

# 地震リスク分析に基づく地震対策の効果検証と 既存建物の耐震改修優先順位の検討

## Demonstration of Effectiveness of Aseismic Improvement and Assessment of Seismic Upgrade Priority of Existing Buildings Based on Seismic Risk Analysis

中南 滋樹 SHIGEKI NAKAMINAMI

谷垣 正治 MASAHARU TANIGAKI

建築事業企画部 山岸 邦彰 KUNIAKI YAMAGISHI

本報では、地震リスク分析に基づく地震対策の効果検証として、地震発生確率が高いとされている地域における既存病院建築物における制震改修・免震改修と新築物流倉庫における免震構法の地震リスク低減効果を定量的に評価した。また、地震リスク分析に基づく既存建物の改修優先順位の検討として、全国に散在する7棟の事務所ビル群に対する耐震改修優先順位を算出するとともに、工法別改修コスト配分の試みを検討した。

**キーワード：**地震リスク分析，ライフサイクルコスト，耐震改修，優先順位

In this paper, as a demonstration of the effectiveness of structural improvement against earthquake based on seismic risk analysis, the reduction of seismic risk is discussed quantitatively for a existing hospital retrofitted with seismic control devices or base isolation system and a newly designed distribution warehouse that are located in the hazardous area for earthquake. And the assessment of seismic upgrade priority for a group of existing buildings based on seismic risk analysis is also proposed. The assessment is applied to 7 office buildings that are located all over Japan, and the upgrade priority and the optimum distribution of upgrade cost according to the retrofitting methods is discussed.

**Key Words:** Seismic Risk Analysis, Life-Cycle Cost, Assessment of Seismic, Upgrade Priority

### 1. はじめに

地震リスク分析は、建物の建つ敷地の地震危険度と建物の耐震性を比較することによって、地震が発生した場合の建物の被害額を推定する方法である。分析結果から建物の耐震性能の費用対効果が分かるので、既存建物の耐震改修工法の選定、新築建物の耐震性能グレードの選定など建物所有者の意思決定に寄与することができる。

高橋ら<sup>1),2)</sup>は、建物所有者の地震対策を推進することを目的とした地震リスク・マネジメント手法を提案している。この手法では、建物所有者の地震に起因する総支出（期待ライフサイクル・コスト：期待LCC）を地震リスクと捉え、複数の設計案のなかからLCCを最小にする最適案を建物所有者に提示することができる。地震リスクを算出する際に、関連する研究分野の最新の知見を導入しており、計算結果の信頼性と納得性を高めている。

本報では、地震発生確率が高いとされている地域における既存建物（病院）および新築建物（物流施設）を対象として、構法による期待LCCの違いを上述の地震リスク・マネジメント手法を用いて検証を行った。また、複数建物を耐震改修するにあたり、改修の優先順位の検討手法を検討した。また、耐震改修が必要な建物を複数所有している所有者にとり、改修の優先順位を決定することが重要になる。本報では、事務所を対象とする複数建物の耐震改修に関する優先順位の決定方法について検討し適用例を示す。

### 2. 地震リスク・マネジメント手法の概要<sup>1),2)</sup>

#### (1) 定義

本報では、ISO/IEC Guide 73およびJIS Q 2001に従い、リスクを「事態の発生確率とその結果の組み合わせ」と定

義する。将来起こりえる結果（損失）は何通りか予想され、それぞれに対して発生確率が与えられる。リスクは損失が離散的な場合には確率質量関数で、連続量の場合は確率密度関数で定量的に表すことができる。地震発生に伴う損失の例として、被害人数、再調達価格に対する建物・収容物の修理費用、事業中断損失が挙げられる。

(2) 期待ライフサイクル・コストの定式化

ある設計案のLCCは確定値としては予測できないが、最小期待損失基準に従うと、LCCの期待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は式(1)のように定式化される。

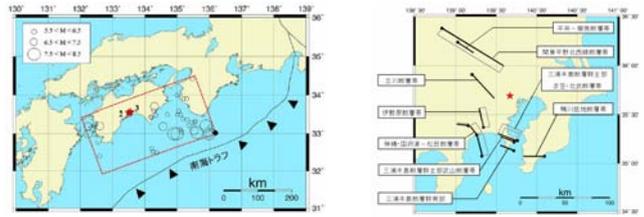
$$E[C_L] = C_I + \sum_{all\ sources} \sum_{j=1}^K E[C_D(m_j)] \int_0^{t_{life}} Q^{t-d} \sum_{n=1}^{\infty} f_{w_n}(t, m_j | W_t > t_0) dt \quad (1)$$

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、 $1/(1+d)$ は金利係数、 $d$ は利率率、 $f_{w_n}(t, m_j | W_t > t_0)$  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、 $all\ sources$ は考慮されるすべての震源域を示す。 $C_D(m_j)$ は、断層破壊および弾性波の伝播、表層地盤の増幅、建物の応答、損傷費用発生までのすべてのプロセスを関連する研究分野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で算出できる。ただし、すべての事象は不確定性を含むので、モンテカルロ・シミュレーションにより期待値 $E[C_D(m_j)]$ を求める。なお、マグニチュード $m_j$ の変数を断層破壊 $EQ_i$ の変数にして地震リスク曲線から算出される期待LCCは式(1)と一致する。

3. 地震動の作成<sup>1),2)</sup>

(1) 震源域および地震活動

耐震改修技術の効果検証で対象とする建物位置は、高知県高知市と東京都中野区の2地点とした。震源域は、高知の建物では想定される南海地震（M8.4前後、30年以内の発生確率40%）の断層面を含む区域（図-1(a)）とし、東京の建物では「主要98断層帯（図-1(b)）」「海溝型地震」「その他の地震」の震源域のうちから発生確率が高く、強い地震動を生じるという観点から、表-1の網掛けした10地震を対象とした。図-2は地震カタログおよび地震調査委員会長期評価部会の報告書を参考に、南海地震の震源域の地震活動を時間とマグニチュードの関係で示したものである。南海地震（ $m_3=8.0$ ）の発

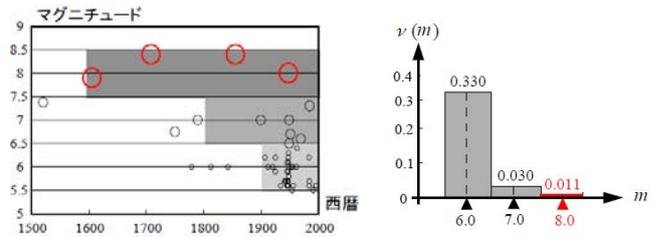


(a) 想定南海地震 (b) 主要98断層帯

図-1 想定震源域

表-1 対象地震（東京周辺の震源）

| NO | 震源名                          | M <sub>w</sub> | 確率モデル | T(年)  | α    | t <sub>0</sub> (年) |
|----|------------------------------|----------------|-------|-------|------|--------------------|
| 1  | 鴨川低地断層帯                      | 6.4            | ポアソン  | 7900  | —    | —                  |
| 2  | 関東平野北西縁断層帯                   | 7.4            | BPT   | 21500 | 0.24 | 505                |
| 3  | 平井—橋挽断層帯                     | 6.6            | ポアソン  | 7000  | —    | —                  |
| 4  | 立川断層帯                        | 6.7            | BPT   | 12500 | 0.24 | 16500              |
| 5  | 伊勢原断層帯                       | 6.4            | BPT   | 5000  | 0.24 | 955                |
| 6  | 神縄・国府津—松田断層帯                 | 6.8            | BPT   | 1050  | 0.24 | 780                |
| 7  | 三浦半島断層群主部 衣笠・北武断層帯           | 6.7            | BPT   | 3400  | 0.24 | 1405               |
| 8  | 三浦半島断層群主部 武山断層帯              | 6.5            | BPT   | 1750  | 0.24 | 2103               |
| 9  | 三浦半島断層群南部                    | 6.3            | ポアソン  | 1600  | —    | —                  |
| 10 | 大正型関東地震                      | 7.9            | BPT   | 219.7 | 0.21 | 81.3               |
| 11 | 南関東地震                        | 7.2            | ポアソン  | 23.8  | —    | —                  |
| 12 | フィリピン海プレートM <sub>w</sub> 5.0 | 5.0            | ポアソン  | 0.268 | —    | —                  |
| 13 | フィリピン海プレートM <sub>w</sub> 6.0 | 6.0            | ポアソン  | 2.07  | —    | —                  |
| 14 | 不特定活断層M <sub>w</sub> 5.0     | 4.98           | ポアソン  | 1.62  | —    | —                  |
| 15 | 不特定活断層M <sub>w</sub> 6.0     | 5.76           | ポアソン  | 12.8  | —    | —                  |
| 16 | 不特定活断層M <sub>w</sub> 7.0     | 6.45           | ポアソン  | 120   | —    | —                  |



(a) 時間 - マグニチュード (b) マグニチュード - 年発生率

図-2 対象震源域の地震活動（想定南海地震）

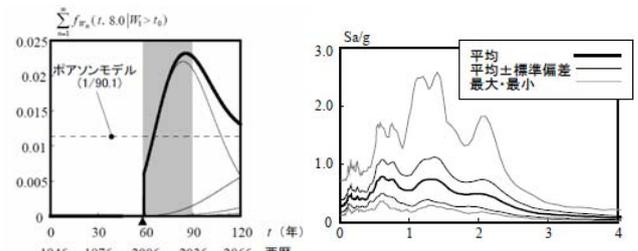
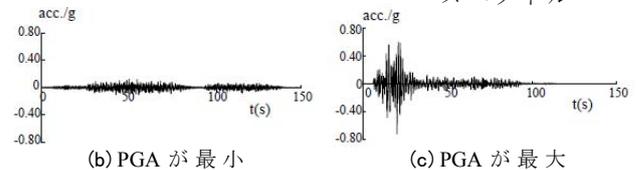


図-3 BPTモデルの地震発生率 (a) 加速度応答スペクトル



(b) PGAが最小 (c) PGAが最大 図-4 地表面における地震動特性（想定南海地震  $m_3=8.0$ ）

生をBPT（Brownian Passage Time）モデル<sup>3)</sup>（ $\mu = 90.1$ 年、 $\alpha = 0.22$ 、 $t_0 = 59$ 年）とすると、その発生率は図-3のようになる。

(2) 地震動

南海地震の $m_1=6.0$ 、 $m_2=7.0$ 、 $m_3=8.0$ の地震と東京の建物を対象とした10地震に対して、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い、各サンプル

の損傷費用  $C_D(m_j)$  の期待値として  $E[C_D(m_j)]$  を求めた。地震基盤上の地震動波形は統計的グリーン関数法によって作成した。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に基づいて決めた。震源域内に断層の位置、断層面内に破壊開始点位置、アスペリティ位置をランダムに設定した。地震基盤から地表面までの地盤応答解析はSHAKE<sup>4)</sup>によって行った。その際、水平成層地盤モデルにおける層厚、密度、S波速度にばらつきを与えて設定した。図-4に代表的な例として、南海地震  $m_3=8.0$  の断層破壊に対する地表面の地震動波形 100 サンプルの加速度応答スペクトルの統計値およびPGAが最小および最大を示す。

#### 4. 想定南海地震における病院建築物の免震改修および制震改修効果検証<sup>1),5)</sup>

##### (1) 対象建物の概要

病院建築物では、地震災害時に機能維持できるように一般の建築物より高い耐震性が要求されている。しかし、一般にどの程度まで耐震性能を高めれば良いかという定量的な議論は難しい。本節では、想定した病院建築物に対して耐震改修法の違いによる想定南海地震による地震リスク低減効果を定量的に評価した。

想定した対象建築物の概要を表-2に、概観イメージを図-5に示す。本建物は1971年(昭和46年)に高知県高知市に建設されたと想定した地上8階、地下2階、塔屋2階の総合病院である。立地点の地盤種別は第2種地盤とする。上部架構は一部RC耐震壁を含むSRC造のラーメン構造であり、RC壁および柱のせん断破壊によって終局に至る比較的脆弱な既存不適格建築物を想定した。本建物の新築費用は61.0億円とし、制震改修費用は5.0億円、免震改修費用は12.0億円とした。

##### (2) 建物の地震応答解析モデル

解析モデルは等価せん断型モデルとし、各層の復元力特性はTri-Linear型、履歴則はTakedaモデル( $\gamma=0.4$ )とした。表-3に無補強モデルの各層の復元力特性値を示す。基礎固定時のX方向の弾性1次固有周期は0.410秒、Y方向は0.423秒である。減衰は瞬間剛性比例型で1次に対して3%とした。建築物の力学特性のばらつきを考慮して、重量、剛性、耐力、減衰定数をそれぞれ変動係数12, 30, 25, 65%とする100モデルを作成した。

制震改修は、新設する外付け鉄骨フレームの各層に粘性ダンパーを設置する計画とした。外付けフレーム補強後のX方向の弾性1次固有周期は0.408秒、Y方向は0.413秒である。粘性ダンパーは速度のべき乗の特性を

表-2 対象建物の概要

|      |                      |
|------|----------------------|
| 所在地  | 高知県高知市               |
| 用途   | 総合病院                 |
| 建物規模 | 地上8階、地下2階、塔屋2階       |
| 構造   | 鉄骨鉄筋コンクリート造          |
| 延床面積 | 17,500m <sup>2</sup> |
| 建築面積 | 1,800m <sup>2</sup>  |
| 総室数  | 250室                 |
| 基礎形式 | 杭基礎                  |
| 建築年  | 1971年(昭和46年)         |



図-5 概観イメージ

表-3 対象建築物の復元力特性値

| 層   | 重量<br>kN | X方向         |            |            |          |          | Y方向         |            |            |          |          |
|-----|----------|-------------|------------|------------|----------|----------|-------------|------------|------------|----------|----------|
|     |          | K1<br>kN/cm | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | Qc<br>kN | Qy<br>kN | K1<br>kN/cm | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | Qc<br>kN | Qy<br>kN |
| PH2 | 2,648    | 6,864       | -          | -          | -        | -        | 16,377      | -          | -          | -        | -        |
| PH1 | 3,727    | 12,748      | -          | -          | -        | -        | 22,849      | -          | -          | -        | -        |
| 8   | 14,808   | 47,562      | 0.294      | 0.001      | 11,277   | 22,751   | 45,404      | 0.266      | 0.001      | 10,689   | 21,672   |
| 7   | 16,769   | 70,607      | 0.231      | 0.001      | 16,475   | 34,813   | 69,234      | 0.256      | 0.001      | 15,592   | 32,558   |
| 6   | 17,456   | 97,085      | 0.256      | 0.001      | 22,653   | 45,110   | 99,537      | 0.237      | 0.001      | 20,594   | 42,168   |
| 5   | 18,142   | 103,950     | 0.182      | 0.001      | 27,066   | 54,328   | 99,243      | 0.208      | 0.001      | 24,320   | 50,798   |
| 4   | 18,338   | 125,525     | 0.162      | 0.001      | 30,792   | 62,272   | 125,819     | 0.202      | 0.001      | 28,145   | 58,251   |
| 3   | 18,829   | 167,693     | 0.170      | 0.001      | 33,244   | 69,136   | 139,646     | 0.172      | 0.001      | 29,812   | 64,723   |
| 2   | 19,907   | 165,152     | 0.137      | 0.001      | 34,127   | 75,020   | 173,577     | 0.155      | 0.001      | 31,283   | 70,117   |
| 1   | 22,065   | 351,078     | 0.137      | 0.001      | 38,245   | 80,022   | 355,000     | 0.133      | 0.001      | 33,832   | 74,824   |
| B1  | 24,419   | 345,194     | -          | -          | -        | -        | 318,716     | -          | -          | -        | -        |
| B2  | 29,910   | 826,700     | -          | -          | -        | -        | 59,459      | -          | -          | -        | -        |

表-4 フラジリティ曲線の中央値と対数標準偏差  $\beta$

| 項目          | 層間変形角(rad.)<br>加速度(g) | $\beta$ | 中央値   |       |       |       |       |
|-------------|-----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             |                       |         | 無被害   | 軽微    | 小破    | 中破    | 大破以上  |
| 構造部材 (rad.) | 0.4                   | ---     | 1/200 | 1/180 | 1/165 | 1/150 | 1/150 |
| 非構造部材       | 変形依存型(rad.)           | 0.5     | ---   | 1/250 | 1/125 | 1/40  | 1/20  |
|             | 加速度依存型(g)             | 0.6     | ---   | 0.3   | 0.6   | 1.2   | 2.4   |
| 収容物 (g)     | 0.6                   | ---     | 0.3   | 0.6   | 1.2   | 2.4   |       |

表-5 費用・復旧日数等に関するパラメーター一覧

| 建築の再調達費用<br>(億円) | 構造部材       |             | 構造部材の被害<br>程度による復旧<br>日数(日)   | 軽微 |      |
|------------------|------------|-------------|-------------------------------|----|------|
|                  | 変形依存型非構造部材 | 加速度依存型非構造部材 |                               | 小破 | 135  |
|                  | 14.1       | 15.5        | 31.4                          | 中破 | 540  |
| 収容物の再調達費用(億円)    | 25.50      |             |                               | 大破 | 720  |
| 改修費用             | 免震         | 12          |                               | 軽微 | 2    |
| (億円)             | 制震         | 5           | 構造部材の被害<br>程度による機能<br>損失日数(日) | 小破 | 67.5 |
| 一日あたりの収益(億円)     | 0.15       |             |                               | 中破 | 270  |
| 解体撤去費用(億円)       | 1.8        |             |                               | 大破 | 360  |
| 往復引越し費用(億円)      | 12.5       |             |                               |    |      |
| 引越し先での家賃(億円/日)   | 0.018      |             |                               |    |      |

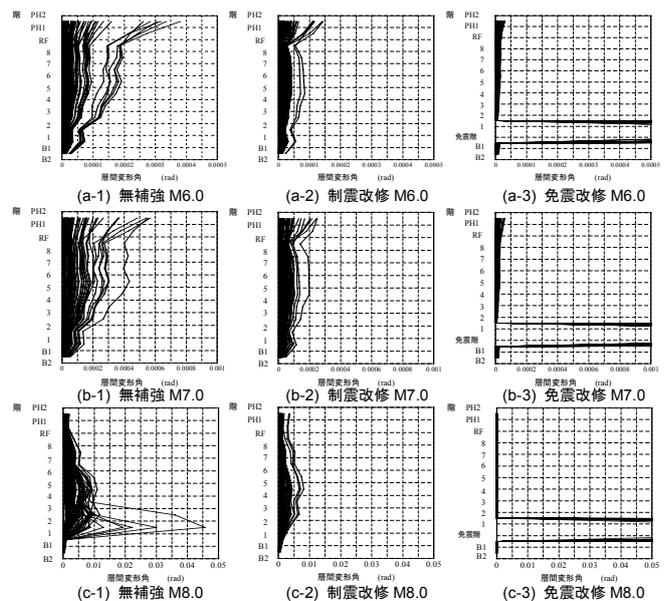


図-6 各マグニチュードの地震に対する層間変形角(X方向)

もつ装置とし、地震動最大速度0.5m/s相当の入力に対して層間変形角が1/100となるようなダンパー量を設定し

た。免震改修は、B1F柱頭に鉛入り積層ゴムを配置する中間階免震とし、上部構造の補強は行っていない。弾性一次固有周期は積層ゴム 250% ひずみ時でX方向3.37秒、Y方向3.38秒である。

(3) フラジリティ曲線および費用のパラメータ

表-4に各項目のフラジリティ曲線の中央値およびばらつき(対数標準偏差β)を示す。本建物はせん断破壊先行型であるため、構造部材の大破における層間変形角の中央値を1/150とした。また、構造部材のフラジリティ曲線のばらつきβ、変形依存型非構造部材、加速度依存型非構造部材、収容物のフラジリティ曲線の中央値およびばらつきβはHAZUS99<sup>6)</sup>のデータを参考に定めた。

表-5に費用・復旧日数等に関するパラメータ一覧を示す。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、一日当たりの収益は、近年の一般的な病院のコスト統計から定めた。収容物の費用は、病院の経営・運営形態によってかなりの差があるため、ここでは一般の民間病院を想定した25億円と公立病院や高度専門化した病院などを想定した50億円の2ケースとした。構造部材の被害程度から推定される復旧日数および機能損失日数はHAZUS99<sup>6)</sup>のデータを参考に定めた。

(4) 解析結果

図-6に南海地震を対象に建設地点で推定される各マグニチュード( $m_j$ )の地震に対する最大層間変形角(X方向)を示す。図-7に  $m_3=8.0$  地震における損傷費用(収容物50億円)を示す。無補強では100サンプルのほとんどで全損(建物+収容物+休業損失)となっているが、免震改修では損傷費用はほとんど発生していない。

図-8に損傷費用の期待値を示す。耐震改修を行わない無補強の場合と、制震改修および免震改修の場合の3ケースについて建物の供用期間と初期費用+地震リスクの累積値を表す期待LCCを図-9に示す。制震改修および免震改修された建物は、初期費用は若干掛かるが地震リスクが低くなることによりLCCが低減される。無補強の場合と改修した場合の収益分岐点は、収容物費用が25億円の場合には7.1年~9.9年、50億円の場合には6.4年~9.0年である。本解析例では、制震改修のほうが免震改修よりも初期コストの回収年数が短くなっているが、収容物価格が大きくなるほど制震改修と免震改修の差が小さくなっている。

5. 東京周辺の震源域を対象とした物流倉庫における免震構法の効果検証<sup>2),7)</sup>

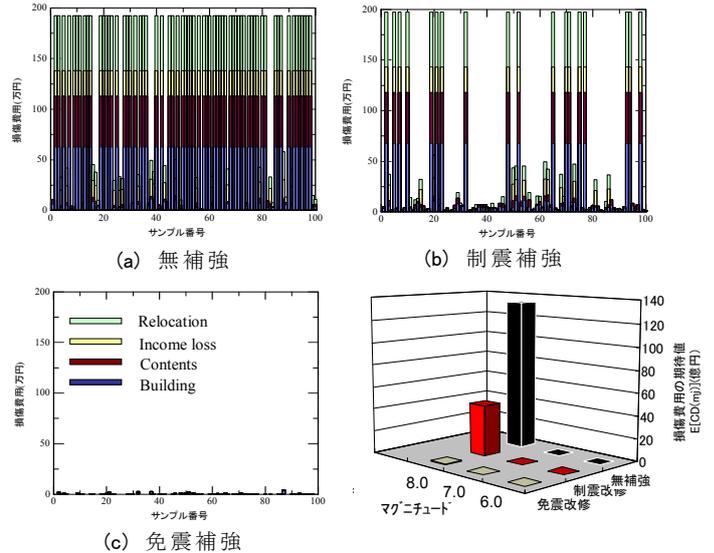


図-7  $m_3=8.0$ における損傷費用

図-8 各  $m_j$  の損傷費用期待値

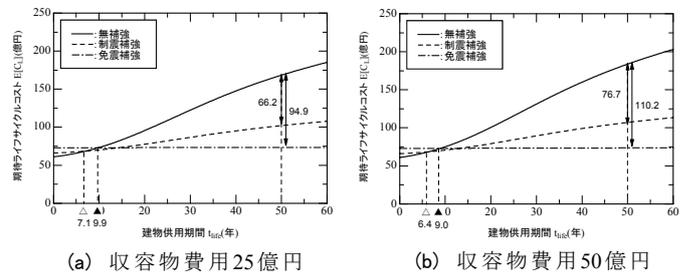


図-9 期待ライフサイクルコスト

(1) 対象建物の概要

近年の社会環境の変化に伴い、物流倉庫の役割は荷物長期保管型から流通型・通過型・配送型へと変化しつつある。事業主は多様化し市場は増大するなか、施設の大型化・集約化が求められている。倉庫建築の耐震性能向上は高付加価値化の条件として必然である。本節では想定した物流倉庫に対して免震構法を採用し、東京周辺の震源域による地震リスク低減効果を定量的に評価した。

表-6に対象建築物の概要を、図-10に概観イメージを示す。本建物は新築として東京都中野区に建設されたと想定した地上4階建ての物流倉庫である。立地点の地盤種別は第2種地盤とする。流通型が主流となっている倉庫では柱の少ない広い荷捌きスペースを確保し、短工期でローコストの工法が望まれる。ここでは、上部架構に柱鉄筋コンクリート造、梁鉄骨造の混合ラーメン+ブレース構造を採用しているものとした。本建物の新築費用は45.0億円とし、免震工事費用は3.3億円とした。

(2) 建物の地震応答解析モデル

解析モデル(図-11)は、等価せん断型マサ-バネモデルとし、各層の復元力特性は修正トリリニア型、履歴則は武田モデル( $\gamma = 0.4$ )とした。図-12に各層の復元力特性を示す。耐震モデル基礎固定時のX方向の弾性1

次固有周期は1.26秒，Y方向は1.08秒である。減衰は，瞬間剛性比例型で1次に対して3%とした。建築物の力学特性のばらつきを考慮して，重量，剛性，耐力，減衰定数をそれぞれ変動係数11%，10%，15%，30%とする100モデルを作成した。

免震構造は，鉛入り積層ゴム（修正トリリニアモデル）を68基，天然ゴム系積層ゴム（弾性モデル）を44基，転がりすべり支承（完全断塑性バイリニアモデル）を16基，基礎に配置する構法とし，上部構造の剛性および耐力を低減したモデルとした（図-12）。積層ゴム208%（50cm）歪み時の等価周期は3.10秒，等価粘性減衰定数は18%である。免震層の水平性能の変動係数（塑性剛性，耐力，摩擦係数）は5%とした。

（3）フラジリティ曲線および費用のパラメータ

表-7に各項目のフラジリティ曲線の中央値およびばらつき（対数標準偏差β）を示す。構造部材のフラジリティ曲線のばらつきβ，変形依存型非構造部材，加速度依存型非構造部材，収容物のフラジリティ曲線の中央値およびばらつきβはHAZUS99<sup>6)</sup>のデータを参考に定めた。

表-8に費用・復旧日数等に関するパラメータ一覧を示す。構造部材および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および一日当たりの収益は，一般的な物流倉庫のコスト統計から定めた。収容物の再調達費用，往復の引越し費用および引越し先での1日当たりの家賃は，地震リスクの対象者が，物流不動産所有者と荷主の2ケースとした。構造部材の被害程度から推定される復旧日数および機能損失日数はHAZUS99<sup>6)</sup>のデータを参考に定めた。

（4）フラジリティ曲線および費用のパラメータ

図-13に大正型関東地震（地震NO.10）に対する最大層間変形角（X方向）を示す。積層ゴムの最大歪みは240%（57.6cm）であった。図-14に最も被害額の大きかったNO.10による被害額を示す。耐震では100サンプルのうち，ほとんどのケースで全損（建物+収容物+休業損失）となっているが，免震では損傷費用はほとんど発生していない。バックグラウンド地震（地震NO.11～NO.16）の被害額はほとんどなく，地震リスクに与える影響は小さかった。図-15に各地震に対する損傷費用の期待値を示す。地震リスクの対象者を物流不動産所有者，それ以外，荷主として評価した。各対象者・各地震において免震の方が耐震より予想損失額が低減している。所有者のリスクとして，初期費用と地震リスクの累積値を表す期待ライフサイクルコスト（LCC）を図-16に示す。期待LCCの計算はポアソン&BPTモデルとした。

表-6 対象建築物の概要

|      |                      |
|------|----------------------|
| 所在地  | 東京都中野区               |
| 用途   | 物流倉庫                 |
| 建物規模 | 地上4階                 |
| 構造   | 柱RC+梁S 混合ラーメン+ブレース構造 |
| 延べ面積 | 50,400m <sup>2</sup> |
| 建築年  | 新築                   |



図-10 概観イメージ

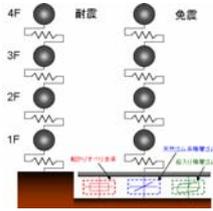


図-11 解析モデル

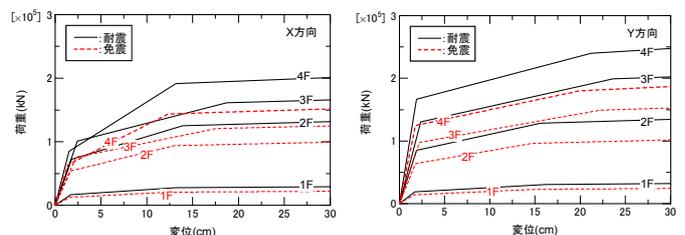


図-12 対象建築物の復元力特性（左：X方向、右：Y方向）

表-7 フラジリティ曲線の中央値と対数標準偏差β

| 項目                | β   | 中央値 |       |       |       |      |
|-------------------|-----|-----|-------|-------|-------|------|
|                   |     | 無被害 | 軽微    | 小破    | 中破    | 大破以上 |
| 構造部材X方向 (rad.)    | 0.4 | --- | 1/200 | 1/100 | 1/75  | 1/50 |
| 構造部材Y方向 (rad.)    | 0.4 | --- | 1/200 | 1/100 | 1/75  | 1/50 |
| 変形依存型非構造部材 (rad.) | 0.5 | --- | 0.004 | 0.008 | 0.025 | 0.05 |
| 加速度依存型非構造部材 (g)   | 0.6 | --- | 0.3   | 0.6   | 1.2   | 2.4  |
| 収容物 (g)           | 0.6 | --- | 0.2   | 0.4   | 0.8   | 1.6  |

表-8 費用・復旧日数等に関するパラメータ一覧

| 項目                | 費用(億円) |       | 項目                 | 日数(日)   |     |
|-------------------|--------|-------|--------------------|---------|-----|
|                   | オーナー   | 荷主    |                    |         |     |
| 構造部材の再調達費用        | 27.5   |       | 構造部材の被害程度による復旧日数   | 軽微      | 10  |
| 変形依存型非構造部材の再調達費用  | 11.8   |       |                    | 小破      | 90  |
| 加速度依存型非構造部材の再調達費用 | 5.7    |       |                    | 中破      | 180 |
| 収容物の再調達費用         | 1.2    | 45.6  |                    | 大破      | 360 |
| 免震工事費用            | 3.3    |       | 構造部材の被害程度による機能損失日数 | 軽微      | 1   |
| 解体・撤去費用           | 2.52   |       |                    | 小破      | 18  |
| 往復の引越し費用          | 0.072  | 1.63  |                    | 中破      | 54  |
| 引越し先での一日当たりの家賃    | 0.0024 | 0.032 |                    | 大破      | 360 |
| 一日当たりの収益(オーナー)    | 0.016  |       | 荷主の家賃              | 0.016億円 |     |

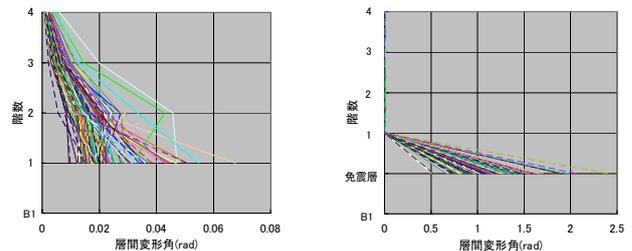


図-13 大正型関東地震(NO.10)に対する層間変形角(X方向)

免震は，初期費用は若干掛かるが地震リスクが低くなることによりLCCが低減される。所有者にとっての耐震との損益分岐年は，44.0年である。荷主のリスクとして，地震リスクに賃料を加算したLCE(Life Cycle Expenditure)を図-17に示す。荷主にとっては，免震の倉庫を利用することにより，LCEが低減される。使用期間10年で耐震に対して2.72億円の差額となる。

## 6. 地震リスク分析に基づく既存建物の耐震改修優先順位の検討<sup>8),9)</sup>

### (1) 評価項目

耐震改修の優先順位を検討する際には、意思決定に必要な項目を過不足なく列挙し、それらの特性を評価する必要がある。ここでは評価項目を安全性  $S$ 、経済性  $E$ 、事業継続性  $B$  として、各評価項目の具体的な指標をそれぞれ被害人数  $C_s$ 、建物・収容物の修理/再調達費用

$C_E$ 、事業中断損失  $C_B$  とした。いずれの指標も特定の地震に対するものではなく、想定期間 ( $t_0 \sim t_0+t_{life}$ ) におけるすべての地震を対象としたものである。各値の確率関数全体 (リスク) ではなく、式 (2) ~ 式 (3) によって期待値  $E[C]$  を計算する。

$$E[C_s] = I_0 \times E[N_D^c] \quad (2)$$

$$E[C_E] = C_0 \times E[C_R^c] / C_0 \quad (3)$$

$$E[C_B] = V_0 \times E[D_L^c] \quad (4)$$

ここで、 $I_0$  は平常時の建物の収容人数、 $V_0$  は建物・収容物の再調達費用、 $V_0$  は平常時の単位時間当たりの事業価値である。これらは対象建物に対する調査により設定できる。また、 $N_D^c$  は設定した被害の発生回数、 $C_R^c$  は再調達費用に対する修理費用、 $D_L^c$  は事業中断時間である。いずれも想定期間内の累積値であり式 (5) ~ 式 (7) のように定式化できる。

$$E[N_D^c] = \sum_{allEQ} E[N_D(EQ_i)] \cdot E[N(EQ_i)] \quad (5)$$

$$E[C_R^c] = \sum_{allEQ} E[C_R(EQ_i)] \cdot E[N(EQ_i)] \quad (6)$$

$$E[D_L^c] = \sum_{allEQ} E[D_L(EQ_i)] \cdot E[N(EQ_i)] \quad (7)$$

ここで、 $N_D(EQ_i)$  は特定の断層破壊  $EQ_i$  が発生した場合の被害回数、 $C_R(EQ_i)$  は再調達費用に対する修理費用、 $D_L(EQ_i)$  は事業中断時間である。 $E[N(EQ_i)]$  は想定期間における断層破壊  $EQ_i$  の発生回数の期待値である。

地震リスク分析には、震源モデルおよび断層破壊から被害発生までのシナリオ解析を導入できる手法<sup>2)</sup>を、シナリオ解析における建物の応答解析には、限界耐力計算法を利用した。構造モデルおよびフラジリティは、耐震診断結果から抽出される情報に基づいて設定した。

### (2) 評価指標

これらの評価項目に基づいて意思決定をする場合、各評価項目の重要度を考慮する必要がある。ここでは、著者により重要度を評価し、AHP法<sup>10)</sup>による重みを算定した。評価項目間の一対比較による重みを  $w$ 、建物間の一対比較による重みを  $c$  とすると、建物  $j$  の優先度合  $PI_j$  は式 (8) で与えられる。

$$PI_j = w_s \cdot C_{s,j} + w_{ECE} \cdot j + w_B \cdot C_{B,j} \quad (8)$$

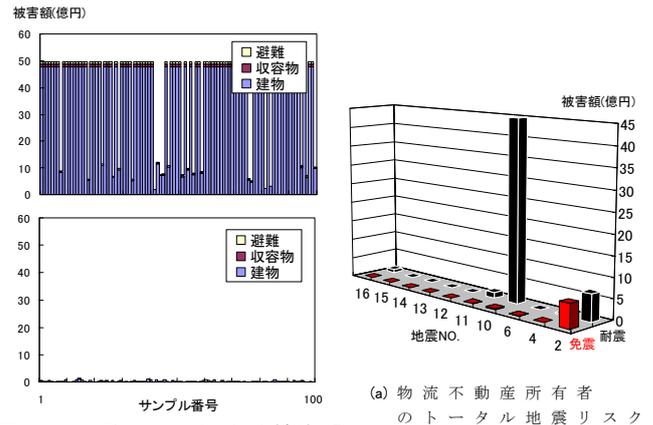
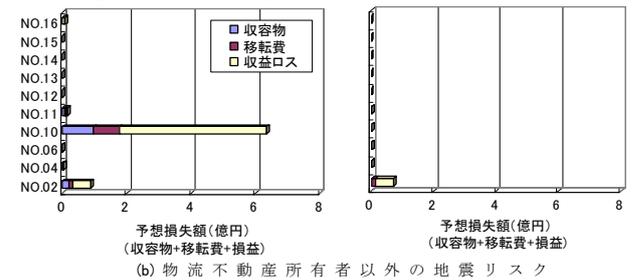
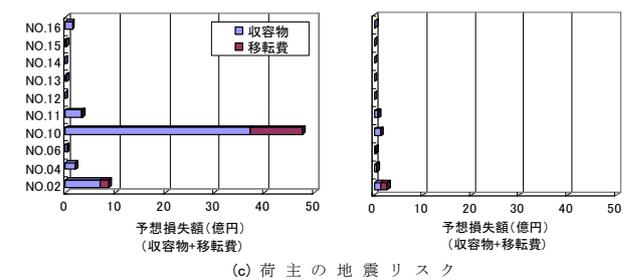


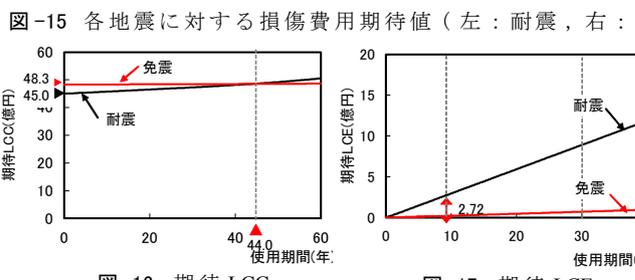
図-14 地震 NO.10 による被害額



(a) 物流不動産所有者のトータル地震リスク



(b) 物流不動産所有者以外の地震リスク



(c) 荷主の地震リスク

図-15 各地震に対する損傷費用期待値 (左: 耐震, 右: 免震)

各項の添字  $S$  は安全性、 $E$  は経済性、 $B$  は事業継続性を示す。また、耐震改修による低減効果 (費用対効果) を確認するために、新たに式 (9) で示す評価指標  $PI_r$  を定義した。 $PI_j$ 、 $PI_r$  が大きい建物ほど優先度が高い。

$$PI_r = \frac{E[C_s]}{E_r[C_s]} w_s + \frac{E[C_E]}{E_r[C_E]} w_E + \frac{E[C_B]}{E_r[C_B]} w_B \quad (9)$$

ここで、 $E$  は耐震改修前の建物群の被害の期待累積値、 $E_r$  は耐震改修後の建物群の被害の期待累積値であり、評価指標  $PI_r$  は建物群全体に対して1つ定まる値である。

### (3) 解析対象と耐震改修優先順位

表-9に解析対象となる各建物の階数、 $I_s$  値、収容人員、再調達価格、事業価値を示す。 $I_s$  値はX,Y方向各階

のうち最小の値を示した。また、各建物とも RC ラーメン構造であり、供用期間は30年、分析開始年は2007年9月とした(表-10)。式(9)の評価指標に基づいて各建物の耐震改修優先順位を求めた。その結果を表-11に示す。優先順位は No.23, No.19, No.22 の順となった。これらの3建物は全体のなかでは中程度の規模のものであるが、地震時被害額が大きいいためすなわち耐震性が低いため優先順位が高くなっている。優先順位を定めるための「安全性」「経済性」「事業継続性」に関する相対的重要度と重み係数は、表-12に示す値を用いている。

(4) 費用対効果を考慮した改修費用配分法

a) 改修効果および改修コストのモデル化

改修工法には強度補強、靱性補強、制震補強の3種類を考える。各補強による構造特性の概念図を図-18に示す。強度補強は耐力  $Q_{ui}$  のみが増加するものとし、限界層間変形角  $\gamma_{ui}$  は変わらないものとした。靱性補強は耐力が上昇しないものと仮定し、限界層間変形角のみが増加するものとし、制震補強は等価減衰定数  $heq_i$  が増加することに伴い外力(ディマンスペクトル)が減少するものとした。耐震改修のグレードとコストの関係は、建物条件によって大きく変動するものであるが、ここでは簡単に表-13のように補強増分と改修コストの関係を定め、この関係が比例的に変化するものとした。

b) 被害低減効果

解析ケースには表-14に示す2ケースを設定した。

CASE-1 は7建物への改修費用を一律再調達価格の10%とした場合、CASE-2 は耐震改修優先順位の高い3棟にのみ全棟再調達価格の10%の補強を行った場合である。図-19に解析結果のうち被害人数、被害額および事業損失の総和を示す。いずれの工法の場合でも改修を行うことにより被害人数および経済的損失が減少している。また、CASE-1 よりも CASE-2 のほうが顕著に減少している。すなわち、適所に改修費用を投じることにより、より効率的な改修をすることができることが分かる。

次に、耐震改修グレードと人的・経済的損失との関係を考える。ここでは、強度補強における  $Q_{ui}$  の倍率、靱性補強における限界層間変形角に対する倍率および制震補強における  $heq_i$  をパラメータとして、耐震改修グレードと人的・経済的損失との関係を計算する。結果の一例として建物 No.15 における改修グレードと人的被害の関係を図-20に示す。改修グレードが高くなると被害回数が減少している。被害額/再調達費用、事業中断日数についても同様の傾向である。ただし、被害減少の度合いは建物の特性に依存する。

表-9 対象とした7棟の事務所ビルの概要

| 建物番号 | 所在地     | 地上階数 | 最低Is値 | 取容人数 | 再調達価格  | 事業価値   |
|------|---------|------|-------|------|--------|--------|
|      |         |      |       | (人)  | (万円)   | (万円/日) |
| 15   | 札幌市中央区  | 4    | 0.31  | 238  | 95,000 | 261    |
| 16   | 仙台市青葉区  | 3    | 0.58  | 229  | 91,760 | 252    |
| 18   | 東京都千代田区 | 2    | 0.5   | 124  | 49,600 | 136    |
| 19   | 静岡県静岡市  | 5    | 0.47  | 138  | 55,060 | 151    |
| 22   | 名古屋市中区  | 7    | 0.38  | 129  | 51,420 | 141    |
| 23   | 大阪市中央区  | 6    | 0.22  | 110  | 44,000 | 121    |
| 24   | 福岡市博多区  | 4    | 0.68  | 12   | 4,800  | 13     |

※事業価値とは1日あたりの収益で表現する。

表-10 7建物共通の解析条件

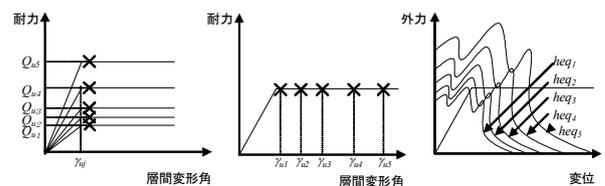
| 項目      | 条件        |
|---------|-----------|
| 用途      | 事務所       |
| 構造種別・形式 | RC・ラーメン構造 |
| 震源検索半径  | 100km     |
| 供用期間    | 30年       |
| 分析開始年   | 2007年9月   |

表-11 既存建物の改修優先順位

| 建物番号 | 建物属性×リスク解析結果 |             |              | 総合評価  | 優先順位 |
|------|--------------|-------------|--------------|-------|------|
|      | 被害人数<br>(人)  | 被害額<br>(万円) | 事業損失<br>(万円) |       |      |
| 15   | 25.15        | 10,349      | 14,073       | 0.054 | 4    |
| 16   | 16.11        | 7,937       | 12,596       | 0.038 | 5    |
| 18   | 6.02         | 3,747       | 6,859        | 0.016 | 6    |
| 19   | 153.5        | 62,573      | 84,202       | 0.328 | 2    |
| 22   | 102.57       | 43,306      | 60,129       | 0.223 | 3    |
| 23   | 159.74       | 64,603      | 86,242       | 0.34  | 1    |
| 24   | 0.12         | 88          | 168          | 0     | 7    |
| 合計   | 463.21       | 192,504     | 264,272      | -     | -    |

表-12 相対的重要度と重み係数

|       | 安全性  | 経済性  | 事業継続性 | 重み係数w  |
|-------|------|------|-------|--------|
| 安全性   | 1    | 5.67 | 5.67  | 0.7164 |
| 経済性   | 0.18 | 1    | 0.23  | 0.0775 |
| 事業継続性 | 0.18 | 4.33 | 1     | 0.2061 |



(a) 強度補強 (b) 靱性補強 (c) 制震補強

図-18 改修の種類と構造特性の変化の仮定

表-13 耐震改修のグレードとコストの関係の仮定

|      | 補強単位          | 補強増分<br>① | 改修コスト<br>/再調達費用<br>② | 対改修コスト<br>比率増分<br>(②/①) |
|------|---------------|-----------|----------------------|-------------------------|
| 強度補強 | 保有水平          | 0.5       | 0.1                  | 5                       |
|      | 耐力倍率          |           |                      |                         |
| 靱性補強 | 限界層間<br>変形角倍率 | 1         | 0.1                  | 10                      |
|      |               |           |                      |                         |
| 制震補強 | 減衰定数          | 0.15      | 0.17                 | 0.88                    |

表-14 改修費用配分のケース

| CASE名  | 条件  |
|--------|---|
| CASE-1 | 7建物への改修費用を一律再調達費用の10%とした場合                  |
| CASE-2 | 既存建物の解析結果から評価指標の高い3棟にのみ全棟の再調達費用の10%の補強をした場合 |

c) 改修費用配分

上で求めた改修グレードと人的・経済的損失の関係を表-13の改修グレードと改修コストの関係を考慮することにより、改修コストと人的・経済的損失との関係が求められる。補強なしの場合の解析結果から、建物 No.19, 22, 23 の評価指標  $PI_r$  (式 (8)) が他の建物より顕著に大きいため、この3建物について CASE-2 の条件により、式 (9) に示す評価指標  $PI_r$  の算定を行った。算定結果を表-15 に示す。均等分配では3建物の改修コストは一律再調達価格の25.7%である。均等分配の場合よりもさらに評価指標  $PI_r$  の値を増大させるために、3建物間での改修コストの最適分配を求めた。その結果、強度補強・靱性補強については均等分配と同一の改修コストでより高い評価指標  $PI_r$  を達成することができた。

7. まとめ

地震リスク分析に基づく地震対策の効果検証および既存建物の耐震改修優先順位の検討の結果、以下の知見が得られた。

- ①耐震改修により地震に対する期待LCCが低減され免震改修の場合でも10年弱で初期改修コストを回収できた。今回の解析では、免震改修より制震改修のほうが初期コストの回収年数が短くなったが、高度医療施設などの収容物価格が大きい病院ほど免震改修のコスト回収期間が短くなる(4章)。
- ②物流不動産所有者は、免震構造を採用することにより、地震に対する期待LCCが耐震構造よりも低減され、本解析では44.0年で初期改修コストを回収できる。荷主は、免震構造の倉庫を利用することにより当初よりLCEが低減され、本解析では使用期間10年で耐震に対して2.72億円の差額となった(5章)。
- ③予想被害の大きさによる耐震改修優先順位の決定法に加えて、耐震改修効果のモデル化および改修グレードとコストの関係を適切に設定することにより、複数建物群に対して改修工法の選定や費用対効果を考慮した最適な改修コスト配分が決定できる方法を示した(6章)。

謝辞：本研究は(社)建築研究開発コンソーシアム「地震リスク・マネジメント研究会(I・II期)(代表者：高橋雄司)」, II期に設置された「複数建物の耐震改修優先順位検討」小委員会の活動の一環として実施されたものです。貴重なご意見を賜りました主査の(独)建築研究所高橋雄司様ほか民間企業12機関のメンバーの皆様へ感謝いたします。

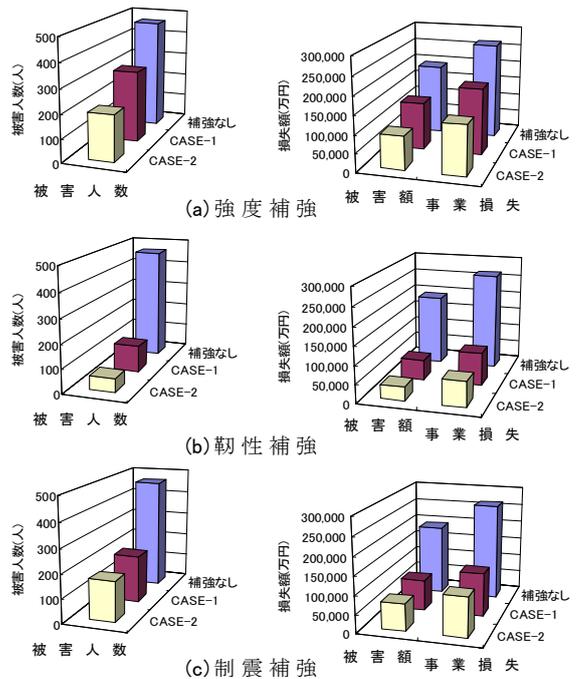


図-19 改修の種類による被害人数および経済的損失

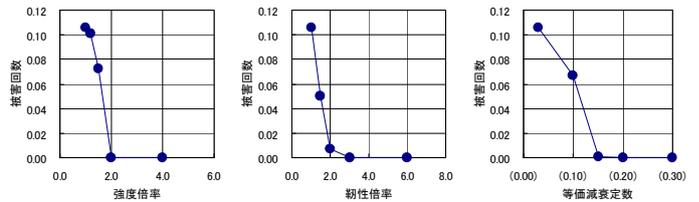


図-20 各改修工法の補強グレードと被害回数(建物 No.15)

表-15 改修コスト比と評価指標  $PI_r$

|      | 均等配分  |             | 最適配分  |       |       | 評価指標 $PI_r$ |
|------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------------|
|      | 配分率   | 評価指標 $PI_r$ | No.19 | No.22 | No.23 |             |
| 強度補強 | 0.257 | 2.278       | 0.398 | 0.164 | 0.2   | 2.446       |
| 靱性補強 | 0.257 | 6.867       | 0.2   | 0.12  | 0.5   | 7.322       |
| 制震補強 | 0.257 | 2.699       | 0.195 | 0.248 | 0.357 | 2.699       |

参考文献

- 1) 地震リスク・マネジメント研究会：「地震対策の普及を目的とした地震リスク・マネジメント手法の実用化」, 建築研究資料, 第103号, 独立行政法人建築研究所, 2005.7
- 2) 地震リスク・マネジメント研究会(II期)：「地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証」, 建築研究資料, 第104号, 独立行政法人建築研究所, 2006.10
- 3) 地震調査委員会HP：<http://www.jishin.go.jp/main/>
- 4) Ahmed,K.A.,Kanada,J,and Iwasaki,R.,"Estimation of uncertainties in the dynamic response of urban soils in Japan,"*Proceedings of 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Paper NO.736,Acapulco,Mexico,1996
- 5) 谷垣正治, 山岸邦彰, 中南滋樹, 高橋雄司：地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証(その11. 病院建築物における制震改修・免震改修の効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.71-72, 2005.9
- 6) FEMA(1999), HAZUS99 technical manual
- 7) 谷垣正治, 山岸邦彰, 中南滋樹, 高橋雄司：地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証(その21. 物流倉庫における免震構法の効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.67-68, 2006.9
- 8) 村地由子, 中川太郎, 高橋雄司, 谷垣正治, 浅野美次：限界耐力計算法を利用した地震リスク分析に基づく既存建物の耐震改修優先順位の検討(その1. 手法および事例研究の概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.79-80, 2007.8
- 9) 谷垣正治, 高橋雄司, 山岸邦彰, 中南滋樹：限界耐力計算法を利用した地震リスク分析に基づく既存建物の耐震改修優先順位の検討(その5. 事務所ビル群に対する工法別改修コスト配分の試み), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.87-88, 2007.8
- 10) 木下栄蔵：「AHPの理論と実際」, 日科技連出版社, 2000.6