

3. 3. 8 表層地質とサイト特性

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京工業大学	教授	翠川 三郎	smidorik@enveng.titech.ac.jp
東京大学	教授	額 額 一起	koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp
防災科学技術研究所川崎ラボラトリー	チームリーダー	若松加寿江	wakamatsu@kedm.bosai.go.jp
地震防災フロンティア研究センター	チームリーダー	松岡 昌志	matsuoka@edm.bosai.go.jp
工学院大学	教授	久田 嘉章	hisada@cc.kogakuin.ac.jp
千葉大学	教授	中井 正一	nakai@tu.chiba-u.ac.jp

(c) 業務の目的

過去の被害地震で被害の大きさは地盤条件に大きく支配され、地震による危険度を評価する上で、地盤条件が重要であることが認識されてきた。そこで、大地震時の地震動の特性や被害の大きさを評価する上で、深い地盤構造のみならず表層地盤による地震動の増幅特性も正確に把握することが重要となる。

地盤の増幅特性を評価する方法として、地盤モデルを作成して解析的に地盤の増幅特性を計算することが行われている。しかしながら、首都圏などのような広い範囲を対象として地盤の増幅特性の分布を知ろうとした場合には、利用できるデータが限られていたり、膨大な手間がかかることなどから、地盤モデルに基づく解析的な方法を利用することには多大な困難を伴う。そこで、より簡単な情報から得られる地形地盤分類を用いた方法を用いるのが現実的となる。

全国を網羅する地形地盤データベースとして国土数値情報がある。地形地盤分類と地盤の増幅特性との関係を介して、国土数値情報を利用した広域での震度分布予測も既に行われている。しかし、国土数値情報には、1kmメッシュという制限があること、地形分類が県毎に異なり統一されていないこと、バグがあること、などの問題点もある。また、地形地盤分類と地盤の増幅特性との関係にも、地域性があることなど、検討すべき課題が残されている。

ここでは、首都圏や近畿圏、中京圏などの都市圏を対象として、より詳細な地形・地盤分類データベースを作成する。また、地形・地盤分類と地盤の増幅特性との関係についても、地震被害データ、常時微動、地震記録、地盤データなどを用いて、検討する。さらに、両者の結果を総合して、強震動予測や地震被害想定に資するための地盤の増幅度マップを作成する。

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

- a) 地形・地盤分類データベース作成として、首都圏のプロトタイプ版を作成した。

b) 地形・地質とサイト特性の関係の検討として、関東地震の被害と表層地盤の関係、常時微動特性と表層地盤の関係、横浜市の地震記録にみられる地盤特性と表層地盤の関係、地盤の平均 S 波速度の地域性について検討を行った。

2) 平成 15 年度 :

a) 地形・地盤分類データベース作成として、首都圏のものを完成させ、近畿圏、中京圏および東北仙台圏のプロトタイプ版を作成した。

b) 地形・地質とサイト特性の関係の検討として、国土数値情報を利用した震度分布予測手法の適用、関東地域の地震記録にみられる地盤特性と表層地盤の関係、長周期地震動と地盤構造の関係について検討を行った。

3) 平成 16 年度 :

a) 地形・地盤分類データベース作成として、近畿圏、中京圏および東北圏のものを完成させ、南海道地域(中国地方南部、四国地方全域、九州地方東部)のプロトタイプ版を作成した。

b) 地形・地質とサイト特性の関係の検討として、地形・地盤分類データベースを利用した地盤増幅推定手法の改良。関東地域の地震記録にみられる地盤特性と表層地盤の関係の定量化、などについて検討を行った。

4) 平成 17 年度 :

a) 地形・地盤分類データベース作成として、南海道地域(中国地方南部、四国全域、九州地方東部)のものを完成させ、札幌圏のプロトタイプ版を作成した。地形・地質とサイト特性の関係の検討として、地形・地盤分類データベースを利用した深さ 30m までの平均 S 波速度推定手法について検討を行った。

b) 地形・地質とサイト特性の関係の検討として、地形・地盤分類データベースを利用した震度分布予測手法の改良、全国の地震記録にみられる地盤特性と表層地盤の関係の定量化、などについて検討を行った。

5) 平成 18 年度 :

a) 地形・地盤分類データベース作成として、札幌圏のものを完成させる。

b) 地形・地質とサイト特性の関係の検討として、全国地盤増幅度マップの作成、これを利用した巨大地震の震度分布予測、などを行う。

(e) 平成 18 年度業務目的

1) 地形・地盤分類 250m メッシュデータベース作成として、平成 14～17 年度は首都圏、近畿圏、中京圏および東北圏、南海道地域(中国地方南部、四国地方全域、九州地方東部)を完成させ、札幌圏のプロトタイプ版を作成した。本年度は、札幌圏のデータベースを完成させる。2) 地盤増幅度マップの高度化として、やや長周期地震動に対する地盤増幅度を定式化し、関東平野の地盤増幅度マップを作成する。3) 首都圏の地盤断層図を用い、当該地域における表層地盤のせん断波速度を求める経験式を示す。4) 千葉市内の斜面近傍の洪積台地における常時微動観測、および有限要素法解析を通し、首都圏で宅地開発が進む洪積台地の地震時振動特性の検討を行う。

(2) 平成18年度の成果

(2-1) 地形・地盤分類データベースの作成

若松加寿江（防災科学記述研究所川崎ラボラトリー）

松岡昌志（地震防災フロンティア研究センター）

(a) 業務の要約

地震時の表層地盤の増幅特性の評価をはじめ広域のハザード評価システム等において地形・地盤参照データベースとして利用されることを前提として、札幌圏を対象に約 250m 四方のメッシュごとの地形・地盤分類 GIS データベースを完成した。

(b) 業務の実施方法

札幌圏の地形地盤分類図を縮尺 1/5 万程度で作成し、これを行政管理庁告示第 143 号（昭和 48.7.12）による基準地域メッシュを縦横 4 等分したメッシュ（約 250m 四方）ごとに属性を持たせたデジタルデータベースを構築した。

このメッシュマップの特長は、既存の地形分類図において作成者、作成地域によりで不統一であった地形分類基準を全国で統一化したこと、表層の地盤特性を反映した分類であること、さらに、1/5 万程度の大縮尺の地形図等を用いて微地形判読を行っていることから、地形境界等の空間的分類精度が向上している点である。

地形・地盤分類は、若松・松岡¹⁾による地形・地盤分類 250m メッシュマップに用いられている分類基準によった。この分類基準は、純地形学的な分類基準を踏襲しつつ、かつ表層地盤条件の判読という工学的利用用途を考慮している。本データベースは、メッシュサイズが約 250m 四方と細かいため、1km メッシュマップ^{2), 3)}には現れない小面積の微地形区分である（表 1）。

表1 本業務で用いた地形・地盤分類基準¹⁾

No	分類	定義・特徴
1	山地	1kmメッシュにおける起伏量(最高点と最低点の標高差)が概ね200m以上で、先第四系(第三紀以前の岩石)からなる標高の高い土地。
2	山麓地	先第四系山地に接し、土石流堆積物・崖錐堆積物など山地から供給された堆積物等よりなる比較的平滑な緩傾斜地。
3	丘陵	標高が比較的小さく、1kmメッシュにおける起伏量が概ね200m以下の斜面からなる土地。
4	火山地	第四系火山噴出物よりなり、標高・起伏量の大きなもの。
5	火山山麓地	火山地の周縁に分布する緩傾斜地で、火砕流堆積地や溶岩流堆積地、火山体の開析により形成される火山麓扇状地・泥流堆積地などを含む。
6	火山性丘陵	火砕流堆積地のうち侵食が進み平坦面が残っていないもの、または小面積で孤立するもの。
7	岩石台地	河岸段丘または海岸段丘で表層の堆積物が約5m以下のもの、隆起サンゴ礁の石灰岩台地を含む。
8	砂礫質台地	河岸段丘または海岸段丘で表層に約5m以上の段丘堆積物(砂礫層、砂質土層)をもつもの。
9	ローム台地	河岸段丘または海岸段丘で表層が約5m以上のローム層(火山灰質粘性土)からなるもの。
10	谷底低地	山地・火山地・丘陵地・台地に分布する川沿いの幅の狭い沖積低地。表層堆積物は山間地の場合には砂礫が多く、台地・丘陵地・海岸付近では粘性土や泥炭質土のこともある。
11	扇状地	河川が山地から沖積低地に出る所に形成される砂礫よりなる半円錐状の堆積地。勾配は概ね1/1000以上。
12	自然堤防	河川により運搬された土砂のうち粗粒土(主に砂質土)が河道沿いに細長く堆積して形成された微高地。
13	後背湿地	扇状地の下流側または三角州の上流側に分布する沖積低地で自然堤防以外の低湿な平坦地。軟弱な粘性土、泥炭、腐植質土からなる。砂丘・砂州の内陸側や山地・丘陵地・台地等に囲まれたポケット状の低地で粘性土、泥炭、腐植質土が堆積する部分を含む。
14	旧河道	過去の河川の流路で、低地一般面より0.5~1m低い帯状の凹地。
15	三角州・海岸低地	三角州は河川河口部の沖積低地で、低平で主として砂ないし粘性土よりなるもの。海岸低地は汀線付近の堆積物よりなる浅海底が陸化した部分で、砂州や砂丘などの微高地以外の低平なもの。海岸・湖岸の小規模低地を含む。
16	砂州・砂礫州	波や潮流の作用により汀線沿いに形成された中密ないし密な砂または砂礫よりなる微高地。過去の海岸沿いに形成され、現在は内陸部に存在するものも含む。
17	砂丘	風により運搬され堆積した細砂ないし中砂が表層に約5m以上堆積する波状の地形。一般に砂州上に形成されるが、台地上に形成されたものを含む。
18	砂丘・砂州間低地	砂州や砂丘の間の低地。一般に堤間低地と呼ばれるものも含む。表層は風成砂よりなるが、その下位は腐植土や粘性土で構成されることが多い。
19	干拓地	浅海底や湖底部分を沖合の築堤と排水により陸化させたもの。標高は水面よりも低い。
20	埋立地	水面下の部分を盛土により陸化させたもの。標高は水面よりも高い。
21	磯・岩礁	基盤の岩が露出、または岩塊が多い海岸
22	河原	雨や雪などの表流水の流路となる細長い凹地のうち、常時は水流がない(冠水していない)部分
23	河道・水路	雨や雪などの表流水の流路となる細長い凹地で、常時に水流がある部分
24	湖沼	四方陸地に囲まれて、海とは直接連絡のない静止した水域。

1) ファイル形式

ファイルの一覧を表2に示す。フォルダおよびファイルは、いずれもSHIFT-JISコードで収録されている。

表2 データベースのファイル形式一覧

フォルダ名	地域	ファイル名	データ種類	ファイル形式	備考
MapInfo	札幌	japanh1g1_h250 sapporo.TAB japanh1g1_h250sapporo.DAT japanh1g1_h250sapporo.MAP japanh1g1_h250 sapporo.ID japanh1g1_h250 sapporo.IND japanh1g1_h250sapporo.WOR	地理情報と属性情報（表3参照）	米国MapInfo社MapInfoTAB形式	地理情報システム用ファイル形式
TXT	札幌	h250sapporo_gm.csv	属性情報（表4参照）	ASCII形式 カンマ区切り	テキストファイル

2) 測地系

本データベースのメッシュ形式は、行政管理庁告示第143号(1973.7.12)による緯度方向30秒、経度方向45秒の標準地域メッシュ（約1km四方）を緯度経度方向にそれぞれ4等分したものである。本メッシュマップは旧測地系に基づいた標準地域メッシュ（地域メッシュコードN）を採用しており、緯度経度で小数点以下6桁の精度を持っている。2002年4月1日から施行された新測地系に基づく標準地域メッシュ（地域メッシュコード）とは境界位置が異なる。

3) 属性情報の説明

MapInfo TAB形式のファイル群のテーブルファイルには、表3に示す属性情報（フィールド）が含まれている。

表3 MapInfo TAB形式の属性情報一覧

フィールド	種類	説明
MESHCODE	10桁文字列	行政管理庁告示第143号（昭和48.7.12）による3次メッシュを縦横4等分したメッシュ（約250m四方）について、3次メッシュコード(8桁)の後に、南西隅のメッシュから北東隅のメッシュにかけて、00～33の数字を付加したもの。
GEOM	2桁の数字	地形分類コード

ASCII形式のファイル群のテーブルファイルには、次の属性情報（フィールド）が左より表4示す順番で含まれている。

表 4 ASC形式の属性情報一覧

フィールド	種類	説明
MESHCODE	10桁文字列	行政管理庁告示第143号（昭和48.7.12）による3次メッシュを縦横4等分したメッシュ（約250m四方）について，3次メッシュコード(8桁)の後に，南西隅のメッシュから北東隅のメッシュにかけて，00～33の数字を付加したもの。
緯度・経度	13桁の文字列 12桁の文字列 13桁の文字列 12桁の文字列	経度（メッシュ南西隅） 緯度（メッシュ南西隅） 経度（メッシュ北東隅） 緯度（メッシュ北東隅）
GEOM	2桁の数字	地形分類コード

4) 地形分類コード

Code	Name
0	沿岸海域
1	山地
2	山麓地
3	丘陵
4	火山地
5	火山山麓地
6	火山性丘陵
7	岩石台地
8	砂礫質台地
9	ローム台地
10	谷底低地
11	扇状地
12	自然堤防
13	後背湿地
14	旧河道
15	三角州・海岸低地
16	砂州・砂礫州
17	砂丘
18	砂丘・砂州間低地
19	干拓地
20	埋立地
21	岩礁・磯
22	河川敷・河原
23	河道・水路
24	湖沼

(c) 業務の成果

本年度に作成したデータベースの対象地域を図-1に示す。札幌圏約93,600メッシュ（約81×74km）である。図-2に札幌圏データベースを示す。

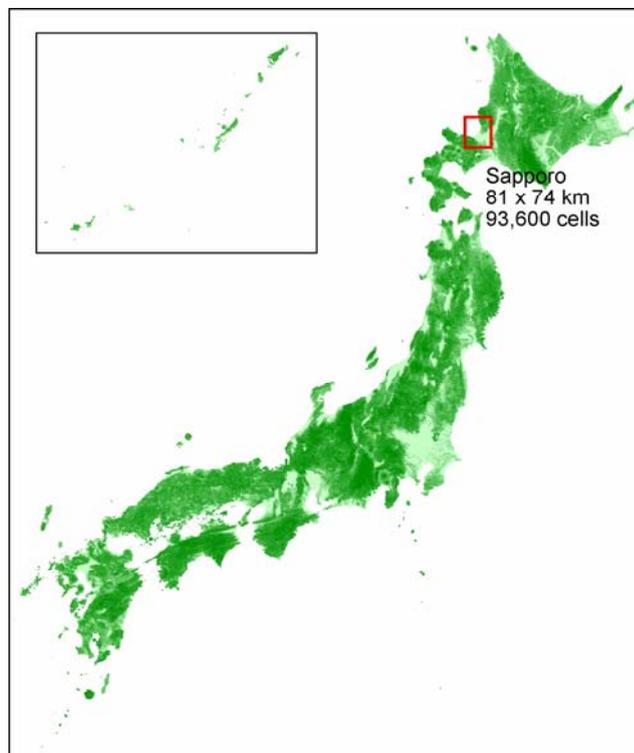


図-1 平成18年度の地形・地盤分類データベースの作成対象地域

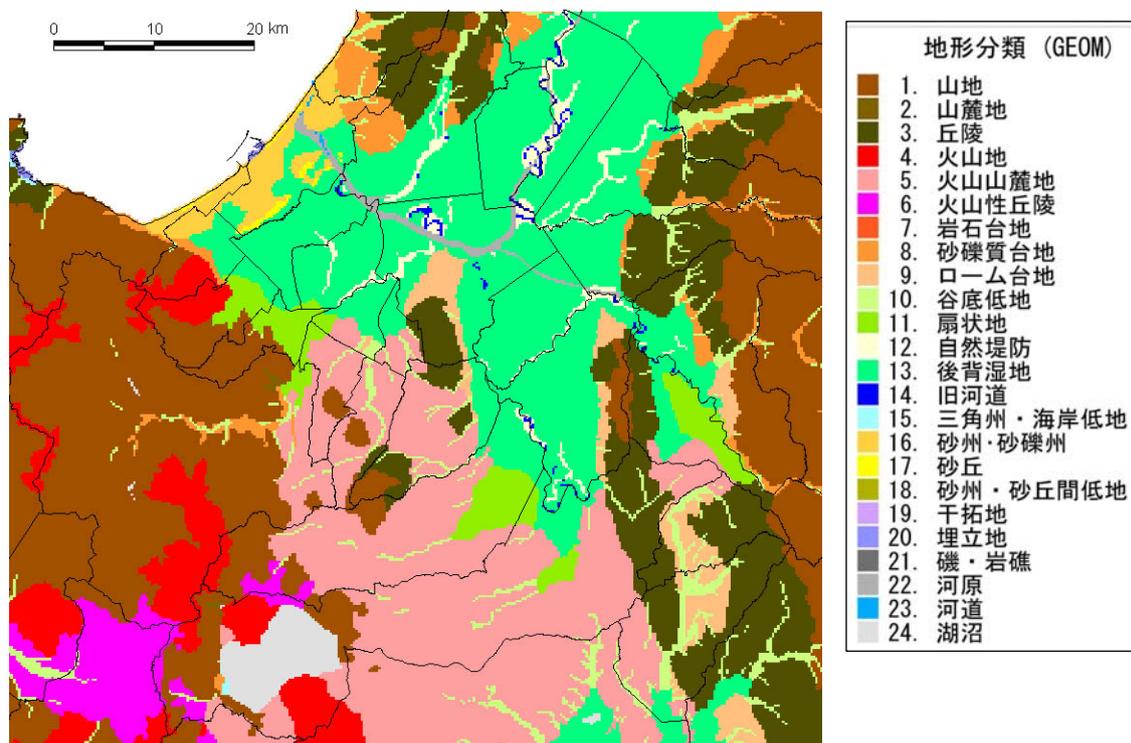


図-2 札幌圏の地形地盤分類データベース

(d) 結論ならびに今後の課題

地震時の表層地盤の増幅特性の評価など広域ハザード評価のための地形地盤データベースを札幌圏を対象として、GISを用いて約250m四方のメッシュ単位で構築し完成させることにより平成18年度の目標を達成させた。

今後は、地形地盤分類データベースの全国展開を図ると共に、空間的分類精度の向上を図り、強震動の増幅率マップの作成に向けた地形・地盤分類とサイト特性の関係の検討をさらに進める必要がある。

(e) 引用文献

- 1)若松加寿江, 松岡昌志: 大都市圏を対象とした地形・地盤分類250mメッシュマップの構築、土木学会地震工学論文集, [27-050], CD-ROM, 2003.
- 2)若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.213-232, 2004.
- 3)若松加寿江, 久保純子, 松岡昌志, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本の地盤・地形デジタルマップ CD-ROM付, 東京大学出版会, 2005.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Matsuoka, M., K. Wakamatsu, K. Fujimoto, and S. Midorikawa	Average Shear-wave Velocity Mapping Using Japan Engineering Geomorphologic Classification Map	Journal of Structural Engineering and Earthquake Engineering JSCE, Vol.23, No.1, pp.57s-68s,	平成18年4月
Matsuoka, M. and K. Wakamatsu	Development of the 7.5-arc-second engineering geomorphologic classification database and average shear-wave velocity map in Japan metropolitan areas	8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM Vol.1, Paper No.682	平成18年4月
Wakamatsu, K. and M. Matsuoka	GIS-based Japan Engineering Geomorphologic Classification Database for Seismic Hazard Assessment	Proc. 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, CD-ROM, Paper No.762, 9p.	平成18年9月
Matsuoka, M. and K. Wakamatsu	Nationwide Site Amplification Zoning Using the 7.5-arc-second Japan Engineering Geomorphologic Classification Database	Proc. 3rd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion (ESG2006), CD-ROM, Paper No.56 (pp.771-780)	平成18年9月
Wakamatsu, K. and M. Matsuoka	Development of GIS-based 7.5-arc-second Japan Engineering Geomorphologic Classification Database	Proc. 3rd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion (ESG2006), CD-ROM, Paper No.57 (pp.781-789)	平成18年9月

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

(2-2) 広域地震動マップ作成手法の高度化に関する検討

翠川三郎（東京工業大学）

(a) 業務の要約

広域地震動マップ作成手法の高度化の一環として、地盤増幅度に対する深い地盤構造の影響について地震記録に基づいて検討した。検討結果に基づいて、やや長周期帯域での地盤増幅度を基盤深度、周期帯、基盤へのみかけ入射角をパラメータとして定式化した。従来の地形・地質から推定した地盤増幅度マップに加えて、基盤深度等から推定したやや長周期帯域での地盤増幅度マップを関東平野に対して作成し、地盤増幅度マップの高度化を図った。

(b) 業務の成果

広域地震動マップ作成手法を高度化するために、a) 国土数値情報の地形分類・標高データ等を用いて地表から深さ 30m までの地盤の平均S波速度を推定する手法、b) 地盤の平均S波速度から経験的に地盤増幅度を推定する手法、の改良を進めてきた^{1),2)}。本手法は、木造建物や中層 RC 建物の被害に大きな影響を及ぼす周期1秒程度での地盤の増幅度を推定するものである。一方、高層建物や長大橋などの長周期構造物への影響を考えた場合には、より周期の長いやや長周期帯域での地盤の増幅度を推定する必要がある。

ここでは、地震観測記録からやや長周期帯域での地盤増幅率を抽出し、基盤深度やみかけ入射角度による変化について検討した上で、やや長周期帯域での地盤増幅度を基盤深度、周期帯、基盤へのみかけ入射角をパラメータとして定式化する。これに基づいて基盤深度等から推定したやや長周期帯域での地盤増幅度マップを関東平野に対して作成し、地盤増幅度マップの高度化を図る。

関東平野において観測された地震記録を用いて、工学的基盤スペクトルと地震基盤スペクトルを算出し、両者の比を工学的基盤以深の地盤増幅率と定義する。工学的基盤スペクトルの算出に用いる 56 の K-NET 地震観測点を図 1 の○および●で示す。地震基盤スペクトルの算出に用いる KiK-net 地震観測点 SITH07（名栗）を◆で示す。ここでは、比較的近距离で発生する 31 地震を対象とし、表面波の卓越が顕著に見られる遠方の地震については、解析対象から除外した。図 2 に示すように、用いた地震は、震源深さ 15～80km 程度、マグニチュード 5～6 程度のものである。

地震観測記録の比から得られた地盤増幅率と基盤深度との関係を図 3 に示す。図の上段、中段、下段は、それぞれ、評価周期帯域 2～3 秒、3～6 秒、5～10 秒における結果である。図の○、△、◇、▽、□は、それぞれ、震源から観測点へのみかけ入射角度 0～40°、40～60°、50～70°、60～80°、70～90° での結果である。ここで、みかけ入射角度 0° は鉛直入射を意味する。この図で、例えば、基盤深度が 0～1000m の観測点での平均値を基盤深度 500m での値としている。同様の計算を基盤深度 1000～3500m まで 500m 刻みで行っている。また、図 1 の地域を、縦 10km×横 10km のメッシュに分割し、各メッシュでの 1 次元地盤モデルによる理論増幅率を計算し、同様に基盤深度毎の平均値を求め、図の■で示す。

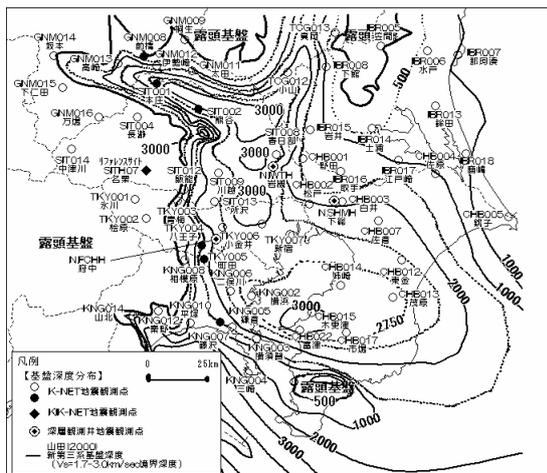


図1 地震観測点の分布と基盤震度分布

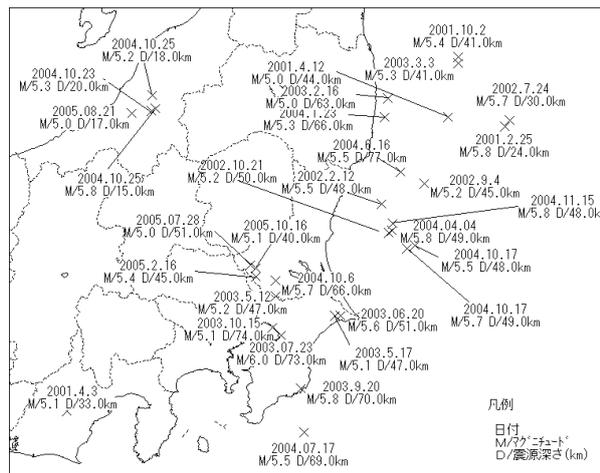


図2 解析に用いた地震の震央分布

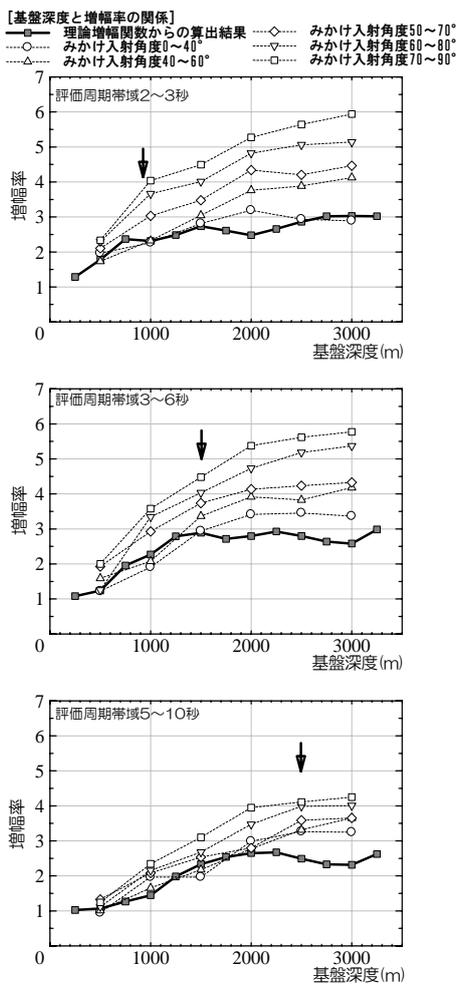


図3 基盤深度に対する地盤増幅率の分布

この結果、みかけ入射角度が大きい場合は、地盤増幅率の値は、理論増幅率の分布と大きく異なるが、みかけ入射角度が小さくなるにつれて、両者は一致する傾向を示す。また、評価周期帯域が短周期側に移行するほど、みかけ入射角度による変化が、やや大きくなる傾向が見られる。一方、基盤深度に対する地盤増幅率の変化に着目すると、ある基盤深度付近までは、基盤深度の増加と共に、増幅率が増加するが、それよりも基盤深度が深くなると、増加の傾向が緩やかになる傾向が見られる。みかけ入射角度が小さい場合には、傾向が変化する基盤深度（以下、折れ点基盤深度と呼ぶ）は、理論増幅率のそれと一致する。

この折れ点基盤深度は、評価周期帯域により異なり、周期と共に増大する傾向が見られる。そこで、理論増幅率の分布に対して、t 検定を行い、折れ点基盤深度を求め、これと評価周期帯域との相関を検討した。この結果、両者には良い相関が見られ、式(1)のように回帰できる。

$$T=0.0027 \times Z \quad \dots (1)$$

ここで、T は評価周期の中心周期(sec)で、Z は折れ点基盤深度(m)である。式(1)で算出される折れ点基盤深度を図3の矢印で示す。

式(1)は、関東平野における基盤深度と地盤の1次固有周期との関係にほぼ一致する。このことから、上述の基盤深度と増幅率の関係は、以下のように説明できる。すなわち、基盤深度が深くなり、地盤の1次固有周期が評価周期と一致する深さまでは、増幅率は基盤深度と共に増加する。しかし、それ以上の深さになると、評価周期は1次固有周期から離れ、外れてくるが、高次のピークが近づいてくるために、増幅率は減少せずに、やや増大するものと推測される。

これらの結果に基づいて、地盤増幅率を周期、基盤深度、みかけ入射角をパラメータとして定式化した。定式化の過程や結果については文献3)を参照されたい。周期1~2秒、2~3秒、3~6秒および5~10秒の場合の関東平野での地盤増幅率の分布をみかけの入射角が40度の場合（震源が関東平野の内側にある場合）および70度の場合（震源が関東平野の外側にある場合）について図4および5にそれぞれ示す。周期が短い場合は山地部に比べて平野部で一様に地盤増幅率は大きくなるが、周期が長くなると地盤増幅率は平野部でも基盤深度が深くなるにつれて大きくなる。みかけの入射角が40度の場合に比べて70度の場合には地盤増幅率は1.5倍程度大きくなる。このことは、震源が関東平野の外側にあっても、やや長周期成分の地震動は盆地構造によって増幅されて大きな振幅となりうることを示唆している。

従来提案してきた地形・地質から得られる地盤増幅率（図6参照）は周期1秒程度での地盤増幅率に対応するものと考えられる。地形・地質から得られる地盤増幅率に対応する周期領域を明確にした上で、今回の結果と融合することにより、より広い周期帯域での地盤増幅率の評価が可能になるものと期待される。

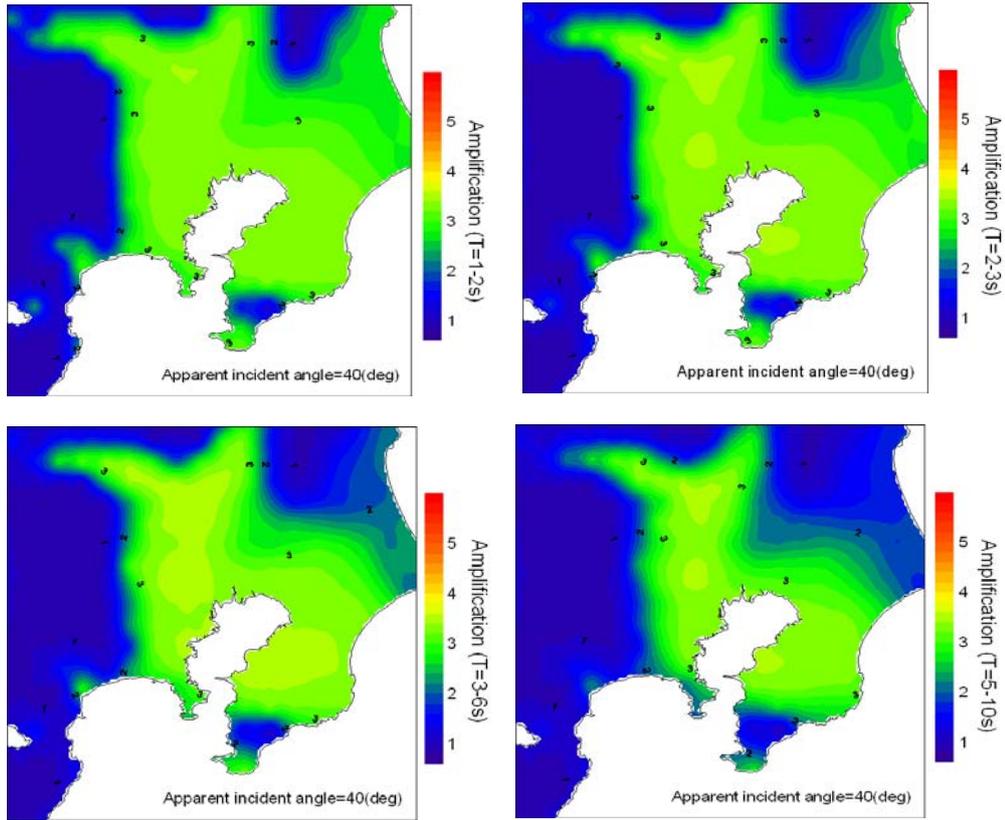


図4 みかけ入射角 40 度の場合の地盤増幅率の分布

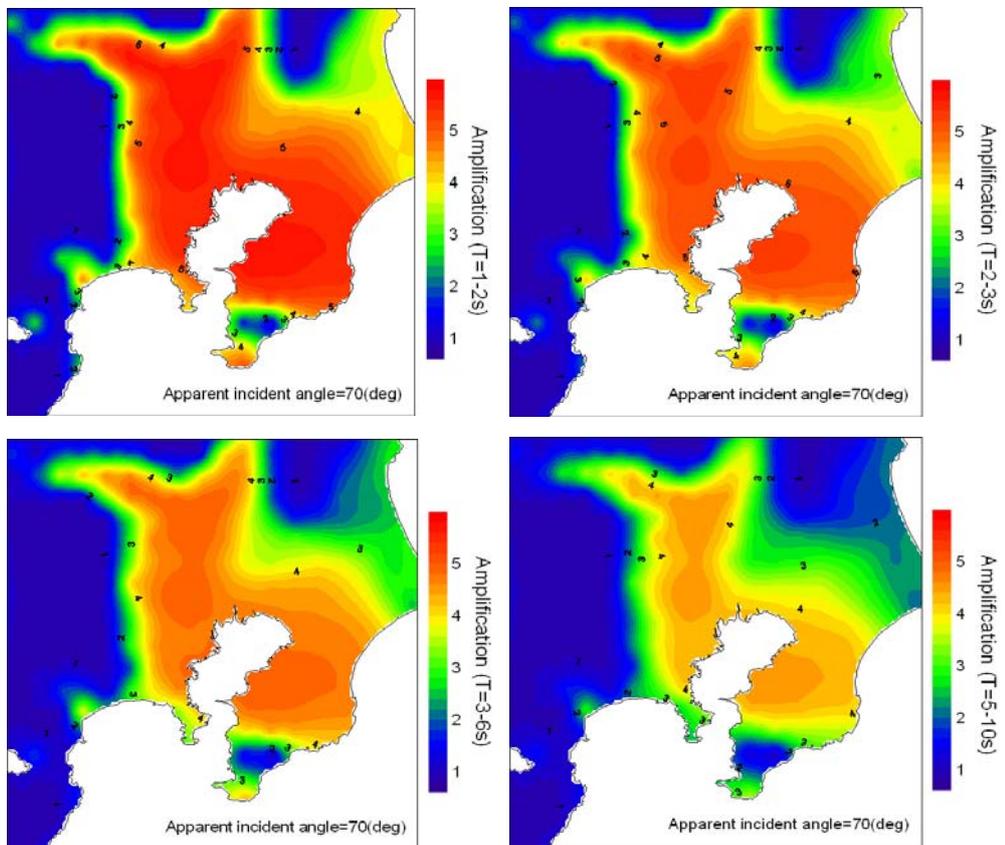


図5 みかけ入射角 70 度の場合の地盤増幅率の分布

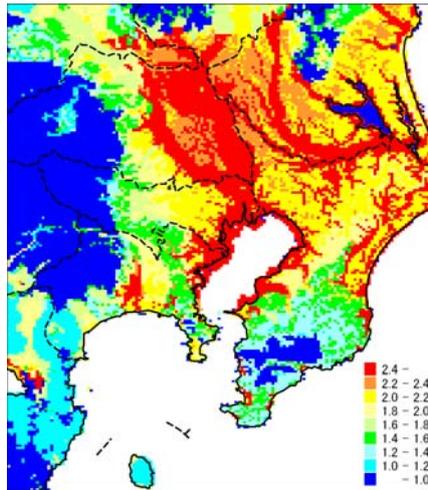


図6 地形・地質から求めた地盤増幅率の分布

(d) 結論ならびに今後の課題

関東平野において観測された地震記録を用いて、工学的基盤スペクトルと地震基盤スペクトルを算出し、両者の比から工学的基盤以深の地盤増幅率を求めた。地震観測記録の比から得られた地盤増幅率と基盤深度との関係を整理した上で、地盤増幅率を周期、基盤深度、みかけ入射角をパラメータとして定式化した。関東平野での地盤増幅率の分布を計算し、周期が短い場合は山地部に比べて平野部で一様に地盤増幅率は大きくなるが、周期が長くなると地盤増幅率は平野部でも基盤深度が深くなるにつれて大きくなること、みかけの入射角が40度の場合に比べて70度の場合には地盤増幅率は1.5倍程度大きくなることなどを示した。従来提案してきた地形・地質から得られる地盤増幅率と今回の結果と融合することにより、より広い周期帯域での地盤増幅率の評価が可能になるものと期待される。

(e) 引用文献

- 1) 松岡昌志・若松加寿江・藤本一雄・翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.239-251, 2005.
- 2) 藤本一雄・翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅率と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.
- 3) 増井大輔：地震記録に基づく工学的基盤以深の堆積地盤による増幅率とその簡便な評価, 東京工業大学学位論文, 2006.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
増井大輔・ 翠川三郎	地震記録に基づく地盤の増幅倍率とみかけ入射角度の関係	土木学会第61回年次講演会	平成18年9月20日

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-3) 首都圏を対象とした表層地盤のせん断波速度の推定式

久田嘉章 (工学院大学)

久保智弘 (ABS コンサルティング)

(a) 業務の要約

地震被害推定などを行うための広域な表層地盤の増幅特性は、従来は距離減衰式で得られる最大速度値の経験的な増幅率が用いられていた。一方、近年の強震動予測手法や応答スペクトルの距離減衰式の発展などにより、時刻歴や周波数依存の表層地盤の増幅特性を求める必要性が高まっている。本業務では周波数依存の表層地盤の増幅特性を求めるため、首都圏の地盤断面図を用いて表層地盤のせん断波速度 (Vs) を求める経験式を求めた。

(b) 業務の成果

表層地盤 Vs の経験式としてこれまでいくつか提案されているが (例えば文献¹⁾)、その多くは N 値・深度・土質分類・地質年代などのボーリングデータを用いており、広域な表層地盤の増幅特性を求めるには適していない。一方、福和ら(1999)²⁾は入手しやすい地盤断面図を用いて名古屋市を対象に、地質ごとの Vs と密度の経験式を提案している。本業務は福和らの経験式に習い、首都圏を対象とした表層地盤のせん断波速度の推定式を導く。

まず使用した地盤データは、東京都土木技術研究所³⁾の PS 検層データ、および国土交通省の首都圏の地盤断面図⁴⁾である。PS 検層データには深度、層厚、土質名称、N 値、密度、Vp、Vs などがあり、東京都 23 区および多摩地区東側の 89 地点のデータを用いた。一方、地盤断面図²⁾には首都圏を南北方向、東西方向に約 2 km ごとに分割された 57 の地盤断面図が利用できる。

本研究では以下のように表層地盤の Vs 経験式を作成した。まず PS 検層データと地盤断面図の位置情報を GIS 上にマッピングし、検層データに近い位置の地盤断面図から各層の地質データを選定し、各層に割り当てる。地質分類は表 1 に示すように、国土交通省が地盤断面図と共に公開している地質分類表²⁾を使用した。次に各地層の Vs (m/s) を福和ら(1999)³⁾の名古屋市を対象とした経験式に習い、次式で近似する。

$$Vs(H, \text{地質}) = aH^b c(\text{地質})$$

表 1 使用した地質分類表²⁾

地質記号	土質	地層	地質年代	地質記号	土質	地層	地質年代
Yuc	粘土	上部	完 新 世	Tcg	砂礫	礫層	後 期 更 新 世
Yus	砂			btg-1	砂礫		
Yug	砂礫	Mg		砂礫			
Ylc	粘土	btg-2		砂礫			
Yls	砂	下部		Lm	ローム・凝灰質粘土	ローム層	
Ylg	砂礫			bl	ローム・凝灰質粘土	埋没ローム	
Nac	粘土	七号地層	後 期 更 新 世	Toc	粘土	東京層	
Nas	砂			Tos	砂		
Ac	粘土	沖積層		Tog	砂礫	東京礫層	中 期 更 新 世
As	砂			Ed	粘土・砂・砂礫	江戸川層	
Ag	砂礫			Ka	泥岩・砂岩・礫岩	上総層群	前 期 更 新 世
Al	粘土・砂・砂礫						

ここで H は地盤深さ (m)、 a, b, c は回帰係数であり、作成した各地層データベースより最小二乗法にて決定する。但し、江戸川層・東京礫層は V_s と深度の関係性がみられなかったため、平均値を採用した。

以上の手続きで得られた経験式が次式である。

$$V_s = 78.649H^{0.417} \left\{ \begin{array}{l} 0.65 \\ 0.5 \\ 0.839 \\ 0.624 \\ 1.436 \\ 0.873 \\ 1.088 \\ 1.143 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{有楽町層(砂・砂礫)} \\ \text{有楽町層(粘土)} \\ \text{七号・沖積層(砂・砂礫)} \\ \text{七号・沖積層(粘土)} \\ \text{礫層} \\ \text{ローム層} \\ \text{東京層} \\ \text{上総層} \end{array} \right\}$$

但し、東京礫層: $V_s=454(\text{m/s})$, 江戸川層: $V_s=492(\text{m/s})$, H : 深度(m)、である。

得られた経験式の精度の検証、および既往の経験式である今井式、太田・後藤式、正木式²⁾との比較を行う。図1は既存の式とおよび今回提案する推定式から求めた推定 V_s の正解値からのばらつきを比較したものである。また図中の凡例の括弧内には、(推定 V_s - 実測 V_s) / 実測 V_s の絶対値で評価したばらつきを表示した。図より深度・地質年代の2つのみをパラメータとしている本研究の提案式から求めた推定値は、 N 値・深度・土質分類・地質年代の4つをパラメータとしている太田・後藤式や正木式から求めた推定値と比較遜色無い結果が得られていることが分かる。

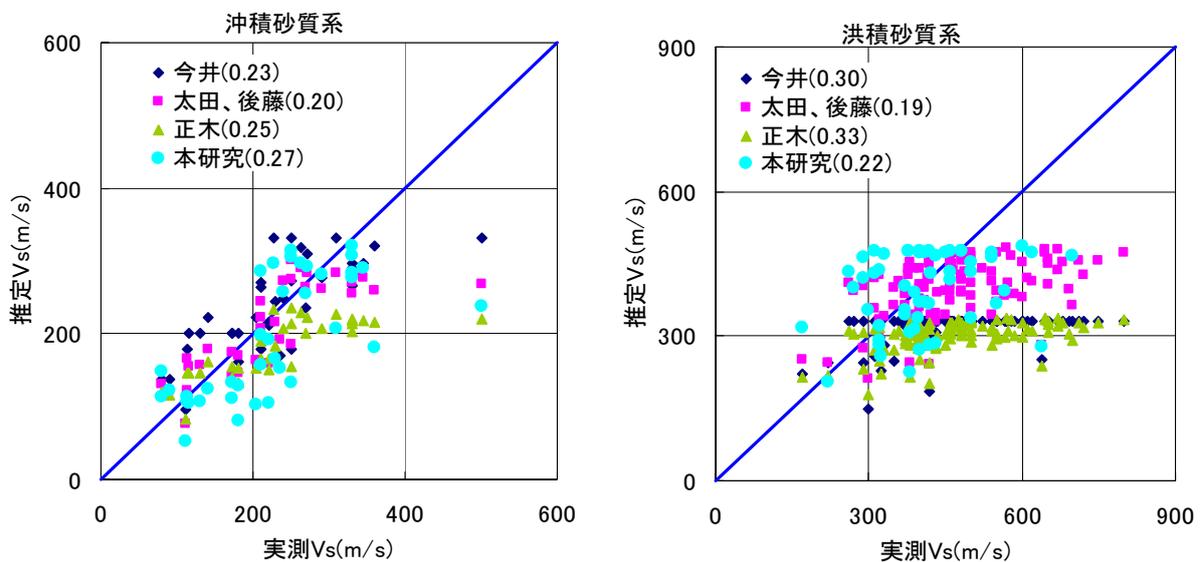


図1 推定 V_s の正解値からのばらつきの比較

(d) 結論ならびに今後の課題

本研究では、東京都を対象に深度と V_s の関係について検討を行い、地質分類を考慮した V_s の推定式を提案した。提案した推定式の精度をみるため、N 値などのボーリングデータを利用した既往の式との比較を行った結果、 V_s を推定するには遜色無い精度があることを確認することができた。今後、より広域な地盤を補完する、地震観測結果との比較を行うなど、精度をさらにあげる必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 地震動と地盤，建築学会，1983.
- 2) 福和伸夫・他：GIS を用いた既存地盤資料を活用した都市域の動的地盤モデル構築，日本建築学会技術報告集，第 9 号，pp249-254，1999.
- 3) 東京都土木技術研究所：<http://www.doken.metro.tokyo.jp/>
- 4) 国土交通省による国土調査のページ：<http://tochi.mlit.go.jp/tockok/index.htm>

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
久保智弘・ 久田嘉章	東京都を対象とした表層地盤の 地盤増幅特性に関する研究（そ の 2）—観測記録との比較—	日本建築学会大会学術講演	2006 年 9 月

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願
なし
- 2) ソフトウェア開発
なし
- 3) 仕様・標準等の策定
なし

(2-4) 斜面上部における地盤の振動特性に関する検討

中井正一（千葉大学）

(a) 業務の要約

地形の境界付近や不整形地盤において地震時に被害が多発することはよく知られているが、その地震時挙動は複雑であり不明瞭な部分も多い。特に、斜面の肩部（上端部）付近は、地震時に崩壊が多発すると言われており、大型模型実験においても斜面肩部の応答加速度の増大が報告されている¹⁾。首都圏に広く分布する洪積台地では、斜面直上・直下とも宅地開発が進んでいる状況にあり、このような場所での地震時振動特性の把握は重要な問題である。

本研究では、千葉市内における斜面近傍の洪積台地の2箇所（小仲台・亥鼻地区）を対象として、高密度な常時微動計測の実施²⁾、及び有限要素法解析等により、斜面上部の地盤振動特性の検討を行った。

(b) 業務の成果

1) 対象地の概要の概要

千葉市周辺の地形分類図³⁾を図1に示す。この地区は、主に洪積台地（関東ローム層）が占めており、その中を樹枝状に谷底平野が形成されている。谷底平野は非常に軟質であることから、宅地として開発される際に、盛土がなされている場合が多い。埋立地と台地の間には、被覆砂丘や砂堆が分布している。谷底平野と台地の境界となる斜面は高さ20m程度以下、急勾配を呈することが多い。



図1 検討対象地の地形分類

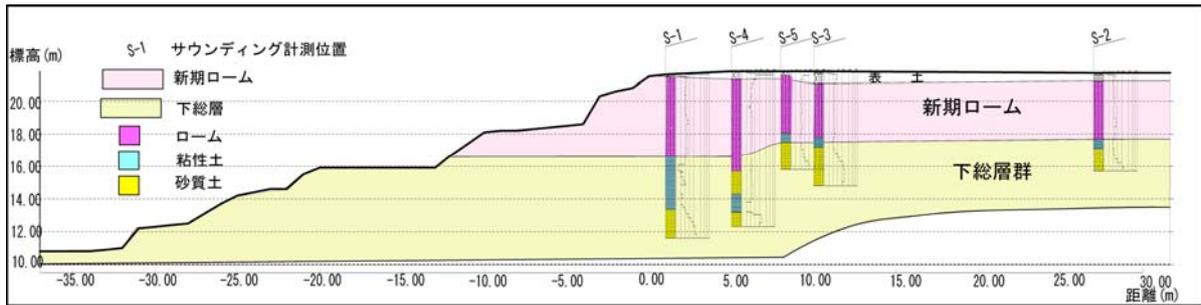


図2 小仲台地区の地質断面図 (A 測線)

【小仲台地区】台地に幅 250m 程度の谷底平野が形成されている。対象斜面は谷底平野の左岸側（北向き）斜面で高さ 10m 程度であり、道路のための切土がなされているが、概ね自然斜面で、木本類が繁茂している。既往の地質調査結果より、台地では、地表から 5m 程度ローム層が分布し、その下部は下総層の砂質土が主体をなす構造である。

【亥鼻地区】周辺は洪積台地であり、三方向を高さ 15m 程度の崖に囲まれた幅約 100m の谷を形成している。もともと自然斜面であったものを切土した法面であるが、整形されてからはかなり時間が経過しているものと考えられる。台地の地質は、砂質土主体の下総層の上部に凝灰質粘土、その上部にロームが覆う構造となっている。

2) 地盤調査の実施

斜面直近の台地の地質状況を把握するために、小仲台地区の図 3 の×の位置で、スウェーデン式サウンディング試験を行った。

調査結果を図 2 に示す。これによると、当地区の地盤構造は表層より、比較的良好な土質である埋土、ローム層が 3～5m、粘性土、砂質土となっていることが判明した。また斜面の上端より 10m 程度までの範囲では、埋土が薄く、ロームおよび軟弱な粘性土が厚く分布し、埋土～粘性土の範囲では、全体的に台地の奥と比較して軟弱な土質となっている。特に斜面にもっとも近い調査地点では、この傾向が顕著であった。当斜面は自然斜面で、また軟弱層がローム層より下層の粘性土であることから、谷底平野成立以前から存在するものであると考えられる。広域の調査がないため、この軟弱層堆積の原因や分布状況は不明であるが、洪積以前についても地形の境界であった可能性がある。

3) 微動計測結果

a) 小仲台地区計測結果

常時微動計測は約 20m 離れた A、B の 2 測線において 2m 間隔で行った(図 3 の○の位置)。図 4 に常時微動の H/V スペクトルを示す。凡例の数字は、斜面上端部からの距離を表す。測線 A、B 共に斜面上端付近で 4Hz 強に卓越値の大きいピークを持ち、斜面上端より 10m 程度離れたら、4Hz 以下の低振動数域の卓越に加えて 6～7Hz 付近にピークが出現し始める。さらに、台地の奥に向かうに従い卓越は 7Hz 付近へと落ち着いていく。また、台地の奥に向かうほど、全体的に振幅が小さくなる傾向が認められる。

地盤調査結果により、軟弱な層は斜面上端より 10m までの範囲に分布しており、微動調査結果においても、10m 付近で H/V スペクトルの傾向に変化が認められる。地盤の状態の変

化に微動 H/V スペクトルは追随していると考えられる。



図 3 小仲台地区の計測点

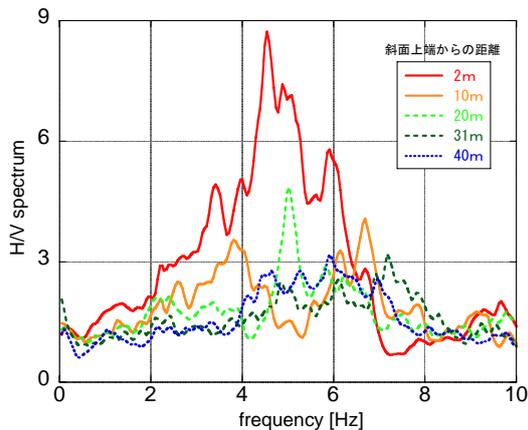


図 4 H/V スペクトル (小仲台地区)

b) 亥鼻地区計測結果

図 5 に示す斜面上端より 1 m 地点から台地の奥に向かって、1.5~2.0m 間隔で常時微動計測を行った結果 (H/V スペクトル) を図 6 に示す。その結果、卓越振動数は 6 Hz 付近でほとんど変化がなく、斜面上端部より台地の奥に向かうほど、卓越の振幅が小さくなる傾向が認められた。特に斜面上端から 2.5m まででは、高いピークが現れている。



図 5 小仲台地区の計測点

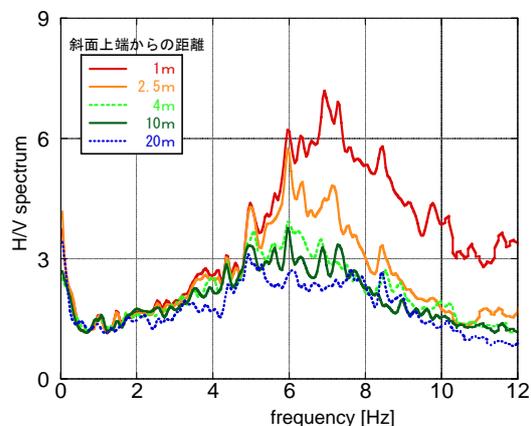


図 6 H/V スペクトル (小仲台地区)

c) 微動計測結果のまとめ

小仲台地区は自然斜面、亥鼻地区は切土斜面と、斜面の成因が異なる 2 箇所、斜面上端付近で H/V の卓越の振幅が大きいという同様の結果が得られている。小仲台地区では、ピークの振幅の変化のみではなく、卓越振動数の変化もあり、この変化と地盤状況の変化とは調和的である。一方、亥鼻地区については、卓越振動数には、あまり変化が認められない。小仲台地区と異なり、地盤の変化があまりないことが、この結果となっていることが考えられる。

小仲台地区では台地の端部（図3の■位置）に地震計を設置している。図7は、この地震計で観測した8回の地震動（2005年2月～10月）のH/Vスペクトルの平均と常時微動H/Vと比較したものである。斜面上端付近の微動計測で見られる高いピークの傾向や卓越振動数帯域もそれぞれ調和的となっている。

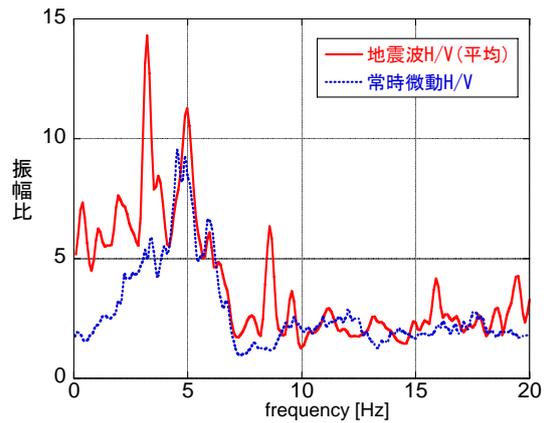


図7 地震動と常時微動のH/Vスペクトル

4) 小仲台地区の有限要素法解析

a) 解析方法

地盤調査結果に基づいて、図8に示す地盤モデルを作成し、2次元有限要素法（周波数応答）による解析を行った。

計算にはDINAS⁴⁾を使用した。物性値（地盤パラメータ）は周辺地域で実施された既往のボーリング調査及び物理探査等の結果から推定した。減衰は粘性土・ロームでは5%、砂質土では3%とした。また、地形の影響を把握するために、一次元波動伝播解析による伝達関数との比較を行った。

b) 解析結果

解析結果（図9）と常時微動H/Vスペクトル（図4）の比較を行った。2次元FEM解析では、斜面上端部近くの極めて大きいピークを再現でき、斜面から離れた箇所についても、形状・卓越振動数で相関が高い。一方、地形の影響を考慮できない1次元解析では、形状・卓越振動数ともに微動H/Vスペクトルとの相関が低い。

当地区のように、地形・地盤構造が複雑な場合には、1次元解析結果の適用には限界があると考えられる。

c) 軟弱層を考慮しない場合の解析

前節では、詳細な地盤調査結果を用いてFEM解析を行ったが、地形の影響を把握するために、斜面近くの軟弱な層を考慮しない、土質を単純化したモデルを作成して解析を行っ

No.	土質	S波速度 (m/s)	ポアソン比	質量 (t/m ³)	減衰	No.	土質	S波速度 (m/s)	ポアソン比	質量 (t/m ³)	減衰
1	ローム	180	0.45	1.40	0.05	5	ローム(敷1)	60	0.45	1.40	0.05
2	沖積粘土	115	0.45	1.50	0.05	6	ローム(敷2)	100	0.45	1.40	0.05
3	洪積砂	290	0.30	1.80	0.03	7	洪積粘土(敷)	60	0.45	1.70	0.05
4	洪積砂	370	0.30	1.80	0.03	8	洪積粘土(硬)	160	0.45	1.70	0.05

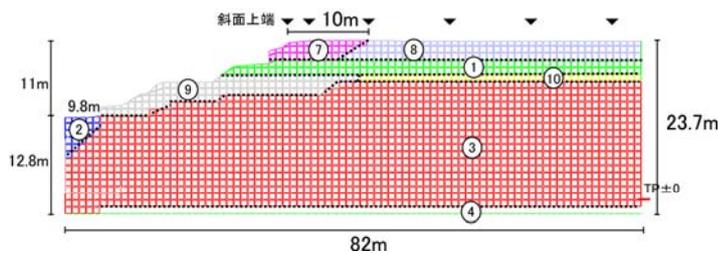


図8 小仲台地区の有限要素解析モデル（軟弱層を考慮）

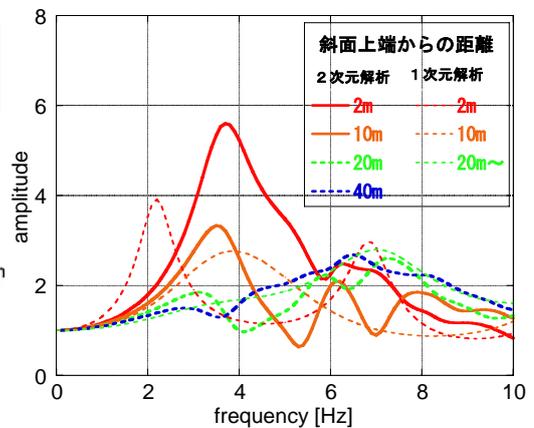


図9 解析結果（伝達関数の比較）

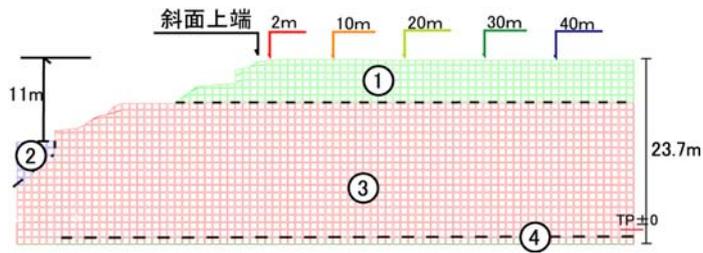


図 10 小仲台地区の有限要素解析モデル
(軟弱層無し)

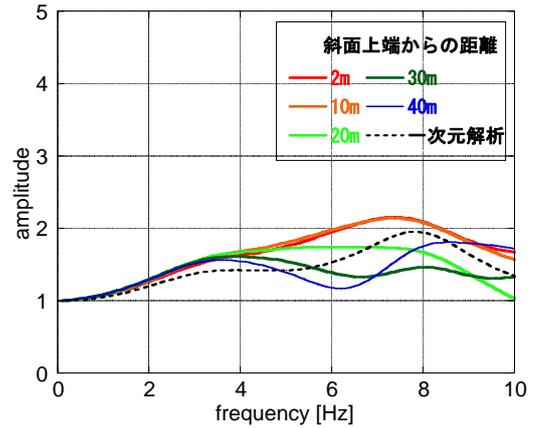


図 11 解析結果 (伝達関数の比較)

No.	土質	S波速度 (m/s)	ポアソン比	質量 (t/m ³)	減衰	No.	土質	S波速度 (m/s)	ポアソン比	質量 (t/m ³)	減衰
1	沖積層	115	0.45	1.50	0.05	5	砂質土(下総層)	250	0.30	1.80	0.03
2	埋土	150	0.30	1.40	0.05	6	砂質土(下総層)	300	0.30	1.80	0.03
3	ローム	115	0.30	1.40	0.05	7	砂質土(下総層)	400	0.30	2.00	0.03
4	粘性土(洪積)	125	0.45	1.50	0.05						

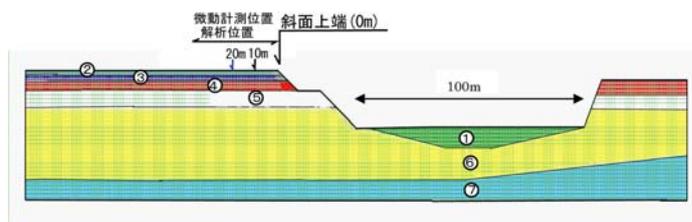


図 12 亥鼻地区の有限要素解析モデル

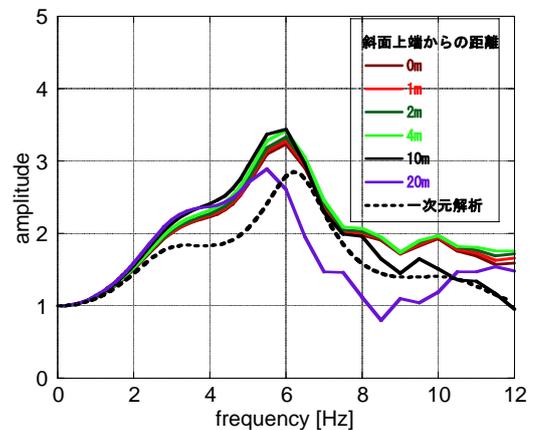


図 13 解析結果 (伝達関数の比較)

た。この場合では、斜面から離れることによる、卓越振動数における振幅の低下傾向は顕著ではなく、この傾向は地形の影響より、地盤の構造や剛性の影響が大きいことが考えられる。

5) 亥鼻地区の有限要素法解析

a) 解析方法

亥鼻地区については、地盤調査を行っていないことから、既存のボーリング調査結果を用いて FEM モデルを作成し、小仲台地区と同様に解析を行った。地盤パラメータは周辺地域で実施された既往のボーリング調査等の結果から推定した。

b) 解析結果

解析結果 (図 13) と常時微動 H/V スペクトル (図 6) の比較を行った。大局的には斜面から離れ、台地の奥になるほど卓越の振幅が小さくなる傾向はあるものの、斜面直上での増幅は現れない。

c) 軟弱層を想定した場合の解析

地質状況によって大きな違いはあると考えられるが、切土斜面の表層は風化や応力の解放

により、地盤の剛性が低下していることが考えられる。小仲台地区の調査では、常時微動計測結果は地盤の状況の変化に追随していたことから、亥鼻地区についても、H/V スペクトルのピークが顕著に大きい斜面から 3m 程度までの剛性が低下しているものとして、図 14 に示すモデルを作成し、FEM 解析を行った。剛性は小仲台地区の調査結果を参考として、S 波速度が 1/3 に低下したものとした。

図 15 に示すように、2次元解析では常時微動計測 H/V スペクトルと同様に、斜面上端より 2m までが、顕著な増幅を示し、4m 以降は少しずつ振幅が小さくなるものの、ほぼ収束している。また、2次元解析では、卓越振動数に変化がほとんどないことが、微動 H/V スペクトルと同様であるが、1次元解析では卓越振動数に変化が見られる点が相違点である。人工斜面のような、比較的地盤構造が単純な場合においても、斜面直近のような地形変換点付近では、1次元解析結果の適用には限界があると考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

微動計測、FEM 解析結果から、台地の縁にあたる斜面近傍では地震動が増幅する傾向が顕著であると考えられる。その原因としては、

- ① 斜面部分で応力が拘束されていない（自由端であること）。
- ② 斜面付近の地盤の剛性が低いこと。

があげられる。かなりの急崖であれば、①の要因が大きくなることが予測されるが、今回の解析結果から、斜面近傍の地盤の剛性が低いことが主な原因であると考えられる。

施工直後の造成斜面以外では、斜面に沿った軟質な地盤の分布は一般的であり、自然斜面においても、崖錐の堆積や地下構造から、斜面付近の地盤が弱いケースは多いと考えられ、したがって、洪積台地のみではなく斜面上端部付近では地震動が増幅しやすいことが想定される。

地盤の剛性が原因であっても、1次元解析の適合性が低いことから、斜面直近では、1次元解析結果の適用には限界があり2次元解析の必要性がある。

No.	土質	S波速度 (m/s)	ポアソン比	質量 (t/m ³)	減衰	No.	土質	S波速度 (m/s)	ポアソン比	質量 (t/m ³)	減衰
12	埋土	50	0.30	1.40	0.05	15	砂質土(下総層)	90	0.30	1.80	0.03
13	ローム	40	0.30	1.40	0.05	16	砂質土(下総層)	150	0.30	1.80	0.03
14	粘粒土(洪積)	40	0.45	1.50	0.05						

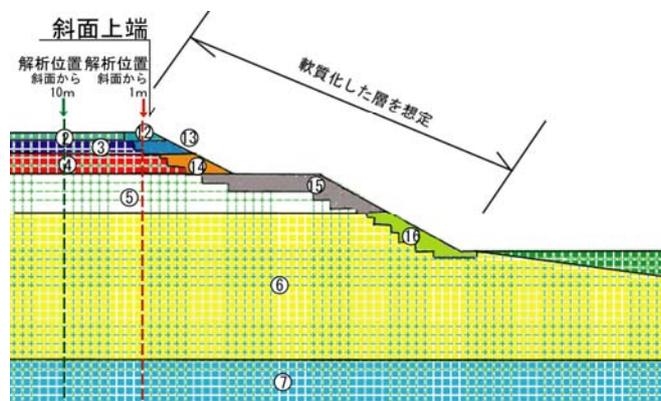


図 14 亥鼻地区の有限要素解析モデル

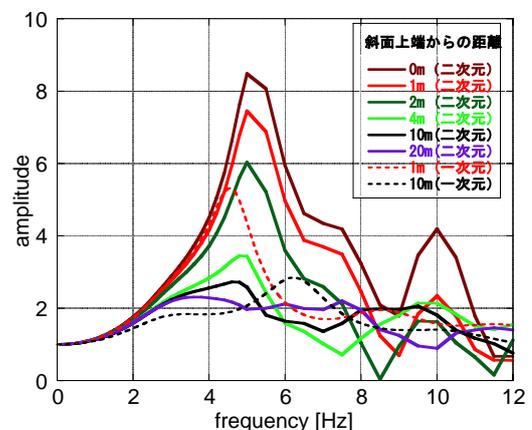


図 15 解析結果（伝達関数の比較）

斜面对策において、斜面の緩み幅を想定することは、非常に重要な問題であるが、微動計測によりある程度の推定が可能となれば、法面の防災工事などで非常に有用となる。今後、切土直後の法面での常時微動計測などを行うことにより、微動と地盤の緩みとの関係を検証する必要がある。また、本研究では微小振動を対象としたが、斜面崩壊につながる強震時の斜面の挙動についても検討をすすめる必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 浅野志穂他：振動台実験による斜面の地中変異量の計測，日本地すべり学会誌，vol.40, No.2, pp.30~33, 2003.
- 2) 石田理永他：常時微動計測による崖近傍地盤の振動特性の把握，第40回地盤工学会研究発表会講演集，pp. 2343-2344, 2005.
- 3) 千葉県企画部企画課：土地分類基本調査 千葉（1980年3月）に加筆
- 4) 「DINAS」CRC ソリューションズ

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
永田葉子・ 中井正一・ 石田理永・ 船橋裕貴	有限要素法による崖近傍地盤の振動特性に関する検討	第41回地盤工学会研究発表会	平成18年7月12日～15日
宮澤 舞・ 中井正一・ 石田理永	伝達関数と常時微動・地震動H/Vスペクトルに関する一考察	日本建築学会大会学術講演	平成18年9月7日～9日
児玉大輔・ 中井正一・ 石田理永・ 船橋裕貴・ 永田葉子	崖近傍地盤の振動特性の検討（その1 常時微動と有限要素法(FEM)解析）	日本建築学会大会学術講演	平成18年9月7日～9日
船橋裕貴・ 中井正一・ 石田理永・ 児玉大輔・ 永田葉子	崖近傍地盤の振動特性の検討（その2 地盤調査に基づくFEM解析）	日本建築学会大会学術講演	平成18年9月7日～9日
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	平成18年11月3日～5日

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし