

地震リスク評価による既存建築物の耐震改修効果の定量化

Economical Evaluation of Seismic Retrofitting by Seismic Assessment

山岸 邦彰 KUNIAKI YAMAGISHI
 江頭 寛 HIROSHI EGASHIRA
 中南 滋樹 SHIGEKI NAKAMINAMI
 谷垣 正治 MASAHARU TANIGAKI
 鈴木 亨 TORU SUZUKI

既存不適格建築物に制震改修および免震改修を施した場合の経済効果について、地震リスク指標を用いて評価した。改修費用と地震リスク低減効果の関係の違いから、制震改修については地震リスクを最小とする最適ダンパー量の定量化、免震改修についてはその振動特性（免震周期・減衰定数）および隣棟間距離の地震リスクに及ぼす影響の把握を行った。本研究で仮定したモデル建物について、制震改修では通常の改修で想定される制震ダンパー数量の1.5～2.0倍ダンパーを付加すると費用対効果が最適となり、免震改修では地震動強さが大きくない範囲では免震の振動特性の影響は小さいこと、および地震リスクを評価する場合に隣棟間距離の影響を考慮することが重要であることが分かった。

キーワード：地震リスク、制震改修、免震改修、ライフサイクルコスト

Economical evaluation of retrofitting buildings with seismic dampers or seismic isolations, which do not satisfy the seismic demands required in present building code, is presented using the seismic risk assessment. In case of retrofitting with seismic dampers (Case-A), optimal numbers of the dampers to minimize the seismic risk are quantified. In case of retrofitting with seismic isolations (Case-B), the effects of characteristics of the isolation system such as natural period and damping ratio and the distance from a neighboring building are investigated. As the results of the investigations for an assumed model building, the followings are summarized. In Case-A, the number of dampers which optimize the cost performance is 1.5 - 2.0 times greater than the case of conventional retrofitting design. In Case-B, the characteristics of the isolation system do not affect seismic risks much in the case of medium strong seismic excitation, and the distance from a neighboring building is important for evaluating seismic risks.

Key Words: Seismic Risk, Retrofitting, Seismic Damper, Seismic Isolation, Life Cycle Cost

1. はじめに

近年、オフィスビルを中心としたバリューアップ等を背景として、耐震性能の向上を目指す事例が増えてきている。特に最近では、地震リスクと呼ばれる将来発生する地震による被害損失の予想額を表す指標が、不動産取引における意思決定の判断材料の一部として利用されるようになってきており、この地震リスクの評価に照らし合わせて耐震改修などの改良行為の有益性を確認する必要性が高まってきている。そこで、既存建築物の耐震改修において、改修工法の費用対効果を示すことができれば、改修の要否や

工法を選択およびそのグレードを決定するために非常に有効である。

本研究では、仮定の既存不適格建築物に対して制震ダンパーを用いる耐震改修構法（以下、制震改修と呼ぶ）および免震構造による耐震改修構法（以下、免震改修と呼ぶ）を行った場合の耐震改修効果を、地震リスク評価により定量化することを試みた。制震改修では、制震ダンパー量がコストと応答低減量に直接反映されるため、その改修費用と地震リスク低減効果を比較することにより経済的かつ合理的なダンパー量の推定を試みた。一方、免震改修では、免震構法を採用するかどうかの方がもっとも大きなコスト発

生要因であり、免震周期や減衰定数といった免震性能の違いが改修コストに及ぼす影響は比較的少ないと考えられる。そのため、最適な免震装置を設計することを目的として、免震性能に関わる主要なパラメータが地震リスクに与える影響について検討した。また、免震改修を行う際に隣接建築物との位置関係のため適切なクリアランスが確保されない可能性もあることを考え、隣接建築物の応答変形が地震リスク評価に及ぼす影響について検討した。

2. 対象建築物

表-1に対象建築物の概要を示す。本建築物は築30年程度、地上8階地下1階の事務所建築物で、立地は東京都新宿区の良い第2種地盤を想定した。上部架構はRC壁構造とS造からなる混合構造、地下部分はRC造、基礎形式は杭基礎であり、RC壁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。この想定建築物に対して桁行方向の静的荷重増分解析を行い、地震応答解析に用いるモデルを作成した。図-1に設定した各層のスケルトンカーブを示す。

表-1 対象建築物の概要

用途	事務所
建物規模	地上8階、地下1階、塔屋1階
構造概要	平面・立面ともにほぼ整形、平面両側にコアを配置。
構造種別	コア部分：壁式RC造 居室部分：S造 地下部分：RC造
基礎形式	杭基礎（RC杭）
延床面積	3,460 m ²
竣工	1974年

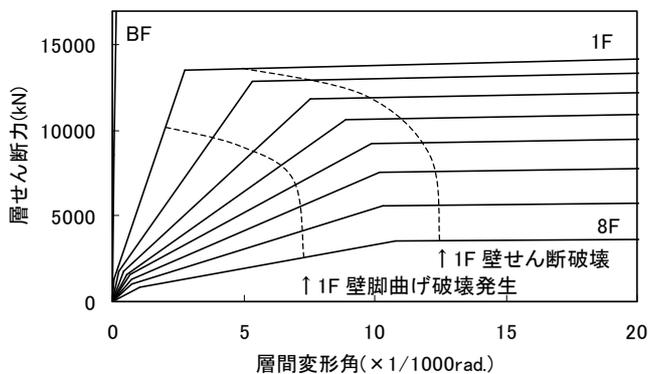


図-1 各層のスケルトンカーブ

3. 地震リスクの解析方法

(1) 地震危険度解析

本敷地のハザード曲線を図-2に示す。ハザード曲線はランダムに発生する地震活動域の地震発生規模や空間分布を確率的に扱う方法と、固有地震発生の周期性を考慮した方法とを組み合わせで評価した。ハザード曲線は表層地盤による増幅を考慮しており、その評価方法は翠川他(1995)¹⁾によった。

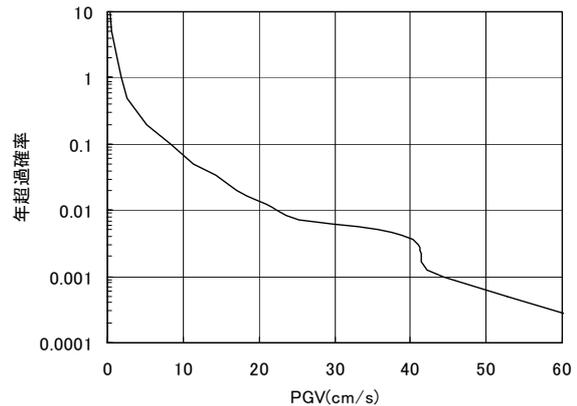


図-2 ハザード曲線

(2) 損傷度解析

建築物の被害率の算定には地震応答解析による方法を用いた(谷垣他, 2001)²⁾。解析モデルは図-3に示すような等価せん断型質点系モデル(基礎固定時の1次固有周期0.64秒)とし、復元力特性は図-1のスケルトンカーブをもつTakedaモデル($\gamma=0.40$)とした。その他の主なパラメータは図-3に示すとおりである。解析に用いた入力地震動は国内外の観測地震波と模擬地震波であり、観測地震波はその震源距離、マグニチュードおよび最大加速度に偏りがないように選択されている。入力地震動の総数は観測地震波と模擬地震波を合わせて100である。各地震動レベルにおける被害率を算定するために、これらの入力地震動の最大速度を基準化した。図-4に入力地震動(オリジナル)の最大加速度-最大速度関係(PGA-PGV関係)、図-5にマグニチュード-震源距離関係を示す。データに大きな偏りがないことが分かる。ちなみに最大加速度の最大速度に対する比(A/V)は約9.26となっている。

表-2に地震リスク算定の対象とした被害項目の分類とその耐震性能限界値を示す。躯体の限界値は本建物の主体構造がRC壁構造であることを考慮し、当該構造の限界を示す層間変形角を設定した。仕上げ・非構造材の限界値は、建設当時の状況を考慮し、変形追従性能が低いものとして設定した。

応答値について、躯体・仕上げ・非構造材は各階の最大応答層間変形角のうち最大を示す層の当該値とし、設備は地下と地上階に分類し、それぞれ1階とR階の床応答加速度の最大値とした。応答解析結果および各種の構造実験結果などから、応答値と耐力性能限界値の分布はともに対数正規分布を示すものとし、基準化された地震動レベルごとに両者を確率計算することにより被害率曲線を求めた。本手法により得られた被害率曲線の例をダンパー倍率(後述)が0.0と2.0のものについて図-6に示す。

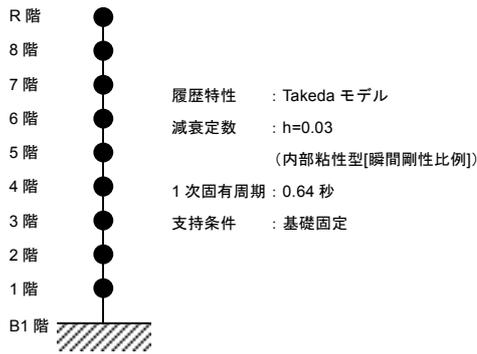
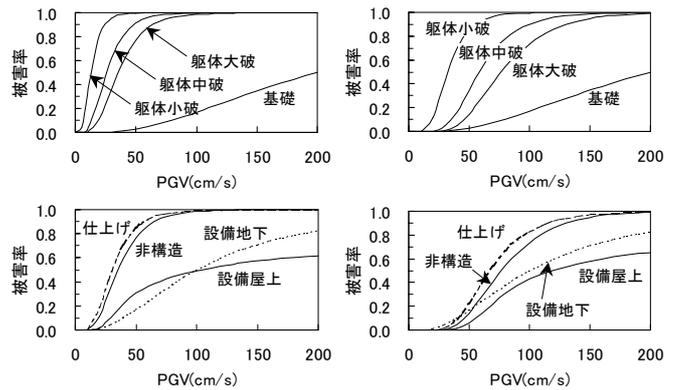


図-3 解析モデル



(a)ダンパー倍率 : 0.0 (b)ダンパー倍率 : 2.0

図-6 被害率曲線

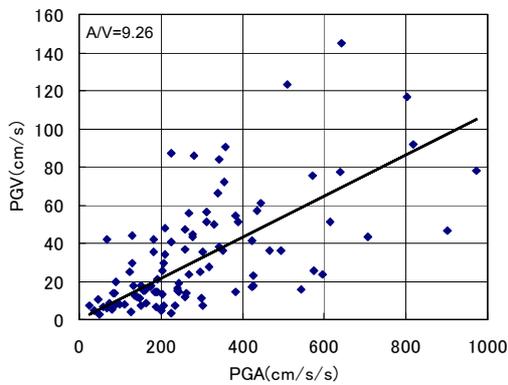


図-4 PGA-PGV 関係

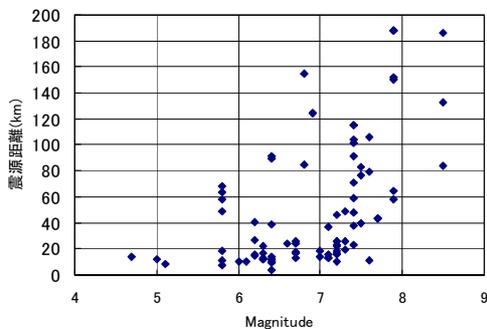


図-5 マグニチュードー震源距離関係

表-2 対象建築物の概要

被害項目	評価尺度	対象階	耐震性能限界値	
			平均値	対数標準偏差
躯体小破	最大層間変形角	1~8階	1/500rad.	0.30
躯体中破			1/200rad.	0.30
躯体大破			1/130rad.	0.30
仕上げ			1/160rad.	0.30
非構造			1/130rad.	0.30
基礎	最大加速度	地盤	20m/s ²	0.25
設備地下			10m/s ²	0.25
設備屋上		R階	10m/s ²	0.25

(3) 被害額の推定

被害額はイベントツリー解析を用いて求めた。躯体大破のイベントは主要耐震要素である耐震壁のせん断破壊によって生じるものとし、建物崩壊につながる可能性が高いことから、建物が全損するイベントとみなした。地震リスクは“地震被害を復旧するための工事費”と定義し、表-3に示す各部位の価格比率と被害復旧額の割合(復旧額/部位の建設費)を用いて予想被害額を算定した。

表-3 各部位の価格比率と復旧額の割合

部位	価格比	被害復旧額の割合		
		大破	中破	小破
基礎	0.08	1.0	—	—
躯体	0.17	1.0	0.3	0.1
設備地下	0.13	1.0	—	—
設備屋上	0.13	1.0	—	—
仕上げ	0.39	1.0	—	—
非構造材	0.09	1.0	—	—
合計	1.00	再調達価格 : 8.7 億円		

4. 制震改修における地震リスク評価

(1) 制震改修概要

改修に用いる制震装置には粘性系ダンパーを使用した。装置の性能曲線を図-7に示す。本検討では最大速度が50cm/sの入力地震動に対して最大応答層間変形角が1/100rad程度になるときのダンパー量を基準値として、これを定数倍(以降、ダンパー倍率と呼ぶ)することにより、制震改修のグレードを設定した。各階に設置した基準ダンパー量と想定した改修費を表-4に示す。他のダンパー量における改修費は基準ダンパー量の改修費にダンパー倍率を乗じた値とした。

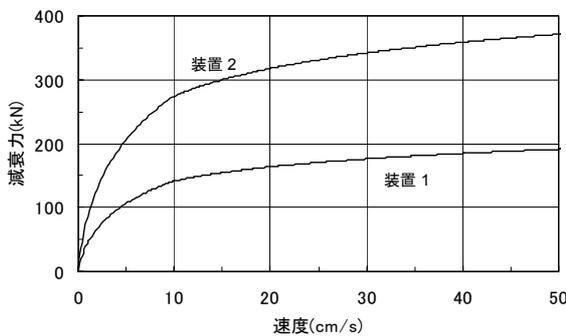


図-7 ダンパー性能曲線

表-4 基準ダンパー量と改修費

階数	ダンパー記号	設置数	付加減衰定数* h(%)	減衰力* (kN)	改修費 (万円)
8	装置 1	2	7.0	300	180
7		4	7.9	600	360
6		6	8.5	900	540
5	装置 2	4	8.6	1200	720
4		4	6.8	1200	720
3		4	5.4	1200	720
2		4	3.4	1200	720
1		4	1.4	1200	720

*表中の付加減衰定数および減衰力はダンパーに加わる最大速度が15cm/sに対する値を表す。

(2) 地震リスク解析結果

ハザード曲線とイベントツリー解析により求めた被害額から地震リスクを算定した。図-8に既存の建築物(ダンパー倍率:0.0)およびダンパー倍率を0.5倍~6.0倍とした場合のリスク曲線を示す。ダンパー倍率の増加に伴って損失率は低下し、制震ダンパーによるリスク低減効果が顕著であるが、ダンパー倍率で4.0(付加減衰定数h=30%程度)を超えるあたりから、リスク低減効果はほぼ頭打ちになる傾向を示している。

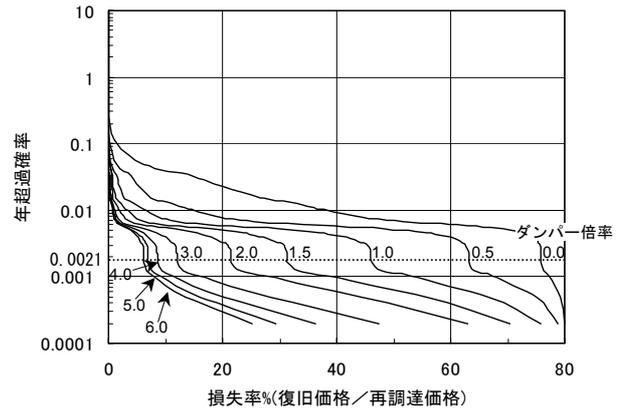
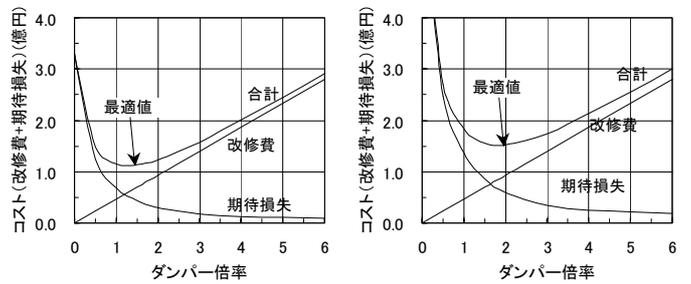


図-8 リスク曲線

(3) 最適ダンパー量の推定

図-9にダンパー倍率とコスト(改修費+期待損失額)の関係を示す。期待損失額は、リスク曲線より求めた表-5に示す年間期待損失額に今後の供用期間を乗じることにより算定できる。図-9より、コストが最小となる最適ダンパー量は、供用期間20年と40年では異なり、その値はダンパー倍率でそれぞれ1.5、2.0程度となった。表-6に今後の供用期間と最適ダンパー倍率の関係を示す。建物の今後の供用期間が長くなるほど最適ダンパー倍率が大きくなるのが分かる。



(a) 供用期間:20年

(b) 供用期間:40年

図-9 ダンパー倍率とコストの関係

表-5 年間期待損失額

ダンパー倍率	年間期待損失額 (万円)	ダンパー倍率	年間期待損失額 (万円)
0.0	1651	3.0	87
0.5	620	4.0	64
1.0	341	5.0	53
1.5	215	6.0	48
2.0	147	-	-

表-6 供用期間と最適ダンパー量の関係

供用期間(年)	5	10	20	40
ダンパー倍率	0.5	1.0	1.5	2.0

各ダンパー倍率 (1.0~6.0) におけるライフサイクルコストを図-10に示す。ここでいうライフサイクルコストとは改修費+年間期待損失額×供用期間である。ダンパー量を増やすことにより地震リスクは低減されるが、改修費用を回収できる年数は、本例ではダンパー量が多くなるほど長くなる傾向にある(表-7)。ただし、改修前の建物の耐震性能とダンパーのリスク低減効果の関係によっては、必ずしもダンパー量の多い場合に改修費用の回収年数が長くなるとは限らない。

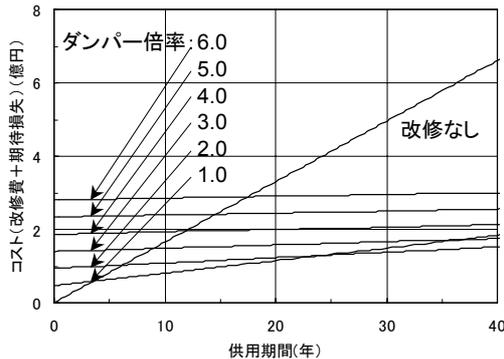


図-10 ライフサイクルコスト

表-7 ダンパー倍率と回収年数の関係

ダンパー倍率	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
回収年数(年)	3	6	9	12	15	18

5. 免震改修における地震リスク評価

(1) 地震リスク算定方法

地震リスクは制震改修における評価と同様に、入力地震動波形および入力レベルの異なる多数の地震応答解析を実施して得られた被害率曲線をもとにイベントツリー解析により算定する。表-8に対象建築物の部位とその各被害レベルにおける限界値を示す。免震建築物は免震層を境として構造物の地震時挙動が大きく異なるため、その影響が強く現れると想定される部位について部位を分類した。その他の部位に関する限界値は制震改修における評価と同一である。免震層の限界値は隣棟間距離とし、対象建築物の相対変位が隣棟間距離以上となる場合は大破とみなして、その下位イベントはすべて大破になると仮定した。

(2) 対象建築物および解析パラメータ

免震構法は敷地の制約等の諸条件を仮定して1階柱頭免震構法とする。解析パラメータは免震周期 T_B および免震層の減衰定数 h_B とする。表-9に解析に使用したパラメータを示す。また、図-11に示すように対象建築物の端部

から0.5m離れた場所に隣接建築物が存在すると仮定する。隣接建築物は対象建築物と同規模(階数8)とし、構造種別は鉄骨造、新耐震設計で設計されているものと仮定して、図-12に示すような簡易なスケルトンカーブを設定した。隣棟間距離は隣接建築物の地震動による応答変形の有無により場合分けした。

表-8 免震建築物の部位とその限界値

		小破	中破	大破		
基礎		—	—	—	20m/s ²	0.25
躯体	下部	1/500rad	0.30	1/200rad	0.30	1/130rad
	免震	—	—	—	—	0.50m
	上部	1/500rad	0.30	1/200rad	0.30	1/130rad
設備	下部	—	—	—	—	10 m/s ²
	免震	—	—	—	—	0.70m
	上部	—	—	—	—	10 m/s ²
仕上げ		—	—	—	1/160rad	0.30
非構造		—	—	—	1/130rad	0.30

※表中各被害レベルの左側の数値は平均値、右側の数値は対数標準偏差を表す。

表-9 免震に関する解析パラメータ

		免震周期 T_B (sec)		
		2.0	3.0	4.0
減衰定数 h_B	0.10	C21	C31	C41
	0.15	C25	C35	C45
	0.20	C22	C32	C42

※C21などは解析ケース名を表す。
2桁目:免震周期{2,3,4}= T_B {2.0, 3.0, 4.0}
1桁目:減衰定数{1.5,2}= h_B {0.10, 0.15, 0.20}

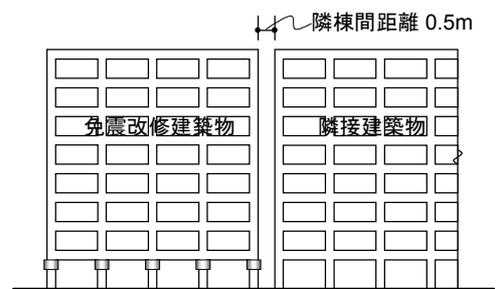


図-11 免震改修建築物と隣接建築物との配置イメージ

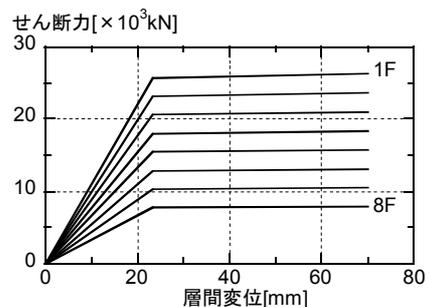


図-12 隣接建築物のスケルトンカーブ

(3) 被害項目の被害率

図-13に‘躯体免震層大破’と‘設備上部大破’の各被害項目の被害率曲線を示す。また、非免震時との比較として現状建築物の‘躯体大破’と‘設備屋上大破’の被害率曲線も併せて示す。躯体については免震構法の採用により被害率は大幅に低減される。さらに、免震層の減衰定数 h_B が大きいほどまた免震周期 T_B が短いほど被害率が低減している。一方、設備については被害率が顕著に低下しているが、地動最大速度(以下、PGV)の大きな範囲では免震周期が短いほど被害率が大きくなっている。PGV=50, 100cm/sにおけるすべての解析パラメータに対する各被害項目の被害率を図-14に示す。

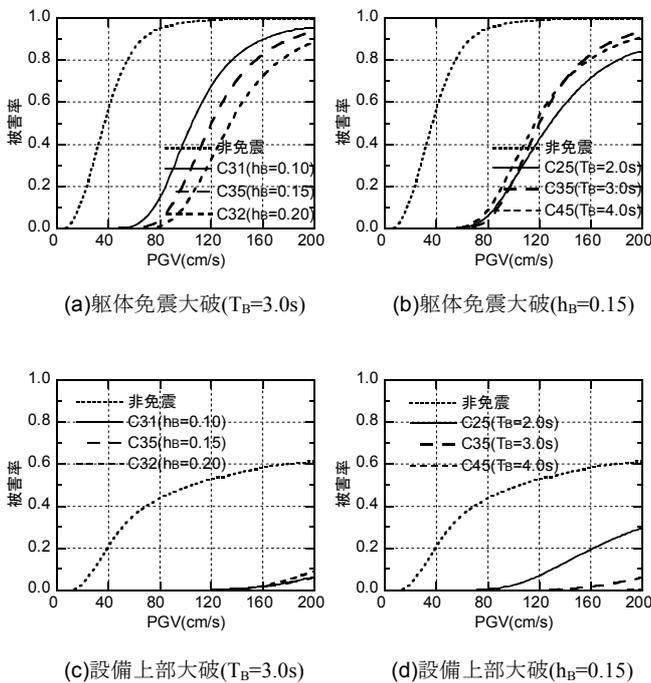


図-13 免震躯体大破と設備上部大破の被害率曲線

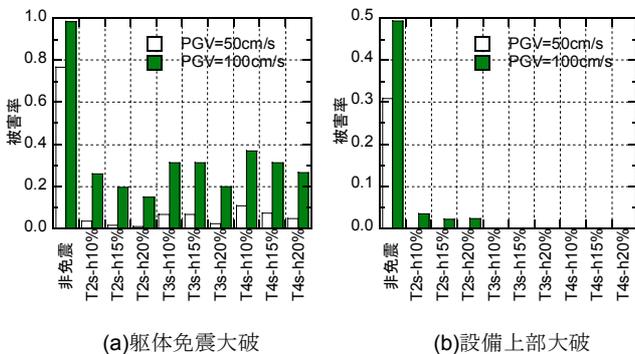


図-14 躯体免震大破と設備上部大破の被害率 (PGV=50,100cm/s)

(4) リスク曲線

図-15にリスク曲線を示す。左図は免震周期 $T_B=3.0s$ として減衰定数 h_B の影響を見たものであるが、年超過確率が1/1000程度以上では減衰定数 h_B の影響はほとんどない。年超過確率がさらに小さい場合、減衰定数 h_B が小さくなると損失率が大きくなる。一方、右図は減衰定数 $h_B=0.15$ として免震周期 T_B の影響を見たものであるが、免震周期 $T_B=2.0s$ が他の免震周期 T_B と比較して大きくなっている。これは免震周期 T_B が短くなったことにより上部構造の応答変形が増え、‘仕上げ大破’に伴う損失率が増えたためである。

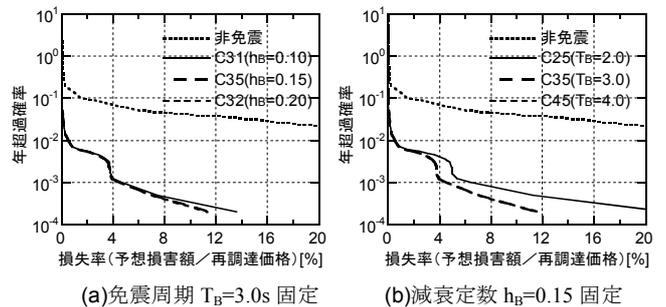


図-15 リスク曲線

(5) 隣接建築物の影響

図-16に免震周期 $T_B=3.0s$, 減衰定数 $h_B=0.15$ の‘躯体免震大破’の被害率曲線を隣接建築物の変形の有無に分けて示す。隣接建築物の変形を考慮すると被害率は顕著に上昇することが分かる。図-17にPGV=100cm/sにおける同破壊項目の被害率を全解析パラメータについて示す。免震周期 T_B が長くなるほど、かつ減衰定数 h_B が小さくなるほど被害率は大きくなるが、免震周期 T_B の変化による影響は減衰定数 h_B の変化と比較して小さい。この傾向はPGV=50~150cm/sにおいて顕著である。

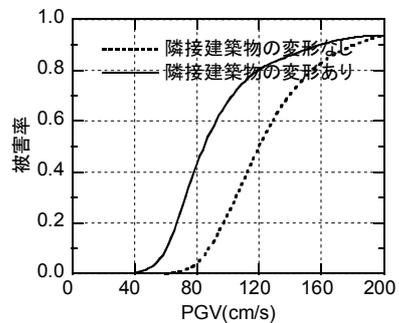


図-16 躯体免震大破の被害率曲線($T_B=3.0s$; $h_B=0.15$)

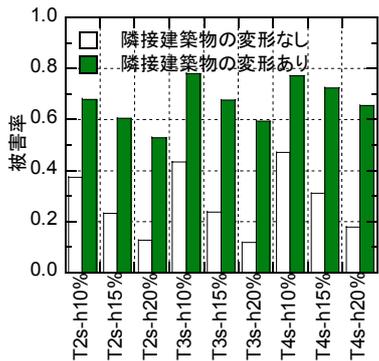


図-17 躯体免震大破の被害率(PGV=100cm/s)

図-18 に隣接建築物の変形の有無によるリスク曲線を示す($h_B=0.15$)。年超過確率が 1/1000 程度以上では、隣接建築物の変形の影響は少ないが、1/1000 程度以下では損失率が顕著に大きくなる。このことは年超過確率が低下することにより PGV が大きくなり、前述した PGV の範囲内では躯体免震大破の被害率が上昇することに関係している。

図-19 に隣接建築物の変形の影響について、再現期間 $T_R=500$ 、2000 年地震発生時(PGV=41, 53cm/s に相当)の損失率を示す。再現期間 $T_R=500$ 年では隣接建築物の影響は小さいが、再現期間 $T_R=2000$ 年ではその影響が大きくなる。また、減衰定数 h_B が小さいほどその影響が大きくなっている。

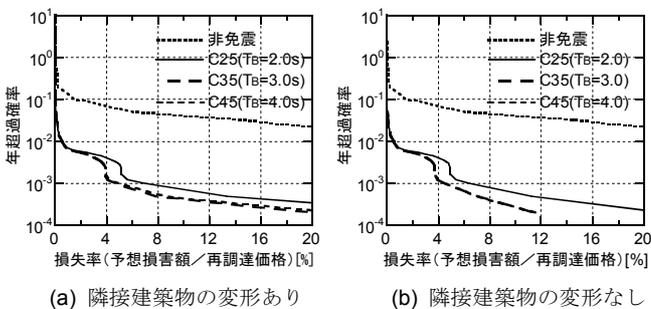


図-18 リスク曲線(減衰定数 $h_B=0.15$ 固定)

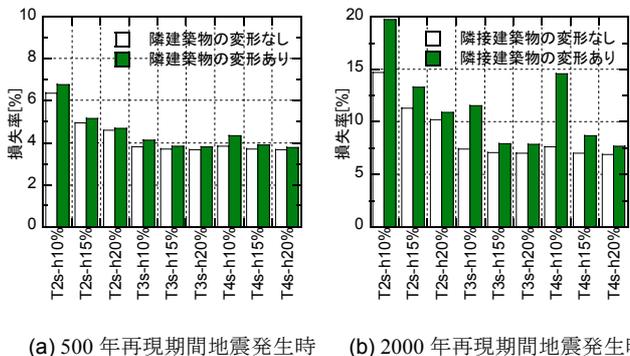


図-19 隣接建築物の変形を考慮した損失率

図-20 にすべての入力地震動に対する 2 棟間の最小相対変位の平均値 μ および標準偏差 σ を (a)隣棟固定, (b)隣棟変形(隣棟間相対変位の時刻歴上の最小値), (c)隣棟変形(各棟の応答相対変位[基礎からの相対変位]の最大値・最小値から算出)の各条件で算出したものを示す。図-21 に上記 (a),(b),(c)の算定模式図を示す。図-20 より (a),(b),(c)の順に最小相対変位の平均値が小さくなり、(b)は(a),(c)の平均的な値となった。また、(a)に対して(b),(c)の標準偏差が大きくなる。このことから隣接建築物の影響を考慮して地震リスクの評価を行う場合、隣接建築物を固定とみなすと地震リスクを過小評価し、隣棟間距離について最悪のシナリオを考えると過大評価となることが分かった。今回の検討結果では時刻歴における両棟の相対変位差の平均値は、上記相対変位算出方法 (a)と(c)の平均的な値となったが、隣接建築物の構造種別、築年数(新耐震設計の前後)、階数などにより、相対変位差の平均値が変動するものと思われる。このことについては次期の検討課題としたい。

いずれにしても、免震建築物に対しては隣接建築物により上部躯体が大破となる限界値が小さくなることがあるため、隣棟間距離や隣接建築物の振動特性を反映させた限界値の設定が重要である。

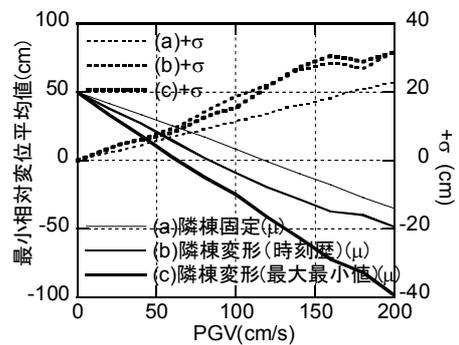
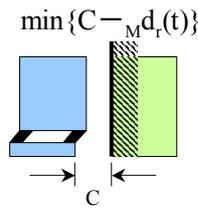
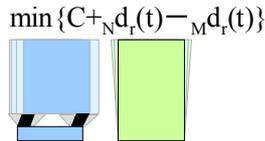


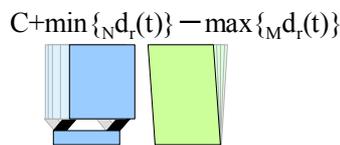
図-20 隣接建築物との最小相対変位(平均値と標準偏差)



(a) 隣棟固定



(b) 隣棟変形(隣棟間相対変位の時刻歴上の最小値)



(c) 隣棟変形(各棟の応答相対変位[基礎からの相対変位]の最大値・最小値から算出)

ここに、C:クリアランス、 $M d_r(t)$:免震相対変位、 $N d_r(t)$:隣棟相対変位

図-21 隣接建築物との最小相対変位の算出方法

6. まとめ

既存不適格建築物に制震改修および免震改修を施した場合の経済効果について、地震リスク指標を用いて評価した。改修費用と地震リスク低減効果の関係の違いから、制震改修については地震リスクを最小とする最適ダンパー量の定量化、免震改修についてはその振動特性（免震周期・減衰定数）および隣棟間距離の地震リスクに及ぼす影響の把握を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

制震改修は建物の地震リスクを低減させる効果的な手法であり、ここで示した方法により最適なダンパー量を経済的観点から設定することができることが分かった。本研究の想定建築物については、今後の供用期間を20~40年とした場合、通常の制震改修で使用される1.5~2.0倍のダ

ンパーを使用すると地震リスクに関する経済性が最も良い。また、供用期間は長くなるほど地震リスクが大きくなるため、最適なダンパー量は多くなる傾向がある。

免震改修は免震周期が長く減衰定数が大きい場合に地震リスクが最も小さくなるが、地震動レベルがそれほど大きくない範囲では免震の振動特性に対する顕著な差異は確認されなかった。また、2棟間の距離が大きい場合は、隣接建築物の地震時の変形を考慮して地震リスクを評価する必要がある。

謝辞：本研究では気象庁、防災科学技術研究所（K-net）、関西地震観測研究協議会、(財)日本建築センター、COSMOS VIRTUAL DATA CENTER、台湾中央気象局³⁾、Boğaziçi大学の地震観測記録を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 翠川三郎, 松岡昌志: 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価, 物理探査, 第48巻, 第6号, pp.519-529, 1995
- 2) 谷垣正治, 有居東海男, 平田裕一, 山田哲也, 山岸邦彰: 超高層集合住宅における地震リスク評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.541-542, 2001
- 3) Lee, W. H. K., T. C. Shin, K. W. Kuo, and K. C. Chen: CWB Free-Field Strong-Motion Data from the 921 Chi-Chi Earthquake: Volume 1. Digital Acceleration Files on CD-ROM, Pre-Publication Version (December 6, 1999), Seismology Center, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, 1999
- 4) 江頭寛, 谷垣正治, 蔵田富雄, 鈴木亨, 山岸邦彰, 長崎充: 地震リスク評価による既存建物の耐震改修効果の定量化(その1 制震ダンパーによる改修), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.13-14, 2003
- 5) 山岸邦彰, 谷垣正治, 鈴木亨, 江頭寛, 新上浩, 中南滋樹: 地震リスク評価による既存建物の耐震改修効果の定量化(その2 中間階免震による改修), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.15-16, 2003