

地震危険度の高い地域の建物を対象とした地震リスク・マネジメント SEISMIC RISK MANAGEMENT OF A BUILDING IN SEISMICALLY ACTIVE REGION

高橋 雄司*, 正木 信男**, 穴原 一範***, 五十田 博****
Yuji TAKAHASHI, Nobuo MASAKI, Kazunori ANAHARA
and Hiroshi ISODA

This paper presents an application procedure of the up-to-date knowledge obtained in the related academic fields, particularly seismological models for the estimation of earthquake occurrence probabilities and strong ground motions, to seismic risk management of buildings in seismically active regions. As an example, a wooden single house in Miyagi prefecture is dealt with. This house is exposed to intensive seismic hazards since it is located near the seismic source of the Miyagi-ken-oki Earthquake ($M_W = 7.5$), which was forecasted to occur in 99 % probability within the next 30 years. Preparing for such earthquakes, the house is base-isolated. In order to examine the effectiveness of the base-isolation system, the life-cycle costs of two design alternatives, one is the base-fixed house and the other is base-isolated one, are compared. They are computed by utilizing the advanced seismological models developed by the Headquarters for Earthquake Research Promotion. The analysis demonstrates that the initial investment in the base-isolation system reduces the life-cycle cost imposed on the owner of the house.

Keywords: Seismic risk management, Life-cycle cost, Earthquake probability, Strong ground motion, Wooden house, Base isolation
地震リスク・マネジメント, ライフサイクル・コスト, 地震発生確率, 強震動, 木造住宅, 免震

1. 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防災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／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、現段階では充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^{2)・4)}。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技術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。

一方で政府の地震調査研究推進本部・地震調査委員会は、地震の

発生確率^{例えは 5)・7)}およびその強震動評価^{例えは 8)・9)}を発表している。このような成果は今後、多方面に有効活用できることが期待され、建物の耐震設計など工学利用に関する議論も行われている^{例えは 10)・11)}。耐震安全性の高い建物を普及させるためにも、地震調査委員会の成果を有効活用する方法を更に議論していくことが望まれる。

本論文ではそのひとつとして、地震調査委員会の成果の一部を、先述の地震リスク・マネジメント技術に効果的に導入する手法を新たに提案する。はじめに、文献2)で定式化されたLCCの算出式において、地震調査委員会・長期評価部会による地震発生確率モデル^{5)・7)}および同委員会・強震動評価部会による強震動作成手法^{8)・9)}を直接的に利用できることを示す。これら最新の知見を活用することにより、建物所有者に対して合理的な判断材料を提示できる。

次に、本論で提案する活用手法の例として、宮城県仙台市の戸建住宅を対象とした地震リスク・マネジメントを示す。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前後）が発生し、長期評価部会は、次の30年以内の発生確率を99%と発表している⁵⁾。また、強震動評価部会による強震動予測地図⁸⁾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。対象住宅では、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。LCCを計算する

本論の一部は文献1)の内容に修正・加筆したものである。

* 独立行政法人建築研究所 研究員・博士(工学)

** ㈱ブリヂストン 博士(工学)

*** ㈱一条工務店

**** 信州大学 助教授・博士(工学)

(元 独立行政法人建築研究所 主任研究員)

Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

Bridgestone Corporation, Dr. Eng.

Ichijo Housing Company, Co., Ltd.

Assoc. Prof., Shinshu University, Dr. Eng.

(Formerly Senior Research Engineer, Building Research Institute)

際には、長期評価部会による地震発生確率モデル⁵⁾および強震動評価部会による強震動評価モデル⁸⁾を利用する。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、地震調査委員会の成果を活用したプロトタイプと位置付けられる。

本論の第2章では、地震リスク・マネジメントの概要を述べ、その中で地震調査委員会の成果の活用手法について説明する。第3章では、宮城県仙台市の戸建住宅を対象とした事例研究を示す。第4章はまとめである。

2. 地震リスク・マネジメントの概要

2-1. 基礎概念

高橋らが提案した地震リスク・マネジメント手法の基礎概念は、既に文献2) - 4)の中で述べている。本章では、これに地震調査委員会・長期評価部会および強震動評価部会の成果の活用手法を新たに追加したうえで、改めて概説する。

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)¹³⁾で表われ、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/制振化などが挙げられる。構造設計だけではなく、保険/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。

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すことができる。

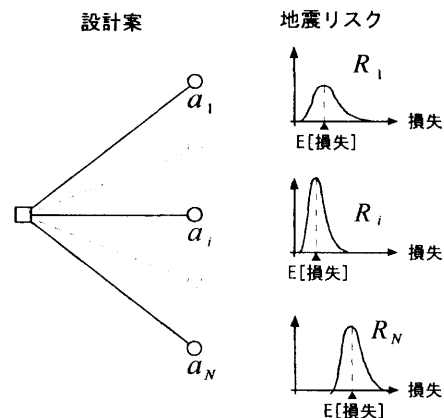


図1 地震リスク・マネジメントにおける意思決定樹木

2-2. 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¹³⁾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²⁾。

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

ここで、 $E[\cdot]$ は確率変数 $\cdot$ 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²⁾。

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

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

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。

これに対して、(1)式中の $\sum f_{W_n}(t, m_j | W_1 > t_0)$ 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。(1)式の $\sum f_{W_n}(t, m_j | W_1 > t_0)$ 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^{8), 9)}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。

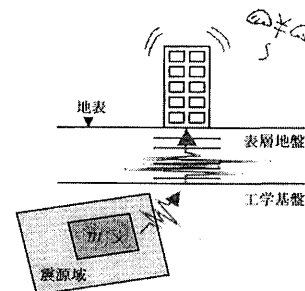


図2 断層破壊から損傷費用発生までのプロセス

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^{3), 4)}。図3には、現時点で想定されるメニューの一例を示す。ここに示した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分野におけるシミュレーション技術

の進捗に応じて、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。

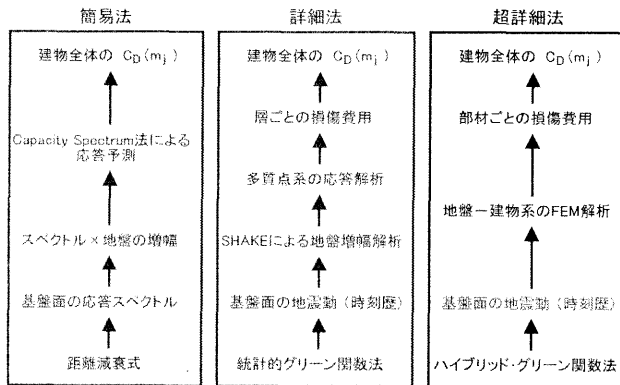


図3 $C_D(m_j)$ を算出するためのシミュレーション・モデルの例

3. 宮城県の戸建住宅を対象とした事例研究

3-1. 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45.33坪＝149.88 m^2 ）を対象とし、その外観と建設位置（緯度38.19°、経度140.91°）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）の二つの設計案を考える。(1)式あるいは(2)式を用いて両者の期待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

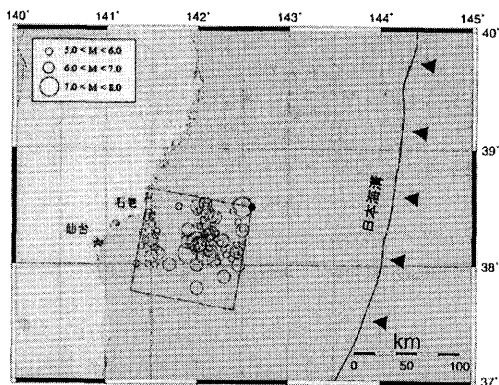


図5 住宅の位置(☆)、対象震源域(□)および歴史地震(○)

3-2. 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(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⁽¹⁴⁾、宇津⁽¹⁵⁾、気象庁⁽¹⁶⁾）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。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（ $\nu(5.5) = 0.840$ 、 $\nu(6.5) = 0.270$ 、 $\nu(7.5) = 0.027$ ）を(2)式に代入する。

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⁽⁵⁻⁷⁾。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、 $\alpha = 0.177$ ）⁽⁵⁾を適用すると、その発生率は図7のようになる。(1)式は、地震の発生率は1回目から ∞ 回目までの地震の発生確率の総和になることを示している⁽²⁾が、本件では1回目から5回目までの総和とした。すなわち、対象期間内に6回以上の宮城県沖地震が発生する確率は無視できるものとした。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。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、過小評価している。地震の発生をBPTモデルとして期待LCCを算出する際には、図7の発生率を(1)式に代入する。

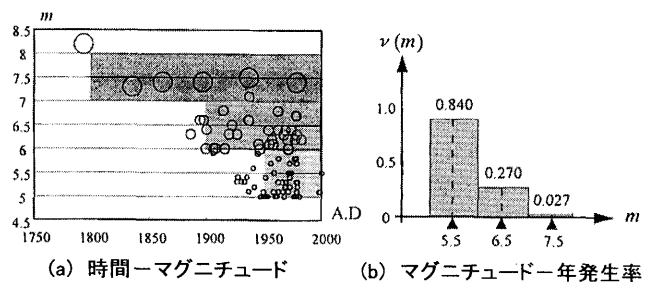
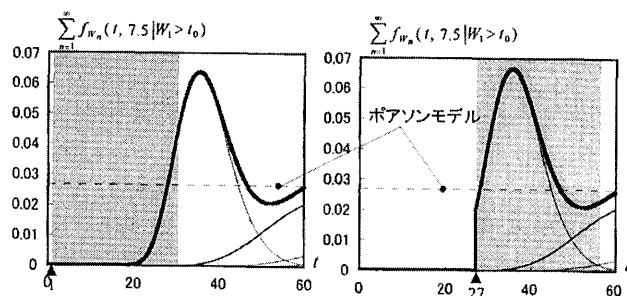


図6 対象震源域の地震活動



(a) $t_0 = 1$ 年(住宅竣工:1979年) (b) $t_0 = 27$ 年(住宅竣工:2005年)

図7 BPTモデルの地震発生率($m_3 = 7.5$ 、 $\mu = 37.1$ 年、 $\alpha = 0.177$)

3-3. 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、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 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 $E[C_D(m_i)]$ を計算できる。2-2 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う (図 3 の「詳細法」)。シミュレーションについて以下に述べる。

地震基盤面における地震波を統計的グリーン関数法^{8), 9)}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⁸⁾に基づいて決めた (表 1)。各マグニチュードに対応する断層破壊面のサイズは、スケーリング則⁸⁾により求めた (表 2)。 $m_3 = 7.5$ については、文献 8) のケース A1 (モーメントマグニチュード 7.6) のパラメータを用いる。文献 8) と同様、各断層面を約 $4\text{km} \times 4\text{km}$ の小断層に分割する (表 2)。

断層破壊面の位置は、図 5 の震源域内でランダムに発生させる。断層破壊面上のすべり量分布は、 $m_1 = 5.5$ および $m_2 = 6.5$ については対数正規乱数を用いてランダムに設定した。 $m_3 = 7.5$ については、文献 8) のケース A1 と同様のアスペリティモデルを用いる。2 つのアスペリティ位置は断層破壊面内でランダムに発生させる。いずれのケースにおいても、断層破壊の開始点は、断層破壊面内でランダムに発生させる。以上により、ひとつのサンプル (断層破壊) に対して XY2 方向の地震波を生成する。文献 8) と同様、放射特性係数を 0.62 で全方向一定としているために、両方向でほぼ同レベルの地震波が生成される。なお、ここでは統計的グリーン関数法を用いているために、ディレクティビティ・パルスや 3 次元地盤構造に起因する長周期成分の再現性に乏しいことが適用限界として挙げられる。

表 1 震源パラメータ

静的応力降下量	7.0 Mpa
密度	3.0 (g/cm ³)
剛性率	4.7E+10 (N/m ²)
せん断波速度	3.9 km/s
破壊伝播速度(放射状)	3.0 km/s
F_{max}	13.5 (Hz)
$Q(f)$	110 $f^{0.69}$ ($f \geq 1.0\text{Hz}$) 110 ($f < 1.0\text{Hz}$)

表 2 断層破壊面のサイズ

m_i	S (km ²)	L (km)	W (km)	L の分割	W の分割
5.5	18.24	4.27	4.27	1	1
6.5	182.4	13.5	13.5	3	3
7.5	2266	47.6	47.6	11	11

以上の方法で作成された地震基盤面の地震波を入力として、SHAKE¹⁷⁾ (等価線形一次元重複反射理論) により地表面の地震波を計算する。図 8 に対象住宅位置の地盤柱状図を示す。この地盤構造のうち、工学基盤面以深の構造は文献 8) を参考にして決めた。対象

地点は第 2 種地盤に分類される。土の力学特性 (せん断波速度、密度、層厚) のばらつきとして、文献 18) を参考に、図 8 の値にそれぞれ変動係数 10%、20%、10% の対数正規乱数を乗じる。工学基盤面以深を岩盤とみなして線形とするが、工学基盤面以浅は土の歪依存性を考慮する。ここでは、告示第 1457 号¹⁹⁾ に示されている図 9 の歪依存性を用いた。

地表面 ▼	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	せん断波速度 (m/s)	土の種類または岩のQ値
	2.8	1.65	110	粘土
	7.2	1.70	190	砂
	3.3	1.80	290	砂
工学基盤面 ▼	2.7	1.85	290	砂
	50	1.80	400	110 $f^{0.69}$
	200	1.98	700	110 $f^{0.69}$
地震基盤面 ▼	450	2.35	1700	110 $f^{0.69}$
	∞	2.63	3000	110 $f^{0.69}$

(岩盤の Q 値は 1.0Hz 未満では 110 で一定)

図 8 対象住宅位置の地盤柱状図

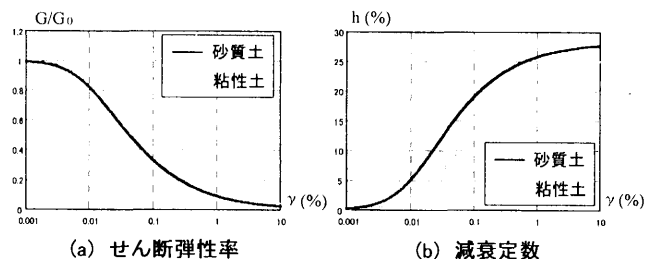
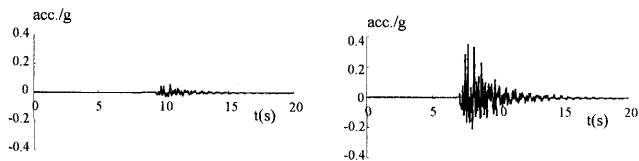


図 9 土の歪依存性¹⁹⁾

図 10 には、 $m_1 = 5.5$ の断層破壊に対する地表面地震波 100 サンプルのうち PGA が最小および最大となる地震波の時刻歴を示す。図 11 は、100 サンプルの応答スペクトルの統計値 (平均、平均土標準偏差、最大および最小) である。 $m_1 = 5.5$ の場合、断層破壊面が小さく点震源に近い場合、主に断層破壊面の位置 (断層破壊面と住宅との距離) が地震動強さに影響を与える。また、地盤の非線形性が小さいため、短周期側の成分が卓越する。図 12 および図 13 は、 $m_3 = 7.5$ に対する結果である。この場合、断層破壊面が大きいため、ディレクティビティやアスペリティなどの有限断層効果地震動強さや波形に影響を与える。さらに、地盤の非線形性が強くなるために、0.5 秒 ~ 1.0 秒程度の周期帯にも大きな成分が生じる。以上は X 方向についての結果であるが、Y 方向についてもほぼ同様の結果が得られている。ここでは SHAKE を用いて地盤増幅解析を行っているため、3 次元地盤構造、液状化、動的相互作用の影響は考慮されていない。



(a) PGA が最小 (b) PGA が最大
図 10 地表面における地震波の時刻歴 ($m_1 = 5.5$, X 方向)

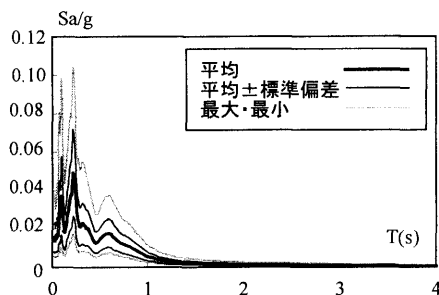
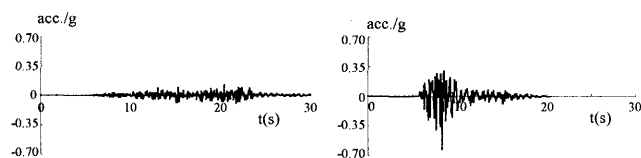


図 11 地表面における加速度応答スペクトル($m_1 = 5.5$, X 方向)



(b) PGA が最小 (a) PGA が最大
図 12 地表面における地震波の時刻歴($m_3 = 7.5$, X 方向)

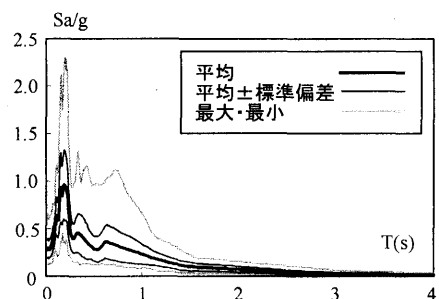


図 13 地表面における加速度応答スペクトル($m_3 = 7.5$, X 方向)

以上の手順により作成された地表面の地震波を入力として、住宅の弾塑性地震応答解析を行う。数値積分は Newmark の β 法 ($\beta=1/4$) で行い、刻み時間を 0.001 秒とする。

対象住宅を 2 質点直列せん断モデルとする。各層の単位有効壁長あたりのスケルトンカーブは、文献 20) - 22) および同様の住宅に対する実大加力実験および震動台実験に基づいて、図 14 上段に示す quad-linear とした。動的解析における履歴は、木造建物用に開発されたバイリニア+スリッパ^{20) - 22)}とする。表 3 に、対象住宅の面積、重量、階高、有効壁長などの諸条件を示す。XY 方向の弾性 1 次固有周期はいずれも約 0.28 秒であり、各方向の応答解析を独立に行う。減衰は瞬間剛性比例型の粘性減衰 3% とする。降伏耐力 Q_y から求められるベースシア係数は 0.7 程度であり、上部構造だけでも非常に強度の高い住宅であることがわかる。建物の重量、剛性、耐力、減衰のばらつきを考慮するために、対数正規乱数を乗じた。文献 23) および 24) や同様の住宅に対する実験結果を考慮して、それぞれの変動係数を 12%、30%、25%、65% とした。

免震層には住宅用天然ゴム免震装置 (ゴム総厚 100mm) 4 基とスライダ (摩擦係数 0.046) 17 基が設置されている。免震層の動的挙動は、免震装置 (剛性 154kN/m の線形弾性モデル) とスライダ (初期剛性 100000kN/m の完全弾塑性モデル) の並列結合を用いて模擬する。上部構造の総重量と免震装置の剛性から求めた固有周期は約 3.65 秒である。免震装置の水平剛性およびスライダの摩擦係数のばらつきを考慮するために、それぞれ 6.7%、4.3% の変動係数を持つ対数正規乱数を乗じた²⁵⁾。

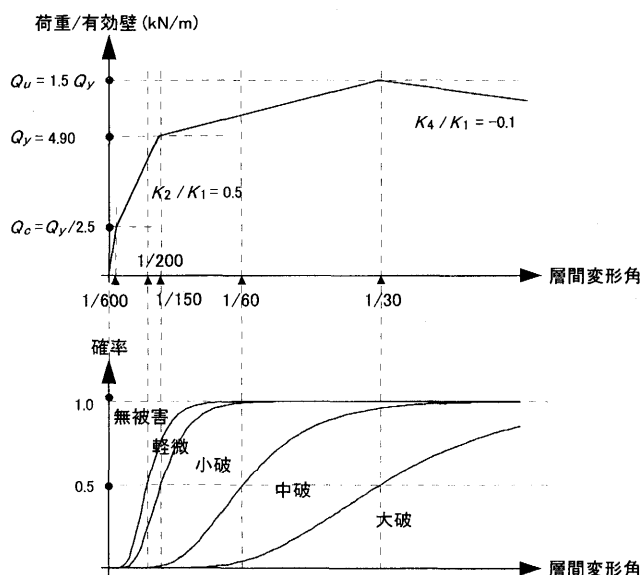


図 14 対象住宅の復元力特性(上段)と fragility 曲線(下段)

表 3 建物の諸条件

	面積 (m^2)	重量 (kN)	階高 (m)	有効壁長 (m)	
				X 方向	Y 方向
2 階	65.83	77.9	2.97	23.66	30.94
1 階	84.05	240.0	3.18	52.78	50.05
免震層	84.05	191.1	0.60	---	---

図 15 および図 16 はそれぞれ、 $m_1 = 5.5$ の断層破壊に対する住宅モデルの最大層間変形角、最大加速度である。各図(a)は基礎固定、(b)は免震の結果である。免震層の変形角は、免震装置のゴム総厚 (100mm) に対するせん断歪を示している。 $m_1 = 5.5$ の場合、地震動が小さいために、基礎固定でも免震でも、上部構造の応答はほぼ同等であることがわかる。図 17 および図 18 は、 $m_3 = 7.5$ の断層破壊に対する結果である。このような大入力の場合、基礎固定モデルでは上部構造の変形角が 1/150 を超えるケースが見られる。これに対して、免震モデルでは免震層が変形することで、上部構造の応答を大幅に低減している。また、先述の通り上部建物の強度が高い (ベースシア係数 0.7 程度) が故に、基礎固定の場合、加速度応答が最大で 1.4g に達する。免震化することで、加速度応答を 1/2~1/3 に低減できる。図 17 では、免震装置の最大せん断歪が読み取れないが、100 サンプルのうち最大でも 350% 程度であり、限界歪 400% (400mm) を上回るものは現れない。図 15 から図 18 はいずれも X 方向の結果であるが、Y 方向についてもほぼ同様の結果が得られている。

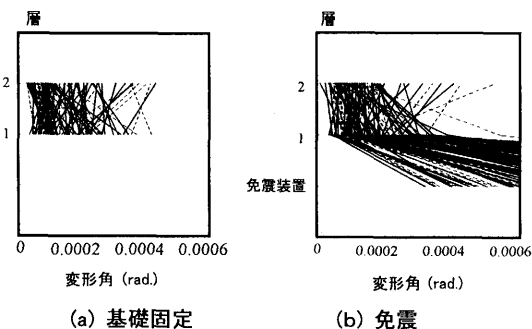


図 15 $m_1 = 5.5$ の地震に対する最大層間変形角(X 方向)

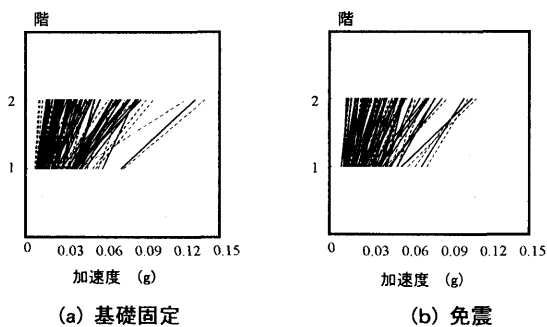


図 16 $m_1 = 5.5$ の地震に対する最大加速度(X 方向)

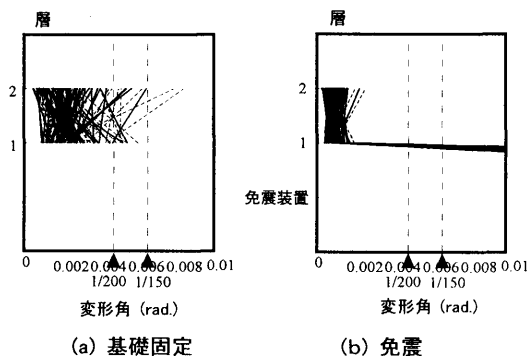


図 17 $m_3 = 7.5$ の地震に対する最大層間変形角(X 方向)

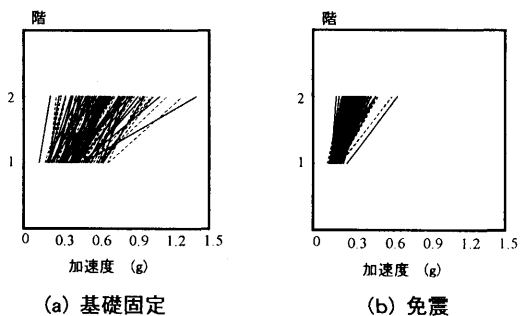


図 18 $m_3 = 7.5$ の地震に対する最大加速度(X 方向)

以上の地震応答解析により得られた最大層間変形や最大加速度を fragility 曲線に適用し、損傷費用を求める。一般に、損傷費用を意思決定者が負担すべき費用の合計とすることで、合理的な意思決定を行うことが出来る²⁾。本事例では、意思決定者を住宅所有者（兼居住者）としているので、住宅の修理／再調達費用、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の合計を損傷費用 $C_D(m_i)$ とする。各損傷費用の計算方法を以下に述べる。

住宅の修理／再調達費用は、構造部材、変形依存型非構造部材（建築仕上げなど）、加速度依存型非構造部材（機械・設備など）の損傷費用の合計として計算される²⁴⁾。各部材の fragility 曲線を対数正規分布とする。各サンプルの応答値を fragility 曲線に適用し、それに対応する確率質量関数に基づき、サンプルごとに損傷状態を一意に割り当てる。各損傷状態に対応する修理／再調達費用率²⁴⁾を表 4 に示す。求められた修理／再調達費用率を再調達費用に乘ずることで、各部材の損傷費用が計算される。対象住宅の構造部材、変形依存型非構造部材、加速度依存型非構造部材の再調達費用は、それぞれ 1,500 万円、1,050 万円、450 万円であり、各階の面積に比例して分布するものとした。構造部材の fragility 曲線の中央値は、実大実験によるスケルトンカーブ（図 14 上段）の限界変形角に基づいて決め、対数標準偏差を 0.4²⁴⁾とした（図 14 下段）。小破および大

破の限界変形角は、それぞれ降伏変形角（1/150）、終局変形角（1/30）に対応するものとし、中破はその中間の 1/60 とした。非構造部材の fragility 曲線については、文献 24) に示されているもの（図 19）が当住宅にも適用可能であると判断し、これを用いることにした。

家財の損傷費用は、加速度依存型非構造部材と同様の fragility 曲線を用いて算出する²⁴⁾。各被害状態に対応する修理／再調達費用率は表 1 の半分の値である²⁴⁾。家財の再調達費用は、世帯主 40 歳台の 4 人家族として 1,600 万円を仮定し²⁶⁾、これについても各階の面積に比例して分布するものとした。

表 4 損傷状態と修理／再調達費用率の対応²⁴⁾

無被害	軽微	小破	中破	大破以上
0%	2%	10%	50%	100%

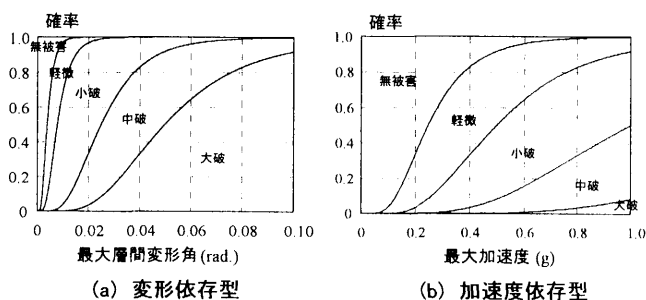


図 19 非構造部材の fragility 曲線²⁴⁾

被害が大きい場合の避難費用は、往復の引越し費用と転居先での家賃である。ここでは、往復の引越し費用を 40 万円とし、転居先での家賃を仙台市内の公団住宅（78 m^2 ）の家賃²⁷⁾を参考に 9.5 万円／月とする。転居期間は、住宅の構造部材の損傷係数（ DF ：Damage Factor）に応じて図 20 のように定める。本モデルは、文献 24) のモデルをベースに、対象住宅の契約・設計・工事の実績から独自のパラメータを設定した。 DF は、住宅全体の構造部材の再調達費用に対する修理費用の比率である。 DF が 10%未満の場合には、居付きでの修理が可能のため、避難費用は発生しない。

建物のいずれかの層が大破以上の場合、建物を修復することが困難として、解体・撤去・新築するものとする。この場合の損傷費用は 4,819 万円（＝解体・撤去費用：0.75 万円/ m^2 × 149.88 m^2 + 建物の再調達費用：3,000 万円 + 家財の再調達費用：1,600 万円 + 引越し費用：40 万円 + 転居先での家賃：9.5 万円／月 × 7 ヶ月）である。

現段階で対象住宅固有の費用モデルがない部分については、文献 24) など、一般的に入手可能なものを代用した点を付言しておく。

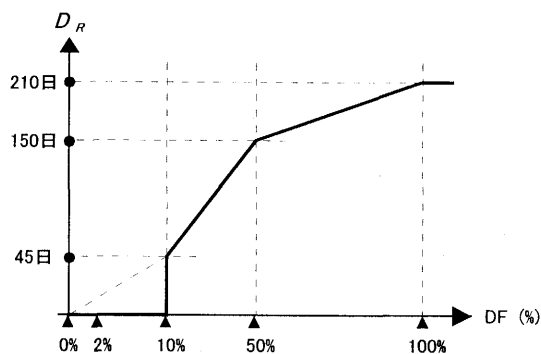


図 20 構造部材の損傷係数 DF と復旧日数の関係

以上の損傷費用モデルに基づいて計算された各サンプルの損傷費用を、図 21 ($m_1 = 5.5$) と図 22 ($m_3 = 7.5$) に示す。各図(a)の基礎固定と(b)の免震の結果を比較すると、免震化することで損傷費用を軽減できることが確認できる。図 22(a)に示す通り、基礎固定モデルが $m_3 = 7.5$ の大入力を受ける場合、大きな損傷費用が生じる。これは、先述のように対象住宅の強度が高く設計されており、構造部材が大破以上になるケースは見られないが、その一方で、大きな加速度応答が生じ、これにより加速度依存型非構造部材および家財の被害が大きくなるためである。図 17 および図 18 に示した通り、免震化することで上部構造の変形、加速度を共に低減できることから、その結果として損傷費用が軽減される (図 22(b))。

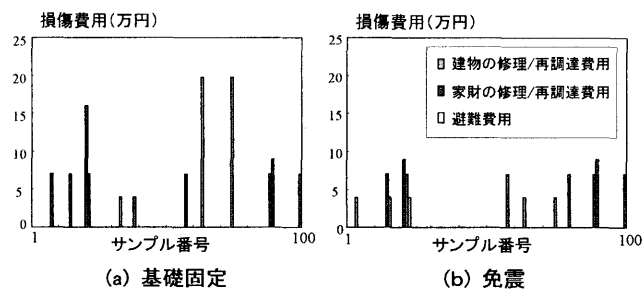


図 21 $m_1 = 5.5$ の地震に対する損傷費用

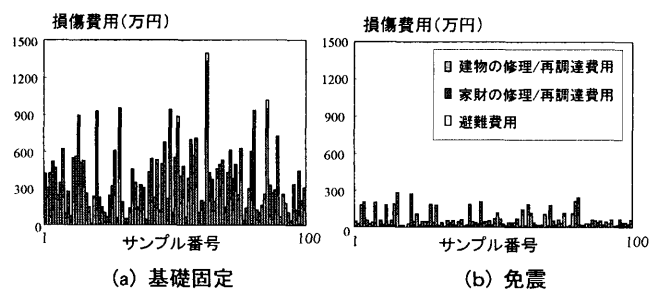


図 22 $m_3 = 7.5$ の地震に対する損傷費用

図 21 および図 22 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 $E[C_D(m_j)]$ を求めたものが図 23 である。地震のマグニチュードが大きくなるにつれて、免震化による損傷費用の低減効果が大きくなる様子がわかる。なお、損傷費用を耐震性能指標の一つと考えると、図 23 は性能設計における性能マトリクスにも対応する。

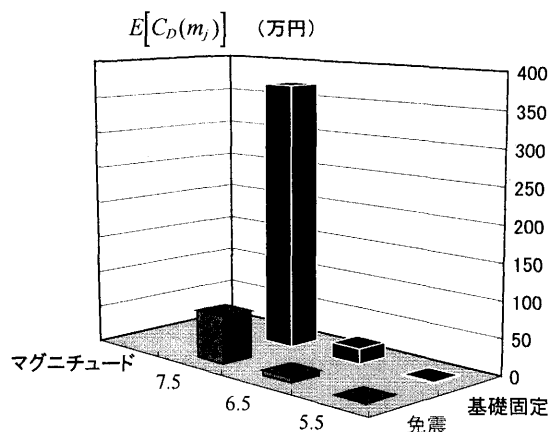


図 23 損傷費用の期待値

3-4. ライフサイクル・コスト評価

地震の発生をポアソン過程として、(2)式に図 6(b)の年発生率 $\nu(m_j)$ および図 23 の期待損傷費用 $E[C_D(m_j)]$ 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 24 である。 $d = 0\%$ ($Q = 1$) としている。図 24 より、免震化することで初期費用は 260 万円高くなるが、21.0 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 111 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。

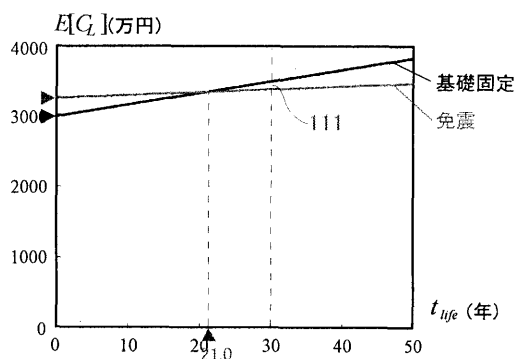


図 24 供用期間－期待 LCC (ポアソン・モデル: $Q = 1$)

図 25 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。 $t_0 = 1$ (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) としている。図 7(a)の年発生率および図 23 の $E[C_D(m_j)]$ 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。比較のためにポアソン・モデルの結果 (図 24) 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 33.8 年となり、供用期間を 30 年とする場合には基礎固定建物が最適設計案となる。これは、ひとたび宮城県沖地震が起きてしまうと、その直後に建てられる住宅の供用期間 (30 年) 内に次の地震が発生する可能性は低いためである (図 7(a)参照)。同じ開始時間でも、仮に建物の供用期間を 50 年間とすると、その間に次の宮城県沖地震を受ける可能性が高まることから、免震を採用した方が有利になる (図 25)。

図 26 は、 $t_0 = 27$ (住宅の竣工を前回の宮城県沖地震の 27 年後とした場合) とした場合の結果である。 $t_0 = 1$ 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 12.8 年で、供用期間を 30 年とすると免震化が最適案となる。

図 26 と図 25 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ほど、免震化の効果が大きくなることが理解できる。このように、BPT モデルが適用可能な場合には、地震危険度の時間依存性を考慮に入れた判断材料を建物所有者に提供できる。

なお、図 26 からは、基礎固定モデルの 50 年間の期待累積損傷費用が 1000 万円程度になることが読み取れる。(1)式より、「期待累積損傷費用」= Σ (「期待損傷費用」×「期待発生回数」) である (Σ は全てのマグニチュードに対する総和を表す)。宮城県沖地震 ($m_3 = 7.5$) のみを考慮すると、期待損傷費用の約 400 万円 (図 23) と 50

年間の期待発生回数の約 1.8 回 (図 7(b)) の積として期待累積損傷費用は 720 万円になる。これに $m_1 = 5.5$ および $m_2 = 6.5$ の場合も合計して 1000 万円程度となる。宮城県沖地震 ($m_3 = 7.5$) に対する期待損傷費用は約 400 万円であるが、図 21 および図 22 に示した通り、住宅 (再調達価格 3000 万円) だけではなく収容物 (再調達価格 1600 万円) の修理/再調達費用と避難費用が含まれていることから、現実的な値と考えられる。

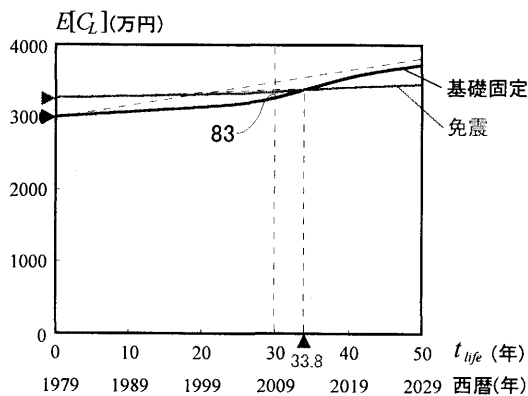


図 25 供用期間—期待 LCC (BPT モデル: $t_0 = 1$ 年、 $Q = 1$)

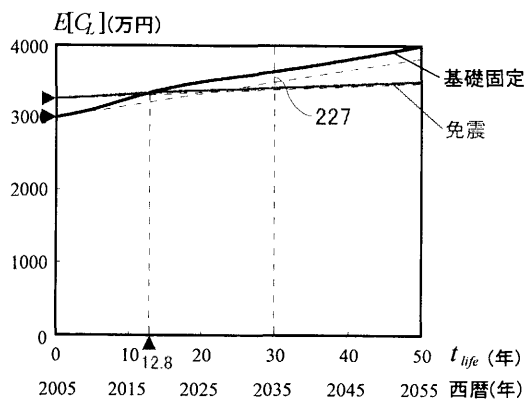


図 26 供用期間—期待 LCC (BPT モデル: $t_0 = 27$ 年、 $Q = 1$)

4. まとめ

本論の第 2 章では、建物所有者に適切な地震対策を説明することを目的として開発された、地震リスク・マネジメント技術^{11,4)}を紹介した。本論では、この技術に、地震調査委員会・長期評価部会および強震動評価部会の成果を効果的に導入する手法を新たに提案した。

第 3 章では、提案手法を宮城県仙台市の戸建住宅に適用した事例を示した。地震対策として免震構法に初期投資するべきか否かを検討するために、基礎固定および免震住宅の地震リスク (期待 LCC) をそれぞれ算出し、両者を比較した。期待 LCC 算出の際には、地震調査委員会・長期評価部会の地震発生確率モデルおよび強震動評価部会の強震動予測モデルをはじめとする、関連研究分野で得られた知見を活用した。以上の検討から、前回の宮城県沖地震から時間が経過した現在では、免震化モデルの期待 LCC が免震化しない場合のそれを下回ることが示された。つまり、免震化に初期投資しておくことで、住宅所有者が総支出を軽減できることが検証された。以上のような結果に基づいて、建物所有者に対して適切な地震対策に投資することの意義を説明できる。

2-2 項で述べたように、本論で紹介した地震リスク・マネジメント

手法では、断層破壊から損傷費用発生までの一連の事象を、関連分野 (地震学、地盤工学、構造工学など) の最新のモデルを自由に導入してシミュレーションできる。各分野では、既往の研究成果の蓄積を踏まえて、更に精度の高いモデルが開発され続けているが、現段階で (おそらく将来も) 対象事象を完全に模擬できるモデルを得ることは困難である。したがって技術者側は、どのようなモデルを使うにしても、それらの適用限界を認識しておく必要がある (本論第 3 章の事例研究では、使用したモデルの適用限界を指摘している)。そうした前提のもとで、その時々における最新の知見を積極的に活用し、建物所有者を適切な地震対策に誘導することが重要である。

本論の第 3 章では、提案手法の適用例のひとつとして、新築住宅を対象とする事例を紹介した。一方で、既存建物の改修も重要な課題である。これを踏まえて、現在、各種既存建物の改修に関する事例研究を進めている。成果がまとまり次第、改めて報告したい。

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)」において筆者らが行ったものです。当共同研究に参加の独立行政法人建築研究所、独立行政法人都市再生機構、(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、(株)一条工務店、大和ハウス工業(株)の皆様から、貴重なご意見を賜りました。

木造戸建住宅の地震応答解析モデルについて、建築研究所の河合直人博士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博士および建築研究所の鹿嶋俊英氏よりご教示頂きました。図 5 は GMT²⁸⁾ を用いて作成しました。建築研究所の八木勇治博士より、当プログラムのご使用方法をご指導頂きました。

以上、記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 高橋雄司・正木信男・穴原一範・五十田博「宮城県沖地震を対象とした免震戸建住宅の地震リスク評価」日本建築学会大会学術梗概集 (北海道)、B-1、pp.257-258、2004.8
- 2) 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.
- 3) 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
- 4) 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
- 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) 日本建築学会「「強震動予測地図」の建築物の耐震設計・評価への応用」2004 年度日本建築学会大会 (北海道)、構造部門 (荷重) パネルディスカッション資料、2004.8
- 11) 防災科学技術研究所「地震動予測地図の工学利用—地震ハザードの共通情報基盤を目指して—」防災科学技術研究所研究資料、第 258 号、2004.9
- 12) 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

- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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」地震研究所集報、第 57 号、pp.401-463、1982
- 16) 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
- 17) 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.
- 18) Ahmed, K.A., Kanda, J., and Iwasaki, R. (1996). "Estimation of uncertainties in the dynamic response of urban soils in Japan", *Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 736, Acapulco, Mexico.
- 19) 日本建築学会(編著)「建築基準法令集(平成 15 年度版)」日本建築学会、2003.1
- 20) 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
- 21) 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) 一木造耐力壁構造に対する適用一」日本建築学会大会学術梗概集(中国)、B-2 冊分、pp.1147-1148、1999.9
- 22) 荒木康弘・腰原幹雄・大橋好光・坂本功「木造住宅の地震応答解析のための復元力モデルに関する研究」日本建築学会構造系論文集、第 579 号、pp.79-85、2004.5
- 23) Sues, R.H., Wen, Y.K., and Ang, A.H-S. (1985). "Stochastic evaluation of seismic structural performance", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 1204-1218.
- 24) Federal Emergency Management Agency, *HAZUS99 technical manual*, 1999
- 25) ㈱ブリヂストン「ブリヂストン戸建て免震装置技術資料」㈱ブリヂストン、2001
- 26) 損保ジャパン HP「家財の保険料ってどのくらい?」
<http://www.sompo-japan.co.jp/hinsurance/hkatei/hkatei011.html>
- 27) 総務省統計局「第 50 表 住宅の種類(3 区分)、専用住宅の所有関係(6 区分) 別 1 か月当たり家賃及び 1 畳当たり家賃」平成 10 年住宅・土地統計調査、2001.7
- 28) Wessel, P. and Smith, W.H.F. "The Generic Mapping Tools",
<http://gmt.soest.hawaii.edu/>

(2004 年 6 月 8 日原稿受理、2005 年 1 月 20 日採用決定)