

2011年東北地方太平洋沖地震における戸建免震住宅の免震層変形と 足柄平野の地盤震動特性との関係

RELATIONSHIP BETWEEN DEFORMATIONS OF THE SEISMIC-ISOLATED LAYER OF HOUSES AND GROUND VIBRATION PROPERTIES IN THE ASHIGARA VALLEY DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

高橋武宏*, 福和伸夫**

Takehiro TAKAHASHI and Nobuo FUKUWA

The authors have investigated the relationship between deformations of the seismic-isolated layer of houses and ground vibration properties in the Ashigara valley during the 2011 Tohoku earthquake. As a result, deformations of the seismic-isolated layer of houses are greatly affected by both the surrounding geography, and the structure of deep layers of the ground rather than the surface layers.

The authors have also verified how seismic-isolated houses resonate with long-period ground motion based on full scale shaking table tests, and indicated that ground vibration properties could be markedly different locally in the Ashigara valley.

Keywords: Seismic-isolated house, Deformation of the seismic-isolated layer, Long-period ground motion, Resonance, The Ashigara valley

戸建免震住宅, 免震層変形, 長周期地震動, 共振, 足柄平野

1. はじめに

我が国では過去にしばしば長周期地震動が社会問題となってきた。2003年十勝沖地震における苫小牧の石油タンク被害や2004年新潟県中越地震の際の、東京における高層建物内のエレベータ設備被害などは記憶に新しい。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(以後、3.11)では、震源から遠く離れた関東平野や大阪平野に建つ高層建物が、長時間に渡って地動の数倍~数十倍大きく揺れ続けた事例が数多く報告された。近年、高層建物の数が増えていることや、スマートフォン等の普及で多くの震災映像がインターネット上に流れるといった時代背景の違いを考慮しても、これほどまでに多くの高層建物が大きく長く揺れたのは初めてのことと思われる。

3.11は国内観測史上最大のマグニチュード(Mw)9.0の巨大地震で、最大30mの断層すべり量を伴い、海溝沿いに450kmに渡って破壊が進んだため、長周期成分を多く含む地震動が長時間放出された。

また、長周期地震動は遠方まで伝わるという特性に加え、大規模な堆積盆地では長周期地震動を増幅させ、揺れを盆地内に溜め込んで揺れの継続時間を長くするといったプロセスが重なる。この結果、固有周期が近接した減衰の小さい高層建物で共振が大きき育った。

一方、高層建物と同様に長周期建築構造物として分類される免震建物は、上部構造と基礎・地盤の間にアイソレータや減衰装置を挟み込むことで固有周期を伸ばし、通常地震動の卓越周期から隔離して共振を避けるように設計される。建物の耐震安全性向上に加え、

室内の家具・什器類の転倒飛散防止、設備配管等の機能維持が図れるため、建築数は急増している。

3.11では鉛ダンパのひび割れや鋼製ダンパの塗装剥がれ、エクspansionジョイントの破損等が見られたものの、長時間継続した長周期地震動に対して、全般的には高い免震効果が発揮された¹⁾。

しかし、地震観測記録に基づく詳細な調査報告は数少ない。これは国内の免震建物の7割以上が住居系の用途で、戸建免震住宅(以後、免震住宅)も含め地震観測が行いにくいと考えられる。

一般に、免震建物の減衰は高層建物より十倍程度大きいために、共振が育ちにくいという考え方もあるが、長周期地震動による免震建物の共振的な応答に関しては十分に実証されていない。

一方で、国内には免震層変形をアナログ的に記録する「罫書き」を設置した免震住宅が多数建築されている。震災後調査によって多くの住宅で免震効果が確認されたが、宮城県の仙台平野や神奈川県西部に位置する足柄平野では非常に大きな免震層変形が、局所的に生じたことが明らかになった^{2,3,4)}。

本論では震源から400km以上離れているにもかかわらず、免震層変形が大きかった足柄平野に建つ免震住宅について、罫書き記録から推測する免震層変形と住宅地の地盤震動特性との関係を、地盤調査や常時微動観測に基づき分析する。更に、地震観測記録を用いて時刻歴応答解析や実大免震住宅の振動台実験を行い、共振によって免震層変形が増大する条件を検証し、今後起こり得る長周期地震動に対してより安全性の高い免震住宅のあり方に関して考察する。

* 名古屋大学減災連携研究センター 研究員・工修

** 名古屋大学減災連携研究センター センター長・教授・工博

Researcher, Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., M. Eng.

Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

2. 調査対象とする戸建免震住宅

2.1 免震装置と力学的特性

日本免震構造協会の調査によると、2010 年末時点での我が国の免震建物総数は約 7100 棟、そのうち免震住宅は 4200 棟あり、棟数の上では約 6 割を占める。本論で対象としている免震住宅はすべり支承と小型の超低弾性積層ゴムを併用した免震システムを用いている。2011 年 3 月時点で日本全国に約 3800 棟建築され、国内の免震住宅総数の 8 割以上を占めている。

上部構造は 2 階建て在来軸組木造で、少数ではあるが平屋や 3 階建ても含まれる。水平抵抗要素は筋違いと厚さ 12mm の構造用合板を釘留めした耐力壁で、木製土台下に H-250*125 の鉄骨土台梁を配し、免震装置を介してベタ基礎に支持される。

図 1 に免震装置を示す。本免震システムではすべり支承が鉛直支持機能と減衰機能を、積層ゴムが弾性剛性機能と減衰機能の一部を担っている。積層ゴムは軸力を負担しないので座屈の考慮が不要であり、小型化と低弾性化によって軽量の住宅の長周期化が実現できている。また、減衰の大部分はすべり支承の摩擦力に依存しているため、非常に安価な免震システムとなっている。

稀に発生する季節風にはすべり支承の摩擦力で抵抗し、極稀な暴風時には滑動を許容している。ただし、すべり支承の可動範囲内に免震層変形を留めるため、リング状のストッパー装置(作動変形はおおよそ 33cm)を併設している。



図 1 免震装置

表 1 に免震システムを示す。すべり支承は低摩擦 ($\mu=4.5/100$) と高摩擦 ($\mu=6.5/100$) の 2 種類があり、積層ゴムも天然ゴム系と高減衰ゴム系の 2 種類がある。これらの組み合わせで 4 つの免震システムが存在する。浅部地盤の固有周期及び地盤増幅によって建物毎に最適な免震システムを選択する。同一建物内では 1 つの免震システムとし、異なる摩擦係数、異なる積層ゴム種は混用しない。

表 1 免震システム種別

免震システム	免震装置の組合せ
A	低摩擦すべり支承＋天然ゴム系積層ゴム
B	低摩擦すべり支承＋高減衰積層ゴム
C	高摩擦すべり支承＋天然ゴム系積層ゴム
D	高摩擦すべり支承＋高減衰積層ゴム

図 2 及び図 3 に現在計画中、建築中も含めた全 4021 棟の周期と減衰分布を、免震システム毎の内訳と共に示す。

上部架構の設計や免震層復元力特性は大臣認定の範囲内で規格化され、積層ゴムの弾性剛性と建物重量から求める接線周期 T_t は概ね 3 秒から 4 秒に分布している。高減衰積層ゴムの免震システムは、

天然ゴム系よりも周期が長い。すべり支承の摩擦力を含めた等価周期 T_e (免震層変形 20cm 時) は T_t の 70% 程度で、実質 2 秒から 3 秒である。一方、免震層復元力特性のエネルギー消費率から算出した平均的な等価減衰定数 h_{eq} は 30% 程度である。規格化されてはいるが、周期や減衰には免震システム毎、物件毎に幅があることが分かる。

図 4 に示す都道府県別棟数では、東海地方と首都圏が多く、静岡県、愛知県が全体の半数以上を占め、次に神奈川県、東京都、千葉県などが多く、島根県と沖縄県以外の 45 都道府県に建築されている。

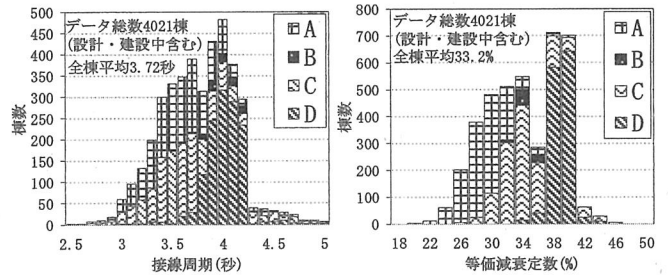


図 2 周期別棟数

図 3 減衰別棟数

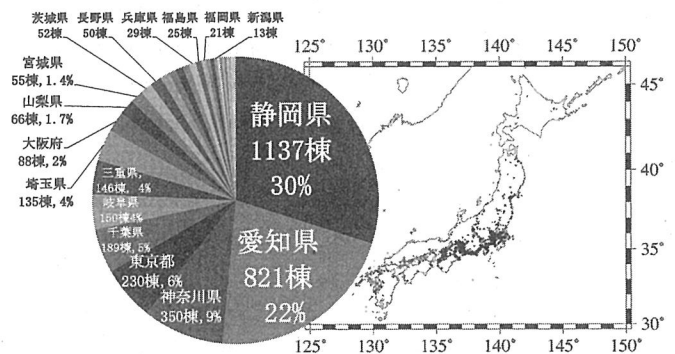


図 4 都道府県別免震住宅棟数

2.2 震災後調査と野書き記録

本論で対象としている免震住宅はすべり支承を用いており、免震層の初期剛性が高い。過去十余年間で 25 回以上の震災後調査では、概ね震度 5 弱以上ですべり支承が滑動することが確認されている。

3. 11 発生後、気象庁発表による震度 5 弱以上の市町村及びその周辺に建築されていた 854 棟に対して、電話による状況確認、現場での外観検査、CCD カメラを搭載した専用の点検ロボット (図 5) を用いた内観検査を行うと共に、ほぼ全棟に設置されている野書き記録の写真 (図 6 左) を取得して免震層変形の最大値を集計した。

調査対象建物の 4 割にあたる 363 棟で免震層が滑動した形跡が見られた。野書き記録は余震時にも作動するため、その軌跡には一連の地震によるものが複数混じっており、本震時の変形のみを正確に分離することや時刻歴の動きを読み取ることは困難ではあるが、最大変形とその方向は本震時のものと考えられる。

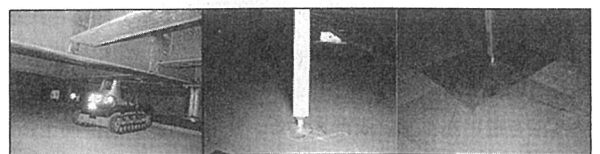


図 5 点検ロボット 図 6 野書き記録(左)と転写フィルム(右)

図7に震度5弱以上と震度4以下のエリアに建築されていた免震住宅棟数分布(縦軸左側・棒グラフ)と、免震層変形の最大値が10cm、20cm、30cm以上の棟数(縦軸右側・折れ線グラフ)を表す。

青森県から山梨県の広範囲で震度5弱以上の揺れを経験した建物がある。震源に最も近い宮城県には55棟建築されており、内50棟が震度5弱以上を経験した。10cm以上変形した建物は24棟、20cm以上9棟、30cm以上3棟であり、多くの建物が強い地震動を受けた。尚、宮城県より北の棟数は少なく、10cm以上変形した建物はない

また、宮城県より南で10cm以上変形した建物は茨城県に2棟、東京都に1棟ある。しかし、震源から約460km離れた神奈川県では15棟も存在する。神奈川県内の免震層変形を詳細に調べると、県東部の関東平野、中央部の相模平野及び周辺では10cm以上変形した建物は皆無で、15棟は全て県西部の足柄平野に集中している。そのうち4棟で30cm以上の変形が生じ、1棟を除いた3棟ですべり支承の設計許容変形を超えてリング状のストッパー装置が作動していた。

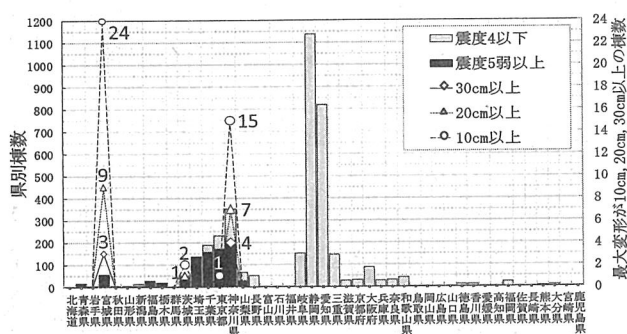


図7 都道府県別免震住宅の棟数と免震層変形

3. 足柄平野における免震層変形と地盤震動特性の関係

3.1 建築地の地形と野書き記録による免震層変形分布

足柄平野は酒匂川流域の下流部に位置し、東西約4.5km、南北約15kmのほぼ長方形をした扇状地性沖積平野である。フィリピン海プレートの沈み込み境界である相模トラフの延長域に位置し、トラフが丹沢山地からの碎屑物で埋められることで形成されたとされる。

関東平野や濃尾平野と比較すると狭小だが、3.11の発生時には平野内に76棟の免震住宅が建築されていた。おおよそ1km四方に1棟という高密度である。詳細な免震層変形の分析を行うために、震災直後の2011年3月から9月にかけて全ての免震住宅を訪問し、免震層の野書き記録を専用フィルム(図6右)に転写して回収した。

次ページ図8に全ての野書き記録を示すと共に、建物位置と免震層変形の最大値をグラデーション表示し、250mメッシュの微地形区分図上にプロットする。大きな転写フィルムを使用した野書き記録やフィルムを継ぎ足したものが存在するが、スケールは全て統一してある。また、建物配置と真北とが正確に一致していない野書き記録もあるが、紙面配置の関係上、方位補正はしていない。

図より、平野内で免震層変形に大きな違いが生じていることが分かる。平野中央部西側の火山性丘陵と扇状地の境界に変形が30cmを越えた建物(35,36,38,39)が集中している。このエリアの東側、南側では20cmを越えた建物(37,42)、10cmを越えた建物(50,34,31,47,9)がある。中央部西側では箱根火山による火山性丘陵が扇状地に入り組んでいて、高低差の大きい複雑な地形となっている。一方で北西

部のローム台地、南西部の火山地、北部、東部の扇状地や、南部の砂礫質台地上の建物では殆ど免震層変形は見られない。

免震層変形が極めて大きかった免震住宅35の西側近隣32の変形は5cm弱だが、両地点の微地形は明確に異なり、32はローム台地に位置している。この建物における震災直後の点検結果や施主のヒアリングからも、大きく変形した可能性は小さい。

最も大きな免震層変形は北北東若しくは北東から南南西若しくは南西方向に生じ、強い方向性が見られる。これは足柄平野から見た震源の方位角度に近く、その直交方向の変形は小さい。片側のみに大きく変形したものは少なく、多くは0点を中心に徐々に振幅を増しながら共振的な応答をしている。

3.2 戸建免震住宅の等価周期及び等価減衰定数と免震層変形

地形の違いによって免震層変形が大きく異なる傾向が見られた。しかし、先述のように個々の建物で免震層復元力特性が異なる。そこで、図9に示すように免震システム種別に等価周期 T_e 、等価減衰定数 h_{eq} を整理し、免震層変形との関係を検討した。

免震システム種別ではAが最も多く、全棟の6割以上を占めている。 h_{eq} が小さく、変形が大きい傾向が明確に見られる一方で、5cm未満の建物も多い。Cの h_{eq} はAより10%程度大きい。 $T_e=2.5$ 秒付近に免震層変形が大きい建物がある。高減衰積層ゴムを用いたB、Dは棟数が少ないため比較が難しいが、 T_e は2.5秒よりも長く、変形は小さい。以上より、 T_e や h_{eq} が同程度であっても免震層変形には差が見られ、建築地の地形による影響が大きいことが確認できる⁵⁾。

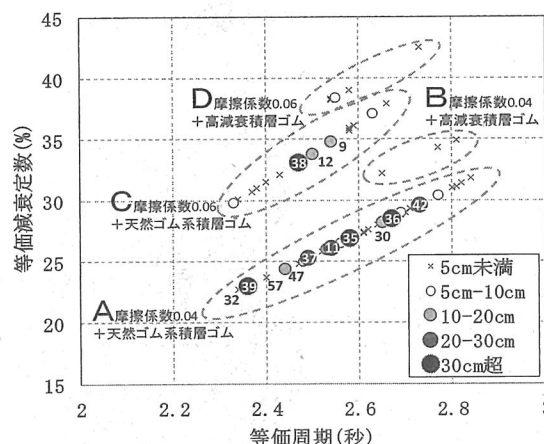


図9 免震システム別の等価周期と等価減衰定数

気象庁が発表した3.11における推計震度分布図では小田原市内、南足柄市内で震度4と震度5弱のエリアが混在し、免震住宅のすべり支承が滑動する境界的な地震動強さであったと考えられる。しかし、他県や神奈川県内の東部や中央部において震度5強以上の地域があったにもかかわらず大きな免震層変形が確認されなかったことは、震度の違いだけでは説明できず、周期特性を含む地盤震動特性が影響していると考えられる。

3.3 浅部地盤の固有周期と免震層変形

免震層変形の大きい4棟(35,36,38,39)と変形の小さい3棟(45,53,75)の合計7棟の敷地でボーリング調査及びPS検層を実施し、

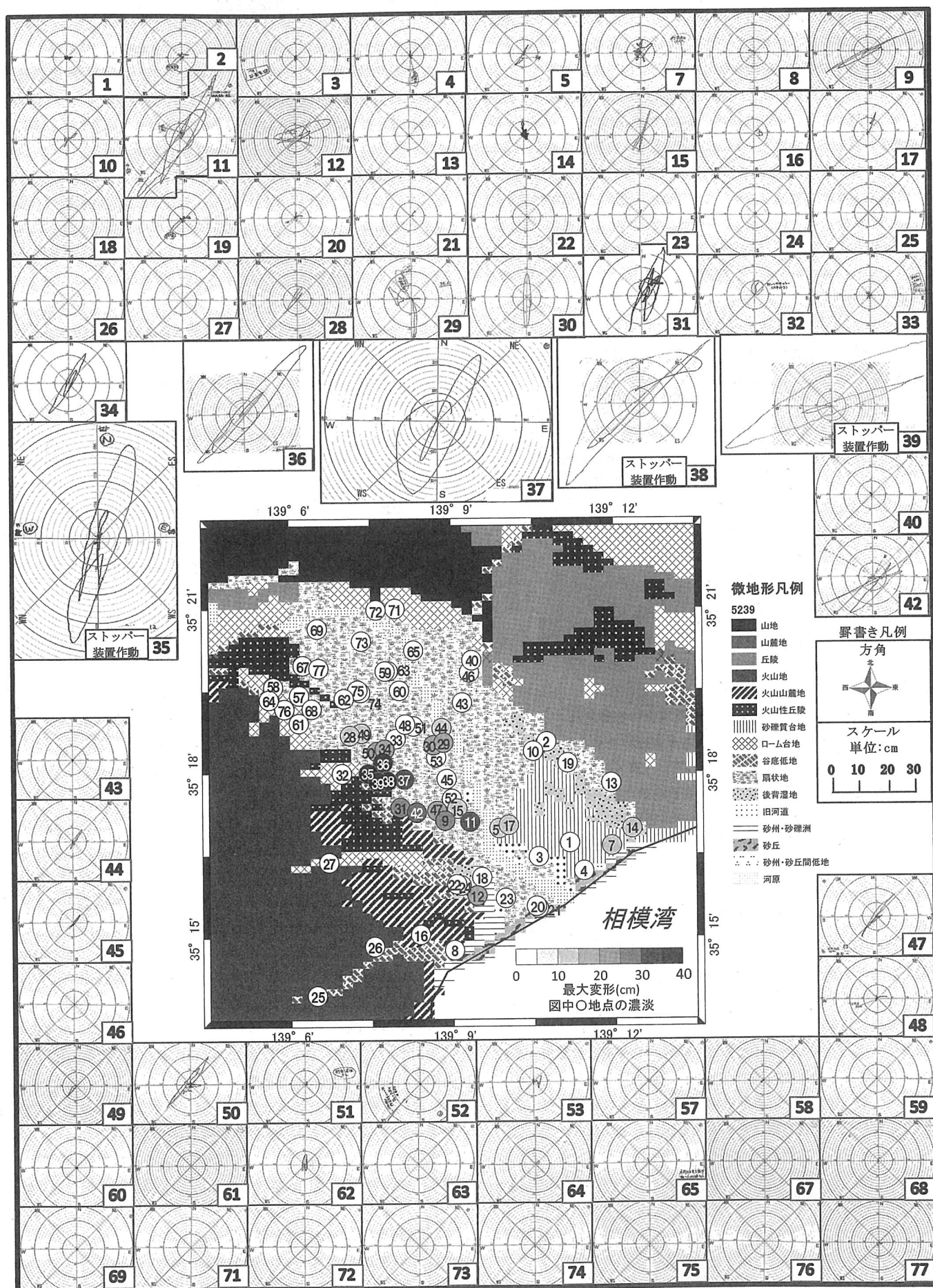


図8 免震住宅から回収した野書き一覧(統一スケール)

S波速度が350m/s程度に達する層を工学的基盤と考え、それより上部の平均S波速度から浅部地盤の固有周期を算出した。また、建築時に敷地内でボーリング調査を実施していた5棟(5,13,26,27,32)、敷地から50m範囲内のボーリングデータがある2棟(11,76)、敷地から200m範囲内のボーリングデータがある17棟については、N値と土質種別による換算式で平均S波速度を求めて固有周期を算出した。

図10に浅部地盤の固有周期と免震住宅の等価周期、免震層変形の関係を示す。免震層変形が30cmを超えた36,38は標高20m程度の扇状地上で、主な土質は礫混じりの玉石である。浅部地盤の固有周期は0.1秒から0.2秒で、建築基準法上の地盤種別では第Ⅰ種地盤に相当する良好な地盤である。35,39は標高30m~45mの火山性丘陵で、N値の低い褐灰の砂質ロームが多く含まれ、固有周期は0.5秒前後の第Ⅱ種地盤である。敷地内に噴砂や沈下などの形跡は見られず、液化化による影響は無いと考えられる。変形が5cm未満の45,53,75は扇状地で、砂礫を主な土質とした第Ⅰ種、Ⅱ種地盤である。

一方、固有周期が0.6秒を超える22,24は小田原市役所近隣の標高約10mの後背湿地、固有周期が0.75秒を超える第Ⅲ種地盤上の8,14は標高約10mの砂州と後背湿地に位置するが、変形は小さい。

以上より、3.11における免震層変形と1秒以下の浅部地盤の固有周期には良い相関は見られず、深部地盤構造に起因する地盤震動特性を検討する必要がある。

3.4 常時微動観測によるH/Vスペクトルと免震層変形

免震層変形と深部地盤からの固有周期との関係を検証するため、2011年9月20日~23日の4日間に66棟の敷地内で常時微動観測を実施した。特に免震層変形が大きかった建物は宅地内に加え近隣の空き地や路上で計測を行った。更にK-NETやSK-netの観測点でも計測し、合計76地点の微動データを得た。微動計は速度・5秒計であり、ローパスフィルタ20Hz、サンプリング周波数は100Hzで計測時間を30分とした。次ページの図11にH/Vスペクトルの一覧を示す。オリジナルのスペクトルと0.05Hzのパルゼンウィンドウによって平滑したものを重ねて描いている。また、図中の数字は建物番号を、アルファベットはその他の計測地点を示している。

地点によって様々なスペクトル形状がある。そこで、ピーク形状の特徴から全地点のH/Vスペクトルを大きく3種類に分類し、図11の標高図上に形状Aを◇、形状Bを○、形状Cを×で表す。

また、◇及び○についてはピーク周期を読み取り、記号内表示色の濃淡で表現した。図12に分類例を示す。

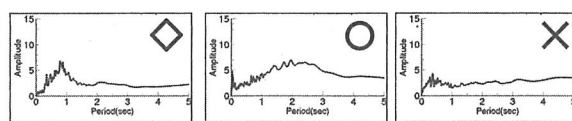


図12 H/V スペクトルの分類例

形状Aは1秒以下の短周期側に明瞭なピークを持つ。ピーク形状は鋭かつスペクトル比が大きいのが多く、平野内の広範囲で多く見られる。形状Bは2秒から3秒にかけて緩やかなピークを持つ。ピーク幅は広いがスペクトル比も大きく、平野中央部西側に局所的に分布している。形状Cは極短周期にヒゲのようなピークを持つが、1秒以下で若干増幅があるが、それより長周期側で明瞭なピークがない形状で、主に平野西側の山間部と北部に見られる。

H/V スペクトルのピーク周期(以後、ピーク周期)に着目すると、平野北部、南西部の山間部では、0.5秒以下、平野南東部は1秒付近となっている。これは足柄平野の沖積層厚が北部や西部では浅く、南部に行くほど深くなっていくことと対応する。一方、2秒から3秒の比較的長周期の地点は、平野中央部の西側に分布している⁶⁾。

一般的にH/Vスペクトル比はS波速度の変化が大きい層の影響を強く受けるとされ、以上の結果から中央部西側では局所的に深部に層境界が存在し、箱根火山地に向かって一部基盤が急激に深くなる箇所があるのではないかと想像される。

図13にピーク周期が判読可能な地点におけるピーク周期と免震住宅の等価周期、免震層変形の関係を示す。変形が30cmを超えた4棟(35,36,38,39)は全てピーク周期2秒付近に集まっている。また、ピーク周期と等価周期が近接した建物(37,50等)も変形が大きく、ピーク周期1秒以下では変形が10cm以下となる傾向が明確に見られる。

一方でピーク周期が0.5秒程度で20cm以上変形した11(扇状地)、逆にピーク周期が2秒付近にも関わらず5cm未満であった32,57(ローム台地)も存在するが、定性的にはピーク周期と等価周期、免震層変形に良い相関がある。

今回の常時微動観測結果では1秒から2秒のピーク周期を有する地点が殆ど存在しなかったことも足柄平野の特徴である。

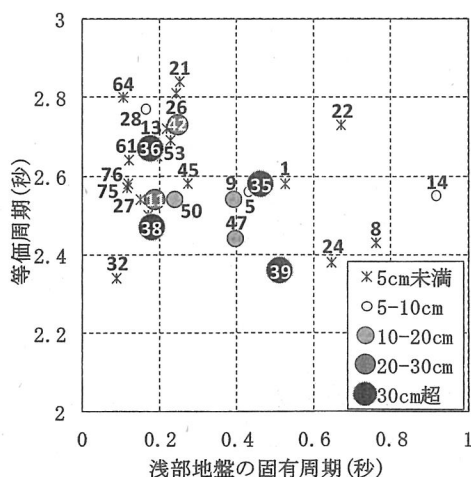


図10 浅部地盤の固有周期及び等価周期と免震層変形

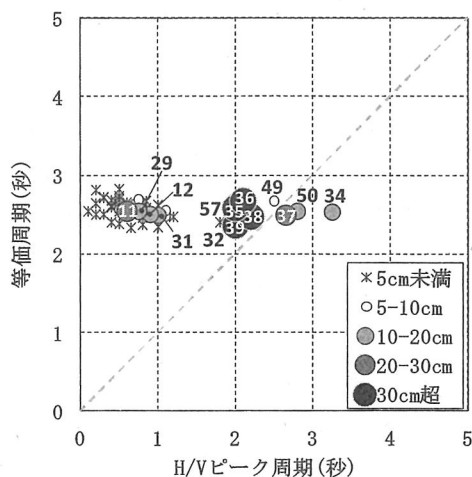


図13 H/V ピーク周期及び等価周期と免震層変形

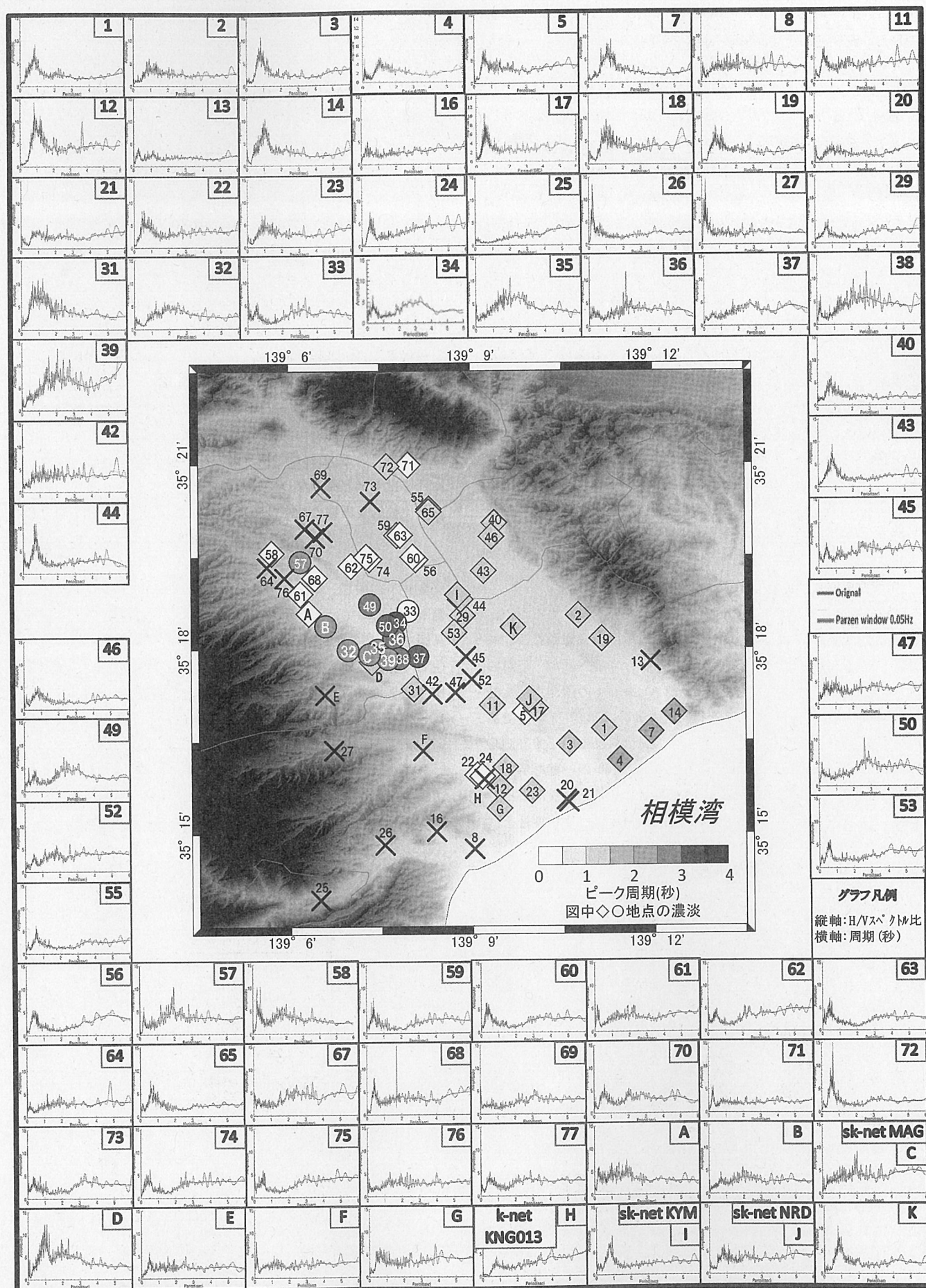


図 11 常時微動観測に基づく H/V スペクトル一覧

4. 地震観測記録による時刻歴応答解析

4.1 平野内の戸建免震住宅と付近の強震観測点

平野内には防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET 及び東京大学地震研究所の首都圏強震動総合ネットワーク SK-net の観測点がある⁷⁾。図 14、表 2 に免震住宅と強震観測点、最大値などを示す。

免震層変形が最も大きかった 35, 39 の近くには同一地形上に SK-net 観測点 MAG が存在する。他にも免震住宅の近くで同一地形と判断できる 5 つの観測点 KYM, NRD, CTS, SKW, KNG013 が存在する。44 と KYM の距離は 50m と近接しており、24 と KNG013 は 150m、17 と NRD は 350m 離れている。35 と MAG の距離は 250m であるが、傾斜地で標高差が 20m ある。

また、平野の東端 NGW、北端 KNG014、西山間部 SJJ にも観測点がある。これらに簡易的な地震計ではあるが、免震住宅の基礎上で計測した地震記録 TKH を加えて合計 10 か所の地震記録を分析する。



図 14 免震住宅と強震観測点の位置

表 2 最大値 (NS)

観測点	地形	PGA gal	PGV kine	PGD cm	卓越 周期 (秒)
NGW	丘陵	54	13	5	2.1
SJJ	火山地	29	11	3	3.0
KNG 014	扇状地	67	12	5	3.0
TKH	扇状地	97	33	13	2.8
SKW	砂丘	88	22	12	2.6
CTS	砂礫 質台地	88	22	11	2.5
KNG 013	後背 湿地	97	24	10	2.5
MAG	大山地 丘陵	122	34	13	2.8
KYM	扇状地	126	43	15	2.2
NRD	扇状地	210	82	31	2.5

4.2 平野内の地震観測記録

各観測点における波形と継続時間を比較するために、図 15 に 10 観測点における加速度時刻歴波形 (NS 方向) をペーストアップする。TKH 以外は GPS による時刻補正を施している。平野東端 NGW、西山間部 SJJ では最大加速度が 30~50gal と相対的に小さく、北端 KNG014、北部 TKH、南部 SKW、CTS、KNG013 では 70~100gal となり、平野中央部 KYM は 126gal、NRD では 200gal を超える大きな振幅である。35, 39 に近い平野中央部西側 MAG では 122gal で KYM とほぼ等しい。また、平野内の観測点では最大加速度をむかえた後も 1 分以上揺れが続いている⁸⁾。

地震動の強さと周期特性を比較するために、図 16 に各観測点における減衰 5% の疑似速度応答スペクトル μS_v (NS 方向) を重ねて示す。どの観測点でも周期 2 秒から 3 秒が卓越しているが、平野東端、北端や西山間部に対して平野内部では速度応答が数倍以上大きい。

これより、3.11 では平野内の広範囲で、等価周期 T_e に近接した周期で大きな速度応答を持つ地震動が長時間継続したことが分かる⁹⁾。

しかし、免震層変形が 30cm を超えたのは MAG 近辺の 35 や他の 3 棟だけで、周期 2.5 秒付近の速度応答が 300cm/秒を超える NRD 周辺の 5, 17、MAG と同程の地震動強さである KYM 近傍の 44 の変形は 5cm~10cm に留まり、観測点における最大加速度や疑似速度応答スペクトルの大きさと免震層変形との対応は良くない。

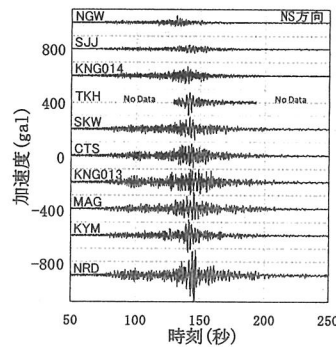


図 15 加速度時刻歴波形

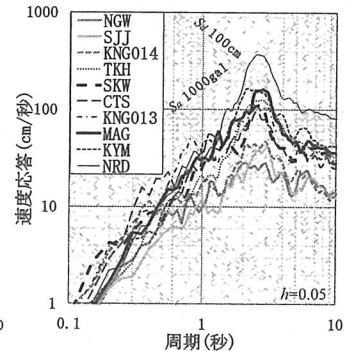


図 16 疑似速度応答スペクトル

4.3 時刻歴応答解析による免震層変形の検討

地震観測記録と免震層変形の対応を検討するために、免震住宅を 1 質点系でモデル化し、観測点の地震記録を用いて 1 方向の時刻歴応答解析 (以後、解析) を行う。

免震層の復元力特性について、すべり支承は摩擦力による完全剛塑性モデル (免震システム A の場合 $\mu=0.045$ 、免震システム C の場合 $\mu=0.065$)、両システム共に天然ゴム系積層ゴムによるバイリニア型弾塑性モデル (切片荷重 $Q=0.593\text{kN}$ 、弾性剛性 $k_r=0.385\text{kN/cm}$) とする。

平野各エリアで観測点に最も近い建物について、図 17 に方位補正した罫書き記録と解析結果との比較を示す。解析結果は南北方向、東西方向各々の免震層変形を、縦軸と横軸にプロットしている。

35 (MAG) は全体的な形状と変形方向とは一致しているが、解析による変形は罫書き記録の 60% 程度しかない。44 (KYM) は変形の方法は再現されているが、解析による変形は 3 倍以上大きい。

17 (NRD) では方向、変形共に全く対応していない。罫書き記録では 8cm 程度だが、解析では 60cm 近く変形する。この建物における免震装置の点検結果や施主のヒアリングから、大きく変形した様子は無

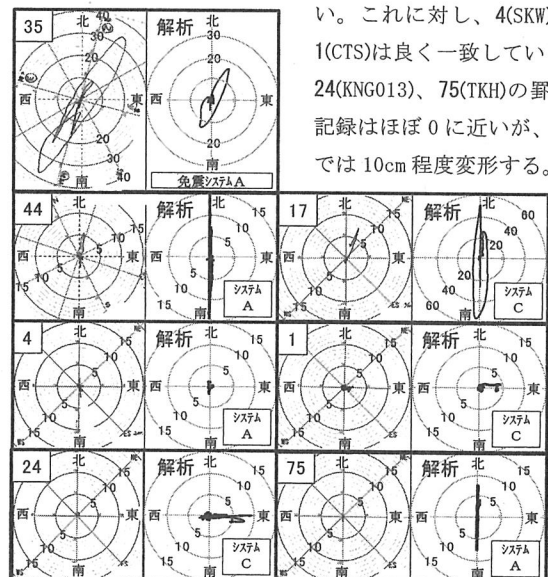


図 17 罫書き記録と解析結果の比較 (単位: cm)

摩擦力を伴う本免震システムの解析は、過去複数回実施した実大振動台実験結果とよく整合すること¹⁰⁾を鑑みると、35 (MAG) や 44 (KYM)、17 (NRD) における罫書き記録と解析の著しい差異は、建物

設計重量と未知数である実際の重量の違いによることも考えられる。

そこで、建物重量を設計値の1/2倍から2倍まで段階的に幅を持たせて検討したが、野書き記録との差は依然として大きかった。現実的に倍半分を超える建物重量の増減は考えにくいいため、長期設置した免震装置の特性変化、若しくは建築地と観測点における地震動増幅の違いによる影響が大きいと考えられる。

しかし、75(TKH)は建物の基礎上の地震観測記録であるため、免震装置特性や解析モデルに起因していると考えざるを得ない。

過去の実大振動台実験では主に短周期が卓越する強震動に対する検証を行っているが、すべり支承が滑動し始める境界加速度付近の挙動については十分に検証されていない。したがって、入力加速度が比較的小さい地点の免震層変形を精度よく推定するためには、すべり支承の静止摩擦力やスティックスリップといった摩擦のメカニズムについて考慮する必要がある、このことは今後の課題としたい。

5. 足柄平野中央部西側の戸建免震住宅

5.1 免震装置の特性確認試験

本章では免震層変形が最も大きかった35について詳細検討する。免震住宅に設置されていた免震装置特性が、大臣認定で規定されている設計値と整合しているかを確認するために、全15基のすべり支承と全4基の積層ゴムを回収し、すべり支承は速度依存性を考慮した摺動摩擦試験、積層ゴムは破断までの静的せん断試験を実施した。35は免震システムA、竣工後約10年の建物で、3.11以前の地震ですべり支承が滑動した記録はない。

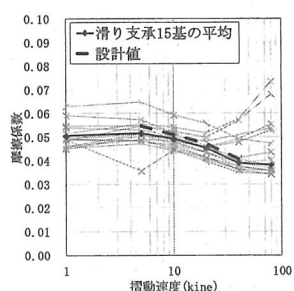


図18 速度と摩擦係数

図18にすべり支承の試験結果を示す。回収時に摺動面に生じた傷が試験によって拡大したものが5基あり、平均からは除外している。摺動速度が速くなると平均的な摩擦係数は0.05から0.04まで緩やかに下がる傾向が見られるが、設計値とほぼ一致している。

また、積層ゴム4基全てのせん断試験における弾性剛性も設計値と対応しており、水平30cm(300%変形)の範囲ではハードニングの影響は少なく、パイリニア型で扱えることを確認した(図20)。

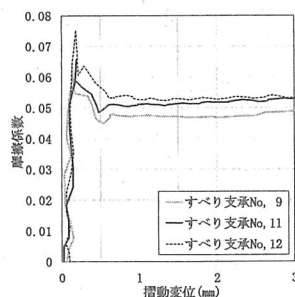


図19 すべり支承の静止摩擦係数

更に、1kine(cm/秒)の低速度で滑動する瞬間の摩擦係数を確認したところ、動摩擦係数に対して30%~50%程度高い静止摩擦係数が明確に存在した。図19に静止摩擦係数の測定結果例として、3基のすべり支承について示す。

図20に積層ゴムのせん断試験結果を示す。回収時に摺動面に生じた傷が試験によって拡大したものが5基あり、平均からは除外している。せん断速度が速くなると平均的な摩擦係数は0.05から0.04まで緩やかに下がる傾向が見られるが、設計値とほぼ一致している。

また、積層ゴム4基全てのせん断試験における弾性剛性も設計値と対応しており、水平30cm(300%変形)の範囲ではハードニングの影響は少なく、パイリニア型で扱えることを確認した(図20)。

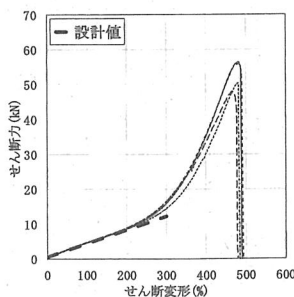


図20 積層ゴムのせん断試験

以上より、免震住宅35に設置したすべり支承及び積層ゴムは地震時において設計値に近い特性を発揮したと考えられ、すべり支承の静止摩擦力を除けば解析モデルと大きな相違はない。従って、35の建築地ではMAG観測点より強い地震動を受けたと推測される。

5.2 実大振動台実験による免震層変形と共振条件

2011年7月に兵庫県三木市にある防災科学技術研究所Eディフェンスの大型振動台を利用して、35と同構造で免震システムAを有する実大免震住宅の振動台実験を実施した。建物規模は建築面積72.87㎡、延床面積130.42㎡の総2階、躯体及び積載荷重を含めた総重量は490.9kNである。

図21に実験対象住宅の概要及び免震装置の構成を示す。

すべり支承17基(摩擦係数 $\mu=0.045$)、天然ゴム系積層ゴム(弾性剛性 $k_r=0.385\text{kN/cm}$)4基、リング状のストッパー装置(作動変形はおおよそ33cm)を10基設置している。

建物総重量と積層ゴム4基の k_r から求められる免震層の接線周期 T_l は3.58秒で、35の T_l である3.40秒より0.18秒長いが、すべり支承の摩擦力を考慮した等価周期 T_e は共に2.70秒と同じである。

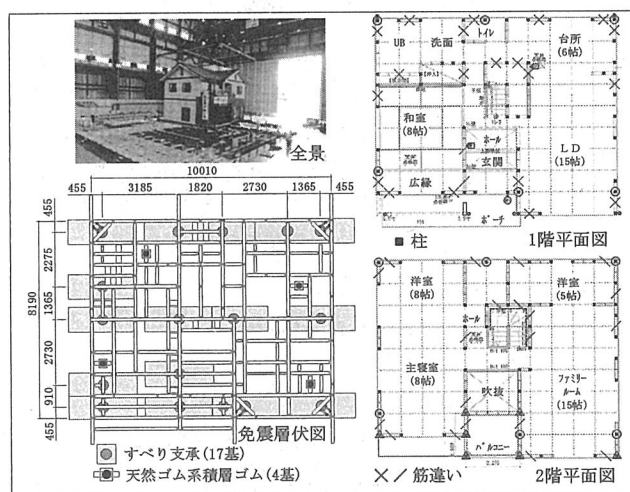


図21 実験対象住宅概要

実験対象住宅にMAGの観測波を用いて3軸原波加振をした。観測波の水平速度軌跡から振動の主軸方向を算出し、主軸が振動台のEW方向に加振されるように加速度データを回転させている。

加振結果を図22に示す。実験対象住宅の免震層変形は最大23cm

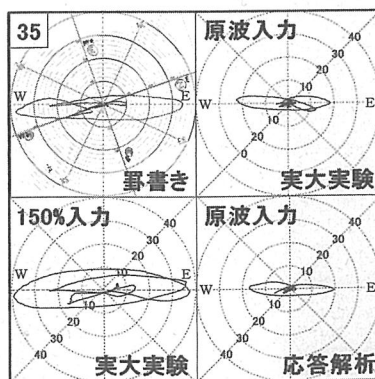


図22 野書き、実大実験、解析比較

となり、履歴形状は解析結果とほぼ一致した。しかし、この結果は野書き記録よりも小さい。これより、建築地ではMAG以上の地震動が生じたことが強く推察される。

そこでおおよその地震動強さを検討するために原波加速度(NS, EW, UD)を一律150%に拡幅して、同様の加振を行った。

その結果、免震層変形は30cmを超えてストッパー装置が作動し、履歴形状は罫書き記録と対応する結果を得た。観測波の加速度を3方向一律150%に上げることには根拠はないが、約50tonの免震住宅を30cm以上変形させるのに必要な地震動強さを定性的に把握できる。

図23に原波加振時の振動台EW方向入力加速度及び2階床中央の応答加速度を、図24に免震層変形を示す。入力加速度が50gal以下では免震層は滑動せず、100galを少し下回るレベルで滑動し始め、146秒付近で急激に免震層変形が増大している。2階床中央の最大応答加速度は最大入力加速度より小さく、免震性能を発揮している。

図25に振動台変位(地動変位)と免震層変形を重ねた拡大グラフを示す。主要動部分の地動変位は T_e と近接した周期約3秒の正弦波に近い様子を呈し、136秒から148秒にかけて4波繰り返している。最初の3波に対する免震層変形は小さく、4波目の地動変位が10cmから15cmに増加し、同時に周期が3秒から若干短く変化した1波によって急激に免震層変形が増大している。

図26に150%加振時の振動台EW方向入力加速度及び2階床中央の応答加速度を、図27に免震層変形を示す。地動変位の位相は原波入力と変わらないが、136秒から徐々に免震層変形が増し、10秒後の146秒付近で一気に35cmまで変形してストッパー装置が作動した。その後、更に2回ストッパー装置が作動して40cmに近い変形となっている。共振時においてもストッパー作動前は免震性能が発揮されているが、作動時には衝撃音と共に2階床中央の最大応答加速度は最大入力加速度を大きく上回る結果となった。

図28にEW方向地動変位と免震層変形の拡大グラフを示す。原波入力とは状況が大きく異なり、1波目から免震層変形が増大し、地動に引きずられるような90°の位相遅れが明確に見られる。そして4波目の地動変位が20cmに達して次に反対方向へ25cm変位する過程で急激に免震層変形が増大し、共振が大きく育つ状況が分かる。

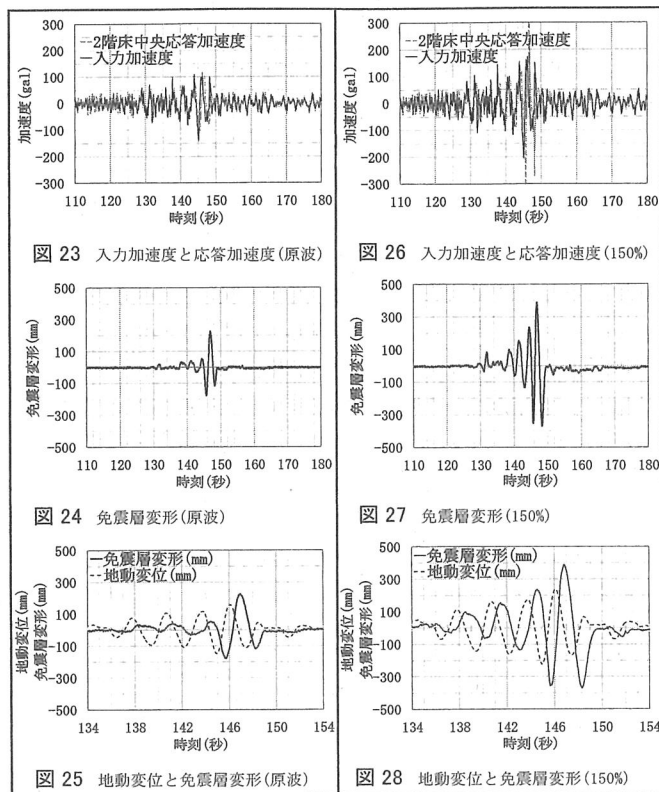
減衰定数 h 、静止状態の1自由度系に、固有周期と同じ円振動数 ω の単位正弦波地動を作用させた場合、共振時の定常振幅(本論における免震層変形)は地動変位の $1/2h$ 倍となり、減衰が小さいほど免震層変形は増幅する。 $h=0.25$ の実験対象住宅の場合には地動変位の2倍となる。原波加振の場合、最大地動変位15cmに対して免震層変形は23cmで、理論上の定常振幅30cmの80%に相当する。一方150%加振の場合は、最大地動変位25cmに対して免震層変形はストッパー装置に拘束された状態で約40cm、定常振幅50cmの80%に達しており、もしストッパー装置を設置していないとすると、ほぼ定常振幅に達して積層ゴムが破断する程の共振に育っていたと推測される。

また、共振が定常振幅の β 倍に育つまでに必要な波数や時間には、

$$n = -\frac{\ln(1-\beta)}{2\pi h}, \quad t = nT \quad (n: \text{波数}, t: \text{時間}, T: \text{周期})$$

の関係があり、減衰が大きいく程、少ない波数と短い時間で共振が育つ¹¹⁾。実験対象住宅の場合は、 $h=0.25$ 、実験における最大変形の状態を原波加振では $\beta=0.8$ 、150%加振では $\beta=1.0$ と仮定して上式に代入すると、原波加振では共振が育つには1波で約3秒、150%加振では4.4波で約12秒が必要となり、実験結果と調和的である。

このことから、減衰が25%程度の免震システムでは、地震動の加速度がすべり支承が滑動する境界加速度(実験では100gal弱と推定される)を上回り、 T_e に近接した揺れが継続した場合、地動変位が10cm程度あれば数波で十分に大きな免震層変形となる。



5.3 様々な地震観測記録と地盤震動特性

3.11以前以後に発生した地震によるMAGの揺れを比較するために、観測点に対して様々な方位で発生した主な13の地震観測記録について分析する(表3)。図29に観測点と、震央、地震規模を示す。

表3 地震観測記録一覧

番号	発生年	月日	時刻	地震名	Mj	深さ(km)	震央距離(km)	方位角(度)	最大震度	小田原(久野)震度	PGA(gal)	PGD(cm)	卓越周期(秒)
①	2004	9月5日	23:57	紀伊半島南東沖地震	7.4	44	304	8.2	5弱	1	7.7	1.1	6.1/2.4
②	2004	10月23日	18:34	新潟県中越地震余震	6.5	14	223	3.6	6強	2	12.5	0.7	1.6
③	2007	7月16日	10:13	新潟県中越沖地震	6.8	17	255	3.8	6強	2	15.8	1.0	2
④	2007	10月1日	02:21	神奈川県西部地震	4.9	14	8.1	59.9	5強	5弱	51.2	0.4	1.2
⑤	2009	8月11日	05:07	駿河湾の地震	6.5	23	80.5	15.9	6弱	4	31.7	0.6	1.2
⑥	2009	12月18日	08:45	伊豆半島東方沖地震	5.1	5	37.5	7.6	5弱	2	7.8	0.1	1.4
⑦	2011	3月11日	14:46	東北地方太平洋沖地震	9.0	24	457	3.0	7	4	121.6	12.6	2.6
⑧	2011	3月11日	15:15	茨城県沖地震	7.6	43	213	11.4	6弱	3	39.3	5.1	1.4
⑨	2011	3月15日	22:31	静岡県東部地震	6.4	14	37.4	20.5	6強	4	62.4	1.6	1.4
⑩	2011	4月7日	23:32	宮城県沖地震	7.2	66	408	9.2	6強	2	11.2	0.5	1.4
⑪	2012	1月28日	07:43	山梨県東部・富士五湖地震	5.4	18	25	35.8	5弱	3	36.8	0.5	1.1
⑫	2012	7月3日	11:31	千葉県南部地震	5.2	88	75.8	49.3	4	3	17.6	0.1	1.2
⑬	2012	12月7日	17:18	三陸沖地震	7.3	49	527	5.3	5弱	2	15.5	0.7	1.4

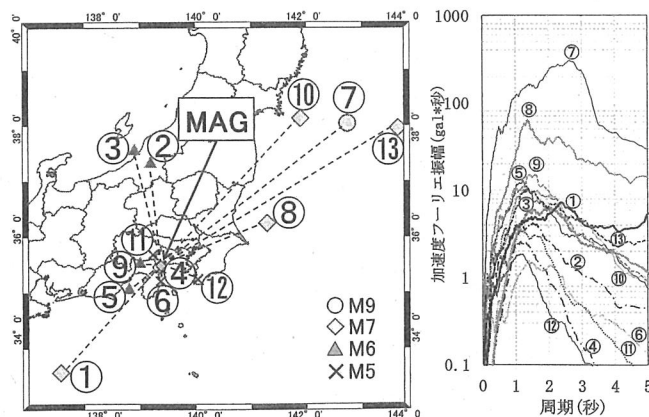


図29 観測点と震央位置

図30 加速度フーリエスペクトル

地震動の周期特性を検討するために、図 30 に水平方向の加速度フーリエスペクトルを重ねて示す。図は NS 方向と EW 方向のスペクトルを二乗平均して表示している。

⑦(3.11)の卓越周期は T_e に最も近接し、その振幅は群を抜いて大きく、免震住宅にとって非常に厳しい地震動であったことが分かる。その他は概ね 1 秒から 1.5 秒が卓越している。また、①及び③は 2 秒が卓越しているが T_e より若干短く、地動加速度、変位共に非常に小さいため、付近の免震住宅では共振はおろか免震層変形も生じていない。また、この程度の振幅の長周期地震動であれば免震装置が作動しなくても十分に室内の安全性が確保できる。

図 31 に地震規模及び震源の俯角(観測点と震源を結んだ直線と地平線がなす角)と地震動の卓越周期との関係を示す。全ての地震を点震源と考えた場合には、地震規模が大きくなり俯角が小さい程、卓越周期が長くなる傾向が見て取れる。例えば②、③は震源が浅く震央が遠いため俯角が小さくなり、表面波の影響が大きいと考えられ、比較的長い周期が卓越している。一方、震源が浅くても規模が小さく震央に近い④、⑪などは、俯角大きく卓越周期は短い。しかし、①は他と傾向が異なり卓越周期が長い。これは南海トラフ沿いに存在する厚い堆積物(付加体)の影響ではないかと推察される。これらの傾向は、切迫性が指摘されている南海トラフ巨大地震¹²⁾にも当てはまり、長周期地震動を受けることが容易に推測できる。

図 32 に各地震観測記録の全範囲で算出した地震動の H/V スペクトルを示す。水平方向は NS、EW 方向の二乗平均としている。地震規模や震源特性が異なり、様々な伝播経路を通して到達した 13 の地震動だが、H/V スペクトル形状は地震によらず安定し、平均化したスペクトルでは周期 2 秒から 2.5 秒にかけて明瞭なピークがある。

これは常時微動観測に基づいた H/V スペクトルのピーク周期と対応しており、足柄平野中央部西側では地震時においても、免震住宅の等価周期 T_e に近接する周期帯を増幅しやすい地盤震動特性を有していると推察され、適確な長周期地震動対策が必要である。

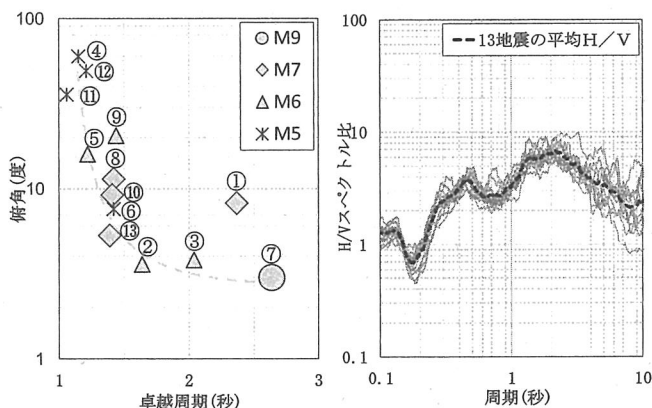


図 31 地震規模、俯角と卓越周期

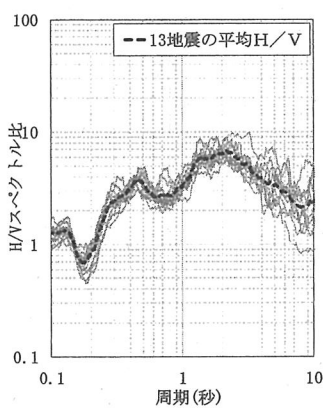


図 32 地震動の H/V スペクトル

6. まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震における戸建免震住宅の免震層変形と足柄平野の地盤震動特性との関係について検討した。その結果、浅部地盤の固有周期と免震層変形に良い相関は見られず、常時微動観測から推測される深部地盤の 1 次固有周期と良い相関があった。

また、野書き記録と応答解析による免震層変形を比較したところ

両者の乖離が大きいため、平野内の地震観測記録を用いて実大免震建物の振動台実験を実施した。その結果、解析と実験の対応は良いことや、観測点から約 250m の距離に位置する住宅地では、観測点の 1.5 倍ほどの強い揺れを受けた可能性があることを確認した。

住宅は平坦な地盤だけでなく傾斜地や地形が入組んだ場所に建築されることが多い。今後免震住宅を計画する際には足柄平野の事例を考慮し、周辺地形から深部の基盤深さが急変することが推察される場合には注意が必要である。また、敷地内で常時微動観測を実施するなど、深部地盤構造に起因する地盤震動特性を可能な限り検討することが重要と思われる。更に、気象庁が情報提供を始めた周期別の長周期地震動階級情報などを活用し、免震住宅の周期帯が増幅しやすい地域を注意深く観察することも有効であろう。

一方、万が一地盤震動特性と免震周期が近接した場合、本論で対象とした免震住宅は地動変位 10cm 程度で加速度が大凡 100gal を上回る地震動であれば、数波で共振が育つことが検証された。来るべき M9 クラスの長周期地震動に対して免震層変形の増大を抑制するためには、減衰を大きくすることが有効な手段の 1 つと考えられるが、より発生頻度が高い地震動に対して免震性能を低下させないように配慮することも重要であり、これらを両立可能な付加減衰装置の技術開発と既存免震住宅への早期適用が急務であると考えている。

謝辞

免震住宅にお住まいの方々には、野書き記録の回収や常時微動観測において多大なるご協力頂きましたこと、心から感謝申し上げます。また本論文では足柄平野内の K-NET 及び SK-net で観測された貴重な地震観測記録を使用させて頂きました。観測網の維持管理における関係者皆様の多大なるご尽力に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本免震構造協会、応答制御建築物調査委員会：東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査報告会、2012.1
- 2) 平野茂、飯場正紀、高橋武宏、松本和行、三宅辰哉、坂本功：2011 年東北地方太平洋沖地震における戸建免震住宅の地震時挙動、その 1 東日本地域における免震住宅の地震時挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II, pp. 511-512, 2012.9
- 3) 田中佑治、高橋武宏、福和伸夫、飛田潤、護雅史：2011 年東北地方太平洋沖地震において足柄平野に建つ免震住宅で観測された応答変位と H/V スペクトルの関係、日本建築学会東海支部研究報告集、第 50 号、pp. 341-344, 2012.2
- 4) 東田豊彦：2011 年東北地方太平洋沖地震を受けた免震住宅の調査報告、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II, pp. 509-510, 2012.9
- 5) 先名重樹、翠川三郎：地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定、日本地震工学会論文集、第 9 巻、第 4 号、2009.8
- 6) 山本俊哉、荏本孝久、松澤共良：高密度常時微動による足柄平野南部の表層地盤振動特性の検討、その 1-2、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp. 689-692, 2004.8
- 7) 工藤一嘉、坂上実、南忠夫、嶋悦三：足柄平野における強震観測網、新システムの導入、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I, pp. 753-754, 1989.10
- 8) 植竹富一、工藤一嘉：足柄平野南部の地下構造モデルと後続波の特徴、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp. 117-118, 1998.9
- 9) 山中浩明、津野靖士、翠川三郎、三浦弘之、三宅弘恵、嶺崎一、酒井真一、平田直：関東平野で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の地震特性、その 2 品川〜川崎周辺の東京湾沿岸部と足柄平野で観測された強震動、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II, pp. 77-78, 2012.9
- 10) 平野茂、三宅辰哉、深堀美英、花井勉、坂本功：実大震動実験に基づく木造免震住宅の地震応答評価手法に関する研究、その 1 実験結果ならびに 1 質点振動モデルを用いた解析的考察、日本建築学会構造系論文集、第 529 号、pp. 65-72, 2000.3
- 11) 福和伸夫：長周期・長時間地震動の生成と長周期建築構造物の応答、JSSC 一般社団法人日本鋼構造協会誌、2012.10
- 12) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：第二次報告 強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—、2012.8

(2013 年 7 月 9 日原稿受理、2013 年 8 月 27 日採用決定)