

# 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

学生氏名 大井 幸太  
指導教員 吉川 弘道

本稿では、数ある地震防災対策案より鉄筋コンクリート単柱式橋脚のリスクマネジャーが最適対策案を選定する、その選定法を提案した。本選定法は「地震危険度解析-期待損失額の算定-費用便益分析」の3段階を経て客観的/主観的純現在価値を算定する。ただし、本稿では客観的/主観的純現在価値が最多な対策案を最適対策案と定義した。保険管理を中核とする保険管理型リスクマネジメントは「確認-評価-処理」の3段階を経て実践される。リスク処理手段には回避、軽減、保有、転嫁があり、これらを組合せて最小の費用で管理対象リスクの不利益な影響を最小化する。本稿では、地震を管理対象リスクとし、そのリスクを被害事例データとイベントツリー解析より定量評価した。また、地震防災対策案は耐震補強工事と損害保険を組合せて作成した。

**Key Words** : reinforced concrete pier, risk management, seismic reinforcement work, damage insurance net present value

## 1. はじめに

我が国の経済は、設備投資と個人消費を両輪とする民間需要に牽引され、1986年11月を景気の「谷」として大型景気「平成景気」を迎えた。しかし、1991年2月に景気の「山」を迎えて景気は後退局面に入り、後に不況(呼称:平成不況)を迎える。上記の経済情勢を受けて日本経済は1990年代に入り税収が伸び悩む一方で政府の度重なる経済対策により国及び地方政府の長期債務残高は675兆円(2001年度末時点)に達した。これは名目国内総生産(gross domestic product, 略称:GDP)の約1.4倍に相当し、我が国の財政状況は非常に厳しいと云える。これら経済情勢の変化により国及び民間企業は今後、最少費用(minimum cost)で最大効果(maximum effect)が期待されるプロジェクトへ優先投資すると考えられる。一方、不確実な将来に対する投資は多種多様なリスクを有する故、民間企業は投資に慎重な姿勢を見せるとも考えられる。そこで「危機的状況の生起以前に管理対象リスクの処理手段を検討・実行」するリスクマネジメント(risk management)が注目され始めた。

リスクマネジメントは、1930年代の米国で付保可能な純粹リスク(pure risk)を対象に登場して1960年代以降に経済の発展と企業経営の環境変化より急速に発達、1970年代に保険外管理を含めて体系化され、リスク全般を取り扱う管理手法として確立された<sup>1)</sup>。

本稿では、数ある地震防災対策案より鉄筋コンクリート(reinforced concrete, 略称:RC)単柱式橋脚のリスクマネジャー(risk manager)が最適対策案を選定する、その選定法を提案する。本選定法は、費用便益分析(cost benefit analysis 略称:CBA)より客観的/主観的純現在価値(objective/subjective net present value, 略称:ONPV/SNPV)を算定、対策案の経済性を貨幣価値で評価する。SNPVはONPVにリスクマネジャーの認知特性を加味した指標である。対策案はリスクを軽減する耐震補強工事(seismic reinforcement work)と転嫁する損害保険(damage insurance)を組合せて作成する。

## 2. 信頼性理論に基づく地震リスク評価法

本稿では被害事例データ、イベントツリー解析(event tree analysis, 略称:ETA)による2種類のリスク評価法(risk assessment)を使い分ける。その評価結果は地震損失関数(seismic damage function, 略称:SDF)で表現する。

### (1) 被害事例データによる地震リスク評価法

本節では、静間らの知見<sup>2)</sup>を踏襲し、RC単柱式橋脚に関する数百の被害事例データより当該橋脚の平均的な地震リスク(seismic risk)を評価する。以下には、被害状況が下記5段階で区分された被害事例データを掲載

する統計資料に基づく地震リスク評価法を記す(Fig.1).  
**As:**落橋, **A:**大被害, **B:**中被害, **C:**小被害, **D:**無被害  
 被害事例データより基盤面最大加速度(peak baserock acceleration, 略称:P.B.A.) $\alpha_i$ Gal と P.B.A. $\alpha_i$ Gal に対する被害状況を読み取り, 被害状況の定義より各状況における損失率  $x_{As}, x_A, x_B, x_C, x_D$  を推定する. ただし, 損失率  $x$  は損失額  $X$  を RC 単柱式橋脚の再調達価額  $C_{R.V.}$  で除して算出される. 以上より, リスク評価に用いるサンプル( $\alpha_i, x_j$ )( $j=As, A, B, C, D$ )が得られる. RC 単柱式橋脚の耐震性能(seismic performance)は個々別々で,  $x_j(\alpha_i)$ はバラツキを有する. 本稿では, SDF が上・下限値を有する点を考慮し, バラツキを $\beta$ 分布(beta distribution)で近似する.  $\beta$ 分布の確率密度関数は次式で定義される.

$$f(x; q, r | \alpha_i) = \frac{1}{B(q, r)} \frac{(x-a)^{q-1} (b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}} \quad (1)$$

$q, r$ : 分布パラメータ,  $B()$ :  $\beta$ 関数(beta function),  $a, b$ : 分布の下・上限値である.  $q, r$  値には Eq.(2)で表す尤度関数の値を最大とする最尤推定量を用いる.

$$L(x_{j,1}, \dots, x_{j,N}; q, r | \alpha_i) = \prod_{n=1}^N f(x_{j,n}; q, r | \alpha_i) \quad (2)$$

$N$  は P.B.A. $\alpha_i$ Gal に対するサンプル総数である. 以上より, P.B.A. $\alpha_i$ Gal に対する $\beta$ 分布の期待値  $E[x]$ と分散値  $Var[x]$ を次式から算出して  $x_{NEL}$  や  $x_{PML}$  を推定する.

$$E[x; q, r | \alpha_i] = a + \frac{q}{q+r} (b-a) \quad (3-1)$$

$$Var[x; q, r | \alpha_i] = \frac{qr}{(q+r)^2 (q+r+1)} (b-a)^2 \quad (3-2)$$

本稿では NEL(normal expected loss)を損失率の期待値(50%非超過確率値) $x_{NEL}$ , PML(probable maximum loss)を損失率の90%非超過確率値  $x_{PML}$  と定義・表記する.

本稿では RC 単柱式橋脚の SDF に上・下限値が設定可能な一価関数である次式の logistic 曲線を適用する.

$$x(\alpha; c) = \frac{b}{1 - \left(1 - \frac{b}{a}\right) e^{-c\alpha}} \quad (a > 0) \quad (4)$$

$c$  は曲線の形状を決定する係数であり, P.B.A. $\alpha_i$ Gal に対するサンプル  $x_{NEL}, x_{PML}$  等を用いて非線形回帰分析(nonlinear regression analysis)より推定する. 以上より, RC 単柱式橋脚の地震リスクが評価される.

(2) イベントツリー解析による地震リスク評価法

本節では, 大井らの知見<sup>3)</sup>を踏襲し, RC 単柱式橋脚の地震リスクを当該橋脚の特性値(characteristic value)および各種変動係数より個別評価する. その地震リスク評価法に用いるイベントツリー(event tree)を Fig.2 に

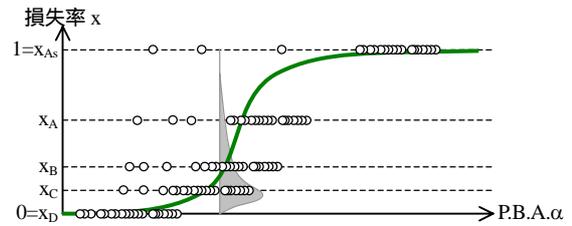


Fig.1 SDF 推定法 の概念図

Table 1 損傷レベルと Performance Level の関係<sup>3)4)5)</sup>

損傷レベル	Performance Level	損失率
1	Fully Operational	$x_1, x_5, x_8$
2	Operational	$x_2, x_6$
3	Life Safe	$x_3$
4	Near Collapse	$x_4$
5		$x_7$
6		$x_9$

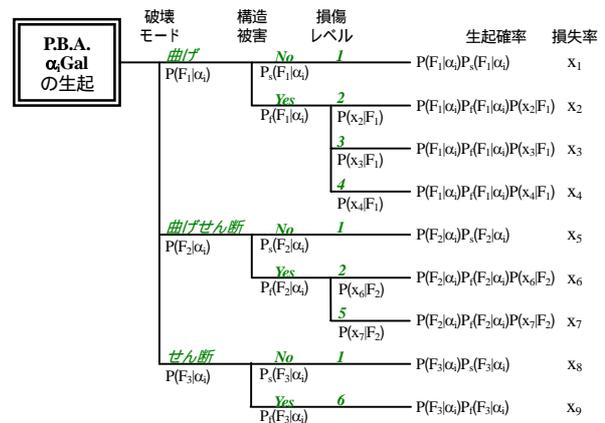


Fig.2 本稿におけるイベントツリー<sup>3)</sup>

示す. P.B.A. $\alpha_i$ 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(略称:曲げせん断破壊), せん断破壊の3事象, 構造被害は2事象, 損傷レベル<sup>4)</sup>は Table 1 に示す6事象を設定する<sup>3)</sup>. 損傷レベル1は, RC 単柱式橋脚の地震時挙動が弾性範囲内であり, 構造被害が生起しない損失率  $x_1=x_5=x_8=0$  の場合を想定する. 最終帰結(end branch)は9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 RC 単柱式橋脚の特性値より信頼性理論に基づいて算出する(Fig.3)<sup>3)</sup>. 本評価法で地震リスクの評価に用いる性能関数(performance function)は次式で定義する.

$$\text{破壊モード: } Z = V_y / V_{mu} \quad (5-1)$$

$$\text{構造被害, 損傷レベル: } Z_K = \delta_R / \delta_K \quad (5-2)$$

$V_y$ : 繰返し荷重作用に起因するせん断耐力劣化を考慮したせん断耐力,  $V_{mu}$ : 曲げ耐力,  $\delta_R$ : 繰返し荷重作用に起因する応答変位量,  $\delta_K$ : 限界状態 K の変位量であり,  $V_y, \delta_R$  は P.B.A. $\alpha_i$ Gal に従属する変数である. これら4つのパラメータは算出誤差を有する為に確率変数となり, 本評価法では対数正規分布に従うと仮定する. 各パラメータの期待値  $E[]$ と変動係数 $v$ を  $V_y=(E[V_y], v_{V_y})$ ,

$V_{mu}=(E[V_{mu}],v_{Vmu}), \delta_R=(E[\delta_R],v_R), \delta_K=(E[\delta_K],v_K)$ とする。  
 また、限界状態  $K$  は 3 つの限界状態  $Y$ :軸方向鉄筋降伏,  $M$ :最大荷重程度の維持,  $N$ :降伏荷重の維持を想定する。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 3) に基づき算出し、最終帰結の生起確率は Fig.2 に示す式で算出する。

RC 単柱式橋脚の期待損失率は、任意の P.B.A. $\alpha_i$ Gal に対して次式より算出される。

$$E[x|\alpha_i] = P(F_1|\alpha_i) \left[ P_s(F_1|\alpha_i)x_1 + P_f(F_1|\alpha_i) \sum_{k=2}^4 P(x_k|F_1)x_k \right] + P(F_2|\alpha_i) \left[ P_s(F_2|\alpha_i)x_5 + P_f(F_2|\alpha_i) \sum_{k=6}^7 P(x_k|F_2)x_k \right] + P(F_3|\alpha_i) \left[ P_s(F_3|\alpha_i)x_8 + P_f(F_3|\alpha_i)x_9 \right] \quad (6)$$

予想し得る全ての P.B.A. $\alpha_i$ Gal に対して期待損失率を算出し、RC 単柱式橋脚の地震リスクが評価される。

### 3. 損害保険 CBA 法の提案

本章で提案する「損害保険を活用した地震防災対策案の費用便益分析法(略称: 損害保険 CBA 法)」は、信頼性理論を導入し、リスクマネジャーが損害保険商品を購入するか否か意思決定する際の判断指標となり得る ONPV/SNPV の算定を最終帰結とする。ONPV/SNPV は保険経済学の玄人、素人に関係なくリスクマネジャーが損害保険の経済性を理解し易い指標と考える。

#### (1) 損害保険 CBA 法の手順

損害保険 CBA 法は 3 段階で構成される (Fig.4)。

**Phase** では、地震危険度解析(seismic risk analysis, 略称: SRA)より対象(建設)地点における地震動特性(ある地震動強度の超過確率)を地震ハザード曲線(seismic hazard curve)で表現し、これを地震生起確率密度曲線(seismic probability density curve)へ変換する。**Phase** では、被害事例や ETA 等を用いて保険者、被保険者、保険未加入者の地震リスクを算出、算出結果は SDF で表現される。算出に際しては、星谷・中村・望月らの知見 6) 7) 8) を踏襲し、保険契約に起因する損失の層分化と地震生起確率認知関数、損失額認知関数が加味される。これらの結果を受け、地震動の地域特性を反映した地震生起確率密度と RC 単柱式橋脚の耐震性能を反映する地震リスクを相乗・積分して主体者別に期待損失額を算定する。主体者とは保険者と被保険者、保険未加入者の総称である。**Phase** では、期待損失額の算定値を用い、CBA より ONPV/SNPV を算定する。

#### (2) 損害保険料の概念と算定<sup>9)</sup>

損害保険における営業保険料の算定法は、大数法則・

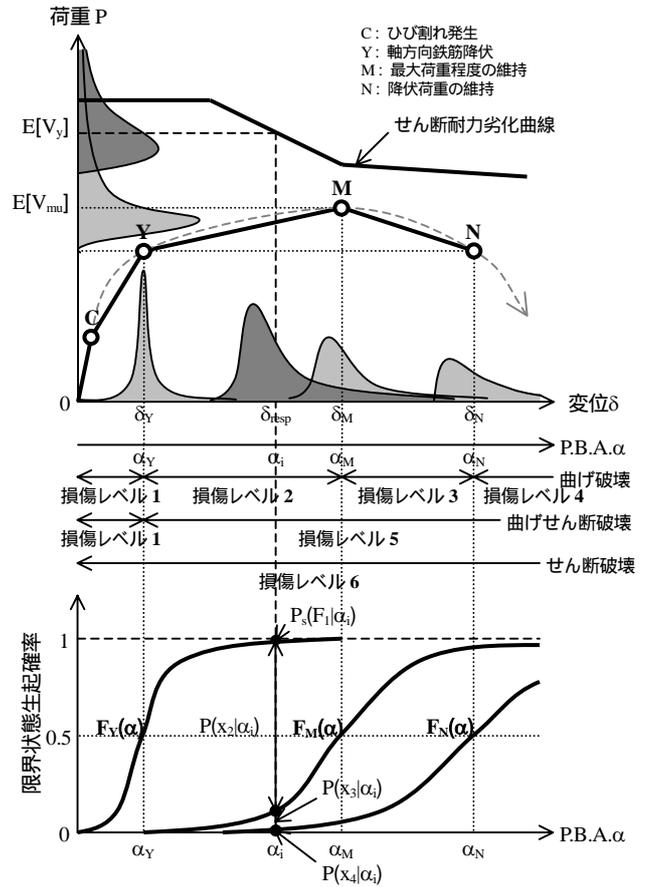


Fig.3 破壊モード、構造被害、損傷レベル生起確率算出法の概念図<sup>3)</sup>

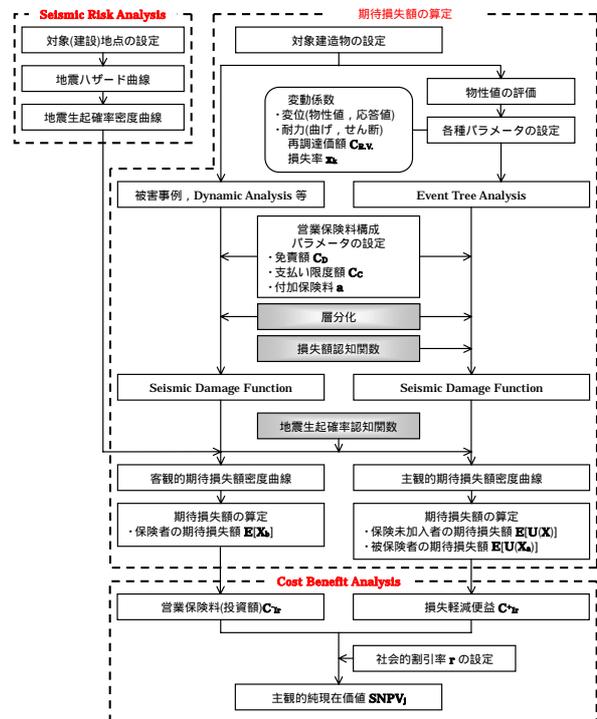


Fig.4 損害保険 CBA 法の手順

中心極限定理を根拠とする。ただし、営業保険料(traffic premium)  $C_{tr}$  は将来の保険金支払に充当されるべき純保険料(net premium)と保険者の事業費等に充当される付加保険料(extra premium)  $a$  を加算して決定する。保険

者は、管理対象リスクを選定して同質の生起確率を有する保険契約者を大量に集め、純保険料に相当する期待損失額  $E[X_b]$  の確率密度関数を推定する。管理対象リスクを地震とした場合、 $C_{lr}$  は次式より算定される。

$$C_{lr} = E[X_b] + a \quad (7-1)$$

$$E[X_b] = \int_0^{\infty} p_1(\alpha) X_b(\alpha) d\alpha \quad (7-2)$$

$p_1$ : 地震の年生起確率密度,  $X_b$ : 保険者の損失額である。

$C_{lr}$  の算定では、層分化と呼ばれる保険契約者の損失額  $X$  を保険者と被保険者に分化する働きが重要となる。本稿では、損害保険の免責額  $C_D$  と支払い限度額  $C_C$  を基づき、Fig.5 の通りに層分化を行う。 $X$  が免責領域  $0 < X < C_D$  である場合、被保険者自らが全損失額を負い、 $X_a = X, X_b = 0$  となる。 $X_a$  は被保険者の損失額である。 $X$  が  $C_D < X < C_D + C_C$  である場合、保険者が  $X$  と  $C_D$  の差額を保険金額として被保険者へ支払い、 $X_a = C_D, X_b = X - C_D$  となる。さらに、 $X$  が  $X > C_D + C_C$  である場合、被保険者へ支払われる保険金額が  $C_C$  に達し  $X_a = X - C_C, X_b = C_C$  となる。ただし、上記3つの全領域で次式が成立する。

$$X_a + X_b = X \quad (8)$$

(3) 主体者別の地震リスク評価法

保険者が定める純保険料  $E[X_b]$  は RC 単柱式橋脚の平均的な損失額として算定される。しかし、当該橋脚の耐震性能は個々別々であり、被保険者が保険加入後に得られる効果も個々別々である。それ故、本提案法では主体者に応じて異なる地震リスク評価法を用いる。

a) 保険者の地震リスク評価法

保険者が有する地震リスクは大数法則が貫徹するに十分な被害事例データより評価する<sup>10)</sup>。評価法の大筋は第2章1節で記した「被害事例データによる地震リスク評価法」に準じる。唯一異なる点は、被害状況に応じて損失率  $x_{As}, x_A, x_B, x_C, x_D$  を推定した後、それらを Fig.5 に従い層分化するか否かである(Fig.6)。以上より、リスク評価に用いるサンプル  $(\alpha_i, x_j')$  ( $j = As, A, B, C, D$ ) が得られる。本稿では層分化後の損失率を  $x'$  と表記する。

保険者の SDF は次式の logistic 曲線より推定される。

$$x_b'(\alpha; c) = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{a} \frac{C_C}{C_{R.V.}}\right) e^{-\alpha}} \frac{C_C}{C_{R.V.}} \quad (a > 0) \quad (9)$$

Eq.9 は Eq.4 と比較して上限値  $b$  が支払い限度となる。ただし、支払い限度は  $C_C$  を  $C_{R.V.}$  で除して算出される。以上より、保険者の地震リスクが評価される。

b) 被保険者の地震リスク評価法

被保険者が有する地震リスクは RC 単柱式橋脚の特性値及び各種変動係数より評価する。評価法の大筋は

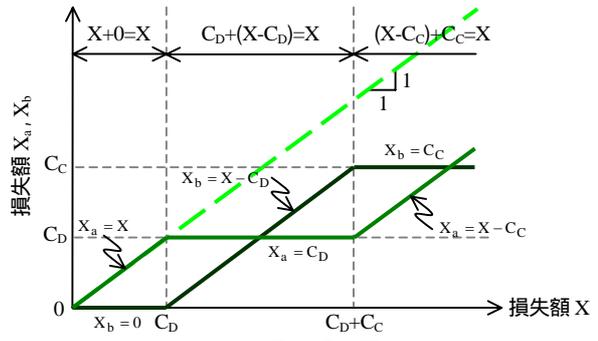


Fig.5 損失額の層分化

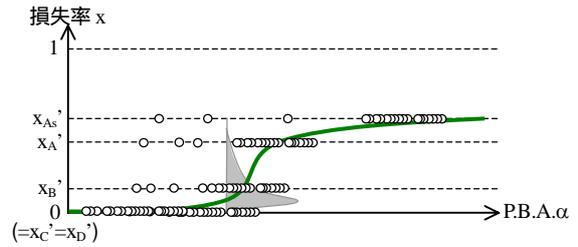


Fig.6 SDF 推定法の概念図

第2章2節で記した「イベントツリー解析による地震リスク評価法」に準じる。唯一異なる点は Fig.2 の損失率  $x_k$  を Fig.5 に従い層分化するか否かである。 $x_k$  の添字  $k$  は Fig.2 の最終帰結番号(上から順に 1, ..., 9)である。

損失額認知関数  $U(X)$  を加味した被保険者の期待損失率は任意の P.B.A.  $\alpha_i$  Gal に対して次式で算出される。

$$E[U(x_k') | \alpha_i] = P(F_1 | \alpha_i) \left[ P_s(F_1 | \alpha_i) U(x_1') + P_f(F_1 | \alpha_i) \sum_{k=2}^4 P(x_k | F_1) U(x_k') \right] + P(F_2 | \alpha_i) \left[ P_s(F_2 | \alpha_i) U(x_5') + P_f(F_2 | \alpha_i) \sum_{k=6}^7 P(x_k | F_2) U(x_k') \right] + P(F_3 | \alpha_i) \left[ P_s(F_3 | \alpha_i) U(x_8') + P_f(F_3 | \alpha_i) U(x_9') \right] \quad (10)$$

$x_k': x_k$  を層分化した後の損失率(Fig.5),  $U(x_k'): x_k'$  に  $U(X)$  を加味した損失率である。ただし、ONPV の算定では  $U(X)$  を加味せずに期待損失率を算出する。予想し得る全ての P.B.A.  $\alpha_i$  Gal に対して期待損失率を算出し、被保険者の地震リスクが評価される。

c) 保険未加入者の地震リスク評価法

保険未加入者の地震リスク評価法は、期待損失率の算出時に層分化しない点以外、被保険者の地震リスク評価法と同様である。保険未加入者の期待損失率は任意の P.B.A.  $\alpha_i$  Gal に対して次式より算出される。

$$E[U(x) | \alpha_i] = P(F_1 | \alpha_i) \left[ P_s(F_1 | \alpha_i) U(x_1) + P_f(F_1 | \alpha_i) \sum_{k=2}^4 P(x_k | F_1) U(x_k) \right] + P(F_2 | \alpha_i) \left[ P_s(F_2 | \alpha_i) U(x_5) + P_f(F_2 | \alpha_i) \sum_{k=6}^7 P(x_k | F_2) U(x_k) \right] + P(F_3 | \alpha_i) \left[ P_s(F_3 | \alpha_i) U(x_8) + P_f(F_3 | \alpha_i) U(x_9) \right] \quad (11)$$

(4) ONPV と SNPV の定義

損害保険 CBA 法では、前節に評価法を記した主体者別の期待損失額を用い、CBA より 2 種類の純現在価

値を算定する．本提案法より算定される地震防災対策案 No.i の経済性指標 ONPV<sub>i</sub> は次式で定義する．

$$ONPV_i = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} (E[X_t] - E[X_a]_t) - T \times (E[X_b] + a) \quad (12)$$

Eq.(12)は被害規模と生起確率に関する認知特性を加味しない指標である．一方，上記 2 つの認知特性を加味した経済性指標 SNPV<sub>i</sub> は次式で定義する．

$$SNPV_i = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} (E[U(X)_t] - E[U(X_a)]_t) - T \times (E[X_b] + a) \quad (13)$$

U():認知関数, E[U(X)]<sub>t</sub>, E[X]<sub>t</sub>:保険未加入者(保険契約前)の t 年目期待損失額, E[U(X<sub>a</sub>)]<sub>t</sub>, E[X<sub>a</sub>]<sub>t</sub>:被保険者(保険契約後)の t 年目期待損失額, E[X<sub>b</sub>]:保険者の期待損失額, a:付加保険料, T:保険契約期間(duration of the policy), r:社会的割引率(social discount rate)である．つまり, Eq.(12),Eq.(13)共に右边第 1 項は損失軽減便益(reduced benefit of loss)C<sup>+</sup><sub>ir</sub>を, 右边第 2 項は営業保険料 C<sub>ir</sub>を表し, ONPV<sub>i</sub> 値または SNPV<sub>i</sub> 値が大きくな値を示す損害保険商品ほど経済的な商品と評価される．

一般に, 保険者は収支相等の原則と給付・反対給付均等の原則を駆使して保険サービスを生産する<sup>11)</sup>．この原則が全ての保険契約者に成立する場合, 損害保険に対する ONPV は負の値を示す．つまり, 損害保険を適用した如何なる対策案も費用に見合う効果が得られないと評価される．しかし, この原則は事後において必ずしも成立すると限らない．損害保険は将来における偶然事故の生起確率を核心としたリスク関連サービス商品であり, その事前的性格は結果として収支不均衡を齎す危険性を帯びている．RC 単柱式橋脚が保険の目的物である場合, 保険商品に対する ONPV は耐震性能の優劣次第で正の値を示す可能性を有する(Fig.7)．ここで, リスクマネジャーは契約時に被害特性等の知識やリスク選好等に関する社会的要請等を踏まえた上で商品購入の意志決定を為すと考えられる．被害規模に関する認知特性を考慮した場合は CBA より算定されるリスク軽減効果が著しく増大し, ONPV 値が負となる保険商品も SNPV は正の値を示し得る．

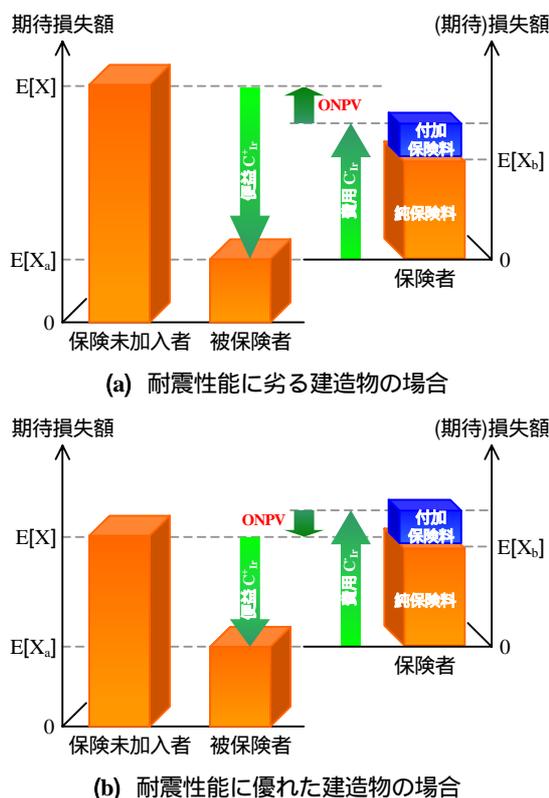


Fig.7 本章における ONPV の概念図

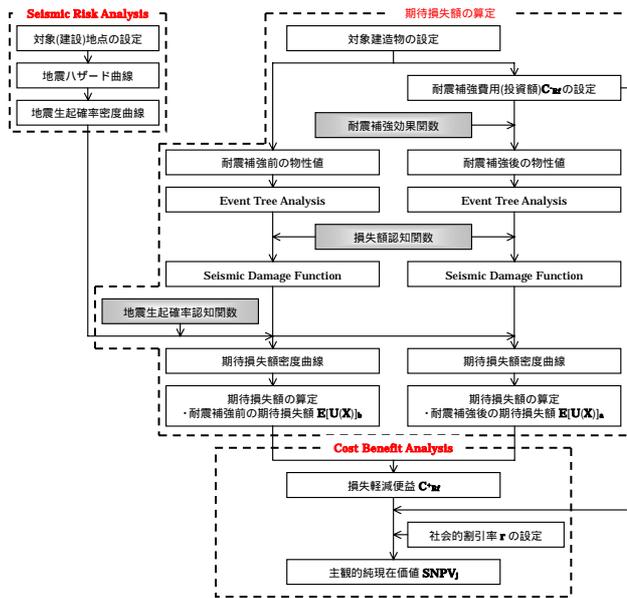


Fig.8 耐震補強工事 CBA 法の手順

#### 4. 耐震補強工事 CBA 法の提案

本章で提案する「耐震補強工事を活用した地震防災対策案の費用便益分析法(略称:耐震補強工事 CBA 法)」は, RC 単柱式橋脚のリスクマネジャーが耐震補強工事を実施するか否か, どれ程の耐震補強費用を費やすか意思決定する際の判断指標となり得る ONPV/SNPV の算定を最終帰結とする．ONPV/SNPV は耐震工学の玄人, 素人に関係なくリスクマネジャーが耐震補強計画の経済性を理解し易い指標と考える．

##### (1) 耐震補強工事 CBA 法の手順

耐震補強工事 CBA 法は 3 段階で構成される(Fig.8)．Phase 1 は, 損害保険 CBA 法と同様, SRA より対象(建設)地点における地震ハザード曲線を推定し, 地震生起確率密度を算出する．Phase 2 では, 本章 2 節で提案する耐震補強効果関数(effect function of aseismatic reinforcement, 略称:EFAR)より補強工事を施した既存 RC 単柱式橋脚の力学的特性値を推定し, ETA より施工前後の地震リスクを算出する．その算出法は第 2 章

2 節で記した「イベントツリー解析による地震リスク評価法」に準じ、算出結果は SDF で表現される。また、算出に際しては地震生起確率認知関数と損失額認知関数が加味される。これらの結果を受け、地震動の地域特性を反映した地震生起確率密度と当該橋脚の耐震性を反映する地震リスクを相乗・積分し、施工前後の期待損失額を算定する。Phase では、期待損失額の算定値を用い、CBA より ONPV/SNPV を算定する。

(2) 耐震補強効果関数の推定法と推定例

EFAR とは、既存 RC 単柱式橋脚に耐震補強工事を施した際、当該橋脚の特性値へ及ぼす効果度を定量的に示した関数である。本稿では、炭素繊維(carbon fiber reinforced plastic, 略称:CFRP)シートを用いた耐震補強工法に着目し、補強部材耐力の算出式が記された「炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針<sup>12)</sup>」により EFAR を推定する。ただし、本稿では補強目的を靱性補強、せん断補強とした。

柱部材の設計補強せん断耐力  $V_{CFyd}$  は、補強工事を施す前の設計せん断耐力  $V_{yd}(=V_{cd}+V_{sd})$  に CFRP シート負担分を加算した次式より算出される。

$$V_{CFyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{CFd} \quad (14)$$

$V_{cd}$ : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力、 $V_{sd}$ : せん断補強鋼材により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力、 $V_{CFd}$ : CFRP シートにより受け持たれる棒部材の設計せん断耐力である。 $V_{cd}$ 、 $V_{sd}$  の算出式は「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)<sup>13)</sup>と同様である。つまり、 $V_{CFd}$  が EFAR 推定のマクロ的補強パラメータとなる。 $V_{CFd}$  は次式より算出される。

$$V_{CFd} = \frac{K A_{CF} f_{CFud} (\sin \theta_{CF} + \cos \theta_{CF})}{S_{CF}} \frac{z}{\gamma_{bcf}} \quad (15)$$

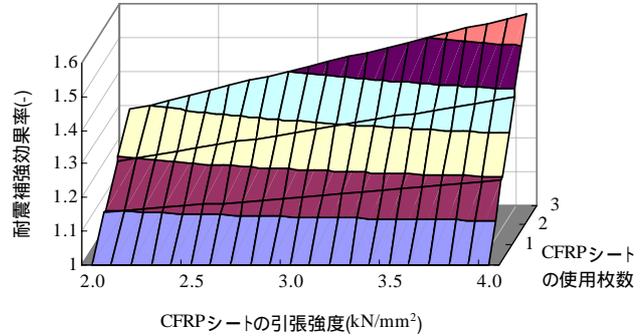
$K$ : CFRP シートの補正係数(=0.8)、 $A_{CF}$ : 角度  $\theta_{CF}$  で配置される CFRP シートの単位幅当り断面積、 $f_{CFud}$ : CFRP シートの設計引張強度、 $\theta_{CF}$ : CFRP シートが部材軸となす角度、 $S_{CF}$ : CFRP シートの単位幅、 $z$ : 圧縮応力の合力位置-引張鋼材の図心位置間の距離(一般に  $d/1.15$ 、 $d$ : 有効高さ)  $\gamma_{bcf}$ : 部材係数(一般に 1.15)である。ただし、 $A_{CF}$  は繊維目付け量  $w$  を CFRP シートの比重  $\rho$ (一般に 1.8)と  $S_{CF}$  で除して求められる 1 枚当りの厚さ  $t_{CF}$  より算出され、下記の条件式を満足する必要がある。

$$p_{CFw} = \frac{A_{CF}}{b_w S_{CF}} \geq 0.00035 \quad (16)$$

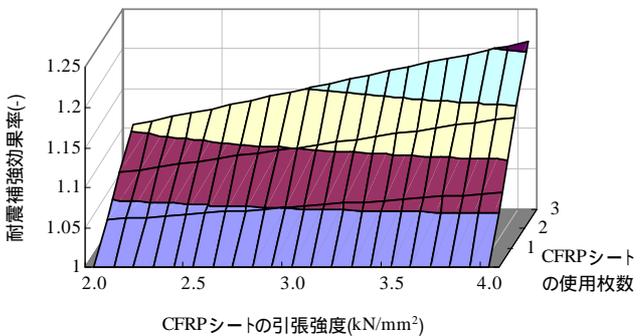
$p_{CFw}$ : CFRP シートによるせん断補強比、 $b_w$ : 腹部の幅である。以上より、EFAR 推定のミクロ的補強パラメータには  $f_{CFud}$ 、 $\theta_{CF}$ 、 $S_{CF}$ 、 $w$ 、そして使用枚数  $\omega$  が挙げられる。本稿では  $f_{CFud}$  と  $\omega$  を補強パラメータとした。一方、柱部材の設計補強靱性率  $\mu_{CFud}$  は次式より算出される。

Table 2 部材寸法と各種パラメータの固定値

有効高さ: $d$	2400 mm
腹部の幅: $b_w$	800 mm
せん断スパン: $l_a$	8000 mm
CFRPシートの単位幅: $S_{CF}$	1000 mm
繊維目付け量: $w$	200 g/m <sup>2</sup>
単位枚数当りの厚さ: $t_{CF}$	0.111 mm
CFRPシートが部材軸となす角度: $\theta_{CF}$	90 °
設計補強曲げ耐力: $M_{CFud}$	4025 kN
補強工事を施す前の設計せん断耐力: $V_{yd}$	5635 kN



(a) せん断補強に対する関数



(b) 靱性補強に対する関数

Fig.9 CFRP シートによる耐震補強効果関数の推定結果

$$\mu_{CFud} = 2.8 + 1.15 \frac{V_{CFyd}}{M_{CFud}} l_a \leq 10 \quad (17)$$

$M_{CFud}$ : 柱部材の設計補強曲げ耐力、 $l_a$ : せん断スパンである。 $M_{CFud}$  は、補強目的が曲げ補強でない故、補強工事の施工前後で変動しないと仮定する。

以上より、 $x$  軸:  $f_{CFud}$ 、 $y$  軸:  $\omega$ 、 $z$  軸: 耐震補強効果率の直交座標系に座標を定めた後、非線形回帰分析より EFAR を推定する。ただし、CFRP シートによる靱性補強、せん断補強効果率  $\eta_{\mu u}$ 、 $\eta_{vy}$  は次式より算出される。

$$\eta_{vy} = \frac{V_{CFyd}}{V_{yd}} = 1 + \frac{V_{CFd}}{V_{cd} + V_{sd}}, \quad \eta_{\mu u} = \frac{\mu_{CFud}}{\mu_{ud}} \quad (18)$$

$\mu_{ud}$  は補強工事を施す前の設計靱性率である。EFAR 推定に際して設定した部材寸法と各種パラメータの固定値を Table 2 に、推定結果を Fig.9 に示す。

(3) ONPV と SNPV の定義

耐震補強工事 CBA 法では、RC 単柱式橋脚のリスクマネージャーが耐震補強工事の施工前後に有する期待損

失額を用い CBA より 2 種類の純現在価値を算定する。本提案法より算定される地震防災対策案 No.i の経済性指標  $ONPV_i$  は次式で定義する。

$$ONPV_i = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} (E[X]_b - E[X]_{a,t}) - C_{RF}^- \quad (19)$$

Eq.(19) は被害規模と生起確率に関する認知特性を加味しない指標である。一方、上記 2 つの認知特性を加味した経済性指標  $SNPV_i$  を次式で定義する。

$$SNPV_i = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} (E[U(X)]_b - E[U(X)]_{a,t}) - C_{RF}^- \quad (20)$$

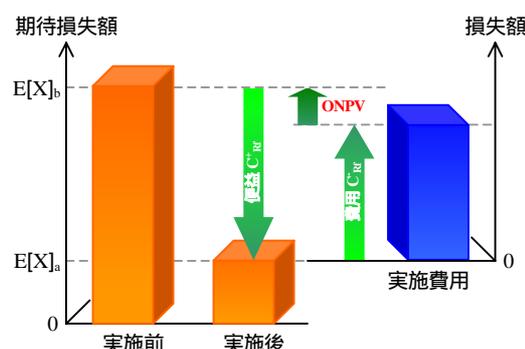
$E[U(X)]_b$ ,  $E[X]_b$ : 補強工事の実施前に所有者が有する期待損失額,  $E[U(X)]_{a,t}$ ,  $E[X]_{a,t}$ : 補強工事の実施後に所有者が有する  $t$  年目期待損失額,  $C_{RF}$ : 耐震補強費用,  $T$ : プロジェクトライフ (project life),  $r$ : 社会的割引率である。つまり Eq.(19), Eq.(20) 共に右辺第 1 項は損失軽減便益  $C_{RF}^+$  を、右辺第 2 項は投資額 (stake) を表し、 $ONPV_i$  値または  $SNPV_i$  値が大きな値を示す耐震補強計画ほど経済的価値が高いと評価される。

部材寸法を一にする一方で耐震性能に差異がある 2 つの既存 RC 単柱式橋脚、これら橋脚に同一の耐震補強工事を施す状況を想定する。Eq.(14), Eq.(15) 及び Eq.(17) より推測するに、この状況下では、 $C_{RF}$  が同額であるに関係なく、耐震性能に優れた橋脚より耐震性能に劣る橋脚の方が多大な  $C_{RF}^+$  を得られる (Fig.10)。また、RC 単柱式橋脚の耐震性能は供用期間中に様々な自然環境の影響を受けて年々低下する。それ故、 $E[X]_{a,t}$  は年々増加し  $C_{RF}^+$  は年々減少する (Fig.11)。以上より、補強工事に対する  $ONPV/SNPV$  は耐震性能の優劣や  $T$  の設定次第で正または負の値を示す。ここで、RC 単柱式橋脚のリスクマネジャーは当該橋脚の公共性や人のリスク選好性に関する社会的要請等を踏まえた上で補強工事の実施と規模を意志決定すると考えられる。被害規模に関する認知特性を考慮した場合は CBA より算定されるリスク転嫁効果が著しく増大し、 $ONPV$  値が負となる補強計画も  $SNPV$  は正の値を示し得る。

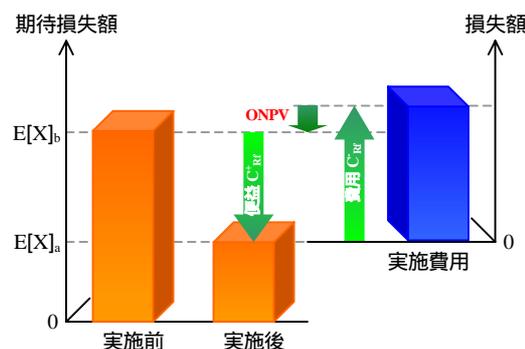
## 5. 最適対策案の選定例

本稿の選定例で想定する場面は、東京都某所の既存 RC 単柱式橋脚を対象とした 16 の地震防災対策案より、当該橋脚のリスクマネジャーが地震防災に関する意思決定を迫られた状況である。対策案は耐震補強工事と損害保険に関する下記 4 事項を組合せて作成した。

- ・CFRP シートによる耐震補強工事を実施するか否か。
- ・CFRP シートの使用枚数は 1 枚か 2 枚か 3 枚か。
- ・耐震補強工事を施した後も残存する地震リスクの一部を損害保険にて転嫁するか否か。



(a) 耐震性能に劣る建造物の場合



(b) 耐震性能に優れた建造物の場合

Fig.10 本節における ONPV の概念図

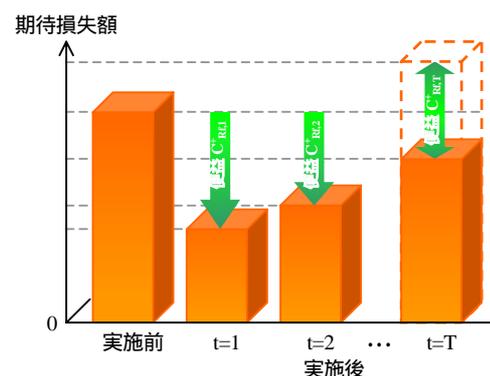


Fig.11 経年劣化を考慮した損失軽減便益の概念図

・損害保険の支払い限度は 0.30 か 0.40 か 0.50 か。  
以下では、補強工事と損害保険を組合せた対策案に対して CBA を行い、リスクマネジャーの意思を推し量る。ただし、本選定例では  $ONPV/SNPV$  が最多な対策案をリスクマネジャーにおける最適対策案と定義した。

### (1) 純現在価値の算定条件

評価対象とする RC 単柱式橋脚の力学的特性値を Fig.12 に、地震リスク評価と CBA に要する各種パラメータを Table 3 に示す。補強工事は靱性補強、せん断補強を目的として繊維目付け量  $w=200\text{g/m}^2$  の CFRP シートを使用し、補強工事を施した橋脚の靱性率  $\mu_{CFu}$ 、せん断耐力  $V_{CFy}$  は既存橋脚の靱性率  $\mu_u$ 、せん断耐力  $V_y$  に耐震補強効果率  $\eta_{\mu}, \eta_{V_y}$  を乗じて推定する。 $\eta_{\mu}, \eta_{V_y}$  は第 4 章 2 節で推定

した EFAR より算出，その算出結果は Table 3 (e) に示した．ここで，耐震補強費用  $C_{Rf}$  は Table 3 (c),(d) に示す CFRP シートの張り付け面積と単価(円/m<sup>2</sup>)を相乗して算定した．また，ETA による地震リスク評価で要する損失率  $x_k$  は耐震性能水準(performance level)に応じて  $x_1=x_5=x_8=0$ ， $x_4=x_7=x_9=1$  と設定した(Table 3 (a))．

RC 部材のせん断耐荷メカニズムに関する既往の研究成果では，地震による部材耐力低下の主要因としてコンクリートせん断強度の低下を挙げている．本選定例では，応答変位量  $\delta_{resp}$  に応じてコンクリートせん断強度  $V_c$  が低下するとした大江・吉川の提案する考え方を適用した<sup>15)</sup>．大江・吉川は，Priestley らが提案する応答塑性率  $\mu_{resp}$  に応じて  $V_c$  を低下させる方法に着目し，せん断耐力劣化現象を次式で定義した．

$$E[V_y] = \zeta V_{c0} + V_s \quad (21)$$

$E[V_y]$ : せん断耐力の期待値， $V_{c0}$ : コンクリートせん断強度の初期値， $\zeta$ : せん断劣化係数である． $\zeta$  は  $\mu_{resp}$  の従属変数で  $V_c$  の低減率を表し(0  $\zeta$  1)，初期値  $\zeta=1$  から繰返し大変形を受けて徐々に低下する．本選定例ではせん断耐力劣化曲線に Priestley らが提案する劣化曲線を用いた<sup>15)16)</sup>．一方，地震生起確率認知関数  $U(p_1)$  と損失額認知関数  $U(X)$  には次式を適用した．

$$U(p_1) = B \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^A p_1 \quad (22-1)$$

$$U(X) = X + 1880 \{ \exp(0.00070X) - 1 \} \quad (22-2)$$

A,B: 認知バイアス係数， $\alpha_0$ : 標準加速度，X: 損失額(単位: 百万円)である．本選定例では， $A=B=1, \alpha_0=150$ Gal と設定し，橋脚のリスクマネジャーが P.B.A.150Gal 未満の地震に対する生起確率を過小認知，150Gal 以上で過大認知する精神現象を想定した．ここで，Fig.13 に  $p_1$  を基準とした主観的地震生起確率密度  $U(p_1)$  の倍率  $U(p_1)/p_1$  を示す一方， $p_1$  と  $U(p_1)$  の差異を次式に示す．

$$\int_0^\infty p_1 d\alpha = 1 \quad (23-1)$$

$$\int_0^\infty U(p_1) d\alpha = \int_0^\infty \frac{\alpha}{150} p_1 d\alpha = 0.254 \neq 1 \quad (23-2)$$

Eq.(22-2)は，地震保険加入 96 世帯の保険加入行動に関する統計データより柴崎・家田が評価した式であり<sup>17)</sup>，X を約 2.3-3.9 倍に過大評価する(Eq.(24-1), Fig.14)．ただし X を基準とした主観的損失額  $U(X)$  の倍率  $U(X)/X$  は Eq.(24-2)で表され，上向き矢印は Eq.(22-2)右辺第 2 項より算定される金額  $U(X)-X$  に相当する．

$$\frac{dU(X)}{dX} = 1 + 1.316 \exp(0.00070X) \geq 2.316 \quad (24-1)$$

$$\frac{U(X)}{X} = 1 + 1880 \frac{\exp(0.00070X) - 1}{X} \quad (24-2)$$

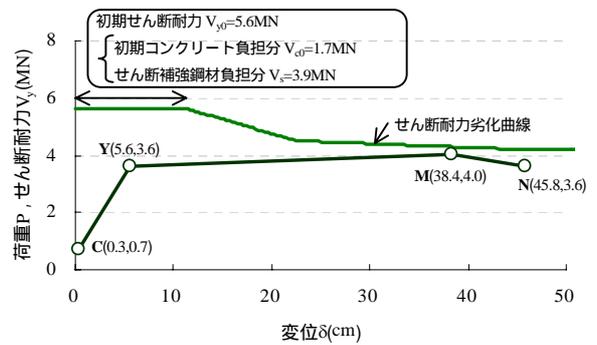


Fig.12 評価対象 RC 単柱式橋脚の特性値

Table 3 各種パラメータの設定値

(a) 損傷レベル別の損失率<sup>5)</sup> (b) 各生起確率の算出に用いる変動係数

損傷レベル	損失率	損失率 $x_k(-)$
1	$x_1, x_5, x_8$	0
2	$x_2, x_6$	0.008
3	$x_3$	0.033
4	$x_4$	1
5	$x_7$	1
6	$x_9$	1

変位	物性値	0.30	
	応答値	0.30	
	耐力	曲げ	0.11
		せん断	0.08

(c) 費用便益分析と耐震補強効果関数の推定に用いるパラメータ

再調達価額 $C_{R.V.}$ (百万円)		2000
社会的割引率 $r$		0.04
損害保険 CBA法	免責額 $C_D$ (百万円)	100
	付加保険料 $a$ /営業保険料 $E[X_k] + a$	0.20
耐震補強工事 CBA法	CFRPシート張り付け面積(m <sup>2</sup> )	42.25
	繊維目付け量 $w$ (g/m <sup>2</sup> )	200
	炭素繊維シートの設計引張強度 $f_{CFRP}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	3.5
	CFRPシートが部材角となす角度 $\theta_{CF}$ (°)	90
	CFRPシートの単位幅 $S_{CF}$ (mm)	1000
	有効高さ $d$ (mm)	2400
	腹部の幅 $b_w$ (mm)	800
	せん断スパン $l_n$ (mm)	8000

(d) 炭素繊維シートの公表価格<sup>14)</sup>

繊維目付け量 $w$	枚数 $\omega$ (枚)	価格(円/m <sup>2</sup> )
200g/m <sup>2</sup>	1	24,900
	2	37,300
	3	49,700

(e) 本選定例における耐震補強効果率

使用枚数 $\omega$ (枚)	耐震補強効果率	
	1	靱性補強 $\eta_{lim}$
2	せん断補強 $\eta_{Vc}$	1.167
	靱性補強 $\eta_{lim}$	1.122
3	せん断補強 $\eta_{Vc}$	1.334
	靱性補強 $\eta_{lim}$	1.183
	せん断補強 $\eta_{Vc}$	1.500

保険者の地震リスク評価では元来 P.B.A. $\alpha_i$ Gal に対するサンプル  $x_{NEL}, x_{PML}$  等を用いて非線形回帰分析より推定される係数  $c$  を 0.01 と設定した．また，地震保険の大部分が 1 年又は 2 年の短期契約であり，本選定例では単年度契約を前提に  $T=1$  と設定した．

(2) 最適対策案の選定結果

耐震補強工事と損害保険を組合せた地震防災対策案に対する CBA は第 4 章で提案した耐震補強工事 CBA 法と第 3 章で提案した損害保険 CBA 法を組合せて実行した．ただし，本選定例では CFRP シートによる補

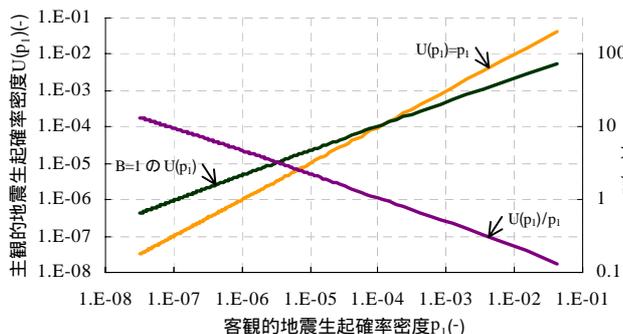


Fig.13 地震生起確率認知関数

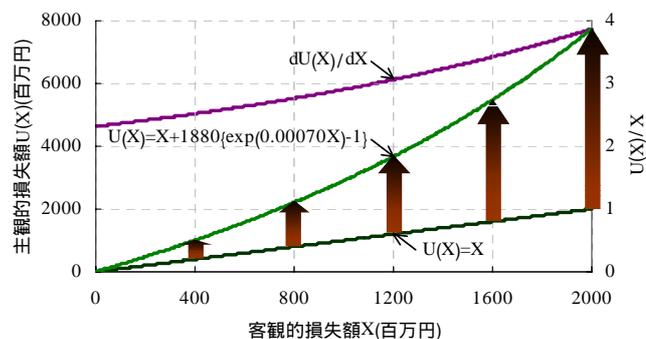


Fig.14 損失額認知関数

Table 4 地震防災対策案の内容とCBA結果(単位:百万円)

案 No.	対策案の内容					Risk Management			Risk Control (耐震補強)								
	補強材料	使用枚数	加入状況	免責	支払い限度	投資額	ONPV	SNPV	Objective Estimation		Subjective Estimation						
									耐震補強費用	損失軽減便益	耐震補強費用	損失軽減便益					
1	無	0	x	-	-	0	0	0									
2						0.30	2.481	3.233					35.166				
3						0.40	2.576	5.042					45.077				
4						0.50	2.661	6.861					53.997				
5	CFRPシート	1	x	-	-	1.052	10.402	47.019	1.052	11.912	1.052	49.994					
6						0.30	3.533	10.171					16.647				
7						0.40	3.628	10.825					21.228				
8						0.50	3.713	11.490					25.351				
9		2	x	-	-	1.576	15.664	75.374	1.576	17.930	1.576	80.028					
10													0.30	4.057	13.683	7.796	
11													0.40	4.152	13.754	9.173	
12													0.50	4.237	13.835	10.413	
13			3	x	-	-	2.100	16.512	83.905	2.100	19.356	2.100	89.445				
14														0.30	4.581	14.115	5.902
15														0.40	4.676	14.048	6.274
16														0.50	4.761	13.991	6.608

案 No.	Risk Financing (損害保険)			
	Objective Estimation		Subjective Estimation	
	営業保険料	損失軽減便益	営業保険料	損失軽減便益
1	-	-	-	-
2	2.481	5.942	2.481	39.153
3	2.576	7.923	2.576	49.559
4	2.661	9.903	2.661	58.925
5	-	-	-	-
6	2.481	2.339	2.481	18.297
7	2.576	3.119	2.576	23.160
8	2.661	3.899	2.661	27.536
9	-	-	-	-
10	2.481	0.519	2.481	5.761
11	2.576	0.692	2.576	7.292
12	2.661	0.865	2.661	8.670
13	-	-	-	-
14	2.481	0.087	2.481	1.826
15	2.576	0.117	2.576	2.311
16	2.661	0.146	2.661	2.748

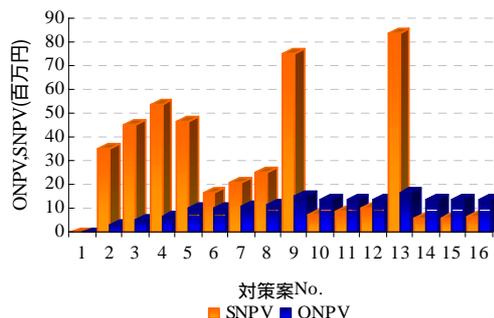


Fig.15 地震防災対策案のCBA結果

強工事を施した後のRC単柱式橋脚を保険の目的物とする故、損害保険CBA法では補強工事を施した橋脚の力学的特性値より被保険者と保険未加入者の地震リスクを評価した。以上より、16の対策案に対してCBAを行い、最適対策案の選定指標となるONPV/SNPVを算定した。算定結果をTable 4, Fig.15に示す。耐震補強等の防災対策を何ら講じない対策案No.1のONPV/SNPV値は0とした。また、CFRPシートを1枚使用する4の対策案No.5-No.8は、CFRPシートの単位幅当り断面積 $A_{CF}$ が不足して下記の条件式を満足せず、不適当な対策案と判断した。

$$P_{CFw} = \frac{A_{CF}}{b_w S_{CF}} = \frac{0.111 \times 1 \times 2 \times 1000}{800 \times 1000} = 0.00028 < 0.00035 \quad (25)$$

補強工事を施した後の橋脚を保険の目的物として損

害保険に加入する対策案は、橋脚の耐震性能が高まる程にONPV/SNPV値を保険加入前より低下させた。その理由は、橋脚の耐震性能が改善する程、営業保険料に見合う損失軽減便益が得られない点にある。16の対策案に対してONPV/SNPVを算定した結果、CFRPシートを3枚張り付けて損害保険に未加入とした対策案No.13でONPV<sub>13</sub>=16.512百万円、SNPV<sub>13</sub>=83.905百万円と最大値が得られた。故に、橋脚のリスクマネージャーは、地震防災に充当可能な準備金が210万円以上であれば、対策案No.13を最適対策案に選定する。

## 6. おわりに

本稿では、RC単柱式橋脚を対象建造物とし、耐震補強工事と損害保険を組合せた地震防災対策案より

橋脚のリスクマネジャーが最適対策案を選定する際に判断指標となり得る ONPV/SNPV を算定した。以下では本稿にて得られた知見と今後の課題を記す。

- ✦ 2001年9月11日に米国で起きた同時多発テロ(世界貿易センターと国防総省への襲撃)は、建造物と保険料に関する下記4つの課題を投げ掛けた<sup>18)</sup>。
  - ・テロ対策の弱い建造物は純保険料を値上げする。
  - ・高層ビルは上層ほど純保険料を高額に設定する。
  - ・ニューヨーク、ロンドン等の大都市でテロリストが標的にし易い建造物は純保険料を値上げする。
  - ・多数のテナントが同居する建造物は入居する会社や組織に応じて純保険料を変額する。
 それら課題は、保険契約者別、保険の目的物別に純保険料を算定する必要性を示す。本稿第3章で提案した損害保険CBA法は、保険者の地震リスク評価法をETAに換え、そのニードに込え得る次世代対応型の手法へと生れ変わる。
- ✦ 本稿で提案した2つのCBA法において、地震生起確率認知関数と損失額認知関数の差異がONPVとSNPVの算定値に及ぼす影響は多大である。認知特性は個人の生活環境や兵庫県南部地震に代表されるカストロフィックな地震生起後の経過時間、新聞記事等のマスメディアより受けるインパクトの個人差等に応じて差異が生じる。本提案法の適用では認知関数の個別評価が必要となる。
- ✦ 本稿の選定例ではプロジェクトライフTを1年とした。今後は、経年劣化によるRC単柱式橋脚の耐力低下を1年刻みで評価し、ライフサイクルを見渡した地震防災対策案の最適化フローを構築する。

謝辞:本稿の作成に当り 構造材料工学研究室の吉川弘道教授、小玉克己教授、栗原哲彦講師、リスク数理工学研究室の星谷勝教授、丸山収助教授には終始温かい御指導御鞭撻を受け賜りました。深謝申し上げます。(株)篠塚研究所の中村孝明氏、望月智也氏、東急建設(株)の服部尚道氏には本稿で提案した損害保険CBA法、耐震補強工事CBA法の構築に当り貴重な情報と資料

を御提供頂きました。厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 亀井利明:保険とリスクマネジメントの理論,株式会社法律文化社, pp1-5, 1992.4
- 2) 静間俊郎,北本廣平,吉川弘道:RC単柱橋脚のDFとSFCの評価,土木学会 第57回年次学術講演会 CD-ROM 版概要集, pp231-232(-116), 2002.9
- 3) 大井幸太,吉川弘道:イベントツリー解析を用いた鉄筋コンクリート単柱式橋脚の地震リスク評価,土木学会 第57回年次学術講演会 CD-ROM 版概要集, pp225-226(-113), 2002.9
- 4) 鉄道総合技術研究所:SI単位版 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計),丸善株式会社, pp149-155, 1999.10
- 5) 家田仁,村上迅:人の被害認知特性を考慮した費用便益分析とネットワーク分析に基づくインフラ施設の要求耐震性能決定法の基礎研究,土木計画学研究・公演集 No.22(2), pp539-542, 1999.10
- 6) 星谷勝,中村孝明:構造物の地震リスクマネジメント,株式会社山海堂, pp68-72, 2002.4
- 7) 望月智也,中村孝明,木村正彦,星谷勝:損失に対する主観金額を考慮した地震保険の最適化,土木学会論文集 -59 No.703, pp203-210, 2002.4
- 8) 中村孝明,中村敏治,望月智也:不確実性を考慮した地震リスク移転と自己負担,日本リスク研究学会 第13回研究発表論文集, pp1-7, 2000.11
- 9) 土方薫:総解説 保険デリバティブ,日本経済新聞社, pp175, 2001.10
- 10) 亀井利明:「前掲書」, pp24-33
- 11) 亀井利明:「前掲書」, pp14-24
- 12) 鉄道総合技術研究所:炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針(第2版), pp7-39, 1996.11
- 13) 鉄道総合技術研究所:SI単位版 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物),丸善株式会社, pp84-92, 1999.12
- 14) 経済調査会:月刊 積算資料, pp842, 2002.10
- 15) 大江亮二,吉川弘道:繰返し大変形を受ける鉄筋コンクリート単柱のせん断強度劣化の評価に関する研究,土木学会論文集 No.711/ -56, pp59-71, 2002.8
- 16) Priestley,M.J.N., Seible,F. & Calvi,G.M.:Seismic Design and Retrofit of Bridges ,A Wiley-Interscience Publication ,pp338, 1996
- 17) 柴崎隆一,家田仁:世帯の保険加入行動を対象とした人間のリスク認知特性の計測,日本リスク研究学会 第13回研究発表会講演論文集 Vol.13, pp31-36, 2000.11
- 18) 伊達佑介:高層ビルに受難の時代?-テロで保険料が急上昇,ワン・トゥ・ワン・マーケティング協議会, 2001.10  
<http://www.lto1.ne.jp/wind18.htm>

## OPTIMIZATION OF EARTHQUAKE DISASTER MEASURES FOR REINFORCED CONCRETE PIER

Kouta OHI

In this paper, a method of optimization of earthquake disaster measures for reinforced concrete pier is proposed. The method consists of three major categories; seismic hazard analysis, calculation of expected loss, cost benefit analysis and whose end branch is calculation of objective/subjective net present value. But earthquake disaster measures are combined risk reduction due to seismic reinforcement work and risk transfer due to damage insurance for making.