

免震レトロフィットを行った建築の費用対効果に関する研究

D301405 中嶋 仁一

免震レトロフィット 地震応答解析 費用対効果

1. はじめに

兵庫県南部地震以降に大地震に対して設備の機能性や内部被害を低減するのに免震構造が有効とされ、新築での免震構造建物が急増している。耐震補強の方法として建物を免震化する免震レトロフィット工法が最近になり使われている。しかし新築の施工例に比べて事例が少ないために、長周期成分の卓越したM8以上の大地震の経験が少なく、免震レトロフィットの事例も少ないために免震レトロフィットの費用対効果についての研究があまりされていない。

そこで本研究では、山梨県にある免震レトロフィット実施例を用いて具体的な検討を行う。まず免震前、免震後を作成し、それぞれのモデルを糸魚川 - 静岡断層帯で想定される地震動で地震応答解析して、加速度や最大層間変位の値から被害額の評価比較し精度の高い費用対効果の分析につなげる。

2. 建物概要

今回研究の対象とした建物は、山梨県にある平成13年に免震レトロフィットを施した建物である。1)表.1に改修前の建物の諸元を書く。免震層は地下一階の柱で中間免震となっている。(図.1)

表1 建物諸元

構造	: RC造
階高	: 37.1m
階数	: 地上11階 地下1階
建物重量	: 127746.91 kN
建物面積	: 1174.2m ²
延べ床面積	: 10187.83m ²
竣工年	: 昭和38年5月
用途	: 事務所
耐震改修工事費	: 約29億円

表2 固有周期

固有周期 (免震層固定)	
NS方向	0.5102 (s)
EW方向	0.609 (s)

表3 減衰定数

減衰定数	
上部構造	$h_0 = 0.03$
免震層	$h_0 = 0.00$

2.1 解析モデル概要

2.1.a 構造物の解析モデル

剛床が成り立ち建物形状も整形であるので、12 質点直列質点系振動モデルとする。(図.2)なお下部構造は剛とし基礎固定とする。固有周期は、桁行方向が0.5102秒、張間方向が0.609秒とする。(表2)減衰定数は、上部構造が3%(瞬間剛性比例型)、免震部材が0%とする。(表3)

2.1.b 復元力特性と履歴則

擬似立体の弾塑性荷重増分解析を行い、得られた各層のせん断力層間変形角関係よりトリリニア型復元力特性を定める。履歴法則は、武田モデルとする。なお、増分解析の外力分布は、レ

ベル2相当の地震動におけるせん断力分布とする。

2.1.c 免震部材 (LRB 支承) の復元力、履歴法則

免震部材の復元力特性は、鉛プラグの降伏を考慮した歪依存型のバイリニア型とする(図2)。履歴法則はノーマルバイリニアとする。

以上の条件により定めたモデルを用いて応答解析を行う。また、免震層を固定したモデルを作成して、上述の免震レトロフィットしたモデルとを比較して免震モデルの有効性等を導き出す。2)ここで免震層固定のモデルは、多少の改修を施しているが免震装置がないと既存不適格なので改修前の建物とほぼ同程度の耐震性があるとみなした。

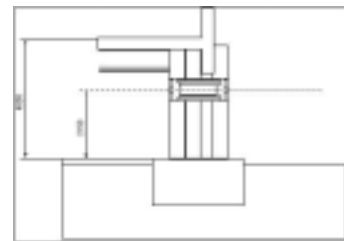


図.1 免震装置設置図

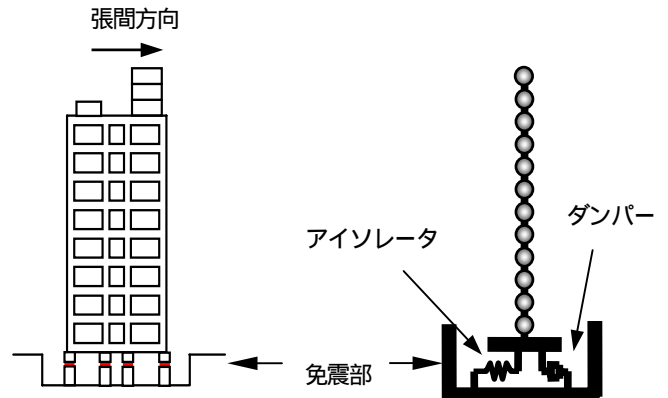


図.2 断面図と解析モデル

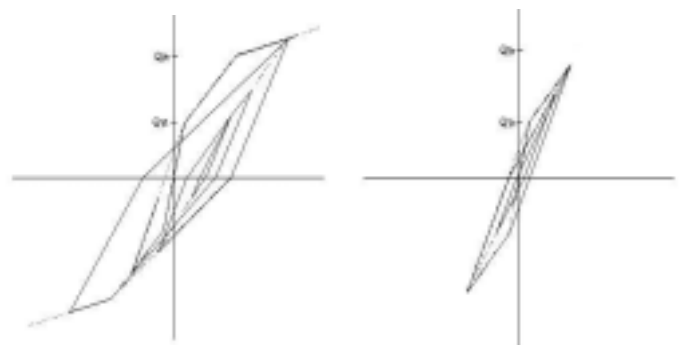


図.3 履歴ループ (左武田モデル、右バイリニア)

3. 入力地震動

2.1 節の解析モデルに係魚川 - 静岡構造線において想定される地震動とランダムに選んだ告示波形を2波、合計3波を入力させる。系魚川 - 静岡構造断層帯で想定される地震動は、山梨県地震被害想定調査報告書（平成 8 年）により県内に大きな影響を及ぼす、可能性があるとされ活動度 A に指定されている。対象建物は開放工学的基盤とみなせる砂礫層上に支持されているので地盤の増幅は無視している。図 4 に対象建物と断層帯との位置関係を示す。それぞれの波形の最大加速度は想定地震動が 287.5gal、告示波は一方は 316.1 gal もう一方が 329gal を入力させた。解析モデルの桁行方向と梁間方向の加速度波形を図 5 に示す。



図4 想定震源

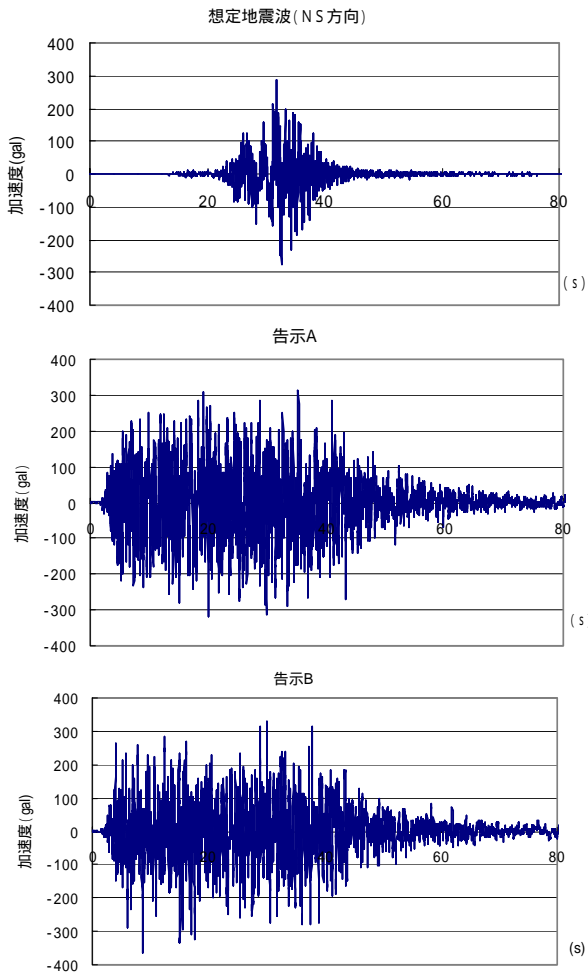


図5 加速度波形

4. 地震応答解析

4.1 解析結果

2.1 節の建物モデルを用いて、系魚川 - 静岡構造線において想定される地震動と告示波を入力して応答解析を行った。地震波はそれぞれ Level 2 相当の強震動とした。図.6 はそれぞれの地震の最大層間変形角を示す。

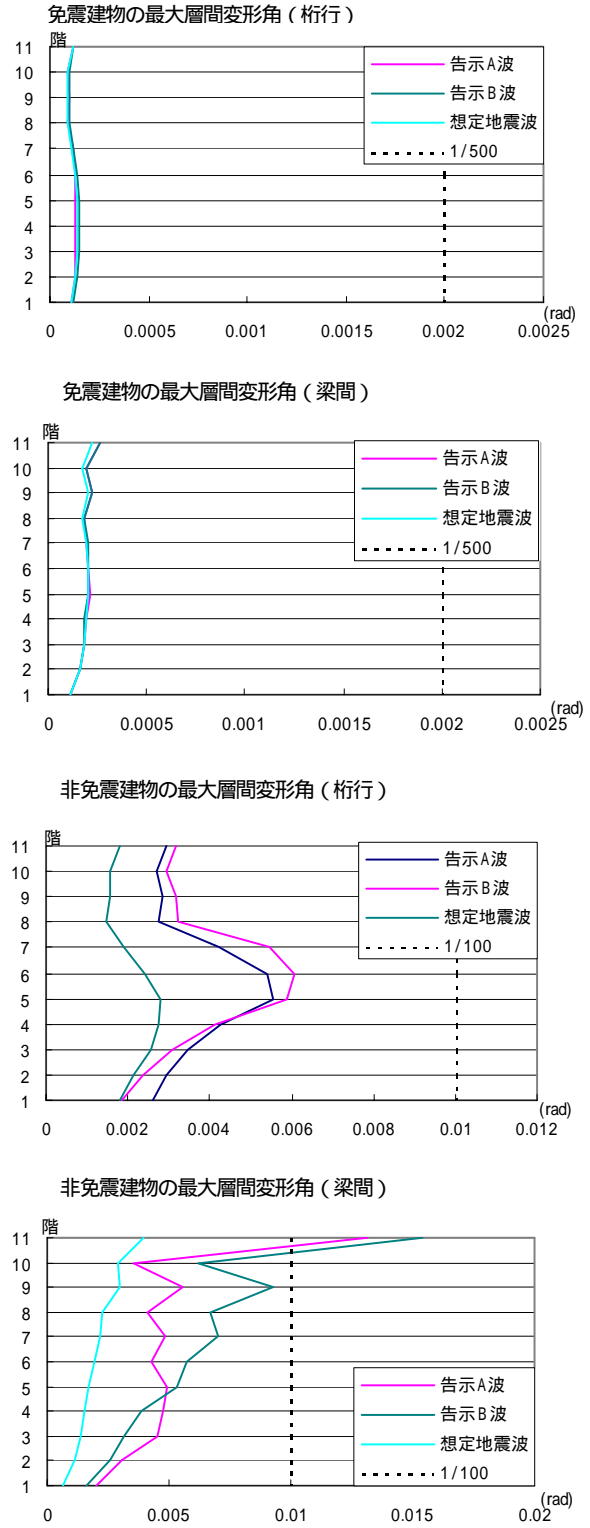


図6 最大層間変形角

3.2 Q - 関係

既存の建物の荷重増分解析から各層の層せん断力 - 層間変位関係 (Q - 関係) 図を求めた。このグラフは、上から 1 ~ 11 階のトリリニアモデルを合わせたものに、加重増分解析で得られた各階の降伏ヒンジとせん断破壊の点を重ねたもので、最大層間変位から各階毎の状態を読み取ることができる。このグラフに 3.1 節で得られた結果を重ねたグラフを図.7 と図.8 に示す。

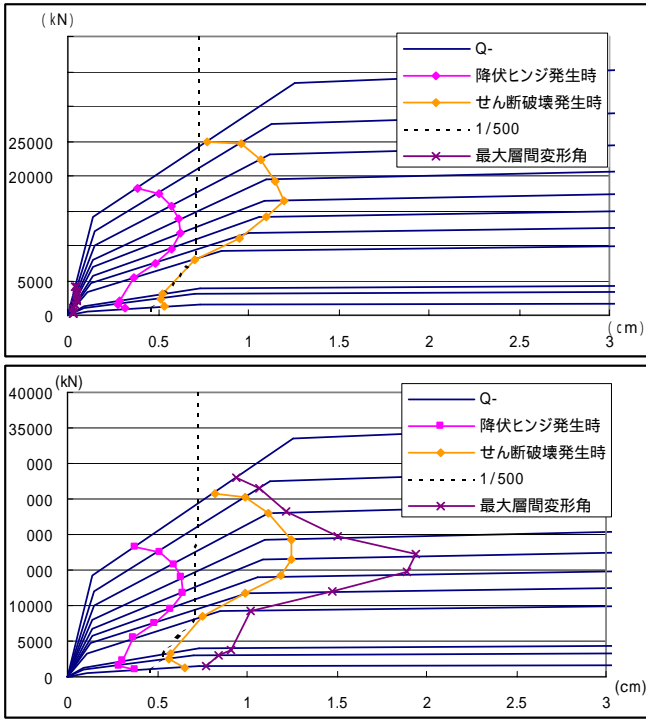


図.7 Q - 関係 桁行方向 (上 免震、下 非免震)

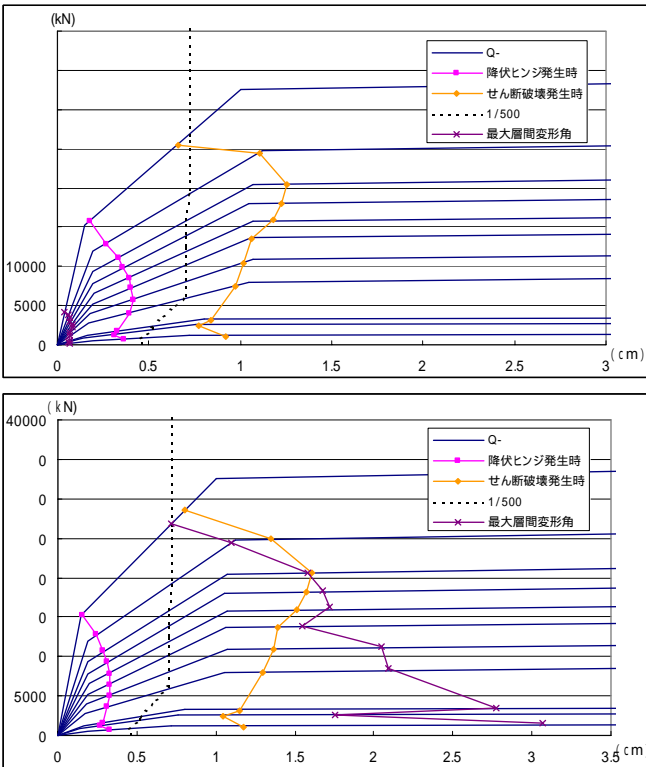


図.8 Q - 関係 梁間方向 (上 免震、下 非免震)

免震建物の方は、桁行方向・張間方向ともすべての階で弾性域内での応答に留まった。非免震の建物の方は、ほぼすべての階でせん断破壊が起こり、一部では倒壊の領域にまで達していた。

5. 損傷費用の算出

5.1 損傷費用モデル

3.1 節の地震応答解析の結果から、損傷費用を算出する。建物の再調達費用は、建物の改修費用の倍 (58 億円) とし、その内わけを構造部材は 1/4 (14 億 5000 万円)、非構造変形依存部材は 1/4 (14 億 5000 万円)、非構造加速度依存部材は 1/2 (29 億円) とした。表 3 は非構造部材の中で考慮される主なファクターを上げたもので、が直接的被害のファクターで、が間接的被害を受けるファクターを示している。なお構造部材は層間変形角、非構造変形依存部材も層間変形角、非構造加速度依存部材は床応答加速度を横軸にとりフラジリティ曲線を用いて損傷費用を算出する。表 4 に部材別の中央値と標準偏差のパラメータを示す。フラジリティ - 曲線は、それぞれ文献 3) を参考に設定した。フラジリティ - 曲線は、下記の式 (1) により変数に層間変形角や床応答加速度を取り、表 4 の中央値を平均に、確率変数を標準偏差として正規累積分布に従い算出する。なお対象物件は、既存不適格という前提で文献 3) において Low Code を採用した。各部材ごとについてのフラジリティ - 曲線を図 9 に示す。

表.3 非構造部材の分類

タイプ	アイテム	非構造変形依存	非構造加速度依存
構造的要素	非耐力壁/間仕切り		
	片持ち要素とバラベツ		
	外壁パネル		
	ベニアと仕上げ材		
	ラックとキャビネット		
	入り口		
	装飾類		
	基本設備 (ボイラーなど)		
	工業機械と制御機械		
	パイプシステム		
機械設備	貯水タンク		
	HVACシステム (冷凍機、ダクト配管など)		
	エレベーター		
	トラス塔		
	総合電気設備 (配電盤、ダクトなど)		
	照明器具		
	内装	ファイルキャビネットや本棚など	
オフィス設備や備え付け家具			
コンピューター/コミュニケーション設備			
消耗産業設備			
デザインのものやその他の物			

○:一次的被害 ○:二次的被害

表.4 各部材の中央値と標準偏差パラメータ

	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	中央値	標準偏差	中央値	標準偏差	中央値	標準偏差	中央値	標準偏差
構造部材	0.0025	0.4	0.004	0.4	0.01	0.4	0.025	0.4
非構造変形依存部材	0.004	0.5	0.008	0.5	0.025	0.5	0.05	0.5
非構造加速度依存部材	0.2	0.6	0.4	0.6	0.8	0.6	1.6	0.6

$$P[ds \setminus S_d] = \left[\frac{1}{ds} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d,ds}} \right) \right] \cdots (1)$$

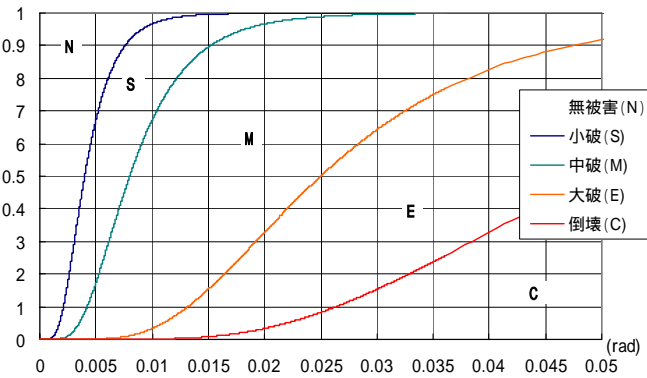
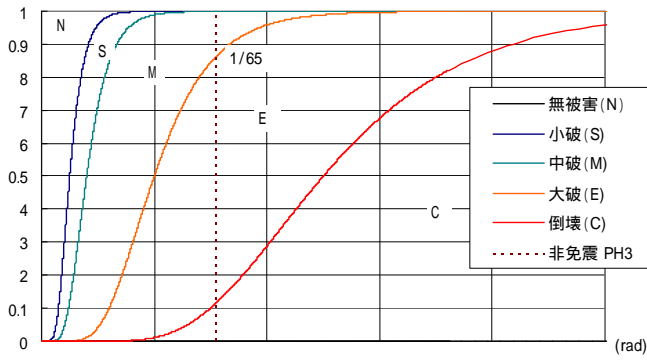
$$\bar{S}_{d,ds} = \delta_{R,S_{ds}} \cdot \alpha_2 \cdot h$$

ここで S_d : 変位スペクトル、 ds : ばらつき、 R_{sds} : 中央値、 α_2 : 重心位置補正係数、 h : 建物軒高さである。

表.5 損傷コスト比率

	無被害	小破	中破	大破	倒壊
構造部材	0.00	0.02	0.10	0.50	1.00
非構造変形依存	0.00	0.02	0.10	0.50	1.00
非構造加速度依存	0.00	0.02	0.10	0.50	1.00

構造部材のフラジリティー曲線



非構造加速度依存部材のフラジリティー曲線

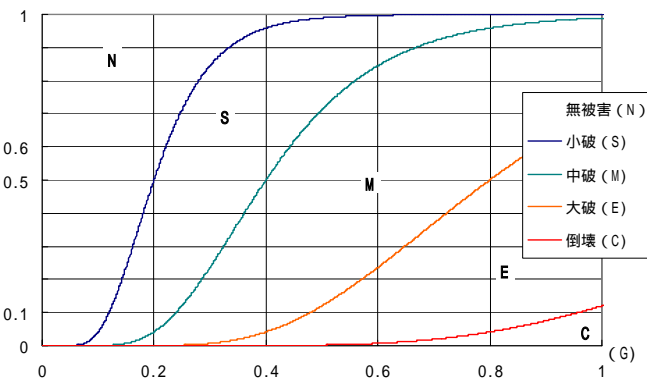


図.9 フラジリティー - 曲線(上 構造、中 非構造変形依存、下 非構造加速度依存)

このフラジリティー曲線から被害率を求める。例として非免震の11階 (PH3) の最大層間変形角は 1/65 (rad) であった。(図 9 上) この時の被害率は、M の被害が 0.15、E の被害が 0.75、C の被害が 0.1 となり(図.10) この時のリスクが表 5 より $(0 \times 0 + 0 \times 0.02 + 0.15 \times 0.1 + 0.75 \times 0.5 + 0.1 \times 1) = 0.49$ が Risk となる。

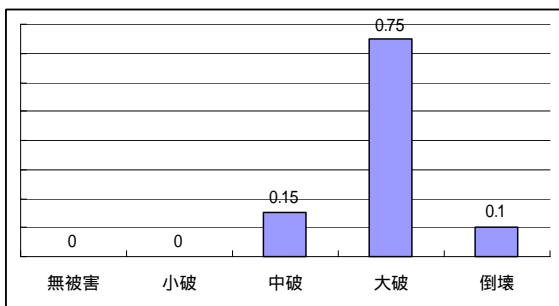


図.10 被害率

5.2 解析結果

費用算出のための解析は、免震建物と非免震建物の構造部材、非構造変形依存部材、非構造加速度依存部材でそれぞれの場合に従いフラジリティー曲線を作成し、各階毎のリスクを算出し、各階の金額的価値を均一と考え、各階の平均値で評価した。リスク評価の結果と損害費用を表 6 に示す。各部材毎の免震建物と非免震建物の期待値を図 11 に示す。

表 6 リスク評価結果

	再調達費用(万円)	被害率		損害費用(万円)	
		免震	非免震	免震	非免震
構造部材	¥ 145,000	0%	5.01%	0	7,263
非構造変形依存部材	¥ 145,000	0%	0.80%	0	1,156
非構造加速度依存部材	¥ 290,000	0.91%	4.72%	2,632	13,700
合計	580,000	0.91%	10.53%	2,632	22,119

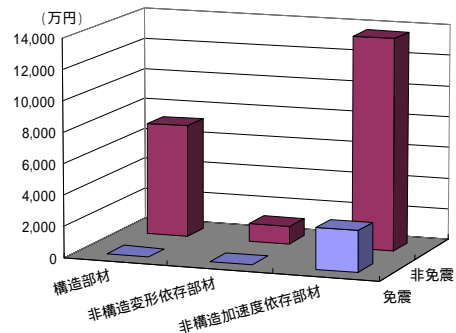


図.11 各部材毎の期待値

6. まとめ

免震レトロフィットを施した建築物の解析モデルに想定地震波と告示波を入力して地震応答解析を行い、その結果から費用対効果の考察について報告した。3.2 節において述べた Q - 関係のグラフから免震建物では弾性域内での応答で留まり被害は出なかった。非免震の建物は、ほとんどの階で弾塑性域応答であった。一部では塑性域まで達していた。

リスク評価については、Hazu99 を参考にフラジリティー曲線を用いて評価した。結果は非免震建物では、構造部材で 7263 万円、非構造変形依存部材で 1156 万円、非構造加速度依存部材で 1 億 3700 万円、合計 2 億 2119 万円の被害額となった。一方免震建物は、構造部材、非構造変形依存部材ともに 0 円、非構造加速度依存部材で 2632 万円という結果となった。免震の効果が出ているが、しかし非免震建物が耐震改修費用に対して 10 分の 1 程度の被害に留まった。今後は、さらに既存耐震改修したモデルとの比較をすれば、より実用的な検討ができると思われる。

参考文献

- 1) 鱈沢 曜、年縄 巧、久田 嘉章、鹿嶋 俊英、小山 信：免震レトロフィットを施した山梨県庁舎本館の低ひずみレベルでの振動特性
- 2) 日本建築学会：免震構造設計指針 (1989)
- 3) Federal Emergency Management Agency (FEMA), Hazus99 technical manual, 1999 (<http://www.fema.gov/>)
- 4) Decision Methodology in Seismic Risk Management of a single building Based on Minimum Expected Life - Cycle Cost, pp.859-880, Vol.33, 2004 : Yuji Takahasi, Armen Der Kiureghian, Alfredo H.S. Ang