

免震層変位を制限した戸建て免震住宅の耐震等級対応法と

ライフサイクルコスト評価

BASE-ISOLATED HOUSES WITH RESTRICTED DISPLACEMENT ACCORDING TO SEISMIC GRADE AND ITS LIFE-CYCLE-COST

花井 勉*, 福和伸夫**, 森 保宏***, 皆川隆之****

Tsutomu HANAI, Nobuo FUKUWA, Yasuhiro MORI, and Takayuki MINAGAWA

The displacement of the isolated story of a base-isolated house built at a narrow land needs to be restricted using dampers or stoppers to meet the regulation of seismic grade for ordinary houses. This paper investigates the responses of a standard 2-story base-isolated steel frame house with restricted displacement considering various types of soil conditions. It is shown that the higher seismic grade can be achieved with some added dampers or large margin of displacement or by upgrading of the frame. Although the response could be larger than that of the ordinary houses, base-isolated houses have an advantage in terms of Life-cycle cost except for soft soil condition.

Keywords : *Base-isolated house, Seismic grade, Ground period, Restricted displacement, Floor seismic intensity, Life-Cycle-Cost*

戸建て免震住宅, 耐震等級, 地盤周期, 変位制限, 床震度, ライフサイクルコスト

1. はじめに

住宅の品質向上を目指して平成 12 年に施行された「住宅の品質確保の促進等に関する法律」(以下、品確法)により多くのハウスメーカーが日本住宅性能表示基準に従った住宅型式認定を取得するようになり¹⁾、耐震性能を耐震等級により明示した戸建て住宅が徐々に増加してきている。

また、耐震等級レベルに応じた地震保険の減額など、建物の損害危険度に合わせた保険面、税制面での優遇制度が充実し、住宅の耐震性の性能設計化が促進されつつある。

戸建て免震住宅の場合も非免震住宅と同一の基準での評価が必要となるが²⁾、耐震等級に応じて地震動レベルが上がると、十分な免震性能を確保するためには 40～50cm 以上の免震層変位が必要な場合もでてくる。

筆者らはこれまで戸建て免震住宅の免震層変位を簡易に求める手法を提案しているが³⁾、敷地に余裕のない戸建て免震住宅では、どこまで免震層変位を許すかは最も重要な設計条件であり、場合によってはダンパーの追加、あるいはストッパーにより変位を制限する設計も考えられる。

そこで本論では、様々な地盤条件を対象に耐震等級に対応する地震波を作成し、代表的な 2 階建て鉄骨住宅の上部架構に、戸建て住

宅用免震装置を組み込んだ場合の時刻歴応答解析を行い、耐震等級を満足するために必要な免震層変位量または免震層変位制限に必要な粘性減衰量を調査する。さらに、ストッパーを用いて強制的に免震層変位を制限した場合の解析も合わせて行い、その制限変位及びストッパー性能が上部架構に与える影響について考察する。

ストッパーによる変位制限を行った場合には、上部架構に大きな衝撃の応答が発生し、地震動のレベル、地盤条件、変位制限条件によっては非免震時の応答より大きくなる場合が考えられる。即ち、変位制限と免震性能とはトレードオフの関係にあり、ストッパーの採用に当たっては地震動の発生確率まで考慮した何らかの判断材料が必要である。

そこでここでは、判断材料の 1 つとしてライフサイクルコストを用いる方法を提案する。中、大地震動時の通常の免震応答から極大地震動時のストッパー作動応答までの各損傷状態に応じた建物と家財の修復コストを求め、地震ハザードの大きさと重み付けして累計し、これに免震化にかかる費用を加えてライフサイクルコストを算出する。いくつかの地盤条件で非免震時及びダンパーを付加して変位を制限した場合の免震時と比較することにより、変位制限を行う免震設計の優位条件を検討し、戸建て住宅の免震構法採用判断の一助とする。

本論文は文献 4)5)に加筆したものである。

*名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生
(日本システム設計)

**名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

***名古屋大学大学院環境学研究科 助教授・Ph.D

****. 日本システム設計 開発設計室

Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

Prof., Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng

Assoc.Prof., Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Ph.D.

Nihon System Sekkei

2. 耐震等級波の作成

日本住宅性能表示基準の「構造の安定に関すること」に従い、建築基準法で定められた地震動を1倍、1.25倍、1.5倍（等級倍率）することで、耐震等級1,2,3に対応した地震波（耐震等級波と呼ぶ）を以下の要領で作成する。

建築基準法施行令第82条の6で示される解放工学的基盤の加速度応答スペクトルに適合する模擬地震動として、継続時間60秒のランダム位相波20波と実地震波位相を用いた4波、計24波を作成する。ランダム位相波の包絡形は主要動を2.5～17.5秒としたJennings型⁶⁾、実地震波位相に採用した地震動は、El Centro 1940_NS, Taft 1952_EW, Hachinohe 1968_EW, Kobe(JMA)1995_NSである。

作成した24波を耐震等級1波、この加速度振幅を等級倍率倍したものを耐震等級2,3波とし、公表されている地盤情報^{7,8)}を用いて、逐次積分法全応力解析⁹⁾により表層増幅を考慮する。地盤物性のひずみ依存性は、建築基準法告示第1457号別表の値をR-Oモデルに置換して用いている。

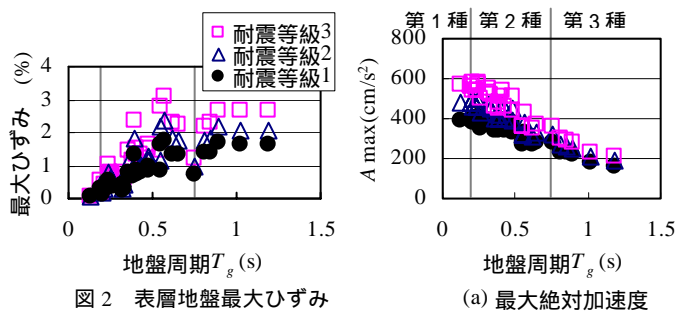
図1には、弾性地盤周期 T_g が1.2秒以下の30サイト（第1種地盤3サイト、第2種地盤22サイト、第3種地盤5サイト）の地盤情報を用いた、耐震等級1,3波の地表面速度応答スペクトルを示す。地震動レベルが上がるにつれピークがなだらかになり長周期化している様子が分かる。図中には表層増幅に告示第1457号第7.2項に示される簡略法による第2種地盤増幅率を用いた場合も参考として示しているが、免震建物が応答する長周期域（2秒以上）では第3種地盤の結果をも完全に包絡している。

各耐震等級波の表層地盤最大ひずみを図2に、地表面での各最大応答値を図3にプロットする。縦軸は各24波の平均値、横軸の地盤周期は各サイトの地盤初期剛性より1/4波長則により求めたものである。耐震等級1の最大値をみると、加速度は地盤により400～200 cm/s^2 、速度、変位は地盤によらず60 cm/s 、40 cm 程の値となる。耐震等級2,3の応答を耐震等級1からの倍率として全サイトの平均でみると、耐震等級2で加速度、速度、変位は1.18, 1.23, 1.25倍、耐震等級3はそれぞれ1.36, 1.47, 1.51倍となり、加速度は等級倍率を若干下回っている。最大ひずみが2.3%に及び表層地盤の大きな非線形化により地盤の塑性履歴減衰が大きくなり、等級倍率ほどは増幅倍率が上がらないようである。しかし、免震応答に影響の大きい速度、変位はほぼ等級倍率で増幅され、耐震等級3では最大速度100 cm/s 、最大変位60 cm 程の地震動となっている。

3. 免震応答解析

3.1 解析モデル

上部架構には2階建の鉄骨耐力パネル構造を考える。1,2階の階高



は270 cm とし、質量比は一般的な分布を想定して免震層：1階：2階=1：1：0.75とする。上部架構各層の復元力モデルは図4に示すノーマルトリニアとし、初期剛性はベースシア係数 $C_0=0.2$ 時に層間変形角が1/200となるように設定している（図4）。1,2階の剛性比は、基礎固定時の上部架構の1次モードが直線になるよう1：0.6

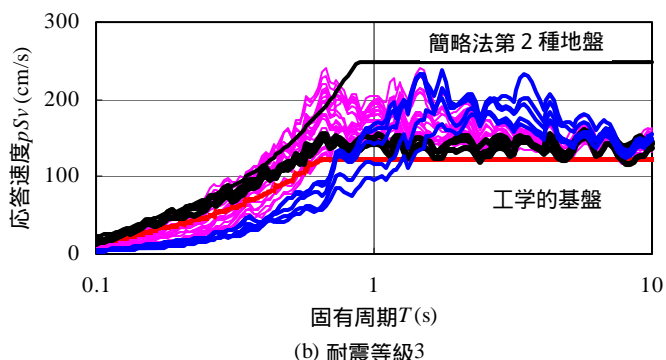
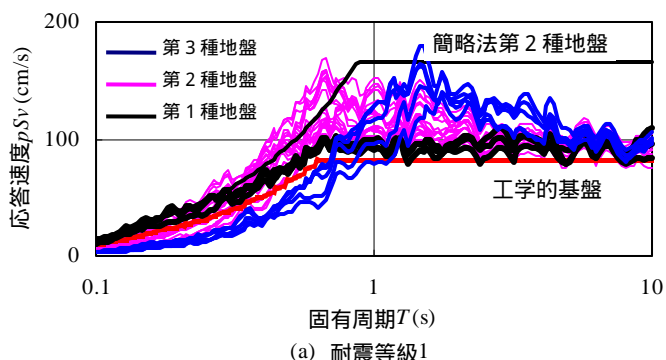


図1 速度応答スペクトル

<ノーマルトリニア>

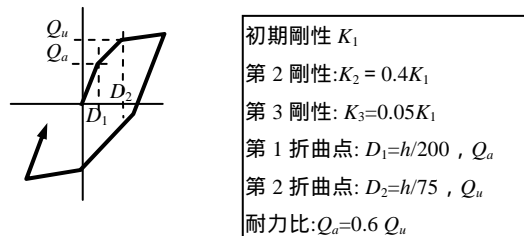


図4 上部架構の復元力モデル

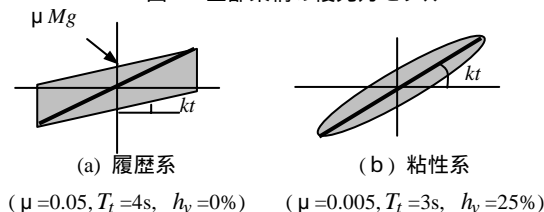


図5 免震層の復元力モデル

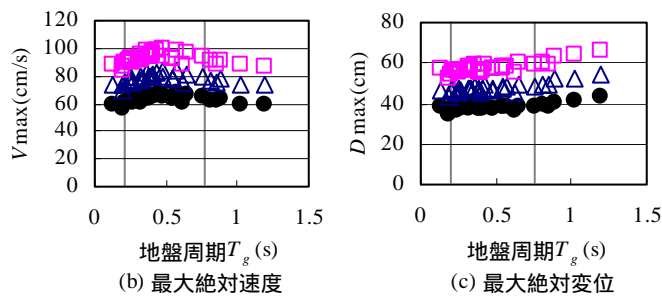


図3 耐震等級波最大値

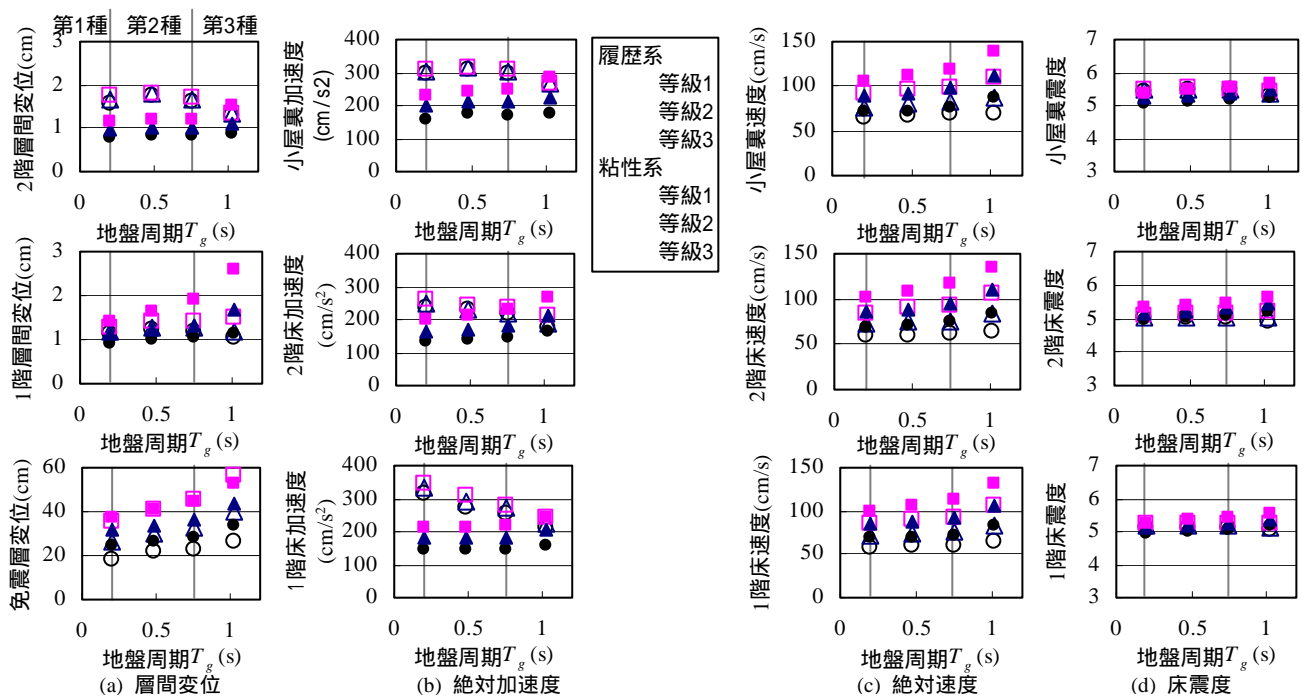


図6 免震応答最大値

とし、上部架構の減衰定数は基礎固定時1次固有振動数に対して $h=3\%$ の剛性比例型とした。

免震層の特性は、戸建て住宅用免震システムとして用いられている¹⁾、すべり支承に線形復元力を組合せた履歴系モデル ($\mu=0.05, T_f=4s, h_v=0\%$)、転がり支承に線形復元力と粘性ダンパーを組合せた粘性系モデル ($\mu=0.005, T_f=3s, h_v=25\%$) を想定する(図5)。ここに、 μ : 免震装置摩擦係数、 M : 建物総質量、 g : 重力加速度、 k_f : 免震装置復元材剛性、 T_f : 免震装置復元材周期、 h_v : T_f における免震層の粘性減衰定数である。本来は地盤種別、設計条件により免震装置の組合せの最適化を図るべきであるが、各パラメータの影響を比較するため上記組合せを標準モデルとする。

3.2 応答解析

第1種地盤から0.20秒、第2種地盤から0.48秒と0.75秒、第3種地盤から1.02秒の地盤周期を持つサイトの地表面等級波を選択して、免震層を含めた3質点系モデルにて時刻歴応答解析を行う。図6に各層の最大応答値(層間変位、絶対加速度、絶対速度、床震度)をサイト毎24波の平均値で示す。床震度とは各層の加速度応答波形を用いて計測震度を算出したものである。

免震層の変位は、地盤周期が長いほど大きくなるが、増加の割合は耐震等級3の方が顕著である。また、1階の層間変位は粘性系が、2階の層間変位は履歴系がやや大きい。しかし、粘性系モデルの第3種地盤、耐震等級3のケースを除くと、変形角は2次部材が追従可能な1/120以内である。

加速度については、特に固い地盤で履歴系モデルが大きくなる傾

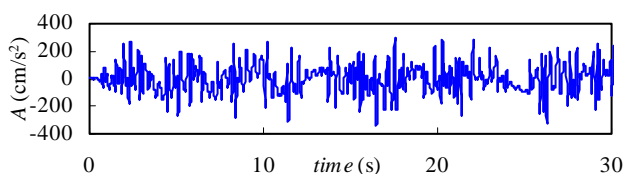


図7 履歴系免震層応答波形(耐震等級3、 $T_g=0.2s$)

向がある。これはすべり摩擦モデルの高い立ち上がり剛性によるものであり、免震層上部の応答波形(図7)で見ると高い振動数の成分であるため、最大速度値にはその傾向は見られない。

室内家具什物の損傷を加速度、速度を考慮した計測震度で評価するとどの床レベルでも履歴系、粘性系共に震度5強の上限から6弱の下限程度であり、損傷の少ないレベルといえる¹⁰⁾図22。

3.3 ダンパー付加による応答変位制限解析

耐震等級3においても免震層応答変位を30cm以内とする必要付加粘性ダンパー量(粘性減衰量 $+h_v$)を各地盤ごとにパラメータスタディする。結果を表1に、この時の上部架構応答値を図8に示す。

表1 免震層応答変位を30cmに制限する場合の付加減衰量($+h_v$)

	$T_g=0.2s$	$T_g=0.48s$	$T_g=0.75s$	$T_g=1.02s$
履歴系モデル	+20%	+40%	+50%	+60%
粘性系モデル	+20%	+30%	+40%	+50%

減衰が付加されることで若干上部架構応答が増加する場合もあるが、層間変形角も1/120以内、床震度も震度6弱に収まり、十分に免震状態といえる範囲である。

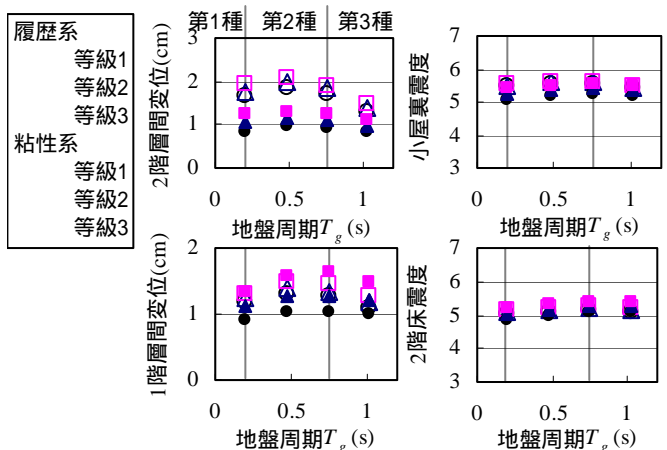


図8 耐震等級3対応用付加減衰時の上部架構応答最大値

4. ストッパーによる免震層応答変位の制限設計

次に免震層標準モデルに変位制限用ストッパーを設けた場合の応答を調べる。ストッパー材としてワイヤーなどのロープ又はゴムの接岸材等を想定し、その応答範囲はストッパー材に減衰の生じない弾性域とする。ストッパーの剛性が低くストッパー変形も大きいほうが衝撃力は緩和されるが、敷地の余裕制限からベースシア係数 1.0 時の水平力を a:2cm, b:5cm で制限できるモデルとする(図9)。尚、ストッパー作動開始変位 s は耐震等級1での免震層変位(24波の平均値 s_0) $\times 1.1$ とした。

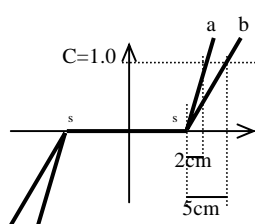


図9 ストッパーモデル

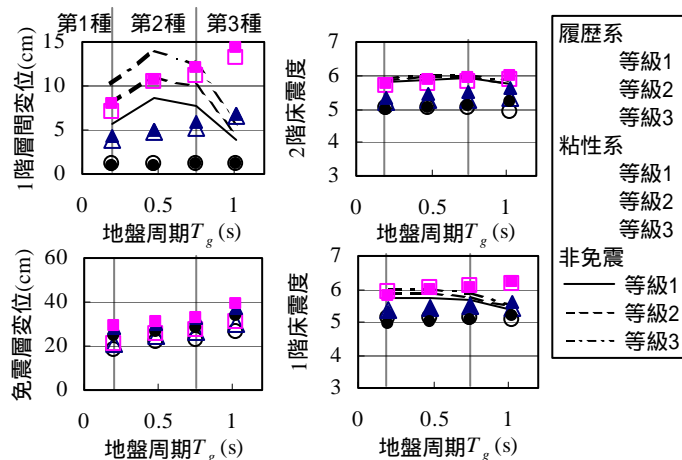
図10に耐震等級3・ストッパー剛性aモデルでの免震層上部の加速度応答波形例を示す。主要動に入り免震周期で数回の衝突を繰り返している。図11には各階の最大応答層間変位、最大応答床震度を示す。値は24波の平均値である。図中の折れ線は非免震時の応答であり、1階床震度は地表面震度を示している。

耐震等級2,3ではストッパーによる変位制限が働くため、免震層変位は耐震等級1プラス数cmで収まるが、上部架構の応答は大きくなる。特に第3種地盤では非免震時を上回る応答となっている。床震度については、耐震等級3では非免震時応答を上回る場合があり、震度6強に達している。

ストッパー剛性による差を比較すると、層間変位、床震度への影響は小さく、この程度の剛性の違いでは上部架構の損傷を軽減するには至らないことを示している。但し、免震層の層せん断力係数は第3種地盤の場合、ストッパー剛性を軽減することにより耐震等級2では0.81が0.56に、耐震等級3では1.20が0.82と軽減され、ストッパー自身の設計にはストッパー剛性を下げることが効果的である。

設計のクライテリアとして上部架構の倒壊限界層間変形角を1/30(層間変形9cm)とすると、耐震等級2応答は収まっているが、耐震等級3では第1種地盤以外ではクライテリアを満足しない。一方、非免震時は第2種地盤では耐震等級2からクライテリアを満足しないが、逆に第3種地盤では応答が小さく抑えられ、耐震等級3でも補強の必要がないレベルになっている。

耐震等級3に対して、1階の層間変位クライテリアを満足する方



<ストッパー剛性aモデル>

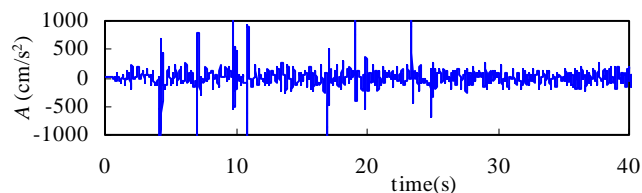


図10 免震層応答波形例(耐震等級3、 $T_g=0.48s$ 、剛性a)

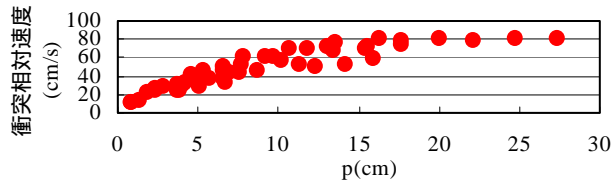


図12 衝突位置 衝突相対速度関係

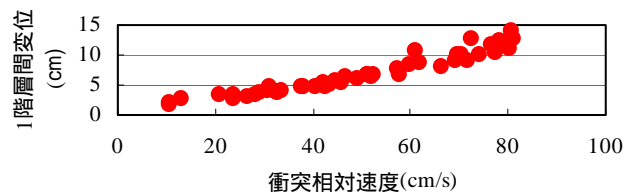
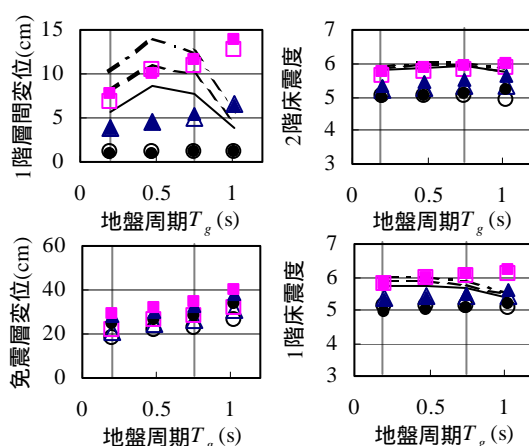


図13 衝突相対速度 1階層間変位関係

策について検討する。まず、ストッパー作動開始変位に余裕を持たせ、 $s=s_0 \times 1.2 \sim 1.3$ とした場合の応答を調べる。ストッパー剛性はbモデル、評価値は24波のうちストッパーに半数以上当たった場合はその衝突波応答の平均値、半数未満の場合は当たらない波応答の平均値とする。図12には衝突時速度と衝突位置(免震層最大変位に対しどれほど手前で衝突させたか)を、図13には衝突時速度と1階層間変位の関係を示す。免震層最大変位の10cm以上手前で衝突させた場合、衝突相対速度は60cm/s程に達し、1階層間変位はクライテリアに近づいてくる。図14は $s_0 \times 1.3$ 倍までストッパー作動変位に余裕を持たせた場合の応答結果である。第2種地盤までがほぼクライテリア内となるが、第3種地盤は衝突速度が大きく依然倒壊レベルである。床震度は耐震等級2で震度5強、耐震等級3で震度6弱程に収まってくる。

次に上部架構を耐震等級倍率に応じて、耐力・剛性ともに1.25倍(耐震等級2)、1.5倍(耐震等級3)UPさせた場合の解析を行う。

図15には $s=1.1 \cdot s_0$ 、ストッパー剛性bモデルでの応答結果を示



<ストッパー剛性bモデル>

図11 ストッパー作動時応答($s=1.1 \cdot s_0$)

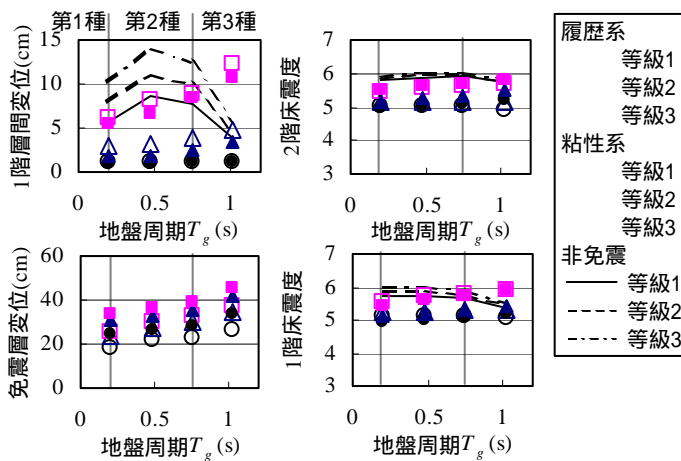


図 14 ストッパー作動変位増大時応答

($s=1.3 \cdot 1_0$, 剛性 b)

す。補強効果で非免震応答は等級による差がなくほぼクライテリア内となり、ストッパー応答でも第2種地盤まではクライテリア内となる。但し補強の影響で各階の応答床震度が多少大きくなっている。尚、第3種地盤では $s=1_0 \times 1.2$ とすればクライテリア内となるが、非免震の方が応答が小さく、第3種地盤ではダンパー付加等の併用が必要である。

5. ライフサイクルコスト評価

ここまでの検討で、ダンパーを付加して免震性能を保ちながら耐震等級対応する方法の他に、建築基準法で要求される耐震等級1の地震動に対しては免震による応答軽減を期待し、それ以上の耐震等級に対してはストッパーにより応答変位を制限しつつ建物を倒壊させないという設計の考え方がありえることを示した。しかし、想定を超える強い揺れを受けた時、変位制限を行うと地盤条件によっては非免震時よりも大きな応答が生じる可能性もある。

そこで、敷地に余裕のない戸建て住宅において、免震構法採用判断の指標の1つとして地震動の発生確率を考慮したライフサイクルコストを試算した。具体的には図16のフローに従い、中、大地震動時の免震応答から極大地震動時の変位制限応答までを対象に、建物、家財の損傷割合に応じた修復コストを算出し、その地震発生確率で重み付けして年間期待損失コストを求め、初期免震化にかかるコストも加えた建物供用年数中の総期待コストとして評価する。

まず始めに、中地震動から極大地震動までのいくつかのレベルの地震動を設定する。ここまでの検討してきた極めて稀に発生する地震動を極大地震動、工学的基盤レベルでこれを1/5したものを中地震動、この中間として1/2としたものを大地震動と定義し、各々に耐震等級倍率1、1.25、1.5を掛けた場合の合計9つのレベルとする。

極大地震動(耐震等級)1の再現期間を500年と考え¹¹⁾、再現期間に対する地震動レベルの補正係数¹²⁾として

$$R_a = (r/100)^{0.54} \quad r: \text{再現期間} \quad (1)$$

を採用すると、各レベルの再現期間が算定できる。図17は、横軸に地震動レベルを工学的基盤の加速度応答スペクトル bS_a の最大値(周期0.16秒から0.64秒の加速度一定領域の値)で示し、縦軸に年超過確率($1/r$)の値をプロットした地震ハザード曲線である。

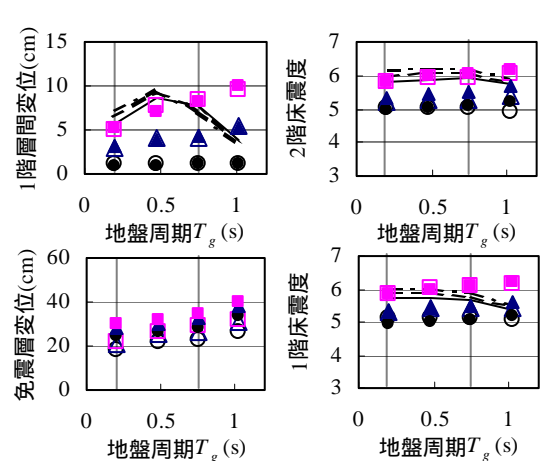


図 15 上部補強した場合のストッパー作動時応答

($s=1.1 \cdot 1_0$, 剛性 b)

次に、各レベルの地震動作用時の応答から損傷度曲線を求める。2節と同様に工学的基盤位置で作成した各レベルの地震動24波に表層増幅を考慮して入力地震動とし、3節のモデルを用いて中地震動、大地震動作用時の応答を求める。尚、ストッパーは極大地震動用にセットされているものとし、ここでは作動させていない。

図18には工学的基盤 $\max_b S_a = 160 \text{ cm/s}^2$ (再現期間25年) $\times 1$ 倍、1.25倍、1.5倍の中地震動時応答最大値(24波平均値)を示す。免震層が数cm変位して上部応答を軽減している。表層増幅の影響で非免震時には1階の層間変位が1/200を超えてしまうが、全ての地盤で軽微な損傷にとどまる1/100よりは小さい。

同様に図19には工学的基盤 $\max_b S_a = 400 \text{ cm/s}^2$ (再現期間139年) $\times 1$ 倍、1.25倍、1.5倍の大地震動時応答最大値を示す。免震層は20cm

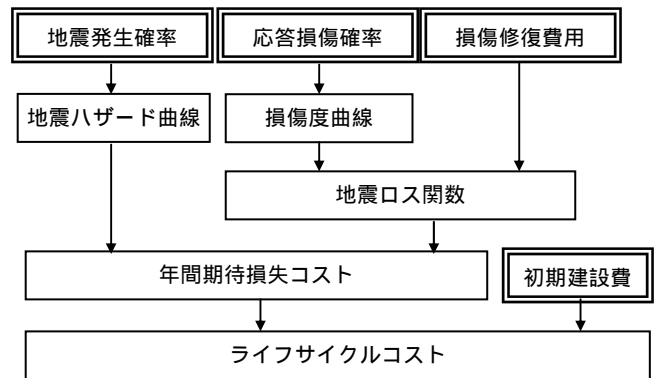


図 16 ライフサイクルコスト算定フロー

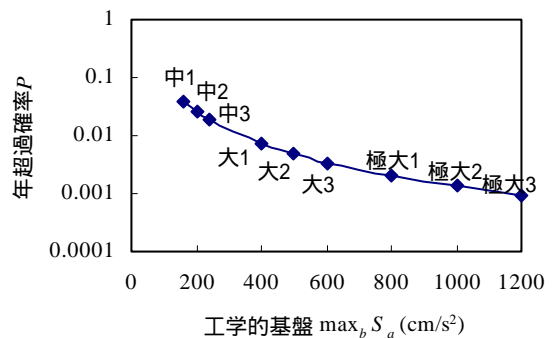


図 17 地震ハザード曲線

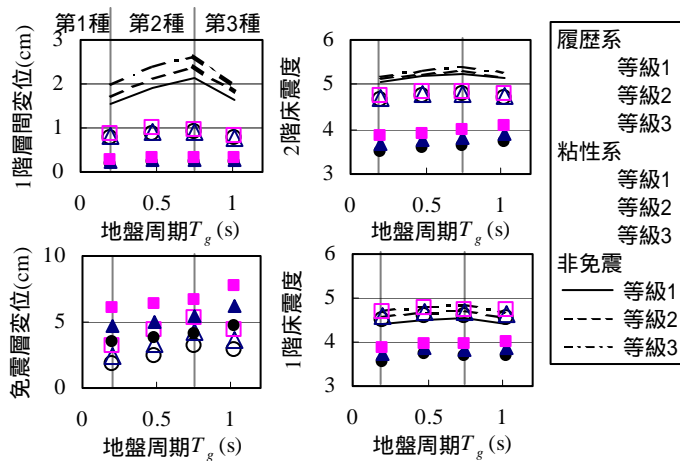


図 18 中地震動時応答最大値

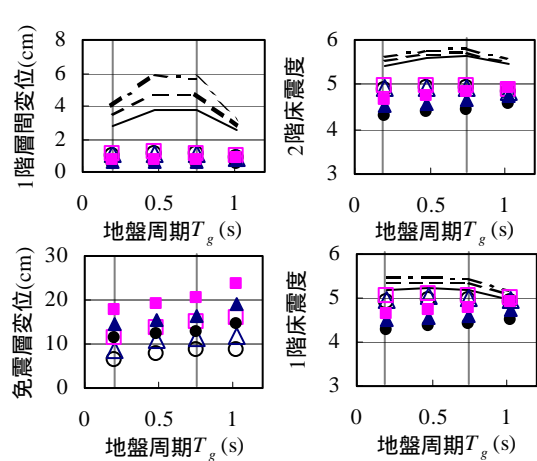


図 19 大地震動時応答最大値

を越えるものもあるが、床震度は 5 弱にとどまっている。非免震時は 1 階の層間変位が 1/100 ~ 1/50 程に達するが倒壊レベルには至っていない。

続いて、標準的な 2 階建て鉄骨住宅（床：ALC、外装材：ALC 版に吹付け仕上げ、内装材：石膏ボードクロス仕上げ）を想定して、各地震動レベルに対する応答から損傷確率、損失額を求めていく。

まず、類似の鉄骨住宅実大振動実験の損傷状態¹³⁾を参考に、建物の損傷モードを最大層間変形角に応じて表 2 のように定義する。

損失額は想定建物を延床面積 40 坪、坪単価 60 万円として、小破から大破まではその変形角に達した階の補修にかかる費用を見積っている¹⁴⁾。

各地震動レベルに対する最大層間変形角は、時刻歴解析で求めた応答平均値を平均値とする対数正規変数と仮定し、応答のばらつきと後で評価する損失額のばらつきを見込んで対数標準偏差は 0.3 とすると、最大層間変形角の確率密度関数は図 20 のようになり、地震動レベルに応じた各損傷モードの発生確率が求まる。これに表 2 の各損失額をかけて累計することで地震動レベルに応じた各階の建物損傷額を算出する。

図 21 は $T_g = 0.2$ 秒の地盤での 1 階の最大層間変形角より、地震動レベルに応じた各モードの発生確率を求めて損傷度曲線を作成したものである。(a)非免震時は中、大地震動から極大地震動へなだらかに損傷モードが変化しているのに対し。(b)粘性系免震装置で変位制限 ($s=1.1 \cdot 10^{-3}$ 、ストッパー剛性 b) した場合はストッパーに当たるまではほとんど損傷が無く、ストッパーに当たると急激に損傷が拡大する様子が見える。(c)同じ免震装置で余裕を持ってストッパーを作動させた場合 ($s=1.3 \cdot 10^{-3}$ 、ストッパー剛性 b) はほとんどが無被害、小破領域となる。(尚、ストッパー作動時の応答のばらつきは対数標準偏差で 0.4 程と少し大きくなるが、ここでは簡便に上記

表 2 建物の損傷モード及び損失額

モード	小破	中破	大破	倒壊
最大層間変形角	1/200 ~ 1/100	1/100 ~ 1/50	1/50 ~ 1/30	1/30 以上
損失額 (万円)	20	150	400	2400
小破：補修が必要な内装材の損傷が始まるレベル 中破：補修が必要な外装材の損傷が始まるレベル 大破：外装材の全面補修が必要なレベル 倒壊：新築と同等の補修費用が発生するレベル				

一律の値を用いる。)

次に室内家財類の損傷を定義する。1995 年兵庫県南部地震の震災調査より、床震度と家財被害の関係は図 22 のようにまとめられて

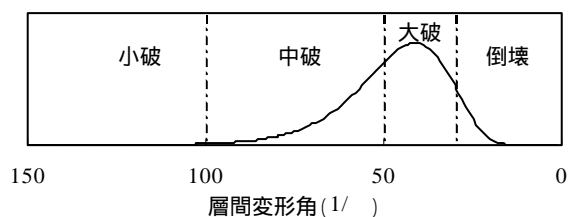
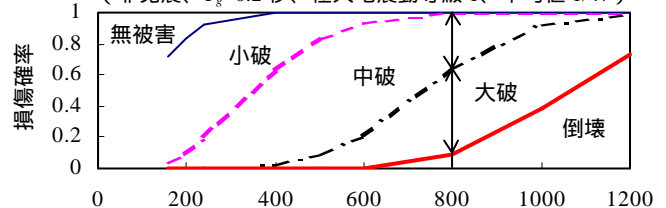


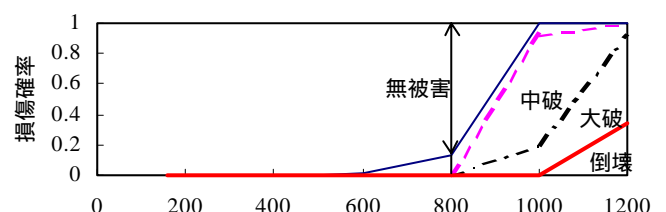
図 20 最大層間変形角の確率密度関数の例

(非免震、 $T_g=0.2$ 秒、極大地震動等級 1、平均値 1/47)



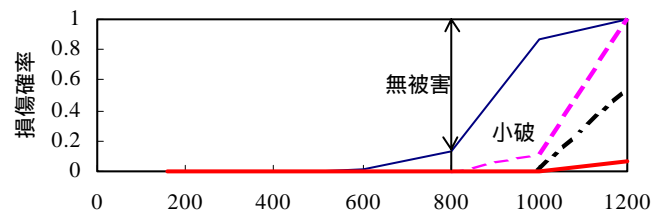
工学的基盤 $\max_b S_a$ (cm/s²)

(a) 非免震建物 1 階



工学的基盤 $\max_b S_a$ (cm/s²)

(b) 免震建物 1 階 (粘性系 $s=1.1 \cdot 10^{-3}$ 、剛性 b)



工学的基盤 $\max_b S_a$ (cm/s²)

(c) 免震建物 1 階 (粘性系 $s=1.3 \cdot 10^{-3}$ 、剛性 b)

図 21 損傷度曲線 ($T_g = 0.2$ 秒)

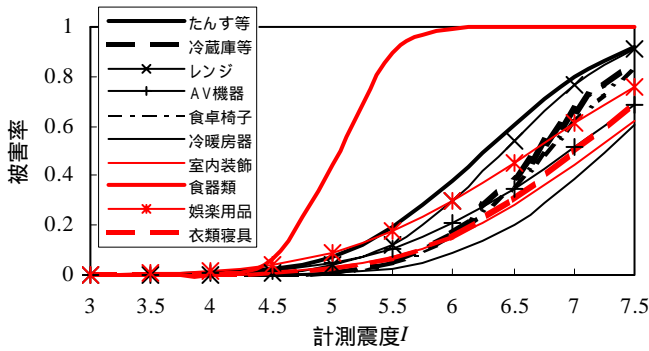


図 22 家財被害率曲線

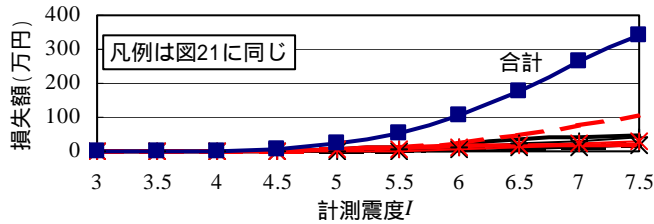


図 23 家財損失額曲線

いる¹⁰⁾。また、同文献では年収に応じた各家財の保有額も調査されており、年収 400～1000 万円家庭の家財総額は 455 万円、損失額曲線は図 23 のようになる。

図 23 中に示した家財被害の損失額合計は、ほぼ計測震度に比例していることから、各階の最大床震度平均値より損失額を算出する。尚、家財は 1, 2 階に均等配置されているものとし各階の損失額は図 23 の 1/2 とする。

地震動のレベル毎に、各階の建物損失額と家財損失額を加えて総損失額を求める。横軸を地震動レベルとして総損失額をプロットし線形補間したものを地震ロス関数とする。尚、総損失額は建物家財総額を越えないものとし、どちらかの階が倒壊モードに達したら、建物家財総額を計上するものとする。

図 24 は $T_g = 0.2$ 秒の地盤での免震+変位制限時 ($s=1.1 \cdot 1_0$ 及び $1.3 \cdot 1_0$ 、ストッパー剛性 b) と非免震時のロス関数を示している。縦軸は建物+家財の損失額を建物家財総額で割った損失率である。非免震時では極大地震動に相当する $\max_b S_a = 800 \text{ cm/s}^2$ を越えると損失率の勾配が大きくなり、免震時にはストッパーに当たると損失率が急増していく。

地震ロス関数に地震ハザード曲線を重み付け積分して¹⁵⁾年間の損失コストを算出する。

$$\text{年間損失コスト} = \int R(s) \cdot f_S(s) ds \quad (2)$$

$$f_S(s) = \frac{dF_S(s)}{ds} = \frac{d(1 - P(s))}{ds}$$

ここに $R(s)$: 地震ロス関数、 $f_S(s)$: $\max_b S_a$ の年最大値の地震確率密度関数、 $F_S(s)$: $\max_b S_a$ の年最大値の地震確率分布関数、 $P(s)$: $\max_b S_a$ の年超過確率関数=地震ハザード曲線である。積分区間は損失率 0 と見なす $\max_b S_a = 80 \text{ cm/s}^2$ より、年超過確率が低く年間損失コストに影響がなくなる $\max_b S_a = 3000 \text{ cm/s}^2$ までとする。尚、地震ロス関数の $\max_b S_a = 160 \text{ cm/s}^2$ 以下の区間は $\max_b S_a = 80 \text{ cm/s}^2$ 時を 0 として線形補間、 $\max_b S_a = 1200 \text{ cm/s}^2$ 以上の区間は $\max_b S_a = 1000 \text{ cm/s}^2$ から 1200 cm/s^2 の勾配のまま延長して用いることとする(但し

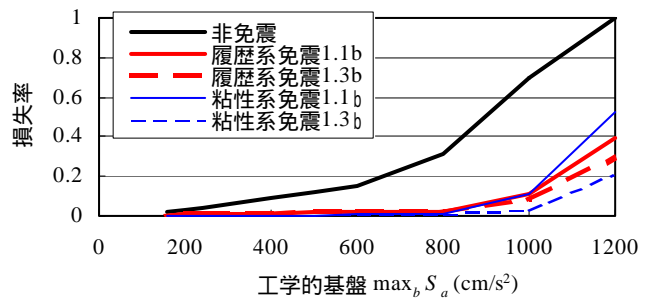


図 24 地震ロス関数 ($T_g = 0.2$ 秒)

損失率は 1 以下)。

供用期間 n 年での総期待コストは、初期建設費用に n 倍の年間損失コストを加えたものとして、図 25 のようにライフサイクルコストが求まる。グラフ縦軸は非免震建物初期建設費で規準化しており、免震の場合は履歴系、粘性系共に初期費用として 200 万円を免震費用として上乗せしている。変位制限設計は $s=1.1 \cdot 1_0$ 及び $1.3 \cdot 1_0$ 、ストッパー剛性 b としている。

また、上部建物を耐震等級に応じて補強した場合(初期費用 50 万円)の結果も破線で表示している。但しこの場合の免震変位制限モデルは 4 節での結果をもとに、 $s=1.1 \cdot 1_0$ 、ストッパー剛性 b としている。

さらに、耐震等級対応をダンパー付加により行う場合の結果も一点鎖線(減衰付加)で示している。初期費用には表 1 のダンパー付加分を+10%当り 20 万円を計上しているが、完全免震状態なので年毎のコストの増加はほとんどない。但し、この場合も耐風対策用としてストッパー費用は見こんでいる。

尚、ライフサイクルコストには経年変化に伴う設備、内外装の修繕費用などがカウントされるが、免震、非免震双方に共通して必要なことでありここでは除外している。また、免震装置の取替え費用も性能保証年数内として見込んでいない。

図 24 ではどの地盤種別でも免震の勾配は緩やかで、履歴系、粘性系及び上部補強の有無に関わらずほとんど差は無い。地盤種別により非免震時とのコスト交点となる供用年数が異なっているが、第 1 種地盤から第 2 種地盤では供用 10～30 年ほどで免震の効果が費用を上回る。耐震補強を施した場合でもダンパーを付加した場合でも、補強費用、ダンパー費用の影響で交点ポイントにほとんど変化がなく、第 1 種地盤と第 2 種地盤では免震のほうが有利と言える。これに対して第 3 種地盤では、非免震のコスト増大勾配が緩やかとなりコスト交点は供用 40 年を超えてから、さらに耐震補強を施した場合には供用 50 年でも交差していない。弾性地盤周期が 1 秒を越えるような軟弱地盤ではライフサイクルコスト評価において免震は不利のようである。

また、グラフからは適正免震化費用も見取る事ができる。免震化費用が設定の倍の 400 万円とすると、免震の切片が 1.17 となり免震の優位性が薄れる。逆に免震化費用が 100 万円となれば切片は 1.04 となり、軟弱地盤以外は数年～十数年で対費用効果が現れることになる。標準的な 2 階建て戸建て住宅の免震化費用としては建物価格の数%～10%が適正価格の目安となろう。

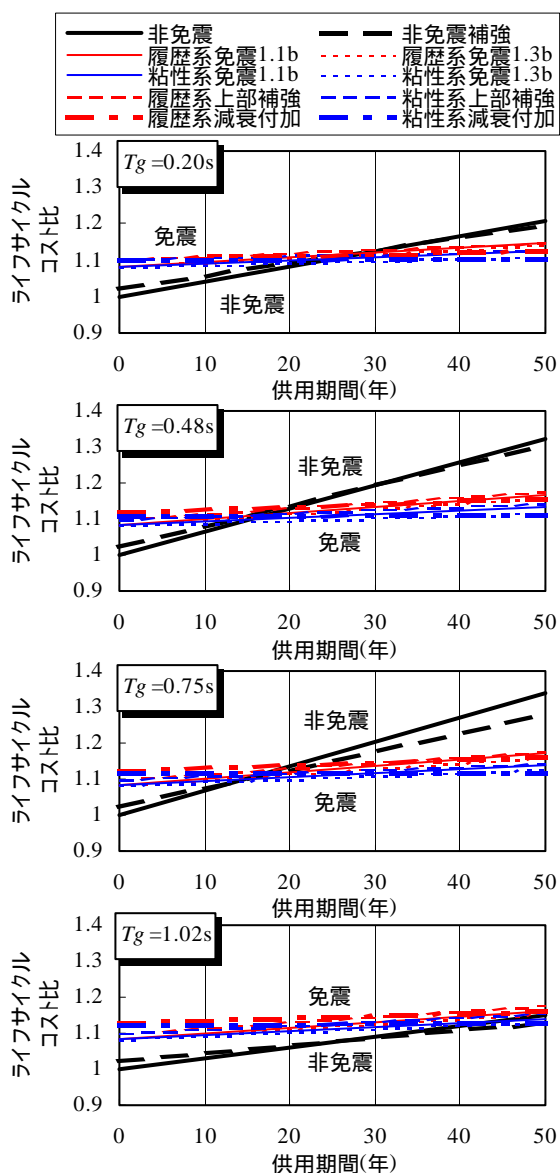


図 25 地盤周期別ライフサイクルコスト比較

6. まとめ

品確法性能表示基準に従って様々な地盤で耐震等級波を作成し、代表的な鉄骨 2 階建て免震構造の応答を求めた。又、敷地に余裕がない場合を想定し、ダンパー付加あるいはストッパーにより変位を制限した場合の応答を検討し、ライフサイクルコスト評価を加えることで、耐震等級に対応した戸建て免震住宅の設計上の知見として下記を得た。

- ・耐震等級に応じた地表面最大応答値については、加速度は等級倍率ほどは増大しないが、免震応答に影響する速度、変位は等級倍率で増幅され、耐震等級 3 で最大速度 100cm/s、最大変位 60cm 程に達する。

- ・免震層変位応答は耐震等級 3 で 40cm を超えるが、履歴系、粘性系の免震装置とも上部架構の変形角は 1/120 以内、応答床震度も家具什器の損傷の少ないレベルに収まる。

- ・粘性ダンパーを付加して免震層変位を 30cm に制限した場合、若干上部架構応答が大きくなる場合があるが、耐震等級 3 でも変形角は 1/120 以内と十分に免震状態と言える。

- ・ストッパーを用いて変位制限した場合、上部架構の応答は急激に増加し、耐震等級 3 では震度 6 強、層間変位も倒壊レベルに達する場合がある。

- ・ストッパー剛性が低く、ストッパー変形も大きい方が衝撃力は緩和されるが、ストッパーの変形を 5cm 程で止める設計ではストッパー剛性による上部損傷への差異はない。

- ・ストッパーの設計において、建築基準法で定められた（耐震等級 1）地震動による免震層応答変位の 1.1 倍よりストッパーを作動させる設定でも耐震等級 2 までは上部架構は倒壊レベルに達しない。

- ・耐震等級 3 ではストッパーを余裕を持って作動させる（耐震等級 1 応答の 1.3 倍程）か、上部架構を補強する、またはダンパー等を付加することが必要となる。

- ・変位を制限した場合、非免震時の上部架構の応答より免震時の応答のほうが大きくなる場合があるが、ストッパーに当たる可能性も考慮したライフサイクルコスト評価においては第 1 種及び第 2 種地盤では免震の優位性が確認できた。

- ・第 3 種地盤において十分に免震層変位が確保できない場合には、ダンパー付加及びストッパーによる免震層変位制限設計が必要であるが、ライフサイクルコストの観点からは非免震で対応する判断もありえる。

- ・対費用効果として免震化費用を見た場合、標準的な 2 階建て戸建て住宅では建物価格の数%～10%が適正価格の目安となる。

尚、個々の設計にあたっては、その地域の地震データによる地震ハザードを用いると共に、本検討の損失コストでは見こんでいない人的損失、精神的損失、家財等の特別な価値等を考慮してライフサイクル評価を行う必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築センター：ビルディングレター
- 2) 建築研究所，日本免震構造協会，建築研究振興協会：改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景，ぎょうせい，pp.77～81，2001.8
- 3) 花井勉，福和伸夫，皆川隆之：地盤周期に着目した戸建て免震住宅の簡易応答評価法，日本建築学会構造系論文集，No.555，pp.93～99，2002.5
- 4) 花井勉，皆川隆之，福和伸夫：戸建て免震住宅の耐震等級対応について その 1.耐震等級地震波による免震応答，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.529～530，2002.8
- 5) 皆川隆之，花井勉，福和伸夫：戸建て免震住宅の耐震等級対応について その 2.ストッパーによる変位制限設計，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.531～532，2002.8
- 6) 建設省建築研究所，日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針（案）本文解説編，pp.59～62，1992.4
- 7) 防災科学技術研究所：K-NET
- 8) 佐竹次男，北中将博：地質と場所打ち杭の設計，建築技術，1990
- 9) 吉田望：YUSAYUSA-2：1次元有効応力地震応答解析プログラム，佐藤工業（株）中央技術研究所，1995.10
- 10) 損害保険料率算定会：地震時の家財被害予測に関する研究，地震保険調査研究 46，pp.93～130，1998.10
- 11) 五條渉：限界耐力計算法の理解と活用，建築技術，p103，2001.4
- 12) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，p415，1993
- 13) 花井勉，小山雅人，馬場三千雄，三宅辰哉：低層鉄骨住宅の実大振動実験 その 4. 非構造部材の損傷状態，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.1025～1026，1998.9
- 14) 積算資料ポケット版：リフォーム・増改築編 2003-'04 年版，経済調査会，2003
- 15) P.トフークリステンセン，M.J.ペイカー著，室津義定監訳：構造物の信頼性 - 理論と応用，シュプリンガー・フェアラーク東京，pp.75～76，1986