

地震・微動観測およびスペクトル解析に基づく 山地形の地盤増幅率の推定

藤並 雄誠¹・吉見 雅行²・酒井 久和³・佐藤 清隆⁴・池田 勇司⁵

¹学生会員 法政大学大学院博士前期課程 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻

(〒162 - 0843 東京都新宿区市谷田町2 - 33)

yusei.fujinami.6f@stu.hosei.ac.jp

²正会員 博(工) 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 (〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第7)

e-mail: yoshimi.m@aist.go.jp

³正会員 博(工) 法政大学大学教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科

(〒162 - 0843 東京都新宿区市谷田町2 - 33)

hisakai@hosei.ac.jp

⁴正会員 博(工) 電力中央研究所 広報グループ (〒100-8126 東京都千代田区大手町 1-6-1 大手町ビル7F)

e-mail: ksato@criepi.denken.or.jp

⁵法政大学大学 博(工) デザイン工学部都市環境デザイン工学科 (〒162 - 0843 東京都新宿区市谷田町2 - 33)

yuji.ikeda.66@adm.hosei.ac.jp

各自治体などの被害想定において、地形分類を考慮した簡易な地震強度分布の推定が行われているが、これまでの強震動予測手法は社会資本や人口の密集した都市部を中心に精度向上が図られており、必ずしも山間部の予測精度は十分ではない。特に山間部における斜面崩壊による被害を減らすためには、山岳地形における強震分布の推定精度向上が求められる。本研究では、横須賀の小山を対象として地中部を含む数か所の地震観測を行うとともに、地震記録をもとにした3次元FEM解析による数値シミュレーションを実施した。

結果として、山地部複数個所の地表速度の増幅率において、観測記録と解析結果でおおよそ同等の周波数特性が得られた。本研究で対象とした小山(約55m)においては、1秒以上の長周期成分の増幅は小さく、0.1~0.2秒の短周期成分の地盤増幅率が標高が高くなるにつれて大きくなる傾向であった。

Key Words: FEM analyses, ground amplification factor, earthquake observation, topographic effect

1. はじめに

我が国は地震活動期に入り、今後30年以内に約70%の確率で南海トラフの巨大地震や首都直下型地震などの発生が懸念されている。国や地方公共団体により公共施設の耐震化や社会資本の地震対策が進められている。一方、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震では、山間部の斜面崩壊や道路盛土の崩壊により孤立

地域が発生し、被災した住民にさらなる苦難をもたらされた。南海トラフの巨大地震においても、自然斜面・盛土等の崩壊による道路寸断により、孤立地域の発生が懸念される。そのため、山間部の斜面崩壊や道路盛土等の被災件数や被害規模を抑制する必要がある。南海トラフの巨大地震のような広域に強震動が作用する地震に対して、道路に近接する膨大な数の斜面に対して詳細な耐震性評価を行うことは現実的ではない。

自治体等の被害推定においては、強震動予測により工学的基盤までの地震動を求め、浅部地盤の地震動は、重複反射理論を用いて計算する手法が採用されることが多い¹⁾²⁾。この理論では、水平成層地盤を仮定するため、平野部では地震動増幅を所定の精度で見積もれるが、山地形に対しては仮定が成り立たず信頼性が低下する。都市部の多くが平地に位置する我が国では、防災想定用の地震動を水平成層構造を仮定して検討することも一理あるが、斜面の地震時安定性を評価する場合には、山地形に適用可能な手法を用いた地震強度算定が必要となる。

広域な斜面の安全性評価を簡易に行うために、過去の地震被害と地表面最大速度 (PGV) や地表面最大加速度 (PGA) などの地震強度を用いて統計的に推定する手法が提案されている。例えば、松岡・翠川³⁾は国土数値情報を利用した斜面崩壊危険度の評価を目的として、地震動最大速度や傾斜度、地形分類、堆積物等の地盤情報を用いて斜面崩壊の危険度を予測する手法を提案した。内田ら⁴⁾は地形や断層位置など一般的に入手可能なデータを用いて山腹斜面の地震時斜面崩壊危険度を評価することを目的として、兵庫県南部地震における斜面崩壊発生の危険度を斜面勾配や斜面の平均曲率、地震動最大加速度によって判別する式を提案し、地震動最大加速度が崩壊発生確率と相関が高いことを示している。また、小山内ら⁵⁾によってこの手法を用いた斜面崩壊危険度評価マニュアルも作成されている。

このような斜面の安全性評価を行う上で、使用する地震強度の精度が耐震性評価の妥当性に大きく影響することから、簡易に山間部の地震強度分布を精度よく推定することが求められる。

これまで地盤の平均 S 波速度や国土数値情報を利用した地盤増幅特性の評価に関する研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾が多く行われてきた。ただし、観測記録と地盤特性との関係から導いた関係にばらつきが大きく、また、山地部や丘陵地のデータも少ない。

山間部における地震動の増幅に関して地形の影響が大きいことは良く知られており、これまでの斜面や山を対象とした研究が多く行われてきた。例えば、Wang⁹⁾らは斜面の勾配が増幅率に影響を与えることを示している。神田ら¹⁰⁾は釧路気象台のアレー観測記録に関する分析で、地盤の不均質性のみを考慮した成層モデルでは観測記録を説明できないことを指摘し、2次元の不整形モデルを用いることで増幅特性を再現できることを示した。浅野ら¹¹⁾は、有限要素解析により山体の形状や規模によって応答加速度の増幅特性が変わること示した。しかし、これらの研究において地震観測は行われておらず、過去に発生した地震の評価にとどまっている。栗田ら¹²⁾

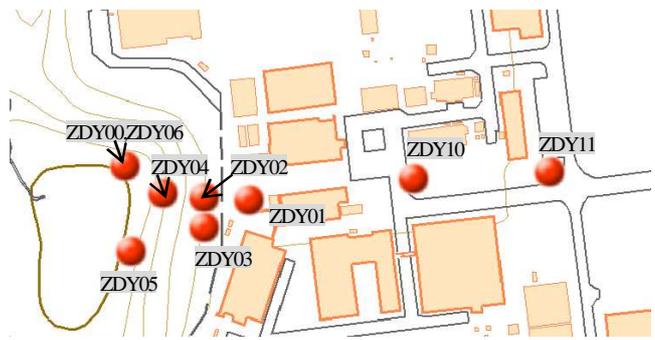


図 - 1 観測地点



写真 - 1 微動計設置風景

は、地震動のアレー観測及び有限要素解析を実施し、山頂部に地震波が集中し大きくなることを示している。しかし、対象地盤が均質地盤で構成されていないために、堆積層の増幅特性と山地形による増幅特性が複合しており、それぞれの地盤増幅特性を個別に特定するには至っていない。

そこで本研究では、構成要素がほぼ一様と想定できる丘陵を対象に、常時微動観測や 3 次元 FEM 解析に基づいて、山岳地形による地盤増幅率評価を行う。

2. 微動観測

(1) 観測地点の概要

神奈川県三浦半島東海岸中部の小田湾に面した低地に位置する小丘陵を対象に微動観測を行った。三浦半島は、新第三系中新統の葉山層群を基盤とし、この上に中新〜鮮新統三浦層群、更新統相模層群が分布している。観測地点に選定した丘陵では三浦層群が露頭しており、丘陵の構成要素の大部分が砂岩である¹³⁾。小丘陵の東側を画する急崖には、頂部から脚部まで砂岩が露出している。

(2) 観測の概要

微動観測は 2015 年 12 月 1 日から 2 日にかけて実施した。観測は、図 - 1 に示すように山地部分と平地部分の計 9 地点で行った。固有周期 10 秒の速度型微動計 (東

京測振社製 SE-321) と 24bit データロガー (白山工業製 DATAMARK LS-8800) を 1 セットで各地点に設置し、微動計には風等の影響を避けるためにバケツを被せた (写真 - 1) . 観測地点は岩盤が露頭しているが、表面に薄い土壌がある。なるべく土壌を剥いで微動計を設置した。

(3) 微動計設置箇所の特徴

9 つの微動計の設置箇所の名称はそれぞれ ZDY00～ZDY06 と ZDY10, ZDY11 とした。ZDY00 地点は丘陵底面と同じ標高に掘られた地下杭で、地盤は丘陵と同じ砂岩である。ZDY01～ZDY06 は丘陵部における観測地点である。前述のように基本的に岩盤が露出している箇所を選定し微動計を設置しているが、丘陵の頂部付近には土壌が厚く堆積しており、岩盤を露出させることができなかった。そのため、ZDY05, ZDY06 地点は堆積層の上に微動計を設置した。ZDY10, ZDY11 地点は丘陵部ではなく、粘土シルトから成る軟弱な堆積層上の平地部の観測地点である。なお、本研究では丘陵部分の観測地点である ZDY00～ZDY06 地点の記録のみを用いる。

トータルステーションによる測量で各地点の座標と標高を計測し得られた各観測点の標高差を表 - 1 に示す。この表より ZDY01～ZDY06 の順に標高が高くなっていることが分かる。

(4) 観測結果

観測中に表 - 2 に示す地震が発生し、地震波形を記録することができた。観測できた地震波は 3 つあり、地震の名称は発生した時間順に地震①, ②, ③とした。1 例として地震①の EW 成分の観測記録を図 - 2 に示す。ただし、図 - 2 の波形には、ノイズと定常成分を除去するために 0.5～10.0Hz の範囲でバンドパスフィルタを掛けている。観測記録を用いて、地中記録の ZDY00 地点を基準として各観測点の最大速度振幅比を算出した結果を表 - 3 に示す。

表 - 3 によると EW 成分では ZDY00 に対する ZDY01～ZDY04 の最大速度は、地震②と地震③の ZDY02 を除き標高が高くなるにつれて増加傾向にあり、その最大倍率は 1.67 倍であることを示している。堆積層上の観測点 ZDY05, ZDY06 に関しては、地震①, ②, ③とも ZDY01～ZDY04 と比較して大きい値を示しており、最大倍率は 5.82 倍である。特に、地震①, ②では ZDY01～ZDY04 の最大倍率と比較して 2.5～3 程度の倍率を示していた。

NS 成分では、EW 成分とは違い標高の増加に伴う倍率の増大の傾向はあまり見てとれなかった。しかし、2 つの記録を除き ZDY00 地点の最大速度よりも大きい値を示しており、その最大は 1.26 倍であることが分かる。

表 - 1 観測点の標高差

	標高差 (ZDY00 基準)	
ZDY01	0.7	m
ZDY02	13.6	m
ZDY03	19.3	m
ZDY04	34.4	m
ZDY05	45.2	m
ZDY06	46.8	m

表 - 2 地震発生時刻と地震規模

	発生時刻	マグニチュード	震央
地震①	午前1時7分15秒	M3.8	茨城県南部
地震②	午前3時26分40秒	震度1以下のため記録なし	
地震③	午前7時49分6秒	M4.6	宮城県沖

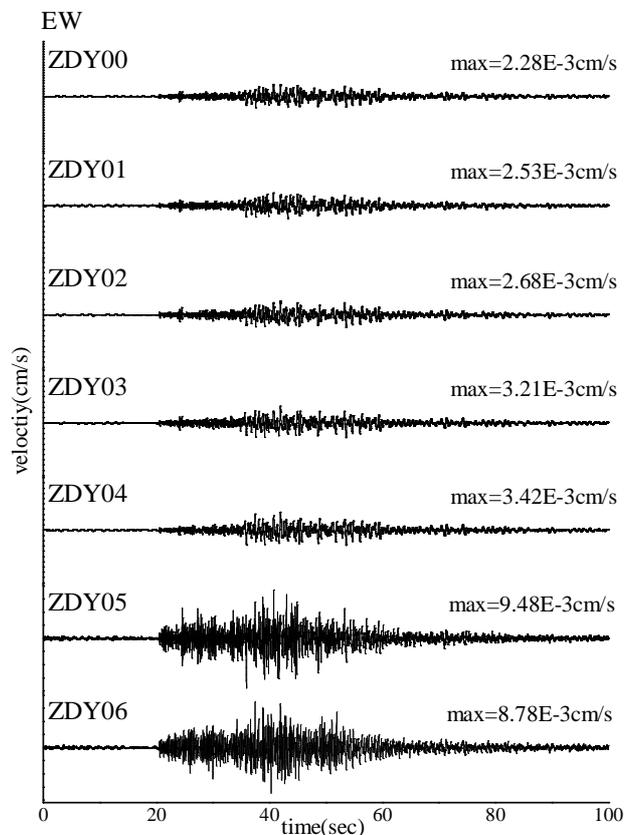
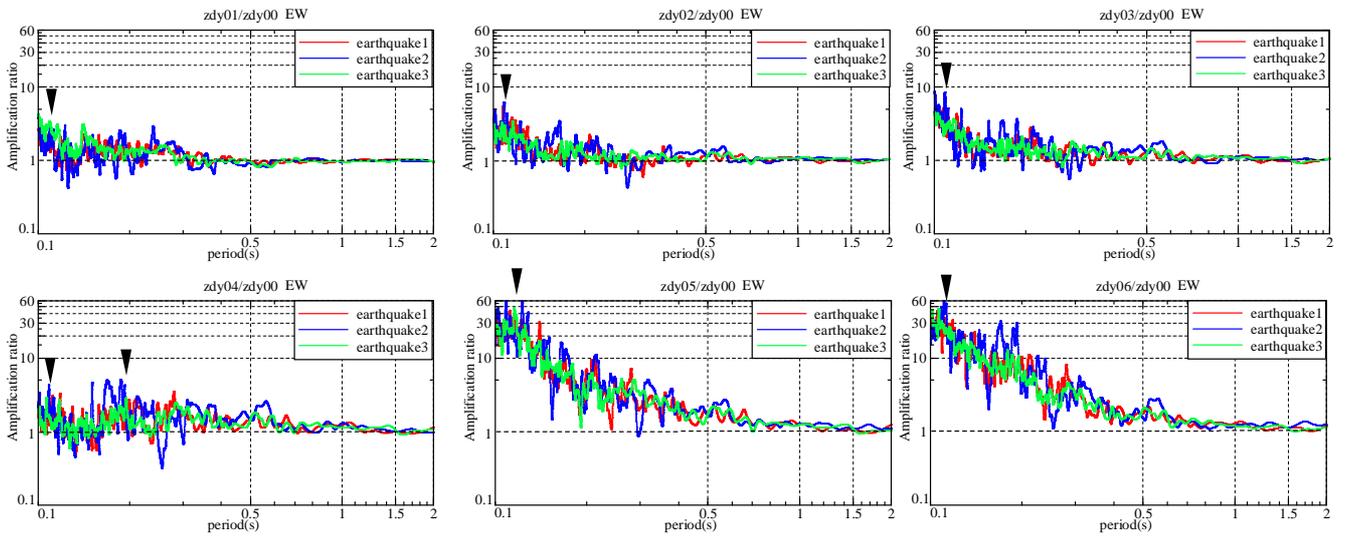


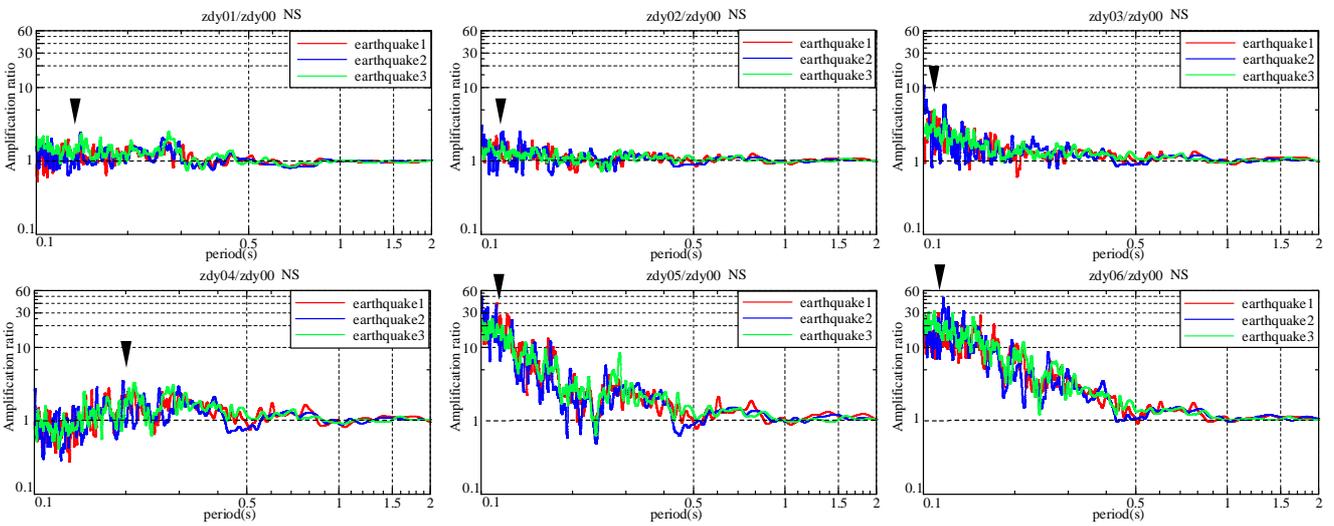
図 - 2 地震動観測記録 (地震①, EW 成分)

表 - 3 各観測点と ZDY00 地点の最大速度振幅の比較

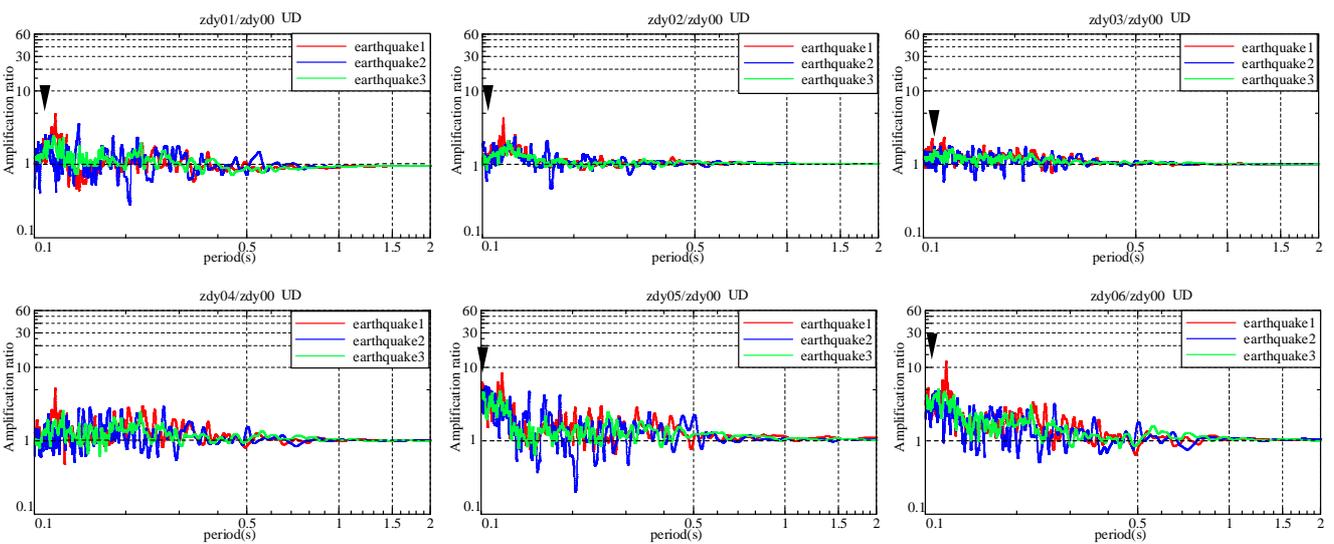
		ZDY01	ZDY02	ZDY03	ZDY04	ZDY05	ZDY06
地震①	EW	1.11	1.18	1.41	1.50	4.16	3.85
	NS	1.12	0.96	1.16	1.05	2.51	2.51
	UD	1.00	1.11	1.20	1.27	1.60	1.49
地震②	EW	1.32	1.11	1.42	1.67	4.97	5.82
	NS	1.04	1.13	1.26	1.05	2.49	4.61
地震③	UD	1.55	1.13	1.11	1.35	1.31	1.30
	EW	1.02	0.95	1.02	1.12	1.53	1.71
地震③	NS	0.97	1.14	1.13	1.18	1.33	1.79
	UD	1.04	0.96	1.05	1.06	0.96	1.08



(a) EW成分



(b) NS成分



(c) UD成分

図 - 3 観測結果による応答倍率

堆積層上の観測点 ZDY05, ZDY06 については EW 成分と同様で ZDY01~ZDY04 よりも特に大きい値を示しており、最大倍率は 4.61 倍であることが分かる。

UD 成分に着目すると、ZDY01~ZDY04 について 1 つの記録を除き最大速度は大きくなっていることが分かり、最大の倍率は 1.35 倍となっていた。ZDY05, ZDY06 地点について EW, NS 成分と比較してあまり倍率は大きくなり、地震③のように ZDY01~ZDY04 と比較して倍率が小さくなっているものもあった。速度振幅比の最も大きいものは 1.6 倍であった。

これらのことより、地下抗の観測点 ZDY00 よりも標高が高いところの地震動最大速度振幅は大きくなる傾向が確かめられた。また、特に倍率が大きくなった ZDY05, ZDY06 地点については前述したとおり、軟弱な堆積層の上に微動計を設置したため、地形効果以外の増幅が起こったためだと考えられる。また UD 成分では水平成分に比べて、ZDY05, ZDY06 地点の最大速度の増幅が大きくなり、上下動は水平動に比べて軟弱な堆積層の影響を受けにくいことが原因であると考えられる。

(5) 応答倍率

観測地震の最大速度振幅での比較を行ったところ、ZDY01~ZDY04 地点について地形効果による影響が考えられる傾向が示された。ここでは観測地震のどの周期が増幅されているのかを判断するためスペクトル解析を行う。本研究では、丘陵底面と同じ標高で地下抗に設置された観測点 ZDY00 を基準として、他の丘陵部に設置された観測点 ZDY01~ZDY06 の応答倍率を算出する。観測結果から算出した応答倍率を図-3 に示す。それぞれの地点のフーリエスペクトルに対してはバンド幅 0.04Hz の Parzen Window を用いて平滑化処理を施している。本研究ではこの応答倍率を地盤の地形効果による増幅率と考える。

図-3 より観測地震より算出した増幅率は、3 つの地震とも各成分でほとんど重なっており、同様の周期特性を示していることが分かる。ここで各成分毎の増幅率について着目していく。

図-3 の(a)によると EW 成分の地震動において応答倍率の卓越周期は 0.1~0.2 秒付近に集中しており、短周期側の地震動が増幅されていることが分かる。また、ZDY01~ZDY04 地点の短周期の増幅率がおよそ 3~9 倍であったのに対して、堆積層上の観測点 ZDY05, ZDY06 では 0.1~0.2 秒の短周期で 10 倍を以上の増幅率を示し、最大で約 60 倍と特に大きくなっている。また、1.0 秒以上の比較的長周期の増幅率はすべての観測点で約 1 倍の値を示しており、地形や地質の影響による増幅がほとんどないということが分かる。ここで、ZDY01~ZDY03, ZDY05, ZDY06 地点では最大増幅率は

周期 0.1 秒付近で表れているのに対して、ZDY04 地点だけは 0.2 秒付近の周期で最も大きい増幅率を示していた。

次に図-3 の(b)によると NS 成分においても EW 成分と同様の傾向で比較的短周期の地震動が増幅されており、卓越周期は 0.1~0.2 秒付近に集中している。また、ZDY01~ZDY04 地点の短周期の増幅率がおよそ 2~9 倍であったのに対して、ZDY05, ZDY06 地点では EW 成分と同様に周期 0.1~0.2 秒の増幅率が 10 倍以上を示し、最大で約 50 倍と特に大きくなっていることが分かった。また、周期 1.0 秒以上の増幅率は EW 成分と同様に約 1.0 倍であったため、NS 成分の周期 1.0 秒以上の増幅率においても地形や地盤の影響による地震動の増幅はほとんどないことが分かる。各観測点において最大の増幅率を示した周期は、EW 成分と同様で ZDY04 地点で 0.2 秒、ZDY01~ZDY06 地点は 0.1 秒付近であった。

図-3 の(c)によると UD 成分については、水平に成分と比較して周期 0.1 秒付近の地震動があまり大きく増幅されておらず、ZDY01~ZDY04 では最大でも 5 倍に満たない増幅率しか示さなかった。ZDY05, ZDY06 についても傾向は EW, NS 成分と同様で、ZDY01~ZDY04 よりも増幅率は大きくなり最大 10 倍ほどであった。また、すべての観測点で周期 1.0 秒以上において増幅率は約 1.0 倍であり、水平 2 成分と同様に長周期において地形や地盤による地震動の増幅がほとんどないことが分かる。各観測点で最大の増幅率を示している周期はほぼ一致しており、周期 0.1 秒付近であった。

3 方向成分すべてにおいて、ZDY05, ZDY06 地点の増幅率が大きくなっているのは、軟弱な堆積層に微動計を設置したことによる影響であり、地形による地震動の増幅効果が表れているのは ZDY01~ZDY04 地点の観測記録だと考えられる。ただし、ZDY04 地点の EW・NS 成分では他の地点と異なる増幅率の卓越周期を示している。また、ZDY05, ZDY06 地点において UD 成分は EW・NS 成分に比べてあまり応答倍率は小さくなく、地震動の地質による増幅の影響は小さいと考えられる。

3. 3次元地震応答解析

(1) モデルと解析条件

本研究では、3次元 FEM 解析コード 7S3¹⁴⁾ を用いて時刻歴応答解析を行う。そのために国土地理院の基盤地図情報より図-4 に示す範囲で、観測対象地形の 5m メッシュ標高データを用いて 3次元のモデル化を行った。作成したモデルを図-5 に示す。なお、図-5 中の X 軸は東西方向（矢印方向が西）、Y 軸が南北方向（矢印方向が北）を表している。モデルの大きさは東西方向に 510m、南北方向に 830m、標高は最大で約 55m、使用した節点数は 66880 節点、要素は 44630 個となっている。

モデルではソリッド要素を使用し、観測丘陵が砂岩から構成される一様地盤であることから、材料は1つとした。なお、ZDY05、ZDY06地点にあるような風化した堆積層はモデル化していない。地震①、②、③のZDY00地点の観測記録（岩盤露頭波）を入力地震波とし、底面の境界条件は粘性境界とする。側方境界は線形弾性解析であることと、側方境界部の標高が小さいことから自由境界とする。その他解析条件、地盤パラメータを表-4に示す。

(2) 入力地震動

入力地震動は丘陵底面と同じ標高に位置する地中観測地点ZDY00の観測記録とする。観測記録は速度波形で測定されたものであるため、下式の数値微分により加速度波形に変換した。

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta t) - f(x)}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで、地震記録は約270秒間であったが、それぞれ地震波形が確認できる領域を抜き出して加速度を作成した。地震①、③は100秒間、地震②は50秒間の入力地震動とした。

(3) 解析結果

解析結果の1例として、地震①の観測記録と比較した時刻歴波形の3方向成分をそれぞれ図-6～図-8に示す。それぞれ解析結果を赤線、観測記録を黒線で表している。

図-6に示すEW成分について見てみると、ZDY00、ZDY02、ZDY03、ZDY04地点の観測記録を解析結果の地震波形と比較するとほぼ重なるような波形となっている。ZDY01、ZDY05、ZDY06地点についてはいずれも解析結果が観測記録よりも速度振幅が小さくなっている。

図-7よりNS成分では、ZDY01、ZDY02、ZDY05、ZDY06の解析結果の波形は観測記録よりも小さくなっていることが分かる。ZDY00、ZDY03、ZDY04地点の解析結果と観測記録の波形は比較的似ていることが分かる。

図-8よりUD成分は、ZDY01で解析結果が観測記録よりも小さくなっている。残りの地点について、観測記録と解析結果の波形は比較的似たようなものとなっていることが分かる。

ZDY05、ZDY06地点ではEW成分、NS成分とも観測記録よりも解析結果が小さい波形となっていることが分かったが、このことは3次元モデルを砂岩から成る一様の地盤であるとして作成し、軟弱な堆積層を再現しなかったために観測と解析の結果が大きく違うものとなったのだと考えられる。一方、UD成分においてZDY05、

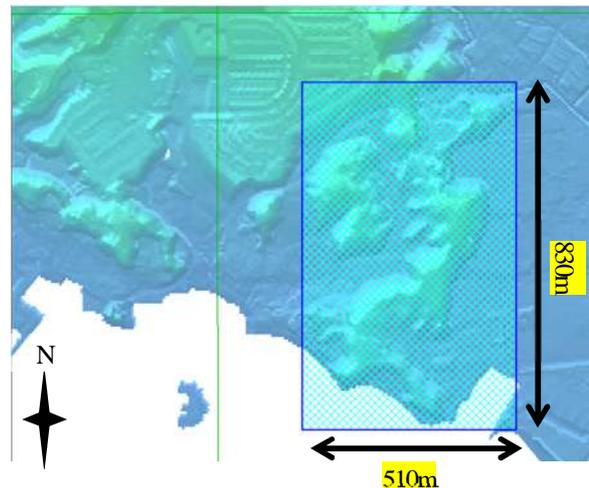


図-4 モデル作成範囲（青線に囲まれた範囲、基盤地図情報より）

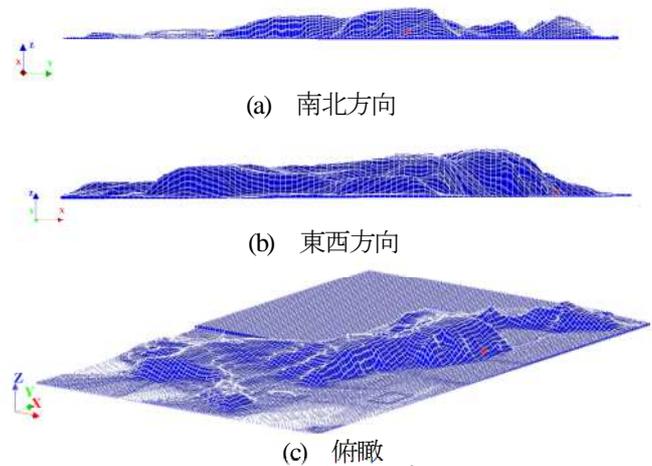


図-5 3次元モデル

表-4 解析条件とパラメータ

解析時間間隔	計算ステップ		
	case1	case2	case3
0.005秒	20000	10000	20000
単位体積重量	ポアソン比	せん断波速度	底面境界条件
1.9t/m ³	0.25	600m/s	粘性境界

ZDY06地点の観測記録と解析結果は比較的似たような波形となっており、UD成分に地震動の増幅効果が地盤の影響をあまり受けないことが影響したと考えられる。

(4) 応答倍率

3次元地震応答解析によって算出した地震動をもとに観測記録と同様の手法で応答倍率を算出した。その結果と観測記録との比較を図-9に示す。ここに3本の黒線が3地震の観測記録より算出した応答倍率を、赤青緑の線が解析による応答倍率をそれぞれ表す。

各成分に着目すると、図-10(a)よりEW成分において、ZDY01地点では地震①、②については周期0.1～0.2秒付近の比較的短周期で観測記録に近い増幅率を得られたが、全体的に倍率が1.0を下回っている。ZDY02地点は、周

期 0.2 秒付近で解析の増幅率が観測記録よりも小さい値を示しているが、そこを除くと観測記録を包絡する解析結果を得られている。ZDY03, ZDY04 地点では、解析による増幅率が観測記録を全体的に包絡していることが分かる。ZDY05, ZDY06 地点では、周期 0.1 秒付近を除いて観測記録を包絡する増幅率が解析によって得られた。周期 0.1 秒付近については観測により得られた増幅率と比べて、解析結果は 1/10 程度の値となっている。

図 - 10(b)より、NS 成分において ZDY01 地点では、EW 成分と同様に解析により算出した増幅率が全体的に

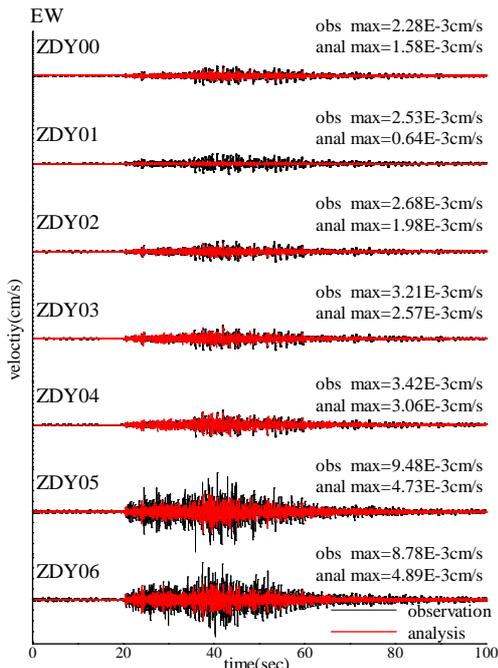


図 - 6 観測記録と解析結果 (地震①, EW 成分)

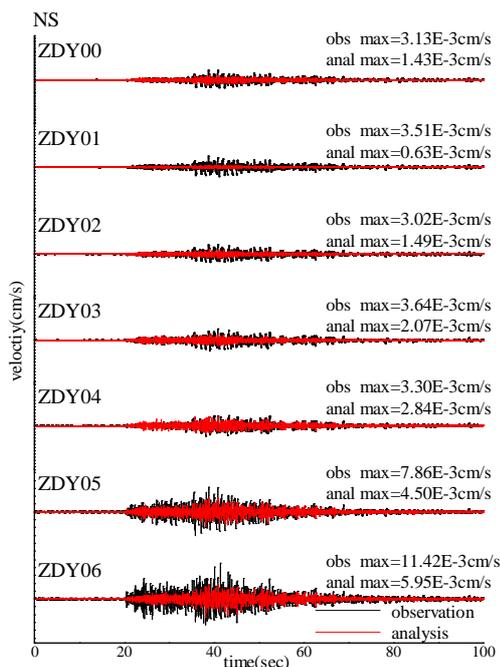


図 - 7 観測記録と解析結果 (地震①, NS 成分)

1.0 を下回る結果となっている。ただし、周期 0.1, 0.2 秒付近については増幅率は 1.0 倍に近い値を示している。

ZDY02, ZDY03 地点は、周期 0.1 秒付近において、観測と解析の増幅率がほぼ一致している。周期 0.2 秒では観測の増幅率よりも解析結果が 5~9 倍ほど大きく、逆に周期 0.3 以上では観測記録よりも解析結果が小さくなっている。ZDY04 地点では、0.2 秒より長い周期では観測の増幅率を包絡する増幅率が解析により得られているが、周期 0.2 秒以下では、解析の増幅率が観測記録よりも大きく、最大で 5 倍程度の差がある。ZDY05 地点では、周期 0.3 秒以上で観測記録を包絡する解析結果が得られ、周期 0.2 秒付近は解析結果が観測記録よりも大きい。また、周期 0.1 秒付近では解析結果が観測記録の増幅率よりも小さくなる。ZDY05 と同様に堆積層上に位置する ZDY06 地点では、周期 0.2 秒以上で観測記録を包絡する解析の増幅率を得られ、周期 0.2 秒以下では観測記録を解析結果が下回り、最大 6 倍程度の差が見られる。

図 - 10(c)より、UD 成分において、ZDY00 地点の解析結果の増幅率は全体的に 1.0 を下回っており、観測記録よりも小さい。ZDY02, ZDY03 地点では、周期 0.1 秒と 0.2 秒付近において解析の増幅率が観測記録よりも小さく、ZDY04, ZDY05, ZDY06 地点では、観測記録と解析結果が全体的に近い値を示していることが分かる。

(5) 考察

各成分の ZDY01 地点の応答倍率が 1.0 倍を下回ったのは、ZDY01 地点の応答波形の下降波成分が小さく計算されてしまったことが原因ではないかと考えられる。この観測点は表 - 1 に示す通り、基準点 ZDY00 との標高

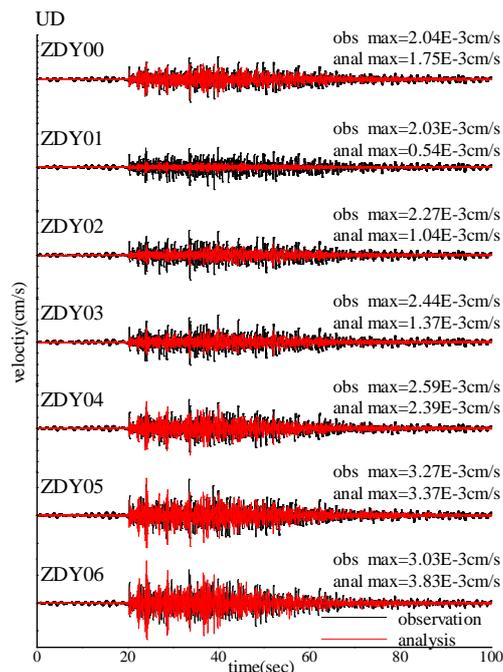
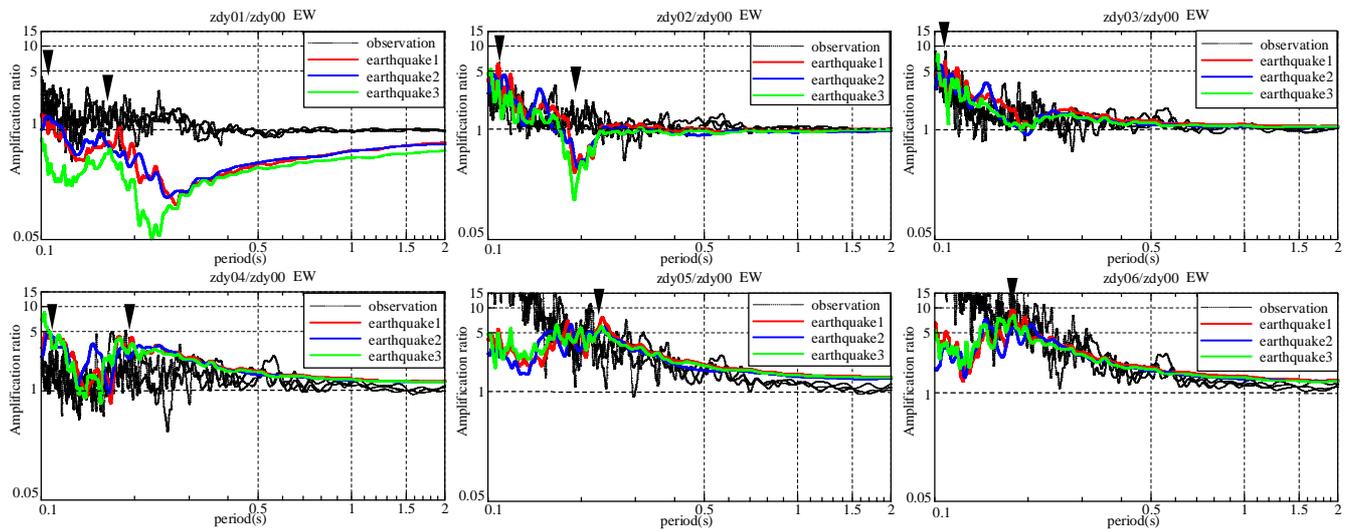
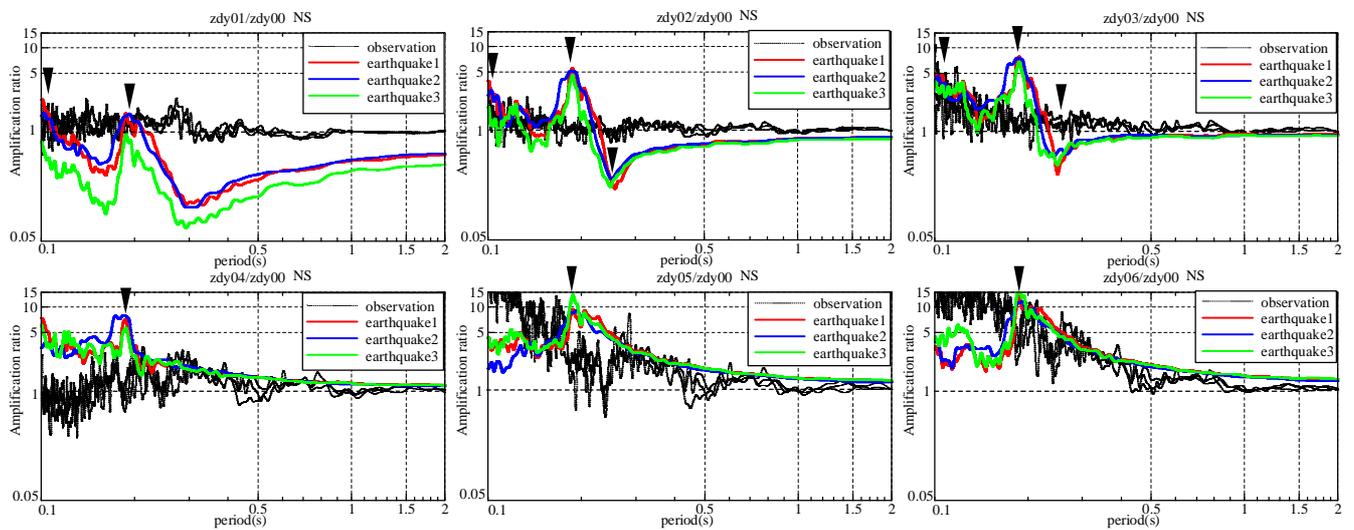


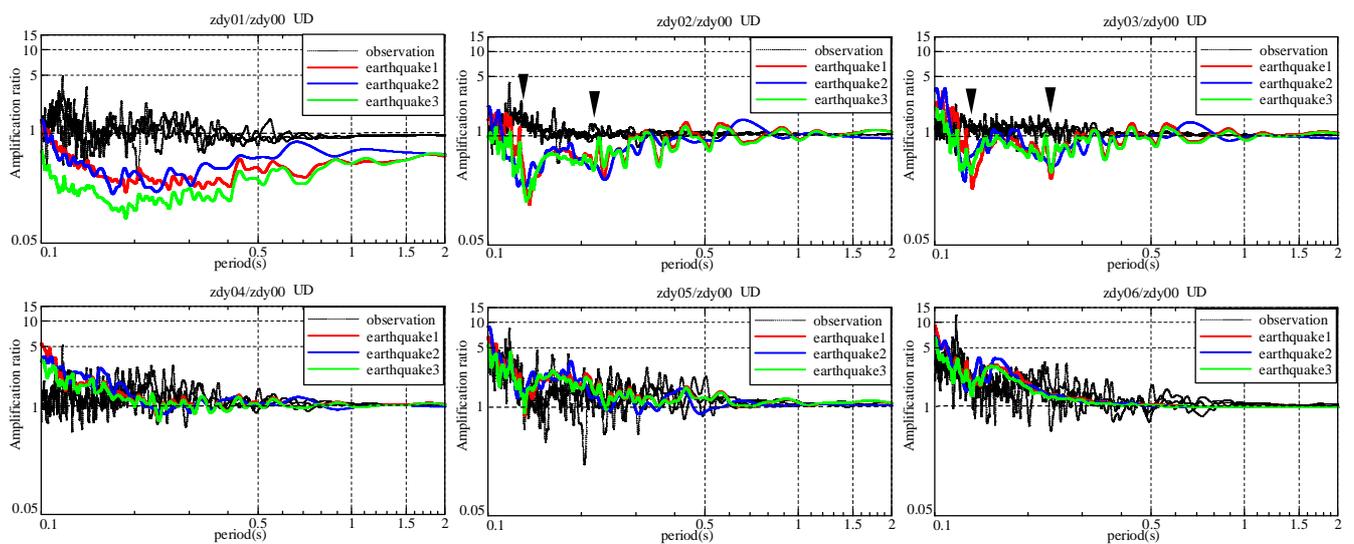
図 - 8 観測と解析地震動 (地震①, UD 成分)



(a)EW 成分



(b)NS 成分



(c)UD 成分

図 - 9 観測と解析による応答倍率の比較

差が小さく、解析モデルの底面境界に近い点であり、このような場合では増幅率が本来より過小評価され、精度の良い解析結果が望めない可能性があると考えられる。

EW成分のZDY02, ZDY03, ZDY04地点の解析結果について、ZDY02地点の周期0.2秒付近の増幅率が小さく計算されている以外は、観測記録を比較的精度よく再現できていると考えられる。ZDY02, ZDY03地点の増幅率の卓越周期は0.1秒付近に確認できたのに対して、ZDY04, ZDY05, ZDY06地点では周期0.2秒付近で卓越していた。

一方、NS成分のZDY02, ZDY03地点の解析結果について、周期0.1~0.2秒付近は観測値を比較的精度よく再現できていると考えられる。また、周期0.5秒より長い周期についても観測値に近い解析結果となっている。ZDY04, ZDY05, ZDY06地点について0.2秒よりも長い周期で観測値を比較的良く再現できていると考えられる。また、各観測点の卓越周期については、ZDY02, ZDY03は0.1秒と0.2秒付近が卓越している。周期0.2秒の増幅率については、解析値は観測値よりも過大に算出されているが実際の卓越周期はEW成分と同じ0.1秒付近であると考えられる。一方、ZDY04, ZDY05, ZDY06地点ではEW成分と同様に0.2秒付近で卓越している。

UD成分については、ZDY02, ZDY03地点では周期0.15秒~0.3秒付近で増幅率が過小に算出されていたが、その他は観測値に比較的近い増幅率を再現できている。ZDY04, ZDY05, ZDY06地点については、解析より観測値に近い増幅率を得られた。またZDY05, ZDY06地点で観測値と解析値がほぼ一致していた。このことからUD成分の地震動の増幅効果に対して、地質による影響はほとんど無いと考えられる。一方、EW, NS成分のZDY05, ZDY06地点は軟弱な堆積層を再現していなかったことによる観測と解析の結果の差異が見られたが、このことにより主に周期0.1~0.2秒付近の地震動に対して、堆積層の増幅効果があると考えられる。図-10に示すZDY02~ZDY06地点のEW・NS成分のモデル断面(矢印で示した箇所が各観測点)によると、ZDY02, ZDY03はNS方向に比較的緩やかな傾斜の観測点で、ZDY04は凹状の地形の観測点、ZDY05, ZDY06は丘陵頂部の平坦な地形の観測点であることがそれぞれ分かる。このことよりZDY04において増幅率の卓越周期が0.2秒付近とZDY02, 03と違いがあったことは凹状の地形の影響があるのではないかと考えられる。ZDY05, 06地点についても堆積層を再現していないことの影響に加えて、地形の違いが影響しているのではないかと考えられる。また、標高が高くなるにつれて比較的短周期の増幅率が大きくなる傾向にあることが分かる。

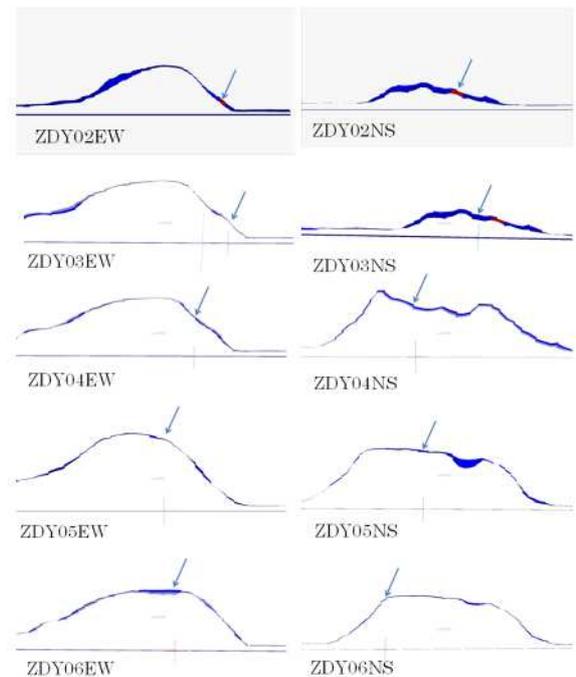


図-10 モデル断面 (矢印は観測点を示す)

4. まとめ

本研究では山地形における地震動の増幅率を推定することを目的として、地震微動観測及び3次元有限要素解析を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 地震観測によって、観測対象丘陵地において3方向成分の地震動は周期0.1~0.2秒以下の短周期において増幅され、増幅率は最大10倍程度の値を記録した。
- 2) 山地形を簡易的に3次元でモデル化することによって、地形による地震動の増幅効果を評価した結果、0.2~0.3秒以外の周期において観測記録の特徴に近い増幅率が得られた。
- 3) 解析によって緩やかな斜面上の観測点では増幅率の卓越周期が0.1秒で、凹状の観測点では卓越周期が0.2秒であった。このように地形の違いによって卓越周期の違いがみられた。また、標高が高くなるにつれて増幅率が增大することを確認した。
- 4) 観測と解析によって堆積層の地震動の増幅特性は0.1~0.2秒の周期で卓越しており、UD成分において増幅効果はほとんど表れない。

今後、NS成分の周期0.2~0.3秒付近に増幅率が解析結果と観測記録が大きく異なる原因、および山地形の汎用的な増幅特性を究明していきたい。

謝辞

本論文を作成するにあたり、日本コンピュータコンサルタンツ株式会社 岸本英明氏、古川秀明氏には、3次元 FEM コードをご提供頂いた上に、モデルの作成や解析について多くのご指導をいただきました。ここに謝意を表します。また、本研究は JSPS 科研費 26420466 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 久世益充, 杉戸真太, 能島暢呂: 南海トラフの巨大地震を想定した広域震度予測, 自然災害科学, JJSNDS, 22-1, 87-99, 2003.
- 2) 千葉県: 平成 26・27 年度千葉県地震被害想定調査報告書, 4. 地震動の予測, 2016.
- 3) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した地震時斜面崩壊危険度予測, 日本建築学会構造系論文集, No.474, pp59-66, 1995.
- 4) 内田太郎, 片岡正次郎, 岩男忠明, 松尾修, 寺田秀樹, 中野泰雄, 杉浦信男, 小山内信智: 地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, 第 204 号, 2004.
- 5) 小山内信智, 秋山一弥, 松下智祥: 地震時の急傾斜地崩壊危険箇所危険度評価マニュアル(案)(個別箇所における危険度評価手法)に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, 第 511 号, 2009.
- 6) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No442, pp.71-78, 1992.
- 7) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した地盤の平均 S 波速度の推定, 日本建築学会構造系論文集報告集, No.443, pp.65-71, 1993.
- 8) 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, vol.3, No.3, pp.13-27, 2003.
- 9) W.P. Wang, Y.P.Yin, B.Li, Z.Feng, N.Zhang, Y.Gao: Characteristics of Ground Acceleration and Features of Landslides Triggered by the Lushan Earthquake (China), *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, Vol.3, pp.149-155
- 10) 神田克久, 源栄正人: 不均質・不整形性および入力コヒーレンスが地震動特性に及ぼす影響評価—釧路地方気象台敷地の場合—, 日本建築学会構造系論文集, No.476, pp.85-94, 1995.
- 11) 浅野志穂, 落合博貴, 黒川潮, 岡田康彦: 山地における地震動の地形効果と斜面崩壊への影響, 日本地すべり学会誌, Vol.42, No.6, pp.457-466, 2006.
- 12) 栗田哲史, 安中正, 高橋聡, 嶋田昌義, 末広俊夫: 山地形における地震動の増幅特性, 日本地震工学会論文集, vol5, No3, pp1-11
- 13) 佐藤清隆, 東貞成, 芝良昭, 阿部信太郎: 不整形地盤の地震応答特性—地盤構造の各種調査・モデル化と地震観測による震動特性—, 電力中央研究所研究報告 U95061, 1996.
- 14) 土岐憲三, 三浦房紀, 大竹敏雄: 3次元ジョイント要素による地盤-構造物系の非線形振動解析, 土木学会論文報告集, No.322, pp.51-61, 1982.

Estimation of ground amplification factor of the mountain terrain based on the earthquake microtremor observation and three dimensional FEM analyses

Yusei FUJINAMI, Masayuki YOSHIMI, Hisakazu SAKAI,
Kiyotaka SATO, Yuji IKEDA

Each municipality has been conducted the seismic assessment based on empirical methods with simple seismic strengths such as PGV (Peak Ground Velocity), PGA (Peak Ground Acceleration) and SI (Seismic Intensity) by considering geomorphology effects. Improvement of the strong motion evaluation has been mainly performed for urban region where social capital and population were concentrated. However improvement of the strong motion estimation in mountain regions is crucial for mitigating secondary damages induced by collapse of natural slopes and road embankments on mountain side. In this study, we conducted the seismic observations at the small mountain in Yokosuka city, including the underground site. We also performed numerical simulations based on three dimensional Finite Element Method analysis.

The main results are summarized as follows; the frequency characteristic of the amplification factor by the numerical calculation is almost a good agreement with the one of the seismic records; The amplification factor is close to 1 at the range of larger than period of 1.0 second; The higher the altitude of the site, the larger value the amplification factor.