

地域防災計画における想定地震規模の選定に関する計画論的考察*

On the Maximum Design Earthquake in Regional Disaster Prevention Planning: A Model Analysis*

喜多秀行**・横松宗太***

By Hideyuki KITA**・Muneta YOKOMATSU***

1. はじめに

平成7年7月に改訂されたわが国の防災基本計画においては、構造物の耐震設計に当たり、“供用期間中に1～2度発生する確率を持つ一般的な地震動”および“発生確率は低いが直下型地震または海洋型巨大地震に起因するさらに高いレベルの地震動”をともに考慮の対象とすることが述べられており、構造物の耐震性能を照査する上で2段階の地震動レベルを規定し、それぞれに対して構造物の重要度に応じた耐震性能を定めて耐震設計を行うという方針がとられている。前者の地震動レベルが「レベル1地震動」、後者が「レベル2地震動」である。

レベル2地震動は、その地震動の下での被害状態は構造物の重要度と地震動強さの発生頻度を考慮して決定すべきであるとされている¹⁾。しかし、構造物の重要度や受容しうる機能低下の程度は、地域社会システム全体として受容しうる機能低下の程度に全面的に依存する。したがって、まず、地域社会システムの機能低下の程度と地震動強さの発生頻度を関連づけがなされなければならない。

そこで、本研究では、地域社会の構成員のリスクに対する選好性や耐震強化費用と残存リスクの関係などを考慮して先に提案した“地域社会が耐えうる地震動強さの上限を求めるための基本的な検討フレーム”²⁾を再構成し、これを基にモデル分析を行うことにより、地域防災計画の策定に資する知見を得ることを目的とする。

*キーワード: 防災計画, 計画手続論, 想定地震規模

** 正会員, 工博, 鳥取大学工学部社会開発システム工学科,
(〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101, TEL: 0857-31-5309,
FAX: 0857-31-0882)

*** 正会員, 博(工), 鳥取大学工学部社会開発システム工学科,
(〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101, TEL: 0857-31-5311,
FAX: 0857-31-0882)

2. モデル

(1) 前提条件

簡単のため、1人の住民からなる地域を想定し、期間内に災害規模 g の災害が確率密度 $p_E(g)$ で1回のみ起こるとする。この地域は富 W を有し、それを合成財 x 、防災投資 $c(G)$ 、保険料 $h(G, \mathbf{b})$ に分割して消費する。

$$W = x - c(G) - h(G, \mathbf{b}) \quad (15)$$

地域社会を維持するのに必要最低限の合成財の消費水準 I_0 があり、 $I < I_0$ のとき地域社会が崩壊すると考える。

(2) 保険

地域は、外部に対して保険を付保できるものとする。保険金は、ある災害規模が起こったときの損害額 $D(g, G)$ に一定のカバー率を掛けたものとする。災害規模 g 、防災投資水準 G 、カバー率 \mathbf{b} に依存するので $H(g, G, \mathbf{b})$ と表記すると、

$$H(g, G, \mathbf{b}) = \mathbf{b} \cdot D(g, G) \quad (0 \leq \mathbf{b} \leq 1) \quad (13)$$

となる。

保険料は保険金支払額により決まる。防災投資水準 G 、カバー率 \mathbf{b} に依存するので $h(G, \mathbf{b})$ として、

$$h(G, \mathbf{b}) = \int_0^{\infty} p_E(g) \times \mathbf{b} \times D(g, G) dg \quad (14)$$

となる。(\mathbf{b} はリスクプレミアム ($\mathbf{b} > 1$)、 $p_E(g)$ は確率密度を表す。)

(3) 状況依存的消費水準

合成財は災害規模 g の大きさにより消費水準が変わる。

$$I(g, x, G, \mathbf{b}) = \begin{cases} x & (0 \leq g < G) \\ x - D(g, G) + H(g, G, \mathbf{b}) = x - (1 - \mathbf{b})D(g, G) & (G \leq g < \infty) \end{cases} \quad (16)$$

(4) 地域社会の生存条件

合成財が必要最低限の消費水準 I_0 を下回ると地域社会は崩壊する。 $g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)$ を地域社会の崩壊を防ぐべき災害規模の上限とすると、

$$I(g, x, G, \mathbf{b}) \geq I_0 \quad \forall g \in [g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0), G] \quad (17)$$

(5) 最適化

ラグランジュ乗数法を用いて、期待効用が最大となるときの x, G, \mathbf{b} を求める。

$$\begin{aligned} \max_{x, G, \mathbf{b}} EU &= \int_0^{g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)} p_E(g) U(I(g, x, G, \mathbf{b})) dg \quad (18) \\ \text{s.t.} \quad &x + c(G) + h(G, \mathbf{b}) = W \end{aligned}$$

ラグランジュ関数 L は、

$$\begin{aligned} L &= \int_0^G p_E(g) U(I(g, x, G, \mathbf{b})) dg \quad (19) \\ &+ \int_0^{g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)} p_E(g) U(I(g, x, G, \mathbf{b})) dg \\ &+ \mathbf{I} \left\{ W - x - c(G) - \int_0^\infty p_E(g) \cdot \mathbf{b} \cdot D(g, G) dg \right\} \end{aligned}$$

となる (\mathbf{I} はラグランジュ乗数を表す)。

$x, G, \mathbf{b}, \mathbf{I}$ についての最適化条件はそれぞれ、

$$\begin{aligned} L_x &= \int_0^G p_E(g) U_x(I(g, x, G, \mathbf{b})) dg \quad (20) \\ &+ \int_0^{g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)} p_E(g) U_x(I(g, x, G, \mathbf{b})) dg \\ &+ p_E(g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)) \cdot U(I(g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0), x, G, \mathbf{b})) \\ &\cdot g_{0x}(x, G, \mathbf{b}, I_0) - \mathbf{I} \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_G &= p_E(G) U(I(G, x, G, \mathbf{b})) \quad (21) \\ &+ \int_G^{g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)} p_E(g) U_G(I(g, x, G, \mathbf{b})) \{- (1 - \mathbf{b}) D_G(g, G)\} dg \\ &- p_E(G) U(I(G, x, G, \mathbf{b})) \\ &+ p_E(g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)) \cdot U(I(g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0), x, G, \mathbf{b})) g_{0G}(x, G, \mathbf{b}, I_0) \\ &+ \mathbf{I} \left\{ - \frac{dc(G)}{dG} - \int_0^\infty p_E(g) \cdot \mathbf{b} \cdot D_G(g, G) dg \right\} \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_b &= \int_G^{g_0} p_E(g) U_b(I(g, x, G, \mathbf{b})) D(g, G) dg \quad (22) \\ &+ p_E(g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)) \cdot U(I(g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0), x, G, \mathbf{b})) g_{0b}(x, G, \mathbf{b}, I_0) \\ &- \mathbf{I} \int_0^\infty p_E(g) D(g, G) dg \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_I &= W - x - c(G) - \int_0^\infty p_E(g) \cdot \mathbf{b} \cdot D(g, G) dg \quad (23) \\ &= 0 \end{aligned}$$

である。この四式を満足する $x^*, G^*, \mathbf{b}^*, \mathbf{I}^*$ が最適解となり、このときの $g_0(x^*, G^*, \mathbf{b}^*, I_0)$ が地域社会の崩壊を防ぐべき災害規模の上限となる。

3. 数値分析

(1) 設定条件

以下のように関数を特定化し数値計算を行った。

$$C(g) = kG^a \quad (k > 0, a > 1)$$

$$\begin{aligned} D(g, G) &= 0 \quad \text{for } g < G \\ &= l(g - G)^b \quad \text{for } g \geq G \quad (l > 0, b > 1) \end{aligned}$$

$$p(g) = m \exp(-ng) \quad (m > 0)$$

$$U(x) = \ln x$$

ここでは相対的危険回避度一定型 (= 1) の効用関数を採用する。また、本数値計算では保険カバー率 β を外生的に与えて、所与のカバー率 β の下で平常時の消費水準 x と耐震水準 G を選択することを通じて期待効用水準 EU の最大化を行うこととする。さらにカバー率 β を 0 から 0.9 まで変化させることによって期待効用水準 EU の最大値と、それを実現する消費水準 x や耐震水準 G 、レベル 2 地震動 $g_0(x, G, \mathbf{b}, I_0)$ 等を導出する。

(2) 基本ケース

はじめに基本ケースとして設定 1 のようにパラメータを特定化した。表 1 に示すように、ここでは対象地域が保有する資源 $W=10$ の半分 $I_0=5$ を消費費することが家計の生存の条件、すなわち地域が存続する条件とする。それによって保険が存在しないとき、すなわち $\beta=0$ のときには地域が崩壊する確率が 39.6% という危険な環境を設定する。またリ

表 1 数値分析の設定条件

	a	k	b	l	μ		W	I_0	
設定1	2	4	1	3	0.5	2	10	5	0
設定2	2	4	1	3	0.5	1.2	10	5	0
設定3	2	4	1	3	0.5	4	10	5	0

する確率も単調に減少することになる。そして、 0.7 のときに EU は最大となる。すなわち保険カバー率の選択も含めた設定 1 の最適解 (x^*, G^*, b^*) は $(7.117, 0.391, 0.7)$ により与えられる。保険料に含まれるリスクプレミアムの存在によって、フルカバーの保険は最適ではないことがわかる。

(3) 保険利用可能性の変化と最適耐震投資水準

設定 2 と設定 3 では、設定 1 のパラメータのうち、リスクプレミアム e をそれぞれ 1.2 と 4.0 に変更して最適解を導出した。設定 2 は市場保険が高い分散機能をもつ環境を、設定 3 は保険を通じてリスクを他地域に分散させることが困難な環境を表している。表- 1 と図- 2 より、設定 2 では $0 < \mu < 0.5$ の領域において最適耐震投資水準 G が減少することがわかる。ここでは保険のリスク軽減機能の向上に

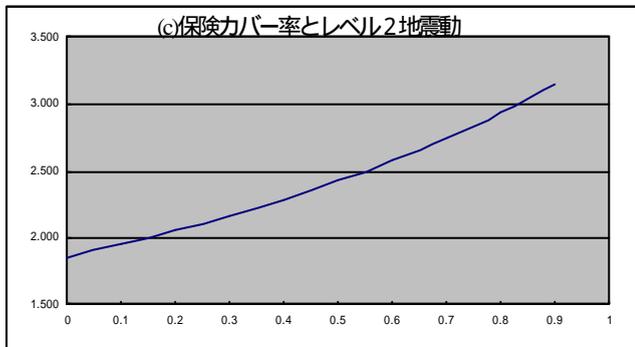
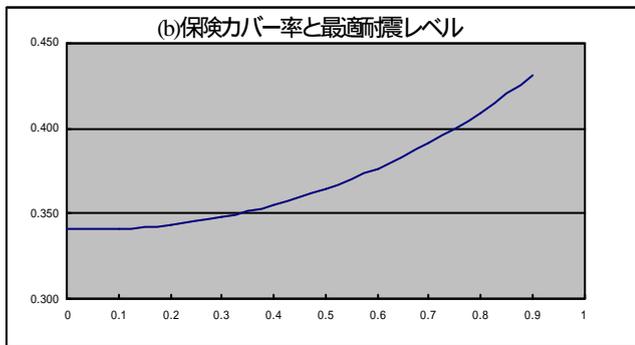
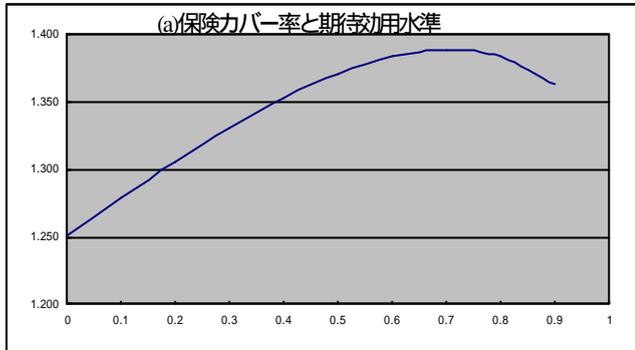


図 1 数値分析結果 (設定 1 : 基本ケース)

リスクプレミアムを $e=2.0$ で与えることにより、保険料が期待保険金支払額の 2 倍である環境を対象とする。いま、 μ を増加させていくと、期待効用水準は上昇する。このとき最適な耐震投資水準 G も増加することになる。ここでは耐震投資を通じて期待被害額を減少させ、それによって保険料を安くする効果が追求されている。すなわち設定 1 では保険と耐震投資が補完的な関係を形成している。また、保険カバー率と耐震水準が同時に上昇することによってレベル 2 地震動 g_0 も単調に上昇し、地域が崩壊

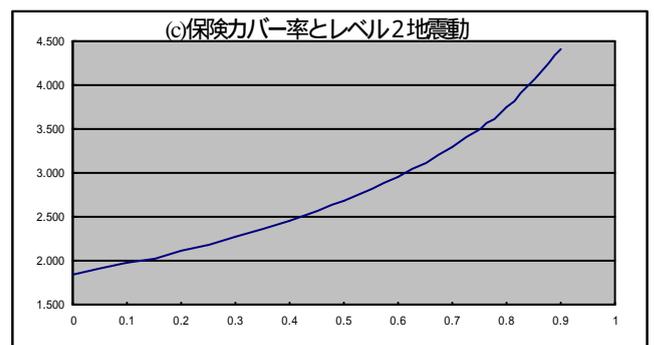
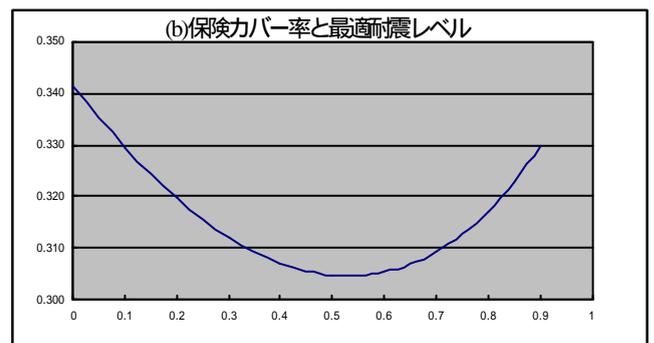
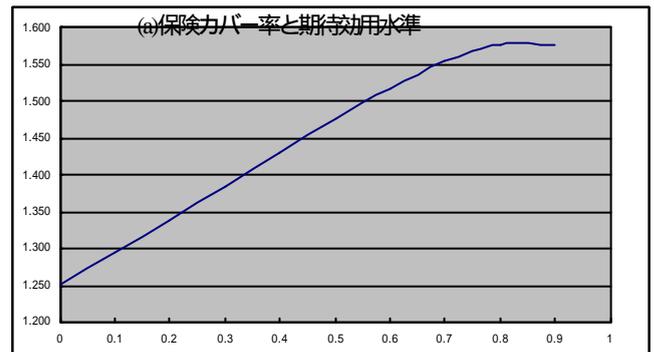


図 2 数値分析結果 (設定 2)

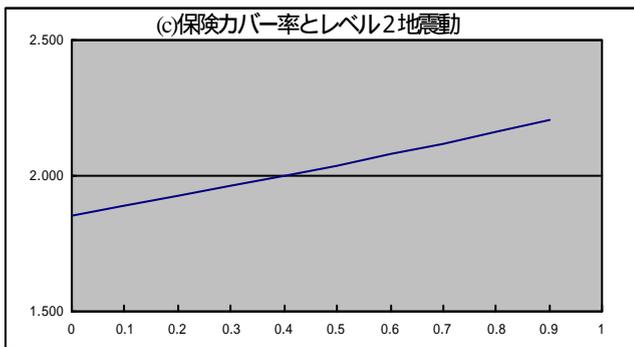
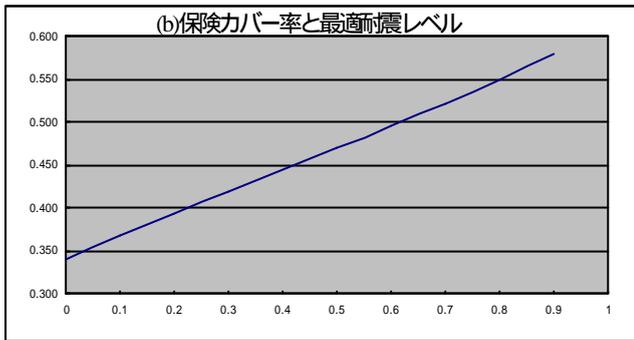
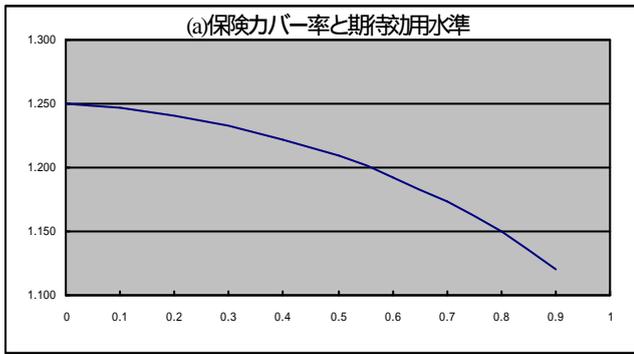


図-3 数値分析結果（設定3）

よって、災害リスク管理に投じる資源を保険の購入の方に移転させていくことが効率的であることが示されている。すなわち単位コストの小さい方のリスク管理手段により大きな費用を配分することが効率的となる。保険と耐震投資が代替的な関係を形成している。しかし、 G が0.6よりも大きくなると G は増加していく。すなわち保険料支出が増加していくと、今後はそれを減少させるために耐震水準を上昇させることになる。この領域では前述の保険と耐震投資の補完的關係が支配的となるのである。そして保険料増加に伴う耐震投資増加の必要性は設定3の計算結果によっても確認することができる。図-3によって、保険が高価な環境において外生的に保険カバー率を増加させていくと、耐震投資は高い増加率で増加することが示されている。また、期待効用の最大値により最適保険行動を求めると、設定2に

おいてはほぼフルカバーに近い保険契約が、設定3においては保険を全く購入しないことが最適であることがわかる。保険カバー率の選択を含めた最適解において耐震投資水準を比較すると、設定2では $G^*=0.330$ 、設定3では $G^*=0.341$ となっている。市場保険の分散機能が高い環境においては保険と耐震投資を併用することによって、耐震投資水準を減少させることができる。

(4) 他の要因の影響と全体的傾向

他にも、被災時の被害額が変化した場合（設定4, 5）や、耐震投資のコストが設定1から変化した場合（設定6, 7）についても分析しているが、紙幅の制約からそれらは発表時にゆずる。

最後に、以上を通じて示された全体的傾向について述べる。第1に、リスクプレミアムを高くした設定2を除くと、リスクマネジメントにおける保険の導入は社会厚生を向上させる。第2に、耐震投資水準は、リスクプレミアムや耐震投資コスト、被災時の被害額等の外生的環境に応じて様々に変化し、外生的環境によって最適耐震投資行動の感度が異なることがわかる。第3に、保険カバー率の増加に伴ってレベル2地震動 $g_0(x, G, I_0)$ が単調に上昇し、耐震投資水準が減少する領域においてさえ上昇している。保険の購入が地域の崩壊を防ぐ上で重要な役割を果たすことがわかる。

4. おわりに

本研究では、計画論的観点から先に提案した想定地震規模の選定方法論に基づき、いくつかの数値事例分析を行い、種々の要因が想定地震規模の上限値に及ぼす影響に関する知見を得た。大胆な単純化を、行った点について、今後検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 土木学会土木構造物の耐震設計に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説，土木学会，2000。
- 2) Kita, H. and K. Tanimoto: On the Maximum Design Earthquake in Regional Disaster Prevention Planning, Proc. of 2001 IEEE SMC Conference, Tucson, 2001.