



## 洪積台地の震動特性に与える斜面の影響

永田葉子<sup>1)</sup>、中井正一<sup>2)</sup>、関口徹<sup>3)</sup>

- 1) 学生会員 千葉大学大学院自然科学研究科、大学院生  
e-mail : nagata-yoko@graduate.chiba-u.jp
- 2) 正会員 千葉大学大学院工学研究科、教授 工博  
e-mail : nakai@faculty.chiba-u.jp
- 3) 正会員 千葉大学大学院工学研究科、助教 博士(工学)  
e-mail : tsekiguc@faculty.chiba-u.jp

### 要約

斜面が洪積台地の地震動増幅特性に与える影響を把握するために、斜面近傍地盤の地盤調査、地震観測、2次元有限要素法解析を行った。地盤調査結果に忠実な斜面沿いに軟弱な層が分布する地盤モデルと、軟弱な層が分布しない地盤モデルにより、有限要素法解析を行った結果、軟弱な層が分布することによる地盤増幅効果は非常に大きい影響範囲は狭く、斜面の形状に起因する地盤増幅効果はそれほど大きくないものの遠方に及ぶことが判明した。さらに、斜面による地震動増幅の要因である反射波の分布を把握し、斜面の影響が遠方に及ぶ原因は斜面での表面波の生成にあるが、表面波が優勢になると地盤増幅も小さくなることを確認した。

キーワード： 洪積台地、震動特性、斜面、地形効果、有限要素法

### 1. はじめに

下総台地や武蔵野台地など、関東地方南部に広がる洪積台地は、それを開析する谷底平野（谷津田）が内陸深くに入り込む複雑な地形を有している。この台地と谷の境界には高さ数十mの斜面が形成されているが、現在では斜面のごく近傍まで宅地化が進んでいる。

地震動の増幅に対して地形が影響していることはよく知られており、斜面による地盤増幅の研究も数多くなされている。例えば、栗田ら<sup>1)</sup>による山地形に対するアレー観測記録の分析及び有限要素法による解析では、山頂の増幅率が非常に大きくなり、また肩のような形状があると増幅が大きくなることが示されている。浅野ら<sup>2)</sup>も有限要素法解析により、山体の比高や幅、対称性の違いにより、応答加速度の増幅の傾向が異なることを示している。また、安田ら<sup>3)</sup>は平面的な斜面形状の違いと増幅特性の関係について考察を行っている。これらは、主に山地形を対象とし、斜面そのものの増幅特性の検討であるが、斜面の影響により斜面上部に当たる台地の増幅特性について検討した事例も多い。斜面の影響のない台地と比較して、斜面による台地の増幅の程度を示している事例としては、例えば、設計用入力地震動研究委員会(財)日本建築センター、昭和63～平成3年度)により、斜面直上では1.1～1.25倍で、斜面から遠ざかるにつれて小さくなる加速度応答スペクトルに対する地形効果補正係数の算出式が提案されている<sup>4)</sup>。さらに、建設省総合技術開発プロジェクト「大都市地域における地震防災技術の開発(平成4

～8 年度)」では、斜面勾配や地層のインピーダンス比をパラメータとした詳細な検討が行われており、斜面上部の伝達関数を水平成層地盤の伝達関数を基準として評価する手法が提案されている<sup>5)~10)</sup>。また、構造耐震判定の指標値の補正係数として、崖地の地形効果を考慮する場合があるが、1.1～1.25 倍程度の値が用いられている<sup>11)</sup>。しかし、これらの台地の増幅を検討したものの多くは、一様や 2～3 層の水平な層境界を有するモデルで検討が行われており、実際の地盤において地震観測や地盤調査を行っている例は少ない。

今回、斜面上端部に地震計を設置し、斜面下端、斜面から離れた台地の地震記録と比較した結果、斜面上端部は他の場所に比べ 2 倍以上の最大加速度を記録することを確認した。筆者らは、常時微動計測及び有限要素法による解析により、斜面近傍地盤の震動特性について検討を行ってきた<sup>12)</sup>、従来の「地形効果」として評価されている「形状の効果」と共に、斜面沿いの軟弱層（以降ゆるみ層）の存在が斜面上部の地盤震動特性に与える影響についても、斜面の「地形効果」として検討を行う必要性を示した<sup>13)~14)</sup>。

本研究は、形状の効果のみではなく、ゆるみ層による増幅をあわせて「斜面による地形効果」と定義し、洪積台地を対象として、この広義の「斜面による地形効果」を把握するために、地盤調査、地震観測、有限要素法に基づいて検討を行ったものである。なお、本論では、約 1.8～2 万年前の最終氷期最盛期以降の堆積物を沖積層、それ以前の地盤を洪積層と呼ぶ<sup>15)</sup>。

## 2. 検討対象地の概要

図 1 に千葉市北部の地形分類図<sup>16)</sup>と研究対象地を示す。千葉市北部は下総台地に分類され、主に洪積台地（関東ローム層）が占めている。周辺の表層は層厚 5m 程度の関東ローム層で、その下部には下総層群の砂質土層が分布している。この台地を開析した谷底平野が樹枝状に形成されており、その下流部は平野となっている。台地と低地の間は高さ数十 m の斜面となっており、急傾斜面となっている箇所も多い。東京湾側は埋立地で、埋立地と台地の境界には急崖が形成されている。谷底平野は非常に軟質な堆積物から成り、かつては水田や湿地であったが、現在は開発されて宅地となっている。また台地も斜面際まで宅地化されている地域である。

研究対象地は、幅約 250m の谷底平野に隣接する台地および斜面である。台地と谷底平野の境をなす斜面は、高さ 10m、勾配 25° 程度で、斜面内には道路及び道路擁壁があるが、概ね自然斜面で植生が繁茂している。

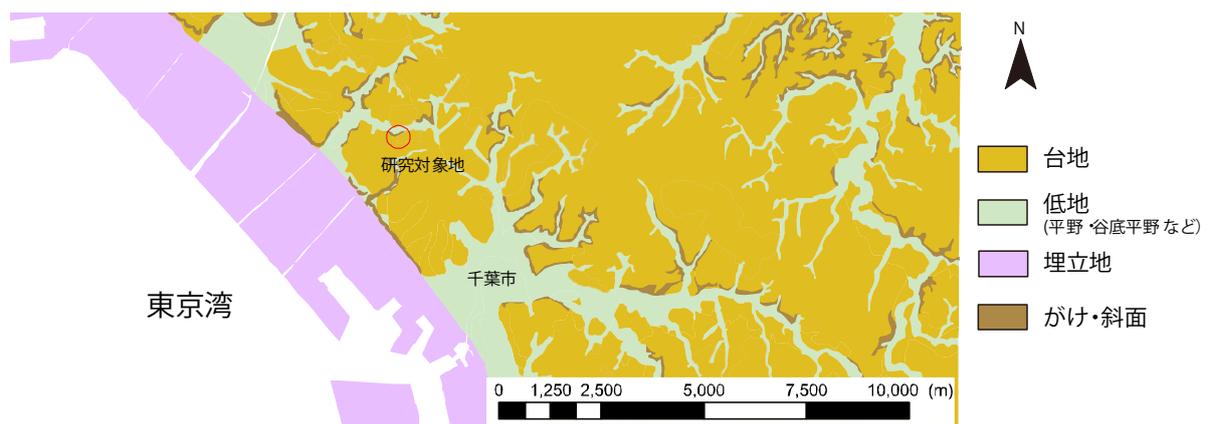


図 1 千葉市北部の地形分類図および研究対象地<sup>16)</sup>に加筆

## 3. 地盤調査

### 3.1 地盤調査の概要

研究対象地の斜面近傍の地盤状況を把握するために、ボーリング調査、PS 検層、表面波探査を実施す

ると共に、既存の地盤調査結果を収集した。調査平面図を図2に示す。今回新規に調査ボーリングを行った位置は、既往の地盤調査資料の無い斜面上端部と低地中央部の2箇所であり、それぞれ標準貫入試験及びPS検層を実施した。さらに周辺部の表層地盤のS波速度構造の把握のために表面波探査を行った。表面波探査は、受振点間隔1m、起振点間隔1mで、地表面からGL-10m程度までを対象とした。

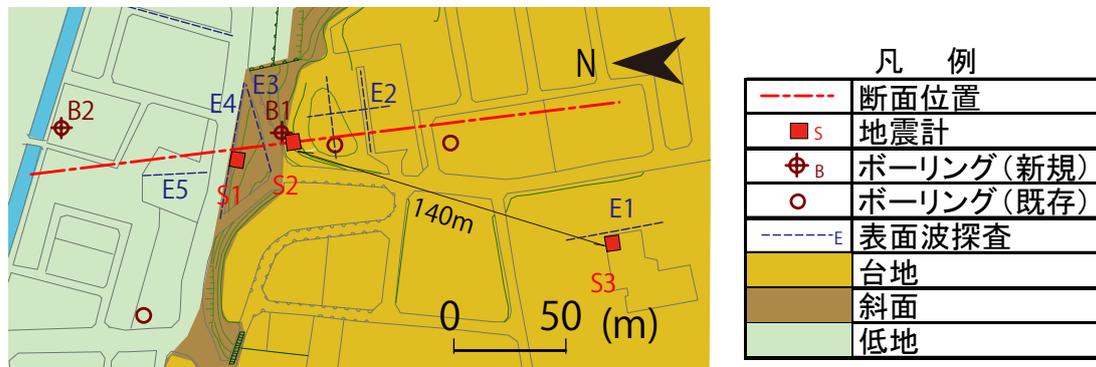


図2 調査平面図

### 3.2 地盤調査結果

地盤調査結果断面図を図3に示す。地震観測は、斜面上端部（S2）とそこから約140m離れた台地上（S3）の2箇所で行っている。また、斜面下端部には他機関の地震計（S1）が設置されている。

近傍のボーリング調査結果から、台地はほぼ成層の地盤構造を有していると考えられ、ローム層は層厚5m程度、その下部にはGL-30m(TP-10m)付近まで洪積の下総層群の砂質土が分布する。この砂質土はPS検層結果から、せん断波速度 $V_s=250\sim 350\text{m/s}$ である。台地面よりGL-30m(TP-10m)付近に厚さ数mのN値の低い粘性土( $V_s=200\text{m/s}$ 程度)を挟み、その下部にN値50を安定的に超え、せん断波速度が400m/sを超える工学的基盤と考えられる層が出現する。斜面下部の沖積谷には極めて軟質な腐植土・粘性土が堆積している。この沖積谷はもともと砂堆により閉塞された溺れ谷（後背湿地）であり、現在では盛土を行い宅地として利用されている。

既往の地盤調査では、台地の表層は層厚5m程度のローム層であるのに対し、今回実施した斜面上端部のボーリング（B1）では、ローム主体で途中に腐植物を挟む崩積土がGL-7.5mまで堆積していることが確認された。この崩積土層はPS検層により、せん断波速度が140m/s以下であり、台地で実施した表面波探査（E2）でも、斜面近くではせん断波速度が200m/s以下の低速度層が厚く現れている。さらに、斜面中央部の道路上で実施した表面波探査（E3）や斜面下端の表面波探査（E4）から、斜面際には斜面

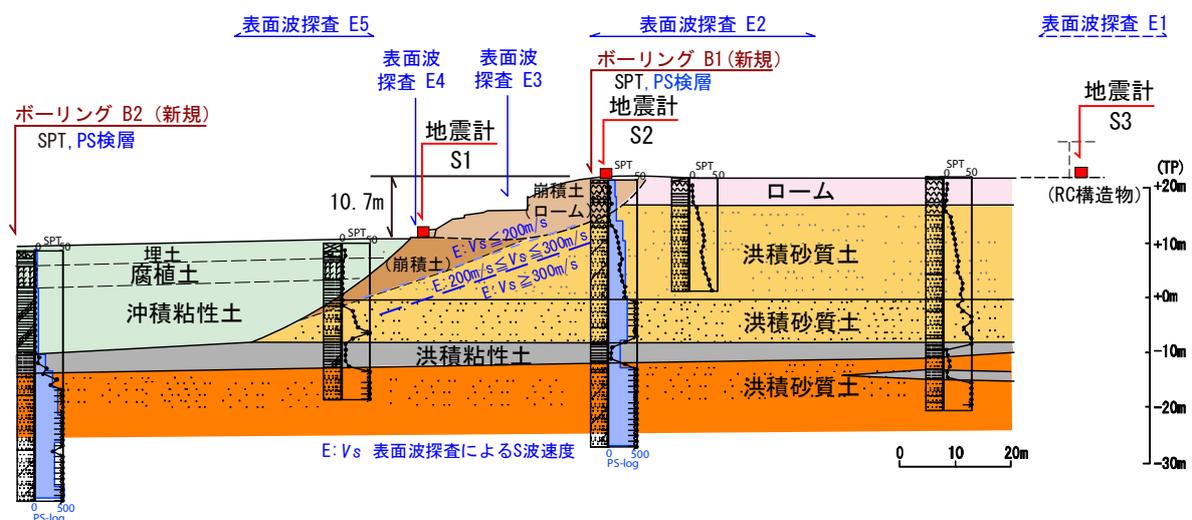


図3 地盤調査結果断面図

とほぼ同程度の勾配を有するせん断波速度 200m/s 以下の低速度層が分布していることを確認できた。この低速度層は 8m 程度の層厚であり、成因については次節で考察を行うが、崩積土および二次堆積物により構成されていると考えられる。

### 3.3 斜面沿いの地盤性状について

今回の地盤調査結果により、斜面沿いの地盤が軟弱であることが確認できた。斜面上端部のボーリングでは、台地の関東ロームより下のレベルまでロームであることから、崩落したロームが斜面沿いに堆積していると考えられる。これはローム層の下部に分布する下総層の砂質土が侵食を受けやすい土質であるのに対して、ロームは火山灰質粘性土で比較的侵食を受けにくいいため、砂質土の脚部侵食に伴って沈下・崩落したもの、もしくは関東地方の台地で一般的に見られる霜柱クリープなどによる土砂の移動が成因<sup>17)</sup>と考えられる。このような成因の崩積土・二次堆積物は、海退期には露頭であった現在の沖積層底面のレベルにまで及んでいる可能性がある。このような成因による斜面沿いの軟弱層の分布は、関東地方の台地に多く見られると考えられる。また、地域を問わず、自然斜面では長年の風雨による風化や植物根の進入による地盤の緩みや腐植物の堆積、切土斜面では応力開放による緩みなど、斜面の多くは斜面に沿って軟弱化している、もしくは軟弱な層が分布しているものと考えられる。

## 4. 地震観測

### 4.1 観測した地震動と最大加速度

図 3 に示した斜面下部(S1)、斜面上端部(S2)、台地上(S3)の 3 地点で地震観測を行っている(S1、S2 については地盤上に、S3 については建物内にそれぞれ設置されている)。このうち 2 箇所以上で記録が得られ、かつその最大地動加速度(PGA)が  $0.1\text{m/s}^2$  以上となる地震について、表 1 にその主な諸元と各地点の最大地動加速度を示す。

地震計 S2 の最大加速度は S1、S3 と比較して、2 倍以上を示しているものが多く、NS 方向(斜面直交方向)の最大加速度が EW 方向(斜面平行方向)より大きい場合が多い。他の地震計については方向による違いは認められない。

表 1 観測した地震動と最大地動加速度 (PGA)

諸元			PGA(NS方向)( $\text{m/s}^2$ )			PGA(EW方向)( $\text{m/s}^2$ )		
日時	マグニチュード	震源	S1	S2	S3	S1	S2	S3
2005/2/16 4:47	5.3	茨城県南部	0.27	0.78	---	0.34	0.66	---
2005/4/11 7:23	6.1	千葉県北東部	0.34	0.73	---	0.21	0.57	---
2005/6/9 9:30	4.5	千葉県北西部	0.26	0.71	---	0.32	0.49	---
2005/6/20 1:16	5.6	千葉県北東部	0.19	0.71	---	0.21	0.45	---
2005/7/23 16:36	6.0	千葉県北西部	1.30	2.86	---	1.31	2.01	---
2005/8/16 11:49	7.2	宮城県沖	0.19	0.36	---	0.19	0.41	---
2005/10/16 16:06	5.1	茨城県南部	0.21	0.33	---	0.16	0.24	---
2005/10/19 20:46	6.3	茨城県沖	0.21	0.54	---	0.26	0.54	---
2007/8/16 4:15	5.3	千葉県東方沖	---	0.94	0.41	---	0.63	0.47
2007/8/16 8:20	4.9	千葉県東方沖	---	0.49	0.19	---	0.27	0.15
2007/8/16 8:32	4.4	千葉県東方沖	---	0.26	0.14	---	0.22	0.07
2007/8/16 9:22	4.7	千葉県東方沖	---	0.32	0.08	---	0.29	0.10
2007/8/18 4:14	4.8	千葉県南部	---	0.73	0.28	---	0.78	0.29
2007/8/18 13:36	4.5	千葉県北東部	---	0.23	0.10	---	0.27	0.12
2007/8/18 16:55	5.2	千葉県南部	---	0.98	0.41	---	0.77	0.38
2007/8/18 23:16	4.0	千葉県北東部	---	0.25	0.09	---	0.21	0.10

### 4.2 2 点間のフーリエスペクトル比

S2 を分子とした S1、S3 との方向別の地震記録のフーリエスペクトル振幅比を図 4 に示す。表 1 の観測地震動のうち震源が遠方である 2005 年 8 月 16 日の記録は除いた。また、図中に赤色で示した 2005 年 7 月 23 日の記録は、観測した中で最大の加速度を記録した地震動である。

スペクトル比は、ほとんどの振動数で 1 を超えており、S2 は S1、S3 と比較して、フーリエスペクトル振幅が大きいことがわかる。いずれのスペクトル比も、異なる地震であるにも関わらず、5Hz 付近に

ピークが見られるなど、その周波数特性は比較的安定している。S2/S1 は、NS 方向と EW 方向のスペクトル比の傾向が異なっているが、S2/S3 については NS、EW 方向とも同様の傾向を示しており、S1 と S3 の地形の違いが影響していると考えられる。全体的な傾向では、S2/S1 は S2/S3 よりスペクトル比が高く、NS 方向は EW 方向より高い。S1 と S3 は同時に観測ができていないが、S3 の振幅が S1 より大きいことが予測される。NS 方向が EW 方向より高いことは、観測された最大地動加速度(表 1)と整合する。

図中に赤色で示した 2005 年 7 月 23 日の地震では、S1 で  $1.30\text{m/s}^2$ 、S2 では  $2.86\text{m/s}^2$  の加速度を記録しているが、他の日の記録とスペクトル比の周波数特性に大きな違いはなく、顕著な地盤の非線形化は発生していないと考えられる。

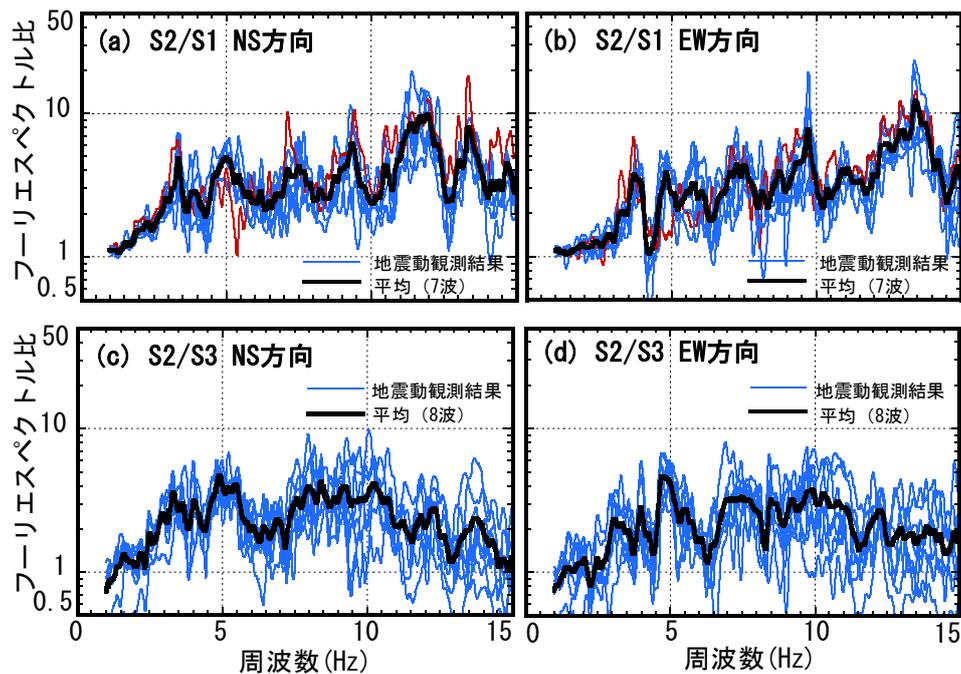


図 4 2 地点間のフーリエスペクトル比

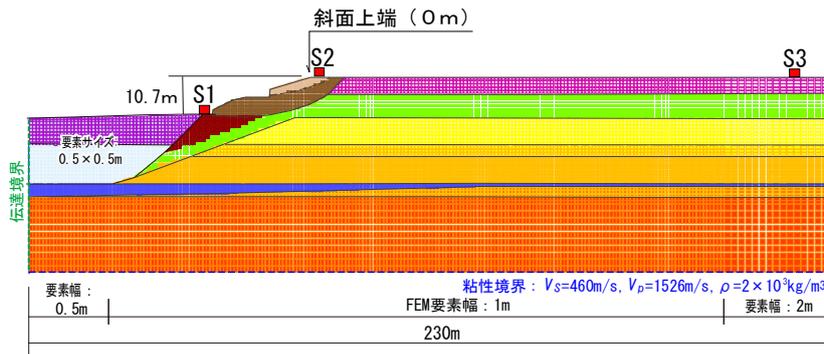
## 5. 斜面沿いに分布するゆるみ層の影響

### 5.1 解析モデル及び解析条件

地盤調査により、斜面に沿って軟弱な層（ゆるみ層）が分布していることを確認した。このゆるみ層が地盤震動特性に与える影響を確認するために、以下の 2 ケースについて 2 次元の地盤モデルを作成し有限要素法による解析を行った。

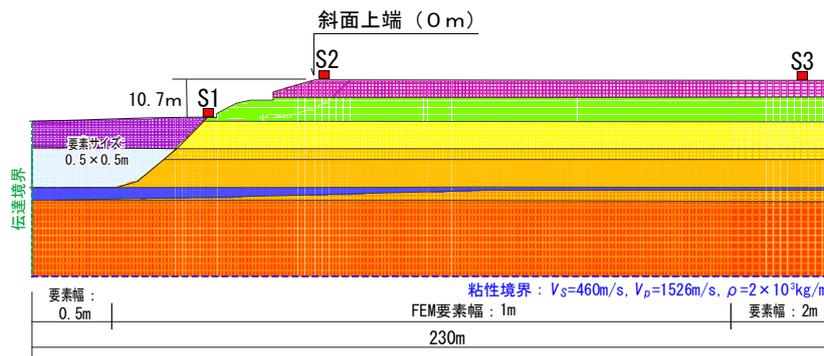
- ゆるみ層モデル（図 5）：地盤調査結果に基づいたモデルで、斜面沿いのゆるみ層を有する
- 成層モデル（図 6）：地形はゆるみ層モデルと同一であるが、斜面沿いのゆるみ層がなく台地側の層が成層に斜面まで届いていると仮定したモデル

地盤の S 波速度や土の単位体積重量等の物性値は、PS 検層、表面波探査及び地盤調査結果等を参考に決定した。解析は複素応答（周波数応答）解析を用い、これまでの地震観測結果には地盤の非線形化の影響がほとんどないと判断されたことから線形計算を行った。解析モデルの境界条件は、側方はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とし、計算振動数は、伝達関数の計算では  $0.1\text{Hz}$  間隔、最大加速度応答計算では  $0.0244\text{Hz}$  間隔で  $15\text{Hz}$  までとした。入力地震動は、周波数特性が異なる建築基準法施行令第 81 条の 2 に則った模擬地震動（以降、告示波）と（財）日本建築センターの八戸 1968NS 波（以降、八戸波）の最大加速度を、単位加速度である  $1.0\text{m/s}^2$  になるように調節したものを用い、モデル底面から面内方向（SV 波）に時間間隔  $0.01$  秒で入力した。入力地震動の加速度応答スペクトルと時刻歴波形を図 7 に示す。解析コードは DINAS（CRC ソリューションズ）を用いた。



層	土質	S波速度 (m/s)	密度 (x10^3kg/m^3)	ポアソン比	減衰
腐植土		40	1.1	0.49	0.05
粘性土		60	1.1	0.49	0.05
崩積土1		80	1.2	0.45	0.02
崩積土2		120	1.2	0.45	0.02
崩積土3		170	1.5	0.45	0.02
ローム		150	1.4	0.45	0.02
砂質土		240	1.8	0.45	0.02
砂質土		270	1.8	0.45	0.02
砂質土		300	1.9	0.45	0.02
砂質土		350	1.9	0.45	0.02
粘性土		210	1.5	0.45	0.02
砂質土		300	1.9	0.45	0.02
基礎		460	2.0	0.45	0.01

図5 2次元 FEM モデル（ゆるみ層モデル）と物性値



層	土質	S波速度 (m/s)	密度 (x10^3kg/m^3)	ポアソン比	減衰
腐植土		40	1.1	0.49	0.05
粘性土		60	1.1	0.49	0.05
ローム		150	1.4	0.45	0.02
砂質土		240	1.8	0.45	0.02
砂質土		270	1.8	0.45	0.02
砂質土		300	1.9	0.45	0.02
砂質土		350	1.9	0.45	0.02
粘性土		210	1.5	0.45	0.02
砂質土		300	1.9	0.45	0.02
基礎		460	2.0	0.45	0.01

図6 2次元 FEM モデル（成層モデル）と物性値

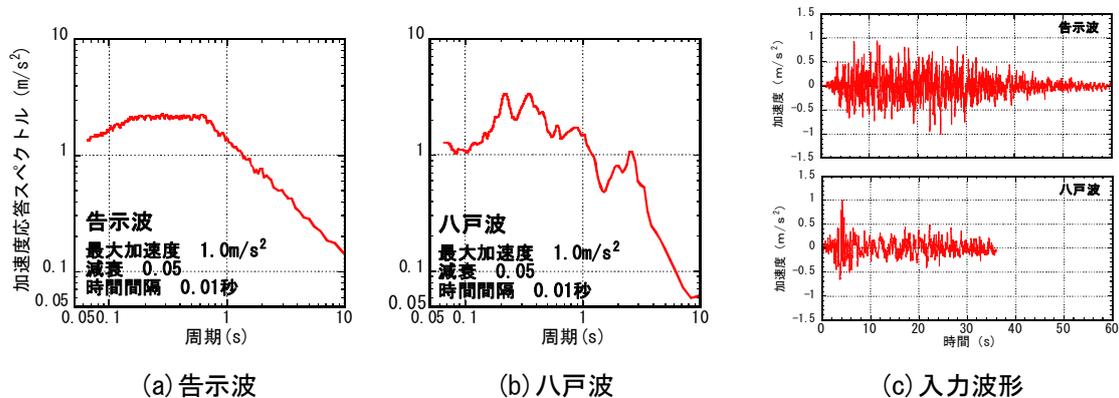


図7 入力波の応答スペクトルと入力波形

## 5.2 ゆるみ層の影響

ゆるみ層モデルと成層モデルから求めた伝達関数を、斜面からの距離により整理したものを図8に示す。横軸は斜面上端からの距離、縦軸は振動数、色の変化は伝達関数の絶対値（増幅率）を表している。伝達関数は斜面上端を0mとした-80~110mでは5m間隔で、110~150mでは10m間隔で抽出した。

ゆるみ層モデルは斜面内及び斜面直上の5Hz付近の増幅が大きい。ゆるみ層モデルは斜面上端部に明瞭なピークがあるのに対し、成層モデルでは斜面上端部と台地内部の増幅に大きな違いは見られない。成層地盤モデルでは、斜面および斜面直下の、特に高振動数の増幅率が非常に小さくなっている。

図9に最大加速度分布を示す。ゆるみ層モデルでは、ゆるみ層内、特にゆるみ層の上部の加速度が大きくなった。成層地盤モデルでも斜面近くの加速度が大きいが、斜面直上ではなく、やや離れた位置が大きくなっている。

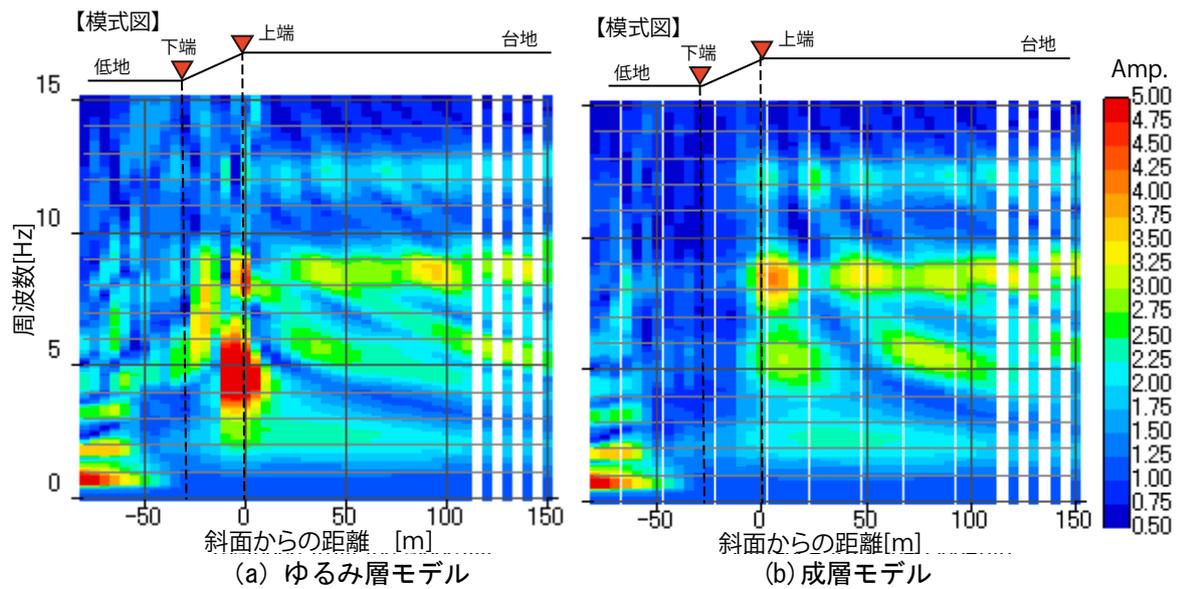


図8 伝達関数の斜面からの距離による変化

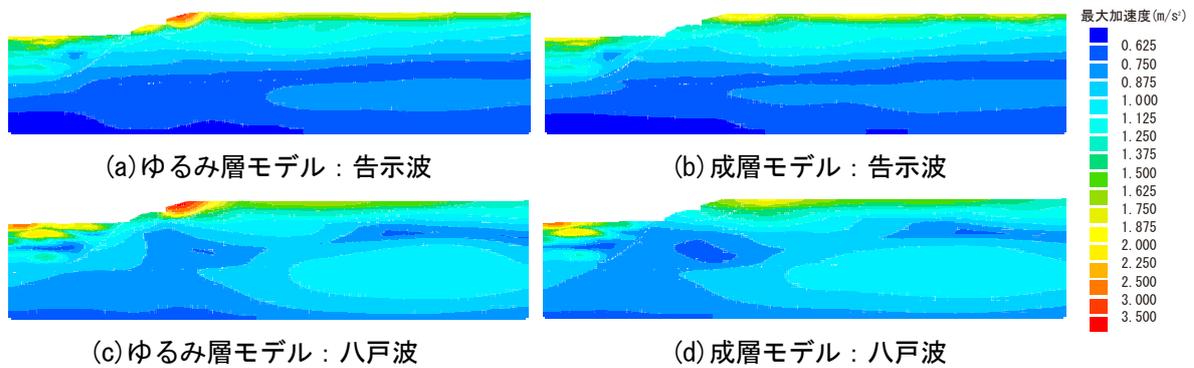


図9 最大加速度の分布

### 5.3 斜面直上の震動特性

ゆるみ層が分布している斜面直上の地盤震動特性について検討を行った。ゆるみ層は斜面上端から10mの範囲に分布していることから、斜面上端(0m)から20mの範囲の5m間隔で伝達関数を抽出し、図10(a)に示す。また比較のため成層モデルについても同じ位置のデータを抽出した(図10(b))。

ゆるみ層モデルでは、斜面上端部の伝達関数は極めて明瞭で高いピークを持ち、斜面から遠ざかると急速にピークが低くなる。斜面から10m以降はゆるみ層の分布はないが伝達関数の変化は継続している。一方、成層モデルは、7Hz以上では増幅率にやや違いは見られるものの、振動数による変化はもっとも台地側(150m位置)の伝達関数(1次元解析)と大きな違いは見られない。

図11は、地点ごとのゆるみ層モデルと成層モデルの、1次元解析と2次元解析結果を比較したものである。ここで1次元解析とは、解析地点の土質の深度分布が水平成層であると仮定したときの伝達関数を表している。ゆるみ層モデルでは、1次元解析と2次元解析のピーク振動数が異なり、不整形性の影響が強く現れている。斜面から20m離れた位置では、両モデルとも同じ地盤であるが、伝達関数の形状は異なっており、ゆるみ層の影響が及んでいることがわかる。特に、斜面上端部(図11(a))では、成層モデルの1次元と2次元解析の伝達関数の差がわずかであるのに対し、ゆるみ層モデルでは大きく異なっている。1次元解析と2次元解析では土質構成が同じであり、ゆるみ層モデルと成層モデルでは地表の地形は同じであることから、この結果は地中の不整形性の影響が考えられる。すなわち、ゆるみ層モデルでは、軟弱な土質そのものの増幅のみではなく、ゆるみ層自体の形状が斜面上端部の地盤増幅の効果を有していることが考えられる。

図 12 に地表面の最大加速度分布を示す。ゆるみ層モデルでは告示波、八戸波とも斜面上端から水平距離で 5m 位置の斜面で最大値を示し、斜面上端でも大きな加速度となっている。成層モデルでは、斜面上端付近に顕著な変化は認められない。

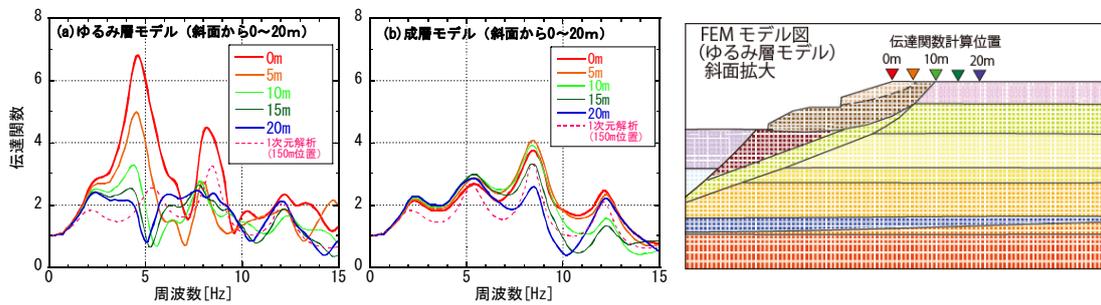


図 10 ゆるみ層の有無による伝達関数の違い (斜面上部)

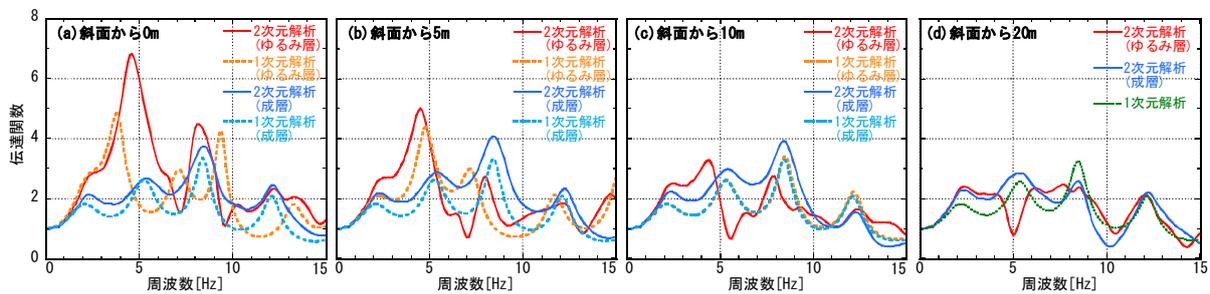


図 11 1次元解析との比較 (斜面上部)

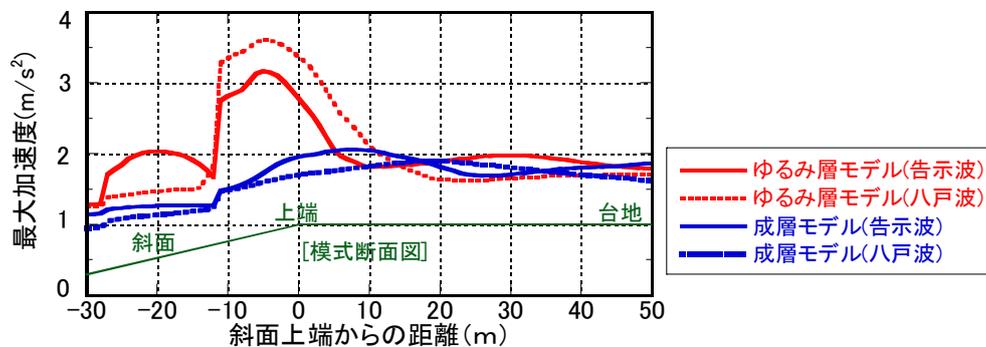


図 12 地表面の最大加速度 (斜面上端付近)

#### 5.4 斜面直下の震動特性

図 13(a)に斜面からの距離による伝達関数の変化を、図 13(b)～(e)に、1次元解析と2次元解析の伝達関数の比較を示す。斜面下部の低地には、極めて軟質な沖積層が堆積しており、斜面から離れるほどその層厚は厚くなる。そのため、斜面から離れるほど伝達関数のピーク振動数が低くなり、増幅率が高くなる傾向にある。これは、地形と関係しない1次元解析でも同様の結果となる。斜面直下(図 13(b))では、1次元解析と2次元解析の増幅率には大きな違いがないが、ピーク振動数がやや異なっている。斜面下端から離れると(図 13(c)～(e))、振動数は1次元と2次元で大きな違いはないが、増幅率が2次元解析では低くなっている。これには、斜面の影響(地表の不整形)と共に沖積層と洪積層の層界の傾斜(地中の不整形)による影響が考えられる。斜面下端から10m位置の2次元の伝達関数がかなり低く抑えられているが、沖積層と洪積層の層界の変化が大きい位置であることから、その影響が強く現れているものと考えられる。

図 14 に示すように、地表面の最大加速度についても、斜面下端付近でもっとも小さくなり、斜面から離れると大きくなる傾向にある。

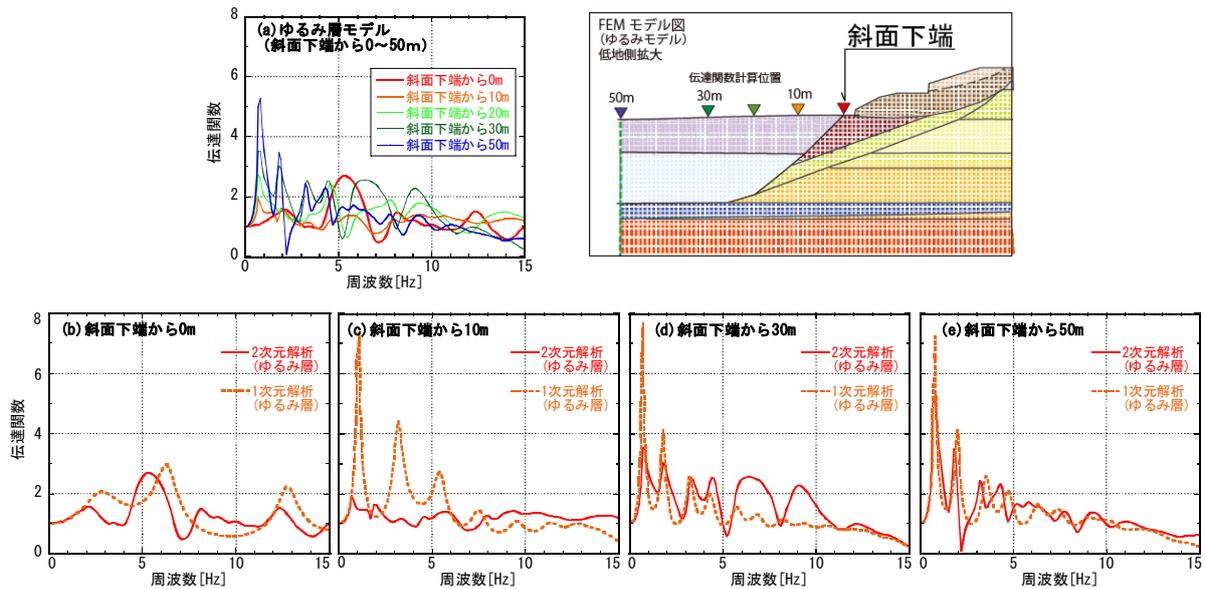


図 13 斜面下部の伝達関数

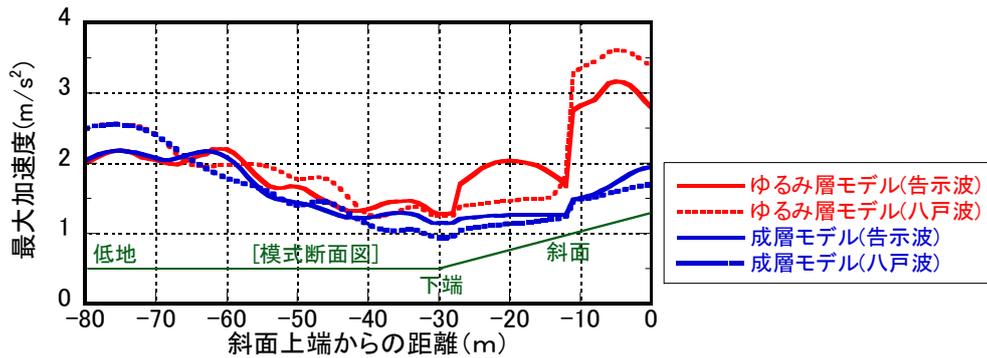


図 14 地表面の最大加速度 (低地)

### 5.5 地震観測結果との比較

図 15 に示す通り、地盤調査に基づく解析 (ゆるみ層モデル) では、地震動観測結果と同様に斜面上端部の加速度が斜面直下の 2 倍以上となった。しかし、斜面上端部 (S2) と台地側の地震計(S3)位置との比は、地震動の比と較べるとやや低くなっている。斜面直下、斜面上端部の地震計が地盤に設置されているのに対し、台地側の地震計は室内に設置されており、この設置条件の違いが観測地震動に影響している可能性がある。成層モデルの場合は、斜面下端と上端の最大加速度比の S2/S1 の値は 1.6~1.8 程度となり、観測加速度の比の傾向およびゆるみ層モデルの斜面内及び斜面上端付近の応答と大きく異なる結果となった。

図 16(a), (b)は、図 4 の地震動の 2 点間のフーリエスペクトル比の平均値と共に地震計位置の 2 次元 FEM の伝達関数の比を合わせて示したものである。伝達関数比は地震動のフーリエスペクトル比と同様に、ほとんどの振動数で 1 を超えており、斜面上端部(S2 位置)の増幅が大きいことを示している。図 16(c) は、地震計位置 3 箇所の常時微動 H/V スペクトル比である。斜面上端部の S2 には 5Hz 付近にするどいピークが表れているが、S1、S3 にはこのようなピークがなく、5Hz の高いピークはゆるみ層の影響と考えられる。図 16(a), (b)のゆるみ層モデルの伝達関数比は、5Hz 付近にピークが見られ、観測記録の傾向及び常時微動 H/V スペクトル比と調和的である。成層モデルでは、5Hz 付近の鋭いピークは見られない。

これらの結果から、ゆるみ層の有無は斜面上部の震動特性に大きな影響を与え、今回観測した斜面上部部の地震動の大きな増幅はこのゆるみ層の存在に起因していると言える。

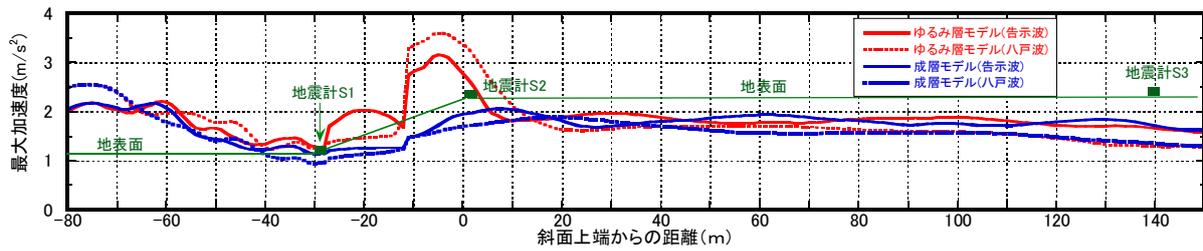


図 15 地表面の最大加速度 (モデル全体)

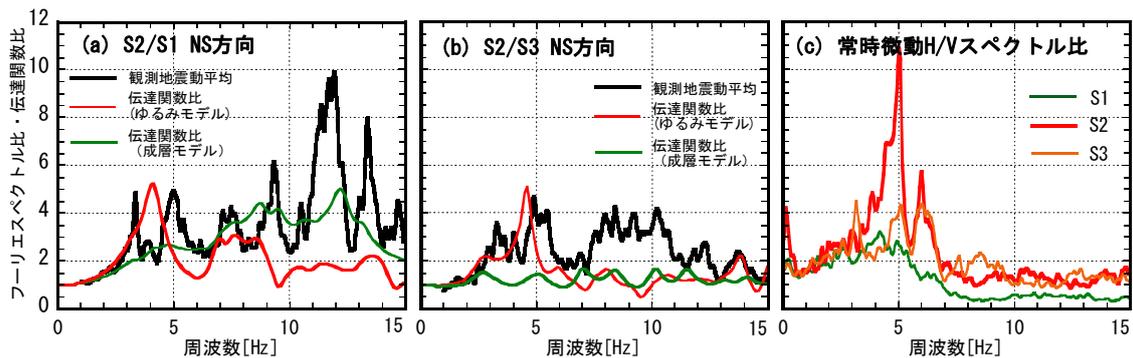


図 16 地震動の 2 点間のフーリエスペクトル比と FEM の 2 点間の伝達関数比と地震計位置の常時微動 H/V スペクトル比

### 5.6 大地震時の検討

地盤が非線形化するような大地震時を想定し、ゆるみ層の影響が線形時とどのように異なるか、等価線形解析により検討を行った。解析モデル、解析条件は前節までの検討と同一とし、 $G/G_0 \sim \gamma$  (剛性低下率～せん断ひずみ) 関係は今津・福武の式<sup>18)</sup>を、 $h \sim \gamma$  (減衰～せん断ひずみ) 関係は双曲線モデルを用いた。今津・福武式の係数のないローム、腐植土については粘土の値を使用した。また、入力地震動は限界耐力計算で極めてまれに発生する地震の加速度応答スペクトルを参考にして、最大加速度  $3.2\text{m/s}^2$  の告示波と八戸波とした。

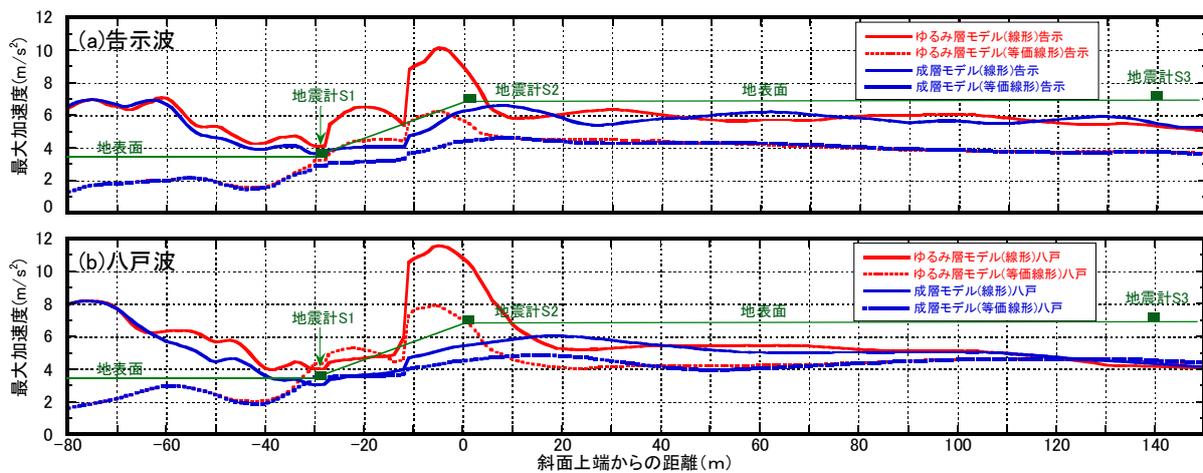


図 17 地表面の最大加速度 (線形解析と等価線形解析の比較)

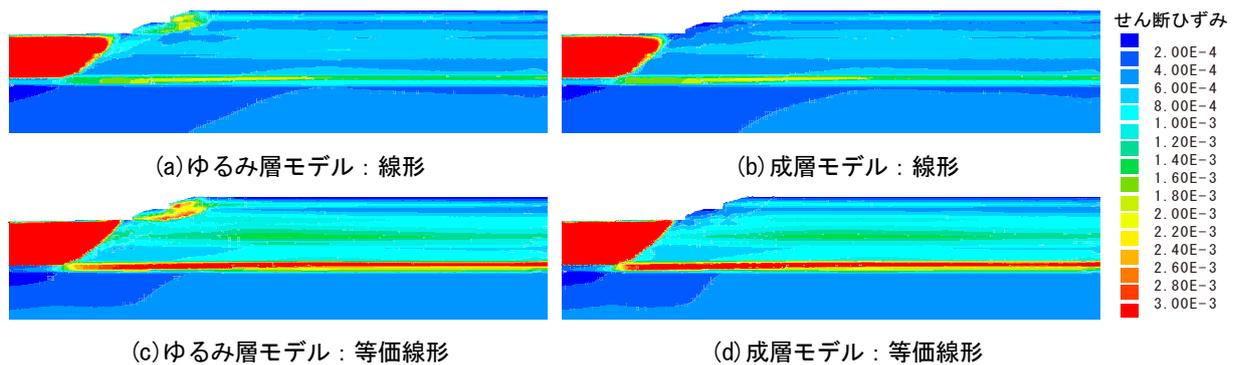


図 18 最大せん断ひずみ分布 (告示波)

ゆるみ層モデルと成層モデルの地表面の応答最大加速度を図 17 に示す。等価線形解析の最大加速度は、斜面から斜面上端部付近ではゆるみ層モデル、成層モデルとも、線形解析より小さくなっているが、その傾向はゆるみ層モデルで顕著である。大地震時におけるゆるみ層モデルの斜面上端部の最大加速度は、その差は小さくなるものの、依然として成層モデルの斜面上端部や台地中央部と比較すると非常に大きな値を示している。

さらに、図 18 に示すとおり、非線形性を考慮するとゆるみ層内のせん断ひずみが大きくなり、成層モデルとの差は明瞭である。ゆるみ層がある場合は、大地震時には崩壊や地盤の沈下の危険性が高くなると考えられる。

## 6. 斜面の形状による影響の検討

### 6.1 解析モデル

本章では、斜面の形状が震動特性に与える影響について検討を行う。台地を対象とした既往の研究では、小林ら<sup>4)</sup>(設計用入力地震動研究委員会)の解析は斜面高さ 30m、建設省総合技術開発プロジェクトにおける解析<sup>5-10)</sup>では、斜面高さ 16m のモデルにより、斜面高さを固定し、斜面勾配を変化させた検討が行われている。建設省総合技術開発プロジェクトの一環として行われた西川<sup>10)</sup>の研究によると、入射波を 4Hz の Ricker Wavelet(SH 波)として、5~60° の範囲で斜面勾配を変えて伝達関数比を計算した結果、一様地盤では 35° で最大値となっている。本研究では、これら既往の研究を参考に、図 19 に示す斜面勾配 1 : 1.5 (33.7°)、斜面高さ  $H$  が 10m、20m、30m の 3 通りの一様地盤(半無限地盤)のモデルを用いて線形解析による検討を行った。要素は 2.5m×2.5m を基本サイズとし、境界条件や入射波は前章の検討と同様とした。

伝達関数は斜面上端を 0m として、-20~50m の範囲では 5m 間隔、その他の範囲では 10m 間隔で抽出した。地表面の最大加速度応答は、2.5m 間隔で抽出した。

このモデルは台地を想定しているため、以降の説明等には、図 19 の緑字で示す「低地」、「台地」などの用語を用いている。

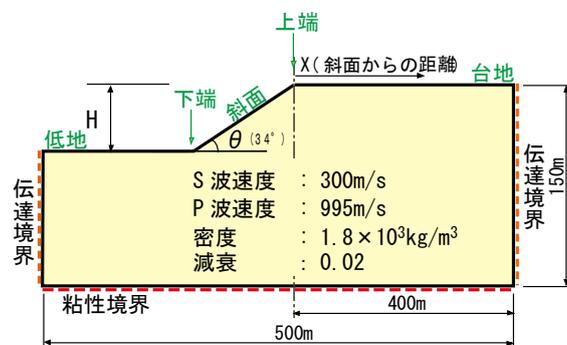


図 19 解析モデルの模式図

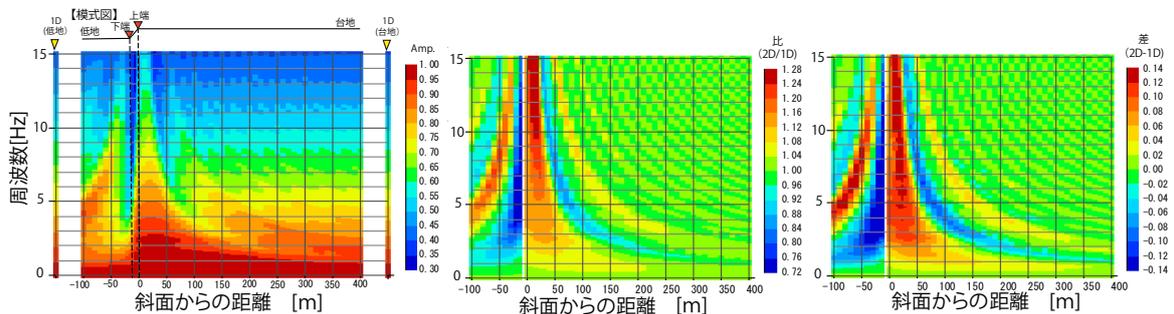
## 6.2 地表面の応答

ここでは、斜面高さ 10m のモデルを用い、地表面の応答に対する斜面の影響について検討を行った。

図 20(a)に斜面上端からの距離と伝達関数の関係を示す。モデルが一様地盤であり、地盤材料に減衰があるため、伝達関数は振動数が高くなるほど低下する。台地側の斜面近くの伝達関数は、水平一様地盤（1次元解析：図中 1D）と比較して値が大きくなる傾向が見られるが、振動数により最大値を示す距離が異なっている。また、斜面から離れることにより伝達関数は低くなるものの、その変化は線形的ではなく複雑な傾向を示している。特定の振動数、特に高振動数に着目すると、伝達関数が増減を繰り返していることがわかる。また、斜面及び斜面直下の高振動数の伝達関数はかなり低くなっている。これは、4.2 節で斜面直上と斜面直下の地震動の 2 点間のフーリエスペクトル比が高振動数で高くなっていたことと整合する結果である。

図 20(b)は(a)の伝達関数と水平一様地盤の伝達関数の比（伝達関数比）、図 20(c)は両者の差を示したものである。比、差とも最大値は斜面から 10m の 15Hz であるが、比では 1.35、差では 0.14 となっている。伝達関数値（絶対値）は 0.54、1次元解析では 0.4 であり、この場合、伝達関数比は 1次元解析結果が小さいことによる過大評価であると言える。図 20(b)(c)から、1次元解析と 2次元解析の伝達関数を比較すると、低地側の低振動数では 1次元解析の値が大きく、また斜面直下ではほぼ全ての振動数で 1次元解析が大きい。一方、台地側では低振動数では 2次元解析が大きく、斜面直上ではほぼ全ての振動数で 2次元解析が大きいことが判る。

これらの図から、斜面上部の台地では、斜面の影響はかなり遠方に及ぶが、水平一様地盤の伝達関数値に対して 1.1 倍以上の値を示す範囲は、斜面から 50m 程度、1.05 倍以上では 150m 程度までであり、それより離れると影響はかなり小さくなる。文献 7)によると、最大振幅で検討した斜面の影響範囲は、斜面勾配による差はあまりなく、SH 波と SV 波か、また  $V_s$  比（表層地盤と基盤のせん断波速度  $V_s$  の比）によって異なっている。 $V_s$  比 1 である一様地盤の SV 波では 60m 程度とあり、今回の検討結果の 50m 程度と近い結果となっている。



(a) 伝達関数(2D-FEM) (b) 一次元解析との比(2D-FEM/1D) (c) 一次元解析との差(2D-FEM-1D)

図 20 斜面からの距離による伝達関数の変化

## 6.3 反射波の影響

斜面で発生する反射波については、文献 7)で詳細な検討が行われており、水平成層地盤の重複反射波と斜面で生成される反射波が重なり合う波動モデルから、伝達関数の空間変化をモデル化している。また筆者ら<sup>19)</sup>は、波動伝播メカニズムの観点から、斜面勾配の変化による反射波の特性の違いと地盤震動特性について考察を行い、斜面勾配が急な場合は表面波（レイリー波）の発生が顕著であること、斜面の影響は斜面高さの 10 倍以上の範囲に及び、その範囲は振動数により変化することを明らかにしている。本研究では、文献 19)と同様の手法を用い、斜面で生成される反射波が地盤震動に与える影響の大きさとその範囲について、前節と同様に高さ 10m のモデルを用いて検討を行った。

図 21 は断面内の反射波の位相分布を、図 22 は、鉛直断面の変位分布及び半無限地盤のレイリー波モードを示したものである。振動数の違いによる分布の差を比較するために、低振動数の 3Hz、高振動数の 9Hz とその中間の 6Hz について計算を行った。図 21 の位相分布は 2次元 FEM の周波数応答関数（加速度）の位相を断面上のそれぞれの位置で周波数ごとに計算したものであり、図 22 は周波数応答関数（変

位) の振幅とレイリー波のモード振幅と比較したものである。これらの図の FEM の結果は、入射波の影響を排除するために、水平(x)方向変位については、2次元解析の結果から1次元解析(水平一様地盤)の結果を引いたものを用いている。

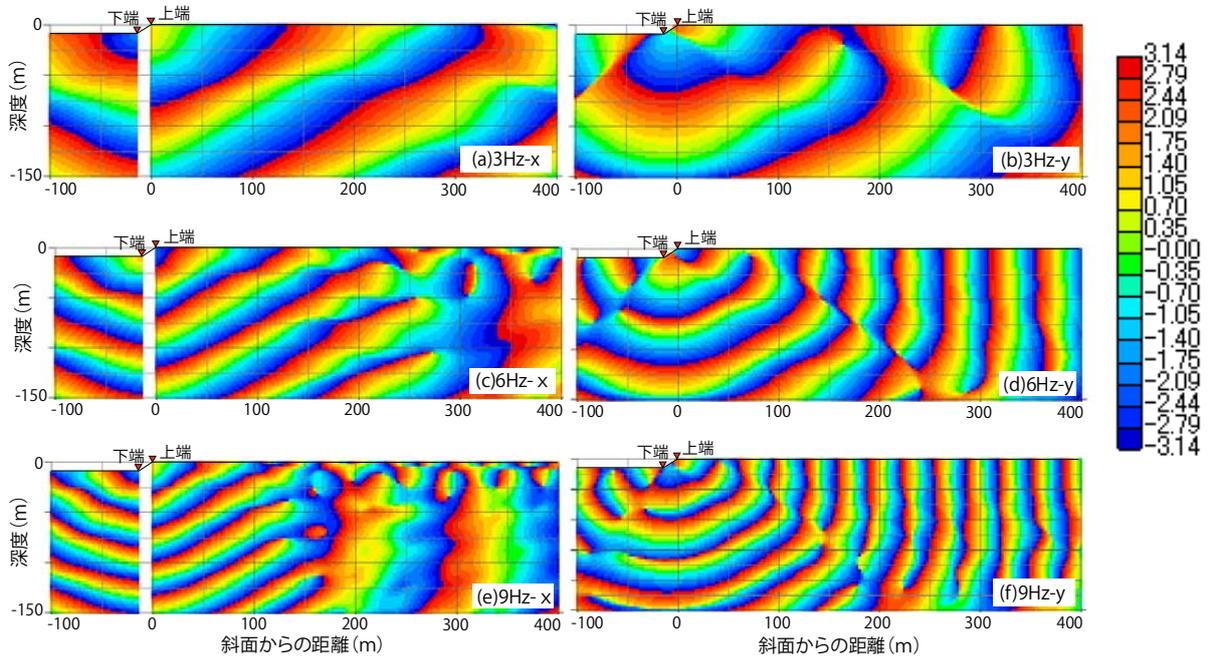


図 21 反射波の位相分布

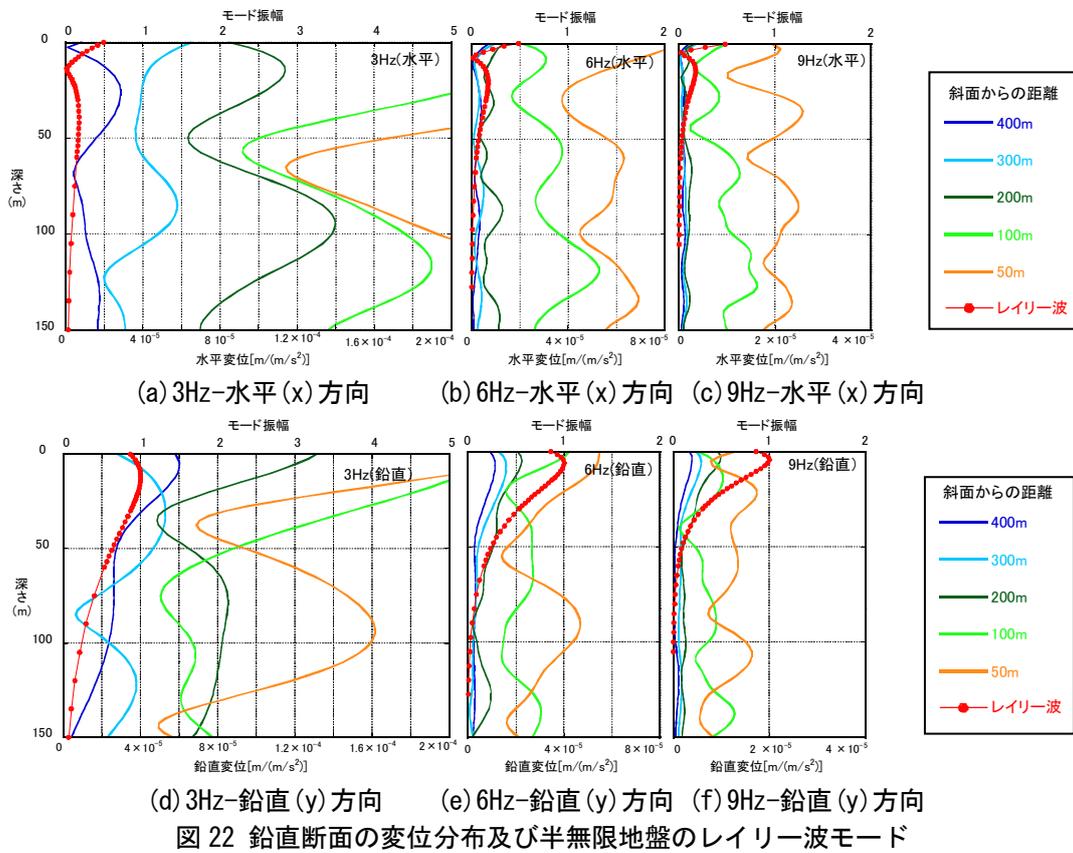


図 22 鉛直断面の変位分布及び半無限地盤のレイリー波モード

今回検討したモデルでは、斜面で生成される反射波として、反射 SV 波、レイリー波、境界面波が考えられる。斜面勾配が急であることから反射 P 波は発生せず、境界面波として伝わる。図 21 の斜面から斜め下方に向かう反射波は位相速度が 300m/s 程度であることから、反射 SV 波であると考えられる。特に鉛直(y)方向変位 (図 21(d)、(f)) に顕著であるが、地表面に鉛直に同位相の波が見てとれる。これは、図 22(e)、(f)でレイリー波の基本モードと深度方向の変位分布が概ね対応し、位相速度が 300m/s 程度であることから、レイリー波であると考えられる。図 21 の水平(x)方向についても、6Hz、9Hz の地表面付近にはレイリー波が認められる。図 21(e)のレイリー波より深部に見られる波は位相速度がほぼ P 波速度に対応するが、境界面波であるか、他の波であるか今後の検討が必要である。

図 21、図 22 から、3Hz ではほとんどレイリー波を確認できないが、6Hz、9Hz では斜面から 100~200m 離れるとレイリー波が確認できる。レイリー波が確認できる距離は、図 20 (c)で水平一様地盤との差がほとんどなくなる ( $\pm 0.03 \sim 0.04$  程度) 距離にほぼ対応していると考えられる。

したがって、斜面により表面波が生成されることが、斜面の影響が遠方に及ぶ原因と考えられるが、ある程度斜面から離れて、反射した実体波が減衰し表面波が優勢となると増幅は数%のレベルとなることがわかる。

#### 6.4 斜面高さの違いによる影響

斜面高さの違いが震動特性に与える影響を検討するために、斜面高さ 10m、20m、30m の 3 種類について検討を行った。図 23 は、伝達関数の斜面からの距離による分布の比較を、図 24 は図 23 の伝達関数と水平一様地盤の伝達関数との差を示したものである。振動数特性や斜面からの距離の傾向に大きな違いはないが、斜面が高くなるほど伝達関数の絶対値も大きくなる傾向があり、斜面及び斜面直下では増幅が小さくなっていることが判る。斜面の影響範囲も斜面が高いほど広がる傾向にある。

図 25 に地表面最大加速度比と伝達関数の差の最大値の分布を示す。斜面が高いほど、斜面直下の最大加速度比が低く、台地の最大加速度比が高い。高さ 30m のモデルでは、水平一様地盤の応答に対して、斜面下端部付近で 0.8 倍程度、台地では 1.2 倍程度となる。斜面上端付近の最大加速度比は 1.1 倍程度で、

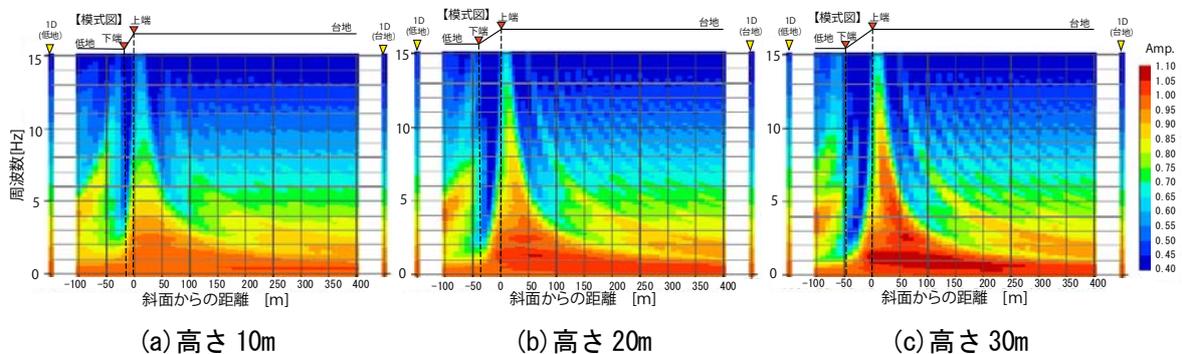


図 23 伝達関数の斜面からの距離による分布の比較

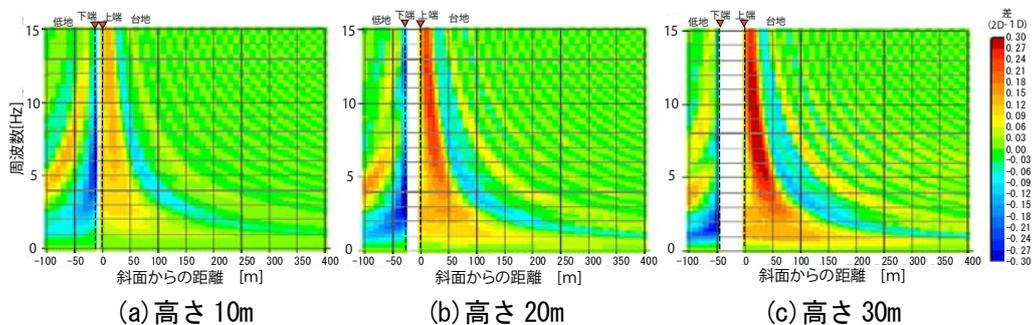


図 24 1次元解析と2次元解析の伝達関数の差

台地の最大値は入射波により異なるが、斜面上端から離れた位置となっている。Ricker wavelet の SH 波入力で検討した既往の研究<sup>8)</sup>でも、最大振幅は斜面上端部から少し離れた位置で発生しており、今回の検討結果と整合する。

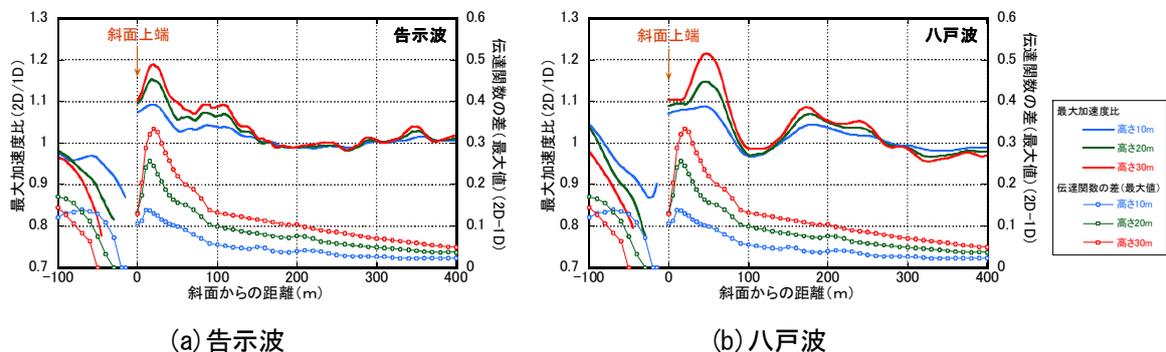


図 25 地表面最大加速度比と伝達関数の差の最大値の分布

## 7. まとめ

本研究では、洪積台地を対象として、地盤震動特性に対する斜面の影響、特に斜面沿いの軟弱層の影響を把握することを目的として、地盤調査・地震動観測および有限要素法による解析を行い、以下の結果が得られた。

- ・斜面による地形効果には、形状の効果と斜面沿いの軟弱層の影響に分けられる。今回検討した自然斜面のみではなく、古い切盛土斜面についても、斜面沿いのゆるみや風化が発生していると考えられる。したがって、多くの斜面でこのような軟弱層が原因となる地盤増幅を考慮する必要がある
- ・斜面の形状による地形効果としては、斜面近くの台地は増幅し、斜面下部は増幅が抑えられる傾向にある。斜面沿いの軟弱層の効果により、斜面上端部の増幅は非常に大きくなる。
- ・斜面が高いと地盤の増幅が大きくなり、影響も遠方に及ぶ。今回の検討は一樣地盤で行っているが、ゆるみ層がある場合も斜面高さが高くなると地盤の増幅が大きくなることが予測できる。
- ・斜面による地震動の増幅は、斜面で発生する反射波（反射 S 波、反射 P 波、表面波、境界面波）が影響している。斜面の影響は、かなり遠方まで届くが、これは表面波によるものが主であると考えられる。ただし、表面波の発生による震動の増幅は数%程度である。

## 謝 辞

本研究の一部は、平成18・19年度科学研究費補助金（基礎研究(B)、課題番号18310121）の助成によって行った。また、東京ガス株式会社よりSUPREMEのデータ（強震動）の提供をいただいた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 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、第5巻、第3号、2005年、pp.1-11
- 2) 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(170)、2006年、pp.1-10
- 3) 安田勇次、土屋智、水山高久、松村和樹、落合博貴、高橋正昭、唐文東：動的振動解析による地震時の加速度応答および斜面変位と地形効果に関する考察、砂防学会誌 Vol.59、No.4、2006年、pp.3-11
- 4) 小林孝至、中村晋、吉田隆治：設計用入力地震動作成手法に関する研究（その6：地形効果を考慮した地盤特性評価）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、1993年、pp.127-128.
- 5) 建設省建築研究所、(財)国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト「大都市地域における地震防災技術の開発」地震動増幅危険度評価（建築）分科会報告書、1995年

- 6) 大川出、南忠夫、瀬尾和夫、渋谷純一、山田真、萩尾堅治、藤堂正喜：微地形効果を考慮した地盤増幅特性評価法の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、1997 年、pp.307-308.
- 7) 建設省建築研究所、(財) 国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト「大都市地域における地震防災技術の開発」地震動増幅危険度評価（建築）分科会報告書、1996 年
- 8) 早川崇：崖地の増幅特性とその定量化について、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、1996 年、pp.263-264
- 9) 小林孝至：崖地盤上の伝達関数の評価手法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、1996 年、pp.265-266
- 10) 西川宏之：崖地形が地震動に及ぼす影響の簡便な推定法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、1996 年、pp.267-268
- 11) 国土交通省住宅局建築指導課：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説、財団法人日本建築防災協会、1977 年、pp.185
- 12) 土佐内優介、中井正一、永田葉子：洪積台地端部における斜面上部の地盤振動特性について-法肩からの距離による地盤振動特性について-、第 42 回地盤工学会研究発表会平成 19 年度発表講演集、2007.7、pp. 1789-1790
- 13) 永田葉子、中井正一、船橋裕貴、石田理永：洪積台地端部における斜面上部の地盤振動特性について、第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集、2006 年、pp.702-705.
- 14) Y. Nagata, S. Nakai, Y. Tosauchi : Dynamic properties of the ground near the edge of diluvial terrace, 8<sup>th</sup> Pacific Conference on Earthquake Engineering, 2007
- 15) 海津正倫：沖積低地の古環境学、古今書院、1994 年、pp.19-20
- 16) 千葉県企画部企画課：土地分類基本調査 千葉（1980 年 3 月）
- 17) 貝塚爽平、小池一之、遠藤邦彦、山崎晴雄、鈴木毅彦編：日本の地形 4 関東・伊豆小笠原、財団法人東京大学出版会、2000 年、pp.224
- 18) 吉見吉昭、福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術、技報堂出版、2005 年、pp.30
- 19) 中井正一、土佐内優介、関口徹、永田葉子：斜面を有する地盤の波動伝播性状に関する一考察-地盤振動特性に与える地形効果の影響-、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、2008.9、pp.973-974

(受理：2008年 6月12日)  
(掲載決定：2008年10月20日)

## **Study of the slope effect on the dynamic properties of diluvial terrace**

NAGATA Yoko <sup>1)</sup>, NAKAI Shoichi <sup>2)</sup> and SEKIGUCHI Toru <sup>3)</sup>

1) Student Member, Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Chiba University

2) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

3) Member, Assistant Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

### **ABSTRACT**

It is well known that landform has a strong influence on the dynamic properties of the ground. The objective of this study is to clarify the effect of a slope on the dynamic properties of diluvial terrace based on ground investigations, seismic motion observations and two dimensional finite element analyses, by choosing a target area that has a landform typical to the southern Kanto plain. Three sets of finite element analysis model have been

constructed; the first one is based on the detailed ground investigation and has a weak soil at the slope between the terrace and the lowland, the second one does not have a weak soil, and the third one consists of a homogeneous soil. Through this study, the followings were found: (1) Due to the weak soil at the slope, amplification becomes very large, but the area of influence is relatively small. (2) Amplification due to ground irregularity is relatively small, but the area of influence is fairly large. (3) The mechanism of this large area of influence due to irregularity can be explained by the generation of surface waves at the slope.

*Key Words: Diluvial terrace, Dynamic property, Slope, Topographic effect, Finite element method*