

# 宮城県沖地震を対象とした 戸建住宅の地震リスク・マネジメント

住宅・都市研究グループ 研究員 高橋 雄司

## 目次

### はじめに

#### 地震リスク・マネジメントの基礎

- 1) 地震リスク・マネジメントとは？
- 2) ライフサイクル・コストの定式化

#### 事例研究

- 1) 対象戸建住宅の概要
- 2) 対象震源域およびその地震活動
- 3) シミュレーション
- 4) ライフサイクル・コスト評価

#### まとめ

#### 謝辞

#### 参考文献

### はじめに

大地震時の都市災害を軽減するためには、地震危険度の高い地域において安全性の高い構造物を普及させることが重要である。しかしながら、個人や企業が所有する私的な建築物については、原則として各々の費用負担で地震防災対策を講じる必要があり、建築物の所有者自身が、いつ来るかわからない地震に対して投資することは稀である。地震調査委員会により地震危険度が高いと発表されている地域<sup>1) - 5)</sup>ですら、建築物の所有者が地震対策に積極的に投資するケースは少ない。構造体の剛性・耐力・靱性の向上、免震/制振化など、新築あるいは既存建築物のハードな耐震技術は発達している。一方で、建築物の所有者に対して、それらへの投資に導くソフトな技術は確立されておらず、優れたハード技術の普及が効率的に行われているとは言い難い状況にある。地震危険度の高い地域において安全性の高い建築物を効率的に供給していくためには、その所有者に対して、防災対策に投資することのメリットを明示し、

それに導くための地震リスク・マネジメント手法が有効である。

このような背景を受けて筆者は、防災対策への投資促進を目的とした地震リスク・マネジメント手法の開発を行っている<sup>6) - 8)</sup>。この手法においては、地震調査委員会 で用いられた地震発生の確率モデル<sup>1) - 3)</sup>や強震動作成手法<sup>4), 5)</sup>をはじめとする関連分野の最新の知見を直接導入して、建物所有者の総支出(ライフサイクル・コスト:LCC)を高精度で算出でき、合理的な判断を提供できる。当手法の適用例として、実際に東京に建つオフィス・ビルのLCCを計算し、制振ダンパーの設置に初期投資することで、建物所有者のLCCを効果的に軽減できることを示した。

本報告では、更に地震危険度の高い地域に建つ建物の一例として、宮城県仙台市の戸建住宅の地震リスク・マネジメントを示す。当住宅では、地震対策として免震構法が施されており、その初期投資によりLCCを軽減できるかを検証する。対象住宅近くの宮城県沖合では、約37.1年の周期で

宮城県沖地震(マグニチュード7.5程度)が発生し<sup>2)</sup>、仙台市、石巻市をはじめとする近隣の都市に大きな被害を与えてきた<sup>9)</sup>。地震調査委員会・長期評価部会は、宮城県沖地震の30年以内の発生確率を99%と発表している<sup>1)</sup>。また、同委員会・強震動評価部会により作成された宮城県沖地震における強震動予測地図<sup>4)</sup>では、対象住宅付近において震度6弱の強い揺れが予測されている。とりわけ戸建住宅の耐震安全性向上を目的とした地震リスク・マネジメントは急務であり、本報告の事例研究は、そのプロトタイプを示すものである。

本テキストの第 4 章では、地震リスク・マネジメントの基礎を概説する。第 5 章では、宮城県仙台市の戸建住宅を対象とした地震リスク・マネジメントの事例研究を紹介する。第 6 章はまとめである。

## 地震リスク・マネジメントの基礎

### 1) 地震リスク・マネジメントとは？

地震リスク・マネジメントとは、図1のように幾つかの設計案の中から、意思決定者にとって最適な案を選ぶ、いわゆる意思決定問題と定義することができる。各設計案の将来の損失は確定的には予測できず、図1右のような確率密度関数(リスク)で表われ、これに基づいて意思決定が行われる。最小期待損失基準<sup>10)</sup>によると、設計案の中で損失の期待値(平均値)が最小となるものを最適案として選ぶことができる。意思決定者(建物所有者など)自身が設計案を提案し、各設計案のリスクを分析・評価することは難しいので、構造技術者がそれらを代わりに行き、より適切な設計案を選ぶように促すことで地震リスク・マネジメントが行われる。設計案として例えば、建築基準法通りの設計、構造体の剛性・強度・靱性の向上、免震/制振化などが挙げられる。初期設計だけではなく、地震保険への加入、リスクの保有/証券化、事後対応を含む防災対策も設計案としてとらえることができる。より一般的には、これらの組み合わせである。理論上設計案は無数に存在するが、実務の第一段階では、検討対象となり得る適切な設計案を幾つかに絞り込む必要がある。

建築物の地震リスク・マネジメントにおいては、以上の設計に関わる確定的な費用(以降、設計費用と呼ぶ)だけに注目するのではなく、建物の供用期間を通しての総出費の少ない設計案を選ぶことが合理的である。したがって、設計費用と、供用期間中に発生する地震(一般には複数)による損傷費用の総和、すなわち、ライフサイクル・コス

ト(LCC)を意思決定者にとっての損失として捉え、それに基づいて設計案を選ぶべきである。LCCに注目することにより例えば、何らかの耐震部材の設置に初期費用を支払っても、ライフスパンで考えれば出費が少ない設計案を選ぶことができる。

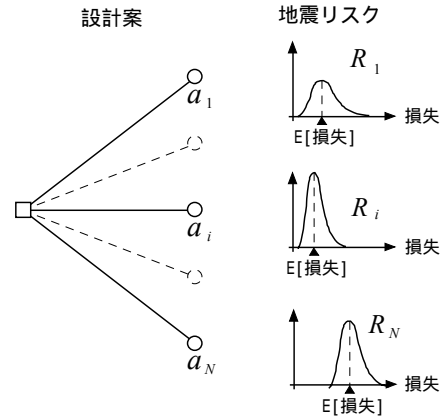


図1 地震リスク・マネジメントにおける意思決定樹木

### 2) ライフサイクルコストの定式化

図1における各設計案のLCCは確定値としては予測できないが、先述の最小期待損失基準<sup>10)</sup>によると、LCCの期待値(平均値)が最小となるものを最適設計案として選ぶことができる。ある設計案の期待LCCは(1)式のように定式化される<sup>6),7)</sup>。

$$E[C_L] = C_I + \sum_{\text{all sources}} \sum_{j=1}^K E[C_D(m_j)] \int_{t_0}^{t_0+t_{life}} Q^{t-t_0} \sum_{n=1}^{\infty} f_{W_n}(t, m_j | W_1 > t_0) dt \quad (1)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は確率変数・の期待値、 $C_L$ はLCC、 $C_I$ は設計費用、 $C_D(m_j)$ はマグニチュード $m_j$ の地震に対する損傷コスト、 $t_0$ は建物の開始時間、 $t_{life}$ は建物の供用期間、 $Q = 1/(1+d)$ は金利係数、 $d$ は利子率、 $f_{W_n}(t, m_j | W_1 > t_0)$ はマグニチュード $m_j$ の地震について、最後の地震から $t_0$ の間に地震が起きていないという条件のもとで、 $n$ 番目の地震発生時刻の確率密度関数、 $\text{all sources}$ は考慮される全ての震源域を指す。

(2)式は、地震の発生を、更新過程のひとつであるポアソン過程とした場合の特殊解である<sup>6),7)</sup>。

$$E[C_L] = C_I + \frac{Q^{t_{life}} - 1}{\ln Q} \times \sum_{\text{all sources}} \sum_{j=1}^K v(m_j) \cdot E[C_D(m_j)] \quad \text{for } Q \neq 1 \quad (2a)$$

$$E[C_L] = C_I + t_{life} \times \sum_{\text{all sources}} \sum_{j=1}^K v(m_j) \cdot E[C_D(m_j)] \quad \text{for } Q = 1 \quad (2b)$$

ここで、 $v(m_j)$ はポアソン・モデルを仮定した際の、マグニチュード  $m_j$ の地震の単位時間あたりの発生率である。

(1)式、(2)式中の  $\sum_{n=1}^{\infty} f_{w_n}(t, m_j | W_1 > t_0)$  あるいは  $v(m_j)$ は、対象震源域の地震活動を示し、地震カタログ<sup>11)-14)</sup>のデータや地震調査委員会・長期評価部会の成果<sup>1)-3)</sup>を直接導入できる。

(1)式および(2)式中の  $C_D(m_j)$ は、図2に示すような断層破壊及び弾性波の伝播、表層地盤の増幅、建物の応答、損傷費用発生までの全てのプロセスを、関連する研究分野（地震学、地盤工学、構造工学など）で開発されたモデルを用いてシミュレーションすることにより算出できる。各分野では、既往の研究の蓄積を踏まえてうえで、更に精度の高いモデルが開発され続けている。そのようなモデルを用いて  $C_D(m_j)$ を計算することで、その時々で精度の高い期待LCCを算出できる。そうした観点から、(1)式および(2)式は、関連分野の最新の知見を体系的に有効活用できるものと位置付けられる。

ただし、図2に示す全ての事象は不確定性を含むので、(そのばらつきを含んだ)複数のサンプルを作成し、各々のサンプルについて  $C_D(m_j)$ を求め、それらの期待値(平均値)として  $E[C_D(m_j)]$ が得られる。つまり、モンテカルロ・シミュレーションにより、 $E[C_D(m_j)]$ を求める。

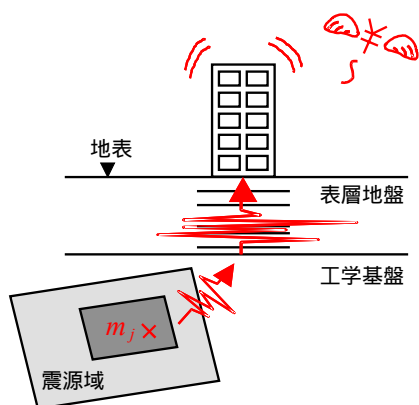


図2 断層破壊から損傷費用発生までのプロセス

各サンプルの  $C_D(m_j)$ を求める際には、理論上、如何なるシミュレーション・モデルでも用いることができる。一般に、詳細なモデルほど(パラメータの設定を含む)解析に

時間と費用が掛かるために、実務上は、顧客(建物所有者など)の要求に応じたメニューを予め用意しておく必要がある。図3には、現時点で想定されるメニューの一例を示す。例えば、顧客から多額の予算のもとに極めて精度の高い結果を要求されれば、ハイブリッド・グリーン関数法<sup>15)</sup>により広帯域の地震動の時刻歴を作成し、表層地盤と建物の相互作用を考慮した3次元有限要素モデルによる地震応答解析を行い、部材ごとの損傷費用を計算する「超詳細法」を提供できる。「詳細法」は、既に文献(6)-(8)に示した通り、現在の耐震設計で用いられている程度の時刻歴解析を伴うモデルの組み合わせである。一方で、「簡易法」<sup>16)</sup>によれば、解析の信頼度は落ちるが、顧客に対して安価かつ瞬時に結果を提示できる。技術者自身が詳細法あるいは超詳細法の前に概算を行う際にも、簡易法は有効である。

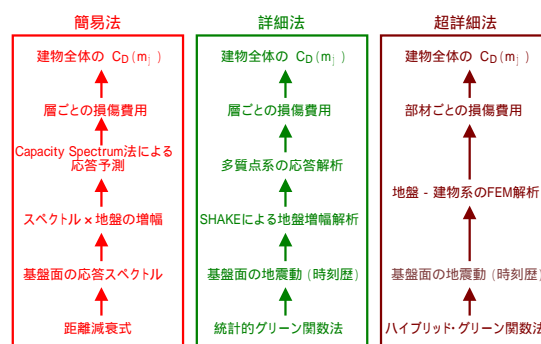


図3  $C_D(m_j)$ を算出するためのシミュレーション・モデルの例

図3に示したメニューは、あくまでも現時点での一例であり、顧客からのニーズや各分野におけるシミュレーション技術の進歩に応じて、随時、柔軟に更新されるべきである。

次章で示す事例研究では、一例として、実務的な時刻歴解析を伴う「詳細法」によりシミュレーションを行っている。

## 事例研究

### 1) 対象戸建住宅の概要

宮城県仙台市の2階建て在来軸組木造住宅(延べ床面積は45.33坪=149.88 $m^2$ )を対象とし、その外観と建設位置をそれぞれ図4および図5に示す。この住宅の地上部分の新築費用は3,000万円であり、免震化工事費用は260万円である(地上部分の約8.7%)。ここでは、免震化せずに基礎を地面に固定した場合(3,000万円)と免震化した場合

(3,260 万円 = 3,000 万円 + 260 万円) の二つの設計案について、(1)式あるいは(2)式を用いて期待 LCC を算出し、免震化に初期投資すべきか否かの検討を行う。意思決定者を建物の所有者兼居住者、住宅の供用期間を 30 年とする。



図4 対象戸建住宅の外観 (提供: ㈱一条工務店)

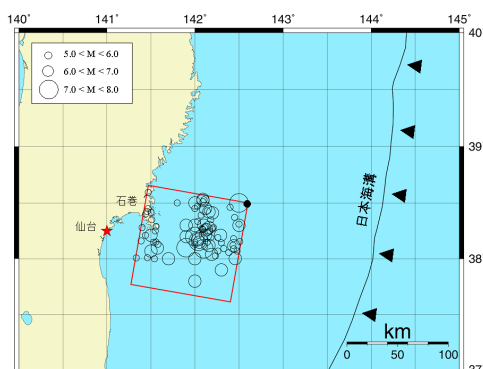
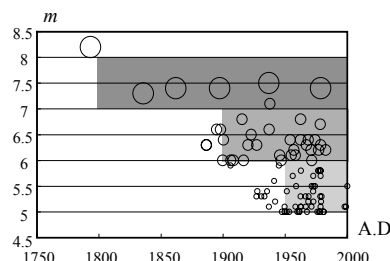


図5 住宅の位置( ), 対象震源域および歴史地震( )

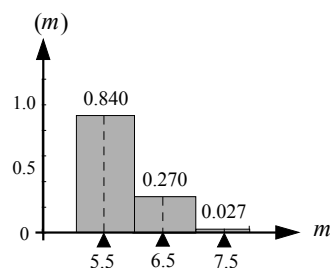
## 2) 対象震源域およびその地震活動

宮城県沖地震の発生が予測される地域を震源域とする。震源域は、文献 2) および 4) を参考に、100km × 106km の長方形、上端深さ 20km、走行 190°、沈み込み角度 20° としている (図 5 中の )。地震カタログ (宇佐美<sup>11)</sup>、宇津<sup>12)</sup>、<sup>13)</sup>、気象庁<sup>14)</sup> に掲載されている、震源域付近で発生した過去の地震を図 5 中にプロットする。マグニチュードの大きさに応じて  $5.0 \leq m < 6.0$ 、 $6.0 \leq m < 7.0$ 、 $7.0 \leq m < 8.0$  の三つのグループに分類されている (各グループのマグニチュードの代表値は、それぞれ  $m_1 = 5.5$ 、 $m_2 = 6.5$ 、 $m_3 = 7.5$  である)。地震発生時間とマグニチュードの関係を示したものが図 6(a) である。 $m_1 = 5.5$  および  $m_2 = 6.5$  の地震はランダムに起きているのに対して、 $m_3 = 7.5$  の地震は周期的に発生していることがわかる。地震発生回数を対象期間で除して、各グループの地震の年発生率を求めたものが図 6(b) である。

地震の発生をポアソン過程とみなして期待 LCC を算出する際には、図 6(b) の年発生率 ( $(5.5) = 0.840$ 、 $(6.5) = 0.270$ 、 $(7.5) = 0.027$ ) を(2)式に代入する。



(a) 時間 - マグニチュード

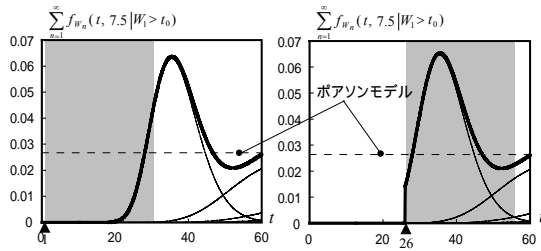


(b) マグニチュード - 年発生率

図6 対象震源域の地震活動

地震発生の非正常性を考慮して、最近では、地震調査委員会が非ポアソン更新過程のひとつである BPT (Brownian Passage Time) モデルを用いて地震の発生確率を算出している<sup>1),3)</sup>。対象期間内に頻繁に起きる地震の発生は、定期的なポアソン過程とみなすことができるが、めったに起きない地震の発生については、BPT モデルなどの非ポアソン更新過程が適している。

宮城県沖地震 ( $m_3 = 7.5$ ) の発生について BPT モデル (平均再現期間 = 37.1 年、 $\lambda = 0.177$ )<sup>1)</sup> を適用すると、その発生率は図 7 のようになる。同図には、比較のためにポアソン・モデルの発生率も破線で示されている。図中の網掛け部分は、住宅の供用期間 (30 年間) を示す。発生率と水平軸の囲む面積が、供用期間中の地震の期待発生回数となる。 $t_0 = 1$  年 (住宅の竣工: 前回の宮城県沖地震の 1 年後) と仮定した場合には、ポアソン・モデルが期待発生回数を過大評価していることがわかる。逆に、住宅の竣工を 2004 年 6 月 12 日 (前回の地震の 26 年後) とした  $t_0 = 26$  年の場合には、過小評価している。地震の発生を BPT モデルとして期待 LCC を算出するために、図 7 の発生率を(1)式に代入する。

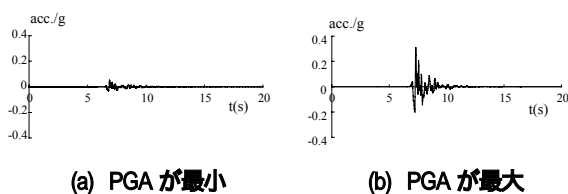


(a)  $t_0 = 1$  (住宅竣工:1979年) (b)  $t_0 = 26$  (住宅竣工:2004年)  
 図7 BPTモデルの地震発生率( $m_3 = 7.5$ )

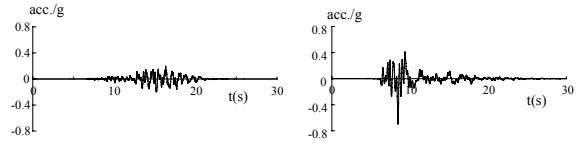
### 3) シミュレーション

(1)式および(2)式中の $E[C_D(m_j)]$ を求めるために、各マグニチュード ( $m_1 = 5.5$ ,  $m_2 = 6.5$ ,  $m_3 = 7.5$ ) の断層破壊に対して、それぞれ100個のサンプルを生成してモンテカルロ・シミュレーションを行う。各マグニチュードについて、100個のサンプルの $C_D(m_j)$ を求め、それらの平均値として $E[C_D(m_j)]$ を計算できる。図2の各プロセスをシミュレーションするためのモデルは、自由に選択することができる。本事例研究では一例として、現在の耐震設計で用いられている程度の時刻歴解析を伴うモデルによりシミュレーションを行った(図3の「詳細法」)

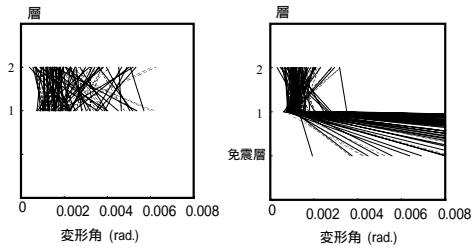
工学基盤面の地震波を統計的グリーン関数法<sup>17),18)</sup>によって生成する。断層パラメータや地下構造などは、地震調査委員会・強震動評価部会で用いられたもの<sup>4)</sup>に基づいて決めた。表層地盤による地震波の増幅をSHAKE<sup>19)</sup>により計算し、建物の地震応答は2質点直列せん断系の弾塑性応答解析により計算する。木造建物の復元力特性は、パイリニア+スリップ<sup>20),21)</sup>とする。地震応答解析により得られた最大層間変形や最大床加速度をフラジリティ曲線に適用し、損傷費用を求めた。損傷費用は、意思決定者(住宅所有者)が負担すべき費用としている。すなわち、建物および家財の修理/再調達費用、大きな被害を受けた場合の避難に要する費用である。シミュレーション結果の一部を図8から図13に示す。



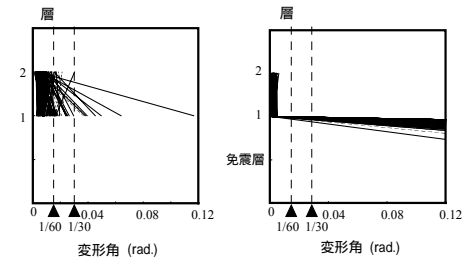
(a) PGAが最小 (b) PGAが最大  
 図8 地表面における地震波の時刻歴( $m_1 = 5.5$ , X方向)



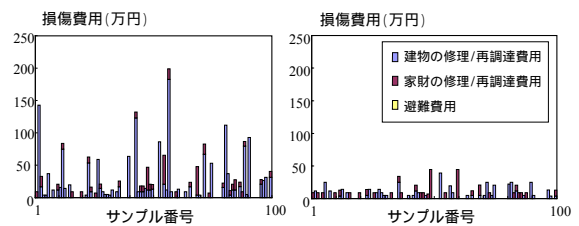
(b) PGAが最大 (b) PGAが最大  
 図9 地表面における地震波の時刻歴( $m_3 = 7.5$ , X方向)



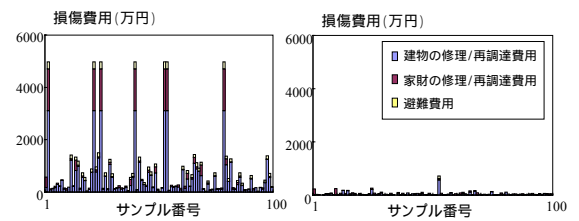
(a) 基礎固定 (b) 免震  
 図10  $m_1 = 5.5$ の地震に対する最大層間変形角(X方向)



(a) 基礎固定 (b) 免震  
 図11  $m_3 = 7.5$ の地震に対する最大層間変形角(X方向)



(a) 基礎固定 (b) 免震  
 図12  $m_1 = 5.5$ の地震に対する損傷費用



(a) 基礎固定 (b) 免震  
 図13  $m_3 = 7.5$ の地震に対する損傷費用

図 12 および図 13 など示す 6 ケース (3 つのマグニチュード×2 つの設計案)それぞれについて、100 サンプルの損傷費用の期待値  $E[C_D(m_i)]$  を求めたものが図 14 である。地震のマグニチュードが大きくなるにつれて、免震化による費用低減効果が大きくなる様子がわかる。

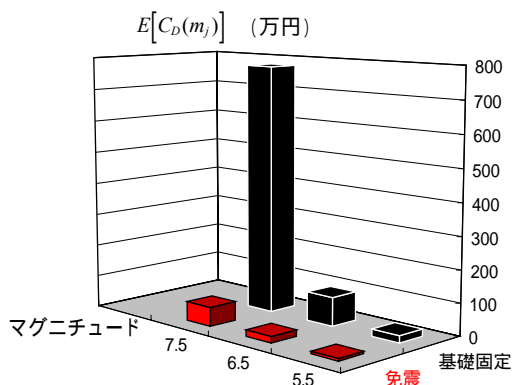


図 14 損傷費用の期待値

#### 4) ライフサイクル・コスト評価

地震の発生をポアソン・モデルとする場合として、(2)式に、図 6(b)の年発生率 ( $m_i$ )および図 14 の期待損傷費用  $E[C_D(m_i)]$ を代入し、建物の供用期間 ( $t_{life}$ )と期待 LCC ( $E[C_L]$ ) の関係を求めたものが図 15 である。 $d = 0\%$  ( $Q=1$ ) としている。図 15 より、免震化することで初期費用は 260 万円高くなるが、5.2 年後以降はその期待 LCC が基礎固定の場合のそれを下回る。建物の供用期間を 30 年間と考えると、免震化することが有利であるといえる。30 年後における基礎固定と免震の期待 LCC の差は 1250 万円であり、これは免震化することにより住宅の所有者が得られる利益の期待値に相当する。

図 16 および図 17 は、 $m_3 = 7.5$  の地震の発生を BPT モデルとして期待 LCC を計算したものである。図 7 の年発生率および図 14 の  $E[C_D(m_i)]$ を(1)式に代入し、建物の供用期間と期待 LCC の関係を求めた。 $d = 0\%$  ( $Q=1$ ) とする。図 16 は  $t_0 = 1$  (住宅の竣工を前回の宮城県沖地震の 1 年後と仮定した場合)の結果であり、比較のためにポアソン・モデルの結果も破線で記してある。実線と破線を比較すると、ポアソン・モデルを適用した場合の期待 LCC が BPT モデルの場合のそれを過大評価していることがわかる。これは、図 7(a)に示したようにポアソン・モデルが  $m_3 = 7.5$  の地震発生率を過大評価し、それが期待 LCC に反映されるためである。これにより、基礎固定と免震の期待 LCC の交点は

8.4 年、30 年後の差は 795 万円となるが、この場合でも免震化が最適設計案となる。図 17 は  $t_0 = 26$  (住宅の竣工を前回の宮城県沖地震の 26 年後とした場合)の結果を示す。 $t_0 = 1$  とは反対に、ポアソン・モデルを適用した場合、期待 LCC を過小評価していることがわかる。基礎固定と免震の期待 LCC の交点は 4.9 年、30 年後の差は 1506 万円となる。図 16 と図 17 を比較すると、想定する地震が起きずに時間が経過し危険度が高まるにつれ、免震化の効果が大きくなることが理解できる。

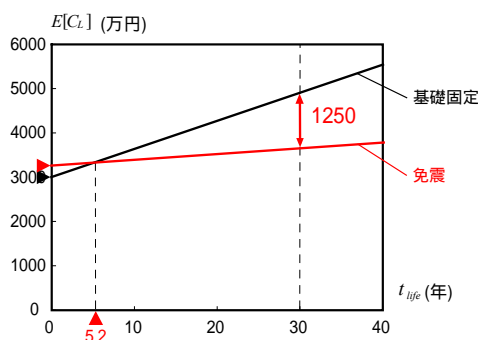


図 15 供用期間 - 期待 LCC (ポアソン・モデル:  $Q=1$ )

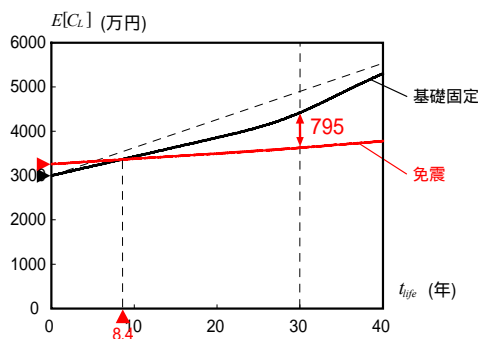


図 16 供用期間 - 期待 LCC (BPT モデル:  $t_0 = 1, Q=1$ )

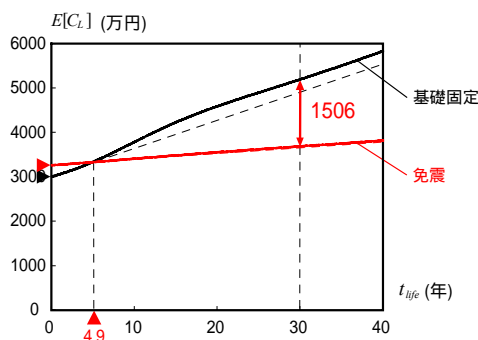


図 17 供用期間 - 期待 LCC (BPT モデル:  $t_0 = 26, Q=1$ )

## まとめ

大地震の発生に備えて、建築物の耐震安全性向上が急がれる。とりわけ戸建住宅の安全性向上を目的とした地震リスク・マネジメントは重要である。

本テキストでは始めに、地震防災対策促進のための地震リスク・マネジメント手法を紹介した。次いで、当手法を宮城県仙台市の戸建住宅に適用した結果を示した。対象住宅近くの宮城県沖合では、宮城県沖地震の30年以内の発生確率が99%と発表され<sup>1)</sup>、また、対象住宅付近において震度6弱の強い揺れが予測されている<sup>4)</sup>ことから、極めて地震危険度の高い地域だと考えられる。ここでは、地震防災対策として免震構法に初期投資するべきか否かを検討した。その結果、免震化することにより、(免震化費用を含む)ライフサイクル・コストが免震化しない場合のそれを下回ることが明らかになった。つまり、免震化に初期投資することで、住宅所有者の総支出を低減できることが示された。

以上のような結果に基づいて、戸建住宅の所有者に対して、免震構法をはじめとする地震防災対策に投資することの意義を説明できる。都市的な観点からは、特に地震危険度の高い地域において、耐震安全性の高い建築物の効率的な普及への寄与が期待される。

本テキストで紹介した地震リスク・マネジメント手法は、関連学問分野の知見を統合し、地震による都市災害の軽減という側面から社会に貢献できるものである。これと同時に、建物所有者の防災対策への関心を高め、防災分野に対する需要を喚起し、経済の活性化にも寄与できる。現在筆者は、公団、設計事務所、ゼネコン、建材メーカー、ソフト・メーカーと共同研究「建築物の地震リスク・マネジメント手法の開発および地震危険度の高い地域の建築物の防災対策への適用(研究代表者:高橋雄司、期間:2002年12月~2005年3月)」を実施し、本テキストで紹介した地震リスク・マネジメント手法の実用化を進めている。このような地震リスク・マネジメント技術を、地震危険度の高い地域において、建物所有者を適切な防災対策に誘導するためのツールとして活用していく。地震リスク分析には、本テキスト第4章で例示したように、地震調査委員会の成果<sup>1)-5)</sup>など関連分野の最新情報を体系的に取り込み、信頼度の高い判断材料を建物所有者に提供していく方針である。新たな成果が得られ次第、改めて報告させて頂きたい。

## 謝辞

本研究は、共同研究「建築物の地震リスク・マネジメント手法の開発および地震危険度の高い地域の建築物の防災対策への適用(研究代表者:高橋雄司、期間:2002年12月~2005年3月)」において筆者が行ったものである。当共同研究に参加されている都市基盤整備公団、(株)日建設計、(株)鴻池組、(株)竹中工務店、(株)ピーエス三菱、(株)フジタ、三井住友建設(株)、(株)ブリヂストン、(株)構造計画研究所の皆様から、貴重な意見を賜りました。

本テキスト第4章の事例研究において対象とした戸建住宅のデータは、(株)一条工務店の穴原一範氏よりご提供頂きました。免震装置のデータについては、(株)ブリヂストンの正木信男氏よりご提供頂きました。木造戸建住宅の地震応答解析および損傷モデルについて、国土技術政策総合研究所の河合直人氏および建築研究所の五十田博氏より貴重なアドバイスを頂きました。宮城県の表層地盤のモデルについて、国土技術政策総合研究所の飯場正紀氏および建築研究所の鹿嶋俊英氏よりご教示頂きました。

以上、記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会「長期的な地震発生確率の評価手法について」、  
<http://www.jishin.go.jp/main/>、2001年
- 2) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会「宮城県沖地震の長期評価」、<http://www.jishin.go.jp/main/>、2001年
- 3) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会「南海トラフ地震の長期的評価」、<http://www.jishin.go.jp/main/>、2001年
- 4) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会「宮城県沖地震を想定した強震動評価手法について」、  
<http://www.jishin.go.jp/main/>、2002年
- 5) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会「南海トラフ地震を想定した強震動評価手法について(中間報告)」、  
<http://www.jishin.go.jp/main/>、2001年
- 6) Takahashi, Y., Der Kiureghian, A. and Ang, A.H-S. (2002). "Decision methodology in seismic risk management of a single building based on minimum expected life-cycle cost", *UCB/SEMM Report-2002/02*, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA.

- 7) Takahashi, Y., Der Kiureghian, A. and Ang, A.H-S. (掲載決定). “Life-cycle cost analysis based on a renewal model of earthquake occurrences”, *Earthquake Engineering & Structural dynamics*.
- 8) 高橋雄司「建築物の地震リスク・マネジメント」2003年度日本建築学会大会(東海) 構造部門(振動)パネルディスカッション資料、リスク制御の視点からの構造性能表示、pp.38-47、2003年9月
- 9) 日本建築学会「1978年宮城県沖地震災害調査報告」1978年
- 10) A. Ang and W. H. Tang (訳:伊藤学・亀田弘行・黒田勝彦・藤野陽三)「土木・建築のための確率・統計の応用」丸善、1988年1月
- 11) 宇佐美龍夫「新編・日本被害地震総覧(増補改訂版416-1995)」東京大学出版会、1996年
- 12) 宇津徳治「日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表:1885年~1980年」地震研究所彙報、第57号、pp.401-463、1982年
- 13) 宇津徳治「日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表:1885年~1980年(訂正と追加)」地震研究所彙報、第60号、pp.639-642、1985年
- 14) 気象庁(編集)「地震年報平成12年(CD-ROM版)」気象業務支援センター(発行)2000年
- 15) Kamae, K., Irikura, K. and Pitarka, A. (1998). “A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green’s function”, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 2, pp.357-367.
- 16) 高橋雄司「簡易シミュレーションによる建築物の地震リスク分析」構造工学論文集 Vol.50B、2004年3月(投稿・査読中)
- 17) Boore, D.M. (1983). “Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra”, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 6, pp.1865-1894.
- 18) 釜江克宏・入倉孝次郎・福地保長「地域的なスケール側に基づいた大地震時の強震動予測 - 統計的波形合成法による予測 - 」日本建築学会構造系論文集、第430号、pp.1-9、1991年12月
- 19) Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B. (1972). “SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites”, *Report No. UCB/EERC 72/12*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- 20) 河合直人「工学的基盤の加速度応答スペクトルを用いた建築物の耐震性能評価(その12) - 木造耐力壁構造に対する適用 - 」日本建築学会大会学術梗概集(中国) B-2冊分、pp.1147-1148、1999年9月
- 21) 五十田博「6.5 時刻歴地震応答解析による耐震設計法」木質構造の新しい耐震設計の考え方(2001) pp.273-278、日本建築学会、2001年