

東北地方太平洋沖地震における宅地被害調査報告（仙台市および山元町）

Investigation Report on the Damages of Residential Land due to Tohoku Earthquake (Sendai City and Yamamoto Town)

兵 動 正 幸 (ひょうどう まさゆき)
山口大学 教授

鈴 木 素 之 (すずき もとゆき)
山口大学 准教授

野 田 翔 兵 (のだ しょうへい)
山口大学 大学院生

古 川 智 (ふるかわ さとし)
中電技術コンサルタント(株) 部長

岸 田 健太朗 (きしだ けんたろう)
中電技術コンサルタント(株) 課長

1. はじめに

地盤工学会中国支部では、地盤工学会2次調査団として、沿岸部と内陸部に分け調査を行った。本調査報告は、内陸の調査として特に、谷埋め盛土上の宅地被害状況について仙台市および山元町を調査し、発生地震動、盛土材の土質特性および常時微動観測による表層地盤構造の考察を行ったものである。調査日と調査場所は以下の通りである。

調査日：平成23年5月9日～11日

調査地：宮城県仙台市内、宮城県亘理郡山元町

調査に先立ち、地盤工学会第一次調査報告¹⁾を参考とともに、関西支部の第二次調査状況についてヒアリングを行い、調査対象とする宅地を絞り、盛土材のサンプリング、常時微動観測に時間を取りこととした。

本報告では、まず、地震と地震動の特徴について考察を加えるとともに、調査した主な宅地被害状況と盛土材の土質特性および常時微動観測による表層地盤構造の考察を加えている。

2. 地震と地震動

地殻内地震である1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震などと異なり、東北地方太平洋沖地震は海溝型の巨大地震であり、近年の宅地造成盛土の被害地震との違いについて考察した。

2.1 地震断層

1995年兵庫県南部地震の際に神戸市域を襲った強震動は、地殻内地震の横ずれ断層の破壊の進行方向で周期1～2秒の大きな長周期パルス波が発生し、宅地造成盛土の被害原因となった。一方、東北地方太平洋沖地震は東北地方に沈み込むプレートに沿った全長400～500kmの低角逆断層のずれに伴い長周期～短周期の幅広い帯域の地震動が長い継続時間で励起された。

2.2 余震

2011年3月11日14時46分にM9.0の本震が発生し、現地調査の5月9日までに発生したM>7の余震は、15

時8分にM7.4、15時15分にM7.7、15時25分にM7.5、4月7日23時37分にM7.1、4月11日17時17分にM7.0の5地震である。本震後もこのように大きな余震が発生しており、宅地被害も拡大したものと考えられる。

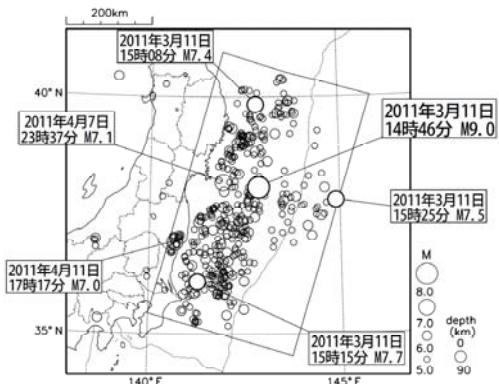
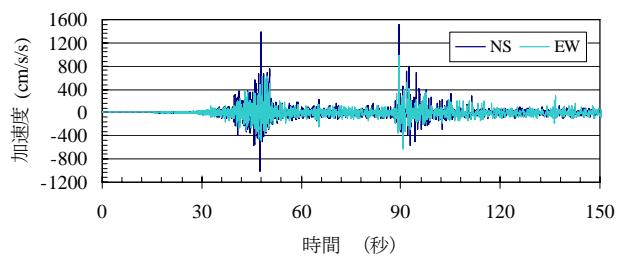


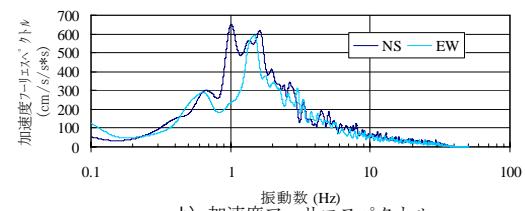
図-1 余震分布図²⁾

2.3 仙台市の地震動

GL-1,200mの地震基盤における地中観測点を有するKiK-net仙台の本震記録は取得されていないが、K-NET仙台では図-2に示すように最大加速度980～1,500cm/s²で1Hz前後が卓越する地表記録³⁾が観測された。



a) 加速度時刻歴



b) 加速度フーリエスペクトル

図-2 仙台市の地震記録³⁾

表-1に示すようにK-NET仙台の表層6.5m程度は軟弱な沖積地盤($V_s < 170 \text{ m/s}$)であり、地盤の非線形性を大きく受けている。

表-1 K-NET仙台の地盤構造³⁾

深度(m)	層厚(m)	土質区分	$V_p(\text{m/s})$	$V_s(\text{m/s})$	$\gamma(\text{g/cm}^3)$
0.85	0.85	埋土・盛土	260	70	1.63
1.65	0.80	粘性土	650	100	1.60
5.15	3.50	シルト	1600	170	1.59
6.50	1.35	礫質土	1600	170	1.97
14.0	7.50	礫質土	1900	440	2.00
15.45	1.45	岩盤	1900	440	2.00

2.4 山元町の地震動

今回、調査対象とした山元町太陽ニュータウンに近い位置にKiK-net山元があり、図-3、図-4のように地中(GL-205m)と地表の記録³⁾が観測された。

地中の記録は最大加速度 $150 \sim 220 \text{ cm/s}^2$ で 0.35 Hz 付近が卓越しているが、地表の記録は最大加速度 $850 \sim 870 \text{ cm/s}^2$ で $4 \sim 6 \text{ Hz}$ 秒付近が卓越している。KiK-net山元の地盤構造は、表-2に示すようにK-NET仙台より硬質な地盤であるが、 $V_s < 770 \text{ m/s}$ の低固結の凝灰質砂岩が地中観測点付近まで続いている。

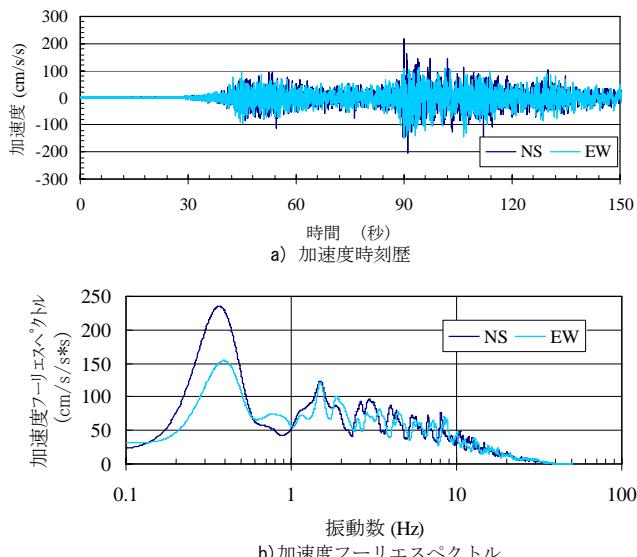


図-3 山元町の地中地震記録³⁾

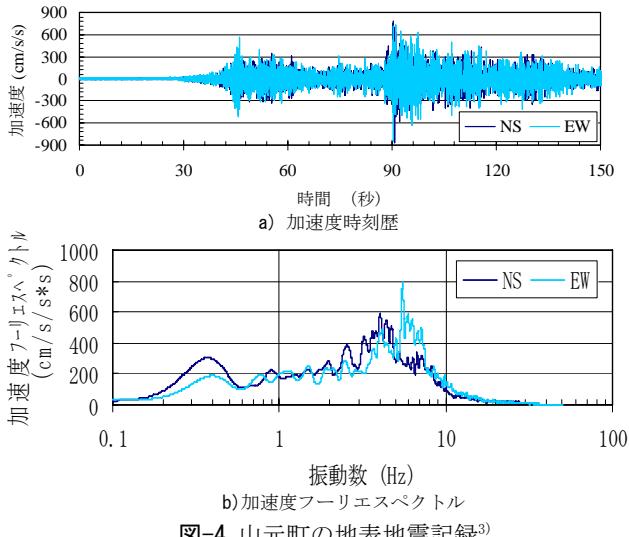


図-4 山元町の地表地震記録³⁾

表-2 KiK-net山元の地盤構造³⁾

深度(m)	層厚(m)	土質・岩種区分	$V_p(\text{m/s})$	$V_s(\text{m/s})$
2.0	2.0	粘性土	500	110
3.5	1.5	粘性土	1750	250
8.0	4.5	砂岩	1750	390
18.0	10.0	礫岩	1750	390
34.0	16.0	砂岩	1750	390
42.0	8.0	軽石凝灰岩	1830	590
114.0	72.0	凝灰質砂岩	1830	590
142.0	28.0	砂岩	1920	770
178.0	36.0	凝灰質砂岩	1920	770
208.0	30.0	シルト	1920	770

2.5 1995年兵庫県南部地震との比較

1995年兵庫県南部地震のJMA神戸の記録⁴⁾を時刻歴波形の比較のため図-5に示すが、図-2、図-4に示す今回の地表地震動の継続時間が非常に長いことが理解できる。また、図-6には、減衰定数5%の加速度応答スペクトルの比較を示す。JMA神戸に比べ、K-NET仙台とKiK-net山元の記録には短周期成分が多く、KiK-net山元には1~2秒の長周期成分が少なく3秒付近の成分が多い。

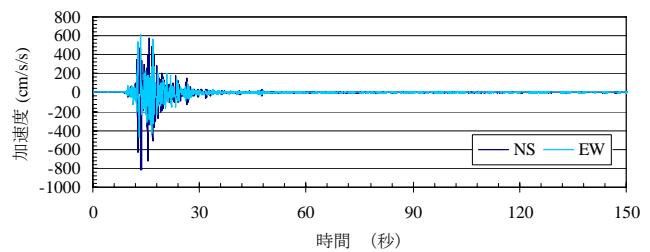
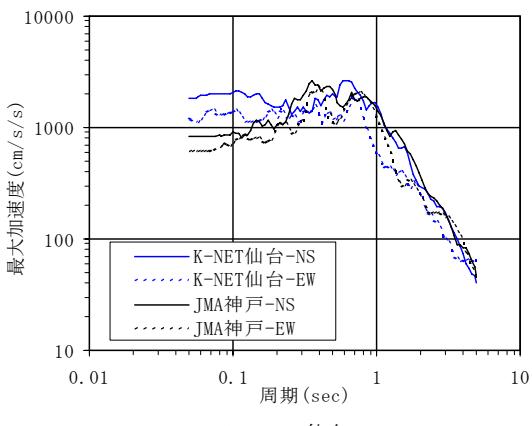


図-5 時刻歴波形(兵庫県南部地震 JMA神戸⁴⁾)



a) K-NET 仙台

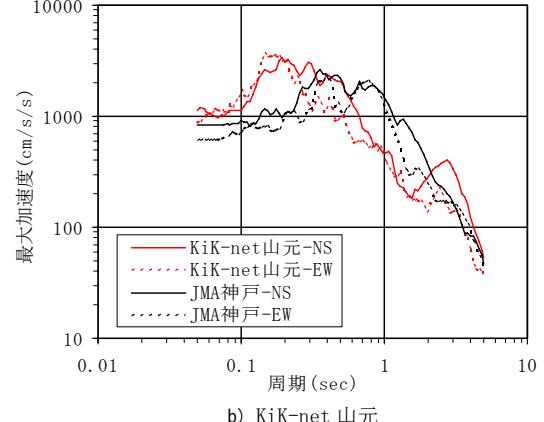


図-6 加速度応答スペクトル($h=5\%$)の比較

3. 宅地被害状況

仙台市の被災宅地危険度判定による宅地被害状況報告⁵⁾を参考に、仙台市内の大規模谷埋め盛土における被害宅地として緑ヶ丘、折立、双葉ヶ丘の3箇所を、長大の法面を含む盛土の被害宅地として北中山と南光台を、腹付け盛土の被害宅地として桜ヶ丘を、その他の被害宅地として東黒松を調査対象とした。さらに、地盤工学会第一次調査報告を参考に、山元町太陽ニュータウンを調査対象とした。ここでは、調査対象箇所のうち、被害規模が大きく盛土材のサンプリング、常時微動観測を実施した4箇所について報告する。

3.1 仙台市内の大規模谷埋め盛土被害（折立）

青葉区折立では図-7に示す急傾斜の造成地において、被害状況の調査、盛土材のサンプリング（3箇所）、常時微動観測（3箇所）を実施した。

図-8に示す「宅地地盤図データ」による谷埋め盛土部の宅地や道路に写真-1、2に示すような激しい地盤変状が確認され、写真-3のような多数の家屋被害が発生した。調査時には居住者の方に被害の激しい宅地を案内してもらい、図-7に示す旧谷筋部や切盛境界部に地盤変状が集中しているとの説明であった。



図-7 調査位置（折立）(Google mapの写真使用)

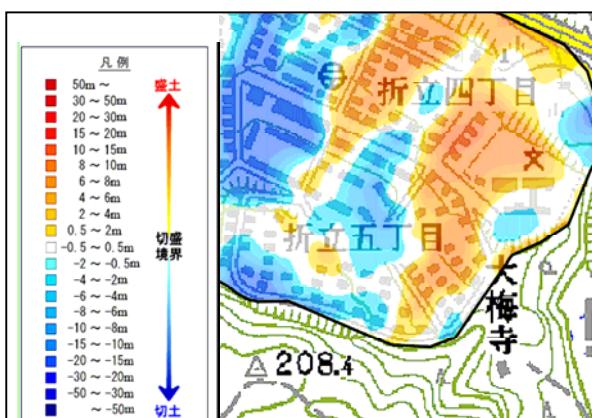


図-8「宅地地盤図データ」（折立）⁶⁾



写真-1 宅地の被害（折立）



写真-2 道路の被害（折立）



写真-3 家屋の被害（折立）

図-7に示す赤丸の位置で盛土材のサンプリングを実施しており、粒度分布を図-9に示す。採取した試料はやや粘性のある細粒分を20%程度含む風化土であったが、液状化の可能性もある盛土材であることが分かる。ここでの崩壊は盛土斜面の滑り的崩壊であった。盛土内への地下水の流入と地震による間隙水圧の上昇による結果と思われる。

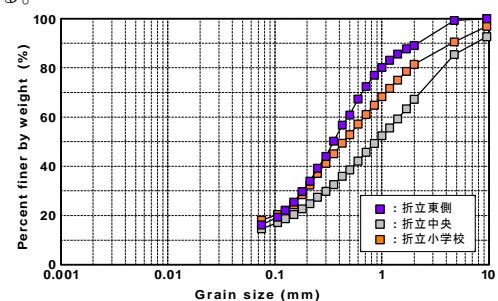


図-9 採取試料の粒度分布曲線（折立）

図-7に示す黄丸の位置で常時微動観測を実施した。計測機器は、固有周期1秒の速度計として物探サービス(株)によって製作された常時微動計 GEONET1-2S3Dである。微動計の周波数特性は地盤の卓越周波数 1~20Hz (卓越周期0.05~1秒)においてフラットな特性を有するため、この範囲の観測データを採用した。観測時間は1箇所当たり5分~10分とし、ノイズのない2~3区間のフーリエスペクトルを計算し、水平動スペクトルを上下動スペクトルで除したH/Vスペクトルを求めて地盤の卓越周期を推定した。

図-10に3箇所の観測記録のH/Vスペクトルを示し、表-3に読み取ったピーク周期をまとめた。折立小学校に近い観測点③のピーク周期が0.62秒と観測点①, ②に比べ周期が長いことから、谷が深く盛土が厚いと考える。

表-3 H/Vスペクトルのピーク周期

観測点	各区間のピーク周期(sec)		平均値(sec)
①	0.232	0.236	0.25
②	0.283	0.309	0.30
③	0.630	0.618	0.62

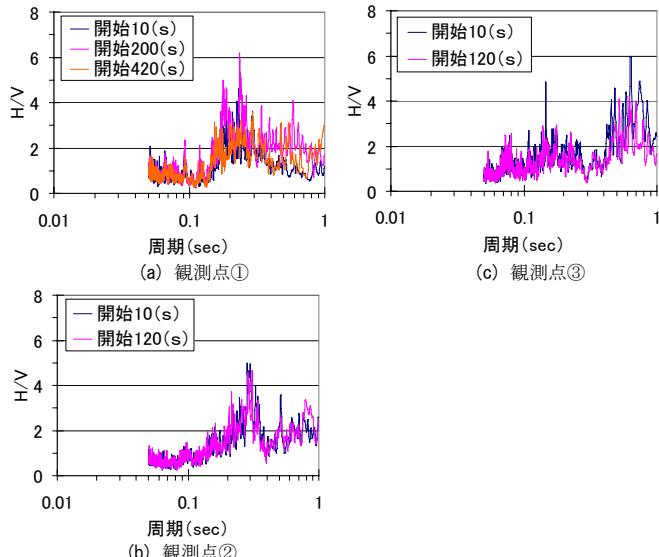


図-10 H/Vスペクトル (折立)

3.2 仙台市内の長大法面盛土の被害 (北中山)

泉区北中山では図-11, -12に示すようにフラットな造成盛土末端部の長大法面が崩壊しており、被害状況の調査、盛土材のサンプリング(2箇所)、常時微動観測(3箇所)を実施した。

長大法面は写真-4に示すように大規模崩壊が確認され、法肩部の外周道路には写真-5のような被害が発生した。

図-11に示す赤丸の位置で盛土材のサンプリングを実施しており、粒度分布を図-15に示す。採取した試料は細粒分を多く含んでおり、液状化の可能性は低い盛土材であることが分かる。

図-11に示す黄丸の位置で常時微動観測を実施した。図-13に3箇所の観測記録のH/Vスペクトルを示し、表-4に読み取ったピーク周期をまとめた。法肩部の外周道路における観測点①のピーク周期が0.63秒と観測点①, ②に比べ周期が長く盛土が厚いことが確認できる。



図-11 調査位置 (北中山) (Google map の写真使用)

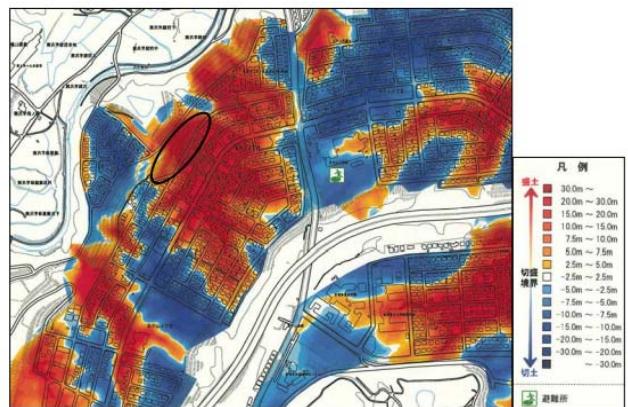


図-12 「宅地地盤図データ」 (北中山) ⁶⁾



写真-4 長大法面の被害 (北中山)



写真-5 外周道路の被害 (北中山)

表-4 H/V スペクトルのピーク周期

観測点	各区間のピーク周期 (sec)	平均値 (sec)
①	0.527	0.731
②	0.172	0.147
③	0.347	0.371

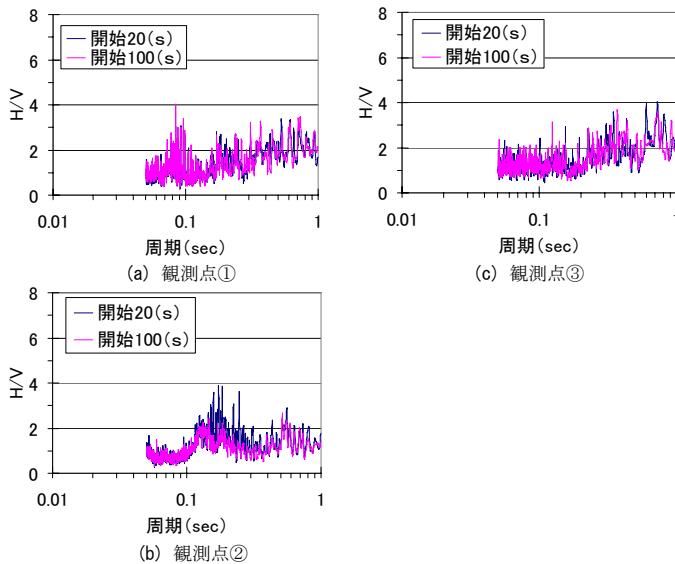


図-13 H/V スペクトル (北中山)

3.3 仙台市内の長大法面の被害 (南光台)

泉区南光台では図-14 に示すようにフラットな造成盛土末端部の長大法面が崩壊しており、被害状況の調査、盛土材のサンプリング (1箇所)、常時微動観測 (3箇所) を実施した。

長大法面は写真-6 に示すように大規模崩壊が確認され、法肩部の家屋には写真-7 のような被害が発生した。

図-14 に示す赤三角の位置で盛土材のサンプリングを実施しており、粒度分布を図-15 に示す。採取した試料は液状化の可能性のある盛土材であることが分かる。

図-14 に示す黄丸の位置で常時微動観測を実施した。図-16 に 3 箇所の観測記録の H/V スペクトルを示し、表-5 に読み取ったピーク周期をまとめた。盛土部の観測点①と切土部の観測点②においてはともにピーク周期が確認できず、盛土部の観測点①では 0.13 秒と短周期が卓越している。地山と盛土の S 波速度にコントラストが見られない地盤構造の可能性が考えられる。



図-14 調査位置 (南光台) (Google map の写真使用)



写真-6 長大法面の被害 (南光台)



写真-7 法肩部の家屋被害 (南光台)

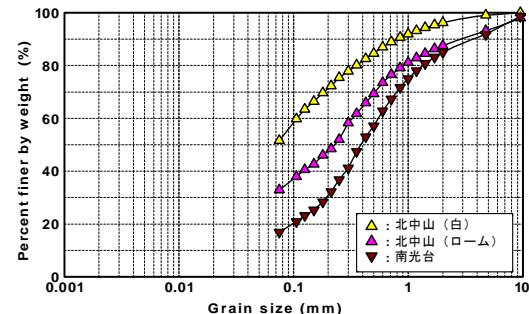


図-15 採取試料の粒度分布曲線 (北中山、南光台)

表-5 H/V スペクトルのピーク周期

観測点	各区間のピーク周期 (sec)	平均値 (sec)
①	—	—
②	—	—
③	0.130	0.137

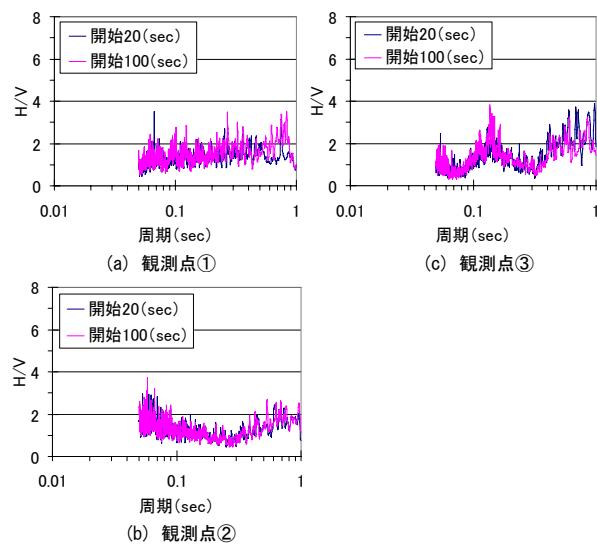


図-16 H/V スペクトル (南光台)

3.4 山元町の被害（太陽ニュータウン）

仙台市から南へ下り、亘理郡山元町の国道6号線沿いにある太陽ニュータウンにおいて、図-17に示す位置の被害状況の調査、盛土材のサンプリング（3箇所）、常時微動観測（5箇所）を実施した。

太陽ニュータウンは、丘陵地を切盛りにより造成したものであり、団地内5か所で崩壊が起こった。崩壊はいずれも、谷埋め盛土末端部や腹付盛土部で発生した。盛土勾配は1:1.5を基本としている。図-18に示す「宅地地盤図データ」による盛土部の宅地や道路に写真-8、-9、-10に示すような激しい地盤変状が確認され家屋被害が発生した。



図-17 調査位置（太陽ニュータウン）（Google map の写真使用）

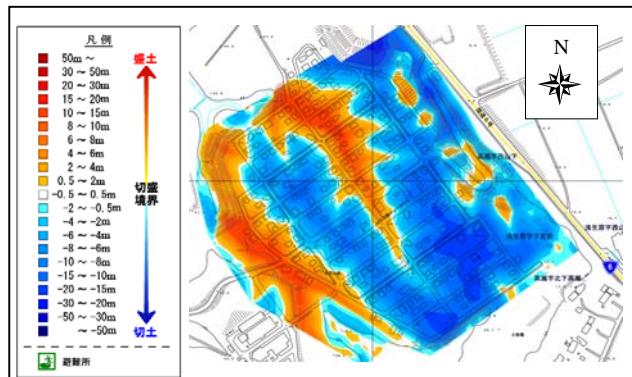


図-18 「宅地地盤図データ」（太陽ニュータウン）⁶⁾



写真-8 盛土法肩部の被害（常時微動観測点①付近）



写真-9 道路と宅地の被害（常時微動観測点③付近）



写真-10 道路と宅地の被害（常時微動観測点④付近）

丘陵地を構成する地山は、低固結の凝灰岩質砂岩で、表層部は風化し砂質土状を呈している。崩壊した東側、西側、北側の3斜面（図-17に示す赤丸の位置）から試料を採取し、粒度試験、締固め試験、排水単調せん断試験および非排水繰返し三軸試験を行った。

採取試料の粒度試験結果を図-19に示す。いずれも粒度分布は良好で、20%強の細粒分を有する砂質土である。

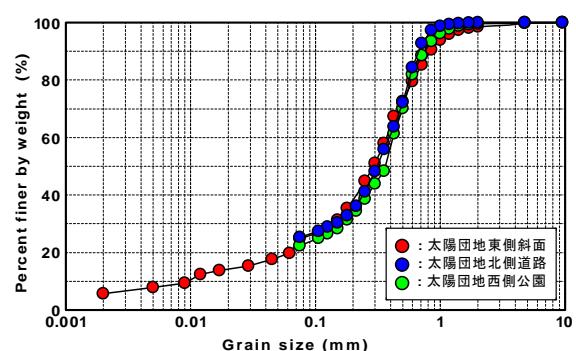


図-19 採取試料の粒度分布曲線（太陽ニュータウン）

採取した試料の締固め曲線を図-20に示すが、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.82\text{g/cm}^3$ となった。そのため、ここでは力学試験に用いる供試体作成時の密度を、締固め度90%相当の乾燥密度 ρ_d となるように作成した。

再構成試料を用いた非排水繰返し三軸試験の結果を図-21に示す。設定した密度によると思われるが、20%強の細粒分を有する砂質土としては、繰返せん断強度が低い傾向にある。崩壊は火山灰土である盛土材の脆弱

性によるところが大きいと思われる。地震発生時の地下水位の位置が明確ではないが、地震時の繰返せん断により容易に液状化を起こす材料であり、有効応力の低下により滑りが引き起こされたものと推察される。

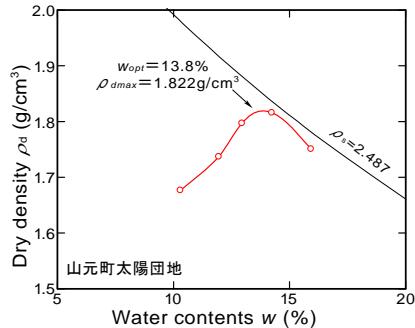


図-20 締固め試験結果（太陽ニュータウン）

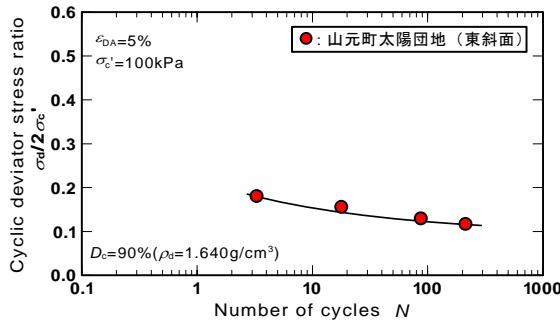


図-21 非排水繰返し三軸試験結果（太陽ニュータウン）

図-17 に示す黄丸の位置で常時微動観測を実施した。

図-22 に 5箇所の観測記録の H/V スペクトルを示し、表-6 に読み取ったピーク周期をまとめた。いずれの観測点も盛土部であり、観測点②を除くとピーク周期が 0.5 秒以上と比較的周期が長く盛土が厚いことが確認できる。

表-6 H/V スペクトルのピーク周期

観測点	各区間のピーク周期 (sec)	平均値 (sec)
①	0.836	0.589
②	0.204	0.173
③	0.442	0.648
④	0.706	0.635
⑤	0.614	0.683

4.まとめ

谷埋め盛土上の宅地被害状況について仙台市および山元町を調査した結果をもとに、発生地震動、盛土材の土質特性および常時微動観測による表層地盤構造の考察を行い得られた知見を以下に示す。

- 仙台市で観測された地震動記録は、最大加速度 980 ~1,500cm/s²で 1Hz 前後が卓越している。
- 山元町で観測された地震動記録は、最大加速度 850 ~870 cm/s²で 4~6Hz 秒付近が卓越している。
- 1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸の記録と比較し、今回の地表地震動の継続時間が非常に長い。また、JMA 神戸に比べ、K-NET 仙台と KiK-net 山元の記録には短周期成分が多く、KiK-net 山元には 1~2 秒の長周期成分が少なく 3 秒付近の成分が多い。
- 青葉区折立のように地山の勾配が急な谷埋め盛土(急傾斜造成地)の滑動崩落は盛土の上流部から末端部までの広範囲で宅地や道路の地盤変状が発生している。

- 泉区北中山、泉区南光台ではどちらもフラットな造成谷埋め盛土の長大法面が滑動崩落している。
- 山元町の太陽ニュータウンでは谷埋め盛土末端部や腹付盛土部が滑動崩落している。

今後、さらに被害原因について分析を進めるために、以下の検討項目を実施する予定である。

- 被害造成地近傍の地震観測点から造成地の工学的基盤における地震動を推定する。
- 被害造成地の盛土材について、初期せん断応力を考慮した非排水繰返し三軸試験を実施し、動的強度を求める。
- 推定した工学的基盤の地震動と初期せん断応力を考慮した動的強度を用いて、被害の再現解析を実施する。

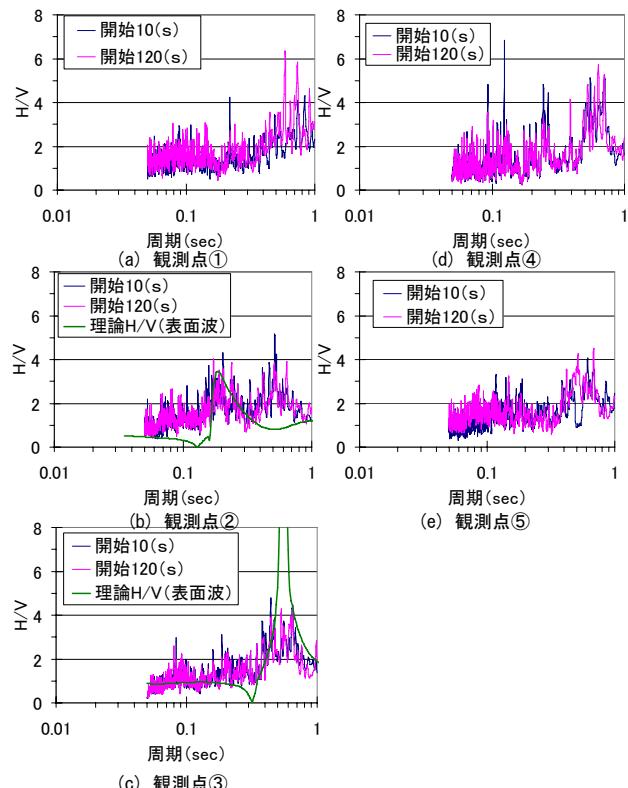


図-22 H/V スペクトル（太陽ニュータウン）

参考文献

- 古閑潤一・若井明彦：宮城県内陸部の被害、地盤工学会、東北地方太平洋沖地震災害調査報告会、2011。
- 気象庁：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震余震分布、<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET, KiK-NET）, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/> <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 神戸海洋気象台：<http://www.jma-net.go.jp/kobe/>
- 仙台市：被災宅地危険度判定による宅地被害状況報告
- 復建技術コンサルタント：1/25,000造成宅地地盤図、2008

（原稿受理 2011.7.6）