

地震リスク評価

坂本 成弘^{*1}

Keywords : earthquake, risk evaluation, physical loss, cost-effectiveness

地震, リスク評価, 物的被害, 費用対効果

1. はじめに

10年ほど前に始まった不動産流動化に伴うデューデリジェンス（エンジニアリング・レポート¹⁾）や2005年に中央防災会議が提示した事業継続ガイドライン²⁾により、一般の建物の地震による被害として人的被害だけでなく物的損失や機能停止被害が注目されるようになり、これらの被害を予測するためのリスク評価が広く行われるようになってきた。地震による被害といつても様々な被害要因、被害事象や被害形態があり、それぞれについて被害の予測や対策に関する研究・開発が行われてきている。本報では地震による被害のうち、主に揺れによる建物単体の物的被害に関連するリスク評価とリスク管理について述べる。また、開発した「総合地震防災システム」の概要を紹介する。

2. 費用対効果の表示例

リスクとは、JISによると「事態の確からしさとその結果の組合せ、又は事態の発生確率とその結果の組合せ（JIS Q 2001:2001）」と定義されている。地震リスクでは、各地震が発生する確率 P_i と、発生した場合の被害による損失 C_i の組合せであるが、ここではこれらを乗じて加えた値もリスクと呼んで対策コストと比較する。すなわち、リスク R は、

$$R = \sum_i P_i C_i \quad \text{式(1)}$$

であり、例えば、50年損失では、 P_i はこれから 50 年間のうちに地震 i が生じる確率である。 R は被害を生じる可能性のある全ての地震の $P_i C_i$ を合算した値であり、地震により被る可能性のある損失の期待値（平均値）となる。このようなリスク値を算出するのがリスク評

*1 技術センター建築技術開発部ニューフロンティア技術開発室

価であり、リスク管理では、リスク値を対策コストと比較して費用対効果を検討し、目標とする耐震性能を設定することになる。以下では、費用対効果の表示例を示す。

2.1 損失低減効果の比較（図-1(1)）

既存の建物について、リスクと対策コストの和を比較している。現状のままの場合と壁補強や免震化などの対策を施した場合について、物的損失、営業損失、初期コストを積み上げて表示しており、対策の費用対効果を表すのによく用いられる図である。比較するリスクは 50 年損失だけでなく、NEL、PML など想定した地震による損失を用いる場合もある（NEL、PML は地震による平均損失と予想最大損失である。詳細については文献³⁾を参照されたい）。

2.2 ライフサイクルコストの比較（図-1(2)）

既存建物を現状のままとした場合と壁補強や免震化などの対策を施した場合について、今後の供用年数に対するコスト（対策コストとライフサイクルコストの和）を比較している。ライフサイクルコストは、50 年損失など建物が供用期間中に被る可能性のある損失の期待値である。図において、今後その建物を使用するであろう年数を供用年数として、該当する年数位置において最もコストの小さい対策ケースが最も効果の高い対策方法となる。例えば、図-1(2)では、「現状」と「壁補強」が供用年数 15 年で交わり、「壁補強」と「免震」が供用年数 35 年で交わっている。この場合、建物を今後 15 年以上は使わない場合には「現状」のまま、今後 15 年から 35 年使う場合には「壁補強」、今後 35 年以上使う場合には「免震」化するのが良い、ということになる。

2.3 建物耐力とライフサイクルコストの関係（図-1(3)）

新築建物について、耐力を連続値としてライフサイクルコストとの関係を示している。横軸は基準法によ

る耐力など基準とする耐力に対する耐力比であり、縦軸は初期コストと50年損失などの供用期間でのリスクの和である。建物耐力を低くするとリスクが大きくなる一方、耐力を高くすると初期コストが大きくなつて、いずれも総コスト（初期コストとリスクの和）は大きくなる。建物耐力とコストの関係は図-1(3)のようになり、最適な建物耐力がわかる。

2.4 リスク曲線による比較（図-1(4)）

現状（実線）に対して、耐震補強した場合（破線）と保険などによりリスク移転した場合（点線）のリスク曲線を比較している。耐震補強した場合には損失の超過確率が全般に小さくなり、保険を用いた場合には損失に上限が設けられるものの、補強費用や保険料といった対策費用も必要となるため、リスク曲線全体が右にシフトする。図-1(1)～(3)では被る可能性のある損失を期待値で比較しているのに対して図-1(4)では損失の超過確率の違いを比較することになり、耐えうる損失額を超える確率を比較することができる。保険などによる対策ではライフサイクルコストが大きくなるため、このようなリスク曲線によって保険金額などの具体的な対策を検討することになる。

3. 地震リスク評価の手法と現状

ここでは、建築学会で調査・検討した手法やベンチマークテストを紹介する³⁾。調査の対象となった手法は12評価機関の16手法であり、これらにより建築会館ほかふたつの建物について地震リスク評価のベンチマークテストを行っている。

3.1 評価の対象

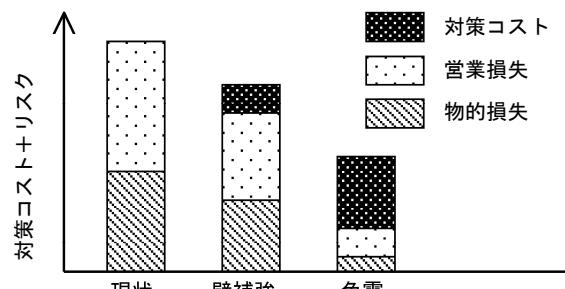
3.1.1 被害の要因

地震による建物被害の主な要因としてあげられるのは、

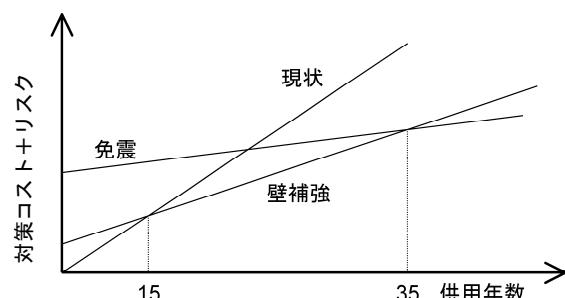
- ・揺れ
- ・液状化
- ・地震火災
- ・津波
- ・傾斜地崩壊

であり、中央防災会議などの地震被害予測ではこれらの要因が対象となっている。ただし、事務所など一般的の建物ではほとんどが揺れによる被害のみが考慮されており、揺れ以外の要因が考慮されることはない。12評価機関のうち、一般建物の地震リスク評価において、液状化は半数程度、地震火災は数機関で考慮しているものの、津波あるいは傾斜地崩壊を考慮して

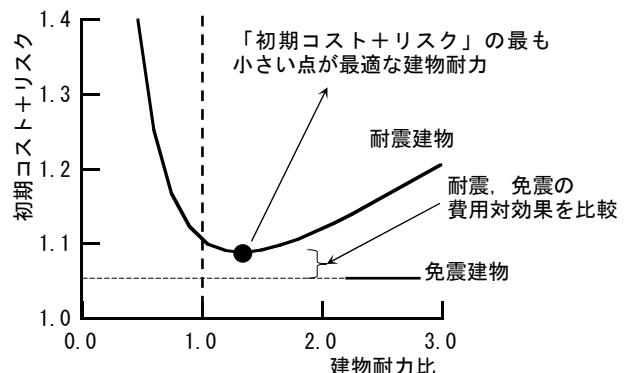
いる機関はなかった。津波や傾斜地崩壊を考慮しようとすると、対象としている建物敷地の外の状況も評価しなければならず、評価費用が大きくなつてしまうためである。



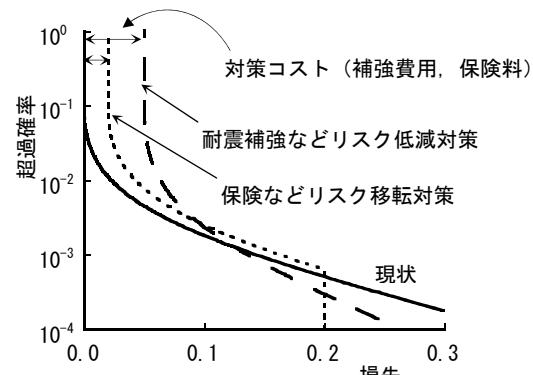
(1) 損失低減効果の比較



(2) ライフサイクルコストの比較



(3) 建物耐力とライフサイクルコストの関係



(4) リスク曲線による比較

図-1 費用対効果の表示例

Fig.1 Sample figures for revealing cost-effectiveness

これら揺れ以外の要因のうち、3月の東北地方太平洋沖地震で大きな被害を及ぼした津波に関しては特に評価が難しい。評価しようとすると、まず、海岸線におけるハザード曲線（津波高さの超過確率）を算出するとともに、海岸線から建物敷地までの遡上解析を行って海岸線での津波高さと敷地での浸水深さを関連付け、さらに津波浸水深さに対する建物の被害確率曲線と損失曲線を求めて、この損失曲線と浸水深さのハザード曲線からリスクを評価することになる。しかしながら、現状では海岸線におけるハザード評価についても地震調査推進本部（以下、推本）の揺れに関する報告書^{4),5)}のようなまとまったものが少なく、距離減衰による評価も精度は良くない。したがって震源を限定して津波解析を行うか、公開されているデータを用いることになるが、公開データには、日本海溝、千島海溝、南海トラフなどの日本近傍を震源とする地震など中央防災会議による評価結果があるものの震源が限られており、また、遠地津波については危険度を評価したもののはほとんどない⁶⁾。さらに建物の被害確率曲線についても、内閣府によるガイドライン⁷⁾に基づいて評価方法が提案されているものの⁸⁾、漂流物の影響が考慮されていないなどその精度には不明確な点が多い。

3.1.2 被害の種類

地震による被害は、

- ・人的被害（人的安全性）
- ・物的被害（資産保全性）
- ・機能被害（機能保持性）

に分けて表わされることが多く、それぞれ人的安全性、資産保全性、機能保持性といった建物各性能と対応づけられる。

機能保持性は資産保全性を前提としており、資産保全性は人的安全性を前提としている。言うまでもなく人的安全性は建物の最も重要な性能であり、構造耐震性能として古くから非常に多くの検討がなされてきている。しかしながら、人的被害への対策は、人の居る部分の構造体と人に被害を及ぼしそうな非構造材や設備・備品の耐震性能を確保するといった程度のことしかできない。人的被害は金額に換算しにくいこともあって直接的な費用対効果の検討に結びつきにくいのである。これに対して、物的被害については被害（リスク）を金額として表わすため、人的被害とは異なり、リスク低減や分散・転嫁といった様々な対策を施しやすい。様々な機関が様々な手法・対策を考案、提案している。また、機能保持性（機能被害）についても、病院などの重要施設では従来から検討されており、

2005年の中防災会議の事業継続ガイドライン²⁾により工場や事務所などの一般建物についても広く検討されるようになってきたが、費用対効果による検討報告はあまりない。これらの概要については文献³⁾を参照されたい。

3.2 評価の方法

現在、建物の物的被害の定量的評価を多くの機関（コンサルタント、保険会社やゼネコン）が行っており、その手法は様々である。建築学会の「建築物の安全性評価ガイドライン小委員会（建築にかかわる社会規範・法規範特別調査委員会）」では各機関の評価手法を調査し、リスク（建物の物的被害）のベンチマーク評価を行った³⁾。ここではその一部を紹介する。

リスクの評価フローは個々に異なる点はあるもののおおよそ図-2のようになる。すなわち、下記の3関数を評価して各種リスク値を算出する。

- ・ハザード曲線
- ・損失曲線
- ・リスク曲線

まず、震源や敷地・地盤情報に基づいて建物立地点の地震ハザード曲線を求めるとともに、建物情報から損失曲線を評価する。そして、これらハザード曲線と損失曲線からリスク曲線を描き、各種リスク値を算出する。建築会館（港区芝5-26-20）を対象としたベンチマーク評価³⁾の結果を図-3に示す。図に示すようにハザード曲線（図-3(1)）は地震動強さの超過確率、損失曲線（図-3(2)）は地震動強さに対する損失の大きさ（建物価格に対する損失額の比）を示しており、これらから損失の超過確率を表しているのがリスク曲線（図-3(3)）である。このリスク曲線からどの程度の損失をどの位の確率で被る可能性があるのかがわかる。図-3の各図にはベンチマークに参画した機関から提供された値をいくつか示しており、評価機関によって異なっていることがわかる。図-3(1)に示している地震ハザードについては推本によって活断層など日本近傍の地震活動の評価がなされており⁴⁾、ネット上のJ-

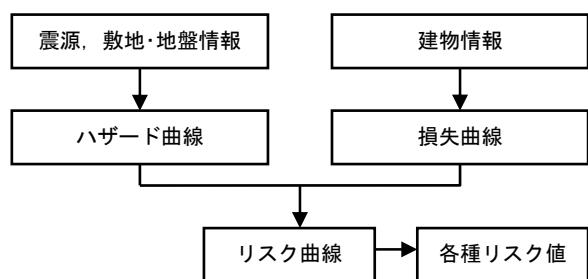
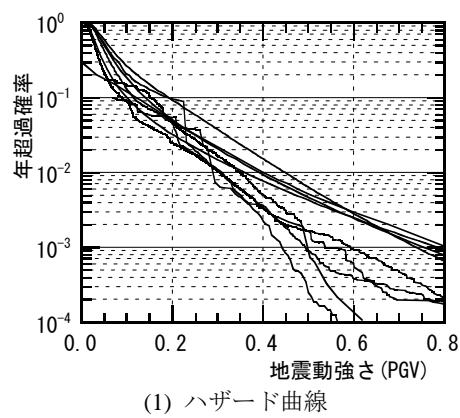


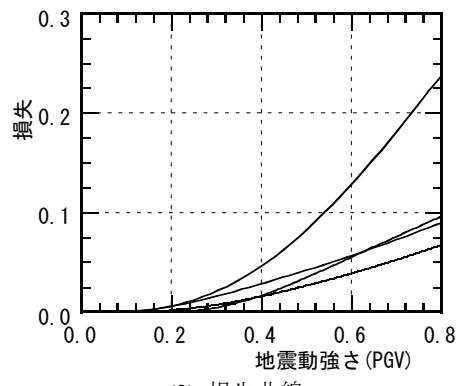
図-2 地震リスクの評価フロー

Fig.2 Flow of seismic risk evaluation

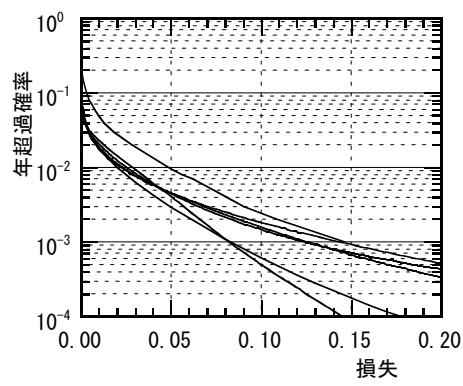
SHIS⁵⁾によって任意の地点のハザード曲線を評価できるようになっている。しかしながら、評価機関によって、地震の活動間隔（最大値とするのか平均値とするのか）や連動、地震動強さの指標（最大速度とするのか最大加速度とするのか）、距離減衰式のばらつきの設定などが違うため、結果も異なっている。また、損失曲線についても、被害統計に基づく簡易なものから動的応答解析に基づく詳細なものまで評価方法が様々であるため、図-3(2)に示すようにばらつきが生じて、リスク曲線も評価機関によって結果が異なっている。さらには、全ての地震について応答スペクトルを求めて損失を評価するために、図-3(1), (2)のようなハザード曲線や損失曲線を評価しない手法もあり、機関に



(1) ハザード曲線



(2) 損失曲線



(3) リスク曲線

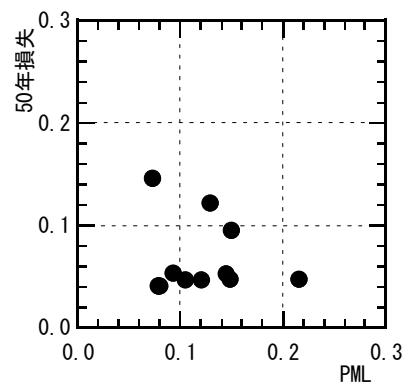
図-3 地震リスクの評価例

Fig.3 Sample curves of seismic risk evaluation

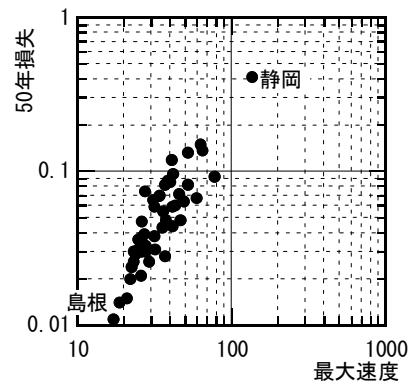
よってその評価手法は様々である。

同じベンチマークにおける各機関の評価値を図-4に示す。図-4(1)は、PML 値（文献³⁾参照）と 50 年間での平均損失の関係であり、いずれも地震による損失額の建物価格に対する比で示している。50 年損失はおおよそ 0.05 度程（建物価格の 5%）の値を示しているものの 0.14 以上となっている値もある。PML についても 0.06 度程から 0.2 以上とばらついていることがわかる。このように同じ建物を同じ資料に基づいて評価した場合にも評価機関によって評価値が異なる。

上記に示したベンチマーク評価のひとつの結果（ひとつの機関が評価した損失曲線）について、建物が 47 都道府県庁位置で工学的基盤上にあるものとし、基準法による地域係数を耐力に乗じた場合の 50 年損失を図-4(2)に示す。基準法では同じレベルの耐震性能となる建物のリスクが地点によってどの程度異なるのかがわかる。最も大きい損失を示すのは静岡県の 0.4、最も小さい損失を示すのは島根県の 0.01 である。発生確率が高い東海地震の影響の大きい静岡県を除いても、損失は 0.01~0.1 にばらついており、基準法上では同じ耐震性能を有しているとされる建物であっても地域によって損失には 10 倍の違いがあることになる。



(1) 機関によるリスク評価値の違い



(2) 地域によるリスクの違い

図-4 評価結果例

Fig.4 Sample results of seismic risk evaluation

4. 費用対効果の試算例

4.1 被害額と対策費用の統計値

地震被害への対策の費用対効果を評価するにあたって設定する費用には様々なものがあるが、構造に関わる主要な費用としては以下が挙げられる。

- ・被害時の復旧費用
- ・新築建物の対策費用
- ・既存建物の補強費用

ここで、被害時の復旧費用は損失額となるものであり、被害統計に基づいて各機関がそれぞれ設定している。被害統計の調査例⁹⁾を図-5(1)に示す。兵庫県南部地震による被害統計であり、被災した建物の復旧費用（平均値。()内は標準偏差）を用途別に示している。

ここに示しているように、小破、中破、大破した建物に要する復旧費用は 3.01, 4.55, 5.46 万円/m²（全建物）であり、標準偏差はこれらを超える大きな値となっていることがわかる。建築費用を 25 万円/m² とすると、復旧費用の比はそれぞれ 12%, 18%, 22% であるが、中破、大破については、リスク評価における設定損失をこれらの値より大きくしている機関が多い。

新築建物の対策費用として標準せん断力係数と建設費の関係を調べた例¹⁰⁾を図-5(2)に示す。1 次設計のベースシア 0.1 増し（2 次で 0.5 増し）につき建設費 5% 増しとなっている。図-5(2)に示されている限りではばらつきは小さく、直線上にほぼ乗っている。

既存建物の補強費用については、戸建て住宅や学校の統計値がいくつか示されているものの、事務所や工場などについては詳細はあまり公開されていない。学校の補強費用の統計例¹¹⁾を図-5(3)に示す。これによると耐震診断の Is 値が 1.0 大きいと補強コストは約 33 千円/m² 小さくなる。補強後の Is 値が同じとすると、Is を 0.1 増すのに必要な補強費用が約 3.3 千円/m² ということになる。栃木県という限られた地域の調査であるが、他の調査でも 30~50 千円程度でありこの範囲に入っている。

4.2 試算例

本節では図-1(3)に示す建物耐力と総コストの関係により費用対効果を示す。費用対効果を示す曲線は図に示すように下に凸の曲線となり総コストが最も低い耐力が最適な耐力となる。

前章に示した評価結果（損失曲線）について費用対効果を比較する。この損失曲線による東京都庁位置（工学的基盤）での 50 年損失は約 10%，PML は 10~15%（PML の定義によって異なる）であり、ほぼ

基準法レベルであるとされている耐力である。比較した結果を図-6(1)に示す。図によると、東京で最も費用対効果の高い（初期コスト + 50 年損失が最も低い）建物耐力比は 1.3 であり、この場合の総コスト（初期コスト + 50 年損失）は 1.09 である。したがって、耐震であれば耐力比 1.3 を選ぶことになり、免震建物とすることによるコストアップが 0.09 より小さければ免震建物を選ぶことになる。他の地域における耐力比をみると、島根県では 0.7、東京都と高知県では 1.3 倍程度、山梨県では 1.6 倍程度となっており、静岡県では 2 倍を超している。リスクだけでなく、最適な耐力も地域による違いが大きいことがわかる。また、例えば、住宅性能表示制度による等級では、耐力余裕度が 1, 1.25,

単位：万円/m ²				
分類	データ数	小破	中破	大破
住宅	39	3.97 (7.57)	2.35 (3.35)	5.16 (3.01)
事務所	84	3.26 (3.86)	5.67 (6.43)	6.39 (4.86)
その他	87	2.87 (3.399)	4.60 (6.52)	5.06 (8.65)
RC/SRC	162	2.90 (4.49)	4.27 (5.32)	4.57 (3.86)
S	41	3.69 (4.58)	7.52 (10.81)	7.68 (10.01)
全体	210	3.01 (4.48)	4.55 (6.01)	5.46 (6.46)

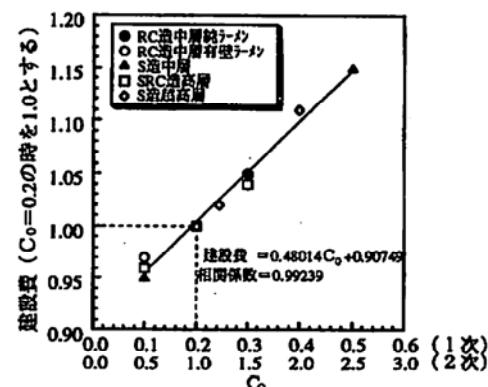
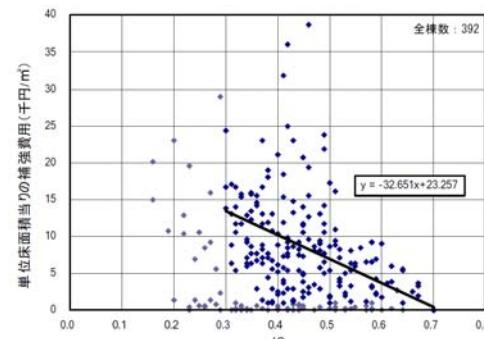
(1) 復旧費用⁹⁾(2) 標準せん断力係数と建設費の関係¹⁰⁾(3) Is と補強費の関係¹¹⁾

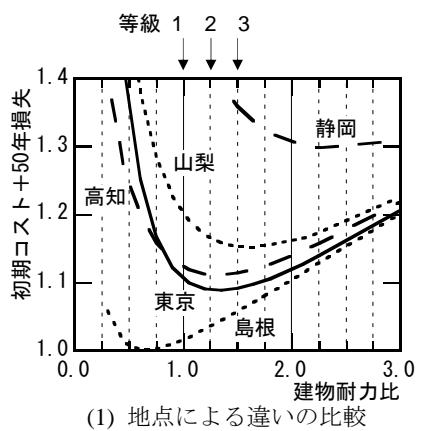
図-5 コストの統計値

Fig.5 Statistics for costs

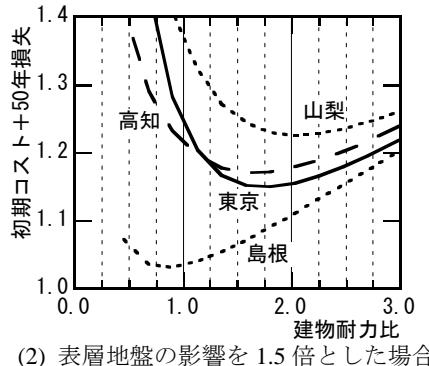
1.5で等級1, 2, 3としているが、図に示しているように、地域による違いに比べて、その範囲はせまい。

参考として、図-6(1)に対して表層地盤の影響が1.5倍（被害に対応する応答倍率が1.5倍）とした場合の関係を図-6(2)に示し、物的損失のみを対象としている図-6(1)に対して物的損失以外の損失が物的損失と同じだけあるとした場合（すなわち、図-6(1)について損失が2倍であるとした場合）の関係を図-6(3)に示す。いずれも最適な建物耐力比が高くなっていることがわかる。なお、静岡県の場合はこの図の範囲に入ってきていない。

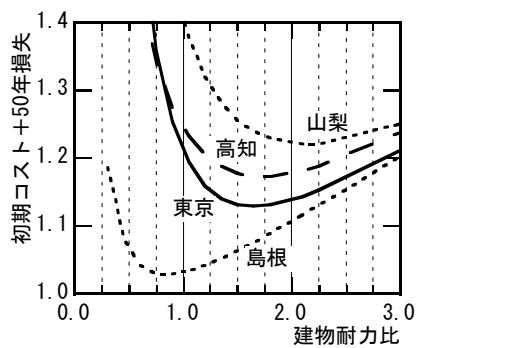
既存建物を補強する場合については、文献¹¹⁾より Is を0.1増すのに必要な費用が約3.3千円/ m^2 であるので、



(1) 地点による違いの比較



(2) 表層地盤の影響を1.5倍とした場合



(3) 物的損失以外の損失を物的損失と同じとした場合

図-6 建物耐力とライフサイクルコストの試算例
Fig.6 Trials for relationship between strength and lifecycle-cost

$Is=0.6$ の建物耐力比を1.0、新築価格を250千円/ m^2 とすれば、耐力比を0.5増すのに新築価格の3.96%の費用が必要となる。新築の場合には5%なので、これよりも小さい費用で済むことになるが、ばらつきは大きいため（図-5(3)）、ほぼ同程度の費用と言える。ここで、耐力比を0.5増すのに（ Is を0.3増すのに）必要な補強費を新築時と同じ5%として試算した結果を図-7に示す。補強前の Is が0.3, 0.6, 0.9の建物が東京にある場合について示しており、新築建物と同じで耐力比1.3程度の時に総コストが最も低く、 $Is=0.3, 0.6$ では補強効果があるものの、 $Is=0.9$ では補強しない方がよい、という結果となっていることが確認できる。ここで、免震化の費用を建築面積について500千円/ m^2 とする。地下階なしで全階の床面積と同じとし、新築価格を250千円/ m^2 とすると、初期コストは2/(建物階数)となる。この場合には、 $Is=0.3$ の建物でも最小の総コストが0.14程度であり、このためには15階建て程度の建物でなければならない。物的損失のみによる費用対効果では免震化は難しいことがわかる。

5. 総合地震防災システム

総合地震防災システムは、1998年に耐震推進部（現ライフサイクルケア推進部 耐震推進室）において構築したものであり、GIS（地理情報システム）を用いて客先建物位置に重ねて、想定した地震による周辺地域の震度の分布や液状化危険度の分布等を表示するシステムである。このシステムに、個々の建物の地震リスクを評価・表示する機能を加え、揺れ・液状化・地震火災・津波による損失を評価して図-1に示したような費用対効果を検討できるシステムとし、FM推進室および耐震推進室において運用している。BCPコンサルや、耐震予備診断、株主優待簡易地震リスク診断の対象物件に適用されてきている。対象用途を限定する必要はなく、事務所や工場のほか店舗、集合住宅の評価も可

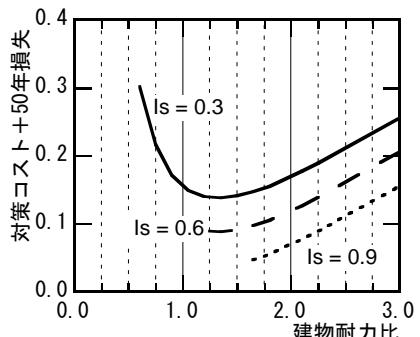


図-7 補強する場合の費用対効果の試算例

Fig.7 Cost-effectiveness trial for retrofit

能である。

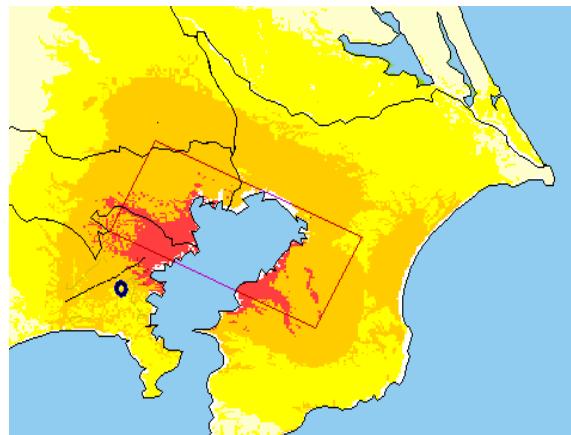
このシステムにおけるリスク評価は簡易評価であり、建物位置（住所）と建築年、構造形式、用途、階数、延床面積を入力すれば、想定する地震による損失と費用対効果が表示されるようになっている。入力例を図-8に示す。延床面積より上が必須項目であり、図では見えていないが「耐震構造」でリスク評価する状態（現状建物、耐震補強後、免震補強（レトロフィット免震）後、新築後など）を指定する。このようにわずかな情報による簡易評価であるため評価精度は良くないが、おおよその目安を見ることはできる。更に精度の高い評価を行うには設計図書など更に詳細な情報が必要となる。

システムによる出力例を図-9に示す。(1)が想定地震による震度分布に建物位置（○）を示しており、(2)では、図-1(1)に示した損失低減効果の比較である。左から、現状建物、耐震補強、免震補強、新築耐震、新築免震であり、この建物では耐震補強が最も効果が高いことを示している。(3)は図-1(2)に示したライフサイクルコストの比較であり、この例では、使用する期間が50年以内では免震補強はコストが大きく（費用

対効果が悪く）、40年程度以上であれば耐震補強が良いものの、40年以下であれば現状のままで良いという結果となっている。

6. まとめ

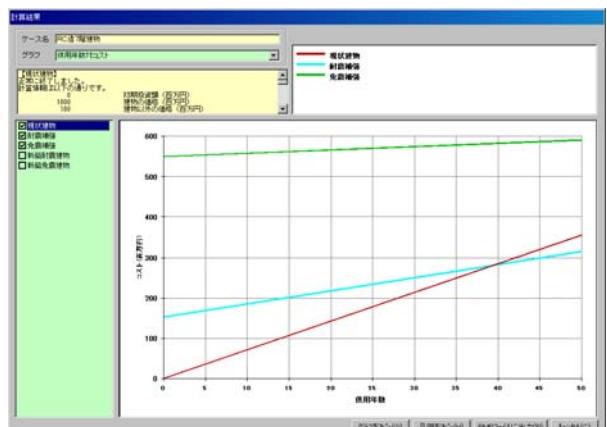
地震リスク評価手法の現状と評価例を紹介した。現状では評価機関による評価結果のばらつきが大きい。



(1) 想定地震による震度分布



(2) 対策費用と想定地震による損失の和の比較



(3) ライフサイクルコストの比較

図-8 総合地震防災システムの入力例
Fig.8 Inputs for “Seismic Risk Assessment System”

図-9 総合地震防災システムの出力例
Fig.9 Output samples by “Seismic Risk Assessment System”

また、これとは別に、地域によりハザードの差、すなわちリスクの差が大きく、最適な建物耐力が地域によって大きく異なることを示した。さらに、被害額や補強など対策に要する費用の集計例を紹介し、新築建物および既存建物について費用対効果の試算例を示した。

また、当社で開発した総合地震防災システムの概要を紹介した。揺れや液状化だけでなく地震火災や津波などによる地震被害の評価も可能である。今後は、台風や雷、火災など地震以外の被害による損失も評価できるようにする予定である。

参考文献

- 1) 建築・設備維持保全推進協会 (BELCA) : 不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係るガイドライン (2007年版), pp.149-168, 2007.
- 2) 内閣府 (防災担当) : 事業継続ガイドライン 第二版, 2009.11. (第一版は2005年)
- 3) 日本建築学会 : 地震リスク評価とリスクコミュニケーション, 156p., 2011.6.
- 4) 地震調査研究推進本部 : 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 2010.
- 5) 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>.
- 6) 安中正, 佐竹健治, 榊山勉, 柳沢賢, 首藤伸夫 : 確率論的津波ハザード解析の方法, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.158-161, 2006.11.
- 7) 内閣府 : 津波避難ビル等に係るガイドライン 卷末資料② 構造的要件の基本的な考え方, 2005.6.
- 8) 矢代晴実, 佐藤一郎, 林孝幸, 大峯秀人 : 津波損傷度曲線の作成 1-2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.639-642, 2007.8.
- 9) 平川ほか : 終局限界状態以前に発生する破壊時費用の評価, pp.69-70, 構造I, 大会梗概集, 1997.
- 10) 神田ほか : 地震荷重を変動させた時の各種建物の建設費について, pp.15-16, 構造I, 大会梗概集, 1994.
- 11) 渡邊ほか : 栃木県内における既存RC造学校建築の耐震診断および耐震補強に関する研究, pp.513-514, 構造IV, 大会梗概集, 2010.