

3次元FEM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)
E-mail: yusei.fujinami.6f@stu.hosei.ac.jp

²正会員 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 法政大学教授 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)
E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

⁴フェロー会員 (一財)電力中央研究所 (〒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 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)
E-mail: yuji.ikeda.66@adm.hosei.ac.jp

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の向上が求められる。筆者らは、横須賀にある小山(標高 55m)を対象に地震観測を行い、地震動増幅の周波数特性を確かめた。本研究では、同地形において山地形の地盤増幅率を解析的に検討するにあたり、観測記録と3次元解析結果の地震動増幅特性を比較した。

結果として、3次元のモデル化を行う際に、地表面以深の領域が小さいと、底面境界に近い箇所の計算結果が過小評価されることが分かった。また、対象丘陵において周期 0.3~0.4 秒付近の波が地形の影響で増幅され、それ以下の周期の波の増幅は堆積層の影響であることを確かめた。

Key Words : *ground amplification factor, FEM analysis, topographic effect*

1. はじめに

国土の約7割が山地で構成されている我が国では、地震時に斜面災害などの発生が懸念されている。2004年新潟県中越地震や2008年岩手・宮城内陸地震では、山間部の斜面・道路盛土などの崩壊により孤立地域が発生し、被災した住民に苦難がもたらされた。今後発生が懸念されている南海トラフ巨大地震などでも、このような2次被害の発生が予想されている。そのため、山間部における斜面崩壊や道路盛土等の被災件数や被災規模を抑制する必要があるが、広域に強震動が作用する地震では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。

各自治体などの被害想定では、地形分類を用いた簡易的な地震動強度分布の推定が行われている¹⁾。ここで用いられる強震動予測手法は水平成層地盤を仮定するため、社会資本や人口の密集した都市平野部では所定の精

度で、地震動増幅を見積もれるが、山地形に関しては仮定が成り立たず信頼性が低下する。地震時の斜面の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動強度を算定する必要がある。

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²⁾⁴⁾⁵⁾が多く行われてきたが、観測記録と地盤特性の関係から導いた関係にはばらつきが大きく、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、これまで斜面や山地を対象とした研究は多く行われている。例えば、神田・源栄⁶⁾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⁷⁾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を示した。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⁸⁾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。

筆者ら¹⁰⁾は、山地形による地震動増幅特性を確かめることを目的として、横須賀にある構成要素がほぼ同様であると想定される小丘陵を対象に地震観測を行った。結果、短周期成分の地震動が増幅され、地形の違いによる増幅率の卓越周期の違いを確認した。

本研究では、解析的な検討として同丘陵の地盤増幅率の周波数特性を観測値と対比して確認する。

2. 3次元FEM解析と地震応答特性

(1) モデルと解析条件および地震応答

本研究では、3次元FEM解析コード7S3¹¹⁾を用いて時刻歴応答解析を行う。解析対象地は神奈川県三浦半島西海岸中部の小田和湾に面した低地に位置する小丘陵で、国土地理院の地番地図情報の標高データを用いて3次元モデルを作成する。モデルの作成範囲は図-1に示し、作成したモデルを図-2に示す。なお、図-2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個である。また、解析精度を20Hzまで確保するためにメッシュ分割は5mとした。モデルはソリッド要素を使用し、対象丘陵がほぼ同様であることから、材料特性は1つとした。ただし、丘陵頂上部に堆積している風化した堆積層についてはモデル化をしていない。

観測記録は表-1に示す2015年12月2日の3つの地震¹⁰⁾の1つである地震[2]を用いる。観測点を図-3に示す。本研究では丘陵部の地震動の増幅特性を確認するためZDY00～ZDY06の記録と解析結果の比較を行う。なお、本研究では、丘陵の地形による地震動増幅に着目するため、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点であるZDY10、ZDY11地点の観測記録は用いない。入力地震動は丘陵に掘られた坑道の観測点であるZDY00地点のものとする。底面を粘性境界とし、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。また、表-2に地盤物性値を示す。

表-1 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	M2.7	千葉県中央
地震[3]	午前7時49分6秒	M4.6	宮城県沖

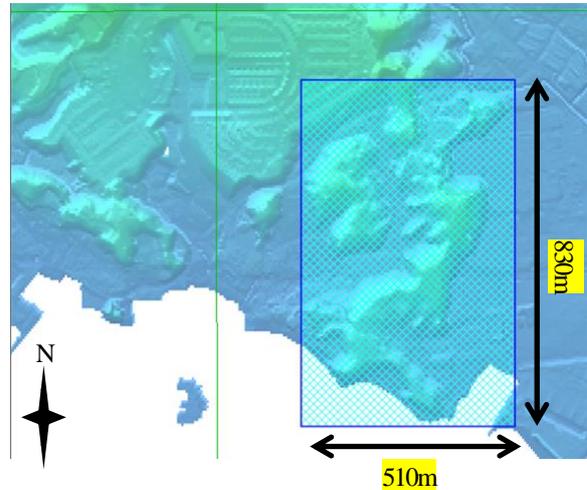


図-1 モデル作成範囲(青線に囲まれた範囲、地盤地図情報より)

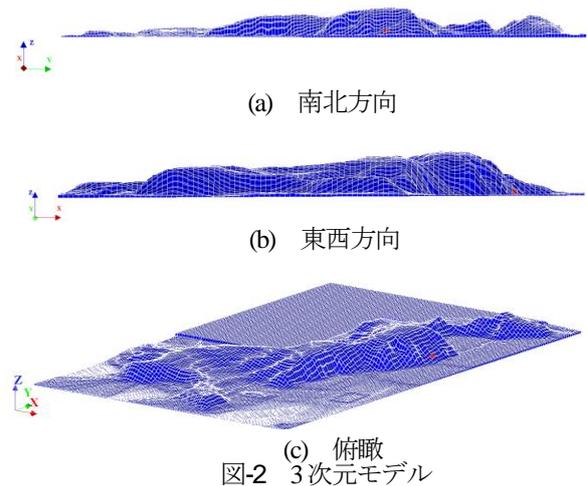


図-2 3次元モデル

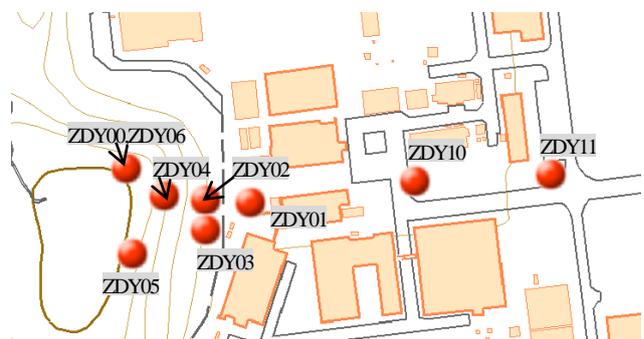


図-3 観測地点

表-2 地盤物性値

せん断波速度(m/s)	密度(t/m ³)	ポアソン比
600	1.9	0.25

(2) 解析結果と観測データの比較

解析結果の1例として、地震[2]の観測記録と比較した時刻歴速度波形の水平2方向成分をそれぞれ図-4、図-5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-4に示すEW成分について見ると、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で、ZDY01, ZDY05, ZDY06地点はいずれも解析結果が観測記録よりも速度振幅が小さいことが分かる。

図-5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、

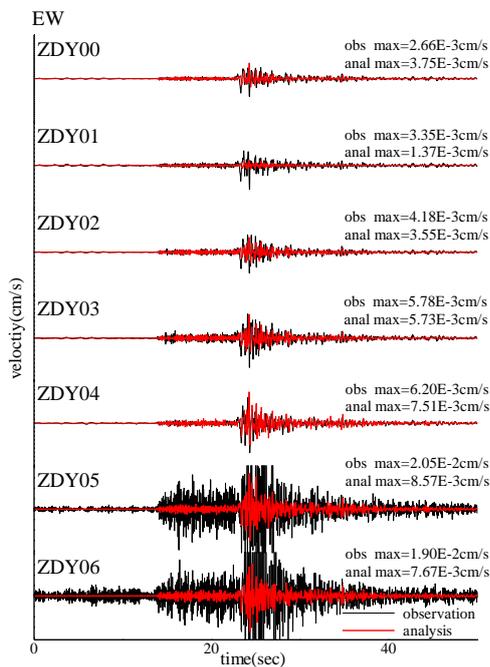


図-4 観測記録と解析結果 (地震[2], EW成分)

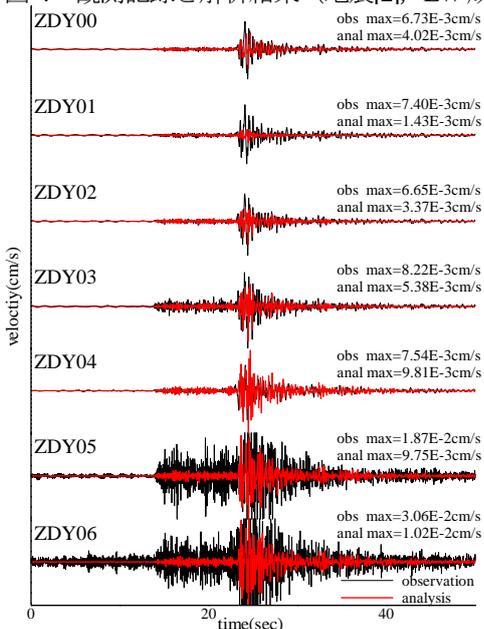


図-5 観測記録と解析結果 (地震[2], NS成分)

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。

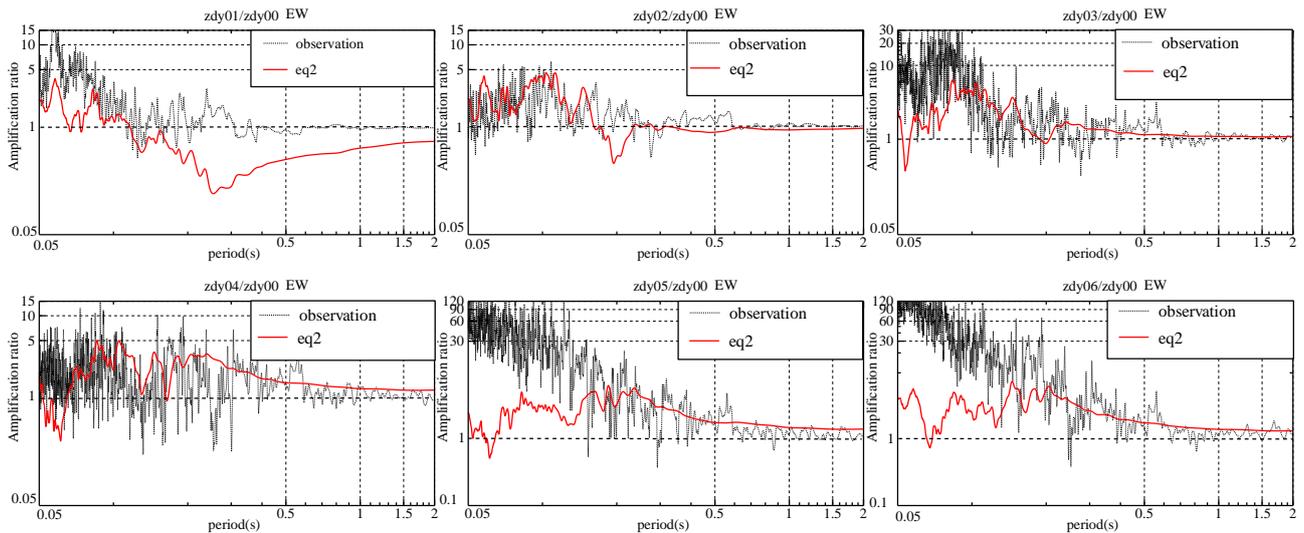
ZDY05, ZDY06地点ではEW成分, NS成分とも観測記録よりも解析結果が小さいが、これは3次元モデルを砂岩からなる一様地盤で作成し、軟弱な堆積層を付与していないためであると考えられる。

(3) 解析結果にもとづく地震応答特性

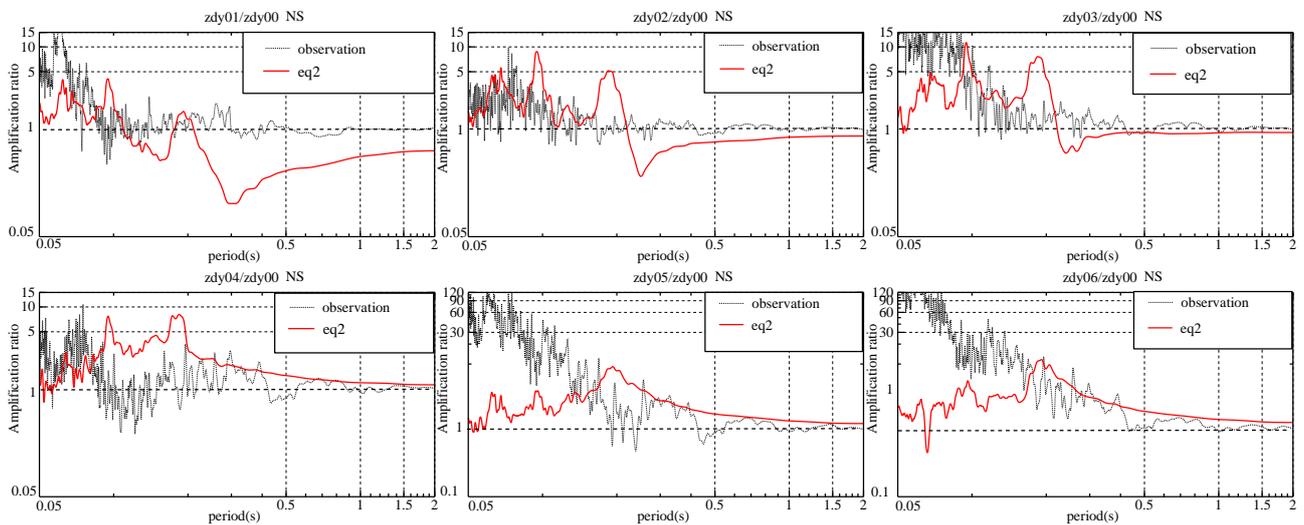
3次元地震応答解析結果をもとに、地下坑に設置した観測点であるZDY00地点を基準として応答倍率を算出した。結果を図-6に示す。ここに破線が地震[2]の観測記録より算出した応答倍率を、実線が解析による応答倍率をそれぞれ示す。なお、それぞれ0.5~20Hzでバンドパスフィルタを掛けて、バンド幅0.05Hzで平滑化を行っている。

各成分に着目すると、図-7(a)よりEW成分において、ZDY01地点では周期0.08~0.2秒付近の比較的短周期で観測記録に近い応答倍率を得られたが、全体的に倍率が1.0を下回っている。ZDY02地点は、周期0.2秒付近で解析の応答倍率が観測記録よりも小さい値を示しているが、その他は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、周期0.1秒以上において解析による応答倍率が観測記録を包絡して、0.1秒以下では過小評価され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応答倍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応答倍率と比べて、解析結果は1/15程度の値となっている。

図-7(b)より、NS成分においてZDY01地点では、0.1秒付近では比較的観測記録に近い応答倍率を得られたが、それ以外の部分では1.0を下回っている。ZDY02地点は周期0.1秒以下ZDY03地点は、周期0.1秒付近において、観測と解析の応答倍率がほぼ一致している。しかし、それぞれ周期0.2秒では観測の応答倍率よりも解析結果が5~9倍ほど大きく、逆に周期0.3秒以上では観測記録よりも解析結果が小さい。ZDY04地点では、0.1~0.2秒の成分では観測の応答倍率に近い値が解析により得られているが、周期0.1~0.2秒では、解析の値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応答倍率よりも小さくなって。ZDY05と同様に表層地盤上に位置する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応答倍率を得られ、周期0.2秒以下では観測記録を解析結果が下回り、最大60倍程度の差が見られる。



(a) EW成分



(b) NS成分

図-6 観測と解析による応答倍率比較

(4) 考察

各成分の ZDY02, ZDY03, ZDY04 地点の解析結果について観測記録を包絡するような解析結果を得ることができており、観測記録を比較的精度よく再現できている。しかし、すべての成分において ZDY01 地点の応答倍率が 1.0 倍を下回っていることが分かる。また、図-4、図-5 に示す地震波形を見ても、ZDY01 地点では解析結果が観測記録より過小に計算されている。ZDY01 地点は、

他の観測点と比較して応答倍率を算出するときの基準点である ZDY00 地点と標高差があまりなく、解析モデルの底面境界に近い点である。このような場合では増幅率が本来より過小に評価され、精度の良い解析結果が望めない可能性があるのではないかと考えられる。

3. モデル領域の影響

(1) モデルと解析条件の変更

本章では、図-2 に示すモデルを用いた解析結果で、Z た問題の原因を突き止めるために、モデルの形状を変化させてケーススタディを行う。ZDY01 地点の地震波が過小評価されるのは、モデルに地下領域を設けておらず底面境界部に近い ZDY01 地点の下降波成分が過小に計算されていることが原因ではないかと考え、モデルに地下領域を付加し解析を行う。また、側方の影響を考慮してモデルの側方を東側に 300m 拡張し作成範囲を図-7 のように変更した。作成したモデルの一例として地下 90m まで再現したモデルを図-8 に示す。なお、メッシュ分割は粗い方から 15, 10, 5m としており、20Hz までの

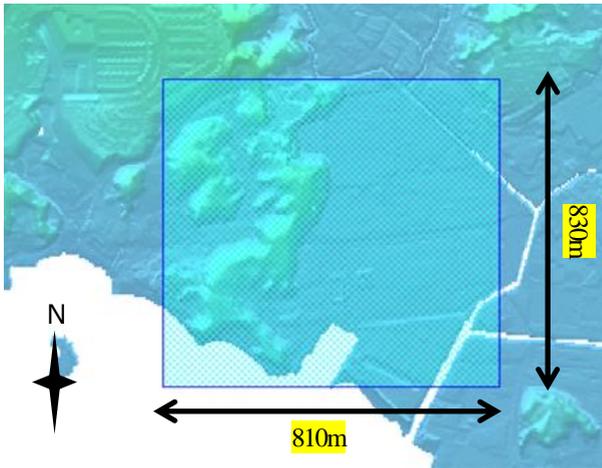


図-7 モデル作成範囲変更後

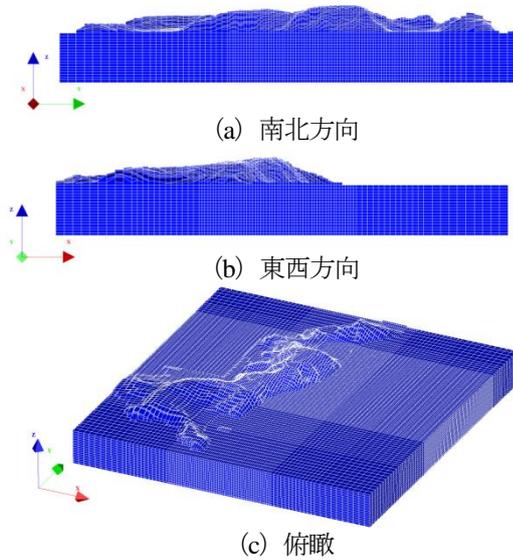


図-8 3次元モデル（領域変更後）

精度を確保するため着目するモデル中央部は 5×5m メッシュで作成している。境界条件として、底面には粘性境界、側方は水平ローラーを用いている。また、前章で用いたモデルと同様に丘陵頂上付近に堆積した風化層はモデル化していない。地盤パラメータは、対象地で行われた PS 検層¹⁰ と J-SHIS 地震ハザードステーションの深部地盤データより得られた数値を基に設定し、表-3 に示す。入力地震動は ZDY00 地点の観測記録を一次元の重複反射理論を用いてモデル底面の深さまで引き戻した波を用いる。解析は、表-4 に示すように地下の深さを変更して5つのケースを行った。

(2) 地下の深さを変更したケーススタディ

図-9 に ZDY01 地点の EW 成分の応答倍率の比較を示す。モデルの妥当性を考えるとき長周期帯の応答倍率が 1.0 に漸近するはずである。周期 0.4 秒以上に着目すると、

表-3 地盤物性値

	せん断波速度(m/s)	密度(t/m ³)	ポアソン比
地下40m以浅	600	1.9	0.25
地下40m以深	850	2.1	0.1

表-4 解析ケース

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
深さ	60m	70m	80m	90m	120m

地下のないモデルの解析結果と比較して、すべてのケースで応答倍率が 1.0 に漸近している。また、長周期成分において CASE4 の地下を 90m つけたモデルでの解析が最も解析値と近い値を示していることが分かる。

これらのことより、ZDY01 地点のような標高が低い観測点の記録を用いて地震応答解析を行う場合、丘陵の低地部に相当する、モデル底面が浅い地点では解析条件によって観測記録に比べて計算値が過小評価されることがあることが認められた。また、適切な解析条件は、必ずしもモデル底面が深いほど精度が上がるわけではないことが分かる。

(3) 各観測点の応答倍率

ZDY01 地点の応答倍率の周期 0.4 秒以上が最も観測波と近い CASE4 の解析結果と観測値の比較を図-10 に示す。

図-10(a)を見ると ZDY01, ZDY03 地点は周期 0.1 秒以上は観測波と解析値が近い値を示している。なお、0.1 秒以下の短周期成分は解析値が 1/5 程度小さい。ZDY02, ZDY04 地点はすべての周期帯で観測値と解析値が同等の値を示しており精度良く計算されている。ZDY05,

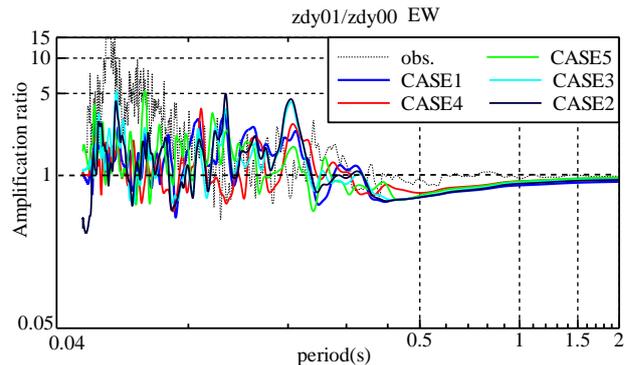
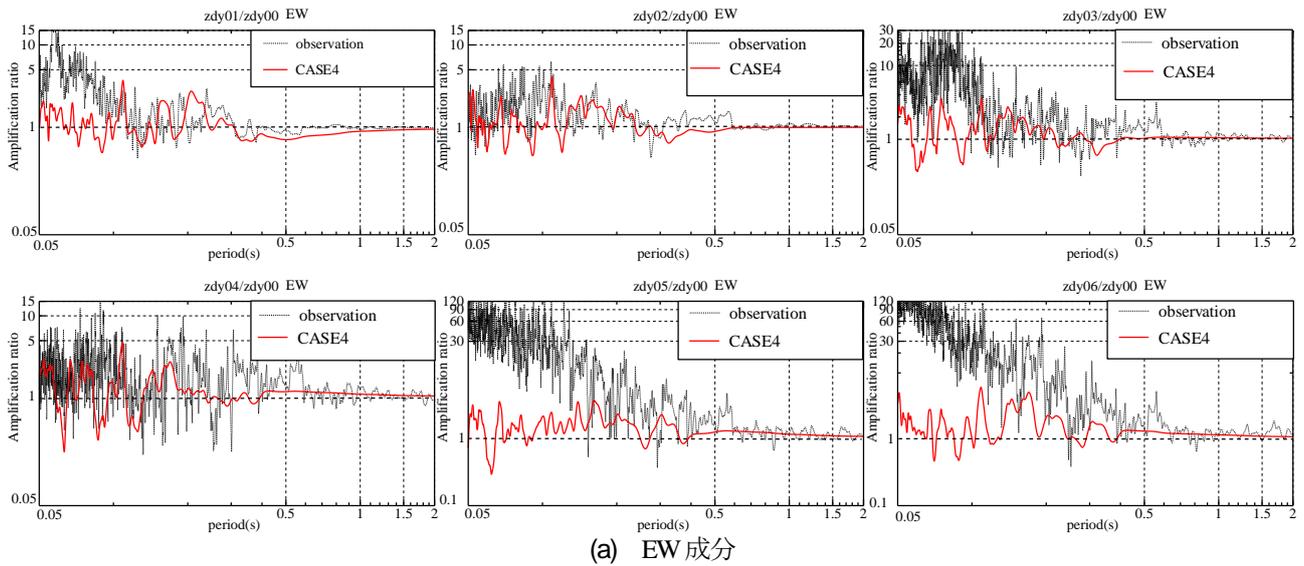


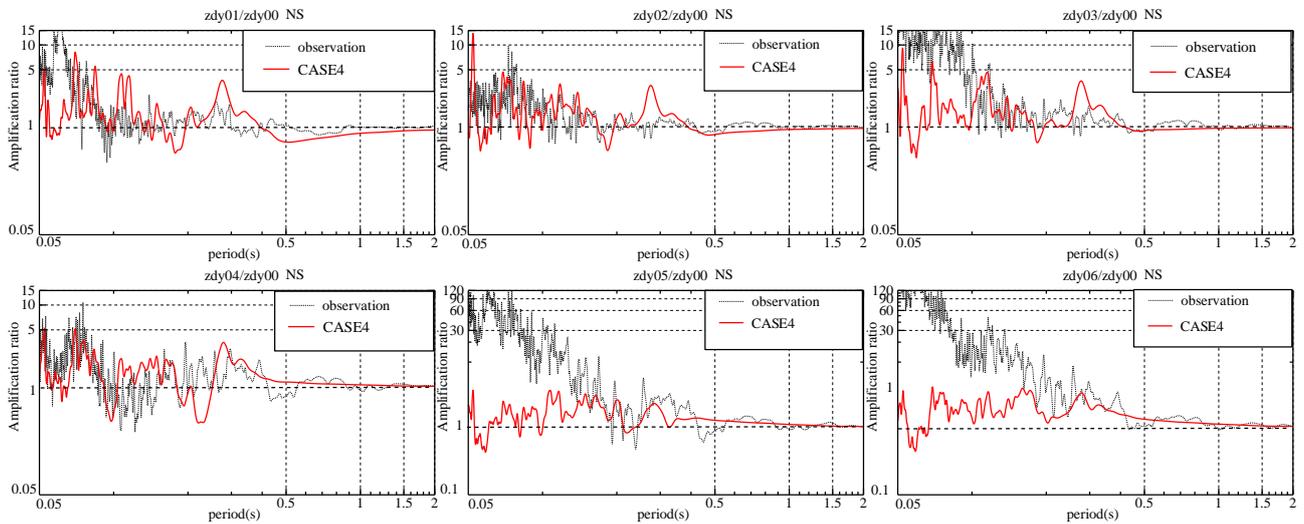
図-9 地下部分変更解析の比較

ZDY06 地点は 0.3 秒以下のところで解析値が観測値を下回っているが、それ以外の部分では比較的観測値と近い値を示していることが分かる。また、各地点の周期 0.3 ~0.4 秒付近を見てみると標高が高くなるにつれて応答倍率が大きくなっている。

図-10(b)より、ZDY01, ZDY03 地点は周期 0.1 秒以下の



(a) EW 成分



(b) NS 成分

図-10 観測と解析による応答倍率比較

部分で解析値が 1/10 程度観測値を下回っているが、それ以外の周期帯では観測値と解析結果が近い値を示している。ZDY02, ZDY03 地点に関してはすべての周期帯で観測値を良く再現できている解析結果であることが分かる。ZDY05, ZDY06 地点は周期 0.2 秒以上の周期帯において観測記録と近い解析結果である。なお、周期 0.2 秒よりも短い周期帯では EW 成分と同様に観測値を下回る解析結果となっている。また、周期 0.3~0.4 秒付近を見ても、計算値が過大に評価されているが、EW 成分と同様に標高が高くなるにつれて応答倍率が大きくなっている傾向がある。

ZDY05, ZDY06 地点の短周期において計算結果が過小になっていることは、丘陵頂部の風化した堆積層を再現していないことが原因である可能性が高い。また、ZDY01~ZDY04 地点で 0.1 秒以下の短周期成分の解析結

果が過小に計算されたことは、ZDY05, ZDY06 地点ほど顕著ではないが丘陵に薄く積もっている表土の影響があるのではないかと考えられる。

また、観測では ZDY01~ZDY06 地点の EW・NS 成分の 0.3~0.4 秒付近の応答倍率が標高が高くなるにつれて、大きくなっていった。このことは、構成地盤の V_s が 500~600m/s 程度の標高約 55m の丘に水平成層地盤の 1/4 波長側を適用すると固有周期が 0.4 秒程度となるため、0.3~0.4 秒付近の周期の波が丘陵の卓越周期を捉えていることが原因である可能性が考えられる。解析においてもこの特徴を再現できたと言える。

(4) 応答倍率に対する考察

ZDY01~ZDY04 地点における各成分の応答倍率の周期 0.1 秒以上の部分について概ね観測値と近い値の解析

結果を得ることができた。ZDY01, ZDY04 地点の周期 0.1 秒以下の部分については観測値よりも過小に計算されているが、ZDY02, ZDY04 地点は殆どの周期帯において観測記録に近い解析結果が得られており、このモデルは地形による地震動の増幅をある程度説明できているモデルであると思われる。ZDY01~ZDY04 地点で 0.1 秒以下の短周期成分の解析結果が過小に計算されたことは、丘陵に薄く積もっている表土の影響があるのではないかと考えられる。丘陵頂部の風化した堆積層に関しては、このモデルでは再現しておらずそのことが ZDY05, ZDY06 地点の短周期において計算結果が過小になっていることの原因であると考えられる。

また、前述のとおり ZDY01~ZDY06 地点の EW・NS 成分の 0.3~0.4 秒付近の応答倍率が標高が高くなるにつれて、大きくなっている。このことは丘陵の構成地盤の V_s が 600m/s として計算を行っているため、標高約 55m の丘に 1/4 波長側を適用した時の固有周期を捉えていることが原因であると考えられ、観測によって得られた周期 0.3~0.4 付近の波が増幅されるという知見を再現することができている。

4. 結論

本研究では、丘陵の増幅特性を確かめることを目的として、横須賀にある小丘陵を対象に行った地震観測に対して 3 次元 FEM 解析を行い、観測記録との比較を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 底面境界に近い点については、地表面以深が小さいモデルでは解析結果が過小に計算されることが分かった。
- 2) 3 次元 FEM 解析により、0.1 秒以下の短周期成分を除き観測記録と近い値を算出することができた。また、短周期成分の地震動の堆積層の影響によって増幅されている可能性が高いことが分かった。
- 3) 観測波の周期 0.3~0.4 秒付近の地震動が対象丘陵の地形の影響を受けて増幅する特徴があり、解析においてもその特徴を再現できた。

今後、丘陵頂部に堆積した風化土を再現することで、より観測記録を再現できるモデルを作成していく必要がある。

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ト株式会社 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ある。

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, Vol. 22, No. 1, pp. 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) 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, No. 442, pp. 71-78, 1992.
- 4) 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報告集, No. 443, pp. 65-71, 1993.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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, Vol. 5, No. 3, pp. 1-11, 2005.
- 9) 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, No. U95061, 1996.
- 10) 藤並雄誠, 吉見雅行, 酒井久和, 佐藤清隆, 池田勇司: 地震観測に基づく山地形の地盤増幅率の考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.73 (2017), No. 4, [特]地震工学論文集, Vol.36 (掲載予定)
- 11) 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 THREE DIMENSIONAL FEM ANALYSIS

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

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. We conducted an earthquake observation on the mountains in Yokosuka and confirmed the frequency characteristics of the increase in the seismic motion. In this study, we analyze ground amplification factor of mountain topography using observation result and analysis result.

The main result are summarized as follows; the analysis result is underestimated when creating a three-dimensional model that is smaller than the ground surface. And we confirmed that the wave around the period of 0.3 to 0.4 seconds in the target hill was amplified by the influence of the terrain. And the amplification of wave less than 0.3 second was the influence of the sedimentary layer.