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

DYNAMIC SOIL MODELING BASED ON EXISTING SOIL DATA IN URBAN AREA USING GIS

福和伸夫 — *1 荒川政知 — *2
小出栄治 — *3 石田栄介 — *4

Nobuo FUKUWA — *1 Masatomo ARAKAWA — *2
Eiji KOIDE — *3 Eisuke ISHIDA — *4

キーワード:

動的地盤モデル, PS 検層, 標準貫入試験, デローニ三角形分割, 地理情報システム

Keywords:

Dynamic soil modeling, PS logging, Standard penetration test, Delaunay triangulator, Geographical information system

The geographical information system to construct the dynamic soil model in urban area using existing soil data is demonstrated. Based on the regression analysis, the empirical equations to evaluate shear wave velocity and weight per volume are derived. By using these equations, the dynamic soil model can be obtained at the arbitrary point in Nagoya area where PS logging data or boring data do not exist. The method of dynamic soil modeling is installed to the disaster prevention geographical information system. In this system, the dynamic soil model at arbitrary point in Nagoya city is generated so that the predominant frequency and soil amplification is interactively evaluated.

1. はじめに

地震被害想定や耐震設計における地震動評価において、地盤特性を適切に考慮することの必要性は、地震工学に携わるものが共通に認識している事柄である。近年の势力的な地盤震動研究の成果により、十分なデータさえあれば精度良く地盤震動を予測することが可能になりつつある。また、耐震設計の性能設計化の流れの中で、建設敷地地盤の地震動増幅特性を反映した地震荷重の評価手法が具体的に論じられ始めている。しかし、一方で、地盤データの収集・整備状況や既存データの活用状況は必ずしも満足のいくものではなく、ごく一部の大都市都心部を除くと、地盤データは質・量共に不足しているのが現状である。質の良い地盤データを新たに獲得することの必要性が高いのは当然であるが、現況を鑑みるに、目前に迫った性能設計を根付かせるためには、現時点で利用できるデータを可能な限り収集し、必要に応じてこれらを相互に活用できる方法論を確立しておくことが緊要であると考えられる。

このような観点から、本論では、ある程度地盤資料が整っている大都市を対象として、既存の地盤データの現況を把握し、地盤データを可能な限り収集した上で、データ補間や多変量解析を通して、現時点で最良と考えられる動的地盤モデルの推定方法を確立することを試みた。さらに、この推定方法を利用して、データベース化した地盤データを地図上でインタラクティブに参照しながら、任意地点・断面の地盤速度構造を推定し、地盤震動特性を評価できる地理情報システム (GIS) を新たに開発した。具体的な対象都市としては、三大都市圏の一つであり、地盤構造が変化に富み、地盤資料が比較的整っている名古屋を選定した。なお、大都市以外の地域に関

しては、地盤資料が非常に少ないのが現状であり、松岡・翠川¹⁾の事例と同様に、国土数値情報の地盤情報に基づいた地盤増幅特性の推定²⁾を念頭におくこととし、本論の対象外としている。

本論では、まず最初に名古屋を例として地盤データの現況を分析し、地盤データが質・両共に不足していることを指摘する。次に、S波速度・単位体積重量と標準貫入試験データとの回帰分析により、標準貫入試験データに基づく動的地盤モデル構築のための回帰式を導出する。さらに、既存の地層境界深さの等高線図をディジタイジング・補間することにより任意地点の地盤構造を推定し、新たに導出したS波速度・単位体積重量と地質年代・深度との回帰式を用いてボーリングデータのない地点での地盤速度構造を推定する。つぎに、これらの推定手法を組み込んだ地理情報システムを開発した結果を示し、名古屋市内の任意地点での地盤増幅特性の推定に至るプロセスを解説する。最後に、得られた結果を観測データ³⁾と比較することによりシステムの有効性を示す。

2. 地盤データの現状と動的地盤モデル作成の基本方針

地盤データベース構築の重要性は古くから認識され、各地域で地盤図の整備が継続的に行われてきた⁴⁾。しかし、データの収集・公開に関しては、所有権、私権などの絡みもあり、様々な問題を抱えているのが現状である⁵⁾。また、整備されている地盤図が電子情報化されている例は稀であり、都市の微視的な地形変化に追従できるだけのデータ量には至っていない。特に、地震動予測に必要となる動的地盤データに関しては、質・量共に不足している。一方で、計算機利用技術の急速な進展に伴って地理情報システムと地盤・地形データとの融

*1 名古屋大学先端技術共同研究センター 教授・工博
(〒464-8603 名古屋市中種区不老町)

*2 東京電力㈱ 修士(工学)

*3 応用地質㈱ 修士(工学)

*4 日本技術開発㈱地震防災部 主任・博士(工学)

*1 Prof., Center for Cooperative Research in Advanced Science & Technology, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*2 Tokyo Electric Power Company, M. Eng.

*3 Oyo Corporation, M. Eng.

*4 Nihon Engineering Consultants, Dr. Eng.

合の試みも増えてきつつある^{6~7)}。

比較的地盤データの整備状況が優れている名古屋市を例に地盤データの現状を分析する。都市域の地盤震動予測のためには、都市全域での地盤の速度構造が必要となる。しかし、名古屋市の場合、公開されているPS検層結果はわずかに35本であり⁸⁾、著者が個別に収集したものも含めても約100本である。図1にPS検層調査位置を示すが、調査位置が偏っており、表層地盤の空間的な変動の大きさを考えると量的に不十分に分かる。図2に調査基底面の深度、S波速度、地質年代の頻度分布を示す。平均調査深さは57mで、基底面位置の平均S波速度は424m/sであり、基準地震動を規定する基盤としては決して

十分なS波速度ではない。

次善のデータとして利用可能なデータは、標準貫入試験データなどのボーリングデータである。名古屋市では最新名古屋地盤図⁸⁾によりデータの電子化が図られている。ここでは、名古屋市内を約125mのメッシュに分割し、各メッシュ毎に代表ボーリングデータを選定している。データが存在するメッシュ位置は図3に示す通りであり、名古屋市域約20,000メッシュ中、約4,200メッシュである。市域の1/5程度のデータ量に相当し外周部でのデータが欠落している。図4に、ボーリング調査深さと、ボーリング調査最深部の地質年代の頻度分布を示す。ボーリングの主たる調査目的が建築基礎設計用であるため、平均調査深さは約25mと浅く、洪積層以浅のデータに限られがちである。ちなみに、名古屋市内の地層構成は、地表部より、沖積層である南陽層、洪積層である鳥居松礫層、大曾根層、熱田層、海部弥富累層、八事・唐山層、第三紀層である矢田川累層という層序となっている。ちなみに、愛知県下全体では約13,000データが存在するので、名古屋市外の愛知県下のボーリングデータ密度は名古屋市の約1/10に相当する。他に利用可能なデータとしては、専門家が推定した洪積層以

浅の地質年代毎の地層境界深さの等高線図がある⁸⁾。一例として南陽層の基底面深さの等高線図を図5に示す。さらに、屈折法探査結果や重力探査結果に基づいて深部構造を推定した結果も存在する⁹⁾。

以上が現時点で、名古屋市中で利用可能な地盤データである。本論では、これらをしてできる限り有効に利用するために、以下の基本方針に則って動的地盤モデルを作成し地盤の増幅特性を評価する。

- (1) 質の高いデータ(PS検層データ)を優先利用する。
- (2) ボーリングデータが存在する場合には、N値・土質分類・地質年代・深度とS波速度・単位体積重量との間の回帰式を求め、S波速度・単位体積重量を推定する。
- (3) 各地質年代の地層基底面深さをデローニ三角分割法により平面補

図1 名古屋市域のPS検層調査地点

(a) 深度

(b) S波速度

(c) 地層年代

図3 名古屋市域のボーリング調査位置⁸⁾

(a) 深度

(b) 地層年代

図2 PS検層基底面地盤の頻度分布

図4 ボーリングデータ⁸⁾基底面地盤の頻度分布

図5 沖積層(南陽層)の基底面深さの等高線図⁸⁾

間し任意地点の基底面深さを推定する。さらに、地質年代・深度とS波速度・単位体積重量との関係を回帰し、ボーリングデータの得られていない位置のS波速度等を推定する。

- (4) 深い地盤構造のS波速度についても、深部地盤のS波速度等高線を平面的に補間することにより推定する。これにより、ボーリングデータの存在しない深部のS波速度等を推定する。
- (5) 推定S波速度構造を用いて、S波重複反射解析により地盤の増幅特性を推定する。

3. ボーリングデータに基づく動的地盤モデルの構築

標準貫入試験により得られるN値とS波速度などとの関係式は過去より数多く提案されてきており^{10~12)}、土質分類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。名古屋地区でも正木¹²⁾が最新名古屋地盤図掲載データを用いて深度(H)、N値(N)、土質分類(4分類)、地質年代(3分類)を用いた回帰式を示している。本論では、地質年代をさらに細分類(8分類)し、かつ、著者等が独自に収集したPS検層データを追加することにより、新たな推定式を作成した。PS検層データが存在するボーリングデータに対して、N値が得られている深度毎にサンプルを取り、数量化理論を用いて、S波速度、単位体積重量を推定する回帰式を求めた。採用したサンプルのS波速度・単位体積重量とN値・深度との関係を図6に、地質年代毎のS波速度・単位体積重量の平均値と標準偏差、土質分類割合を図7に示す。得られた回帰式は以下の通りである。

$$V_s = 102.86 N^{0.129} H^{0.118} \left\{ \begin{matrix} 1.000 \\ 0.978 \\ 1.015 \\ 1.113 \end{matrix} \right\}_{S1} \left\{ \begin{matrix} 1.000 \\ 1.345 \\ 1.223 \\ 1.219 \\ 1.157 \\ 1.365 \\ 1.505 \\ 1.543 \end{matrix} \right\}_{A1} \quad (1)$$

$\left\{ \begin{matrix} \text{粘土} \\ \text{シルト} \\ \text{砂} \\ \text{砂礫} \end{matrix} \right\}_{S1}$
 $\left\{ \begin{matrix} \text{南陽層} \\ \text{鳥居松礫層} \\ \text{大曾根層} \\ \text{熱田層上部} \\ \text{熱田層下部} \\ \text{海部弥富累層} \\ \text{八事層} \\ \text{矢田川累層} \end{matrix} \right\}_{A1}$
 $\left\{ \begin{matrix} \text{粘土} \\ \text{砂礫} \end{matrix} \right\}_{S2}$
 $\left\{ \begin{matrix} \text{沖積層} \\ \text{洪積層} \end{matrix} \right\}_{A2}$
 $\left\{ \begin{matrix} \text{粘土} \\ \text{シルト} \\ \text{砂} \\ \text{砂礫} \end{matrix} \right\}_{S3}$
 $\left\{ \begin{matrix} \text{沖積層} \\ \text{洪積層} \\ \text{第三紀層} \end{matrix} \right\}_{A3}$

図6 P S検層の実測S波速度・単位体積重量とN値・深度との関係

$$V_s = 1.58 N^{0.031} H^{0.007} \left\{ \begin{matrix} 1.00 \\ 1.015 \\ 1.010 \\ 1.039 \end{matrix} \right\}_{S1} \left\{ \begin{matrix} 1.000 \\ 1.050 \\ 0.999 \\ 1.004 \\ 1.007 \\ 1.052 \\ 1.041 \\ 1.027 \end{matrix} \right\}_{A1} \quad (2)$$

ここに、S1とA1のベクトルは、それぞれ、{粘土・シルト・砂・砂礫}、{南陽層・鳥居松礫層・大曾根層・熱田層上部・熱田層下部・海部弥富累層・八事層・矢田川累層}を意味している。図8に式(1)~(2)により推定したS波速度と単位体積重量の実測値との関係を示す。相関係数はS波速度に対しては0.852、単位体積重量に対しては0.729である。ちなみに、文献^{10~12)}で提案された既往の回帰式は、

$$V_s = 97.0 N^{0.314} \quad (3)^{10)}$$

$$V_s = 68.91 N^{0.173} H^{0.195} \left\{ \begin{matrix} 1.00 \\ 1.085 \\ 1.189 \end{matrix} \right\}_{S2} \left\{ \begin{matrix} 1.000 \\ 1.306 \end{matrix} \right\}_{A2} \quad (4)^{11)}$$

$$V_s = 98.04 N^{0.170} H^{0.104} \left\{ \begin{matrix} 1.00 \\ 0.871 \\ 0.840 \\ 0.984 \end{matrix} \right\}_{S3} \left\{ \begin{matrix} 1.000 \\ 1.292 \\ 1.659 \end{matrix} \right\}_{A3} \quad (5)^{12)}$$

図7 地質年代毎のS波速度・単位体積重量・土質分類割合

であり、S2、S3、A2、A3のベクトルは、各々、{粘土・砂・砂礫}、{粘土・シルト・砂・砂礫}、{沖積層・洪積層}、{沖積層・洪積層、第三紀層}を意味している。これらの3式によって求めたS波速度の相関係数は、各々、0.684、0.811、0.791であり、式(1)は既往の研究に比較して推定精度が向上している。

次に、ボーリングデータが存在しない場所に対しては、次節に述べるように、地質年代毎の基底面深さ等高線を平面補間し、任意地点の地盤構造を地質年代による層構造として推定する。そこで、地質年代と深度のみを用いてS波速度と単位体積重量を推定する回帰式も導出した。結果は下式の通りである。

$$V_s = 110.94 H^{0.189} \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.796 \\ 1.642 \\ 1.414 \\ 1.156 \\ 1.704 \\ 2.206 \\ 1.788 \end{Bmatrix}_{A1} \quad \gamma_s = 1.624 H^{0.027} \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.124 \\ 1.070 \\ 1.033 \\ 0.995 \\ 1.103 \\ 1.109 \\ 1.051 \end{Bmatrix}_{A1} \quad (6)$$

式(6)の第1式における地質年代による指標の差異は、図7(c)に示した地質年代による土質分類割合の差によると考えられる。上式を用いて推定したS波速度・単位体積重量の実測値との関係を図9に示す。相関係数は、S波速度に対しては0.759、単位体積重量に対しては0.573であり、ボーリングデータを用いた推定結果に比較して推定精度は落ちるものの、概ね満足できる結果であると判断される。

参考までに、回帰式の指標の取り方による推定精度の差異を検討するために指標の組み合わせ方と相関係数との関係を図10に示す。図中には、地質年代を細分類した効果を見るために、地質年代を3分類とした結果も示してある。

つぎに、地盤増幅特性の評価に対する式(1)~(2)の有効性を検討するために、PS検層の行われている地点について、ボーリング基底面における入射波振幅の2倍に対する地表応答の伝達関数を重複反射解析により求め、1次ピークの卓越周期と増幅率を評価した。PS検層結果を用いた結果と式(1)~(2)を用いた推定結果との相関を図11に示す。相関係数は卓越周期に対して0.858、増幅率に対して0.667であり、卓越周期の評価精度に比べ増幅率の精度がやや劣っているものの、地盤の増幅特性をある程度捉えている。

4. 市全域の地層境界面深度の推定

名古屋市全域での地盤増幅特性を評価するためには、地盤構造の面的補間及び深さ方向の外挿が必要となる。そこで、最新名古屋地盤図に掲載されている地質年代毎の層境界深度⁸⁾と、愛知県地震被害想定⁹⁾に用いられた深部地盤構造($V_s=500, 700, 1600, 3000\text{m/s}$)の深度等高線をディジタイジングし、デローニ三角分割法を用いて、層境界深度を平面補間した。図12に沖積(南陽)層基底面と地震基盤上面($V_s=3000\text{m/s}$)を例として深度補間結果を示す。深度補間結果の精度の把握のために、図13にボーリング調査から得られた各地層境界深度と本補間法により推定された深度との相関を示す。図より、本補間結果は十分な精度を有していると判断される。

以上の手続きに基づいて推定した動的地盤モデルを用いて、名古屋市内全域の地震基盤に対する1次固有周期を求めた結果を図14に示す。また、図15には常時微動測定結果に基づいて求めたやや長周期域の卓越周期分布³⁾を示す。両者はよい対応を示しており、本論で求めた動的地盤モデルの有効性を示している。

図8 (1)・(2)式によるS波速度・単位体積重量の推定値と実測値

図9 (6)・(7)式によるS波速度・単位体積重量の推定値と実測値

(b) 単位体積重量

図10 回帰式の指標の組み合わせと相関係数

(a) 1次ピークの卓越周期

(b) 1次ピークの卓越率

図1-1 (1)・(2)式により求めたボーリング基底面に対する卓越特性の推定精度

図1-3 ボーリング調査により得られた地層境界深度と推定深度の相関

5. 動的地盤モデル作成用地理情報システム

前節までに示した動的地盤モデルの作成手法を地理情報システム化することにより、名古屋市内の既存ボーリングデータの活用と、動的地盤モデルや地盤卓越特性の推定を、インタラクティブかつビジュアルに行えるシステムを構築した。図1-6が本システムの概要である。最初に、(a)名古屋市内のボーリングデータ調査位置を図示し、(b)評価したい地域をマウスドラッグにより拡大し、さらに位置特定のため背景に都市情報を示す。その上で、(c)表示したい地層断面位置を地図上でマウスドラッグすると、4節に示した方法で補間・外挿した地層断面を背景としてボーリング柱状図が表示される。図中には地震基盤位置までの断面が表示される。さらに、(d)ボーリング柱状図をマウスクリックすると、詳細な柱状図が表示され、3節に示した方法で推定したS波速度と単位体積重量が右側に表示される。土質柱状図上でマウスを上下に移動させると、当該深さまでで定まる固有周期を重力式により簡易推定し、ウィンドウ下方に表示する。これにより、各地層の地盤周期への寄与を容易に把握できる。さらに、(e)ウィンドウ左下の伝達関数ボタンをマウスクリックするとボーリング基底面および地震基盤位置の入射波の2倍に対する地表応答の伝達関数が評価され、結果を自動表示する。以上が、本システムの主たる動きであるが、別途開発した地震動評価GIS¹³⁾や波形解析用シェル¹⁴⁾と組み合わせることにより、任意地点の地表での地震動評価が可能となっていく。なお、一部の機能は既にWeb上 (<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/>) で稼働する地理情報システムに移行しており¹⁵⁾、インターネットを介して利用可能である。

6. まとめ

本論では、名古屋市域を対象として、既存の地盤調査結果を最大限利用して市域全体の地盤の速度構造と密度構造を推定する方法を示すと共に、得られた知見を地理情報システムに組み込み、任意地点の動的地盤モデルと動特性の推定を行うシステムを開発した。本論で得られた主たる成果は以下の通りである。

- 1) 既存地盤データの収集と電子情報化、市域任意地点の地層境界深度の推定、速度検層データとの回帰に基づく他の地盤指標を用いたS波速度・単位体積重量推定式の誘導、を行い、現状で最良と思われる名古屋市域全体の動的地盤モデルを構築した。
- 2) 得られた地盤モデルを用いて求めた地盤の卓越周期・卓越率はPS

検層結果を用いて求めたものと良く対応し、地震基盤に対する1次固有周期も観測結果と一致度が高いことから、導出された動的地盤モデルは市域の動特性の推定には有用な資料であると判断できる。

- 3) 本論の知見をGISに組み込むことにより、市内任意地点の動的地盤モデル推定と動特性評価をインタラクティブかつビジュアルに行うことを可能とした。

今後は、地盤資料の収集を一層進めると共に、常時微動や強震観測記録等の観測データの蓄積を図り、浅部・深部地盤構造の修正・改善を進め、より信頼性のある地盤震動特性評価手法を確立していく。

参考文献

- 1) 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報告集、第447号、pp.51-56、1993
- 2) 福和伸夫、荒川政知、西阪理永：国土数値情報を活用した地震時地盤卓越率の推定、構造工学論文集、Vol.44B、pp.77-84、1998
- 3) 西阪理永、福和伸夫、高橋広人、寺本道彦、植田三月、飛田潤：常時微動計測に基づく名古屋地盤の震動特性に関する研究、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.835-840、1998
- 4) 例えば、日本建築学会東海支部、土質工学会中部支部、名古屋地盤調査研究会：名古屋地盤図、コロナ社、1969
- 5) 地盤工学会：地盤情報データの高度利用に関するパネルディスカッション資料集、地盤情報データベースの評価と高度利用に関する研究委員会研究委員会報告書、1996
- 6) 植下協他：講座・地盤工学者のための地形・地質情報の活用入門、土と基礎、Vol.38、No.8～Vol.39、No.8、1995～1996
- 7) 福和伸夫、西阪理永：東海地域における地震危険度評価のための動的地盤モデルの構築と地震時地盤卓越率の推定、地盤に関係した環境・防災問題とGISの利用、平成9年度地盤工学研究委員会活動報告書、地盤工学会、pp.54-76、1998
- 8) 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
- 9) 愛知県：愛知県東海地震被害予測調査報告書、1993
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 正木和明：地震防災を対象とした地盤震動特性の評価に関する研究、学位論文、1984
- 13) 福和伸夫、飯田正憲、西阪理永、河村康弘、飛田潤：地震動評価地理情報システム'QuSE'の構築、日本建築学会技術報告集、第6号、pp.225-229、1998
- 14) 松島信一、石田栄介、福和伸夫、西阪理永、徳武茂隆、田中清和：EWSを用いた波形解析システム、第16回情報・システム・利用・技術シンポジウム、pp.61-66、1993
- 15) 石田栄介、福和伸夫：J A V Aによる都市防災情報統合GISのインターネットへの展開、日本建築学会技術報告集、第5号、pp.287-291、1997

(a)沖積（南陽）層深度

(b)地震基盤上面 (Vs=3km/s) 深度

図 1 2 沖積（南陽）層基底面と地震基盤上面 (Vs=3km/s) 深度の補間結果

図 1 4 地震基盤に対する推定 1 次固有周期

(a)ボーリング位置

(b)地図の拡大と都市情報との重ね書き

図 1 5 微動記録に基づくやや長周期域の卓越周期³⁾

(c)任意位置の地層断面図の推定

(e)ボーリング基底面と地震基盤
に対する加速度伝達関数

(d)ボーリングデータ柱状図と動的地盤モデルの推定

図 1 6 動的地盤モデル作成GISの概要

[1999年4月19日原稿受理 1999年7月27日採用決定]