

地震動予測のための表層地盤のモデル化手法の提案と検証

PROPOSAL AND VERIFICATION OF MODELING OF THE SURFACE LAYERS FOR STRONG MOTION PREDICTION

高橋 広人 福和 伸夫

Hirohito TAKAHASHI and Nobuo FUKUWA

The purpose of this paper is to propose modeling technique of shear-wave velocity structure of the surface layers for a seismic hazard map where the unit of estimation is detailed. In the Nagoya City region, 40420 standard penetration test data and 342 PS logging data have been accumulated and the geologic structure is presumed. Using these data, shear-wave velocity structure of the surface layers is modeled. This model expresses the distribution of a detailed N-value in a stratum, and reproduces a suitable soil dynamics, compared with H/V ratio of microtremors at 340 sites in Nagoya City and the geomorphological land classification.

Keywords : *modeling of surface layers, standard penetration test, PS logging, horizontal-to-vertical spectral ratio, average shear-wave velocity, site amplification factor*

表層地盤モデル, 標準貫入試験, PS 検層, H/V スペクトル, 平均 S 波速度, 地盤増幅度

1. はじめに

近年, 国を中心に, 地震防災対策を主目的として様々な地震ハザードマップが作成され, 一般に公開されるようになってきた^{1)~3)}。多くの自治体でも, 地震対策及び地域防災計画策定のための基礎資料として, 地震動予測が行われている^{4),5)}。従来, これらは行政施策への反映を主眼においたものであった。しかしながら近年は, 自助・共助の推進のために広くハザードマップを公開し, 住宅の耐震化や地域の防災力向上を目指したものが増加してきた。住民に身近なスケールで揺れを実感させるために, 一般公開中の自治体のハザードマップでは住宅の区画サイズに近い 50m メッシュで作られた事例もある^{6),7)}。しかしメッシュサイズが小さくなるほど, 表層モデルへの感度が高くなる。地震動予測においては, 表層地盤の増幅特性や周期特性を適切に評価することが非常に重要であり, 表層地盤のモデル化によって結果が大きく左右される。また, 都市域においては宅地造成などに伴う地形の改変が行われてきており, 細分化された各メッシュでの地盤増幅特性を考える上では切土・盛土の影響を考慮することが重要となる。

表層地盤の増幅特性や周期特性を把握するための基礎資料としては PS 検層があるが, その数量は限られており対象地域を十分な密度で網羅するには至らない。一方で, ボーリングデータは杭の支

持層の調査や幹線道路の調査, 地下鉄の計画路線の調査等, 都市域においては比較的多くのデータが蓄積されてきており, これらをデータベース化しシステム上で活用している自治体もみられる。これらのデータベースには調査が実施されるたびに新たにデータが追加され, 常時最新のデータが保持される。適切な地震動予測のための表層地盤の基礎資料としては, これらのデータベースを有効に利用した表層地盤のモデル化, さらに新たに追加されたデータを容易に反映できるモデル化が望まれる。

従来の地震ハザードマップにおける表層地盤のモデル化では, 先ず既存の調査データを用いて対象地域の地質断面をいくつか作成する。次に断面図に基づいて各メッシュの地質構成を典型化し, 対象域における全メッシュの地盤を何種類かの代表柱状地盤モデルにより表現する方法を採っている (表 1 中の従来モデル^{4),5)})。これは調査データに基づく地質断面図をモデル化の基本としており, 既存の調査データを直接的に反映したものではない。また, 新たに調査データが追加された後に, そのデータを反映して表層地盤モデルを更新するためには, 地質断面を作成し直す作業から実施する必要がある。新しいデータを容易に反映できるモデル化とはいえない。一方で, 中央防災会議では, ある一定のルールの下で既存の調査データを反映したモデル化方法を採用している^{2),3)}。この方法は, 既存の調査

*応用地質株式会社 修士 (工学)

**名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

OYO Corporation M. Eng.

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

データ及び地形分類図を反映した表層地盤のモデル化を機械的に実行可能であり、新しいデータを反映して容易に地盤モデルを更新できる。しかし、調査データが高密度に存在しない場合、対象地域全体の地質構造を満足しない地盤モデルが生成される可能性がある。

深部地盤のモデル化においては、既存調査データによる初期モデル構築の後、地震観測記録に基づいて地盤モデルの検証・修正が行われるのが一般的である⁸⁾。一方、表層地盤の場合には、地盤構造の空間的な変化の細かさに対して、従来のハザードマップの表示単位である1kmメッシュまたは500mメッシュは粗い。また、地震観測地点の地点間の間隔は精々1～2kmであり、表層地盤構造の空間的な変化を踏まえた検証は難しい。このため、表層地盤モデルに対して周期特性や増幅特性を検証した例は少ない。しかし地盤モデルを50mメッシュの細分化した単位で構築すれば、表層地盤構造の空間的な変化をモデル化することが可能であり、表層地盤構造の空間的な変化に伴う周期特性や増幅特性の変化を考慮することの重要性が高まってくる。

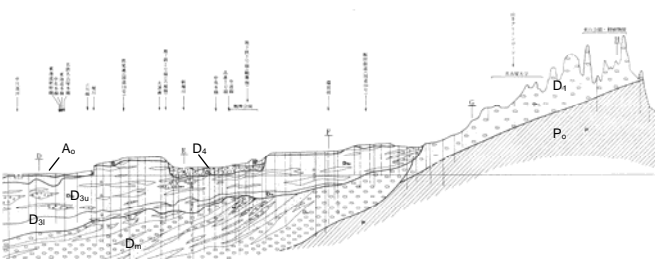


図1 名古屋市表層地盤の東西断面の一例⁹⁾

本論では、名古屋市を対象として、50mメッシュ単位で表層地盤のモデル化を行った結果を示す。ここでは、既存の調査データや地質構造、地形改変による切土・盛土分布を反映した表層地盤のS波速度構造のモデル構築方法を提案する。モデルの検証は、地盤の周期特性及び増幅特性の観点から行う。ここに提示する方法は、調査データが追加された場合に、容易にモデルを更新することが可能である。日本の都市部では、ボーリングデータに加え、地盤図等の形で表層地盤の地質構造が整理されており、本手法は他地域の都市部の地震ハザードマップ作成にも適用可能な方法と考えている。

2. 名古屋市域の表層地盤モデル化の方針

2.1 名古屋市域の表層地盤

図1に土質工学会による名古屋市内の表層地盤の東西断面(図13中のAA'に対応)⁹⁾を示す。名古屋市が位置する濃尾平野は、濃尾傾動地塊運動により西側が沈み込み、東側が隆起している^{9),10)}。このため、名古屋市の西部は低地、東部は丘陵地となっている。表層地盤を構成する地層は、沖積層であるA₀:南陽層・濃尾層、洪積層であるD₄:鳥居松礫層・小牧礫層・大曾根層、D_{3u}:熱田層上部、D_{3l}:熱田層下部、D_m:海部・弥富累層、D₁:八事・唐山層、第三紀層であるP₀:矢田川累層である。主として低地では年代の新しい順にA₀、D₄、D_{3u}、D_{3l}、D_m、P₀、丘陵地ではD₁、P₀の順に層構成をなしており、西側ほど各層が出現する深さは深く、層厚は厚くなる。

2.2 モデル化の方針

図2に名古屋市域における既往の調査データの位置図を示す。名

表1 各地震動予測における計算手法、地盤モデル作成方法の一覧

実施機関	例えば愛知県 ⁴⁾ 、名古屋市 ⁵⁾ (従来モデル)	中央防災会議 ^{2),3)}	名古屋市 ⁷⁾ (本論)
目的	・地震対策及び地域防災計画策定のための基礎資料の作成	・強化地域の見直し、推進地域の指定 ・地震対策に関する大綱策定	・市民や企業の防災意識の向上 ・住宅の耐震改修促進
メッシュサイズ	・500mメッシュ	・1kmメッシュ	・50mメッシュ
工学的基盤	・Vs=500m/s相当層上面	・Vs=700m/s相当層上面	・Vs=500m/s相当層上面
計算方法	・各地盤モデルに対して等価線形応答計算により入力加速度別・周波数別の増幅率を求め、これを工学的基盤において求めた加速度応答スペクトルに乗算し、地表の加速度応答スペクトルを算定	・等価線形法による地震応答計算(東海地震) ・全応力非線形法による地震応答計算(東南海・南海地震)	・全応力非線形法による地震応答計算
予測結果項目	・加速度応答スペクトル ・震度ランク ・最大加速度 ・最大速度	・応答計算による加速度波形 ・計測震度 ・最大加速度 ・最大速度	・応答計算による加速度波形 ・計測震度 ・最大加速度 ・最大速度
表層地盤モデル作成方法の概要	①既存調査資料収集 ②1/25000地形図を元に各メッシュの代表地形(沖積低地、洪積台地、丘陵地、山地[丘陵地、山地]については年代又は岩質で細分類))を設定 ③PS検層データよりVsとN値の関係を回帰 ④ボーリングデータ及び既往の文献資料を基に断面図を作成 ⑤県内に現れる地層を物性(N値)で区分 ⑥②、④、⑤及びボーリング資料を考慮して500mメッシュを代表する柱状図を選定し316種類(名古屋市は77種類)にモデル化(典型化) ⑦土質ごとに物性値を付与しS波速度構造を作成 ⑧動的変形特性は試験結果を土質別に整理して設定	①既存調査資料収集 ②国土数値情報を元に各メッシュの代表微地形を設定 ③PS検層データよりVsとN値の関係を回帰 ④微地形別にAVS30 ¹⁵⁾ と標高又は河川からの距離との関係を回帰 ⑤PS検層データがあるメッシュはそのデータを採用 ⑥掘進長が30m以上のボーリングデータが5本以上あるメッシュは、最も卓越周期(T _g)が長いデータを採用しVsとN値の関係からモデルを作成 ⑦⑤、⑥以外のメッシュは同じ微地形のボーリングで最も近いデータをVsとN値の関係、AVS30と標高又は河川からの距離との関係を用いてS波速度構造を作成 ⑧動的変形特性は試験結果を土質別に整理して設定	①既存調査資料収集 ②土地条件図(国土地理院)を元に各メッシュの代表微地形を設定 ③PS検層データよりVsとN値の関係を回帰 ④各ボーリングデータをN値のばらつきの小さい範囲で平均、層構造化 ⑤文献資料を考慮し、平均N値で層構造化したボーリング間を同等のN値、地層とみなせる層同士で補間しN値境界面を作成 ⑥PS検層データがあるメッシュはそのデータを採用 ⑦ボーリングデータがあるメッシュは、最も卓越周期(T _g)が長いデータを採用しVsとN値の関係からモデルを作成 ⑧⑥、⑦以外のメッシュは⑤のN値境界面に基づきVsとN値の関係をj用いてS波速度構造を作成(ただし液状化評価[PL法]のためのN値は同じ微地形のボーリングで最も近いデータを採用) ⑨動的変形特性は試験結果を土質別に整理して設定
予測結果の検証方法	・過去の被害地震(昭和東南海地震)の被害に基づく震度分布と比較、妥当性を検証	・過去の被害地震(宝永東海地震、安政東海地震、昭和東南海地震)の被害に基づく震度分布と比較、妥当性を検証	・AVS30に基づく速度増幅度と応答計算による速度増幅度を比較、妥当性を検証

古屋市を50mメッシュで区分するとメッシュ数は125,962個である。一方で名古屋域におけるボーリングデータは40,420地点、PS検層データは342地点と多くの調査データが蓄積されている。しかし、これは市域の3分の1をカバーする程度であり、また全ての調査データが工学的基盤まで達しているわけではない。このため、調査データは市域の表層地盤に関する情報として十分とはいえず、調査データのない地点は何かの方法で地盤構造を推定する必要がある。名古屋域において既存調査データを活用して表層地盤の速度構造をモデル化した例として、

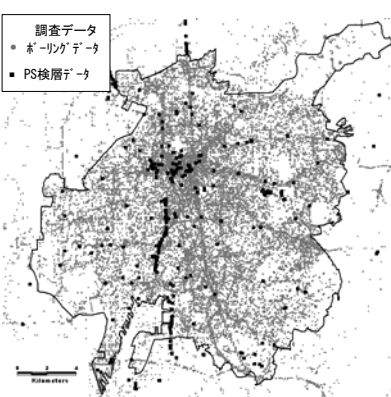


図2 名古屋域における調査位置図

福和・他¹¹⁾がある。ここではS波速度(以下 V_s)の境界として文献⁹⁾による各地質年代の地層境界を用い、ボーリング調査実施地点では土質・地質年代を考慮したN値と V_s の関係を、ボーリングデータのない地点では地質年代を考慮した深度と V_s の関係をを用いて、さらに深部は文献⁴⁾で設定した地盤構造を用いている。しかし、市東部の丘陵地では地層内の土質の変化や風化等の影響により同一地層内でも V_s が変化している。図1に示すように、名古屋市東部は表層地盤が2層で構成されるが、福和・他¹¹⁾の方法はボーリング調査のない地点では、速度構造を2層でしかモデル化することができず、実状を反映できていない。このためボーリングデータのない地点においても地質年代区分による地層に加えよりきめ細かな指標を入れることが望まれる。一方で福和・他は V_s の推定においてパラメータの数や種類による推定精度の比較を行い、N値をパラメータとしない場合は推定精度が落ちることを示している¹¹⁾。これは逆に言えば同一地質年代の層で土質種別によるS波速度構造の変動を考慮するには、N値に基づいた層構造を推定すればよいことを意味する。そこで、

本論ではN値の空間的分布を推定し、ボーリングのない地点及び工学的基盤に達しないボーリングの孔底から工学的基盤までの構造を補うことを試みた。

図3に表層地盤のモデル化の流れを示す。まず、ボーリングデータを地質年代毎に区分する。各地質年代内で平均N値による層構造を作成し、平均N値の出現深度を空間的に補間して3次元の平均N値の層境界面を作成する。次に、PS検層データに基づくN値と V_s の関係をを用いて表層地盤のS波速度構造を構築する。さらに、新旧の地形図に基づいて、地形面標高の差分から切土・盛土厚を求め、表層地盤モデルに考慮する。なお、標準貫入試験によるN値から、貫入量30cmに対する打撃回数を求めるため、式(1)により補正する。

$$\tilde{N} = N \cdot 30 / d \quad (1)$$

\tilde{N} : 換算N値, N : N値, d : 貫入量 (cm)

式(1)より得られる値を換算N値と呼ぶが、本論では換算N値をN値と呼ぶこととする。

3. 標準貫入試験データに基づくS波速度構造の推定

3.1 N値と V_s の関係式

V_s とN値の関係に関しては、過去から多くの回帰式が提案されており^{11)~14)}、土質や地質年代の考慮により推定精度が向上することが示されている。図4に名古屋域342本のPS検層データに基づくN値と V_s の関係を示す。なお、図4には、後述する V_s とN値の回帰結果のうち、 D_{3U} 層に適用した回帰曲線を重ねて示す。各図中に示す相関係数 R からわかるように、 V_s とN値は相関がよく、この関係を式(2)の形式で回帰した(以下、A法)。回帰結果を表2(1)に示す。表中の σ は回帰係数に対する標準偏差を示す。

$$\log V_s = \log a + b \cdot \log \tilde{N} \quad (2)$$

次に図5に深度と V_s との関係を示す。 V_s は深度とも対応がよく、正木・他¹⁴⁾や福和・他¹¹⁾等ではN値、土質、地質年代の他、深度をパラメータとして V_s の推定式を回帰している。図6に深度とN値

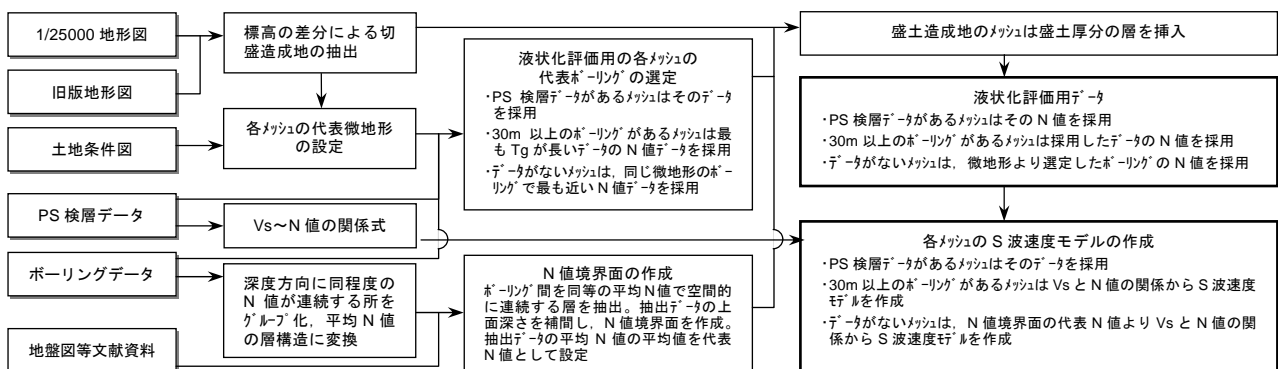


図3 表層地盤のモデル化の流れ

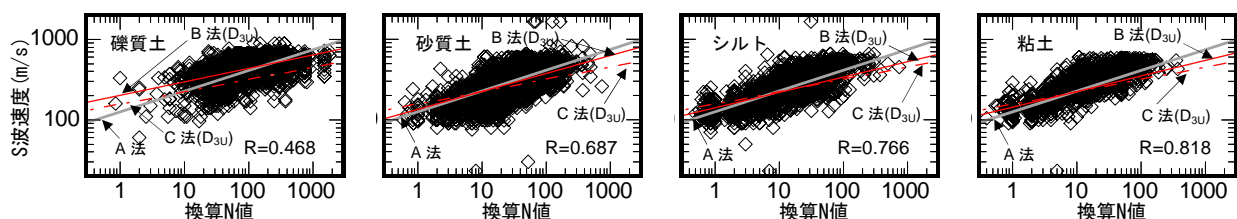


図4 換算N値と V_s の関係

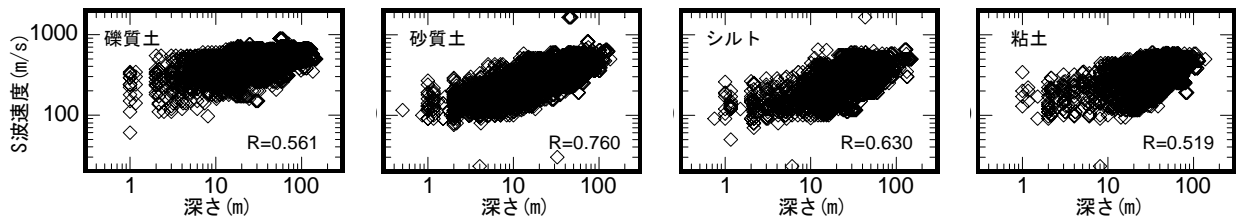


図5 深さと Vs の関係

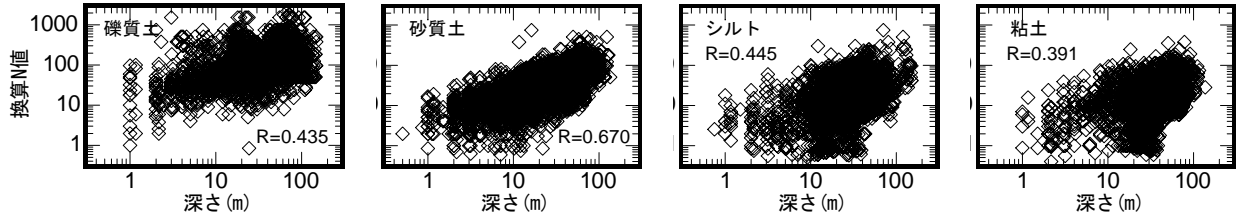


図6 深さと換算 N 値の関係

の関係を示す。深度は N 値と概ね対応している。そこで、N 値の中に深度の影響が反映されていると考え、本論では N 値、土質、地質年代をパラメータとして Vs との関係重回帰分析により求めた(以下、B 法)。得られた回帰係数を表 2(2)に示す。A 法に比べ標準偏差 σ が小さい結果が得られている。

図 7 に名古屋市域の 342 本の PS 検層データを対象に各地質年代に含まれる N 値の割合を土質別に示す。図 7 より堆積環境を反映して各地質年代特有の土質構成割合を持ち、N 値の構成にも特徴がみられることがわかる。本モデル化においては、ボーリングデータのないメッシュでは空間的補間より得られる平均 N 値と地質年代のみ

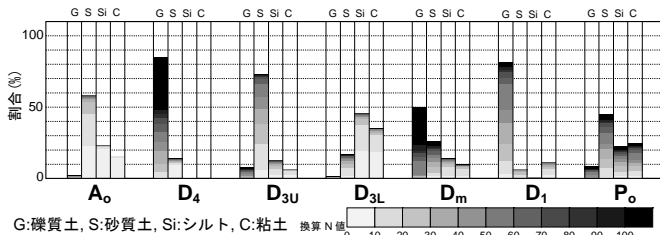


図7 各地質年代における土質及び換算 N 値の構成割合

表 2(1) 換算 N 値と Vs との関係式の係数一覧 (A 法)

a	126.18	b	0.258	σ	0.144
-----	--------	-----	-------	----------	-------

表 2(2) 換算 N 値・土質・地質年代と Vs との関係式の係数一覧 (B 法)

	a							b	σ
	A ₀	D ₄	D _{3u}	D _{3l}	D _m	D ₁	P ₀		
粘土	92.13	—	143.96	132.86	154.49	198.56	200.80	0.195	0.091
シルト	94.55	—	141.27	128.77	148.48	—	199.90	0.192	0.097
砂	105.62	179.85	135.13	124.56	148.44	—	182.41	0.224	0.086
礫	156.10	232.03	201.76	—	245.45	265.39	247.81	0.170	0.101

表 2(3) 換算 N 値・地質年代と Vs との関係式の係数一覧 (C 法)

	A ₀	D ₄	D _{3u}	D _{3l}	D _m	D ₁	P ₀
a	127.64	169.43	156.68	200.44	211.84	177.01	155.24
b	0.124	0.164	0.154	0.106	0.156	0.209	0.250
σ	0.113	0.197	0.091	0.100	0.118	0.156	0.097

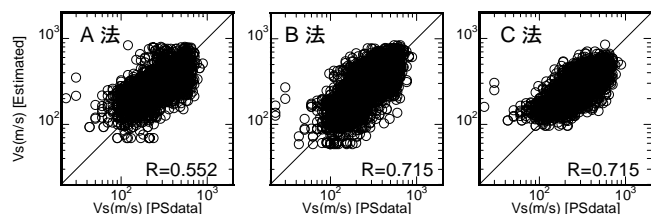


図8 各回帰式に基づく S 波速度の推定精度の比較

がパラメータとなるが、土質は概ね地質年代によって代表できると考え、N 値をパラメータとする Vs との関係式を地質年代別に回帰した(以下、C 法)。回帰係数を表 2(3)に示す。C 法は地質年代によっては A 法より σ が大きい場合がある。各回帰式に基づく推定 Vs を PS 検層結果と比較した。結果を図 8 に示す。B 法では幅広い Vs の範囲で良好に推定できている。特に土質区分の考慮により軟弱な地盤で推定精度を高めている。一方、C 法では 100m/s 以下の Vs は速めに推定されるが、B 法と同等の相関係数が得られている。これより C 法による回帰式はある程度適用可能であることを確認した。

3.2 標準貫入試験データの層構造化

平均 N 値の層境界面を作成するためには、各標準貫入試験データを用いて N 値に基づく層構造に変換する必要がある。しかし、標準貫入試験は通常深さ方向に 1m 毎に実施されるため、N 値の空間分布を捉える際にデータ量が膨大となる。そこで N 値の多少のばらつきを許容して層としてのまとまりを与える。標準貫入試験データを平均 N 値による層構造に変換する方法としては、土質柱状図に基づき土質毎に平均 N 値を求める方法がある。しかし土質による層区分は、調査する人間の感性・感覚によるところが大きい。そこで標準貫入試験データから式(3)を満たすように平均 N 値の層を作成した。

$$\text{Log}_{10}(\delta \bar{N}) / \text{Log}_{10}(\bar{N}) \leq 0.7 \quad (3)$$

ここで、 \bar{N} :平均 N 値、 $\delta \bar{N}$:標準偏差である。右辺の 0.7 については、0.3~0.8 について試行し、PS 検層の層構造と対応する中で最小の値とした。これは平均 N 値に対して 0.6 から 1.4 倍程度のばらつきを許容することに相当し、Vs のばらつきに換算すると 10%程度である。

図 9 に、式(3)による層区分と各層の平均 N 値から C 法により推定した S 波速度構造を、PS 検層結果と比較して示す。参考に式(3)による層区分と各層の平均 N 値から A 法により推定した S 波速度構造及び、土質毎の平均 N 値から B 法により推定した S 波速度構造を重ねて示す。ここでは名古屋市の東部丘陵地と西部沖積低地を代表する地点を比較対象として選定した。図 9 より、工学的基盤に相当する平均 N 値が 50 以上の礫層で Vs の誤差が大きいが、推定 S 波速度構造は、PS 検層による S 波速度構造と対応がよい。礫質土の場合に誤差が大きいのは、礫が混じると N 値が地層全体の固さではなく、局所的な礫の固さを反映するためと考えられる。PS 検層結果は、地層全体としての固さを示すため、推定誤差が大きくなる。S 波速度

の推定精度の向上については今後の課題であるが、本論では愛知県
の速度検層や地震探査に基づき構築された深部地盤モデル¹⁹⁾の工学的
基盤の V_s である 500m/s を採用した。

推定した S 波速度構造を、周期特性、増幅特性の観点から比較す
るため、A～C 法による 3 種類の S 波速度構造に対して、1 次固有周
期、深さ 10m までの平均 S 波速度（以下、AVS10）、深さ 30m まで
の平均 S 波速度（以下、AVS30）を求めた。なお、AVS30 は地盤の
増幅特性との対応がよいとされ、地盤増幅の簡易予測に用いられて
いる。松岡・翠川は AVS30 と、1987 年千葉県東方沖地震の速度増

幅度との対応からその有効性を検討している¹⁵⁾。また、川瀬はスペ
クトルインバージョンから求めたサイトの増幅特性が AVS10 と対
応がよいことを示している¹⁶⁾。図 10 に PS 検層による 1 次固有周期、
AVS10、AVS30 と A～C 法による S 波速度構造を用いた 1 次固有周
期、AVS10、AVS30 をそれぞれ比較して示す。図 10 より、C 法は 1
次固有周期、AVS10、AVS30 のいずれも PS 検層による結果とよく
対応しており、B 法による結果と同等の相関係数が得られている。
これより、式(3)による平均 N 値の層構造及び C 法による V_s と N 値
の関係式の有効性が確認できる。以下では、式(3)による平均 N 値層
構造を用いて 3 次元的な層境界面を作成する。

3.3 平均 N 値層構造の推定

ボーリングデータのないメッシュにおける S 波速度構造を推定す
るため、名古屋市域を対象に平均 N 値の層境界面を作成した。N 値
の境界面を作成するには、各ボーリング地点で式(3)を用いて標準貫
入試験データから平均 N 値層構造を求める必要がある。図 11 に名
古屋市東西断面 AA'における各地層内の N 値の分布を示す。図 11
より同程度の N 値が東から西に傾斜して連続して分布していること
が分かる。同一地質年代で N 値が変動するのは土質の違いを反映し

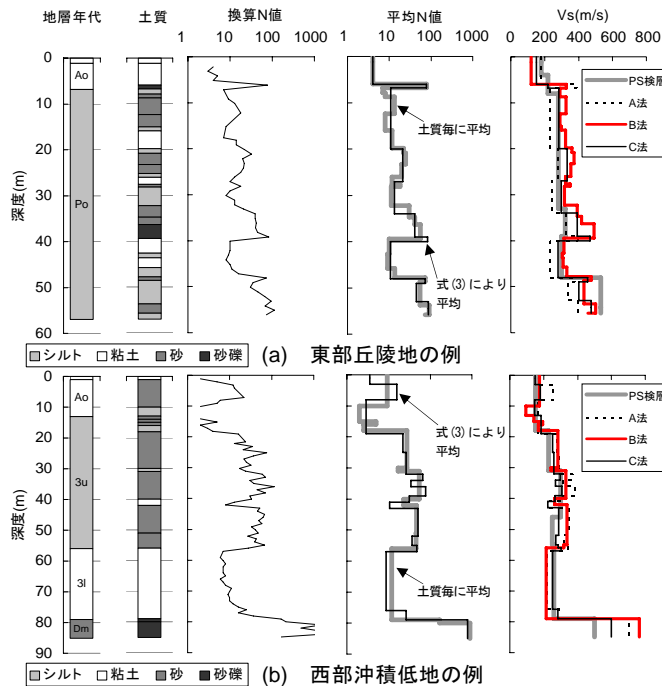


図 9 SPT データから各手法で推定した S 波速度構造の例

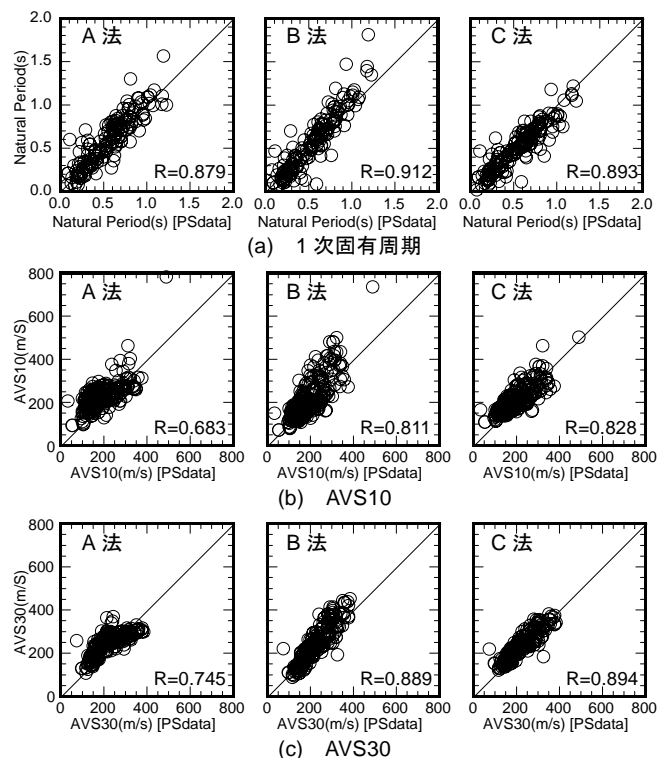


図 10 推定 S 波速度構造と PS 検層データとの比較

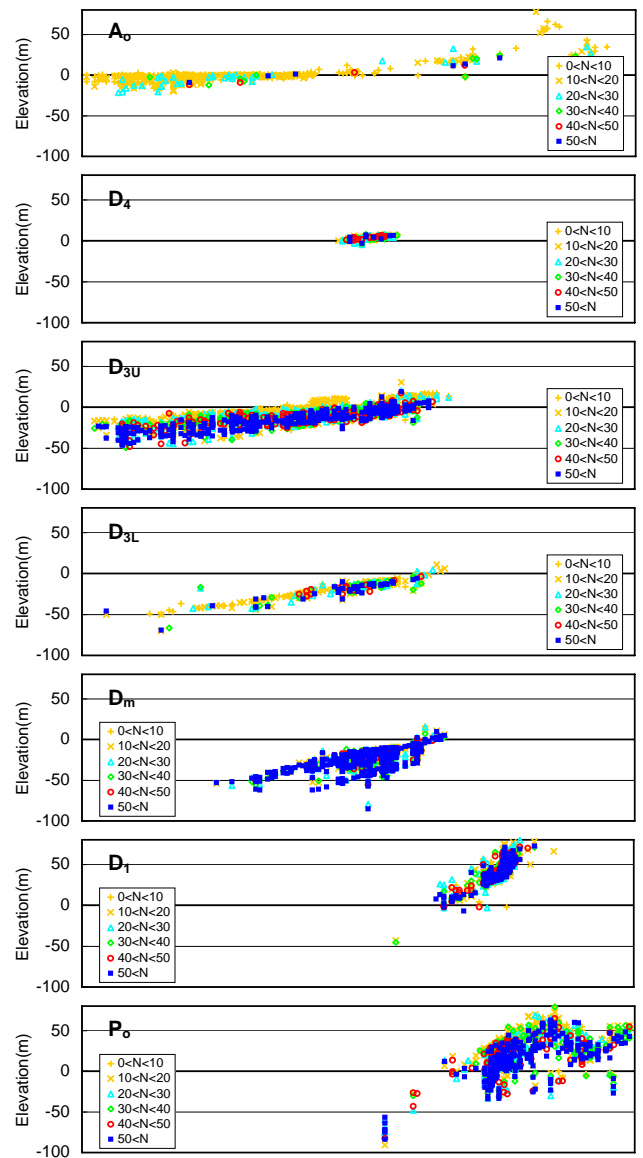


図 11 各地層内における平均 N 値の分布の例

ている。例えば A_0 は主に粘性土と砂で構成され、それぞれ海進期、海退期に堆積する。これを反映して A_0 内の N 値はほとんど 10~20 程度であるが、下部は 20~30 程度の N 値が分布している。これは砂の層に相当する。これを平均 N 値の層と解釈し、空間的に補間して平均 N 値の層構造を推定した。S 波速度構造推定の手順は次の通りである。

- ①文献^{9),10)}の地質構造を補間して各ボーリングデータ位置における地質年代境界の深度を求める。
- ②各ボーリングにおいて、平均 N 値層を地質年代別に区分し、図 11 のように平均 N 値の分布を示す断面を作成する。
- ③地質年代ごとに、各ボーリングの平均 N 値 \bar{N} と層順・ボーリング間の連続性を断面上で判断し、全ボーリングにおいて共通と見なせる平均 N 値の上面深度を抽出する。
- ④抽出した層の上面深度を補間し、3 次元的な層境界を作成する。補間にはクリギング法による線形補間を用いる。併せて文献^{9),10)}に基づく地質年代別地層境界を補正する。
- ⑤層境界を作成するために各ボーリングから抽出した層の平均 N 値 \bar{N} を更に平均した値 $\bar{\bar{N}}$ (以下、代表 N 値) から C 法による N 値と V_s の関係式より S 波速度構造を推定する。
- ③と⑤の結果、得られた各層の代表 N 値と抽出した平均 N 値の範囲、地質年代との対応を表 3 に示す。

図 12 に上記④において作成した平均 N 値構造の東西測線 AA' における断面図を、図 13 に沖積層基底面(表 3 の上位 6 番目の層)の上面標高を示す。文献⁹⁾による地質年代境界を考慮しているため、図 12 の断面は図 1 の地質断面とも対応する。また各地質年代の地層内の硬さは図 11 の N 値の空間分布を反映したものであり、硬さを示す層構造として妥当な結果が得られている。

なお本モデル化においては、ボーリングデータが追加された場合に、追加データを式(3)により層構造化した後、表 3 の平均 N 値の層に対応するように区分し、改めて境界面を補間することにより随時モデルの更新が可能であり、従来手法のように一から断面を作成しなおすことを必要としない。

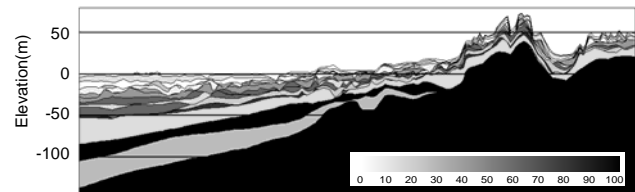


図 12 推定した平均 N 値構造の断面例

表 3 作成した平均 N 値層と地質年代との対応一覧

代表 N 値	市西部(低地)		市東部(丘陵地)	
	平均 N 値・ V_s	地質年代	平均 N 値・ V_s	地質年代
2.9	平均 N 値 6 未満	A_0	平均 N 値 6 未満	D_1
13.6	平均 N 値 6 以上		平均 N 値 6 以上	
2.7	平均 N 値 6 未満		平均 N 値 6 未満	
23.3	平均 N 値 10 以上		平均 N 値 10 以上	
7.2	平均 N 値 10 未満		平均 N 値 10 未満	
38.0	平均 N 値 15 以上	$D_{3u} \cdot D_4$	平均 N 値 20 以上	P_0
40.1	平均 N 値 35 以上		平均 N 値 35 以上	
59.5	平均 N 値 40 以上	D_{3u}	平均 N 値 40 以上	
15.2	平均 N 値 30 未満		平均 N 値 30 未満	
60.6	平均 N 値 45 以上		平均 N 値 45 以上・ $V_s 300m/s$ 以上	
21.7	平均 N 値 30 未満		平均 N 値 50 以上・ $V_s 400m/s$ 以上	
79.4	平均 N 値 50 以上	D_{3l}	平均 N 値 50 以上・ $V_s 400m/s$ 以上	
17.5	平均 N 値 40 未満・ $V_s 400m/s$ 未満		平均 N 値 50 以上・ $V_s 450m/s$ 以上	
95.3	平均 N 値 50 以上・ $V_s 450m/s$ 以上		平均 N 値 50 以上・ $V_s 500m/s$ 以上	
26.4	平均 N 値 40 未満・ $V_s 400m/s$ 未満	D_m	平均 N 値 50 以上・ $V_s 500m/s$ 以上	
134.9	平均 N 値 50 以上・ $V_s 500m/s$ 以上		平均 N 値 50 以上・ $V_s 500m/s$ 以上	

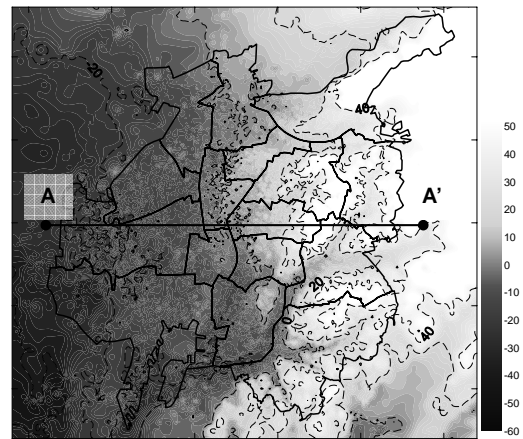


図 13 推定した沖積層基底面の上面標高(m)

3.4 切土・盛土の考慮

名古屋市中では東部丘陵地を中心に、戦後、宅地開発に伴う造成工事が進められ、元の地形が保存されていないところが多く存在する。そこで、東部丘陵地における造成地(切土・盛土)の改変量を把握することとした。

造成地の改変量は、旧版地形図と新版地形図との標高差より算出した。地形図はその縮尺による精度の問題があるが、一般に入手可能な地形図である都市計画基本図(縮尺:1/3000 または 1/2500)、1/10000 地形図、1/25000 地形図のうち、昭和初期から整備されている図幅は 1/25000 地形図のみであったため、昭和 10 年頃と平成 13 年の 1/25000 地形図を用いた。GIS (Geographical Information System) 上で新旧それぞれの地形図の等高線及び独立標高点をデジタイズし、これに基づきクリギング法の線形補間により 10m 間隔の DEM (Digital Elevation Model) を作成した後、同一座標の標高値の差分をとり切土・盛土厚を求めた。図 14 に得られた切土・盛土分布を示す。ただし特に旧版地形図の位置、標高の精度の問題を克服するため、明らかに地形改変が行われていない地域で標高差の補正を行った。次に図 15 に PS 検層データに基づく盛土部の V_s の累積頻度分布を示す。図のように盛土対象地域の原地形によって盛土材料が異なるため、盛土の物性値は埋立地、沖積面、台地・丘陵地の 3 区分に対して各々

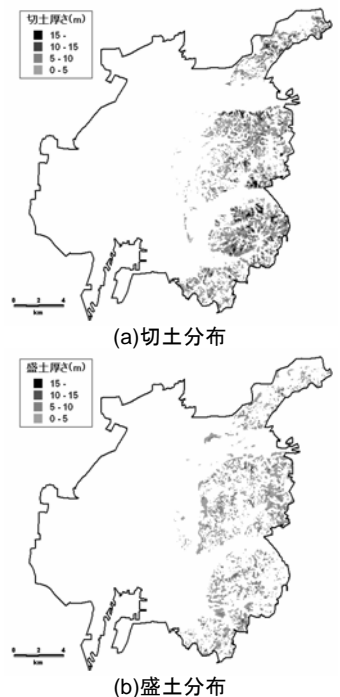


図 14 1/25000 地形図より求めた名古屋市の切土・盛土分布

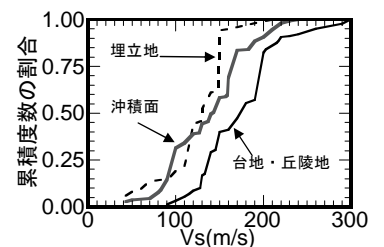


図 15 原地形面ごとの盛土の V_s の累積度数分布

の平均値を設定した。なお、地形図が改訂された場合には改訂された地形図に基づいて最新の地形グリッドデータを作成することにより切土・盛土分布の履歴データを更新することが可能である。

4. 表層地盤モデルの検証

4.1 微動 H/V スペクトルに基づく検証

本論で作成した地盤モデル（以下、推定地盤モデル）は強震動予測に利用することを目的としている。そこで、地盤の周期特性を観測記録と比較することによりモデルの有効性を検討する。一般に空間変化の少ない深部地盤モデルの場合は、地震観測記録を用いて検証を行っている。しかし、表層地盤に対しては、空間的な変化に対して観測点数が不足するため、地震観測記録に基づく検証は現実的ではない。そこで、本論では微動の水平動と上下動のスペクトル振幅比（以下、H/V スペクトル）を用いた。名古屋市内においては中村・他¹⁷⁾が、図 16 に示す市内の小学校や PS 検層地点、地震観測地点等の 340 地点において微動測定を実施し、求めた H/V スペクトルに対し、スペクトル形状から図 17 に示す 7 種類のカテゴリーに分類し、名古屋市の地形的特徴と周期特性の関連を考察している。H/V スペクトルの形状は、S 波速度コントラストが大きい層境界を有する速度構造ではその層に対応するピークが明瞭に現れる。しかし、S 波速度コントラストが大きい層境界を有しない場合には、明瞭なピークがなく単純に卓越周期のみで検証することは難しい。

一方で、微動 H/V スペクトルは、時松・新井¹⁸⁾により高次モードを考慮したレイリー波とラブ波の重ねあわせにより解釈できることが示されている。そこで、本論では微動観測地点に該当する位置の推定地盤モデルから、表面波理論 H/V スペクトル（以下、理論 H/V）の形状を求め、微動測定結果より求めた H/V スペクトル（以下、観測 H/V）の形状と比較し、推定地盤モデルの検証を行った。

高次モードの影響を考慮した理論 H/V は、次のように求めることができる¹⁸⁾。

$$H/V = (P_{HS} / P_{VR})^{0.5} \quad (4)$$

$$R/L = P_{HR} / P_{HL} \quad (5)$$

ここで、 R/L はレイリー波水平成分とラブ波の振幅比であり、式(4)、(5)の右辺の各項は、次の通りである。

$$P_{VR} = \sum_j^M P_{VRj}, \quad P_{HS} = \sum_j^M P_{HRj} + \sum_j^M P_{HLj} \quad (6)$$

P_{VRj} , P_{HRj} , P_{HLj} はそれぞれ j 次モードレイリー波（鉛直、水平）、ラブ波の相対パワーである。また、 P_{VRj} , P_{HRj} , P_{HLj} はレイリー波及びラブ波のミディアムレスポンス A_{Rj} , A_{Lj} を用いて、次のように求めることができる。

$$P_{VRj} = (A_{Rj}/k_{Rj})^2 \cdot \{1 + (\alpha^2/2) \cdot (u/w)_j^2\}, \\ P_{HRj} = P_{VRj} \cdot (u/w)_j^2, \quad P_{HLj} = (\alpha^2/2) \cdot (A_{Lj}/k_{Lj})^2 \quad (7)$$

k_{Rj} , k_{Lj} : 波数, u/w : レイリー波の水平鉛直比,
 α : 加振力の水平鉛直比

理論 H/V の算出においては、 α または R/L は、任意に設定する必要がある。ここでは、時松・新井¹⁸⁾に倣い R/L を全周波数において 0.7 と仮定して重ね合わせた。また、高次モードはレイリー波、ラブ波共に 10 次モードまでを考慮した。なお、工学的基盤以深の深部

地下構造は濃尾平野地下構造調査に基づいて構築した愛知県による深部地盤モデル¹⁹⁾を用いた。

図 17 に、観測 H/V と推定地盤モデルによる理論 H/V を比較した結果を微動 H/V のカテゴリー別に示す。参考のため、図 17 には推定地盤モデルを用いたレイリー波基本モードの H/V 比(以下、 H/V_{RF})も重ねて示す。図 17 より推定地盤モデルより求めた H/V_{RF} と観測 H/V を比較すると大局的な形状は対応するが、特に高周波数側のスペクトルレベルや詳細なピーク周波数は表現できていない。一方で、高次モードを考慮した理論 H/V は、概ね各カテゴリーの観測 H/V のスペクトル形状を再現しており、推定地盤モデルの検証に有効な手法と考える。

カテゴリー⑤～⑦の地点に関しては、表層地盤の卓越周波数に相当する 2 次ピークを明瞭に確認できるため、観測 H/V と理論 H/V の 2 次の卓越周波数を図 18 に比較して示す。図 18 より、観測 H/V と

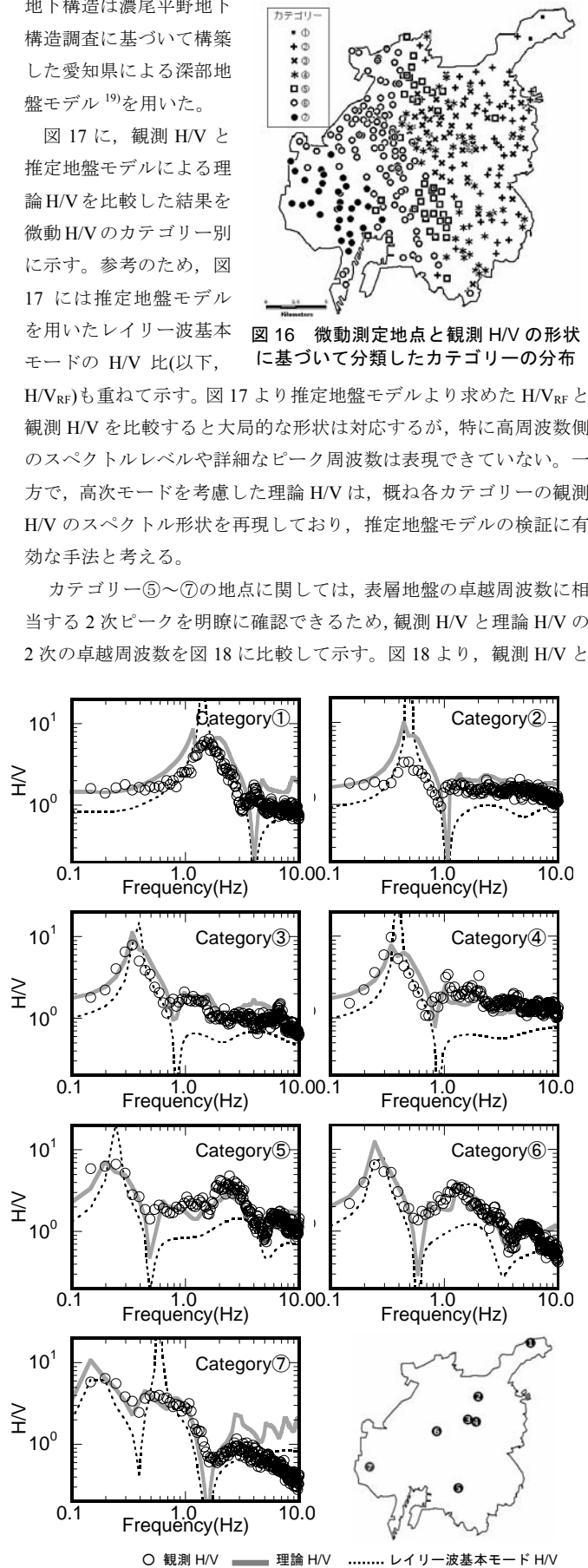


図 16 微動測定地点と観測 H/V の形状に基づいて分類したカテゴリーの分布

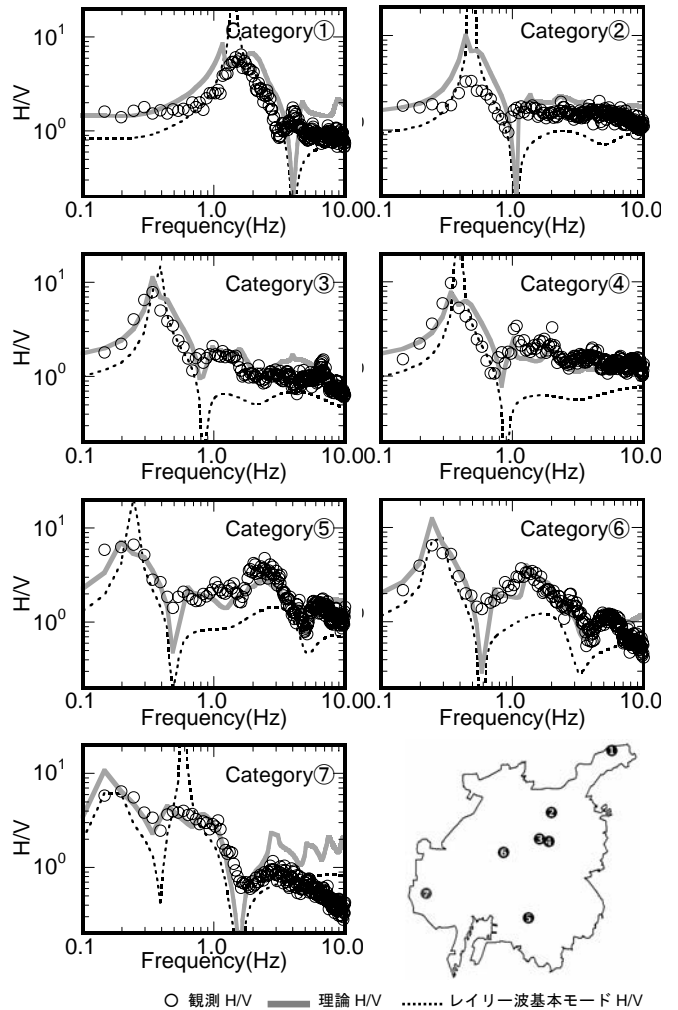


図 17 微動 H/V の各カテゴリーの観測 H/V と理論 H/V との比較例

理論 H/V の 2 次の卓越周波数はよく対応している。

これらより、推定地盤モデルは地盤の周期特性を模擬できる S 波速度構造を与えていると考えられる。なお観測 H/V と理論 H/V の対応がよくない地点は、両者が適合するように S 波速度もしくは層厚を調整して推定地盤モデルを修正することにより推定地盤モデルの高精度化が可能である。

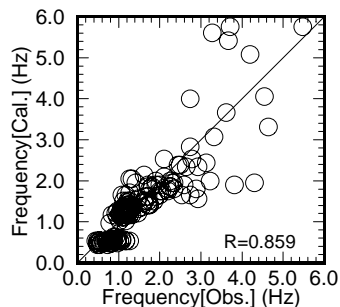


図 18 観測 H/V と理論 H/V の 2 次卓越周波数の比較

4.2 AVS30 に基づく検証

推定地盤モデルの作成目的は、地盤の増幅特性の把握にある。松岡・翠川¹⁵⁾は AVS30 と速度増幅度との関係式に加え、関東地方のデータに基づいて地形分類・標高等から AVS30 を経験的に求め、地形情報から地盤の増幅度を推定する手法を提案している。さらに、藤本・翠川²⁰⁾は本手法が日本全国へ適用可能であることを示している。

そこで、推定地盤モデルに基づく AVS30 と、東海・東南海連動の地震動を想定した基盤地震動¹⁹⁾を用いて全応力非線形応答計算により求めた速度増幅度とを比較する。

図 19 に推定地盤モデルの AVS30 と全応力非線形応答計算に基づく工学的基盤における最大速度に対する地表最大速度の比 (以下、ARV) との関係を示す。なお、推定地盤モデルの工学的基盤は $V_s=500\text{m/s}$ であり、松岡・翠川¹⁵⁾の関係式における

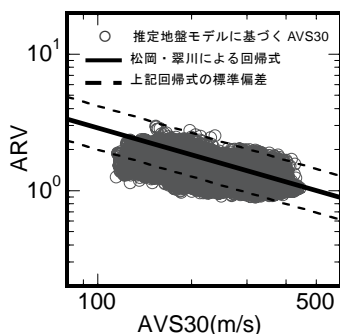


図 19 推定地盤モデルに基づく AVS30 と全応力非線形応答計算による工学的基盤～地表までの速度増幅度との関係

ARV の基準層である 600m/s と異なるため、松岡・翠川¹⁵⁾に補正係数 1.12 を除し 500m/s 相当層を基準とする ARV の回帰曲線を示している。また、全応力非線形法に必要な剛性と減衰定数のひずみ依存性に関しては、名古屋市内における動的変形特性試験結果を土質別に平均した曲線に対して R-O モデルをフィッティングして用いた。図 19 より全応力非線形法による ARV は AVS30 と相関がよく、松岡・翠川¹⁵⁾の回帰曲線とも概ね対応している。AVS30 が小さいと松岡・翠川¹⁵⁾の回帰曲線よりも ARV が小さめの結果となっているが、これは軟弱地盤の非線形性の影響が要因と予想される。

次に推定地盤モデルに基づく AVS30 の分布と、国土数値情報を用いた藤本・翠川²⁰⁾による AVS30 の分布を図 20、図 21 に示す。両図より AVS30 の空間的分布は概ね対応しているが、特に東部丘陵地で解像度の差が明瞭に認められる。なお、推定地盤の

AVS30 は、沖積面や埋立地・干拓地等の低地部では小さく、台地・段丘や丘陵地等では大きめに評価されており、地形による速度コントラストが大きい。図 22 に、推定地盤モデルによる AVS30 を、藤本・翠川²⁰⁾による AVS30、ボーリングデータより推定した S 波速度構造 (B 法) に基づく AVS30、PS 検層による AVS30 とそれぞれ比較して示す。図 22 より、推定地盤モデルによる AVS30 は PS 検層データやボーリングデータによる AVS30 とよい対応を示している。また、国土数値情報による AVS30 と比べ、推定地盤モデルによる AVS30 は得られる値の幅が大きい。これは図 20、図 21 と合わせて見ると、地形による AVS30 のコントラストが大きくなり、解像度が高くなったためと考えられる。図 23、図 24 に全応力非線形応答計算に基づく速度増幅度の分布と加速度増幅度の分布をそれぞれ示す。両図と図 20 を比較すると、速度増幅度は沖積低地である市西部で AVS30 の分布に対応している。一方で、加速度増幅度は、市西部では速度増幅度とは異なり、非線形の影響が強く、応答が抑制された結果となっている。しかし、丘陵地である市東部では AVS30 と概ね対応しており、浅部地盤構造の影響を受けた結果となっている。

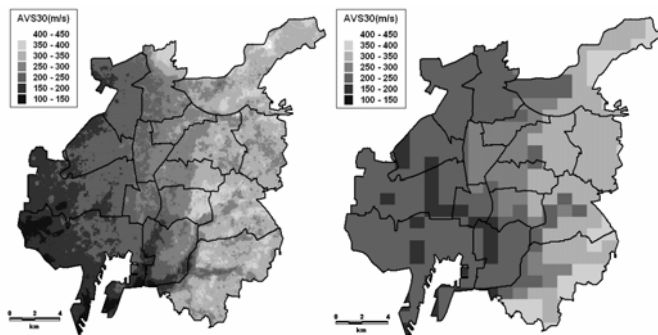
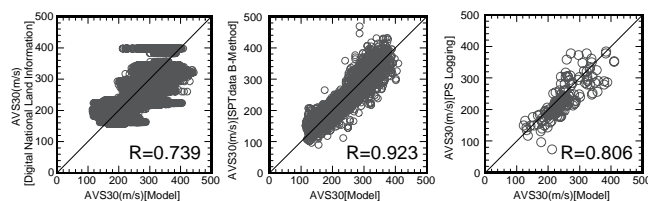


図 20 推定地盤モデルに基づく AVS30 の分布

図 21 国土数値情報に基づく AVS30 の分布



(a)国土数値情報 (b)ボーリング (B 法) (c)PS 検層

図 22 推定地盤モデルによる AVS30 と各方法による AVS30 の比較

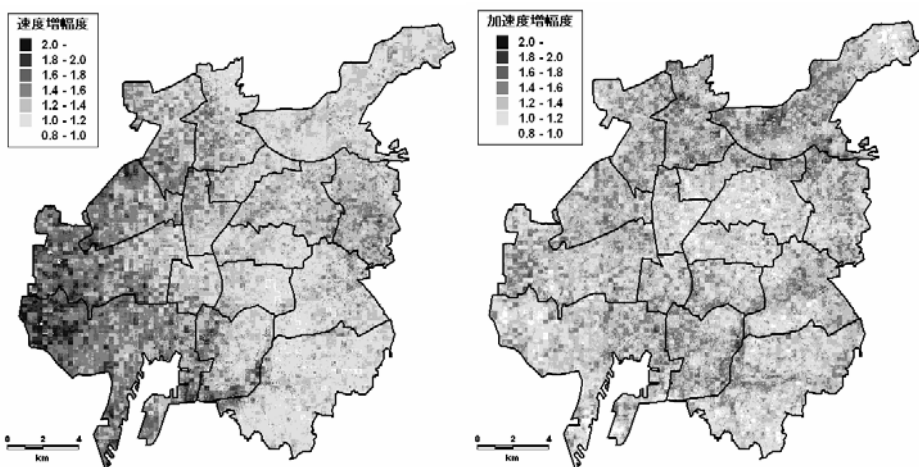


図 23 全応力非線形計算による速度増幅度

図 24 全応力非線形計算による加速度増幅度

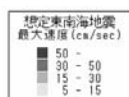


図 25 全応力非線形計算による東南
海地震の想定最大速度分布

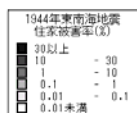


図 26 飯田²¹⁾による 1944 年東南海地震
の連区及び町別住家被害率分布

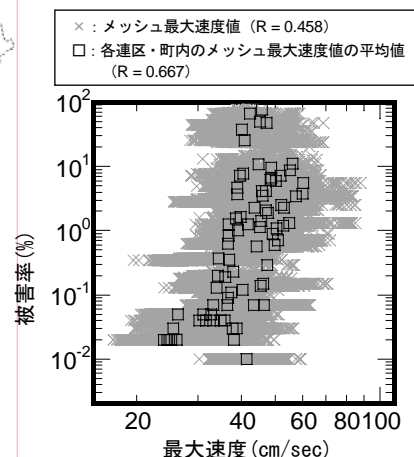


図 27 最大速度と住家被害率の関係

図 25 に、東南海地震を想定した基盤地震動¹⁹⁾を用いて全応力非線形応答計算により求めた最大速度分布を、図 26 に、飯田²¹⁾による 1944 年東南海地震の名古屋市における連区別住家被害率の分布を、図 27 に、最大速度と住家被害率の関係をそれぞれ示す。全応力非線形応答計算による最大速度分布は、1944 年東南海地震の住家被害率分布と概ね対応していることが分かる。以上より、本推定地盤モデルが地震動予測に適用可能であることが確認できる。

5. まとめ

本論では、高解像度ハザードマップ作成を目的として、新たな地盤モデル化法を提案した。

- (1)既存の調査データや地質構造、地形改変による切土・盛土分布を反映した強震動予測のための表層地盤のモデル化、さらに地盤の周期特性及び増幅特性の観点から表層地盤モデルの検証までの枠組みを提案することができた。本手法は、データの追加に伴うモデルの更新が可能である点に特徴がある。
- (2)名古屋市域における地質年代毎に区分された各地層は、各地層特有の土質構成割合を持つため N 値と地質年代をパラメータとする C 法で従来の回帰式と遜色ない S 波速度構造が得られた。
- (3)応答計算結果では表層地盤の周期特性を概ね反映している。また、周期特性の検証には、深部地盤構造の検証に用いられるレイリー波基本モードの H/V 比に比べ、高次モードを考慮した表面波理論 H/V のスペクトル形状と観測 H/V のスペクトル形状の比較が有効である。

残された課題として、既存の地盤図の改訂や、切土・盛土分布の解像度を高めるための大縮尺地図の利用や旧陸軍の空中写真の利用が考えられ、これらは今後検討の予定である。

謝辞

名古屋市の表層地盤モデル作成の機会をあたえていただきました名古屋市消防局防災部の関係諸氏にお礼を申し上げます。

応用地質株式会社・山本明夫氏・辻岡秀樹氏には、貴重なご助言をいただきました。ここに記して、謝意を表します。

匿名の査読者には、丁寧な査読をしていただき、本論文の内容を改善することができました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 2005.
- 2) 中央防災会議：中央防災会議「東南海地震に関する専門調査会」取りまとめ資料(案), 2001.
- 3) 中央防災会議：中央防災会議「東南海・南海地震に関する専門調査会」(第 3 回)説明資料, 2002.
- 4) 愛知県防災会議地震部会：愛知県東南海地震被害予測調査全体報告書, 1995.
- 5) 名古屋市防災会議地震災害対策部会：名古屋地震被害想定調査報告書, 1997.
- 6) 横浜市：わいわい防災マップ, <http://www.city.yokohama.jp/bousaimap/>
- 7) 名古屋市：地震マップ, 広報なごや号外, 2004.
- 8) 例えば、愛知県：平成 14 年度濃尾平野地下構造調査成果報告書, 2003.
- 9) 土質工学会中部支部：最新名古屋地盤図, 名古屋地盤図出版会, 1988.
- 10) 東海三県地盤沈下調査会：濃尾平野の地盤沈下と地下水, 名古屋大学出版会, 1985.
- 11) 福和伸夫, 荒川政知, 小出栄治, 石田栄介：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, pp.249-254, 1999.
- 12) 今井常雄, 殿内啓司：N 値と S 波速度の関係およびその利用例, 基礎工, pp.70-76, 1982.
- 13) 太田裕, 後藤典俊：S 波速度を他の土質の指標から推定する試み, 物理探査, 第 29 巻, 第 1 号, pp.31-41, 1976.
- 14) 正木和明：地震防災を目的とした地盤震動特性の評価に関する研究, 学位論文, 1984.
- 15) 松岡昌志, 翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測, 日本建築学会構造系論文集, No.447, pp.51-56, 1993.
- 16) 川瀬博：強震記録のスペクトルインバージョンから評価される地盤増幅率, 第 32 回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.51-60, 2004.
- 17) 中村仁, 福和伸夫, 高橋広人, 飛田潤, 堀啓輔：常時微動計測に基づく名古屋市域の地盤震動特性と基盤深さの推定に関する研究, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.413-421, 2000.3.
- 18) 時松孝次, 新井洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, No.511, pp.69-76, 1998.
- 19) 愛知県：平成 14 年度愛知県東南海地震東南海地震等被害予測調査報告書, 2003.
- 20) 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, 第 3 巻, 第 3 号, pp.13-27, 2003.
- 21) 飯田波事：昭和 19 年 12 月 7 日東南海地震の震害と震度分布, 愛知県防災会議, 1977.