九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 地震リスク・マネジメント技術を実建物に活用した地震対策の効果検証

田原, 一徳
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

高橋, 雄司
独立行政法人建築研究所 : 研究員

清家, 規
九州大学大学院人間環境学府

https://doi.org/10.15017/1456084

出版情報：都市・建築学研究. 24, pp.57-64, 2013-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第24号, 2013年7月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.24, pp. 57～64, July. 2013

# 地震リスク・マネジメント技術を実建物に活用した地震対策の効果検証

## Application of up-to-date seismological knowledge to seismic risk management of an existing building

田原一徳*, 高橋雄司**, 清家　規***
Kazunori TAHARA, Yuji TAKAHASHI and Tadashi SEIKE

This paper presents an application procedure of up-to-date seismological knowledge,i.e.,probabilistic models for earthquake occurrences and evaluation methodology of strong ground motion, to seismic risk management of buildings. A case study concerning an actual existing city hall near the seismic source of Miyagi-ken-oki earthquake (Mw=7.5, and 99% occurrence probability within the next 30 years ) is demonstrated.

***keywords*** *: Seismic risk management, Earthquake probability, Strong ground motion, LCC*
地震リスク・マネジメント、地震発生確率、強震動、ライフサイクル・コスト

### 1. 序論

地震による建物被害を軽減するために、事前に適切な防災対策を施しておくことは有効である。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、防災対策を行うために原則として各々の費用負担が発生する。それらの投資に対する効果を具体的に建物所有者に対して示す指標として、不動産評価などに関連してPML(Probable Maximum Loss)値を用いて評価されることがあるが、建物の供用期間といった時間軸を考慮した投資効果の評価は困難なのが現状である。

そこで、本論では、高橋らにより提案された地震リスク・マネジメント手法[1)~2)]を用いて、実際に防災対策（耐震補強）を行った建物が地震危険度の高い地域に建つと想定して地震リスク解析を行い、防災対策の効果をLCCを用いて建物所有者に説明する一手法を示す。2 章では地震リスク・マネジメント手法の概要を説明し、3 章では想定した地震動について説明を行う。4 章では実建物の概要を説明し、5 章にてリスク解析の結果を示す。

### 2. 地震リスク・マネジメント手法の概要

#### 2.1 基本概念

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** のような確率密度関数（リスク：損失とその発生確率の組み合わせ）で表され、これに基づいて意思決定が行われる。設計案としては、例えば建築基準法通りの設計、耐震補強、免震化などがあげられる。

建物の地震リスク・マネジメントにおいては、設計・建設にかか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（ライルサイクル・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

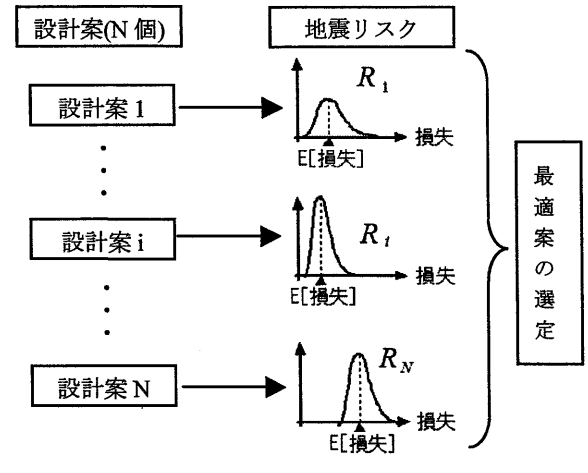



**図 1 地震リスク・マネジメントにおける意志決定樹木**

*　都市共生デザイン専攻　博士後期課程
**　独立行政法人　建築研究所研究員
***九州大学大学院　人間環境学

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（一般的には複数）による損傷費用の総和で表すことができる。

## 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を(1)式によって定式化する。[2)]

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

ここで、E[・]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、$t_0$は最後の地震から建物完成までの経過時間、$t_{life}$は建物の供用期間、$f_{Wn}(t,m_j|W_1>t_0)$はマグニチュード$m_j$の地震について、$t_0$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は考慮されるすべての震源域を指す。期待LCCに対して割引率dを考慮し、$Q$=1/(1+d)は割引係数である。(2)式は、地震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)]

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

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

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。(2a)式は割引率を考慮する(d≠0)式、(2b)式は割引率を無視する(d=0)式である。これに対して、(1)式中の$\Sigma f_{Wn}(t,m_j|W_1>t_0)$は、地震発生を任意の非ポアソン・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Brounian 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$\Sigma f_{Wn}(t,m_j|W_1>t_0)$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。ただし、これらすべ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。

## 3. 対象震源域および地震動

### 3.1 地震活動

本章で扱う建物の位置は緯度38.19°、経度140.91°（宮城県仙台市・2種地盤：**図2**中★印）とする。宮城県沖地震の発生が予想される区域（**図2**中□）を対象震源域とする。震源域の巨視的パラメータは以下とする。

- 100km(走行)×106km(沈み込み)の長方形、走行190°、沈み込み20°
- 震源域の原点(**図2**中●):緯度38.50°、経度142.6°、深さ20km

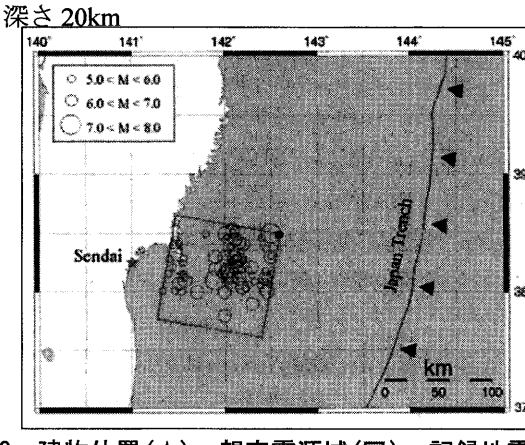



**図2　建物位置(★)、想定震源域(□)、記録地震(○)**

地震カタログ（宇佐美、宇津、気象庁）および政府の地震調査委員会・長期評価部会の報告書[4),5)]を参考に、震源域付近の記録地震を抽出し、年—マグニチュードmの関係を示したものが**図3(a)**である（図中○の大きさはマグニチュードの大きさを示す）。

**図3(b)**は各マグニチュードm（m1=5.5、m2=6.5、m3=7.5）の年発生率$\nu$(m)を計算したものである。地震の発生をポアソン過程とする場合、この年発生確率の値を(2)式に代入して、期待LCCを算出する。

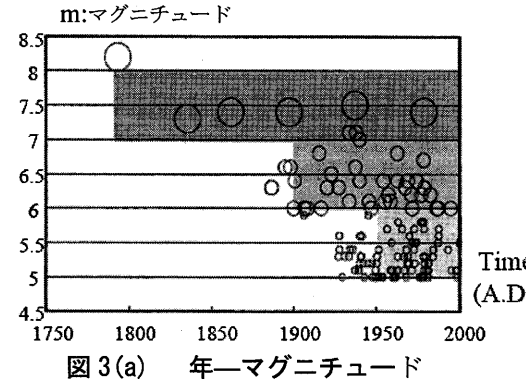



**図3(a)　年—マグニチュード**

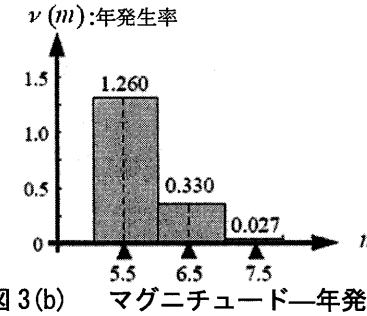



**図3(b)　マグニチュード—年発生率**

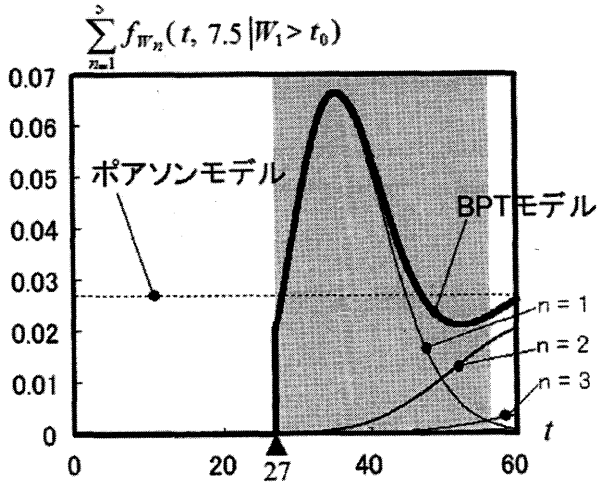



図 4　BPT モデルの地震発生率

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ため、めったに起きない地震の発生についてはBPT (Brounian Passage time)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(m3=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）を適用すると、その発生率は図 4 のようになる。(1)式は、地震の発生率は 1 回目から∞回までの地震の発生確率の総和になることを示しているが(n=1～∞)、本件では 1 回目から 5 回目までの総和とした(n=1～5)。すなわち、対象期間内に 6 回以上の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、建物の供用期間の例として 30 年間を示す。供用期間をおおよそ改修するとした時期(2005 年 6 月 12 日：前回の地震の 27 年後)としている($t_0$=27 年)。(1)式(BPT モデル)および(2)式(ポアソン・モデル)より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。$t_0$=27 年の場合には、ポアソン・モデルが期待発生回数を過小評価している。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 4** の発生率を(1)式に代入する。

### 3. 2 地震基盤面の地震動

地震基盤面における地震波を統計的グリーン関数法によって生成する。断層パラメータや地下構造などは、地震調査委員会・強振動評価部会で用いられたものに基づいて決めた(**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、スケーリング則により求めた（**表 2**）。M3=7.5 については、文献(3)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(3)と同様、各断層面を 4km×4km の小断層に分割する（**表 2**）。

断層破壊面の位置は、**図 2** 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、m1=5.5 および m2=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(**表 3**)。m3=7.5 については、文献(3)のケース A1 と同様のアスペリティモデルを用いる(**表 3**)。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、断層破壊の開始点を、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(3)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、両方向でほぼ同じレベルの地震波が生成される。

**表 1　震源パラメータ**

| | |
|---|---|
| 放射特性係数(全方角一定) | 0.62 |
| 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) |
| $Q(f)$ | $110f^{0.69}$ |

**表 2　断層の破壊面のサイズ**

| $m_j$ | 面積 (km$^2$) | 長さ(km) | 幅 (km) | 長さの分割 | 幅の分割 |
|---|---|---|---|---|---|
| 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 |

**表 3　断層破壊面のすべり量分布**

| $m_j$ | 平均すべり量(cm) | すべり量分布 |
|---|---|---|
| 5.5 | 26.1 | ランダム |
| 6.5 | 82.6 | ランダム |
| 7.5 | 291 | (アスペリティー×2)＋背景領域 |

(注) $m_3$=7.5 の場合のパラメータは強振動評価部会(宮城県沖地震)と同じものを用いる。

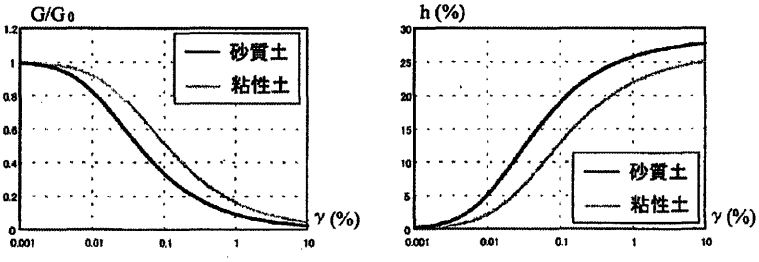
### 3. 3 表層地盤の増幅

以上の方法で作成された地震基盤面の地震波を入力して、SHAKE（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。**表 4** に対象建物位置の地盤柱状図を示す。工学基盤面以深の構造は文献(3)を参考に決めた。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**表4**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。ここでは建設省告示第1457号に示されている**図5**の歪依存性を用いた。

**表4　建物位置の地盤柱状図（2種地盤）**

| 番号 | 層厚(m) | 密度(g/cm³) | S波速度(m/s) | 土の種類または岩の $Q$ 値（= 1/2$h$） |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.8 | 1.65 | 110 | 粘土 |
| 2 | 7.2 | 1.70 | 190 | 砂 |
| 3 | 3.3 | 1.80 | 290 | 砂 |
| 4 | 2.7 | 1.85 | 290 | 砂 |
| 5 | 50 | 1.80 | 400 | $110f^{0.69}$ |
| 6 | 200 | 1.98 | 700 | $110f^{0.69}$ |
| 7 | 450 | 2.35 | 1700 | $110f^{0.69}$ |
| 8 | ∞ | 2.63 | 3000 | $110f^{0.69}$ |




(a) せん断歪-弾性係数低減率　(b) せん断歪-減衰定数

**図5　土の歪依存性**

本解析においては、対象震源域における m1=5.5、m2=6.5、m3＝7.5 の断層破壊に対してそれぞれ100サンプルのモンテカルロ・シミュレーションを行うため、地表面地震波をそれぞれ100サンプル作成する。**図6**にm3＝7.5 の断層破壊に対する地表面地震波 100 サンプルの応答スペクトルの統計値（平均、平均±標準偏差、最大および最小）を示す。**図7**は100サンプルのうち最大地動加速度（PGA:Peak Ground Acceleration）が最小および最大となる地震波の時刻歴である。m3=7.5 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が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 秒程度の周期体にも大きな成分を生じる。

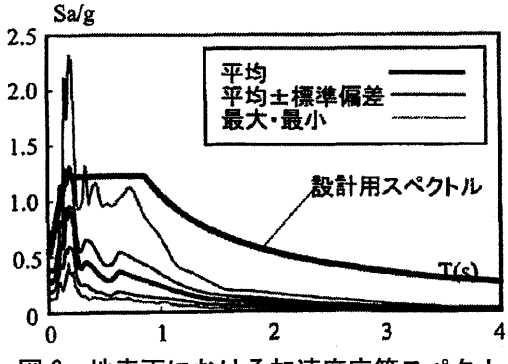
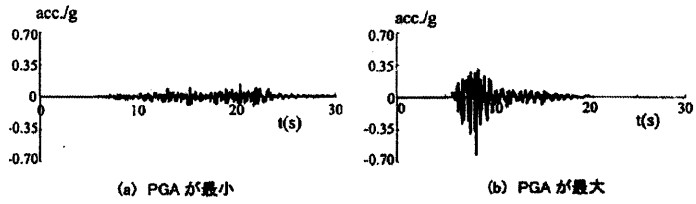



**図6　地表面における加速度応答スペクトル（m3＝7.5、X方向）**




(a) PGA が最小　(b) PGA が最大

**図7　地表面における地震波の時刻歴（m3＝7.5、X方向）**

**図6**には比較のため、建築基準法施行令第82条の6の設計用スペクトル(安全限界検証用)を書き入れている。地震動評価位置と同じく、2 種地盤のスペクトルとしている。ここで作成された地震動は概ね設計用地震動を下回っていることがわかる。したがって、新しい基準法に則して設計された建物の構造体は安全限界を超える可能性は低い。ただし、機械・設備類や収容物は加速度応答により被害が大きくなる可能性がある。また、既存建物のうち、新基準で設計されていないものについては安全限界を超えて崩壊する可能性があると考えられる。

## 4. 建物の地震応答とリスク解析

### 4. 1 建物概要

建物概要は以下とする（**図8**）。

規模・用途：地下1階、地上5階建　庁舎
　構造　　：鉄筋コンクリート造
　　X,Y 方向とも耐震壁付ラーメン構造
延べ床面積：11,000 ㎡
建物位置　：**図2**中★印とする。
再調達費用：26.6 億円
　設計案　：(A)　既存（築35年 Is=0.3 程度）
　　(B) 既存に補強を行ったもの

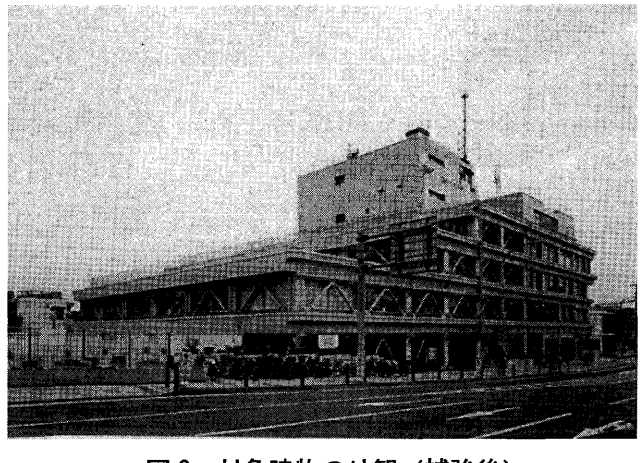


**図8　対象建物の外観（補強後）**

### 4. 2 補強概要

既存建物に必要な剛性と耐力を確保するために以下の耐震補強を行っている。補強目的は大地震に対して建物

が崩壊、倒壊をしないことである。補強費用は3.67億円（建物新築費用の約17%）

・外付け制振ブレース工法を採用（**図9**）
座屈拘束ブレースを制振ブレースとして早期に降伏させ、エネルギー吸収を行う。補強目標値（最大入力速度50kineに対して最大層間変形角が1/150以下）

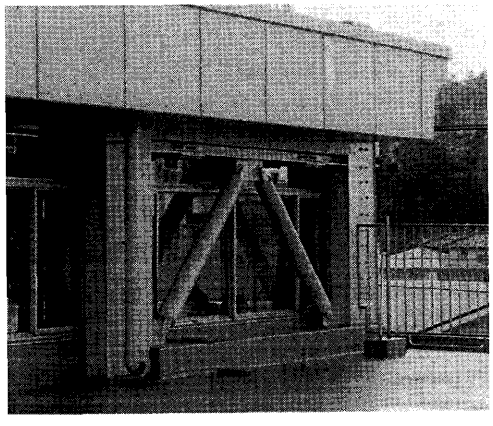


**図9　外壁制振ブレース　補強概要**

・壁補強、耐力ブレース補強
すでに既存耐力壁が比較的ある構面、階については耐力壁、耐力ブレース補強により剛性と耐力を確保する。
・柱補強（炭素繊維巻き補強）
制振ブレースなどの補強後の挙動により補強の必要となる柱に対しては、耐力と靭性を確保するために既存RC骨組を補強する。

### 4.3 建物の地震応答

(1)解析モデル概要

X,Y 方向とも各層 1 質点直列せん断系モデルを用い、弾塑性・時刻歴応答解析を行う（架構のモデルを**図 10** に示す）。

・各層の復元力特性は既存モデル（A）については各層ごとに RC フレームのせん断バネ（原点指向トリリニア）を 1 つ設定し、補強後のモデル（B）には耐震補強を行ったフレームのバネ（原点指向トリリニア）と制振ブレースのバネ（ノーマルバイリニア）とを並列に設定する（X,Y 方向とも）。

・減衰は初期剛性比例型の粘性減衰 3%とする。

・力学特性のばらつき（対数正規分布の COV）は重量 12%、剛性 30%、耐力 25%、減衰 65%とし、それぞれについては全層で同じばらつきを与える。

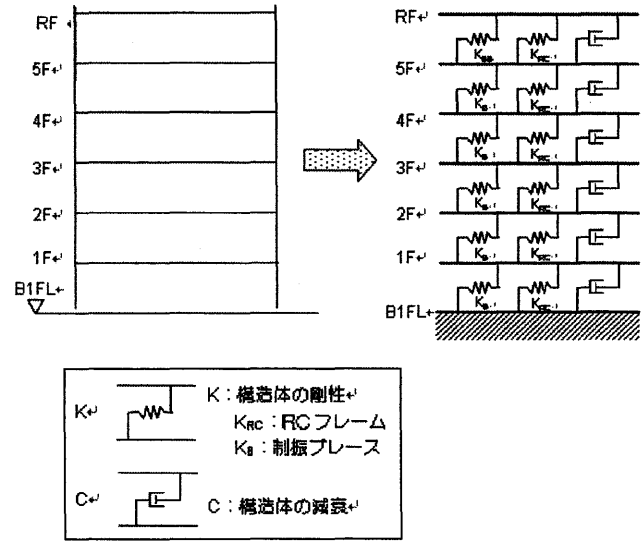



**図 10　架構のモデル化**

(2)振動応答解析結果

上記建物モデルに対し、各マグニチュードの地震波を入力して地震応答解析を行った。m=7.5 の場合の求められた各層の最大層間変形角を**図 11**、最大床応答加速度を**図 12** に示す。

最大層間変形角においては、m=7.5 の場合の 2 階、3 階に補強効果が大きく見られ、変形量が小さくなっていることがわかる。

最大応答加速度においては、補強後することで建物の剛性が大きくなり、応答加速度が大きくなっている傾向もあることがわかる。

本解析においては、補強を行うことですべての応答が低減されるという結果ではなかったが、想定される地震動に対する実挙動が結果として示されている。

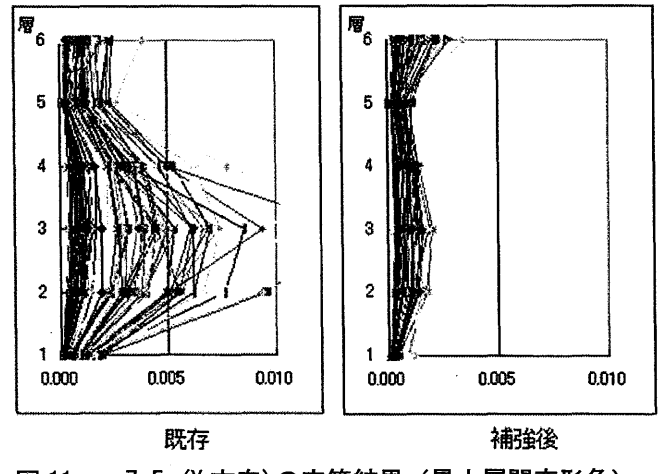
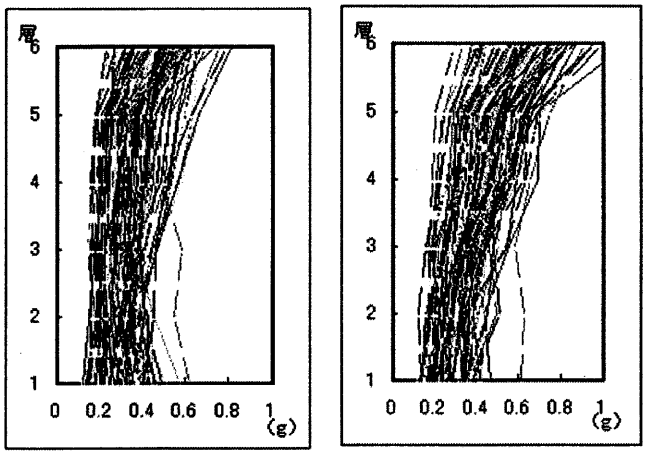



**図 11　m=7.5（X 方向）の応答結果（最大層間変形角）**




既存　　補強後

図 12　m=7.5（X 方向）の応答結果（最大床応答加速度）

### 4.4 損傷費用の算出過程

対象震源域における入力地震波に対して、建物の応答結果がされたところで、損傷コストを算出する。損傷費用 $C_D$ は以下のように定義する。

$C_D = C_B + C_C + C_R$

$C_B$：建物の損傷費用

$C_C$：家財（収容物）の損傷費用

$C_R$：建物を修理・再調達する間の転居費用

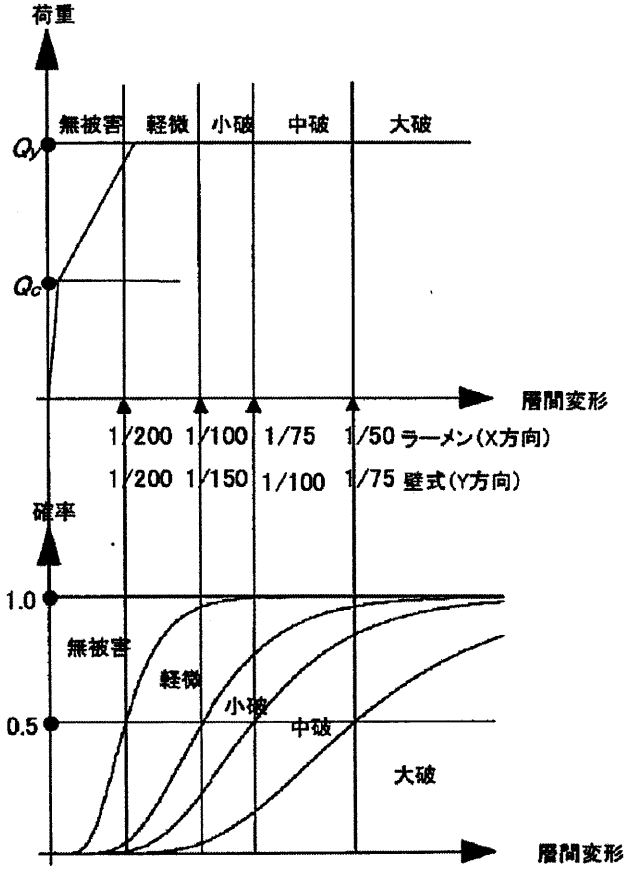



図 13　構造体のスケルトン・カーブ、損傷状態、フラジリティ曲線の概念図

図 13 は応答変形に依存する構造体のフラジリティ曲線の概念図を示している。それぞれの損傷費用は建物の応答変形に寄与するもの、応答加速度に寄与するものがあり、建物の応答と図 13 のフラジリティ曲線により決定する損傷費用率との対応から損傷費用を算定する。まず対象建物の構造種別、構造形式、建築年代などを考慮して各層の層間変形による建物（構造体）の性能損傷状態をあらかじめ設定する。そして、得られた各層の最大層間変形、最大床応答加速度により、建物の損傷状態を決め、損傷状態に基づいた損傷率を各層ごとに決めることになる。表 6 に損傷費用解析に用いた解析パラメータを示す。

表 6　損傷費用解析のパラメータ

| パラメータ | 単位 | 入力値 |
|---|---|---|
| 延べ床面積 | (m2) | 11000 |
| 部屋数 | | 100 |
| 構造部材の再調達費用 | (億) | 9.31 |
| 変形依存型非構造部材の再調達費用 | (億) | 11.97 |
| 加速度依存型非構造部材の再調達費用 | (億) | 5.32 |
| ダンパーの設置費用 | (億) | 3.67 |
| 収容物の再調達費用 =0.08*NROOM | (億) | 8.00 |
| 一時避難の引越し費用（往復） =0.02*2*NROOM | (億) | 4.00 |
| 引越し先での家賃（/day） =0.0018*NROOM/30 | (億) | 0.006 |
| 解体・撤去費用 =0.00003*AFLOOR | (億) | 0.33 |
| 一日あたりの収益 | (億) | 0.02 |

・フラジリティ曲線の中央値

構造部材（最大層間変形角）

| | 補強前 | 補強後 |
|---|---|---|
| 軽微 | 1/400 | 1/200 |
| 小破 | 1/200 | 1/150 |
| 中破 | 1/150 | 1/100 |
| 大破 | 1/100 | 1/75 |
| BETA | 0.4 | 0.4 |

変形依存型非構造部材（最大層間変形角）

| | 補強前 | 補強後 |
|---|---|---|
| 軽微 | 0.002 | 0.004 |
| 小破 | 0.004 | 0.008 |
| 中破 | 0.013 | 0.025 |
| 大破 | 0.025 | 0.05 |
| BETA | 0.5 | 0.5 |

加速度依存型非構造部材及び収容物（床応答加速度(G)）

| | 補強前 | 補強後 |
|---|---|---|
| 軽微 | 0.3 | 0.4 |
| 小破 | 0.6 | 0.8 |
| 中破 | 1.2 | 1.5 |
| 大破 | 2.4 | 2.4 |
| BETA | 0.6 | 0.6 |

家財の損傷費用率（床応答加速度(G)）

| | 補強前 | 補強後 |
|---|---|---|
| 軽微 | 0.01 | 0.01 |
| 小破 | 0.05 | 0.05 |
| 中破 | 0.25 | 0.25 |
| 大破 | 0.5 | 0.5 |

### 4.5 損傷費用の解析結果

建物の応答解析結果と、それを基にした損傷費用の解析結果を**図 14** に示す。

地震動および建物モデルについては、1 サンプルに対して X,Y の 2 方向、各 100 サンプルで 200 回のシミュレーションを行った。これに対して実際に発生する損傷費用は X,Y 方向別に生じるのではなく、1 サンプルに 1 つなので、100 サンプルに対して 100 の損傷費用となる。そこで本解析では、各階における X,Y 方向の被害のうち、大きい方をその階の被害とした。

既存モデル（A）と補強後モデル（B）を比較すると、特に M7.5 の地震に対する損傷費用が補強により大きく低減されたことがわかる。この結果を基に、**図 15** では各マグニチュードでの損傷費用の期待値を算出した。

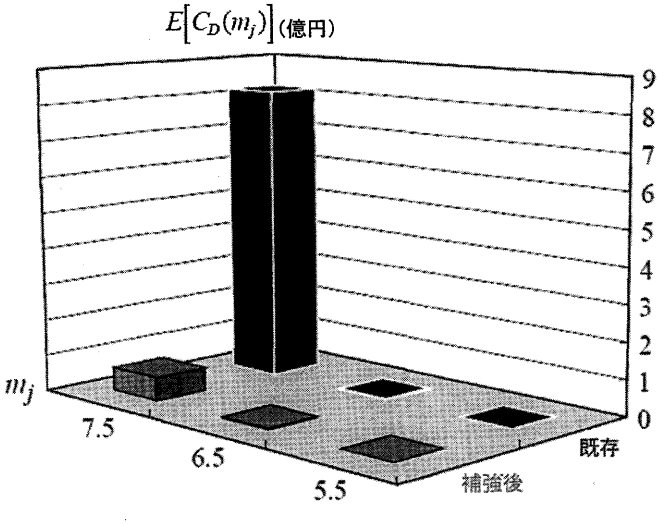



**図 15　各マグニチュードの地震に対する損傷費用の期待値**

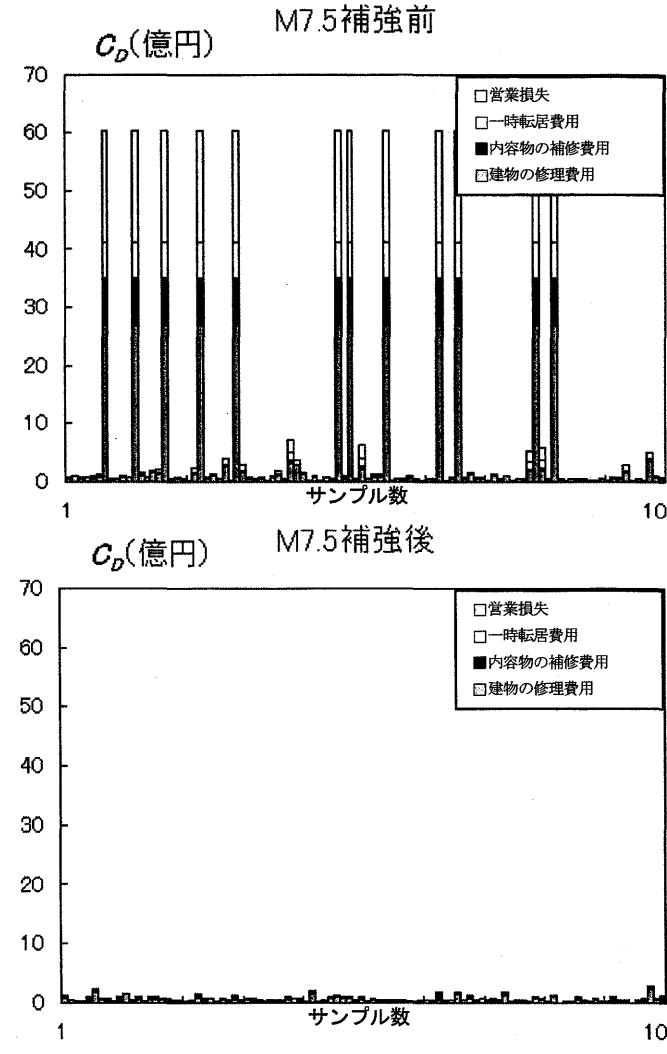



**図 14　各マグニチュードに対する損傷費用**

### 4.6 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、**図 3(b)** の地震活動と**図 15** の期待損傷費用を（2）式に代入し、期待 LCC を算出した（**図 16** 破線）。宮城県沖地震（m3=7.5）の発生のみ BPT モデルとした結果が**図 16** の実線である。**図 4** の地震活動と**図 15** の期待損傷費用を（1）式に代入し期待 LCC を求めている。

改修の場合は通常、LCC に建物の再調達価格(26.6 億円)を加えない。**図 16** では「改修の場合にも、建物所有者に再調達費用を明示できる」という利点から、再調達価格を加えている。

**図 16** のポアソン過程の結果からは、建物の改修に 3.67 億円かかるが、建物の供用期間を約 20 年以上とする場合、期待 LCC を軽減できることがわかる。建物供用期間を 50 年とする場合は、期待 LCC の差は 6.4 億円となり、これが建物を改修することにより得られる利益の期待値である。

また、宮城県沖地震（m3=7.5）の発生を BPT モデルとする場合、交点が 11.0 年、50 年間での差が 9.5 億円、改

修建物であるので供用期間を30年と考えても5.1億円になることがわかる。これはBPTモデルが地震発生率の時間依存性を考慮でき、前回の地震から長い時間が経過して地震危険度が高まっていることが期待 LCC に反映されるためである。

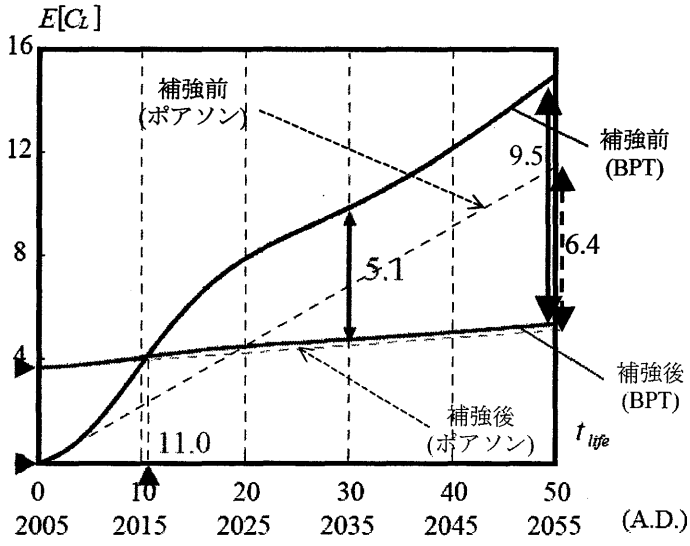



**図16　建物供用期間(年) — 期待LCC(億)**

## 5. 結論

本研究では、大地震の危険性が取りざたされる現在、特に現行基準に満たない耐震性能である既存不適格建物を所有する個人や企業に対して、所有する建物を存置するか、補強すべきか、立て替えるべきかといった際の判断材料の提案手法および提案結果を、実建物を用いたリクマネジメント解析を行って示した。

本解析で想定した建物（庁舎）においては、耐震補強を行うことで、建物の耐震性能が向上しただけでなく、今後の供用期間を30年と想定した場合には、補強を行うことで、供用期間内に期待LCCを低減することができる、つまり投資した元が取れる、補強効果が見込める補強案であるという結果を示している。

建物を補強する、立て替える際の意思決定の要因が、必ずしもすべて構造的な解析結果だけによるわけではないが、実際に補強に投資することの効果を、PML値のような、ある想定した再現期間に対する被害率のみで比較・評価するのではなく、LCCという評価値を用いることで、費用対効果を投資額と建物の供用期間に即して、わかりやすくとらえることができ、合理的に建物の所有状態を選定できる一つの判断材料になると考える。

参考文献


1)Takahashi,Y.,Der kiureghian,A. and Ang,A.H-S.,"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,2002.

2)Takahashi,Y.,DerKiureghian,A. and Ang,A.H-S.,"Life-cycle cost analysis based on a renewal model of earthquake occurrences",Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.33,pp.859-880,2004

3)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.jisin.go.jp/main/,2002

4)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.jisin.go.jp/main/,2001.

5)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.jisin.go.jp/main/,2001.


（受理：平成25年5月23日）