

# 地震リスク・マネジメント技術を活用した 地震対策の普及

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・マネジメント技術の概要

- 1) 基本概念
- 2) ライフサイクル・コストの定式化

#### 宮城県の集合住宅を対象とした適用事例

- 1) 建物概要
- 2) 対象震源域
- 3) シミュレーション
- 4) ライフサイクル・コスト評価

#### 研究成果を活用した地震対策の普及

- 1) 共同研究
- 2) 一般市民向け防災セミナー

### おわりに

#### 参考文献

### はじめに

大地震による建物被害を軽減するためには、事前に適切な防災対策を施しておくことが有効である。しかしながら、個人や企業が所有する私的な建物については、原則として各々の費用負担で地震対策を講じる必要があり、建物の所有者自身が、いつ来るかわからない地震に対して投資するケースは多くない。構造体の強度/靱性の向上、免震化、制振化など、新築あるいは既存建物のハードな地震対策技術は進歩している。一方で、それらに投資することのメリットを建物所有者に説明するためのソフトな技術は、現段階では十分に整備されていない。

このような背景を受けて高橋らは、建物所有者を地震対策に誘導することを目的とする、地震リスク・マネジメント手

法の開発を行ってきた<sup>1)-4)</sup>。本手法では、建物所有者の総支出(ライフサイクル・コスト:LCC)を地震リスクととらえ、複数の設計案の中から、LCCを最小にする最適案を建物所有者に提示できる。特に地震危険度の高い地域では、強度/靱性の向上、制振、免震などの地震対策に初期投資することで、LCCが軽減されることを説明できる。都市的な観点からは、このような地震リスク・マネジメント技術を用いることで、耐震安全性の高い建物の普及に寄与できる。

各設計案のLCCを計算する際には、政府の地震調査委員会・長期評価部会による地震発生の確率モデル<sup>5)-7)</sup>や、同委員会・強震動評価部会による強震動作成手法<sup>8), 9)</sup>など関連学問分野の最新の知見を直接的に利用できる。すなわち、建物所有者に対して合理的な判断材料を提示できる。

本稿の第 1 章では、以上の地震リスク・マネジメント技術の概要を述べる。第 2 章では、技術の適用事例として、宮城県仙台市の集合戸建住宅を対象とした地震リスク・マネジメントを示す。対象建物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 前後）が発生し、長期評価部会は、30 年以内の発生確率を 99% と発表している<sup>5)</sup>。対象建物の耐震診断の結果、何らかの耐震改修が必要であることが判明しており、ここでは強度型・制振・免震の各種改修による LCC 低減効果を検討する。第 3 章では、地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策普及への取り組みとして、現在進行中の共同研究と、その一貫として開催した一般市民向け防災セミナーを紹介する。第 4 章はまとめである。

## 地震リスク・マネジメントの概要

### 1) 基本概念

本節では、高橋らが開発した地震リスク・マネジメント技術<sup>1)-4)</sup>の基本概念を概説する。

地震リスク・マネジメントを、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。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）<sup>10)</sup>で表わされ、これに基づいて意思決定が行われる。設計案として例えば、建築基準法通りの設計、構造体の強度 / 靱性の向上、免震 / 制振などが挙げられる。構造設計だけでなく、地震保険 / 地震デリバティブの購入、リスクの保有 / 証券化、事後対応も設計案としてとらえることができる。

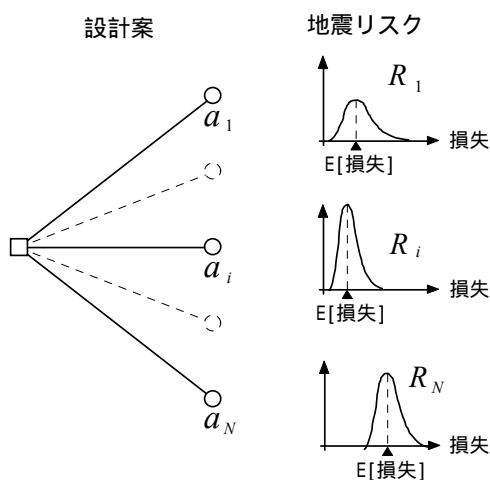


図 1 地震リスク・マネジメントにおける意思決定樹木

建物の地震リスク・マネジメントにおいては、以上の設計に関わる初期費用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（ライフサイクル・コスト：LCC）を地震リスクとしてとらえ、それに基づいて設計案を選ぶことが合理的である。地震リスク・マネジメントで考慮すべき LCC は、初期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で表わすことができる。

### 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、最小期待損失基準<sup>11)</sup>に従うと、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>1)</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、 $C_I$  は初期費用、 $C_D(m_j)$  はマグニチュード  $m_j$  の地震に対する損傷費用、 $t_0$  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、*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>1)</sup>。

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

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

ここで、 $\nu(m_j)$  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。

これに対して(1)式中の  $f_{W_n}(t, m_j | W_1 > t_0)$  は、任意の非ポアソン・モデルとする場合の発生率である。地震調査委員会・長期評価部会は、近年の地震学の発展を踏まえて、非ポアソン・モデルのひとつである Brownian Passage Time (BPT) モデルを用いて地震の発生確率を算出している<sup>5)-7)</sup>。(1)式の  $f_{W_n}(t, m_j | W_1 > t_0)$  には、そのモデルあるいは計算結果をそのまま導入できる。

(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。特に地震動作成に関しては、経験的距離減衰式、統計的グリーン関数法、ハイブリッドグリーン関数法など地震調査委員会・強震動評価部会の手法およびパラメータ<sup>8),9)</sup>をそのまま利用することができる。

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。

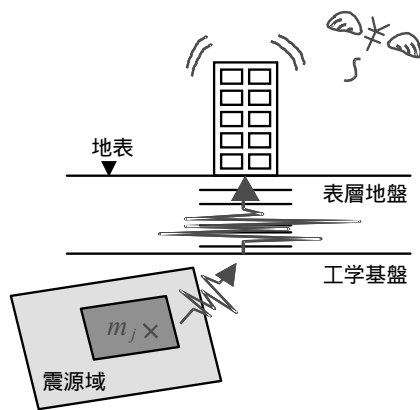


図2 断層破壊から損傷費用発生までのプロセス

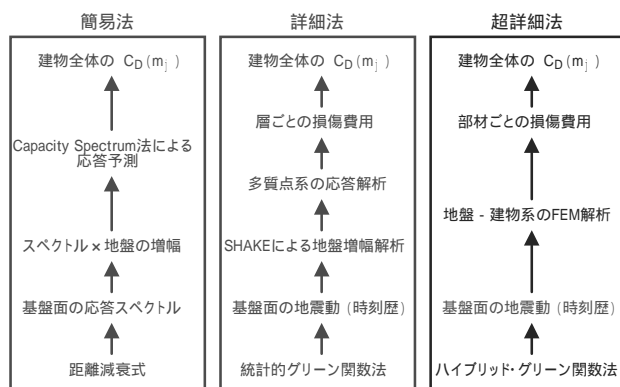


図3  $C_D(m_j)$ を算出するためのシミュレーション・モデルの例

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。しかしながら実用上は、顧客(建物所有者など)の要望に応じたメニューを予め用意しておくことが現実的である<sup>2),3),4)</sup>。図3には、現時点で想定されるメニューの一例を示す。このメニューはあくまでも現時点での一例なので、顧客からのニーズや各研究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。

以上のように(1)式あるいは(2)式は、関連研究分野の知見を最大限に導入することを可能とし、その時々で信頼度の高い判断材料を提供できるものである。ただし、現段階で図2の各事象を完全に模擬できるモデルを得るのは困難であるために、どのようなモデルを使うにしても、適用限界を明確にしておく必要がある。

## 宮城県集合住宅を対象とした適用事例

### 1) 対象建物

ここでは、地上11階建ての既存集合住宅(図4(a))を対象として、地震リスク・マネジメント技術の適用例を示す。この建物に対する耐震診断の結果、現状では安全性能が非常に低く( $I_s = 0.3$ 程度)何らかの耐震改修が必要と判断された。改修前の建物概要は次の通りである。

・構造:	鉄骨鉄筋コンクリート造
	X方向: ラーメン Y方向: 独立連層耐震壁
・延べ床面積:	6,062 m <sup>2</sup>
・総戸数:	120戸(2階以上各階12戸、1階はピロティー)
・再調達価格:	8億4,500万円
・建物位置:	緯度 38.19°、経度 140.91°
	(宮城県仙台市・2種地盤: 図5中)

建物の改修方法を検討するために、無補強(何もせずに放っておく)・強度型・制振・免震の4つの地震対策を比較する。強度型・制振(制震)・免震で改修した場合の建物の概観を、それぞれ図4(b)、図5(c)、図5(d)に示す。それぞれの改修費用は以下の通りと試算された。無補強: 0万円、強度型: 8,400万円、制振: 2億8,500万円、免震: 3億7,800万円。



(a) 改修前



(b) 鉄骨ブレースによる強度型改修



(c) 粘性ダンパーによる制振改修



(d) 免震改修

図4 対象建物の外観

## 2) 対象震源域

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(6)および(8)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 )、原点(図5中の 印)の緯度・経度をそれぞれ38.50°、142.60°とした。地震カタログ(宇佐美<sup>12)</sup>、宇津<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である。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7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7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。

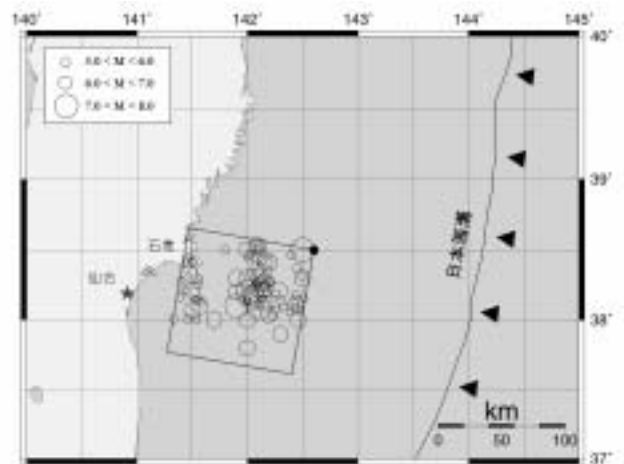


図5 建物位置( ), 対象震源域( )および歴史地震( )

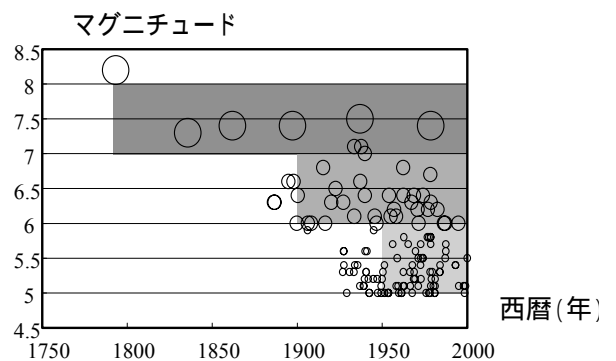


図6 時間 - マグニチュード

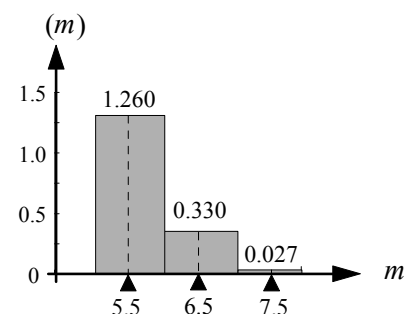


図7 マグニチュード - 年発生率(ポアソン・モデル)

対象期間内に頻繁に起きる地震の発生は、定常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 (Brownian Passage Time) モデルなどの非ポアソン更新過程が適している<sup>5)~7)</sup>。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>9)</sup> を適用すると、その発生率は図 8 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 (0.027) も破線で示されている。住宅の竣工を 2005 年 6 月 12 日 (前回の地震の 27 年後) とした  $t_0 = 27$  年の場合には、ポアソン・モデルが発生率を過小評価していることがわかる。地震の発生を BPT モデルとして期待 LCC を算出する際には、図 8 の発生率を(1)式に代入する。

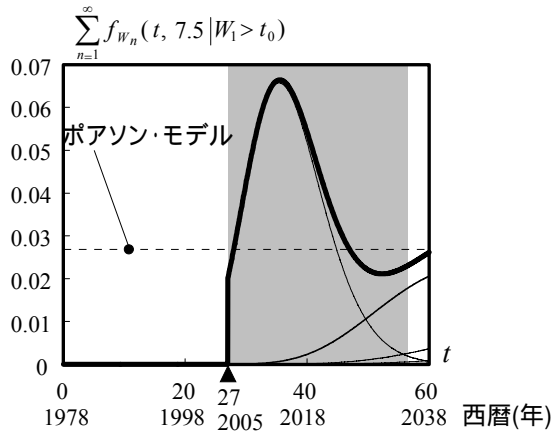


図8 宮城県沖地震の発生率 (BPTモデル:  $m_3 = 7.5$ ,  $t_0 = 27$  years)

### 3) シミュレーション

(1)式および(2)式中の期待損傷費用  $E[C_D(m_i)]$  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、図 2 に示す事象のばらつきを考慮して、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 サンプルの損傷費用  $C_D(m_i)$  を求め、それらの平均値として  $E[C_D(m_i)]$  を計算する。

第 2 章の 2) 節に述べたように、図 2 の各事象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う (図 3 の「詳細法」)。

具体的には、工学基盤面の地震波を統計的グリーン関数法<sup>8), 9)</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>8)</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>15)</sup>により計算し、建物の地震応答は 11 質点直列せん断系の弾塑性応答解析により計算する。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

イ曲線に適用し、各サンプルの損傷費用  $C_D(m_i)$  を求める。 $C_D(m_i)$  は、意思決定者 (住宅所有者) が負担する費用として、住宅および家財の修理 / 再調達費用、大きな被害を被った際の避難費用の合計とした。シミュレーション結果の一部を図 9 から図 14 に示す。

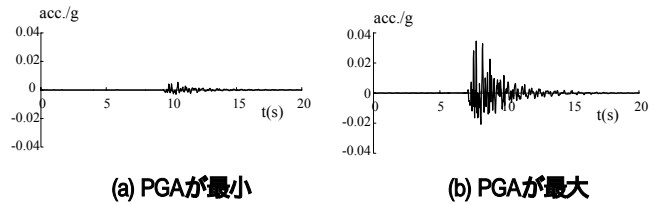


図9 地震加速度の時刻歴 ( $m_1 = 5.5$ )

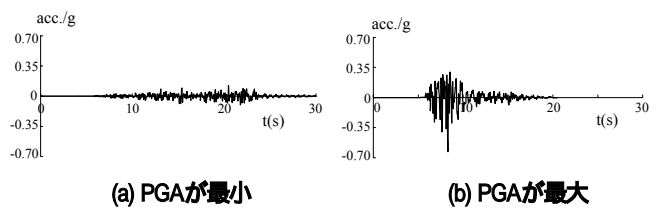


図10 地震加速度の時刻歴 ( $m_3 = 7.5$ )

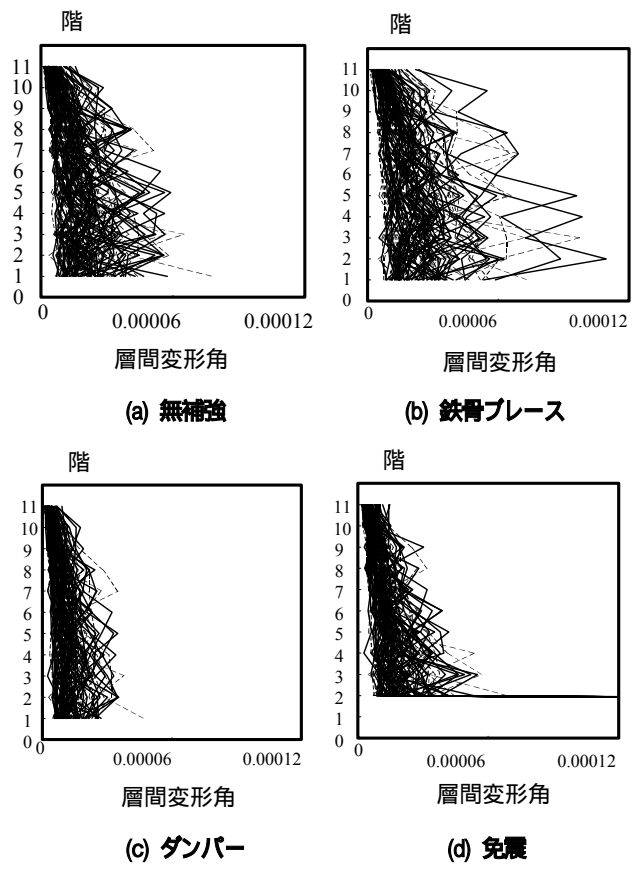


図11 建物モデルの最大層間変形角 ( $m_1 = 5.5$ )

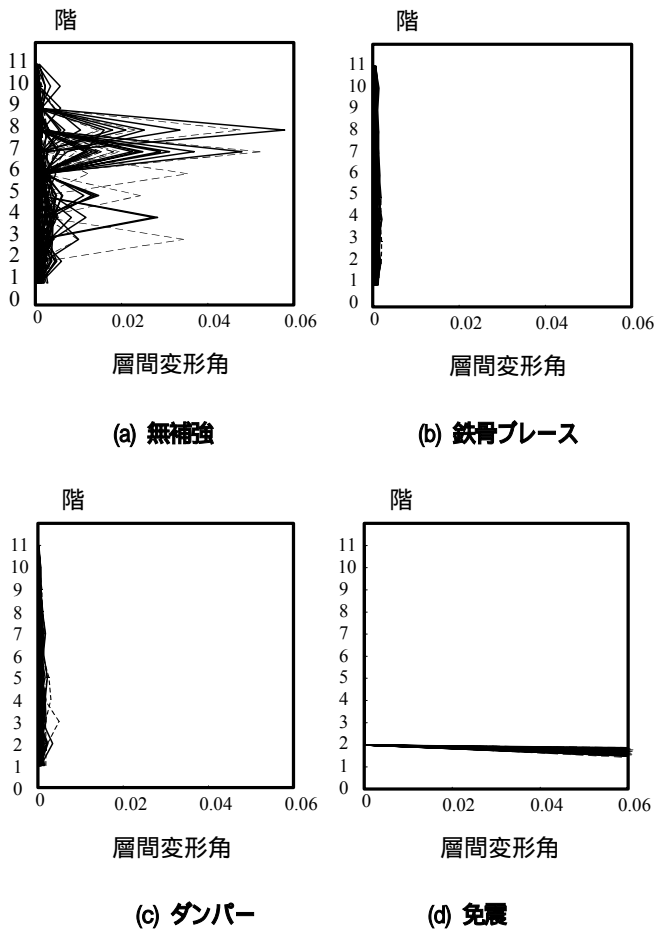


図12 建物モデルの最大層間変形角 ( $m_3 = 7.5$ )

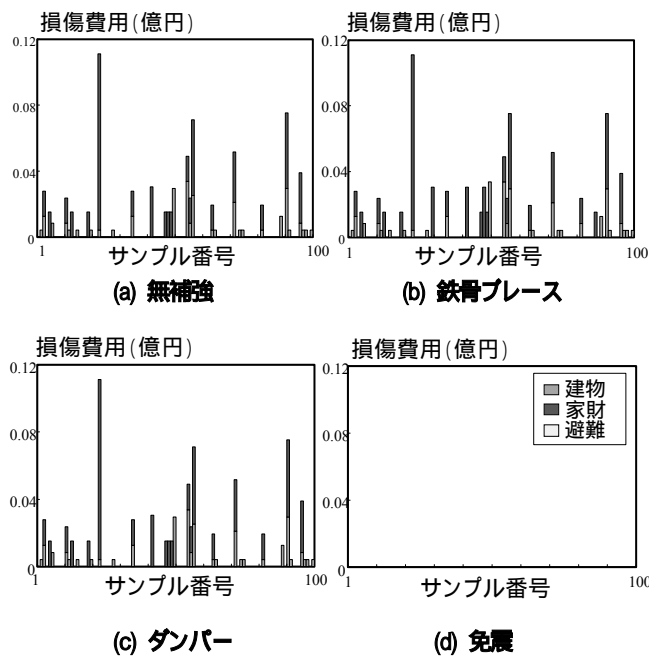


図13 損傷費用 ( $m_1 = 5.5$ )

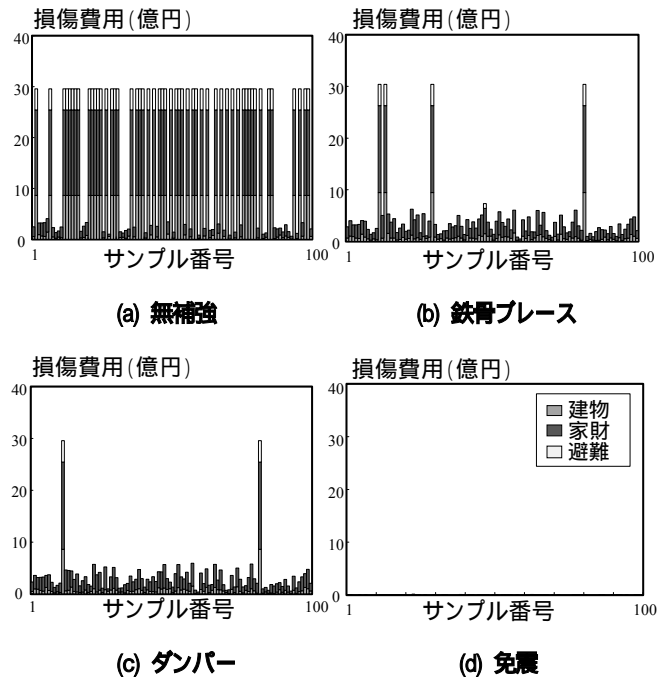


図14 損傷費用 ( $m_3 = 7.5$ )

図13 および図14などに示す12ケース(3つのマグニチュード×4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  $E[C_D(m_j)]$  を求めたものが図15である。地震のマグニチュードが大きくなるにつれて、改修による損傷費用の低減効果が大きくなる様子がわかる。なお、期待損傷費用  $E[C_D(m_j)]$  を耐震性能指標の一つと考えれば、図15は性能設計における性能マトリクスにも対応する。

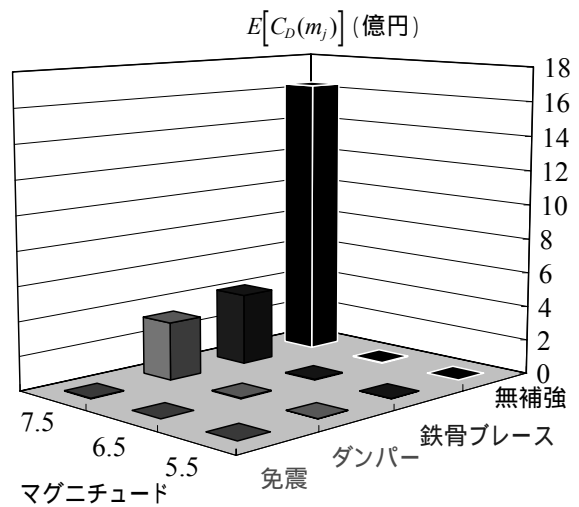


図15 期待損傷費用

#### 4) ライフサイクル・コスト評価

図16は、地震の発生をBPTモデル( $t_0 = 27$ :住宅の竣工を前回の宮城県沖地震の27年後、2005年6月12日)とした場合の、建物の残りの使用期間( $t_{life}$ )と期待LCC( $E[C_L]$ )の関係である。図8の年発生率および図15の $E[C_D(m_i)]$ を(1)式に代入して計算した。図16より、残りの使用期間を12年間以上とすると、免震改修の期待LCCが最も小さくなり、これが最適案となることがわかる。3~12年間程度とすると鉄骨ブレースによる強度型改修、3年間未満だと無補強がそれぞれ最適案になる。これは、建物を長く使うほど、(地震を受ける率が高くなることから)初期投資を増やして高度な改修方法を採用した方が良いことを示している。

以上のような結果を提示することで、建物所有者に対して、地震対策に初期投資することのメリットを説明できる。

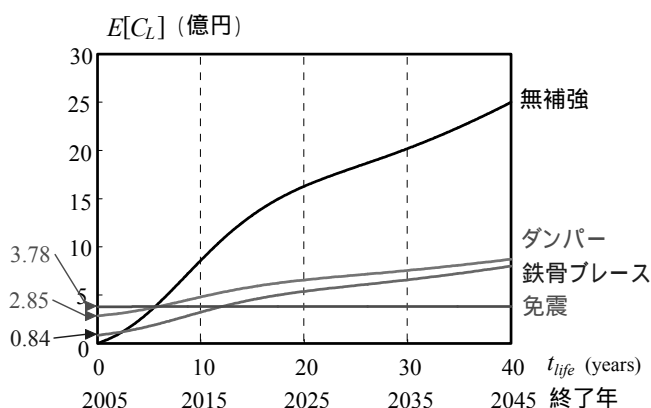


図16 残りの使用期間 - 期待LCC (BPTモデル:  $t_0 = 27$  years)

#### 研究成果を活用した地震対策の普及

##### 1) 共同研究

本稿の第 章および第 章で紹介した地震リスク・マネジメント技術の実用化を目指して、12 機関による共同研究を展開中である。共同研究相手機関は、建築研究開発コンソーシアム (<http://conso.jp/>) で募集した。共同研究の概要を以下に記す。

名称：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物の防災対策への適用  
略称：建築物の地震リスク・マネジメント手法の開発と実用化  
代表者：高橋雄司 (建築研究所)  
期間：2002年12月~2005年3月(2年4ヶ月間)  
参加機関：  
【公的機関】(独)建築研究所、(独)都市再生機構

【設計事務所】(株)日建設計

【ゼネコン】(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)

【建材メーカー】(株)ブリヂストン

【ソフトメーカー】(株)構造計画研究所

【住宅メーカー】(株)一条工務店、大和ハウス工業(株)

当共同研究では、地震リスク・マネジメント技術を実用化するために、地震リスク分析のためのソフトウェアを共同開発した。それを用いて実建物を対象とした事例研究を行った。事例研究では、地震危険度の高い宮城県と高知県のそれぞれに建物が建っていると仮定し、強度型・制振(制震)・免震などの事前対策に投資することの効果を検証している。各企業が対象とした建物は、それぞれが実際に改修などを行った、あるいは検討した物件である。各企業が事例研究で扱った建物を図17から図24に示す。



図17 鉄骨ブレースによる事務所建物の強度型改修  
(株)ピーエス三菱提供



図18 鋼材ダンパーによる庁舎の制振改修  
(株)日建設計提供



図19 粘弾性ダンパーによる共同住宅の制震改修  
(株河池組提供)



図20 粘性ダンパーによる病院の制震改修  
(三井住友建設㈱提供)



図21 オイル・ダンパーによる工場の制震改修  
(株構造計画研究所提供)



図22 免震化された新築オフィス・ビル  
(株フジタ提供)



図23 新築の免震木造住宅  
(株一条工務店提供)



図24 新築の免震鉄骨住宅  
(大和ハウス工業㈱提供)

## 2) 一般市民向け防災セミナー

前節で紹介した共同研究の活動の一環として、宮城県および高知県において、一般市民（主に建物所有者／管理者）向けの地震防災セミナーを開催した。両セミナーでは、各企業が作成した事例に基



づいて、地震対策の効果を説明した。各企業からの講演に加えて、パネル・模型展示、個別耐震相談なども行った。両県におけるセミナーの概要を表1にまとめる。図25と図26はそれぞれ、宮城県と高知県におけるセミナーの様子である。

両県とも多くの方々にご来場頂き、会場はほぼ満員であった。各企業の講演に対する質問や議論もあり、来場者（建物所有者）から耐震相談を依頼されるケースも報告された。研究成果を一般市民に還元するための初の試みとして、成功を収められたと総括している。一方で、一般市民への周知、セミナーの構成、配布資料の内容、会場設営など、幾つかの課題も残された。事後に問題点を整理したので、それらを解決しながら、今後さらに良いイベントを開催したい。

表1 一般市民向け防災セミナーの概要

場所	宮城県	高知県
想定地震	宮城県沖地震 ( $M=7.5$ 、30年間99%) <sup>5)</sup>	南海地震 ( $M=8.4$ 、30年間40%) <sup>7)</sup>
主催	建研、県、研究会、 地元協議会	建研、県、研究会
日時	11月5日(金) 13:00~17:00	11月11日(木) 12:30~17:00
構成	講演、模型・パネル展示、 個別相談	講演、模型・パネル展示、 個別相談
参加者数	約150人	約140人
報道	読売新聞(仙台圏) 8/31 建設産業新聞 10/25 不動産経済通信 10/26 読売新聞(仙台圏) 11/6	建設産業新聞 10/25 不動産経済通信 10/26 高知新聞 11/12 NHK 高知 11/11



(a) 講演中の会場



(b) 各企業の模型・パネル展示

図25 宮城県におけるセミナーの様子



(a) 講演中の会場



(b) 各企業の模型・パネル展示

図26 高知県におけるセミナーの様子

#### おわりに

本稿の第 章では、地震リスク・マネジメント技術の概要を述べた。本手法では、関連研究分野(地震学、地盤工学、構造工学など)の最新の知見を導入して地震リスクを分析できる。したがって、建物所有者が地震対策を検討する際に、合理的な判断材料を提供できる。

第 章では、地震リスク・マネジメント技術の適用事例として、宮城県仙台市の集合戸建住宅を対象としたケースを示した。対象建物の耐震診断では、現状のままでは非常に耐震性能が低いことが判明している。また、宮城県沖地震（マグニチュード 7.5 前後、30 年以内の発生確率 99%）の震源域の近くに建っていることから、何らかの耐震改修が必要である。ここでは、強度型・制振・免震の各種改修による LCC 低減効果を比較し、建物を長く使うほど地震対策に初期投資しておくべきであることが検証された。地震危険度の高い地域における防災対策への誘導は喫緊の課題であり、本事例はそのプロトタイプと位置付けられる。

第 章では、地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策普及への取り組みとして、現在進行中の共同研究と、その一貫として開催した一般市民向け防災セミナーを紹介した。今後も、このような活動を通じて、研究成果を社会に還元していく方針である。

なお、本稿に記した内容（技術の概要、共同研究、研究成果の活用など）の詳細については、建築研究所から「建築研究資料」を出版する予定である。興味のある方は、こちらを参照されたい。

#### 参考文献

- 1) Takahashi, Y., Der Kiureghian, A. and Ang, A.H-S. (2004). "Life-cycle cost analysis based on a renewal model of earthquake occurrences", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 33, pp. 859-880.
- 2) 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、2003.9
- 3) 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、pp.453-463、2004.3
- 4) 高橋雄司・正木信男・穴原一範・五十田博「地震危険度の高い地域の建物の地震リスク・マネジメント」日本建築学会構造系論文集、第 591 号、2005.5（掲載決定）
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 日本工業標準調査会「JIS Q 2001 リスクマネジメントシステム構築のための指針」日本規格協会、2001.5
- 11) 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、1988.1
- 12) 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
- 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」地震研究所彙報、第 57 号、pp.401-463、1982
- 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）2002
- 15) 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.