

# 耐震改修促進のための性能照査型契約に関する基礎的研究\*

## Theoretical analysis on Performance-based contract to promote mitigation policy\*

吉田護\*\*・多々納裕一\*\*\*

By Mamoru YOSHIDA\*\*・Hirokazu TATANO\*\*\*

### 1. はじめに

巨大地震に備えるため、既存家屋の耐震性向上の必要性が指摘されている。しかし、既存家屋の耐震化は十分進んでいるとは言いがたい。様々な問題点が考えられる中で<sup>(1)(2)</sup>、本研究では、家計は工事期間中の企業が投入する努力情報だけでなく、耐震改修設計、施工後の成果情報（達成された家屋の脆弱性）に関しても観察することは容易ではない、工事の質に関する「事後確認の困難性」に着目する。このとき、企業は機会主義的な行動を容易にとることが可能であり、それを初めから予想する家計は耐震改修を依頼しないであろう。本研究ではこの「事後確認の困難性」に焦点をあて、企業のモラルハザード問題を解消しうる性能照査に基づく耐震改修契約について分析する。なお、ここで言う性能照査とは、設計段階で家計の提示した要求性能を満たしうる設計図書であるか否かの検査を行い、施工段階で設計図書通り施工がなされたか否かの検査を行う二段階の検査を指す。また、多くのモラルハザードを扱ったモデルではインセンティブを付加するためのリスクシェアリングに分析の焦点が当てられているが、本研究ではそれらのモデルと異なり、検査精度の低下が及ぼす影響を効率性、契約の成立可能性の観点から分析を行っている点が特徴的である。以下、2章では社会的最適な耐震改修契約モデルを定式化、分析する。3章では家屋の脆弱性を家計が観察可能（かつ立証可能）である場合の耐震改修契約を分析する。4章では事後確認の困難性下において性能照査を導入し、その効率性、契約の成立可能性について分析し、最後に5章でまとめ及び今後の課題について言及する。

\*キーワード：耐震改修、モラルハザード、性能照査

\*\*学生員、工修、京都大学工学部情報学研究所

(京都府宇治市五ヶ庄京都大学防災研究所

TEL0774-38-4037、FAX0774-38-4044)

\*\*\*正員、工博、京都大学防災研究所社会防災研究部門

(京都府宇治市五ヶ庄京都大学防災研究所

TEL0774-38-4308、FAX0774-38-4044)

### 2. 社会的最適耐震改修契約モデル

#### (1) モデル化の前提条件

耐震改修の依頼を行う家計 (principal) と依頼を受ける一企業 (agent) が耐震改修契約を締結する場合を考える。耐震改修は耐震改修設計と耐震改修施工に分けられ、企業の選択する設計、施工に対する努力水準をそれぞれ  $e_d$ 、 $e_c$  とする ( $0 \leq e_d, e_c \leq 1$ )。次に、耐震改修設計の成果である設計図書の質は  $q \in \{q_1, q_0\}$  の二種類を仮定する。 $q_1$  は適正なレベルの設計水準を有した設計図書で、適切な施工 ( $e_c = 1$ ) により家計の要求性能を満たす家屋の脆弱性が実現される設計図書を表す。一方、 $q_0$  は適正なレベルに到達していない設計図書であり、施工努力水準に関わらず家計の要求性能は達成されないものとする。設計図書の質  $q \in \{q_1, q_0\}$  が実現する確率  $\rho(q)$  は、企業が選択する設計努力水準  $e_d$  の関数として以下のように仮定する。

$$\begin{pmatrix} \rho(q_1) \\ \rho(q_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_d \\ 1 - e_d \end{pmatrix} \quad (1)$$

耐震改修施工後に実現される家屋の脆弱性 (倒壊確率) も  $Q \in \{Q_1, Q_0\}$  の二種類を仮定する ( $Q_1 < Q_0$ )。なお、家屋の脆弱性  $Q_1$  は、耐震改修によって実現される家屋の脆弱性が家計の要求性能を満たす場合の家屋の脆弱性である。また、 $Q_0$  は要求性能が満たされない場合の家屋の脆弱性を表し、耐震改修を依頼しない場合の家屋の脆弱性と同一であることを仮定する。すなわち、家計の要求性能が施工後に達成されない限り、耐震性の向上は認められないものとする。施工に用いる設計図書の質が  $q \in \{q_1, q_0\}$  のとき、家屋の脆弱性  $Q \in \{Q_1, Q_0\}$  が実現される条件付確率  $\phi(Q|q)$  は、企業が選択する施工努力水準  $e_c$  の関数として以下のように仮定する。

$$\begin{pmatrix} \phi(Q_1|q_1) & \phi(Q_0|q_1) \\ \phi(Q_1|q_0) & \phi(Q_0|q_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_c & 1 - e_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

次に、企業の設計・施工費用関数をそれぞれ各努力水準の関数として  $C_d(e_d)$ 、 $C_c(e_c)$  で表す。なお、設計、施工費用関数に関して  $C_d' > 0, C_d'' < 0, C_d'(0) = \infty, C_d'(1) = 0, C_c' > 0, C_c'' > 0, C_c'(0) = 0, C_c'(1) = \infty$  を仮定する。ここで設計費用関数は、設計が知識ベースの作業である点を考慮して、凹関数を仮定している点は留意する必要がある。また、家計は企業に対して合理的期待予測を行うものとし、家計、企業ともにリスク中立であることを仮定する。

## (2) モデル化

社会的最適モデルを社会厚生を最大化したモデルとして定式化する。家屋の脆弱性が  $Q \in \{Q_1, Q_0\}$  のとき、家計の期待効用  $U(Q)$  は以下の式で表される。

$$U(Q) = rQu(x-L) + (1-rQ)u(x) \quad (3)$$

なお  $x, r, L$  はそれぞれ家計の初期資産、地震の発生確率、被災した場合の被害額を表す。このとき、家屋の脆弱性が  $Q_0$  から  $Q_1$  に低下することによる家計の期待利得の増加は  $U(Q_1) - U(Q_0) = rL(Q_0 - Q_1)$  で表される。また、ここでは再設計、再施工を許容する。すなわち、施工後に要求性能を満たさなかった場合や、設計後に設計図書の質が低いと判明した場合は再度、設計、施工を行えるものとする。図1はモデル化された社会的最適な耐震改修契約の構造を表す。図1中の各状態に対応した価値関数を  $S_i (i=1, \dots, 7)$  とおくと、社会厚生最大化問題は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} S_1 &= \max[S_2, 0] \\ S_2 &= \max e_d S_3 + (1-e_d)S_4 - C_d(e_d) \\ S_3 &= \max e_c S_5 + (1-e_c)S_6 - C_c(e_c) \\ S_4 &= \max[S_2, S_6 - C_c(e_c)] \\ S_5 &= rL(Q_0 - Q_1) \\ S_6 &= \max[S_3, 0] \\ S_7 &= \max[S_4, 0] \end{aligned} \quad (4)$$

## (3) 社会的最適契約

式(4)を解くことにより以下の結果が導かれる。

$$rL(Q_0 - Q_1) - C_c'(e_c^*) - C_d(1) \geq 0 \quad (5)$$

のとき、耐震改修契約の成立は社会的に望ましく、設計努力水準に関しては最大の努力水準  $e_d = 1$  を選択すること、施工努力水準に関しては  $C_c(e_c^*)/e_c^* = C_c'(e_c^*)$  を満たす努力水準  $e_c^*$  を選択し、要求性能  $Q_1$  が実現されるまで施工を繰り返すことが社会的に望ましい、という結果が

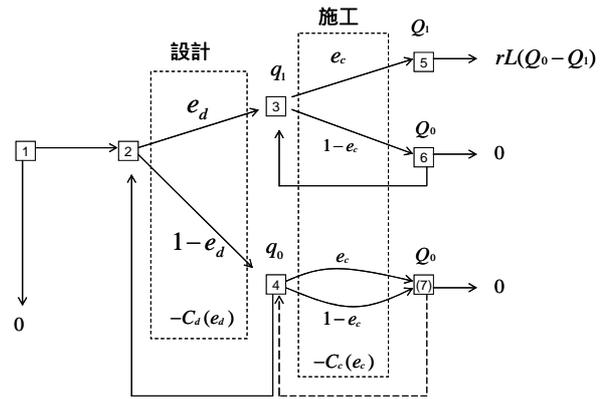


図 - 1. 社会的最適モデル

導かれる。また、 $rL(Q_0 - Q_1) - C_c'(e_c^*) - C_d(1) < 0$  のとき、耐震改修契約は社会的に望ましくない。

## 3. 家屋の脆弱性が観察可能な状況下の耐震改修契約モデル

### (1) モデル化の前提条件

家計は実現された家屋の脆弱性を観察可能、企業の投入する努力水準を観察不可能であることを仮定する。これは基本的なモラルハザードモデルの仮定に対応する。ただし、ここでの重要な仮定として、家計は要求性能が企業により満たされた場合に限り、企業に対して対価  $w$  を支払う契約を結ぶことが可能であることを仮定する。また、企業は再設計、最施工を許容されているものとする。

### (2) モデル化

図2は家屋の脆弱性が観察可能な状況下における耐震改修契約モデルの構造及び論理的順序を表している。初めに家計は企業に対して、要求性能及び対価  $(Q_1, w)$  を提示する。対価  $w$  は耐震改修市場の形態、たとえば完全競争市場など、に依存して定まるものとする。次に、企業は契約の受諾、拒否に関する意志決定を行い、受諾時は設計、施工を行う。このとき、企業の図2中の各状態における意志決定は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} V_1 &= \max[V_2, 0] \\ V_2 &= \max e_d V_3 + (1-e_d)V_4 - C_d(e_d) \\ V_3 &= \max e_c V_5 + (1-e_c)V_6 - C_c(e_c) \\ V_4 &= \max[V_2, V_7 - C_c(e_c)] \\ V_5 &= w \\ V_6 &= \max[V_3, 0] \\ V_7 &= \max[V_4, 0] \end{aligned} \quad (6)$$

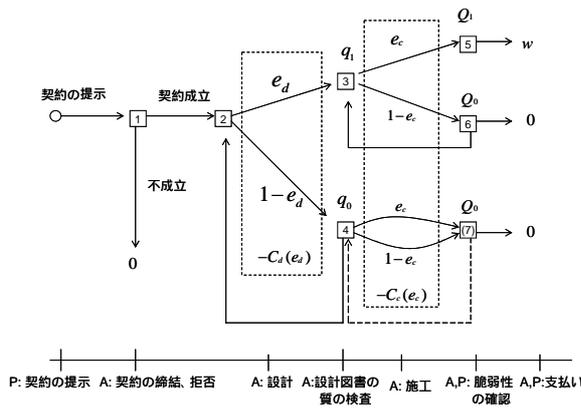


図 - 2. 事後確認可能な状況下における耐震改修契約モデル

### (3) 均衡解

式(5)を解くことにより、以下の均衡解が得られる。契約が成立する場合に企業が選択する努力水準を  $e_d^*$ ,  $e_c^*$  とすると、それぞれ以下の関係式を満たす。

$$e_d^* = 1 \quad (7)$$

$$C_c'(e_c^*) = C_c(e_c^*)/e_c^* \quad (8)$$

すなわち、契約が成立するとき、企業が選択する努力水準は、設計、施工どちらも社会的最適な努力水準に一致する。また、家計が提示した契約を受諾する条件式は以下の式で与えられる。

$$w - C_c(e_c^*)/e_c^* - C_d(1) \geq 0 \quad (9)$$

次に家計は要求性能  $Q_1$  が達成された場合に限り、期待利得は増加し、さらに企業に対して対価  $w$  を支払う。よって以下の条件式を満たす場合に、家計は企業に対して契約を提示する。

$$rL(Q_0 - Q_1) \geq w \quad (10)$$

条件式(6)(7)より、以下の不等式が成立する。

$$rL(Q_0 - Q_1) - C_c'(e_c^*) - C_d(1) \geq 0 \quad (11)$$

この条件式は社会的に耐震改修が望ましい場合の条件式(5)と一致しており、家計と企業の間で耐震改修契約が結ばれる場合はその契約が社会的にも望ましいことがわかる。また、対価  $w$  は企業の選択する努力水準に影響を及ぼさないこともわかる。すなわち、対価を決定する市場の形態は、耐震改修契約の成立によって発生する利得の分配に影響を及ぼすだけで、企業が投入する努力水準の効率性には影響を及ぼさない。

## 4. 性能照査に基づく耐震改修契約モデル

### (1) モデル化の前提条件

先のモデルで示したように、家計が家屋の脆弱性さえ観察可能であれば、社会的最適な耐震改修契約は成立する。しかし、家計が達成された家屋の脆弱性を直接、確認・判断することは非常に難しい。そのため公平な第三者機関をここでは導入する。ただし、第三者機関であっても直接、家屋の脆弱性を検査することは非常に費用高である。そのため、ここでは比較的安価な第三者検査機関による性能照査を導入する。家計、企業はその第三者機関による検査情報に基づき行動することを仮定し、また、設計、施工の二段階の検査を通過した時に限り、家計から企業に対して対価が支払われることとする。

### (2) モデル化

設計検査結果を  $m_j$  , 施工検査結果を  $M_j$  とそれぞれおく ( $j = 0, 1$ )。なお,  $j = 1$  のとき検査通過を意味する。ここでは設計検査, 施工検査, 各検査において, 第三者機関は質の高い設計・施工に対しては完全に見抜くことが出来るが, 質の低い設計・施工に対してはそれぞれ確率  $\alpha$  ,  $\beta$  でしか見抜くことが出来ないことを仮定する。企業が努力水準  $e_d$  を選択した際の検査結果  $m_j$  が提示される条件付確率  $\sigma_d(m_j | e_d)$  はこのとき, 以下のように表される。

$$\sigma_d(m_1 | e_d) = e_d + (1 - e_d)(1 - \alpha) \quad (12)$$

$$\sigma_d(m_0 | e_d) = (1 - e_d)\alpha \quad (13)$$

耐震改修施工に対する努力水準  $e_c$  が選択されたときの, シグナル  $M_j$  が提示される条件付確率  $\sigma_c(M_j | e_c)$  を以下のように表される。

$$\sigma_c(M_1 | e_c) = e_c + (1 - \beta)(1 - e_c) \quad (14)$$

$$\sigma_c(M_0 | e_c) = \beta(1 - e_c) \quad (15)$$

なお, これらは家計, 企業の共通知識とする。図3は契約モデルの論理的順序および, 全体の構造を示したものである。各状態に対応した価値関数をそれぞれ  $W_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) とおくと, 各価値関数は以下の式で表される。

$$W_1 = \max[W_2, 0]$$

$$W_2 = \max[\sigma_d(m_1 | e_d)W_3 + \sigma_d(m_0 | e_d)W_4 - C_d(e_d), 0]$$

$$W_3 = \max[\sigma_c(M_1 | e_c)W_5 + \sigma_c(M_0 | e_c)W_6 - C_c(e_c), 0]$$

$$W_4 = \max[W_2, 0]$$

$$W_5 = w$$

$$W_6 = [W_3, 0]$$

これを解くと以下の均衡解が求まる。

$$\alpha \geq \frac{C_d(1) - C_d(0)}{C_d(1)} \text{ かつ } rL(Q_0 - Q_1^*) - C_c'(e_c^*)/\beta - C_d(1) \geq 0$$

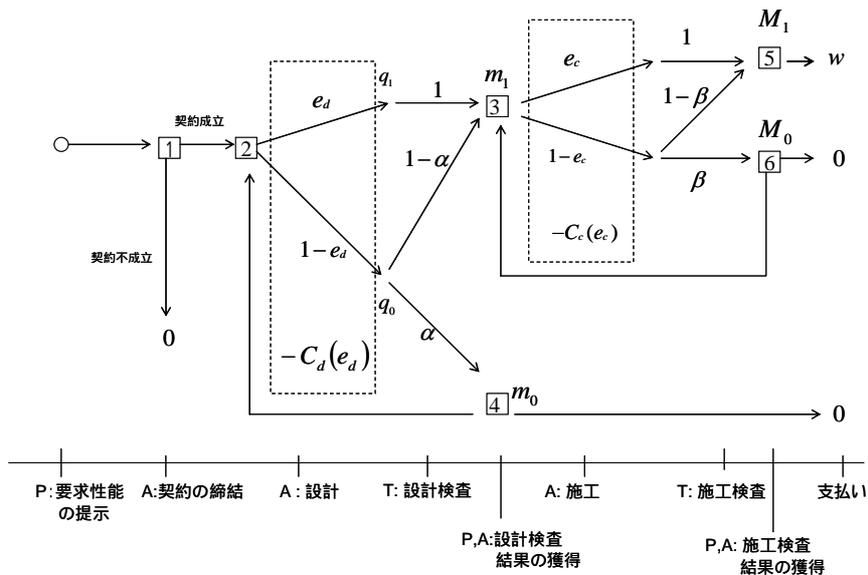


図 - 3. 性能照査を用いた耐震改修契約モデルの構造及び論理的順序

のとき、企業は  $e_d = 1$ ,  $e_c = e_c^{**}$  を選択し、施工検査を通過するまで企業は施工を行うのが最適となる。なお、 $e_c^{**}$  は  $C_c'(e_c^{**}) = \beta C_c(e_c^{**}) / \sigma_c(M_1 | e_c^{**})$  を満たす。このとき、 $e_c^* \geq e_c^{**}$  が成立する。また、上記の条件を満たさない時、耐震改修契約は結ばれない。

### (3) 検査精度の及ぼす影響

$\alpha = 1$ ,  $\beta = 1$  を代入した時、均衡解は社会的最適解と全く同一となる。すなわち、性能照査の枠組みで社会的最適が実現可能であることがわかる。しかし、 $\alpha < 1$  のとき、家計と企業の間で契約が成立するための新しい制約条件  $\alpha \geq \frac{C_d(1) - C_d(0)}{C_d(1)}$  が必要となる。

この不等式を等号で満たす  $\hat{\alpha}$  は、契約成立のための閾値の役割を果たし、この  $\hat{\alpha}$  以上の設計検査精度でなければ契約は成立しない。一方で、施工検査精度  $\beta$  に関しては高ければ高いほど、企業の選択する施工努力水準は社会的最適な施工努力水準に近づくことが分かる。なお、対価  $w$  は先のモデル同様、企業の選択する努力水準には影響を及ぼさない。

## 5. 今後の課題

本モデルでは第三者機関の検査精度は外生的に与えた。しかし、第三者機関に対して検査精度を高く保つインセンティブを与えることが重要であることが本研究より分かる。また、ここでは検査費用に関して明示的に扱って

いないが、いかに検査費用を節約するか、どの主体が負担すべきか等は非常に重要な問題である。これらは今後の課題としたい。

### 参考文献

- 1) Hiroyuki Sakakibara, Norio Okada and Satoshi Tsuchiya: A Model Analysis of Old Wooden Houses Taking into Safety Diagnosis, Annals of Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ, No.42 b-2, 1999.
- 2) Hirokazu Tatano, Hiroshi Kamiya, Satoshi Tsuchiya: Knowledge Acquisition Cost and Aseismic Mitigation Investment by Individual Households, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.1, pp104-1049, 2004.
- 3) Holmstrom, B.: Moral Hazard and Observability, The Bell Journal of Economics, Vol10, pp74-91, 1979
- 4) Mirrless, J.A.: The theory of Moral Hazard and Unobservable Behavior: Part1, Review of Economics Studies, 66, pp3-21, 1999
- 5) Jean-Jacques Laffont, and David Martimort, : The theory of Incentive, Princeton Univ. Press, 2002
- 6) Holmstrom, B. :Moral Hazard in teams, Bell Journal of Economics, Vol.13, No.2, pp324-340, 1982.
- 7) Akerlof, G.: The Market for Lemons, Quality Uncertainty and the Market Mechanism, Quarterly Journal of Economics, 84, pp488-500, 1970
- 8) Sandeep Baliga, and Tomas Sjostrom: Optimal design of peer review and self-assessment schemes, RAND Journal of Economics, Vol.32, No.1, pp27-51, Spring 2001.