

既往の大規模地震における仙台市宅地造成斜面での地震動と滑動変形量の評価

ニゲマン カタリナ¹・秦 吉弥²・常田 賢一³・門田 浩一⁴・魚谷 真基⁵

¹ 学生会員 アーヘン工科大学(大阪大学) (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: katharina.niggemann@rwth-aachen.de

² 正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³ フェロー会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴ 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 地盤技術部 (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

E-mail: hirokazu.kadota@os.pacific.co.jp

⁵ 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: muotani@civil.eng.osaka-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震において被災、および2005年宮城県沖地震において無被災であった仙台市泉区南光台6丁目の宅地造成斜面に着目し、被災・無被災の再現解析を実施した。具体的には、まず、現地で地震観測などを行い、得られた記録などに基づいて本震時の地震動を推定した。そして、推定地震動を入力波とした宅地造成斜面のNewmark法に基づく滑動変形量解析ならびに動的有効応力解析を実施した。その結果、Newmark法に基づく解析では、被災・無被災を定性的には評価できるが残留変形量の実績値を再現するには至らなかったこと、一方で、動的有効応力解析では、被災・無被災の評価だけでなく残留変形量の実績値についても再現可能であることを示した。

Key Words : *Slope failure, strong motion estimation, Newmark's sliding block method, dynamic FEM analysis, residual displacement, damage and non-damage simulation*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_{J}9.0$)において被災した幾つかの仙台市内の宅地造成地(例えば、仙台市太白区緑ヶ丘および仙台市泉区南光台など)は、1978年宮城県沖地震($M7.4$)の際にも被災している¹²⁾。仙台市泉区南光台6丁目の主谷の出口に位置する宅地造成斜面(以後、対象斜面と呼ぶ)では、1978年宮城県沖地震の強震動の作用により、斜面崩壊を伴う被害が発生し、その後、擁壁などの対策工が施され、2005年8月16日11時46分に発生した宮城県沖を震源とする地震($M7.2$) (以後、2005年宮城県沖地震と呼ぶ)の際には、無被災であった。しかしながら、2011年東北地方太平洋沖地震による強震動の作用により斜面崩壊を伴う深刻な被害が発生^{3,4)}した。

これまで著者らは、宅地造成地(一関市館ニュータウン⁵⁾、仙台市泉区南光台2,3,4,7丁目⁶⁾、仙台市太白区緑ヶ丘団地⁷⁾、仙台市青葉区折立団地⁸⁾、仙台市青葉区西花苑⁹⁾、宮城県山元町太陽ニュータウン¹⁰⁾、白石市緑が丘団

地¹¹⁾、福島市伏拝あさひ台団地¹²⁾、茨城県東海村南台団地¹³⁾など)に作用した2011年東北地方太平洋沖地震時における強震波形を評価している。その際、いずれのケースも被害が発生した2011年東北地方太平洋沖地震を主に評価対象としており、無被災であった大規模地震を評価対象としているケース¹¹⁾は少ない。しかしながら、対象斜面では、上述のように地震毎に被害の程度が異なっていることから、被害が発生した地震(本稿では、2011年東北地方太平洋沖地震を対象とする)だけでなく、被害が発生しなかった地震(本稿では、2005年宮城県沖地震を対象とする)において、対象斜面に作用した地震動を評価することは重要^{14,15)}である。

図-1は、宅地造成斜面の耐震性能評価の信頼性向上を図るためのフロー¹⁶⁾である。図-1に示すように、既往の大規模地震などにおいて被災した(あるいは無被災であった)宅地造成斜面に対して、現時点で採用可能な被害予測手法(例えば、動的FEM解析など)を適用し、推定された被害・無被災と実際の被害・無被災を比較し、被害

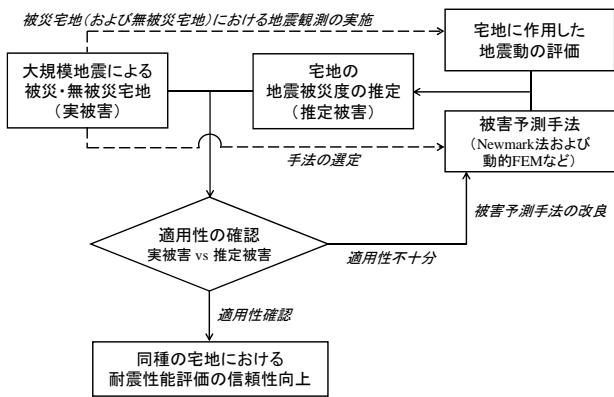


図-1 宅地造成斜面の耐震性能評価の信頼性向上策

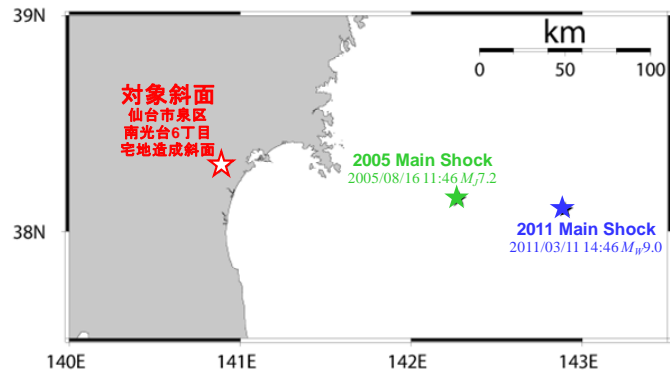


図-2 対象斜面と既往大地震との位置関係



写真-1 2011年東北地方太平洋沖地震による対象斜面の被災¹⁹⁾



図-3 対象斜面の亀裂分布³⁾と地震被災状況¹⁹⁾

表-1 対象斜面における残留変位の実績値と推定値の比較一覧

	2005 Main Shock	2011 Main Shock
Actual results	Virtually Zero	70 to 150 cm
Newmark's method	1.8 cm	35.8 cm
Dynamic FEM analysis	12.0 cm	111.0 cm

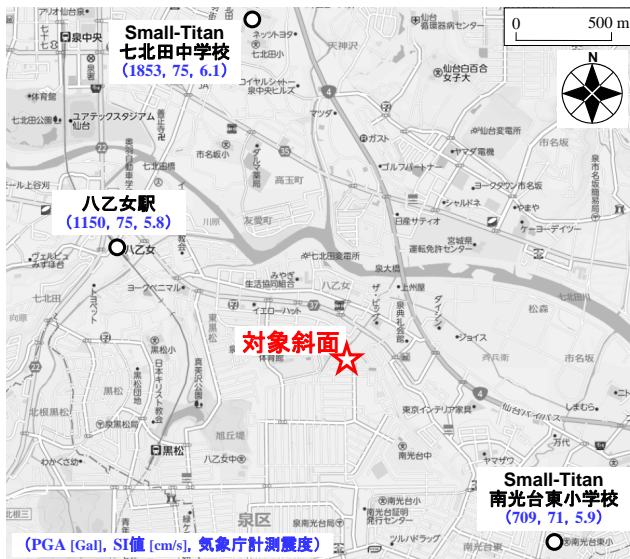


図-4 対象斜面周辺の本震観測記録の分布

予測手法の適用性を確認する。適用性が十分でない場合には、その原因を究明し、被害予測手法の改良につなげる。こうしたプロセスを繰り返すことで、同種の宅地造

成斜面の耐震性能評価の信頼性が向上すると考えられる。すなわち、2011年東北地方太平洋沖地震および2005年宮城県沖地震(以後、これら2つの大規模地震をまとめて既往大地震と呼ぶ)における対象斜面(図-2参照)での推定地震動を入力した動的解析を実施し、対象斜面の被災・無被災を再現することも重要¹⁷⁾である。

以上の背景を踏まえ、本研究では、まず、対象斜面近傍において地震観測を実施し、得られた記録に基づいてサイト特性を評価した。次に、評価したサイト特性に基づいて、2011年東北地方太平洋沖地震および2005年宮城県沖地震において対象斜面に作用した強震波形をそれぞれ評価した。最後に、評価した地震動を入力波とした、(I) Newmark法¹⁸⁾に基づく滑動変形量の評価、および(II) 動的有効応力解析に基づく残留変形量の評価をそれぞれ行うことで、対象斜面において観測された実際の変形量と比較することによって、被災・無被災の再現を試みた。

2. 対象斜面の概況

南光台(対象斜面)は、昭和37年から60年にかけて造成された大規模宅地であり、2011年東北地方太平洋沖地震による強震動の作用によって、写真-1に示すとおり、斜面崩壊を伴う深刻な被害が発生した。図-3は、対象斜面

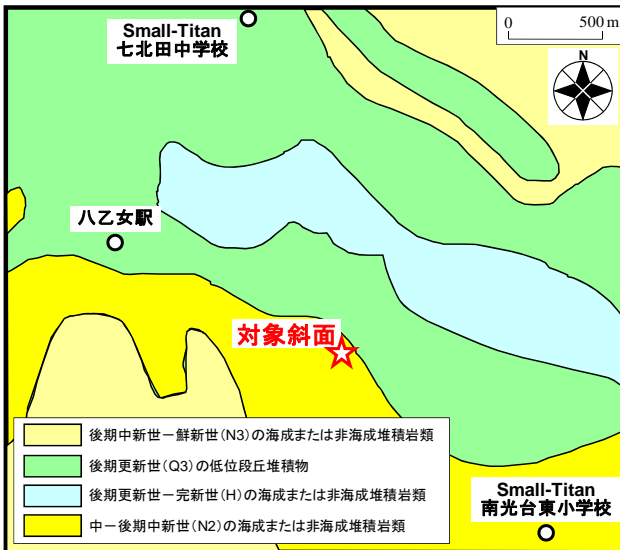


図-5 対象斜面周辺の地質図

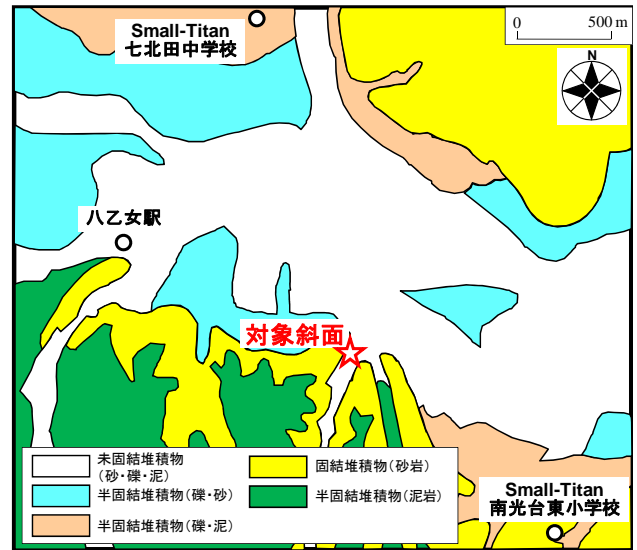


図-6 対象斜面周辺の表層地質図

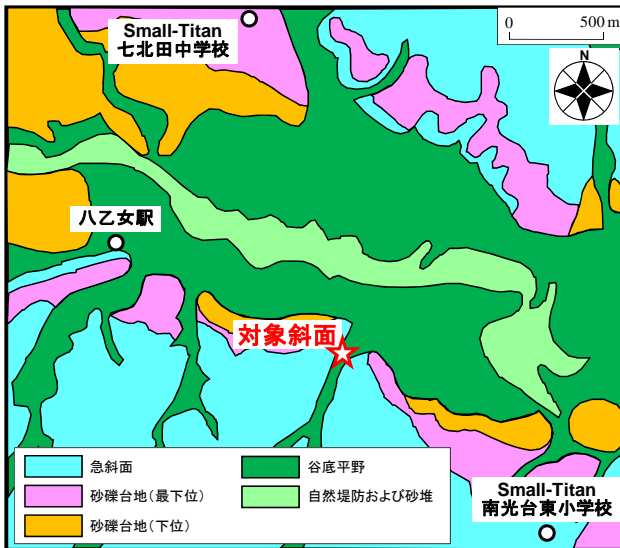


図-7 対象斜面周辺の地形分類図

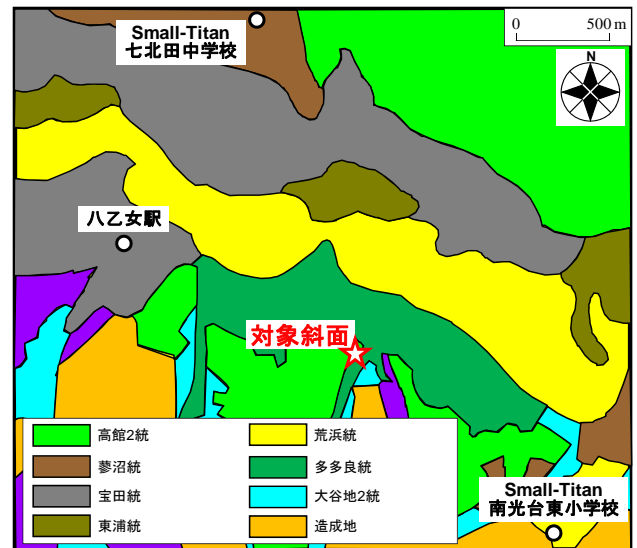


図-8 対象斜面周辺の土壌図

の亀裂分布図³⁾に対して、著者ら¹⁹⁾による現地踏査の状況写真を追記したものである。図-3(枠内写真)に示すように、法尻付近では、盛土と地山との境界にコンクリート製の階段が設置されていたが斜面崩壊による大規模な変状を生じているだけでなく、1978年宮城県沖地震後に施工された擁壁は側方移動している。一方で、法肩付近では、斜面崩壊に伴い法肩近傍にあった住家の柱が損傷している。なお、2011年東北地方太平洋沖地震前後の測量結果に基づく対象斜面の法肩における水平方向の残留変形量は、表-1に示すとおり、70～150cm程度であったことが報告²⁰⁾されている。

図-4は、2011年東北地方太平洋沖地震における対象斜面周辺の強震記録の分布を示す。図-4には、各観測点における3成分合成最大加速度値PGA(Gal)、N-S成分のSI値(cm/s)²¹⁾、気象庁計測震度²²⁾も同時に示している。図-4に示すように、対象斜面周辺には、Small-Titan観測点(2地

点²³⁾と八乙女駅(震度計)²⁴⁾の既存強震観測点があるものの、PGAの値に非常に大きな差異が生じており、両観測点間におけるサイト特性の差異が示唆される。

図-5、図-6、図-7、図-8は、(独)産業技術総合研究所による地質図²⁵⁾、および国土交通省国土政策局国土情報課による表層地質図²⁶⁾、地形分類図²⁶⁾、土壌図²⁶⁾に対して、対象斜面とその周辺の強震観測点による位置情報(図-4参照)を重ね合わせたものである。図-5、図-6、図-7、図-8に示すように、3観測点の位置相当における地形・地質等の種別はまちまちとなっており、強震記録の差異に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

したがって、比較的近接している観測点同士(対象斜面を取り囲む観測点同士)でも、本震時(既往大地震時)における地震動特性に差異が生じており、対象斜面と周辺観測点との間に地震動特性の差異が生じている可能性は否定できない。既往大地震時に対象斜面に作用した強

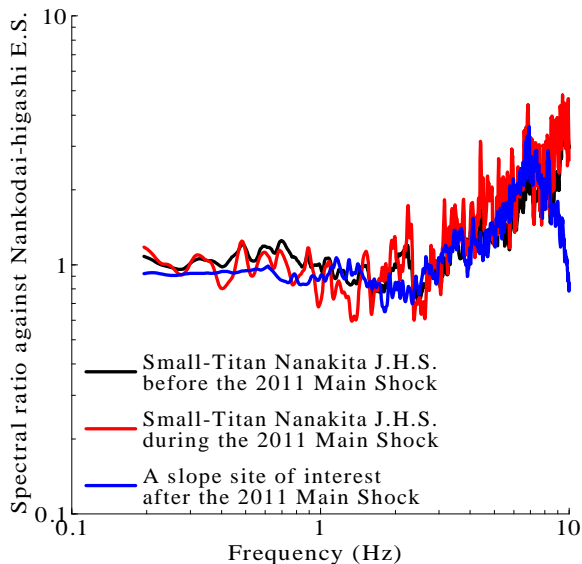


図-9 Small-Titan南光台東小学校の観測波に対するスペクトル比

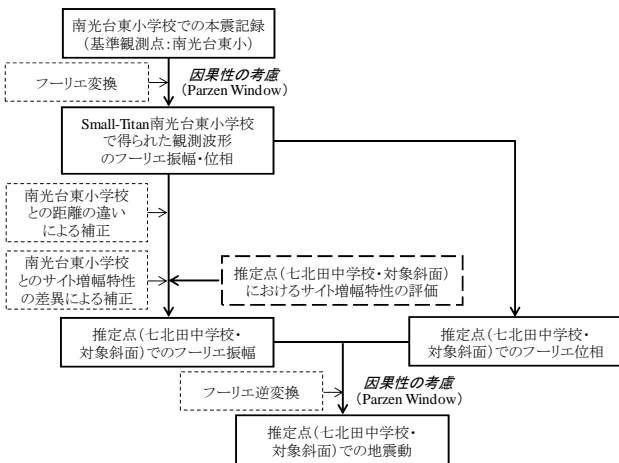


図-10 丸山の方法^{31),32),33)}による地震動推定フロー

震動は、対象斜面におけるサイト特性を評価した上で推定することが肝要である。

3. 入力地震動の評価

(1) 余震観測

本研究では、対象斜面近傍(法尻付近)において地震計を設置し、地震観測を実施した。2012年11月27日～2013年2月27日の3か月間であり、地震計としてはボアホール型広帯域加速度計を採用した。地震計の詳細については、文献27)を参照されたい。地震観測システムや観測期間は、南光台2,3,4,7丁目での地震観測²⁸⁾と同様である。また、観測条件として、サンプリング周波数は100Hz、観測方向は3成分(N-S方向、E-W方向、U-D方向)とし、トリガー加速度レベルは設定せずに常時観測を継続するシステムを採用した。なお、得られた主要な地震観測記録の一覧については、文献28)と同様であり参照されたい。

(2) スペクトル比の評価

図-9は、Small-Titan南光台東小学校で得られた観測地震動のフーリエスペクトルに対する比較を行ったものである。比較対象としては、①Small-Titan七北田中学校での観測地震動(ただし、2011年東北地方太平洋沖地震前)のフーリエスペクトル、②Small-Titan七北田中学校での観測地震動(ただし、2011年東北地方太平洋沖地震時)のフーリエスペクトル、③対象斜面での観測地震動(ただし、2011年東北地方太平洋沖地震後)のフーリエスペクトルである。ここに、フーリエスペクトルの計算には、0.05HzのParzen Windowを考慮している。なお、スペクトル比(①Small-Titan七北田中学校(本震前)、②Small-Titan七北田中学校(本震時)、③対象斜面(本震後)／Small-Titan南光台東小学校(上記①～③において共通))を計算する際には、両地点の距離の違いによる補正^{29),30)}を施し、観測地震数によってスペクトル比を平均化している。

図-9に示すとおり、対象斜面におけるスペクトル比に着目すると、1.0付近で推移していないこと、およびSmall-Titan七北田中学校でのスペクトル比と類似していないことから、Small-Titan南光台東小学校ならびにSmall-Titan七北田中学校で得られた観測地震動を、対象斜面に作用した本震時(既往大地震時)の地震動として直接転用できないことが読み取れる。一方で、Small-Titan七北田中学校のスペクトル比に着目すると、本震前と本震時において比較的良い一致を示していることから、Small-Titan南光台東小学校における本震観測記録(既往大地震時の観測記録)のフーリエスペクトルに対して、余震等の中小地震による観測記録に基づく対象斜面でのスペクトル比を掛け合わせることによって、本震時(既往大地震時)における対象斜面での推定地震動のフーリエスペクトルを評価できる可能性が高いことが示唆される。

(3) 地震動推定手法とその適用性

本研究では、丸山の手法^{31),32),33)}を用いて、対象斜面およびその周辺の強震観測点であるSmall-Titan七北田中学校(以後、二地点まとめて推定点と呼ぶ)における地震動の推定を行った。以下、2011年東北地方太平洋沖地震を対象地震とした場合を例に、地震動推定の流れを示す(2005年宮城県沖地震を対象地震とした場合においても地震動推定の流れは同様³⁴⁾である)。

図-10に地震動推定フローを示す。具体的には、まず、基準観測点としてSmall-Titan南光台東小学校を選定した。次に、基準観測点での本震観測記録(図-11(a), (b)参照)によるフーリエ振幅を計算し、そのフーリエ振幅に対してスペクトル比(推定点／基準観測点：図-9参照)を掛け合わせることによって、推定点における本震時のフーリエ振幅を推定した。その際、水平2成分それぞれについて

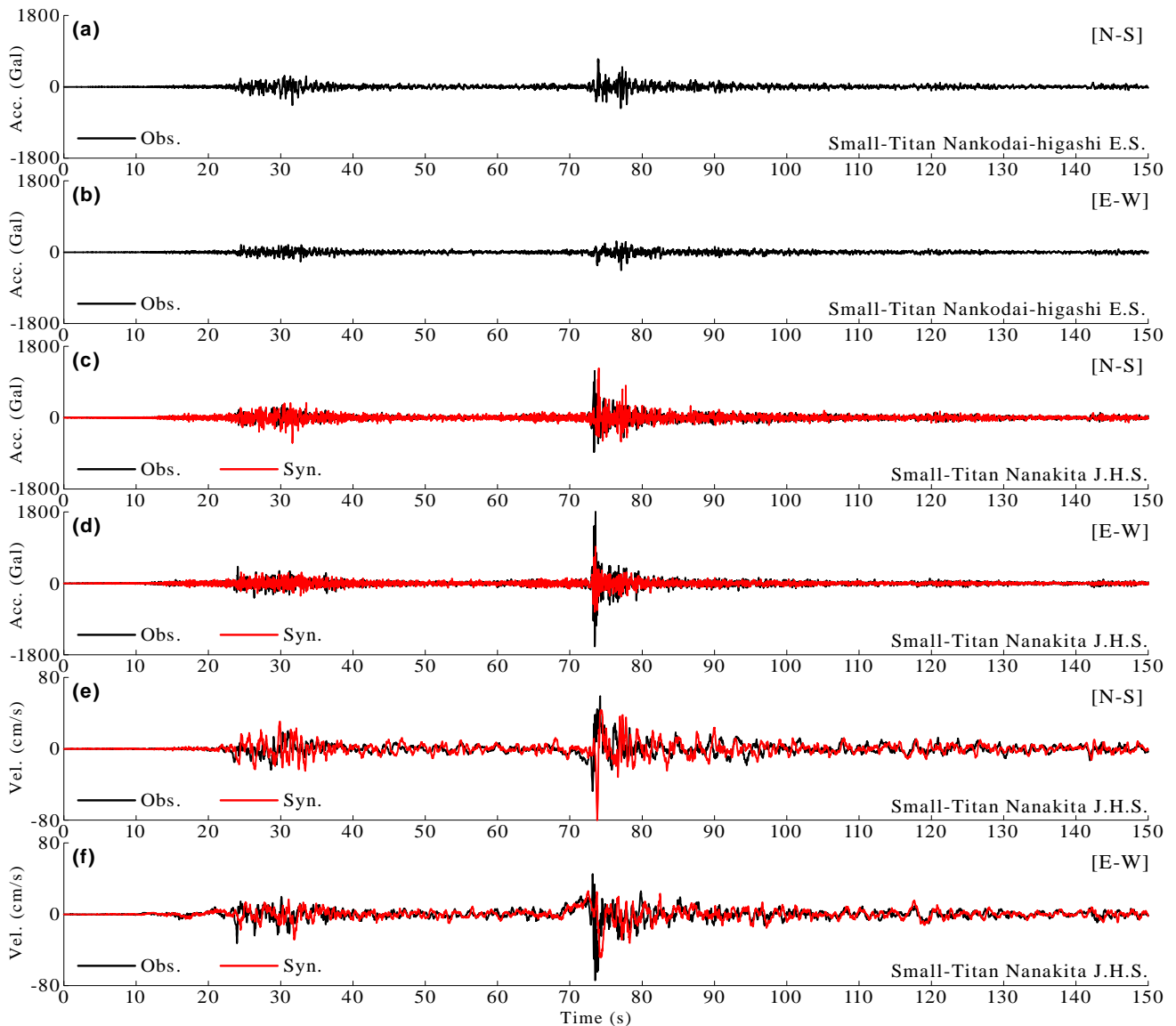


図-11 基準観測点での観測波(同図(a), (b))と、地震動推定手法の適用性確認(同図(c), (d), (e), (f))

同様の計算を行った。

最後に、得られたフーリエ振幅と、基準観測点での本震記録のフーリエ位相を組み合わせ、因果性を考慮したフーリエ逆変換³⁵⁾を行うことで、推定点における本震時の地震動を推定した。なお、対象斜面における観測記録の中に宮城県沖を震源とする最適な中小地震によるものが含まれていなかったため、本稿ではサイト位相特性の置換³⁶⁾³⁷⁾の実施を見送った。

図-11(c), (d), (e), (f)にSmall-Titan七北田中学校における本震時の加速度・速度波形(観測波)とその強震動推定結果(推定波)を比較したものを示す。なお、ここでは、両波形ともにバンド・パスフィルタなどの波形処理は行っていない。さらに、絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトル(ともに減衰定数5%)を観測波と推定波で比較したものを図-12(a), (b), (c), (d)に示す。図-11(c), (d), (e), (f)および図-12(a), (b), (c), (d)に示すとおり、推定

波は比較的良好に観測波を再現できている。すなわちこれは、対象斜面に対して丸山の手法^{31),32),33)}を適用すれば、本震時における対象斜面に作用した地震波形を一定の精度で推定できる可能性が高いことを示唆している。

(4) 対象斜面における地震動の評価

図-13(a), (b), (c), (d)は、2011年東北地方太平洋沖地震時における対象斜面での推定加速度波形および推定速度波形である。さらに、2005年宮城県沖地震時における対象斜面での推定加速度波形および推定速度波形(3.3)と同様の方法を用いて推定³⁴⁾を図-13(e), (f), (g), (h)に示す。図-13(a), (b), (c), (d)と図-13(e), (f), (g), (h)を比較すると、2011年東北地方太平洋沖地震による推定地震動のほうが、2005年宮城県沖地震による推定地震動よりも加速度・速度振幅が大きく、地震動の継続時間も長くなっている。

図-12(e), (f), (g), (h)は、2011年東北地方太平洋沖地震時

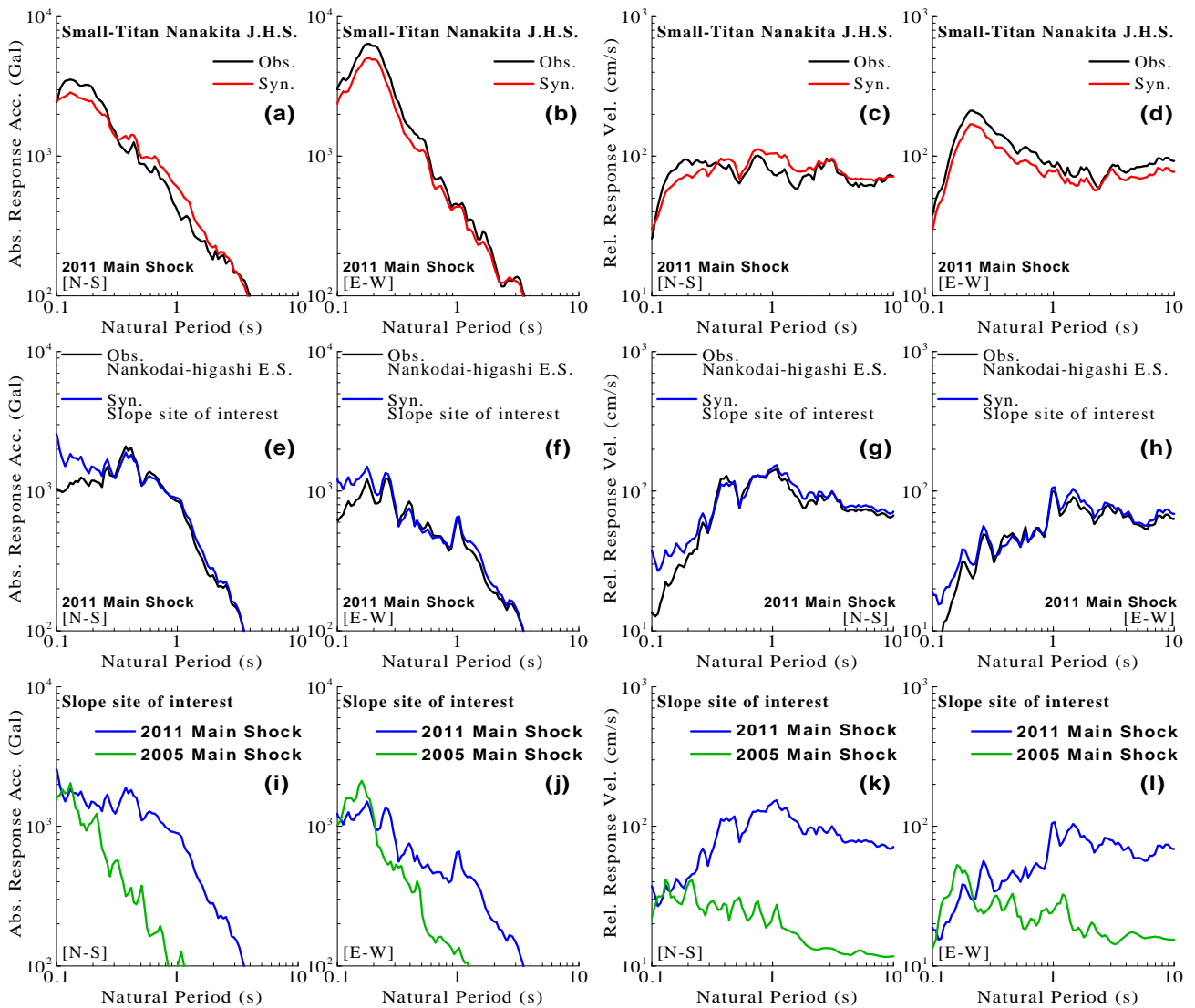


図-12 地震動推定手法の適用性確認(同図(a), (b), (c), (d)), および推定地震動の応答スペクトルの特徴(同図(e)~(l))

におけるSmall-Titan南光台東小学校での観測地震動と対象斜面での推定地震動の応答スペクトル(ともに減衰定数5%)を比較したものである。図-12(e), (f), (g), (h)に示すように、3.(2)で述べた両地点間のサイト増幅特性の差異に起因して0.1~0.3sの周期帯域において、対象斜面での応答スペクトルがSmall-Titan南光台東小学校での応答スペクトルを連続的に上回っているものの、0.3sよりも長周期帯では両地点の応答スペクトルは概ね類似している。

図-12(i), (j), (k), (l)は、2011年東北地方太平洋沖地震と2005年宮城県沖地震における対象斜面での推定地震動の応答スペクトル(ともに減衰定数5%)を比較したものである。図-12(i), (j), (k), (l)に示すように、0.1~0.2sの周期帯域を除いて、2011年東北地方太平洋沖地震による応答スペクトルが2005年宮城県沖地震による応答スペクトルを概ね包絡している。

以上の結果によれば、2005年宮城県沖地震と比較して2011年東北地方太平洋沖地震では、対象斜面に非常に大

きな地震動が作用し(図-13および図-12(i), (j), (k), (l)参照), その地震動のレベルは、周辺の観測点であるSmall-Titan南光台東小学校で得られた本震記録よりも比較的大きかったものと推察される。4.および5.では、本章で評価した推定波を用いて対象斜面における耐震検討(滑動および残留変形量の評価)を行った結果について述べる。

4. Newmark法による滑動変形量の評価

図-14は、仙台市宅地保全審議会技術専門委員会³⁸⁾による対象斜面の2次元盛土モデルである。図-14に示すとおり、対象斜面は、砂礫層Gs、沖積砂質土層As、沖積粘土層Acからなる基礎地盤上に造成された盛土(B1層およびB2層)であり、地下水位が盛土内に形成され、非円弧のすべり面が推定されている。以下、Newmark法¹⁸⁾による滑動変形量解析の流れについて示す。

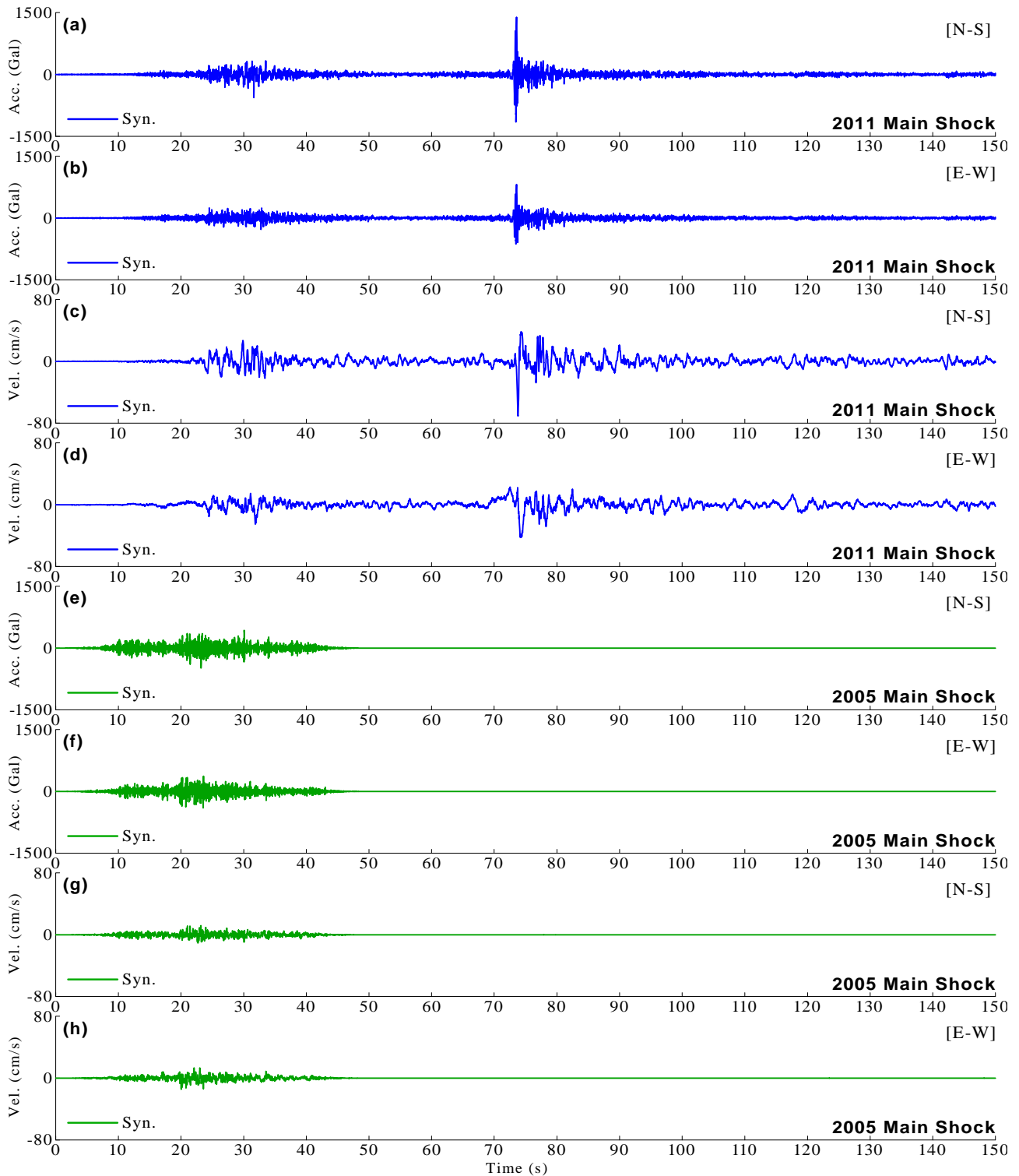


図-13 2005年宮城県沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震による対象斜面での推定地震動

まず、盛土内における地盤物性値^{39),40)}については、対象斜面および周辺の造成宅地での各種地盤調査結果に基づき、単位体積重量 γ を $\gamma=19\text{kN/m}^3$ (B1層)および $\gamma=20\text{kN/m}^3$ (B2層)、内部摩擦角 ϕ を $\phi=25\text{deg}$.(B1層)および $\phi=29\text{deg}$.(B2層)と設定した。また、粘着力 c は、粘着力 c と地盤深度 h の経験式($c(\text{kPa})=h(\text{m})$)^{41),42)}に基づき、粘着力 c の値を地盤深度1m毎に与えた。

次に、修正Janbu法⁴³⁾による斜面安定計算を行い、対象斜面のすべり安全率が1.0となる際の水平震度 k_H (降伏加速度 A_f)を0.2965(296.5Gal)と算定した。

最後に、図-15(a)および図-15(b)に示すように、2011年東北地方太平洋沖地震および2005年宮城県沖地震による対象斜面(地盤地表面・法尻相当)での推定加速度波形のN-SおよびE-W成分(図-13(a), (b), (e), (f)参照)を主要滑動方

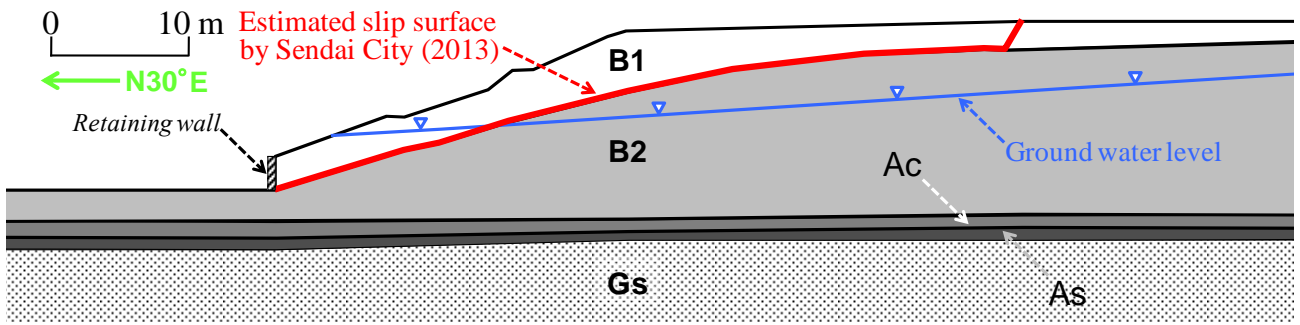


図-14 対象斜面の2次元盛土モデル³⁸⁾

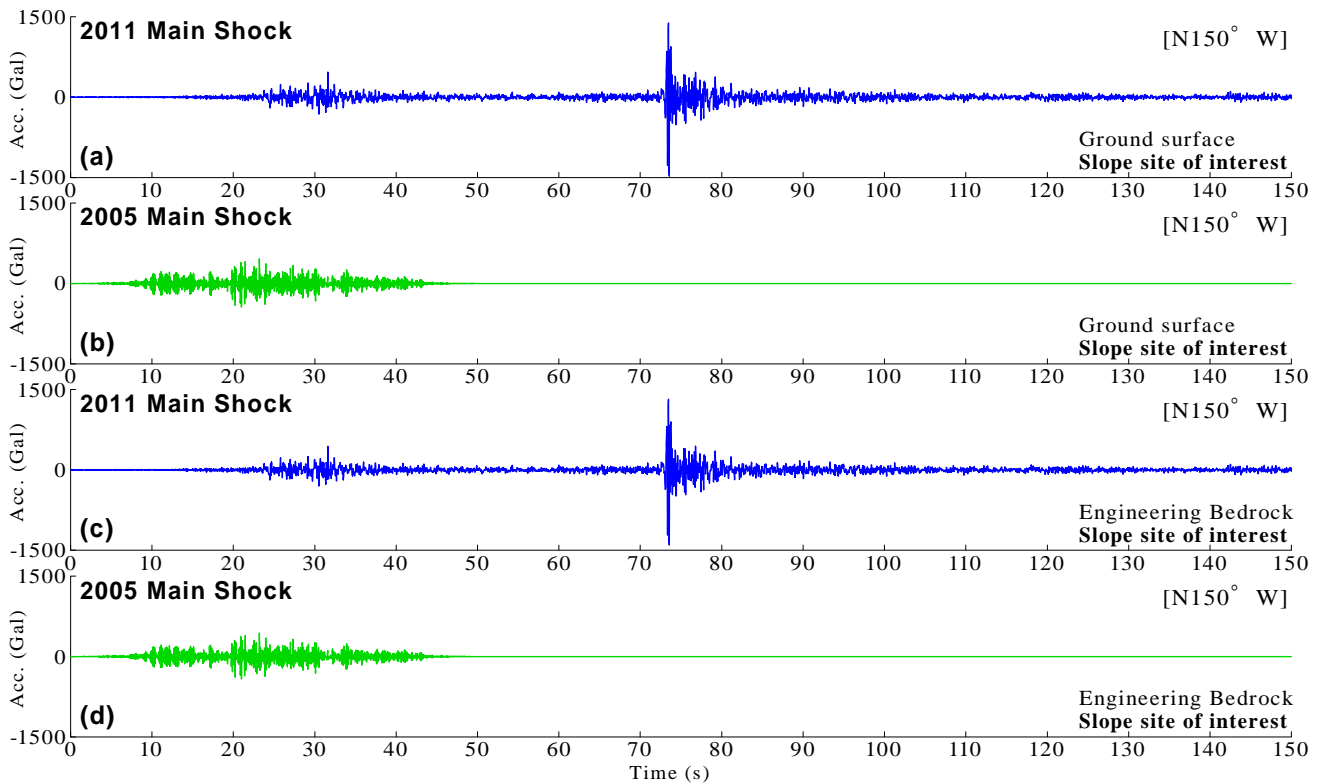


図-15 対象斜面の主要滑動方向における推定地震動の加速度時刻歴

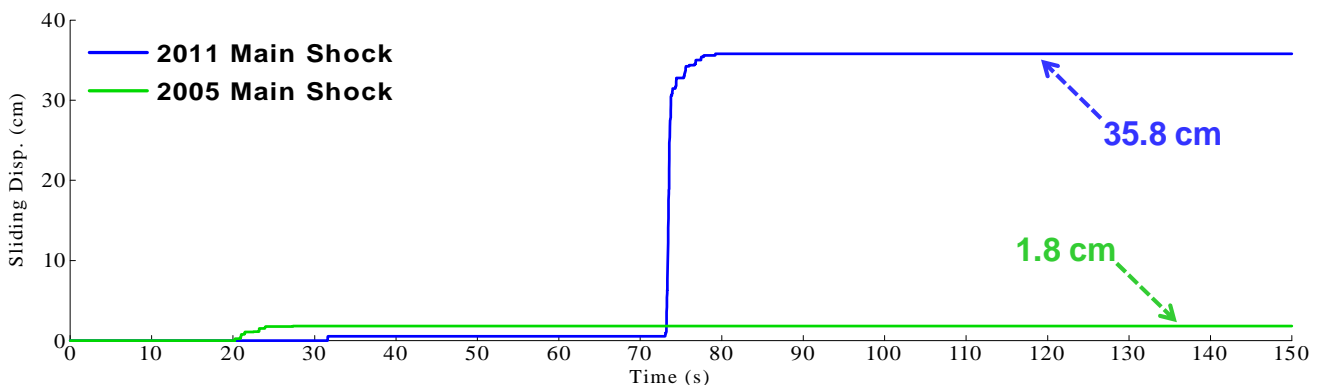


図-16 Newmark法に基づく対象斜面の滑動変形量の時刻歴

向(図-2参照)に変換した。そして、上記で得られた降伏加速度 A_v (296.5Gal)および推定加速度波形(図-15(a), (b)参照)を用いて、Newmark法¹⁸⁾による滑動変形量を計算した。

図-16に計算した滑動変形量の時刻歴を示す。図-16に示すとおり、残留変形量は、2011年東北地方太平洋沖地

震のケースにおいて35.8cm、2005年宮城県沖地震のケースにおいて1.8cmとなっており、対象斜面の被災・無被災を定性的に再現できている。しかしながら、表-1に示すとおり、2011年東北地方太平洋沖地震における残留変形量の実績は70~150cmであり、残留変形量を過小に評

表-2 動的有効応力解析(LIQA)における入力パラメータの一覧

		Gs	As	Ac	B2 _{GW, bottom}	B2 _{GW}	B1 _{GW}	B2	B1
Initial void ratio	e_0	0.4	1.0	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Compression index	λ	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Swelling index	κ	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Initial shear modulus ratio	G_0/σ'_m	2,300	1,700	1,700	1,300	1,300	1,400	2,200	1,500
Coefficient of permeability	k (cm/s)	0.0098	0.0000098	0.0049	0.00098	0.00098	0.00098	—	—
Unit weight	ρ (kN/m ³)	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9
Phase transformation stress ratio	M^*_m	1.100	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700
Failure stress ratio	M^*_f	1.500	1.336	1.336	1.336	1.158	1.158	1.158	1.158
Hardening parameter	B^*_0	6,000	4,200	4,000	5,200	5,000	5,000	3,400	2,800
	B^*_1	60	42	40	52	50	50	34	28
	C_f	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dilatancy parameter	D^*_0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	n	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Reference strain parameter	$\gamma^{P^*}_r$	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
	$\gamma^{E^*}_r$	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012

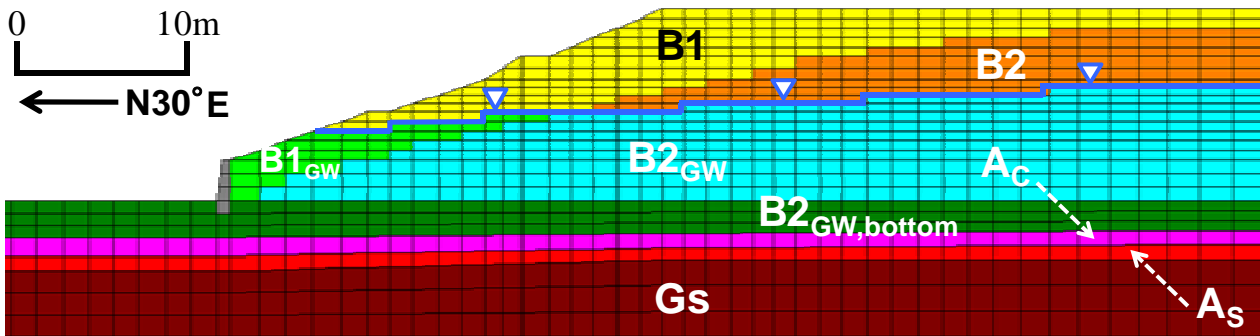


図-17 対象斜面のFEMモデル

価していることが読み取れる。過小評価の原因としては、Newmark法に基づく滑動変形量の計算では、盛土斜面内における地震動の増幅効果¹¹⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾や過剰間隙水圧の発生効果⁴⁶⁾などを考慮されていないことが挙げられる。そこで次章では、対象斜面における動的有効応力解析を行った結果について述べる。

5. 動的有効応力解析による残留変形量の評価

(1) 解析モデルおよび入力パラメータ

対象斜面の2次元FEMモデルを図-17に示す。このモデルは、仙台市宅地保全審議会技術専門委員会³⁸⁾による2次元盛土モデル(図-14参照)を参考に、既往のボーリング調査や土質試験の結果を踏まえて作成したものであり、使用要素は全て平面ひずみ要素である。図-17に示すように、基礎地盤(砂礫層Gs, 沖積砂質土層As, 沖積粘土層Ac)上にあるB1層およびB2層から成る盛土層を、底部(B2_{GW, bottom})、地下水位以深部(B1_{GW}, B2_{GW})、地下水位以

浅部(B1, B2)の5つに分類した。

土層に対しては岡ほかによる弾塑性モデル⁴⁷⁾、擁壁については弾性体でモデル化した。各土層に対して設定したパラメータを表-2に示す。参考とした地盤調査は、対象斜面およびその付近の造成宅地での調査であり、原位置試験のほか、各種土質試験を参考に入力パラメータを設定した。その設定方法を以下に示す。

- 密度 ρ ：土質試験結果での採用値を参考に設定した。
- 透水係数 k ：土質試験結果もしくは粒度分布 D_{20} からCreagerの方法⁴⁸⁾に基づいて設定した。
- 初期間隙比 e ：原位置試験および物理試験の結果に基づいて推算した。
- 圧縮指数 λ , 膨潤指数 κ ：等方圧密試験が実施されていないため、経験的な値⁴⁹⁾⁵⁰⁾を採用した。
- せん断波速度 V_s ：標準貫入試験およびPS検層の結果から総合的に決定した。
- 初期せん断係数比 G_0/σ'_m ：密度 ρ とせん断波速度 V_s から算定される初期せん断係数 G_0 を各土層中心の初期平均有効応力 σ'_m で除して算定した。



写真2 常時微動計測状況（法尻）



写真3 常時微動計測状況（法肩）

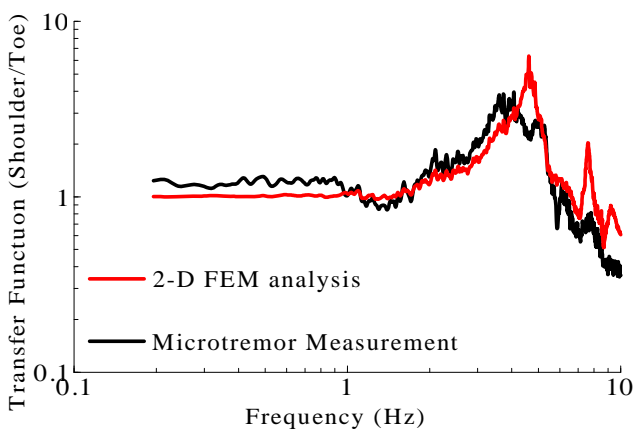


図-18 計測と解析による伝達関数(法肩/法尻)の比較

- ・疑似過圧密比 OCR^* : 正規圧密状態と仮定して1.0とした。
- ・破壊応力比 M_f^* : 三軸圧縮試験から得られた内部摩擦角 ϕ , もしくは標準貫入試験から得られる経験値に基づいて設定した。
- ・変相応力比 M_m^* : 内部摩擦角 ϕ と変相角 ϕ_m の経験的關係⁵¹⁾を参考に設定した。
- ・硬化関数中のパラメーター B^*_0, B^*_1, C_f , 塑性剛性・弾性剛性のための規準ひずみ γ^*_p, γ^*_e , ダイレイタンスー係数 D^*_0, n : 繰返し三軸試験の要素シミュレーションより試行錯誤で設定した。目標としたのは、両振幅軸ひずみ5%における繰返し回数と軸差応力比の関係である。

一方で、基礎地盤の粘性土層(Ac層)については、粘性土の繰返し強度特性に関する一斉試験の結果⁵²⁾を参考にした要素シミュレーションを実施することによって設定した。

なお、動的解析に先だて実施した初期応力解析に用いたパラメーターについては、5.(2)で述べる。

(2) 数値解析条件

初期応力状態は、図-17に示したFEMモデルと同じモデルを用いた初期応力解析により算定した。全ての土層は弾完全塑性モデルとし、要素の有効重量を荷重(100分割の増分解析)として与えた。弾完全塑性モデルのパラメーターは以下のように設定した。

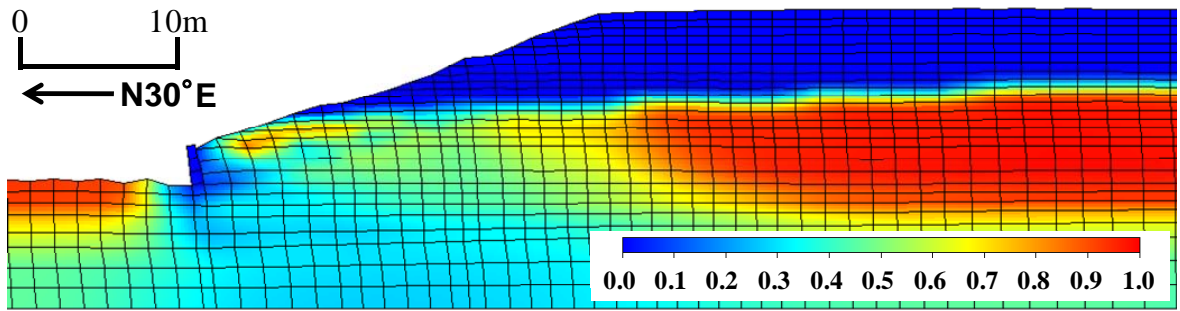
- ・ヤング係数 E : 初期せん断係数 G_0 とポアソン比 ν の関係から計算した。
- ・ポアソン比 ν : 静止土圧係数0.5を仮定して、全土層において0.333とした。
- ・地盤強度定数 c, ϕ : 盛土層(B1層およびB2層)については、4.で述べたNewmark法による検討での採用値と同じである。一方で、基礎地盤層(砂礫層Gs, 沖積砂質土層As, 沖積粘土層Ac)については、標準貫入試験から得られる経験値に基づいて設定した。

土骨格に対する境界条件として、底面は弾性基盤としてダッシュポットを配置し、そのせん断波速度 V_s は400 m/sとした。側方は疑似自由地盤境界⁵³⁾として、幅3,000m程度の幅広要素(同一深度等変位拘束)をモデル両側に配置した。間隙水に対する境界条件として、地下水位面を水頭0の排水境界、その他の要素面は全て流量0の非排水境界とした。

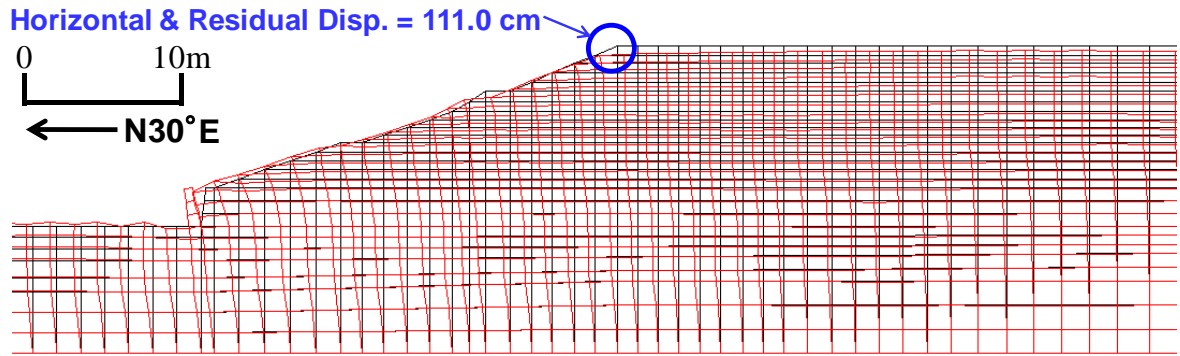
入力地震動としては、2011年東北地方太平洋沖地震および2005年宮城県沖地震による対象斜面(地盤地表面・法尻相当)での主要滑動方向の推定加速度波形(図-15(a), (b)参照)を、法尻付近の地盤モデル(図-17参照)を参考に、等価線形解析^{54),55)}を用いて工学的基盤相当まで引き戻した波形(図-15(c), (d)参照)をFEM解析モデル底面に作用させた。

数値解析上の解析条件として、計算時間増分は0.001秒、Newmark法の係数は $\beta=0.3025$ および $\gamma=0.6$ とした。

Rayleigh減衰としては、初期剛性比例型を用い、その係数は0.0018とした。動的解析時間は150s(図-15参照)であ

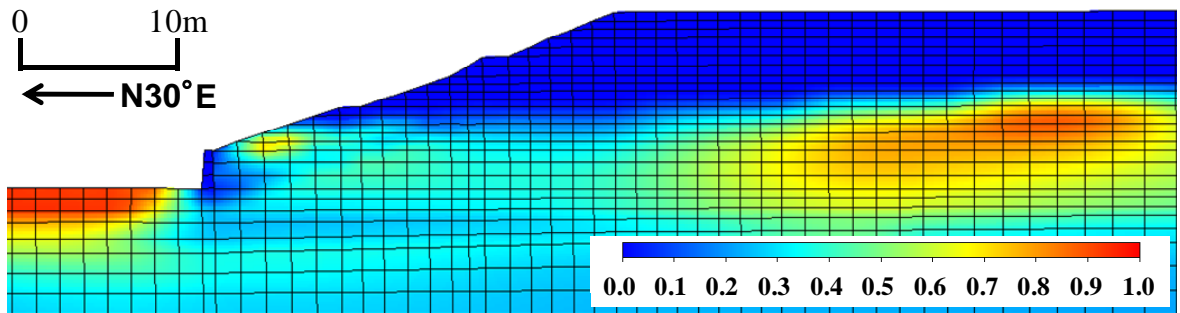


(a) 過剰間隙水圧比の分布

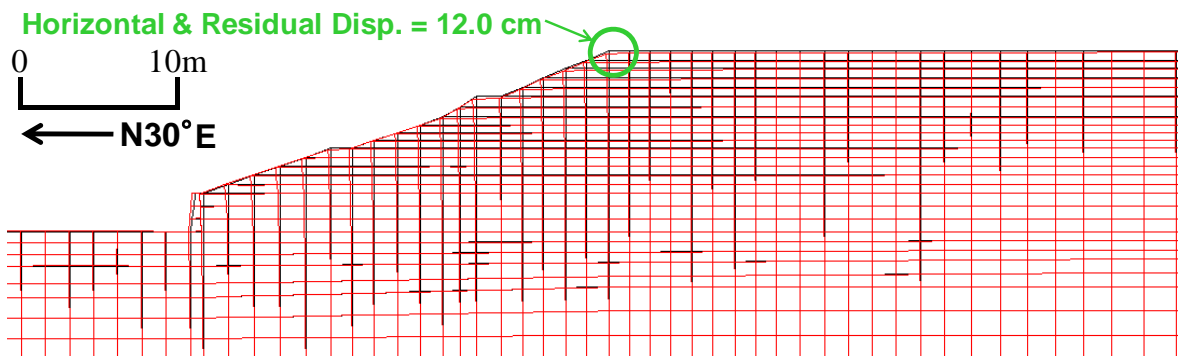


(b) 変形状況 (等倍)

図-19 2011年東北地方太平洋沖地震における対象斜面の被災シミュレーション



(a) 過剰間隙水圧比の分布



(b) 変形状況 (等倍)

図-20 2005年宮城県沖地震における対象斜面の無被災シミュレーション

り、その後、10,020s(2.8hour)まで慣性項を無視した圧密解析を実施した。

(3) 常時微動計測

表-2で設定した対象斜面における動的FEM解析の適用性について確認、および4.で指摘した盛土斜面内にお

ける地震動の増幅効果について確認するため、対象斜面の法尻および法肩付近において微動アレー計測を行った。

写真-2および写真-3に法尻および法肩での計測状況を示す。ここに、法尻と法肩において同時計測(アレー計測)としたのは、後述するとおり、対象斜面における常時微動での伝達関数(法肩/法尻)を算定するためである。微

動計としては、一体型微動探査兼地震計機器⁵⁶⁾を採用した。地震計の詳細については、文献⁵⁶⁾⁵⁷⁾を参照されたい。また、計測条件として、サンプリング周波数は100Hz、計測時間は1時間とした。観測方向は、対象斜面の主要滑動方向(図-2参照)および2次元FEM解析断面方向(図-17参照)を考慮して、法尻および法肩ともにN30°E-N180°W方向とした。

図-18は、対象斜面におけるスペクトル比による伝達関数(法肩/法尻)を、常時微動による計測値と2次元FEMによる解析値で比較したものである。ここに、伝達関数の算定方法は、以下のとおりである。

まず、微動の加速度時刻歴に対して、0.1Hzのハイパスフィルターを施し、163.84秒の区間を10区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化したのちに、スペクトル比(法肩/法尻)を算出し、10区間の平均をとった。評価周波数範囲としては、使用した微動計測器の性能などを考慮して0.2~10Hzとした。一方で、2次元FEMによる伝達関数の算定方法は、対象斜面の2次元FEMモデル(図-17参照)に対して、ホワイトノイズ波(PGA= 1Gal)を入力し、得られた法尻および法肩付近での応答加速度波形(163.84秒間)についてフーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化したのちに、スペクトル比(法肩/法尻)を算出した。

図-18に示すとおり、常時微動計測と2次元FEM解析による対象斜面の伝達関数(スペクトル比：法肩/法尻)がともに主に1Hzよりも高周波帯域において1.0を連続的に上回っている。さらに、両伝達関数のピーク周波数やスペクトル形状などの特徴が、計測と解析で類似していることが読み取れる。すなわちこれらの知見は、既往大地震時に対象斜面では地震動の増幅効果を示していた可能性が高いこと、5.(1)および5.(2)で設定した入力パラメータや数値解析条件に一定の信憑性があることを示唆するものである。

(4) 動的解析結果

図-19および図-20は、150sの時間断面(動的解析での最終計算ステップ)における過剰間隙水圧比の分布、および2.8hourの時間断面(圧密解析での最終計算ステップ)における残留変形状況を、2011年東北地方太平洋沖地震のケースおよび2005年宮城県沖地震のケースでそれぞれ比較したものである。

図-19に示すように、2011年東北地方太平洋沖地震のケースでは、盛土内の広い範囲で過剰間隙水圧比が1.0に近い値を示し、法尻部の擁壁が水平方向にはらみ出ししている。一方で、図-20に示すように、2005年宮城県沖地震のケースでは、盛土内の過剰間隙水圧比が0.7~0.8

程度の値に留まりその範囲も狭く、残留変形量も比較的小さくなっている。さらに、対象斜面法肩における水平方向の残留変形量に着目すると、2011年東北地方太平洋沖地震のケースでは111.0cm(図-19(b)参照)であるのに対して、2005年宮城県沖地震のケースでは12.0cm(図-20(b)参照)となっており、残留変形量の実績値(表-1参照)と比較的良好一致を示していることが読み取れる。

6. まとめ

本研究では、仙台市泉区南光台6丁目の宅地造成斜面を対象に、現地で実施した余震観測記録に基づき、2011年東北地方太平洋沖地震および2005年宮城県沖地震において当該斜面に作用した地震動を推定した。そして、推定地震動を入力波とした場合の当該斜面における滑動・残留変形量を、Newmark法および動的有効応力解析に基づいて評価した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 仙台市泉区南光台6丁目の宅地造成斜面と周辺の既存強震観測点では、サイト特性が異なっているため、2005年宮城県沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震による観測地震動を南光台6丁目の宅地造成斜面に作用した地震動として転用することはできない。
- (2) 丸山による本震記録を利用した地震動評価手法を利用すれば、2005年宮城県沖地震ならびに2011年東北地方太平洋沖地震による南光台6丁目の宅地造成斜面周辺で得られた観測地震動を一定の精度で再現することが可能である。
- (3) 2011年東北地方太平洋沖地震による南光台6丁目の宅地造成斜面での推定地震動は、2005年宮城県沖地震による推定地震動に対して、地震波形の振幅値が大きく、地震動の継続時間も長くなっており、応答スペクトルが評価周期帯域においてほぼ連続的に上回っている。
- (4) 2005年宮城県沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震による南光台6丁目の宅地造成斜面での推定地震動を入力波とした、Newmark法に基づく滑動変形量の評価では、被災・無被災を定性的には評価可能であるものの、残留変形量の実績値を十分な精度で再現することができない。
- (5) 2005年宮城県沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震による南光台6丁目の宅地造成斜面での推定地震動を入力波とした、動的有効応力解析に基づく残留変形量の評価では、被災・無被災を評価できるだけでなく、残留変形量の実績値についても十分な精度で再現することが可能である。

今後は、1978年宮城県沖地震を対象とした強震動の評

価⁵⁸⁾および被災シミュレーションを実施することによって、宅地造成斜面の耐震性能評価に関する知見をさらに深めていきたいと考えている。

謝辞： 神山眞 東北工業大学名誉教授には、数多くの困難の中で得られた貴重なSmall-Titan観測点での地震波形データを提供していただきました。宮城県仙台市泉区南光台の住民の皆様には、地震観測の実施などにおいて多大なるご支援をいただきました。科学研究費補助金・若手研究B「中小地震観測記録に基づくダイナミック地すべり挙動の予測」(25820220)の一部を使用しました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 若井明彦, 佐藤真吾, 三辻和弥, 森友宏, 風間基樹, 古関潤一: 東北地方太平洋沖地震による被害調査報告; 地域別編 宮城県内陸—仙台市内の造成宅地を中心に—, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.79-90, 2012.
- 2) 古関潤一, 若井明彦, 三辻和弥: 東北地方太平洋沖地震災害調査報告—宮城県内陸部の被害—, 地盤工学会誌, Vol.59, No.6, pp.40-43, 2011.
- 3) 沖村孝, 鍋島康之, 岡田肇, 野並肇: 東北地方太平洋沖地震による仙台市内及び周辺の宅地被害調査報告, 地盤工学会東日本大震災被災調査報告, 2011.
- 4) 釜井俊孝: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震によって発生した造成地盤の地すべり, 自然災害科学(東日本大震災速報), Vol.30, No.2, pp.193-197, 2011.
- 5) 秦吉弥, 中村晋, 駒井尚子, 常田賢一: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2008 年岩手・宮城内陸地震および 2011 年東北地方太平洋沖地震における一関市館ニュータウンでの強震波形の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.1357-1368, 2014.
- 6) 秦吉弥, 駒井尚子, 釜井俊孝, 王功輝, 野津厚: 高密度地震アレー観測に基づく既往の大規模地震における仙台市泉区南光台での強震動の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.1334-1356, 2014.
- 7) 秦吉弥, 釜井俊孝, 野津厚, 王功輝: 拡張型サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市緑ヶ丘団地での強震動の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, pp.153-158, 2013.
- 8) 秦吉弥, 釜井俊孝, 王功輝, 野津厚: 拡張型サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市折立団地での強震動の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.4, pp.1298-1310, 2013.
- 9) 秦吉弥, 駒井尚子, 常田賢一, 魚谷真基: 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市青葉区西花苑での斜面崩壊, 地盤工学会誌, Vol.61, No.9, pp.14-17, 2013.
- 10) 秦吉弥, 野津厚, 常田賢一: 2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した盛土での余震観測と地震動の評価, 日本地震工学会論文集, Vol.13, No.3, pp.56-59, 2013.
- 11) 秦吉弥, 野津厚, 王功輝, 釜井俊孝: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく既往の大規模地震における宮城県白石市緑ヶ丘団地での強震動の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.14, No.1, pp.117-141, 2014.
- 12) 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 地盤非線形応答時のサイト増幅特性の評価—2011 年東北地方太平洋沖地震による福島市の造成盛土崩壊地点での地震動の推定—, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.139-149, 2012.
- 13) 秦吉弥, 釜井俊孝, 王功輝: 2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した造成宅地における地震動の評価, 日本地震工学会論文集, Vol.14, No.2, pp.181-184, 2014.
- 14) 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 本震観測記録を利用した地震動推定手法の精度とその向上策—2008 年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象として—, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, pp.186-205, 2013.
- 15) 野津厚: 地震動研究とのコラボレーションが地盤耐震工学の一層の発展をもたらす, 地盤工学会誌, Vol.62, No.2, pp.22-23, 2014.
- 16) 秦吉弥: 地震地すべりに作用した強震波形の推定とその特徴, 平成 26 年度日本地すべり学会シンポジウム講演集—大規模地震に備えた地すべり技術の展望—, pp.22-25, 2014.
- 17) 野津厚, 一井康二: 性能設計の発展型としての Evidence-Based Design の提案とその実現に向けた課題, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3073-3080, 2010.
- 18) Newmark, N. M.: Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, *Fifth Rankin Lecture, Geotechnique*, Vol. 15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 19) Niggemann, K., Komai, S., Hata, Y., Tokida, K. and Kadota, H.: Damage investigation of a residential fill slope due to the 2011 Tohoku Earthquake, *Proc. of 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper No.633, Istanbul, Turkey, 2014.
- 20) Niggemann, K., Komai, S., Hata, Y. and Tokida, K.: Damage and non-damage simulation of a residential fill slope during the past large-scale earthquakes, *Proc. of 53th annual meeting on the Japan Landslide Society*, pp.168-169, 2014.
- 21) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, *Proc. of 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, pp.94-115, 1965.
- 22) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 23) Kamiyama, M., Matsukawa, T. and Anazawa, M.: Strong ground motions observed by Small-Titan during the 2011 Great East Japan Earthquake, *Joint Conference Proc. of 9th International Conference on Urban Earthquake Eng. /4th Asia Conference on Earthquake Eng.* (CD-ROM), Tokyo, Japan, 10p, 2012.
- 24) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之: 常時微動 H/V スペクトルに基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市地下鉄高架橋被災地点での地震動の評価, 第 16 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.117-122, 2013.
- 25) 産業技術総合研究所: 地質図表示システム(地質図 Navi), 地質調査総合センターホームページ, 2013. (last accessed: 2014/07/27)

- 26) 国土交通省国土政策局：5万分の1都道府県土地分類基本調査(仙台)，国土政策局国土情報課ホームページ，2003。(last accessed: 2014/07/27)
- 27) 秦吉弥，一井康二，常田賢一，柴尾享，山田雅行，満下淳二，小泉圭吾：アレー計測を利用した道路盛土の地震応答特性の評価，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010 論文集，地盤工学会，pp.21-26, 2010.
- 28) 秦吉弥，駒井尚子，釜井俊孝，王功輝，野津厚：SPGA モデルに基づく 1978 年宮城県沖地震および 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市泉区南光台での強震動の評価，第 33 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No.1-454, 2013.
- 29) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 30) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，No.556, pp.15-24, 2002.
- 31) Maruyama, Y., Yamazaki, F. and Hamada, T.: Microtremor measurements for the estimation of seismic motion along expressways, *Proc. of the 6th international conference on seismic zonation*, pp.1361-1366, 2000.
- 32) 村岡七重，丸山喜久，山崎文雄：余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の推定，日本建築学会構造系論文集，No. 603, pp.179-186, 2006.
- 33) 秦吉弥，一井康二，丸山喜久，福島康宏，酒井久和，中村晋：位相を考慮したサイト特性置換手法の震源近傍地点での適用—2004 年新潟県中越地震における検討—，構造工学論文集，土木学会，Vol.57A, pp.340-353, 2011.
- 34) Hata, Y., Kadota, H., Niggemann, K., Komai, S. and Tokida, K.: Strong motion estimation at residential fill slope site in Nankodai-6chome, Sendai City, for the 2005 off Miyagi Prefecture Earthquake and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—発表論文集，pp.342-350, 2014.
- 35) 野津厚，菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—，港湾空港技術研究所資料，No. 1173, 2008.
- 36) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
- 37) Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto, H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.418-429, Tokyo, Japan, 2012.
- 38) 仙台市：仙台市宅地保全審議会技術専門委員会公開資料，仙台市宅地保全審議会ホームページ，2012。(last accessed: 2014/07/27)
- 39) Niggemann, K., Komai, S., Uotani, M., Hata, Y., Tokida, K. and Kadota, H.: An approach on verification of performance of a residential embankment due to the past earthquakes, *Proc. of 56th annual meeting on the Kansai Branch of the Japan Society of Civil Engineers*, Paper No. 0308, Osaka, Japan, 2014.
- 40) Niggemann, K., Komai, S., Uotani, M., Hata, Y., Tokida, K. and Kadota, H.: Preliminary study on seismic performance evaluation of a residential fill slope due to the past earthquakes, *Proc. of 49th the Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, pp.1669-1670, Kitakyushu, Japan, 2014.
- 41) (公社)日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針，丸善，pp.339-349, 1999.
- 42) 渡正亮，小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の予知と対策，山海堂，pp.113-117, 1987.
- 43) Janbu, N.: Application of composite slip surface for stability analysis, *European conference on stability of earth slopes*, Vol.3, pp.43-49, 1955.
- 44) 秦吉弥，一井康二，山田雅行，常田賢一，竹澤請一郎，柴尾享，満下淳二，村田晶，古川愛子，小泉圭吾：中小地震観測および常時微動計測に基づく道路盛土の地震応答特性の評価，土木学会論文集 A1, Vol.68, No.4, pp.I_407-417, 2012.
- 45) 林宏親，西川純一，谷口啓二郎：地盤および道路盛土におけるアレー観測，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，pp.117-120, 1997.
- 46) Li, L. and Hata, Y.: Verification of earthquake triggered slope failure through centrifuge model test and numerical analysis, *Proc. of 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, pp.1421-1426, Zurich, Switzerland, 2010.
- 47) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sanf considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-668, 1999.
- 48) (公社)地盤工学会：土の透水特性と設計用土質定数，設計用地盤定数の決め方—土質編—，pp.145-184, 2007.
- 49) 田中智太郎，岡二三生，小高猛司，浅井良太：浸透を考慮した河川堤防の地震応答解析，第 40 回地盤工学研究発表会概要集，No.1137, pp.2269-2270, 2005.
- 50) 田辺晶規，余川弘至，八嶋厚，沢田和秀，星加泰央，中山修，藤井紀之，久保嘉章，阿部知之，関沢元治：東海・東南海地震を想定した木曾川下流域堤防に対する液状化解析，第 62 回年次学術講演会講演概要集，No.3-063, pp.125-126, 2007.
- 51) 中島進，杉田秀樹，谷本俊輔：不攪乱凍結試料の液状化試験から得られた破壊角・変相角，第 6 回日本地震工学会・大会—2008 梗概集，pp.158-159, 2008.
- 52) 粘性土の動的性質に関する研究委員会：粘性土の繰返し強度特性に関する全国一斉試験の実施および試験結果，土と基礎，Vol.43, No.5, pp.79-82, 1995.
- 53) 渦岡良介：地盤・構造物系の有効応力解析における境界条件，日本地震工学会誌，No.3, pp.24-27, 2006.
- 54) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics*

and *Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3, pp.205-222, 2002.

- 55) 吉田望, 末富岩雄: DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所報, pp.61-70, 1996.
- 56) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 地球惑星連合大会 2006 予稿集(CD-ROM), S111-P002, 2006.
- 57) 秦吉弥, 常田賢一, 林健二: 常時微動 H/V スペクト

ルを用いたサイト増幅特性の評価に関する試み, 地盤と建設, 地盤工学会, Vol.31, No.1, pp.125-131, 2013.

- 58) 秦吉弥, 門田浩一, Niggemann, K., 駒井尚子, 常田賢一: 1978 年宮城県沖地震における宅地造成斜面での地震動の推定とその解釈, 第 49 回地盤工学研究発表会講演概要集, No.834, pp.1667-1668, 2014.

**DAMAGE AND NON-DAMAGE SIMULATION OF A RESIDENTIAL FILL SLOPE,
NANKODAI 6 CHOME, IZUMI WARD, SENDAI CITY,
DURING THE 2005 OFF MIYAGI PREFECTURE EARTHQUAKE
AND THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE**

**Katharina NIGGEMANN, Yoshiya HATA, Ken-ichi TOKIDA
Hirokazu KADOTA and Masaki UOTANI**

Evaluation of residual displacement was conducted in order to simulate process of damage and non-damage to a residential fill slope, Nankodai 6 chome, Izumi Ward, Sendai City, Miyagi Prefecture, during the 2005 off Miyagi Prefecture Earthquake and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. First, analyses based on Newmark's Sliding Block Method were carried out using ground motions of the 2005 main shock and 2011 main shock at the site estimated from temporary earthquake observation records. Analyses based on dynamic FEM calculation were then conducted considering the estimated ground motions. The result of the analyses due to the 2005 main shock and the 2011 main shock coincides with the actual damage and non-damage to the residential fill slope.