頂上部の堆積層が小丘陵地の地震動増幅に 及ぼす影響に関する検討

藤並 雄誠 1·石丸 達也 2·酒井 久和 3·吉見 雅行 4·佐藤 清隆 5

¹非会員 東京都交通局 (〒179-0075 東京都練馬区高松 5-8-50) E-mail: Yuusei Fujinami@member.metro.tokyo.jp

²学生会員 法政大学大学院 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: tatsuya.ishimaru.3n@stu.hosei.ac.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

⁵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

山間部の斜面災害を減らすためには、山岳地形における地震動強度分布を精度良く求める必要があるが、山間部における予測精度は十分とは言えない.そこで、本研究では横須賀にある小丘陵を対象に、丘陵頂部に存在する堆積層の地震動の増幅特性を把握することを目的として、当該丘陵においてスウェーデン式サウンディング試験と3次元FEMによる時刻歴応答解析を行った.微動観測記録と地震観測記録と比較することにより、山地形における地震動増幅の周波数特性を確かめた.

結果として、山地形と山地形に堆積する堆積層の双方において 1/4 波長則によって卓越周期を算定できる可能性が示唆された.

Key Words: seismic amplification, mountainous area, topographic effect, FEM analysis

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巨大地震や首都直下型地震などの巨大地震の発生が懸念されており、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、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 ^{1,2)}. 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 3/4/5¹⁶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きた. 例えば、神田・源栄 %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. 藤並ら 9,10 は、山地形による地震動増幅特性を確かめ

藤並ら %100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一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. 短周期成分の地震動が増幅され、地形による増幅率の卓越周期の違いを確認した後、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することにより3次元モデルの妥当性を検討した. 結果、丘陵頂部に存在する風化した堆積層をモデル化していなかったため、堆積層上の観測地点については0.1 秒以下の短周期成分がかなり過小に評価されていた.

そこで、本研究では堆積層の地震動の増幅特性を把握することを目的として、観測丘陵においてスウェーデン式サウンディング試験を行った.

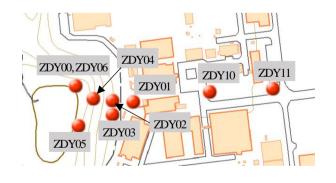


図-1 観測地点

表-1 試験結果から得られた物性値

全試験の 平均	平均換算N値	2.6
	層厚(m)	4.2
	せん断波速度(m/s)	138

2. 丘陵頂部における地盤調査

(1) 地盤調査

観測対象地は、神奈川県三浦半島西海岸中部の小田湾に面した低地に位置する小丘陵である。観測点を図-1に示す。丘陵頂部に堆積層があり、堆積層上の ZDY05、ZDY06 地点の応答倍率の短周期成分が過小評価されていた。そのため、堆積層の物性値を得ることを目的として、観測丘陵においてスウェーデン式サウンディング試験を行った。

スウェーデン式サウンディング試験から得られる静的 貫入抵抗値の Wsw, Nsw と標準貫入試験から得られる N 値には相関関係が得られており, 次に示す式(1), (2)が 与えられている.

砂質士
$$N = 0.002W_{SW} + 0.067N_{SW}$$
 (1)

粘性士
$$N = 0.003W_{SW} + 0.050N_{SW}$$
 (2)

ここで、Wsw は荷重、Nsw は 1m 貫入するのに必要な半 回転数を示す。

上式より算出した N値を用いて, 道路橋示方書に示された算定式(3)から, 堆積層のせん断波速度を推定する.

試験は ZDY05, ZDY06 地点付近でそれぞれ 2 回実施 し、それぞれの試験の平均値を物性値としてモデルに反映させる. 得られた物性値を表-1 に示す.

(2) 固有周期の比較

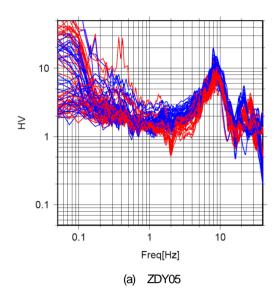
地盤の固有周期を得るときに、簡易的な方法として用いられるのが式(4)に示す 1/4 波長則である.

$$T = \frac{4H}{Vs} \tag{4}$$

ここで、Hは表層地盤の層厚、Vsは表層地盤のせん断波速度を示す。

この式は、地盤が水平成層地盤であることを前提としているが、表-1 の物性値を基に、観測丘陵の堆積層の固有周期を算出すると、固有周期は約0.12秒となる。

一方,当該地点において実施した微動観測によるZDY05,ZDY06地点のHVスペクトルを図2-(a),(b)に示す。



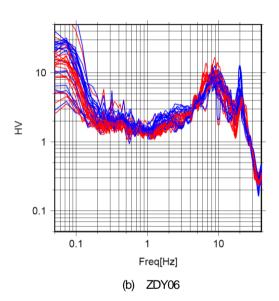


図-2 HW スペクトル

図 2-(a), (b)によると ZDY05 地点の卓越周波数は 8.0~9.0Hz 付近, ZDY06 地点は 8.0~10Hz である. つまり, 観測対象丘陵頂部に堆積した有機質土の固有周期は 0.1~0.125 秒であることが確かめられ, 1/4 波長則を用いて算出した固有周期と概ね一致していることが分かる

3. 3次元 FEM 解析と地震応答特性

(1) モデルと解析条件

本研究では、3次元 FEM 解析コード 783¹¹⁾を用いて時刻歴応答解析を行う。国土地理院の地盤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。モデルの作成範囲を図-3に示し、作成したモデルを図4に示す。なお、図4中の X 軸は東西方向(矢印方向が西)、Y 軸は南北方向(矢印方向が北)を表している。モデルの大きさは

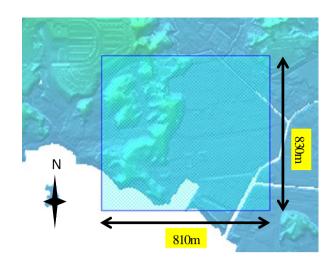


図-3 モデル作成範囲

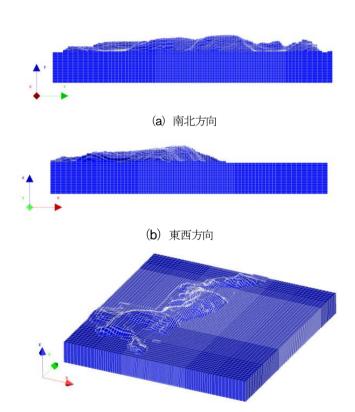


図-4 3次元モデル

(c) 俯瞰

東西方向に 810m, 南北方向に 830m, 標高は最大で約 55m である.

メッシュ分割は荒いほうから 15, 10, 5m としており, 20Hz までの精度を確保するため着目するモデル中央部は5×5mメッシュで作成する. 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.

観測記録は2015年12月2日の3つの地震⁹の1つである表-2に示す地震[2]を用いる。本研究では、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 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地震波を用いる. 地盤物性値は, 対象地で行われた PS 検層 ¹²⁾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た(表-3). なお, 堆積層のせん断波速度は地盤調査によって得られた値, 密度は道路橋示方書 ¹³⁾, ポアソン比をトンネル標準示方書 [開削工法編]を参考に設定した. 表-3 の物性値を基に, 図-1 の丘陵範囲で堆積層を標高 45m以上において簡易的に再現した.

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[2]	午前1時7分15秒	M38	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

表-3 地盤物性値

	せん断波速度(m/s)	密度(t/m³)	ポアソン比
堆積層	138	15	0.45
地下40m以浅	600	19	0.25
地下40m以深	850	2.1	0.2

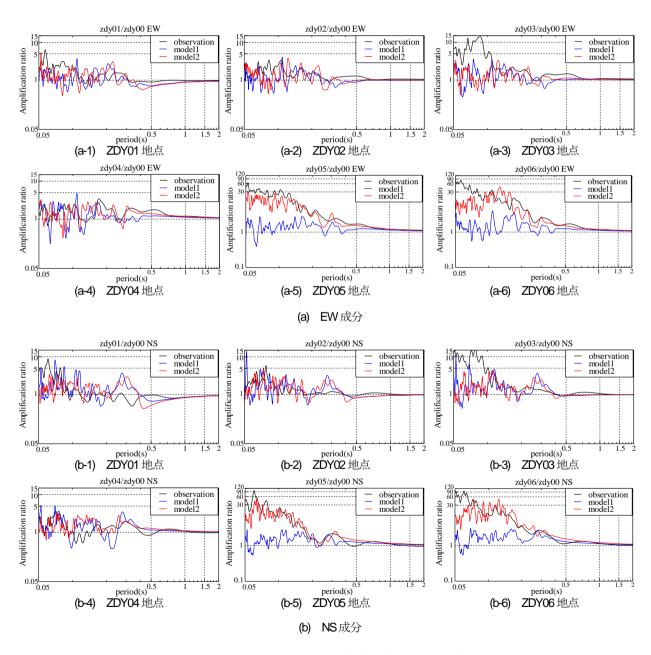


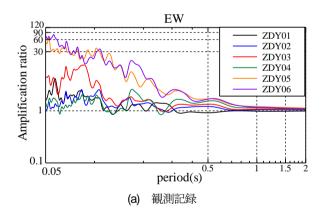
図-5 地盤増幅率(堆積層考慮の有無と観測比較)

(2) 地盤増幅率の比較

地下坑内の観測点である ZDY00 地点を基準として各 観測点の応答倍率を算出する. 本研究では,この応答倍 率を地盤増幅率として扱う.

丘陵頂部における堆積層を考慮していないモデルを model1 (青線) , 堆積層を考慮したモデルを model2 (赤線) として地盤増幅率を比較したものを図-5 に示す. 図-5 の EW 成分より, model2 においてすべての観測点で 0.1 秒以上の周期成分は, 観測記録が近い値が得られた. 特に, ZDY05, ZDY06 地点において, model1 で過小に評価されていた 0.1~0.5 秒の成分の波の計算精度が大きく改善している. 一方, ZDY03, ZDY06 地点の 0.1 秒以下の短周期成分は最も差がある箇所で model2 でも 1/10程度 過小評価されている.

NS 成分を見てみると、model2 において ZDY01~ ZDY03 地点は各地点の周期 0.3 秒以外の成分と ZDY03 地点の 0.1 秒以上の成分で観測値と近い値が得られている。 ZDY04 地点は、0.1 秒付近以外で観測値と計算値が近似している。 ZDY05 地点は過小評価されていたすべての周期で観測値と概ね一致する解析結果となり、 ZDY06 地点においても周期 0.1 秒以上の部分は観測値と近い値が得られていることから、計算精度が大きく改善できていることが分かる。 ただし、 ZDY03 地点の周期 0.1 秒以



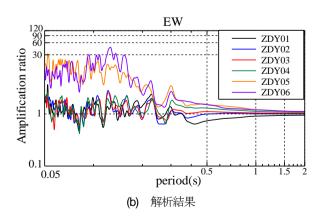


図-6 EW成分における各観測点の比較

下の部分で1/5程度, ZDY06地点の0.1 秒以下の応答倍率 が観測値よりも1/6程度過小評価されている.

図-6は、観測記録と解析結果(model2)のEW成分における各観測点の応答倍率の比較を示したものである。

観測点は ZDY01~ZDY06 地点の順で標高が大きくなるが、観測値は標高が高くなるにつれて、応答倍率は大きくなる傾向があり、図-6の周期 03~0.5 秒付近に着目すると、解析においてもその特徴を再現することができた。また、せん断波速度 Vs=600m/s で層厚が 55m の水平成層地盤を仮定して、1/4 波長則を適用すると周期 0.3 秒付近が固有周期になるが、観測対象丘陵も標高が約 55mで Vs が 600m/s であり、図-6の観測記録および解析結果(model2)より周期 0.3 秒付近の波が増幅して卓越することが示されている。つまり、山地形に対しても水平成層地盤の 1/4 波長則を適用できる可能性があることが分かる.

4. 結論

本研究では、横須賀にある小丘陵頂部に存在する堆積層の地震動の増幅特性を把握することを目的として、スウェーデン式サウンディング試験を行った. 地盤調査によって得られた物性値と丘陵頂上における微動観測記録を用いて堆積層の固有周期を求めた. 得られた結果を以下に示す.

1) 地盤調査から得られた物性値を基に、1/4 波長則を用いて算出した堆積層の固有周期と、堆積層上の微動観測記録による H/V スペクトルから求めた固有周期が概ね一致した。このことから丘陵頂部に堆積する堆積層の固有周期を簡易的に推定する方法として 1/4 波長則を適用できる可能性を示した。

次に、当該丘陵で行った地震観測に対して3次元FEM 解析を行い、観測記録と増幅特性の比較を行った結果を以下に示す.

- 1) 堆積層をモデル化した 3 次元 FEM 解析によって 周期 0.1 秒以上の成分において観測記録と近い応 答倍率を算出することができ, 地震動増幅の周 波数特性を再現できた.
- 2) 観測記録と解析結果において,卓越周期 0.3 秒の 応答倍率が標高とともに大きくなる傾向にある.また,観測丘陵の標高が約 55m,せん断波速度 Vs=600m/s であり,1/4 波長則を適用すると周期 0.3 秒付近が固有周期になることから,丘陵においても1/4 波長則によって算出した固有周期が卓越することが示唆された.

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、古川秀明氏には3次元FEMコードをご提供して頂いた上に、モデルの作成にあたって多くのご指導を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。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, Vol.22, No.1, pp.87-89, 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,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.443, 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ー釧路 地方気象台敷地の場合ー、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) 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,地震工学論文集, Vol.36, pp.907-913, 2017.
- 10) 藤並雄誠, 吉見雅行, 酒井久和, 佐藤清隆, 池田勇司:3次元 FEM に基づく山地形の地盤増幅率の推定, 第 37 回土木学会地震工学研究発表会講演概要集, No.1131 (CD-ROM), 2018.3
- 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.55-61,1982.
- 12) 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.
- 13) 社団法人 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.32-33, 2012.

(2018. ?. ? 受付)

EFFECT OF TOP SURFACE SEDIMENTARY LAYER ON SEISMIC AMPLIFICATION CHARACTERISTICS AT A SMALL HILL

Yuusei FUJINAMI, Tatsuya ISHIMARU, Hisakazu SAKAI, Masayuki YOSHIMI, and Kiyotaka SATO

In Japan, a large number of landslides occurred during severe earthquakes and induced the blockage of roads. The blockage frequently brought the secondary disaster as the isolation regions. Seismic amplification characteristics on the mountain topography should be estimated properly to mitigate the disaster. In this study, we conducted the Swedish weight sounding tests at the low hill top to grasp the ground condition, and some numerical analysis based on three-dimensional FEM.

We could obtain the same seismic amplification characteristics by the analysis as those by microtremor and earthquake observations. The results suggest that the quarter wave rule could lead two predominant periods related the surface sediment layer and the mountain topography.