策費  $C_H$  の考え方

$C_H$  は以下の3パターンに分類する。

補強する(大):  $C_X$  地震発生後に初期強度と同じ強度を持つように補強を行った場合。

補強する(小):  $C_Y$  地震発生後に地震発生前の強度に戻す補強を行った場合

補強しない:  $C_Z$  全く補強を行わない。

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) 地震保険条件の算定

本研究では、崩壊時に支払われる補償額  $Y_c$  に対し、半壊時  $Y_d$ 、無被害時  $Y_1$  の補償額を以下のように定義する。  
 $Y_{lord} = \gamma \cdot Y_c$  (無被害時  $\gamma = 0$ 、半壊時  $\gamma = 0.5$ ) 地震リスクに対する地震保険条件の算出は、崩壊時のみ考えていく。また、実施した補強対策により、保険料の割引が適用されるものとした。

表 2

補強対策	割引率
$C_X$	0.8
$C_Y$	1.0
$C_Z$	1.2

$C_c$  : 事故が起こった場合の損失額

$pf_c$  : 事故の起こる確率

$m$  : 保険料率 (補償額 1 円に対する保険料)

$Y_c$  : 補償額 (ここで、 $0 < Y_c < C_c$ )

$\alpha$  : 保険会社経費 ( $\alpha = \alpha' \cdot Y_c$ ) ここで、保険者の立場

から、重味関数  $U_i = \left(1 - \frac{y_i}{C_i}\right)^n$  を用いて、 $Y_c$  と  $m$  の関係を、

$$\left\{ C_c + \left\{ \frac{pf_c}{1 - pf_c} \cdot \frac{1 - m}{m} \right\}^{n-1} - 1 \right\} \cdot \alpha \left/ \left\{ (1 - m) \cdot \left\{ \frac{pf_c}{1 - pf_c} \cdot \frac{1 - m}{m} \right\}^{n-1} + m \right\} \right. = Y_c$$

と表せる。

保険会社の立場からは、必要保険料率  $m_{opt} = pf_c + \beta$  となる。よって、

$$\frac{1}{(1 - m_{opt}) \cdot \left\{ \frac{pf_c}{1 - pf_c} \cdot \frac{1 - m_{opt}}{m_{opt}} \right\}^{n-1} + m_{opt} - \left\{ \frac{pf_c}{1 - pf_c} \cdot \frac{1 - m_{opt}}{m_{opt}} \right\}^{n-1} - 1} \cdot \alpha' = \frac{Y_c}{C_c}$$

### 4. 数値検討事例

算定結果は、 $C/C_0$  によって表した。

地震発生時刻は25年目、50年目、75年目とした。

#### レベル1地震動1回(25年目)発生

パターンX実施	0.0314
パターンY実施	0.0253
パターンZ実施	0.0192

#### レベル1地震動2回(25、50年目)発生

パターンX実施(2回)	0.0411
パターンY実施(2回)	0.0398
パターンZ実施(2回)	0.0409

#### レベル1地震動3回(25、50、75年目)発生

パターンX実施(3回)	0.0444
パターンY実施(3回)	0.0488
パターンZ実施(3回)	0.0546

### 5. 結論

数値検討事例の結果から、1回だけ発生するパターンでは、補強対策パターンZ実施時のコストが最小となった。これは、破壊確率が同じであるため、補強対策費がそのまま反映されたからである。しかし、2回、3回発生するパターンでは、実施する補強対策により破壊確率に差が生じるため、それぞれ、2回発生するパターンでは補強対策パターンY、3回発生するパターンでは補強対策パターンX実施時のコストが最小となった。よって、本研究での仮定の下では、これらが最適な補強対策と地震保険の組み合わせであるといえる。