

2011年東北地方太平洋沖地震における宮城県内に建設された 戸建免震住宅の免震層変形と地盤震動特性との関係

RELATIONSHIP BETWEEN DEFORMATIONS OF THE SEISMIC-ISOLATION LAYER OF HOUSES AND GROUND VIBRATION PROPERTIES IN MIYAGI PREFECTURE DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

高橋 武宏*, 福和 伸夫**

Takehiro TAKAHASHI and Nobuo FUKUWA

To enhance the safety of seismic-isolated houses, the authors have investigated the cause of large deformations of the seismic-isolation layer of houses during the 2011 Tohoku earthquake. Our findings show that unlike resonant responses in the Ashigara valley, pulse responses were seen in many seismic-isolated houses in Miyagi prefecture. The authors have verified that the maximum deformations of the seismic-isolation layer have a very high co-relational relationship with the peak ground velocity of pulse ground motion and amplification characteristics of the surface ground rather than the deep layers of the ground.

Keywords : *Seismic-isolated house, Deformation of the seismic-isolation layer, Pulse ground motion, Miyagi prefecture*

戸建免震住宅, 免震層変形, パルス性地震動, 宮城県

1. はじめに

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、宮城県栗原市で震度7を記録したのをはじめ、東北地方から関東に至る広範囲で震度6強～6弱の揺れに見舞われた。本論文で対象とする宮城県では大規模建築物の天井落下や、設備機器の損傷など、建物機能が損なわれる事例が数多く見られたが¹⁾、石巻市に建設された日赤病院では、免震構造が病院機能維持に大きく貢献した²⁾。また、大崎市に建設された免震構造宿泊施設も、鉛ダンパに繰り返し変形に起因すると考えられる亀裂が見られたものの、宿泊者の安全を確保した³⁾。宮城県内に数多く建設された木造戸建免震住宅(以後、免震住宅)でも、応答加速度の低減効果によって居住者に大きな安心感を与えた⁴⁾。

免震性能は、地動卓越周期からの振動周期の隔離と免震層の水平変形に伴う地震エネルギーの吸収によって発揮されるが、免震層のクリアランスには限りがあり、過大な免震層変形は擁壁との衝突等をもたらす。特に敷地が狭小な住宅では十分なクリアランスを確保することが困難なため、免震層変形が設計上クリティカルとなることが多い。3.11では登米市で免震層変形が40cmを超える防災施設があったが、クリアランス以下であったために擁壁との衝突には至らなかった⁵⁾。一方、免震住宅では大崎市古川及び仙台市若林区の3棟で局地的に大きな免震層変形が生じ、地震時設計限界変形(30～33cm)を超え、ストッパー装置が作動した⁶⁾。

免震層に大変形が生じる原因を明らかにすることは、免震住宅

の安全性維持の上で極めて重要である。そこで本論文ではローカルな地盤震動特性が免震層変形に与える影響について分析を加える。

宮城県では国や県、大学研究機関により高密度強震観測網⁷⁾が整備され、3.11でも地盤震動特性の分析が数多くなされている⁸⁾など。また、地震動と建築物被害の関係分析や⁹⁾、個別の免震建物に関する詳細な報告¹⁰⁾もあり、宮城県内の免震建物の応答や被害の概要が把握されている。3.11では宮城県から茨城県にかけての多くの地震観測点で速度波形に明瞭なパルスが観測され、過去に構造物被害をもたらした内陸地殻内地震で生じたパルスと共通の特徴を有しているとの指摘もある¹¹⁾。また、現行の建築基準法で規定する地震動レベルを上回るパルス性地震動に対する免震建物の擁壁衝突時の最大応答評価も行われている¹²⁾。しかし、パルス性地震動に対する免震建物の地震時の実挙動について多面的に分析した例は少ない。

本論文では宮城県内に建設され規格化された共通の免震システムを有する30棟の免震住宅について、野書き記録から推測した免震層変形と建築地の地形や常時微動観測に基づく地盤震動特性との関係を検討する。次に、近隣の強震記録を用いた時刻歴応答解析を行い、地震動強さと免震層変形との関係を検討する。また、建築地及び近隣ボーリング調査に基づく表層地盤増幅特性との関係を検討し、今後起こり得る大規模なパルス性地震動に対する既存免震住宅の免震層変形予測、新規免震住宅に適した地盤条件に関して考察する。さらに、パルス周期やパルス形状が免震層変形に及ぼす影響を検討し、有効な免震層変形抑制法についても分析する。

* 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. 宮城県内の免震住宅

2.1 免震住宅概要

3.11 発生時に本論文で研究対象とした木造住宅メーカーの免震住宅は国内に約 3800 棟¹⁴⁾、宮城県内には 55 棟建築されていた。上部構造は 2 階建て木造軸組構法で、木製土台下に配した鉄骨土台 (H-250*125) とマットスラブの間に免震装置を設置した基礎免震構造である。免震装置はすべり支承と積層ゴムを併用している。また、極稀な暴風時に免震層変形をすべり支承の可動範囲内に留めるため、リング状のストッパー装置を設置している (Fig. 1)。

すべり支承には 2 種類の摩擦係数が、積層ゴムには 2 種類の復元力特性がある。摩擦係数 4.5/100 のすべり支承と天然ゴム系積層ゴム、同すべり支承と高減衰積層ゴムの組み合わせをそれぞれ免震システム A、B と呼び、摩擦係数 6.5/100 のすべり支承と天然ゴム系積層ゴム、同すべり支承と高減衰積層ゴムの組み合わせをそれぞれ免震システム C、D と呼ぶことにする (Table1)。免震システム毎の平均的な周期や減衰は異なり、同一システム内でも幅があるが、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 5 秒、すべり支承の摩擦力を含めた免震層変形 20cm 時の等価周期 T_e は 2 秒から 3 秒で、同じく免震層変形 20cm 時における復元力特性のエネルギー消費率から算出した等価減衰定数 h_{eq} は 25% から 40% である。

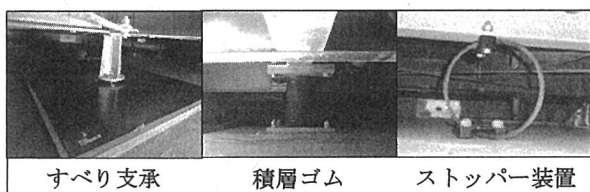


Fig.1 Seismic isolation devices

Table1 Combinations of sliders and rubber bearings

免震システム	免震装置の組合せ	平均 T_t (秒)	平均 h_{eq} (%)
A	低摩擦すべり支承+天然ゴム系積層ゴム	3.6	28.2
B	低摩擦すべり支承+高減衰積層ゴム	3.9	33.3
C	高摩擦すべり支承+天然ゴム系積層ゴム	3.6	33.3
D	高摩擦すべり支承+高減衰積層ゴム	4.0	38.0

2.2 建築地及び免震層最大変形分布と罫書き記録

筆者らは 2011 年 3 月 15 日から 4 月末の間に道路事情等が許す範囲で県下の免震住宅 55 棟の応急点検を実施した。その結果、宮城県では地盤被害による危険宅地判定数が被災都県で最も多いとされたが¹⁾、丘陵の造成宅地で地盤被害を受けた免震住宅は皆無であった。一方、海岸部の免震住宅 3 棟が津波によって床上浸水したが、流速が小さい立地であったために深刻な事態は免れた。

このような状況下、CCD カメラを搭載した点検ロボットで免震層に設置された罫書きを撮影した写真¹⁵⁾から、免震層変形が確認できたものが 30 棟、このうち、転写シートで罫書きを回収できたものが 15 棟あった。これらの記録には本震以外に前震余震の応答も含まれているが、免震層最大変形 (以後、最大変形) は本震時のものと考えられた。なお、変形の読み取りには 1cm 程度の誤差を含んでいる。

Table2 に、免震層変形が確認され、研究対象とした免震住宅 30 棟の建築地及び最大変形を示す。免震住宅は宮城県内の広範囲に分布しており、仙台市内には 20 棟存在する。Fig. 2 に最大変形の分布

Table2 Site location and max. deformation of the seismic-isolation layer

番号	建築地	最大変形 (cm)	番号	建築地	最大変形 (cm)
1	大崎市古川諏訪	25 ㉟	16	仙台市宮城野区鶴ヶ谷	18 ㉟
2	大崎市古川西荒井	38 ㉟	17	仙台市宮城野区鶴ヶ谷	22 ㉟
3	遠田郡小牛田町	22 ㉟	18	仙台市若林区伊在	37 ㉟
4	石巻市蛇田	16 ㉟	19	仙台市若林区伊在	36 ㉟
5	宮城郡松島町磯崎	12 ㉟	20	仙台市若林区文化町	17 ㉟
6	塩釜市牛生町	10 ㉟	21	仙台市太白区長町	19 ㉟
7	黒川郡富谷町	10 ㉟	22	仙台市太白区泉崎	19 ㉟
8	仙台市泉区紫山	7 ㉟	23	仙台市太白区大野田	10 ㉟
9	仙台市泉区紫山	12 ㉟	24	仙台市太白区大野田	17 ㉟
10	仙台市泉区明石南	26 ㉟	25	仙台市太白区富田	7 ㉟
11	仙台市泉区明石南	25 ㉟	26	仙台市青葉区錦ヶ丘	4 ㉟
12	仙台市泉区加茂	19 ㉟	27	仙台市青葉区錦ヶ丘	2 ㉟
13	仙台市泉区上谷刈	16 ㉟	28	名取市みどり台	3 ㉟
14	仙台市青葉区桜ヶ丘	15 ㉟	29	岩沼市松ヶ丘	9 ㉟
15	仙台市青葉区貝ヶ森	11 ㉟	30	亶理郡亶理町	12 ㉟

※The alphabet shows the type of the seismic-isolation systems of houses

図及び罫書き記録を示す。仙台市圏では若林地区や七北田北部、南光台付近で変形が大きい。罫書きの軌跡形状を見ると、仙台市圏北部では南東に大きく変形したものが、南部では北東から南西に向かって円弧を描くように変形したものが多く見られる。その変形の仕方は特徴的で、パルス的に 1 度だけ表れているものが多い。

筆者らは過去に、3.11 で震源から離れた神奈川県足柄平野で局所的に大きな免震層変形が生じた現象について検証してきたが¹⁵⁾、宮城県で見られたパルスの応答は足柄平野において確認された免震層変形が徐々に増大する共振的応答とは明らかに異なっている。

若林区伊在の 2 棟 (18, 19) はパルスの応答が卓越し、ストッパーが作動した。最大変形は南東方向へ 36~37cm であり、北西方向はその 1/2 程度の変形となった。この結果、ストッパーの基礎側固定金具の一部浮き上がりや、鉄骨土台梁への固定ボルトの一部損傷が見られた。ストッパー作動時の上部住宅への衝撃力が危惧されたが、施工へのヒアリングでは、食器棚の座りの悪いものが転倒した程度であった。また、泉区明石南の 2 棟 (10, 11) でも最大変形が東南東方向へ 25~26cm となり、パルスの応答が強く表れていた。一方、青葉区錦ヶ丘の 2 棟 (26, 27) や名取市みどり台 (28) の変形は 5cm 以下と小さく、同じ仙台市圏においても免震層変形に大きな違いが見られる。

大崎市古川西荒井 (2) ではストッパーが破断して、すべり支承の可動範囲を超えて 40cm に近い変形が確認された。罫書き装置の破損により記録の回収はできなかったが、すべり支承の摺動跡から大変形が東西方向、次いで南北方向へ出現したと考えられる。軌跡形状は仙台市圏のものと異なり、また足柄平野で見られた方向性のある共振的応答とも異なっている。

2.3 地形及び標高と免震層最大変形

Fig. 3 に免震住宅 30 棟について地形及び標高と最大変形の関係を示す。仙台市圏では長町一利府構造線を境に、それより北西部は洪積台地・丘陵、南東部は沖積低地と地形的に明確な違いがある。

標高 1m~20m の低地部では 35cm を超える大きな免震層変形が生じた住宅があり、同じ低地部内でも場所によって最大変形に 20cm 以上の差が生じている。一方台地部では最大 25cm 程度の変形に留まっており、標高と共に応答が小さくなる傾向が見られる。

大正~昭和初期に国土地理院が発行した旧版地図¹⁶⁾を用いて過去の地形や土地利用と比較し、現在の地盤状況を確認した。その結果、Fig. 4 に示す通り半数が丘陵の造成宅地であり、一方平野部の住宅はその殆どが水田を埋土して宅地化していた。特に変形が大き

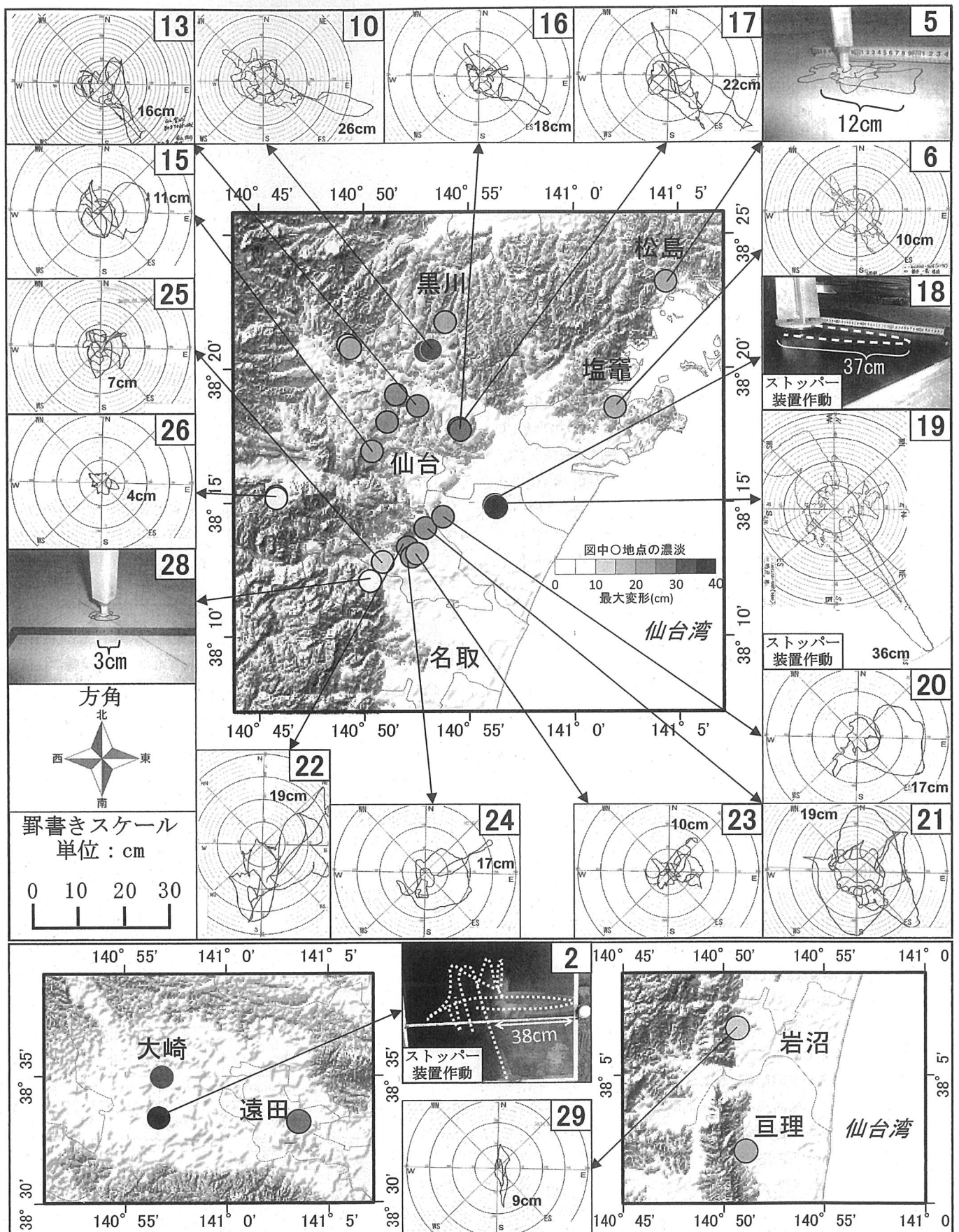


Fig.2 Marking lines from the seismic-isolation layer of houses and distribution maps of the maximum deformation of the seismic-isolation layer
 Above: Sendai city, Shiogama city, Matsushima city, Kurokawa district and Natori city area
 Below: Oosaki city area and Iwanuma city area

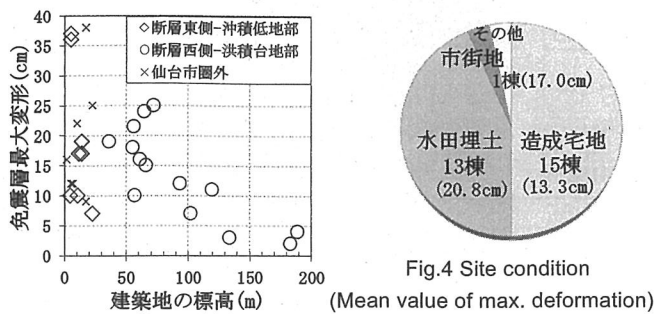


Fig.3 Site elevation and max. deformation of the seismic-isolation layer

かった若林区伊在の2棟(18, 19)の建築地は1980年代に水田が埋土造成されていた。昭和初期に既に集落として市街化されていたのは太白区文化町(20)の1棟だけであった。区分ごとの最大変形の平均値は水田埋土が最も大きく、市街地、造成宅地の順で小さくなる。

2.4 常時微動観測によるH/Vスペクトルのピーク周期との対応

地盤震動特性と免震層変形との関係进行分析するために、2012年10月19日～21日の3日間に免震住宅の敷地内で常時微動観測を実施した。あわせて、K-NETや気象庁の地震観測点でも計測した。微動計は速度計(5秒計)で、サンプリング振動数は100Hz、計測時間は1地点30分とした。データは1区間163.84秒に分割し、著しいノイズを除外した区間ごとにフーリエ変換した後にアンサンブル平均している。Fig.5～7に代表的な地点のH/Vスペクトルを示す。なお、グラフは0.05Hzのパルゼンウィンドウで平滑化している。

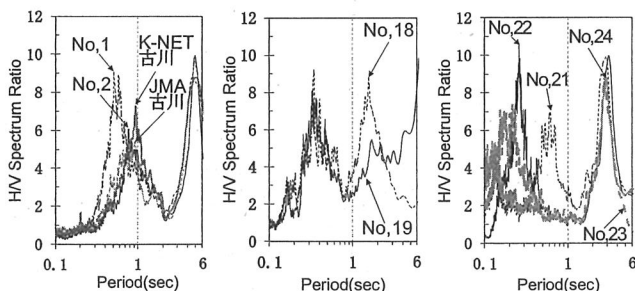


Fig.5 Furukawa Fig.6 Wakabayashi Fig.7 Taihaku

多くの地点で1秒以上(以後、長周期側)と1秒未満(以後、短周期側)の両方に大きなピークを持つ。長周期側は最大変形が35cmを超えた大崎市古川(2)や近隣(1)では5秒、仙台市若林区(18, 19)では1.5秒、最大変形が20cm程度であった仙台市太白区(21, 22, 23, 24)は3秒に明瞭なピークがあった。一方、短周期側は古川では0.5秒から1秒弱、若林区では0.35秒付近、太白区では様々であった。

仙台市圏では工学的地盤(第四紀層基底)は南東側で深く、深部地盤構造は海岸線から西に向かって徐々に深くなるとされ¹⁷⁾、浅部地盤と深部地盤の傾斜方向が異なっている。このような複雑な地盤構造が振動性状の違いを生み出していると考えられる。

Fig.8に長周期側のH/Vスペクトルのピーク周期及び免震住宅の等価周期 T_e と最大変形の関係を示す。太白区ではH/Vピーク周期3秒と T_e が近接し、最大変形が10～20cmの建物が多い。しかし、最大変形が20cm以上の建物では長周期側H/Vピーク周期と T_e とが必ずしも近接していない。この特徴は足柄平野の結果とは異なる。

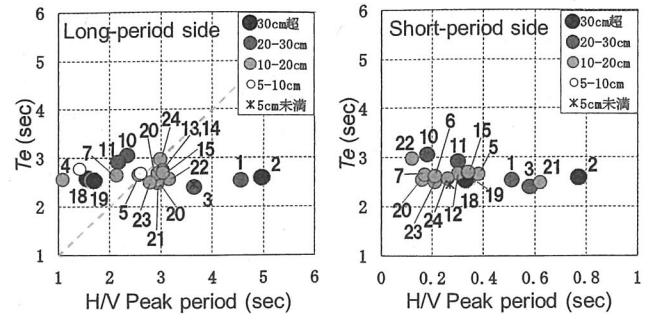


Fig.8 Relationship among H/V peak period, T_e and max. deformation

一方、短周期側のH/Vピーク周期との間にも特筆すべき関係は見られない。免震システムの減衰が最大変形に及ぼす影響を確認するために、Fig.9に30棟の等価減衰定数 h_{eq} と最大変形の関係を示すが、 h_{eq} との相関も小さい。最大変形が35cmを超えた3棟の免震システムは全て異なっている。

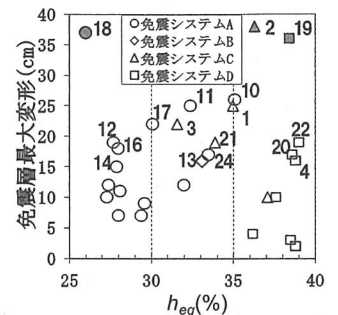


Fig.9 Type of seismic-isolation system, h_{eq} and max. deformation

3. 建築地付近の地震動特性と免震住宅の応答

3.1 強震記録の特徴

宮城県内では東北工業大学アレー強震観測システム(Small-Titan)、東北大学災害制御研究センター強震観測網(DCRC)、防災科学技術研究所(K-NET、KiK-net)、気象庁観測点などの強震観測網が高密度に整備されており、既に詳細な分析がなされている¹⁸⁾。本論文では野書き記録等が得られた免震住宅30棟の近隣で原則同一地形と判断される地震観測点を抽出し、建築地付近の地震動特性进行分析する。

Table3に免震住宅の近隣観測点の最大値(PGA、PGV、PGD)を示す。なお、最大値は水平2方向の時刻歴波形ベクトル和から求めた。

Table3 Strong motion observation site and peak value of ground motion

住宅No	微地形	距離km	Code	観測点名	観測網	微地形	PGA gal	PGV kin	PGD cm
1	後背湿地	1.3	MYG006	K-NET古川	K-NET	自然堤防	583	90	30
2	後背湿地	2.4	4B9	大崎市古川三日町	JMA	自然堤防	568	85	28
18	後背湿地	1.2	CCHG	七郷中学校	Small-Titan	後背湿地	1149	153	41
19	後背湿地	1.4							
10	丘陵	0.8							
11	丘陵	0.7	54083	仙台泉区将監	JMA	谷底低地	600	84	25
17	丘陵	0.5							
16	丘陵	0.4	NANK	南光台東小学校	Small-Titan	丘陵	705	68	26
3	後背湿地	4.1	54012	大崎市松山	JMA	後背湿地	479	72	23
22	後背湿地	0.6							
24	後背湿地	0.9	THU25	長町南コミュニティセンター	DCRC	後背湿地	500	63	31
23	後背湿地	0.9							
21	自然堤防	0.8							
20	自然堤防	0.5	THU3	古城小学校	DCRC	自然堤防	391	63	24
13	丘陵	2.5							
14	丘陵	0.6	SAKR	桜丘小学校	Small-Titan	丘陵	717	61	24
12	丘陵	1.8							
4	砂州	2.0	MYG010	K-NET石巻	K-NET	砂州	482	63	18
9	丘陵	1.4							
8	丘陵	1.4	THU10	宮城県立図書館1F	DCRC	丘陵	484	63	26
30	丘陵	0.6	54067	亘理町下小路	JMA	丘陵	512	39	10
5	三角州	0.5	8A3	松島町高城	JMA	三角州	367	56	17
15	丘陵	1.0	THU5	第一中学校	DCRC	洪積台地	415	61	25
6	三角州	1.3	MYG012	K-NET塩竈	K-NET	三角州	1970	64	13
7	丘陵	4.3	54006	富谷町富谷	JMA	丘陵	350	50	20
29	丘陵	0.2	MYG008	KiK-net岩沼地表	KiK-net	丘陵	285	43	14
25	後背湿地	1.4	THU22	富沢中学校	DCRC	後背湿地	458	53	30
26	丘陵	2.5							
27	丘陵	2.5	KURI	栗生小学校	Small-Titan	洪積台地	567	53	23
28	丘陵	1.0	SHOK	尚綱女学院短大	Small-Titan	丘陵	255	33	16

地動速度や地動変位は加速度データを時間積分して算出している。
3.11 では地殻変動によって永久変位が生じたことが判明しているが¹⁹⁾、本論文では免震住宅の応答に直接的に影響を及ぼす地動変位に着目するため、積分には10秒のローカットフィルターを用いた。

各地形を代表する地点として、12地点の地動変位をFig.10に示す。多くの地点で80秒から100秒にかけて、地動変位波形にパルスが確認できる。振幅は若林区伊在(18,19)の近隣観測点である七郷中学校 CCHG(後背湿地)で最も大きくEW方向へ30cmに達している。パルスは震源から離れた大崎市古川を除く全ての地点で見られる。

また、地表に安山岩が露出する地点としてSmall-Titanのリファレンスサイトとされる尚綱女学院短大 SHOK、民間の観測記録である青葉区南吉成のGL-100m地点、KiK-net 岩沼 MYGH008のGL-86m地点を見ると、いずれの深い地点でも波形にパルスが見られる。このことから、パルスは震源から放出され、表層地盤の増幅特性によって振幅の違いが生じたものと推察される。

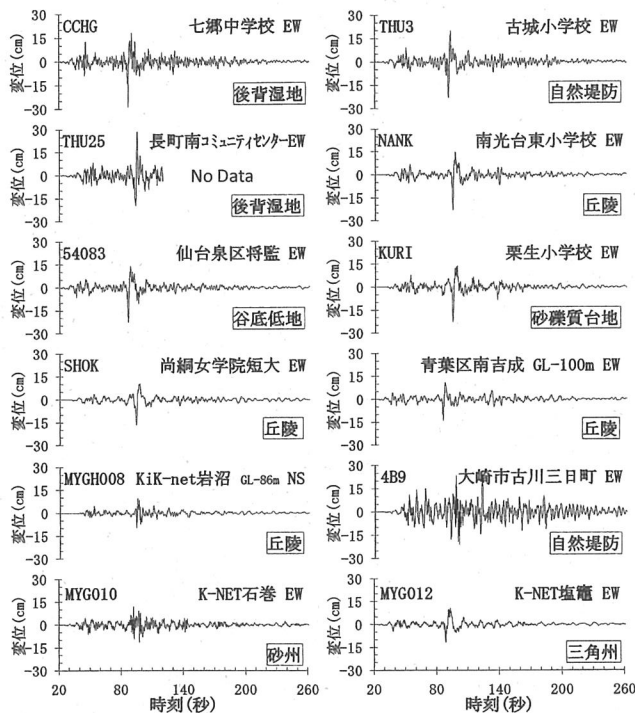


Fig.10 Displacement of ground motion at observation points (EW)

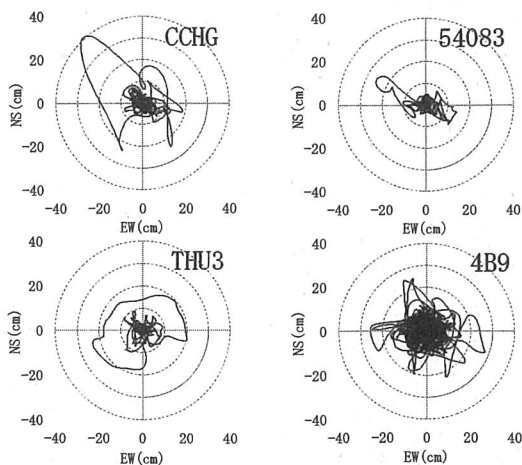


Fig.11 Displacement trace of ground motion at observation points

Fig.11に地動変位軌跡を示す。CCHGでは北西に大きく41cm、54083では25cm変位している。THU3では円弧を描くように20cm、4B9では東西に30cm、南北に25cm変位しており、各々の観測点に近い若林区伊在(19)や泉区明石南(10)、若林区文化町(20)、古川西荒井(2)の罫書き記録(Fig.2)と比較し、点对称的な形状になっている。

丘陵の泉区上谷刈(13)では唯一、免震住宅の基礎上で簡易的な地震計による地震観測を行っていた²⁰⁾。Fig.12に近隣観測点SAKRと基礎上の地動変位波形を重ねて示す。簡易地震計は1分ごとに約10秒間の無収録時間があるが、95秒付近でパルスが見られる。SAKRとは2.5km離れているが、両波形は全体的に良く一致している。

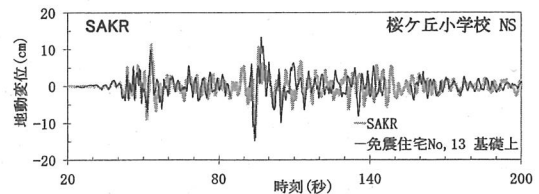


Fig.12 Comparison of displacement between SAKR and house No.13

3.2 強震記録による時刻歴応答解析

罫書きと近隣の強震記録による応答解析の最大変形を比較するため、免震住宅を1質点に置き換え、基礎固定とした1自由度系の時刻歴応答解析を行う。既往の研究より、水平2方向入力時の免震層最大変形は速度主軸方向の水平1方向入力による値とほぼ一致することが明らかになっている²¹⁾。そこで、速度履歴においてNS方向とEW方向のベクトル和が最大になる点と原点を結ぶラインを主軸とし、水平2方向入の加速度を主軸角 θ によって1方向に補正した。

$$AP = A_{EW} \cos \theta + A_{NS} \sin \theta \quad (AP: \text{主軸波}, A_{EW}, A_{NS}: \text{水平加速度}) \quad \dots (1)$$

重量及び免震装置の復元力特性は各邸の設計値を使用する。なお、免震層変形のオーダーを把握することを目的とするため、免震装置の性能ばらつきや積層ゴムのハードニングは考慮していない。

(1) 罫書き記録と応答解析による免震層最大変形

3.11における宮城県内の観測地震動の多くは、加速度波形に2つの波群が認められ、後半の波群の方が大きいという特徴がある。このため、全ての応答解析結果において最大変形は第2波群によって生じていた。

Fig.13にTable3に示した全ての免震住宅について、罫書き記録と応答解析による最大変形の対応を示す。なお、図中には微地形と近隣観測点との距離区分も合わせて示す。全般的に丘陵では罫書き記録と応答解析との対応は良く、近隣観測点の強震記録を用いて最大変形の大まかな推定ができていた。またサンプル数が少ないが、自然堤防でも比較的に対応は良い。これに対し、後背湿地や三角州では高々1km程度離れた観測点でも罫書き記録と応答解析との対応が悪い地点があり、応答解析結果の方が大きな変形になっている。

平野部の応答解析例として最大変形が約60cmに達した若林区伊在の2棟(18,19)について分析を加える。実際に18と19はストッパーによって免震層変形が抑制されており、強い地震動を受けたことが推測できる。しかし、ストッパーの損傷状況や変形抑制時の住宅内部の衝撃があまり大きくなかったことを考慮すると、ストッパーが存在しない状態の最大変形は40cm程度であったと推察され、建築物の地震動はCCHGよりもかなり小さかったと考えられる。

そこで、建築地での大凡の地震動強さを検討するために、CCHGの位相を変えず、加速度倍率を縮小して再解析したところ、原波の70%入力で最大変形が約40cmとなった。紙面には省略するが、建物重量や免震装置の性能ばらつきを考慮しても最大変形に大きな差異は生じておらず、両地点における地震動強さの違いが推測される。

2004年新潟県中越地震におけるK-NET小千谷とJMA小千谷(観測点間距離700m)の強震記録差異を検討した文献²²⁾によれば、地表約3mの地盤構造の違いが地表の地震動に影響しているとされる。このように、建築地と近隣観測点の表層地盤の違いや、最大変形に大きな差が生じた原因については今後更なる検討が必要である。

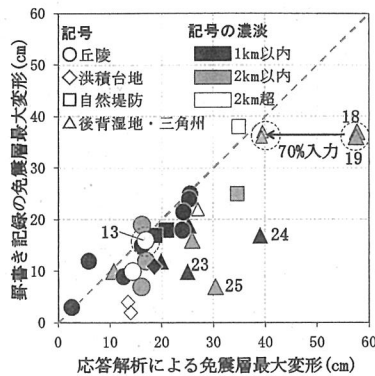


Fig.13 Comparison of maximum deformation between marking lines and response analysis

(2) 地震動強さと免震層最大変形

前項で後背湿地などでは建築地と観測点の地震動強さが異なる場合が多いことが確認された。そこで、本項では仮に30棟の免震住宅が最寄りの観測点に建築されていたものとして、地震動強さと最大変形との関係について検討する。地震動強さの指標として、気象庁の計測震度及び主軸方向のPGA、PGV、PGDを検討した。なお、気象庁の計測震度は上下成分を含めた3成分ベクトル和を用いた。

Fig. 14に4種類の地震動強さと最大変形との関係を示す。PGVと最大変形は最も相関が良い。PGAはMYG012のような大加速度もあり、全体的な対応が良くない。PGDは全体的な傾向は現れているが、最大変形が地動変位を上回る地点や下回る地点など、地点毎のばらつきが大きい。一方、加速度と速度の中間的な物理量である気象庁計測震度は、いくつかの地点を除けば最大変形の大まかな推定ができています。他の諸量の回帰と整合させるため、最大変形を対数表示している。なお、東北工業大学の強震観測グループが求めた仙台市圏の計測震度分布図⁷⁾とFig. 2に示した最大変形分布の対応も良い。

(3) 強震記録のパルス特性と免震層最大変形

PGVと最大変形の関係を詳細に分析するため、Fig. 15~17に地動速度と免震層変形、地動変位と質点の変位(免震層絶対変位)を時刻歴波形で示す。全て第2波群における12秒間の応答である。

Fig. 15はCCHG(19)の応答解析結果で、86~87秒にかけて地動速度波形に周期約1秒、振幅160kineの大きなパルスが見られる。PGV直前までの免震層変形は小さいが、PGV発生直後に最大変形に達している。また、地動変位に対して1/2周期遅れで免震層が変位応答しており、それ以外では絶対静止に近い。仙台市圏の多くの地点で同様のパルス特性と免震層変形が見られた。

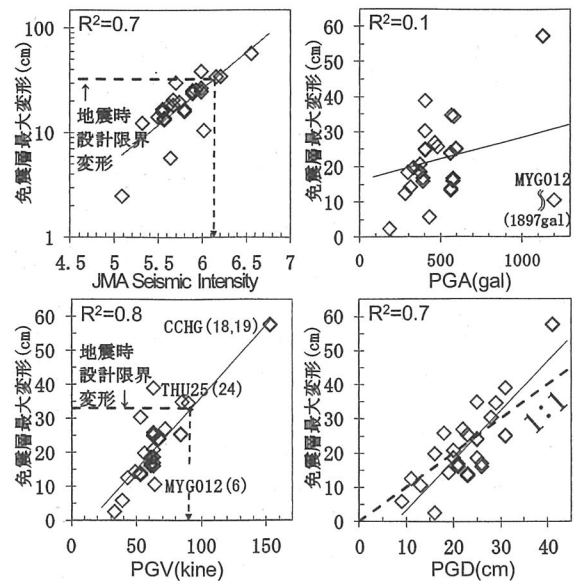


Fig.14 Relationship between maximum deformations and ground motion intensity

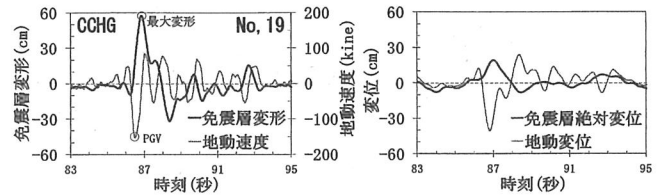


Fig.15 Response analysis result of CCHG (No. 18)

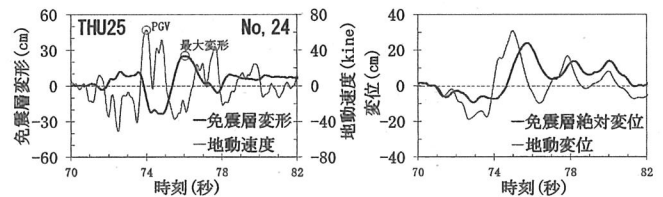


Fig.16 Response analysis result of THU25 (No. 24)

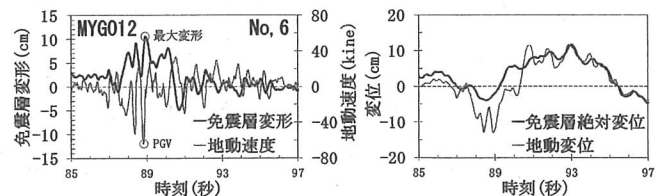


Fig.17 Response analysis result of MYG012 (No. 6)

Fig. 16はTHU25(24)の応答解析結果である。地動速度波形におけるパルスは複雑だが、大局的には74~77秒にかけて周期約3秒、振幅60kineのパルスが見られる。最大変形はPGV直後には現れず、地動変位に対して1/4周期遅れで免震層が変位応答している。

Fig. 17はMYG012(6)の応答解析結果で、地動速度波形の88~89秒にかけて周期約0.5秒、振幅60kineのパルスが2波見られる。PGV発生直後に最大変形が生じているが振幅が片振れしている。地動変位に対して免震層は静止に近い応答となり、パルス前後は比較的長い周期の地動変位に追従するように変位応答している。

以上より、PGVと最大変形の経時的な関係はパルス周期によって

変動しており、普遍的ではない。しかし、地動速度波形において仙台市圏で多く観測された、周期が1秒～2秒のパルスに限定すれば Fig. 14 に示した通り両者に明確な相関が見られ、 PGV が凡そ 90～100kine で地震時設計限界変形(30～33cm)に達することが分かった。

4. 建築地の地盤増幅特性と免震層最大変形

4.1 表層地盤増幅の考え方

地表でのパルス特性は地盤増幅特性と関係が深い。建築地の地盤を基盤と表層から成る2層に単純化して、基盤にせん断波が鉛直下方入射する際の地表での増幅率が理論的に求められる。2層の境界面での変位とせん断力の連続性や、地表面でせん断力が0、下方からの上昇波と地表面からの下降波の振幅等価性から、表層と基盤のインピーダンス比を β とした時、最大増幅率は $2/\beta$ と導かれる。なお、インピーダンス比 β は、 $\beta = \rho_1 V_{s1} / \rho_2 V_{s2}$ で表わされる。…(2)

ここに ρ : 密度、 V_s : せん断波速度、添字1: 表層、2: 基盤

ゆえに、増幅率は2層のせん断波速度の比に依存し、2層のインピーダンス比が小さいほど地表面での増幅率が大きくなる。

このような背景のもと、地震動強さの増幅率は地表から深さ30mまでの地盤の平均せん断波速度(以後、 $AVS30$)と相関が高く、 $AVS30$ から増幅率を近似的に推定できることが示されている²³⁾。

また、 $AVS30$ を用いた表層地盤増幅は、藤本・翠川によって日本全国の様々な地形での適用性が改善され²⁴⁾、せん断波速度600m/s相当の基盤に対する PGV の増幅率と関係が深いことが示されている²⁵⁾。そこで、本論文では PGV との対応が良い免震層変形の推定に有効であると考え、建築地の地盤増幅特性と最大変形の関係評価を、 $AVS30$ を用いた簡便な方法で試みる。

4.2 平均せん断波速度 $AVS30$ の算出

$AVS30$ の算出に際し、最大変形が35cmを超えた3棟(2, 18, 19)では敷地内でボーリング調査を行い、それ以外は近隣データを入手した。沖積低地部では1km離れると地盤震動特性が大きく異なる可能性が高いため、同一地形でかつ500m程度の近隣データを採用した。

各層のせん断波速度を、入手したボーリングデータの地層毎の N 値と土質、地質年代による変換式²⁶⁾を用いて算出した。

$$V_s = 68.79 N^{0.171} \times H^{0.199} \times Y_g \times S_t \quad \dots (3)$$

ここに、 N : N 値、 H : 地表面からの深さ(m)、 Y_g : 地質年代係数、

S_t : 土質に応じた係数

$AVS30$ の算出方法は下式とした。

$$AVS30 = 30 / \sum (H_i / V_{si}) \quad \dots (4)$$

ここに、 $AVS30$: 地表から表層30mまでの平均せん断波速度(m/s)

H_i : i 層の層厚(m)、 V_{si} : i 層の平均せん断波速度(m/s)

また、ボーリングデータの掘進長が10m以上30m未満の場合などは内閣府(2005)の $AVSn$ ($n=10, 15, 20, 25$)と $AVS30$ との関係式を用いて換算した。

$$AVS30 = a_n \times AVSn + b_n \quad \dots (5)$$

ここに、 n : 10, 15, 20, 25、 a_n, b_n : $AVSn$ と $AVS30$ の回帰式の係数さらに、 $AVS30$ による最大速度増幅率の推定には次式²⁵⁾を用いた。

$$\log AF_{PGV} = -0.852 \times \log(AVS30/600) \quad \dots (6)$$

ここに、 AF_{PGV} : 最大速度増幅率

4.3 $AVS30$ 及び最大速度増幅率と免震層最大変形

Fig. 18 に有効なボーリングデータを入手した25棟の $AVS30$ と最

大変形の関係を示す。全般的に AF_{PGV} が低下すると最大変形が増大する傾向が見られるが、250m/sを境にそれ以下でばらつきが著しい。特に、灰色丸で示した免震住宅(2, 18, 19, 6, 26, 27)で対応が悪い。

対象とした25棟では石巻市蛇田(4)が野津らによる強震動パルス生成域(SPGA4)¹¹⁾に最も近く約130kmである。一方、最も離れているのが青葉区錦ヶ丘(27)で約160km、仙台市圏では平均的に150kmである。強震動パルス生成域からの距離を R とした時、実体波の振幅は概ね $1/R$ で減衰する。そこで、4を基準とした各建築地の減衰比率($130/R$)を AF_{PGV} に乗じることで距離減衰の影響を補正した。Fig. 19 に AF_{PGV} と最大変形の関係を示す。 AF_{PGV} 算出過程におけるせん断波速度の換算式によるばらつき²⁷⁾が少なくないと考えられるが、黒丸地点では概ね±5cmの範囲内で最大変形が推定できている。

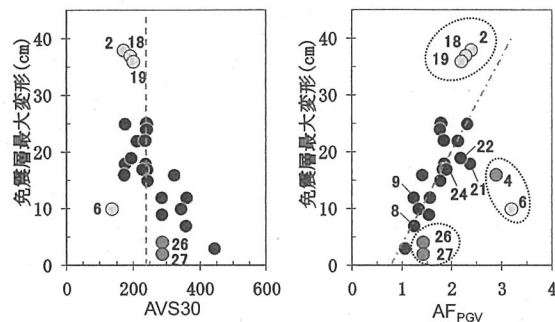


Fig.18 $AVS30$ and max. deformation Fig.19 AF_{PGV} and max. deformation

次に、 AF_{PGV} との対応に関して、灰色丸地点を中心に考察する。

最大変形が35cmを超えた3棟(2, 18, 19)は、表層が地下水位の高い飽和砂質土地盤である点で共通しており、2, 18では3.11直後に敷地内で噴砂や地盤沈下など、実際に液状化現象が確認されている。一般に液状化地盤では長周期化に伴う地動変位の増大と加速度の低下が生じるとされる。しかし、18, 19から南東へ約1kmの観測点CCHGの加速度波形に1000galを超すスパイク状の波形(Fig. 20)が観測されたことや、北西へ約2kmのMYG013(K-NET 仙台)でも、観測小屋付近に液状化が確認されたにも関わらず1000galを超すスパイク状の波形(Fig. 21)が観測されたことと矛盾する。

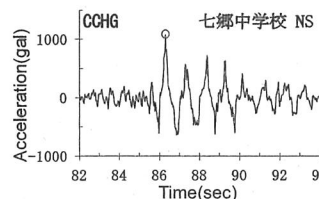


Fig.20 Acceleration at CCHG

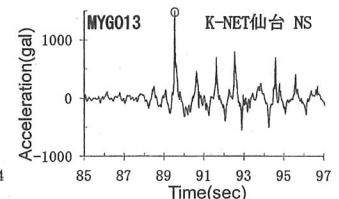


Fig.21 Acceleration at MYG013

2004年新潟県中越地震におけるK-NET小千谷の波形で検証された地盤の剛性低下に伴うサイクリックモビリティの影響²⁸⁾が、パルスの振幅(加速度、速度、変位共に)を助長したと仮定すると、液状化地盤上での著しい免震層変形増大の説明が可能と思われる。実際にCCHGの加速度波形はK-NET小千谷に酷似しているとされる²⁹⁾。

最大変形が10～15cmの塩竈市牛生町(6)、石巻市蛇田(4)は共に N 値が小さい粘土またはシルトが深く堆積する軟弱地盤である。Fig. 17 に示したように、これらの地点では長周期化した地動変位の

中で短周期パルスが出現する傾向が見られること、パルス形状が他と比べて先鋭でないことが AF_{PGV} との対応が悪い要因と考えられる。

最大変形が2~4cmの青葉区錦ヶ丘の2棟(26, 27)は1980年代の丘陵造成地(標高180m)で、宅地造成履歴図³⁰⁾及び建築地の極く周辺で実施されたボーリング調査によると、建築地は丘陵の谷間に45m以上の盛土をしている。盛土厚が20m程度までは盛土が厚くなるほど計測震度が大きくなるという報告があるが³¹⁾、錦ヶ丘では非常に厚い盛土によってむしろ表層加速度が低下し、免震層が滑動する境界レベルの地震動強さになったと想像される。一方、 R が同程度の泉区紫山の2棟(8, 9)は1990年代の丘陵造成地(標高100m)で、錦ヶ丘と地形的に酷似しているが、最大変形は10cm前後で AF_{PGV} との対応は良い。前述の資料より、建築地は20m以上の切土上にある。

最大変形が20cm程度の太白区長町(21)、泉崎(22)、大野田(24)は仙台市南部に位置する。付近は表層20m程度が完新世の軟弱地盤であると推定され、3.11では表層地盤の非線形応答の影響が確認されている³²⁾。しかし、 AF_{PGV} との対応は比較的良好。地盤の非線形化は加速度増幅に頭打ちをもたらすが、速度増幅には影響を与えないことが検証されており³³⁾、このような増幅特性の現れと推察される。

5. 模擬パルス波とパルス性地震動に対する免震住宅の応答

5.1 入力模擬パルス波

1質点1自由度系の弾性モデルに正弦波パルスを与えた時の最大応答値や減衰効果、パルス周期比の影響などについて詳細に検討した研究や³⁴⁾、せん断弾性棒に正弦波パルスや Ricker wavelet を用いて応答特性を評価した研究³⁵⁾など、パルス性地震動に対する建物や地盤の応答特性を理論的に検討した文献がある。

本論文では仙台市圏で見られた地動変位が片振幅または両振幅に近いケースの2種類のパルス性地震動を想定する。入力波は文献を参照し、各ケースに対する数学的なモデル例として Ricker wavelet(片振幅波)と Ricker wavelet の加速度を1階微分した波形(両振幅波)とする。そして、すべり支承を完全剛塑性、天然ゴム系積層ゴムを弾性にモデル化し、両者を並列した復元力特性にて1質点1自由度系の時刻歴応答解析を行う。また、比較のために地動に永久変位が生じるケースとして正弦波パルスによる応答解析も行う。

①正弦波パルス

$$\ddot{y}(t) = A_0 \sin(2\pi/T_p) t \quad \dots (t \leq T_p), \quad \ddot{y}(t) = 0 \quad \dots (t > T_p) \quad \dots (7)$$

②Ricker wavelet(片振幅波)

$$\ddot{y}(t) = A_0(\tau_R^2 - 1) \exp(-\tau_R^2/2) \quad \dots (8)$$

③Richer wavelet の微分(両振幅波)

$$\ddot{y}(t) = A_0 \tau_R \exp(-\tau_R^2/2) \times (3 - \tau_R^2) \quad \dots (9)$$

ここに、 A_0 : 加速度振幅(gal)、 T_p : パルス中心周期(s)、 t : 時刻(s)
 $\tau_R = \omega_p(t - T_p)/\sqrt{2}$ 、 ω_p : パルス角振動数(rad/s) $\dots (10)$

Fig. 22 に①~③の加速度振幅 A_0 、速度振幅 V_0 、変位振幅 D_0 と、波形概要を示す。

5.2 模擬パルス波に対する最大変形

摩擦力を有する場合、等価周期 T_e は変形に応じて変化するため、天然ゴム系積層ゴムのせん断剛性 k_s による接線周期 T_t を免震周期とした。 T_t は0.1秒間隔とし、各 T_t で摩擦係数 μ を0から0.1まで0.01刻みで11段階に変化させた。 $\mu=0$ は非減衰の弾性モデルとなる。

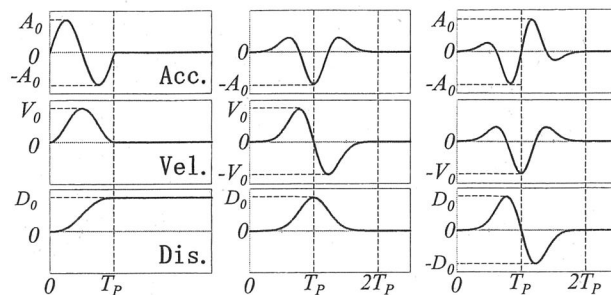


Fig.22 Acceleration, Velocity, Displacement of pulse waves

(Left: Sine wave, Center: Ricker wavelet, Right: Differentiated Ricker wavelet)

Table 4 Maximum amplitude of A_0 , D_0 ($V_0=100\text{kine}$)

T_p	正弦波サイン		片振幅波		両振幅波	
	$A_0(\text{gal})$	$D_0(\text{cm})$	$A_0(\text{gal})$	$D_0(\text{cm})$	$A_0(\text{gal})$	$D_0(\text{cm})$
0.5	628	25	1466	19	1220	7
1.0	314	50	733	37	611	14
2.0	157	100	366	74	308	27

なお、本解析では V_0 を100kine とし、 T_p を0.5秒、1秒、2秒とした。Table4 に入力模擬パルス波と各 T_p における A_0 、 D_0 を示す。

Fig. 23~26 に応答解析結果を示す。縦軸は入力模擬パルス波の変位振幅 D_0 に対する最大変形(地動との相対変位) S_d の比 S_d/D_0 、横軸は周期比 T_t/T_p に基準化している。網掛け部は現実的な T_t の範囲(3秒~5秒)を示しており、以降、当該範囲を中心とした考察を行う。

正弦波パルスの場合、 S_d/D_0 は1を超えることはなく、摩擦係数 μ が高いほど S_d/D_0 は減少する。 $T_t/T_p=1$ の時 S_d/D_0 は0.5以下となる。

$T_p=0.5$ 秒の片振幅波では μ が高いほど S_d/D_0 は減少し、すべり支承の平均的な摩擦係数 $\mu=0.05$ で S_d/D_0 は約0.8となる。一方、両振幅波では μ が高いほど S_d/D_0 は増大し、 $\mu=0.05$ で S_d/D_0 は約1.5となる。 $T_p=1.0$ 秒では両波共に μ が高いほど S_d/D_0 は増大し、 $\mu=0.05$ の時、片振幅波の S_d/D_0 は1前後、両振幅波では凡そ2となる。

さらに、 $T_p=2.0$ 秒では両波共に μ が高いほど S_d/D_0 は減少し、 $\mu=0.05$ の時、片振幅波の S_d/D_0 は約1、両振幅波では約2となる。

$T_p=3.0$ 秒以上では現実的な免震周期範囲で T_t/T_p が1に近づく。このため S_d/D_0 の増大が予測されるが、 $T_p=2.0$ 秒までの結果からも、非減衰状態における片振幅波で1.5、両振幅波で3を上限として、 $\mu=0.05$ では凡そ $S_d/D_0=1\sim2$ の範囲内となることが推察される。

ここで、ある条件において μ が高いほど S_d/D_0 が増大する現象について考察する。一般に μ が高いと免震層は初動に対して滑動しにくく、地動と共に変位しやすい。逆に μ が低いと滑動しやすく、絶対静止になりやすい。片振幅波の場合は地動変位が $+D_0$ で折り返して原点で停止する。例えば $T_p=0.5$ 秒の時、 μ が高く免震層が地動に追従する方が、地動との相対変位である S_d は小さくなる。逆に μ が低く絶対静止に近いと、 S_d が増大して D_0 に近づく(Fig. 27)。

一方、両振幅波の場合は地動が $+D_0$ を折り返し、大きな速度で原点を通過して $-D_0$ まで変位する。この時、同様に $T_p=0.5$ 秒の時、 μ が高いほど地動の返し点で免震層が $+D_0$ に近く変位しているため、次に地動が $-D_0$ へ変位した瞬間に出足払いを受けたような状態となって S_d は大きくなり、 S_d/D_0 が1を超える(Fig. 28)。しかし、 $T_p=1.0$ 秒や2.0秒では上述の μ と S_d/D_0 の傾向がパルス形状によって逆転する条件もある。このように、パルス周期や形状、摩擦係数は最大変形に大きな影響を与え、免震住宅は複雑な応答をする。

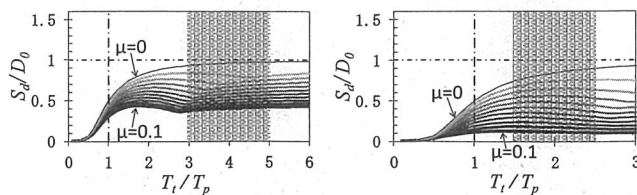


Fig.23 Rigid-Plastic response spectrum by sine wave (ref.)

(Left: $T_p=1.0$ sec, Right: $T_p=2.0$ sec)

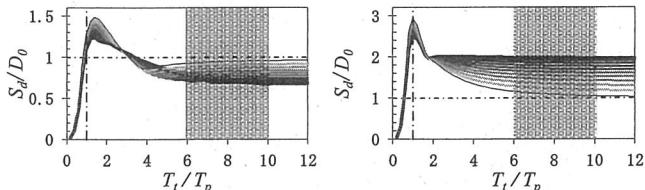


Fig.24 $T_p=0.5$ sec(Left: Half amplitude wave, Right: Double amplitude wave)

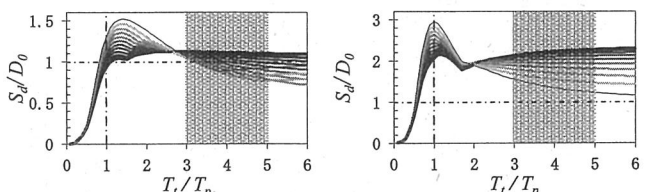


Fig.25 $T_p=1.0$ sec(Left: Half amplitude wave, Right: Double amplitude wave)

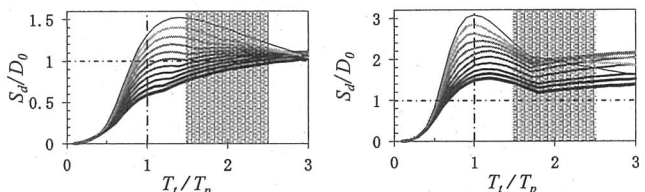


Fig.26 $T_p=2.0$ sec(Left: Half amplitude wave, Right: Double amplitude wave)

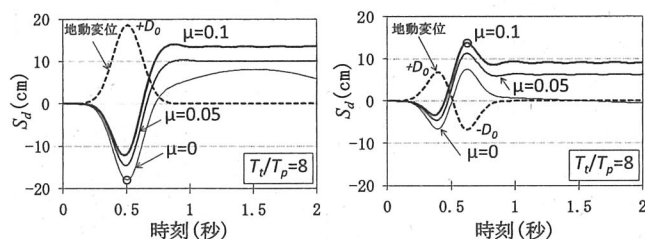


Fig.27 S_d by Half amplitude wave Fig.28 S_d by Double amplitude wave

5.3 パルス性地震動に対する最大変形

模擬パルス波との応答比較を行うために、実地震動である CCHG ($T_p \approx 1.0$ 秒、 $D_0 \approx 41$ cm) に対する最大変形を検討する。本節では高減衰積層ゴムのケースも加えた。なお、 T_i は 0.1 秒間隔とし、各 T_i において μ を 0.02 から 0.08 まで 0.01 刻みで 7 段階に変化させた。

Fig. 29 に応答解析結果を示す。天然ゴム系積層ゴムのグラフでは $T_i/T_p=1$ に鋭いピークを持ち、 $T_i/T_p=3 \sim 5$ における S_d/D_0 は、 μ によらず凡そ 1.5 に漸近した。ピーク付近のスペクトル形状は、Fig. 24 及び Fig. 25 の両振幅波 ($T_p=0.5$ 秒及び 1.0 秒) に似ているが、 $T_i/T_p=3 \sim 5$ における S_d/D_0 は大きく異なる。一方、高減衰積層ゴムのグラフでは $T_i/T_p=1.5$ 付近に緩やかなピークを持ち、天然ゴム系積層ゴムと同様に、免震周期帯では μ によらず S_d/D_0 が 1.5 に漸近した。

このことは CCHG に近い若林区伊在の免震住宅 2 棟 (18, 19、2 棟間の距離は 150m) の免震層復元力特性が、18 が免震システム A、 $T_i=3.4$ 秒、19 が免震システム D、 $T_i=4.1$ 秒と異なるにも関わらず、2 棟の最大変形が同程度であったという地震時の実挙動を反映している。

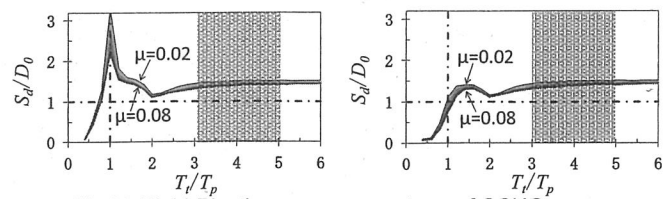


Fig.29 Rigid-Plastic response spectrum of CCHG wave

(Left: Natural rubber bearing, Right: High-damping rubber bearing)

しかし、CCHG に対する S_d/D_0 とパルス周期や摩擦係数の関係は、本論文で検討した数学的な模擬パルス波 2 波では十分に説明できていない。この原因として、実地震動ではパルスの中心周期前後の成分幅が模擬パルス波よりも狭く鋭いことや、パルス以前の波形の位相特性などが影響していると考えられる。

以上より、パルス性地震動による応答を単純化した模擬パルス波の応答解析で予測するには、多種多様なパルス形状による検討が必要と思われるが、5.2 節及び 5.3 節の検討では大規模パルス性地震動に対して S_d/D_0 を最大 2 程度考慮する必要があることを確認した。

5.4 油圧ダンパによる免震層変形抑制

パルス性地震動の特性によっては、摩擦係数の違いや高減衰積層ゴムの履歴型減衰が最大変形に殆ど反映されない現象が生じた。そこで現行の免震システムに減衰力が速度に比例する油圧ダンパを付加した際の変形抑制効果を検討する。油圧ダンパの減衰係数 c は戸建免震住宅用として実績がある減衰装置³⁶⁾を参考にし、 $c=15$ kN/m/s $\times 2$ 基=30 kN/m/s として粘性減衰項を 3.2 節の応答解析モデルに追加した。なお、建物重量は 490 kN で対象免震住宅の平均的規模とした。

Fig. 30 に油圧ダンパを付加した際の CCHG に対する応答解析結果を示す。最大変形が約 20% 抑制され、 S_d/D_0 が 1.25 に漸近する結果が得られた。本検討は大規模パルス性地震動の一例に過ぎないが、油圧ダンパによる S_d/D_0 低減は免震住宅の安全性維持に有効であると考えられる。ただし、過剰な付加減衰は応答加速度を増大させるため、免震層変形抑制には油圧ダンパの適切な設計が必要である⁶⁾。

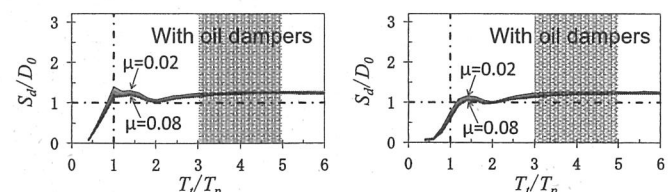


Fig.30 Rigid-Plastic response spectrum of CCHG wave

(Left: Natural rubber bearing, Right: High-damping rubber bearing)

6. まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震における、宮城県内に建設され規格化された共通の免震システムを有する戸建免震住宅の免震層変形と地盤震動特性との関係を検討した。得られた知見を下記に示す。

- 1) 足柄平野で見られた共振的な応答とは異なり、野書き軌跡にはパルスの応答が強く現れ、県内で最大変形に大きな違いが生じた。
- 2) 常時微動観測による H/V ピーク周期と T_e の近接度合いと最大変形に良い相関は見られなかった。
- 3) 多くの近隣観測点で、強震記録に周期 1 秒～2 秒のパルスが見られた。強震記録の PGV と応答解析による最大変形の対応が良く、PGV が凡そ 90 kine 以上で地震時設計限界変形に達することを確

認した。また、一部の地点を除けば気象庁の計測震度で最大変形の大まかな推定ができた。

4) AVS30 が概ね 250m/s 以下の地盤では最大変形が大きくばらついたが、建築地の距離減衰を考慮した最大速度増幅率 AF_{PRG} と最大変形は良い対応が見られた。ただし、飽和砂質土地盤では免震層変形が著しく増大する傾向があるため注意が必要である。

5) Ricker wavelet 等の模擬パルス波による剛塑性応答解析により、 S_d/D_0 は T_p やパルス形状、 μ に大きく影響されることを確認した。一方、実際の大規模パルス性地震動 (CCHG) では T_i や μ の違いによらず、 S_d/D_0 はほぼ一定となった。

6) 一例ではあるが、大規模パルス性地震動 (CCHG) に対して、速度比例型油圧ダンパの免震層変形抑制効果が高いことを確認した。

地盤の非線形化と最大変形の関係については、今後更なる検討が必要である。そのため、非線形化が予測される免震住宅の建築地には地震計の設置を急ぎ、観測データの蓄積を優先的な課題としたい。

謝辞

免震住宅の居住者には、震災後の混乱の中、免震層の点検や野書き記録の回収、ヒアリングや常時微動観測に快くご協力を賜りました。また、㈱一条工務店宮城、㈱一条工務店仙台の各位、㈱ラスティングの品川恭一氏、西嘉治氏、松島弘氏には、宮城県内における免震住宅の地盤調査と地盤情報収集に多大なご尽力を頂きました。

本論文では DCRC³⁷⁾、Small-Titan、気象庁、仙台市、K-NET 及び KiK-net、㈱フジタによる南吉成³⁷⁾で観測された貴重な強震記録を使用させて頂きました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本建築学会: 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, pp. 42-44, 2011. 7
- 2) 一般社団法人日本免震構造協会: Menshin, No. 82, pp. 20-25, 2013. 11
- 3) 日経 BP 社: 免震の真価, 震災で分かった効果と維持管理の課題, 日経アーキテクチュア, No. 955, pp. 14-19, 2011. 7
- 4) 飯場正紀, 小豆畑達哉, 井上波彦, 平野茂: 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 2 宮城県内の戸建免震住宅の調査および変位応答と近傍地震動の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 513-514, 2012. 9
- 5) 文部科学省研究開発局, 独立行政法人防災科学技術研究所: 平成 23 年度長周期地震動予測地図作成等支援事業成果報告書, pp. 176-177, 2012. 3
- 6) 高橋武宏, 天竺貴仁, 福和伸夫: 実大震動実験に基づく戸建免震住宅の免震層変形抑制に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 699 号, pp. 565-574, 2014. 5
- 7) 神山眞, 松川忠司, 穴澤正宏: 2011 年東北地方太平洋沖地震における東北工業大学アレー強震観測システム Small-Titan による強震観測記録について (速報), 東北工業大学強震観測グループ, 2011. 4
<http://smweb.tohtech.ac.jp/smalltitan/japanese/>, 2014. 2. 3 参照
- 8) 大野晋, 三屋栄太, 源栄正人: 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市域の地盤震動特性, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号 (特集号), pp. 339-353, 2012. 9
- 9) 林佑樹, 飯塚裕暁, 汐満将史, 小林雄, 境有紀: 2011 年東北地方太平洋沖地震の宮城県における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性, 日本地震工学会論文集, 第 13 巻, 第 5 号 (特集号), pp. 62-101, 2013. 11
- 10) 国土技術政策総合研究所, 独立行政法人 建築研究所: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 国総研資料, 第 674 号, 5 章 5 節, pp. 1-62, 2012. 1
- 11) 野津厚, 山田雅行, 長尾毅, 入倉孝次郎: 海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号 (特集号), pp. 209-228, 2012
- 12) 安本宏, 岡沢理映, 多幾山法子, 大西良広, 林康裕: パルス性地震動に対する免震建物の擁壁衝突時の最大応答評価, 日本建築学会構造系論文

集, 第 697 号, pp. 385-392, 2014. 3

- 13) 一般社団法人日本免震構造協会ホームページ,
<http://www.jssi.or.jp/>, 2014. 3. 3 参照
- 14) 株式会社一条工務店ホームページ,
<http://www.ichijo.co.jp/technology/menshin/>, 2014. 3. 3 参照
- 15) 高橋武宏, 福和伸夫: 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, 日本建築学会構造系論文集第 694 号, pp. 2123-2132, 2013. 12
- 16) 旧版地図 1/5 万 (大正~昭和初期), 国土地理院
<http://www.gsi.go.jp/MAP/HISTORY/koufu.html>, 2014. 3. 3 参照
- 17) 源栄正人, 山本優, 大野晋: 仙台地域の深部地盤構造に起因するやや長周期地震動特性と長周期構造物の現状, 月刊地球号外, No. 55, pp. 227-233, 2006. 7
- 18) 源栄正人: 東日本大震災における地震動と建物被害の実態と教訓, 東日本大震災に関する技術公講演会論文集-巨大地震・津波がもたらした被害と教訓-, 宮城県沖地震対策研究協議会, 東北地質調査業協会, pp. 21-39, 2012. 2
- 19) 平井敬, 福和伸夫: 強震記録に基づく東北地方太平洋沖地震による地殻変動分布の算定, 日本建築学会構造系論文集, 第 673 号, pp. 341-350, 2012. 3
- 20) 松本和行, 平野茂, 高橋武宏, 飯場正紀, 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 3 地震観測に基づく免震住宅の挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 515-516, 2012. 9
- 21) 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
- 22) 藤川智, 先名重樹, 藤原広行, 大井昌弘: 2004 年新潟県中越地震の強震観測点における表層地盤の地震動増幅, 日本地震工学会論文集, 第 6 巻, 第 3 号, pp. 27-42, 2006. 8
- 23) 翠川三郎: 地震断層と地盤条件を考慮した地表面最大加速度・最大速度分布の推定, 第 8 回地盤震動シンポジウム, pp. 59-64, 1980. 3
- 24) 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第 3 巻, 第 3 号, pp. 13-27, 2003. 9
- 25) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 第 6 巻, 第 1 号, pp. 11-22, 2006. 2
- 26) 国土交通省建築研究所: 改正基準法の構造関係規定の技術的背景, 社団法人建築研究振興協会, 2001. 3
- 27) 木本幸一郎, 前田泰吉: 地盤の N 値からせん断波速度 Vs を推定する試み その 2 データの蓄積 (2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊, pp. 449-450, 2007. 8
- 28) 翠川三郎, 三浦弘之, 秋場俊一: 2004 年新潟県中越地震の地震動について, 東京工業大学都市地震工学センター地震工学研究レポート, No. 92, pp. 1-10, 2004. 11
- 29) 田中浩平, 津野靖士: 東北地方太平洋沖地震における Small-Titan 七郷中学校 (CCHG) で観測された強震動の特性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 275-276, 2013. 8
- 30) 仙台市宅地造成履歴等情報マップ (切土・盛土図及び造成年代図), 1/1 万, 仙台市都市整備局開発調整課, 2013. 3
- 31) 森友宏, 松下克也, 佐藤真吾, 渦岡良介, 風間基樹: 造成地の盛土厚および旧地形形状が地震応答に及ぼす影響, 第 13 回日本地震工学シンポジウム冊子, pp. 268-274, 2010. 11
- 32) 大野晋: 仙台市内の地盤震動と地下構造の関係, 2011 年東北地方太平洋沖地震から何を学び、どう活かすか-巨大地震に備えるための地盤震動研究 (その 2)-, 第 40 回地盤震動シンポジウム冊子, pp. 20-28, 2012. 11
- 33) 吉田望: 表層地盤と地震動の性質, 日本地震工学会誌, No. 9, pp. 6-11, 2009. 1
- 34) 西影武知, 見上知広, 鈴木恭平, 林康裕: パルス波に対する建築物の応答特性とその評価, (その 1) 1 自由度系の応答特性と減衰補正係数, シンポジウム-内陸地震に対して構造設計者はどう対応すればよいのか- 地震荷重と構造設計, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会, pp. 43-48, 2009. 10
- 35) 南博之, 林康裕: パルス波地震動を受けるせん断弾性棒の応答特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 685 号, pp. 453-460, 2013. 3
- 36) 横林優, 横山重和, 紀本亨, 東田豊彦, 箭野憲一, 片村立太: 戸建て免震住宅の実大振動実験, その 1 実験概要と建物の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊, pp. 417-418, 2004. 8
- 37) 一般社団法人日本建築学会東海支部: 東北地方で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震の建物・地盤系強震データ集 (CD-ROM), 2013. 6

RELATIONSHIP BETWEEN DEFORMATIONS OF THE SEISMIC-ISOLATION LAYER OF HOUSES AND GROUND VIBRATION PROPERTIES IN MIYAGI PREFECTURE DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Takehiro TAKAHASHI and Nobuo FUKUWA***

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

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

The authors have investigated the relationship between deformations of the seismic-isolation layer of houses and ground vibration properties in Miyagi prefecture during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake.

From our investigations, we present the following conclusions.

- 1) Unlike the Ashigara valley, where resonant responses were seen, in Miyagi prefecture pulse responses were seen in many seismic-isolated houses. The maximum deformations among the houses were also largely different.
- 2) The approach level of peak period of H/V spectrum based on microtremor measurement and equivalent period of seismic-isolated houses and the maximum deformations are not well correlated.
- 3) Pulse waves in periods of one to two seconds were seen in the strong motion records at many adjacent observation points. The maximum deformations of the seismic-isolation layer have a very high co-relational relationship with the peak ground velocity (PGV) of pulse ground motion. When PGV exceeds approximately 90 kine the maximum deformation reaches the maximum limit. In most observation points, maximum deformations could be estimated roughly by J.M.A. seismic intensity.
- 4) Site amplification characteristics of the surface ground, like $AVS30$ and AF_{PGV} , had excellent correspondence to maximum deformations. But on the softer ground whose $AVS30$ is below around 250m/s, deformations were largely different. In the saturated sandy soil ground, the maximum deformation of the seismic-isolation layer tends to be significantly high and it is hard to estimate, thus requiring care in building.
- 5) Through Rigid-Plastic response analysis result using simulation waves such as Ricker wavelet, the maximum deformation is greatly influenced by pulse period, pattern and friction coefficient. By contrast, using a real pulse wave, there are situations where they have little influence on the maximum deformation.
- 6) In one example, oil dampers which are proportional to velocity effectively function to restrain deformation of the seismic-isolation layer against large scale pulse ground motion.

The relationship between nonlinear characteristics of the surface ground and deformation of the seismic-isolation layer need to be investigated further.

We conclude that seismometers need to be installed quickly at the site where nonlinear characteristics of the surface ground are predicted and that accumulating observation data is the top-priority.

(2014年5月9日原稿受理, 2014年7月17日採用決定)