

第IV部門 性能照査を用いた耐震改修契約に関する基礎的研究

京都大学大学院情報学研究科 学生員 ○吉田 護 京都大学防災研究所 正会員 多々納 裕一
 京都大学防災研究所 正会員 畑山 満則

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いえない。一般に、家計は工事期間中の努力情報だけでなく、耐震改修設計、施工後の成果情報（設計図書の内容、家屋の脆弱性）に関しても観察するのは容易ではない。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。本研究ではこうした家計の工事の質に関する‘事後確認の困難性’に着目し、企業のモラルハザード問題を解消しうる性能照査について分析する。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。本章の構成は以下の通りである。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、家屋の脆弱性のみ家計が観察可能（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する。

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: 耐震改修を耐震改修設計と耐震改修施工に分別する。企業の設計、施工に対する努力の水準をそれぞれ e_d, e_c で表す ($0 \leq e_d, e_c \leq 1$)。このとき企業の設計、施工費用関数を各努力水準の関数として $C_d(e_d), C_c(e_c)$ で表す。なお、その費用関数は $C'_d \geq 0, C''_d \leq 0, C_d(\cdot) > 0, C'_d(0) = \infty, C'_d(1) = 0, C'_c \geq 0, C''_c \geq 0, C'_c(0) = 0, C'_c(1) = \infty$ を仮定する。耐震改修設計の成果である設計図書の質は $q \in \{\bar{q}, q\}$ の二種類を仮定し、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。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。設計図書に関しては、 \bar{q} 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 ($e_c = 1$) が行われることにより、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。一方で、 q は適正なレベルに到達していない設計図書であり、施工水準に関わらず耐震改修による最終的な家屋の脆弱性は Q_0 が実現される。また、リスク中立的な家計、企業を仮定し、家計は企業に対して合理的期待予測を行うものとする。家計は初期資産 x を有し、地震の発生確率を r 、被災した場合の被害額を L で表す。
 (2) モデル化: 社会的最適モデルを社会厚生（家計の期待効用の増加と企業の利潤の和）を最大化したモデルとして定式化する。

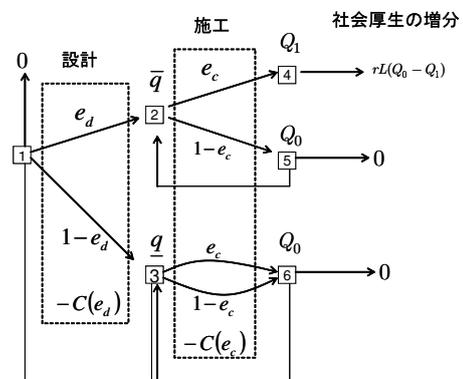


図 1: 社会的最適契約モデル

図 1 は社会的最適契約モデルの構造を表したものである。ここで家計の期待効用が増加するのは Q_1 が実現した場合のみであることを確認出来る。なお、その増分は $rL(Q_0 - Q_1)$ で与えられる。各状態に対応した価値関数を U_i ($i = 1, \dots, 6$) とおく。このとき社会厚生最大化問題は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \max_{e_d} [\max_{e_c} e_d U_2 + (1 - e_d) U_3 - C_d(e_d), 0] \\
 U_2 &= \max_{e_c} e_c U_4 + (1 - e_c) U_5 - C_c(e_c) \\
 U_3 &= \max[U_1 - C_c(e_c), U_6] \\
 U_4 &= rL(Q_0 - Q_1) \\
 U_5 &= \max[U_2, 0] \\
 U_6 &= \max[U_3, 0]
 \end{aligned}$$

これを解くと以下のような均衡解が導かれる。

$rL(Q_0 - Q_1) - \frac{C_c(e_c^{sw})}{e_c^{sw}} - C_d(1) \geq 0$ のとき、耐震改修契約の成立は社会的に望ましく、 $e_d = 1, e_c = e_c^{sw}$ のもとで Q_1 が実現されるまで施工を繰り返すことが望ましい。

なお e_c^{sw} は $C'_c(e_c^{sw}) = \frac{C_c(e_c^{sw})}{e_c^{sw}}$ を満たす．上記の条件を満たさないとき、耐震改修契約は結ばれない．

3. 家屋の脆弱性が観察可能・不可能な状況下の耐震改修契約モデル

紙面の都合上、詳細は割愛するが、ここでの主な結論は、家屋の脆弱性 $Q \in \{Q_1, Q_0\}$ さえ観察可能であれば、社会的最適な耐震改修契約が成立する点である．また、家屋の脆弱性が観察不可能な状況下では、家計が企業に対して合理的期待予測を行う限り、耐震改修契約は成立しないことが示される．

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: 家計は企業の投入する努力水準だけでなく、その成果の質も観察可能でない．ただし、ここでは公平な第三者機関による性能照査を導入し、家計、企業はその検査情報に基づき行動することを仮定する．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報酬が支払われることとする．
- (2) モデル化: 設計検査結果を m_i 、施工検査結果を M_i でそれぞれ表す ($i = 0, 1$)．なお、 $i = 1$ 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できるが、質の低い設計・施工に対してはそれぞれ確率 α, β 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_i が提示される条件付確率 $\sigma_d(m_i|e_d)$ はこのとき、以下のように表される．

$$\begin{aligned} \sigma_d(m_1|e_d) &= e_d + (1 - e_d)(1 - \alpha) \\ \sigma_d(m_0|e_d) &= (1 - e_d)\alpha \end{aligned}$$

次に、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_i が提示される条件付確率 $\sigma_c(M_i|e_c)$ を以下のように表される．

$$\begin{aligned} \sigma_c(M_1|e_c) &= e_c + (1 - \beta)(1 - e_c) \\ \sigma_c(M_0|e_c) &= \beta(1 - e_c) \end{aligned}$$

なお、これらは家計、企業の共通知識とする．

図2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 ($i = 0, \dots, 5$) とおく．このとき各価値関数は以下の式で表される．

$$\begin{aligned} W_0 &= \max[W_1, 0] \\ W_1 &= \max_{e_d} [\sigma_d(m_1|e_d)W_2 + \sigma_d(m_0|e_d)W_3 - C_d(e_d)] \\ W_2 &= \max[\sigma_c(m_1|e_c)W_4 + \sigma_c(m_0|e_c)W_5 - C_c(e_c)] \\ W_3 &= W_1 \end{aligned}$$

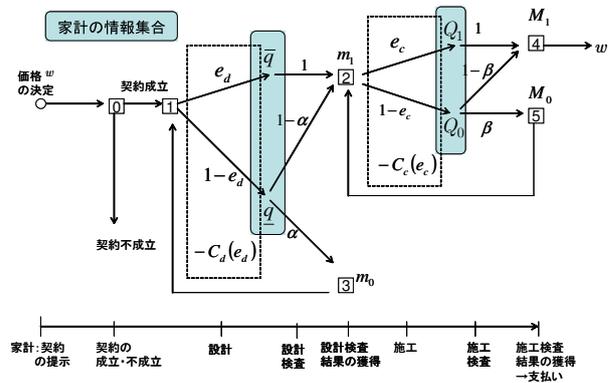


図 2: 性能照査に基づく耐震改修契約モデル

$$W_4 = w$$

$$W_5 = W_2$$

これを解くと以下の均衡解が求まる．なお、以下の条件を満たさない時、耐震改修契約は結ばれない．

$\alpha \geq \frac{C_d(1) - C_d(0)}{C_d(1)}$ かつ $rL(Q_0 - Q_r^*) - \frac{C_c(e_c^{**})}{\sigma_c(M_1|e_c^{**})} - C_d(1) \geq 0$ のとき、 $e_d = 1, e_c = e_c^{**}$ が導かれ、施工検査を通過するまで企業は施工を行う．なお、 e_c^{**} は $\frac{\beta C_c(e_c^{**})}{\sigma_c(M_1|e_c^{**})} = C'_c(e_c^{**})$ を満たし、 $e_c^{sw} \geq e_c^{**}$ が成立する．また、契約が成立する際、企業の選択する各努力水準が報酬 w に依存しないことが示される．

(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、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 α は、契約成立のための閾値の役割を果たし、この α 以上の設計検査精度が要求されることがわかる．一方で、施工検査精度に関しては高ければ高いほど望ましく、社会的に最適な施工努力水準に近づくことが分かる．

3. 今後の課題

本モデルでは第三者機関は外生的に与えた．しかし、検査には費用がかかりそれをどの主体が負担するかは大きな問題となる．また、仕様設計から性能規定へと設計方式が変化し、設計に対して自由度が増していく中で、第三者機関の設計検査精度の問題は今後一層重要視されるであろう．本研究で示したように、設計検査精度の低下し、閾値を下回った場合、契約自体成立しない．また企業と第三者機関が結託した場合、この性能照査による検査情報は意味を持たず、制度そのものが成立しない．検査費用を明示化した分析および第三者機関のインセンティブ設計に関する研究は今後の課題としたい．