

三次元地層推定手法による地盤構造の可視化

児島 理士 高橋 真一 森尾 義彦
萩原 由訓 渡辺 和博

Visualization of Ground Structure via 3D Stratum Distribution Estimation

Rihito Kojima Shinichi Takahashi Yoshihiko Morio
Yoshinori Hagiwara Kazuhiro Watanabe

Abstract

Visualization of ground structures via a three-dimensional (3D) stratum distribution estimation is expected to help decrease geotechnical risks, particularly in a complex ground structure. It is important to use 3D models by understanding their characteristics and reliability. This is because a 3D stratum distribution estimation is a type of interpolation of the point data obtained from a boring survey. In this study, we discuss the features and issues of the existing estimation method with examples. We also discuss a microtremor measurement as a supplementary survey method for 3D stratum distribution estimation. Finally, we propose a comprehensive examination procedure of the ground structure visualization.

概要

地盤情報データベースの公開や利用環境の整備が推進されている。このような情報を用いて地盤構造を三次元的に可視化すれば、複雑な地層構成に伴い発生し得る地盤リスクを大幅に低減できる。三次元的な地盤構造は、ボーリングによる点情報から三次元的な面情報として地層境界面の形状を推定することで構築される。利用に際しては、その推定方法の特徴を理解するとともに、推定した地盤情報の信頼性を常に考慮することが重要である。本報告では、建設工事での利用にあたり、三次元地層推定手法を用いた地盤構造の可視化技術の基本的な特質とその課題を例示しながら、三次元地盤推定法を補強する微動探査技術を含めた総合的な地盤リスク低減のための検討フローを提案した。

1. はじめに

近年の杭未達によるマンションの傾き問題や大規模道路陥没事故などに代表される地盤に関するリスク(以下、地盤リスク)が顕在化している。これらの問題を背景に、ボーリング調査から得られる点情報から地盤構造の三次元的な把握と建設工事への反映の重要性が増している。三次元的な地盤構造の情報は、これまでも「東京都総合地盤図 I」¹⁾のように、代表的な地層断面が書籍として公開されている。これらの情報は、建設工事に関連する地盤構造の情報が必要になる場合に参照することがある。しかし、その断面位置は 1km あるいは 2km 間隔と間隔が広い場合、必要とする地点から距離が離れている場合が多い。実用的には、その地層断面を参考にして、新たな地層断面図を作成して対応している。

建設工事で不可欠な地盤調査ボーリング情報は、国土交通省「KUNIJIBAN」や各地方公共団体が保有する地盤情報データベースなどで公開が進んでいる。その結果、利用できるデータ形式、データ数や利用環境の整備が推進されている。対象工事範囲内で行う地盤調査を中心に、周辺地盤情報も加味することで、より信頼性の高い三次元的な地盤構造モデルを構築し、工事に反映することで

地盤リスクの低減に寄与することが期待されている。

三次元の地盤構造モデルは、Fig. 1に示すような杭の支持層不陸等の地盤リスク低減や回避のための適用が代表的な活用対象の1つである。推定された三次元の地盤構造は、任意の地点の地層構成の不陸を具体化するため、非常に有用である。しかし、推定された三次元地盤構造は、理論的推定根拠はあるものの、あくまで既知のデータに基づく補間である。推定根拠が併せ持つ特徴について、

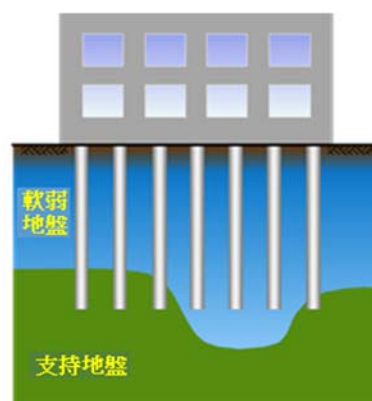


Fig. 1 杭の支持地盤の不陸
Irregularity of Support Stratum for Piles

日本建設情報センター(JACIC)で議論が進められている社会基盤情報標準化委員会(地盤データ品質標準化小委員会等)では、推定手法が議論されている。加えて、推定に用いるボーリング調査データの品質や推定結果に含まれるばらつきの認識などの議論も進められている。すなわち、推定結果の特性を十分に把握しながら利用することが重要視されている。

本報告では、まず、2章で三次元地盤モデルの活用事例を示し、その有用性を説明する。一方で、地盤情報不足によって発生する地盤リスクを具体的に示すことで、三次元地層推定手法の課題を述べる。次に3章で三次元地層推定手法の原理と含まれるリスクを示す。その後、それらのリスクの回避や低減に有効である技術を4章で紹介する。最後の5章では、三次元地盤モデルを活用する上で必要な、総合的な検討フローを提案する。

2. 三次元地盤モデルの活用事例と課題

地盤リスクを低減するためには、地盤構造を適切に把握し、設計および施工に反映する必要がある。近年、設計および施工におけるリスクの事前把握を目的とした、三次元地層推定技術の利用が進められている。また、可視化された地盤構造を関係者間で共有することにより、施工の合理化および生産性の向上の効果も期待されている。一方で三次元地層推定技術を用いると、少ない情報

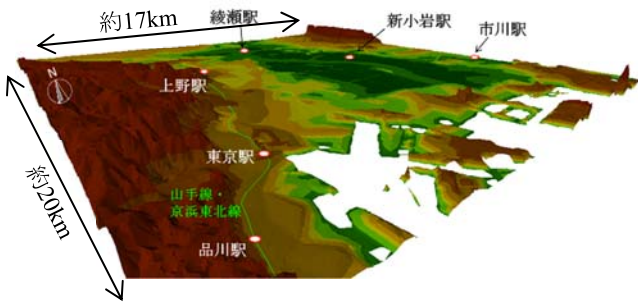
からでも、その精度に関わらず、直感的で判りやすい図を生成できることから、調査不足などのリスクが見えにくくなる可能性も指摘されている。本章では初めに、近年の三次元地層推定技術の動向として、同技術を広域な地盤構造の把握に用いた事例、ならびに、設計および施工におけるリスク低減や生産性の向上に用いた事例を紹介する。続いて、三次元地層推定技術ではリスクが見えにくい場合の例として、ボーリング調査の不足により局所的な不陸である埋没谷が見落とされた事例を示す。

2.1 三次元地盤モデルの活用事例

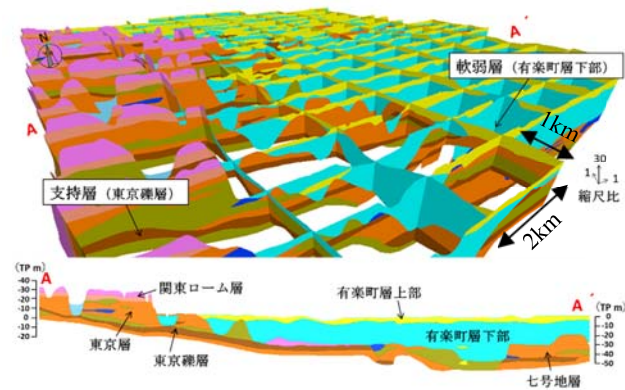
Fig. 2 (a)は、広域な地層推定を行った範囲である。この範囲において、1km×2km グリッドについて自治体等の公開情報¹⁾を加え、東京23区の地盤構造を推定したモデルがFig. 2 (b)である。Fig. 3は、このモデルを活用して、広域に地震動評価を行うための解析メッシュを作成した事例である。

Fig. 4に、埋立て地に建設された建物において、既製杭の長さを決定するために三次元地盤モデルを用いた事例を示す。Fig. 4に示すように、支持層面と必要な杭の配置をCAD上で重ね、全ての杭が所定の根入れ長を満たすように設計した。また、三次元地盤モデルは施工時にも活用し、支持層到達確認の指標とした。

Fig. 5には、三次元地盤モデルの情報をBIM/CIMに取り込んだ事例を示す。近年、ICT技術活用が促進されており、



(a) 地層推定範囲²⁾を加工して作成



(b) 東京23区の三次元地層推定結果

Fig. 2 広域な三次元地盤モデル
3D Underground Structure Model of Wide Area

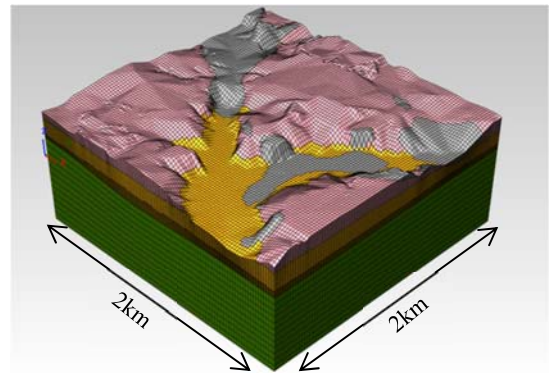


Fig. 3 広域な地震動解析モデルの事例
Analysis Model of Wide Area

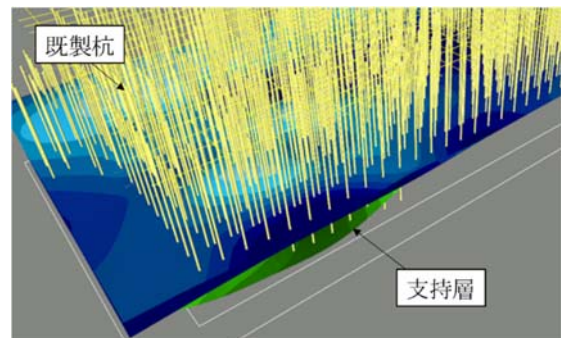
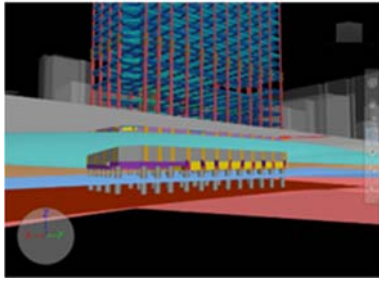
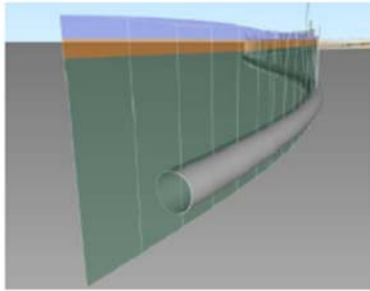


Fig. 4 既製杭の設計・施工に三次元地層推定を用いた事例
3D Underground Structure for Designing and Constructing
PCa Piles



(a) 建築BIMモデルへの適用事例



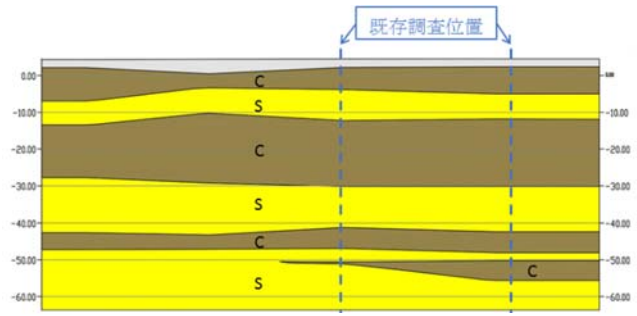
(b) 土木CIMモデルへの適用事例⁴⁾

Fig. 5 BIM/CIMと連携した事例
3D Underground Structure with BIM/CIM

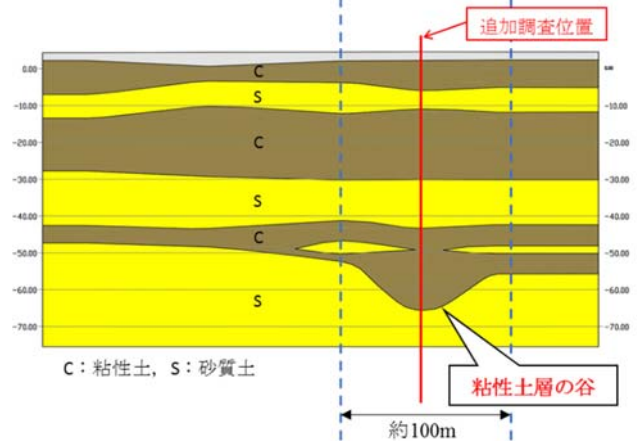
三次元地盤モデルと連携を図っている。Fig. 5(a)は、建築の新築工事に、Fig. 5(b)はトンネルの地下工事に、三次元地盤モデルを取り込んだ事例⁴⁾である。BIM/CIMとの連携は今後ますます活発化することが予想される。

2.2 追加調査によって埋没谷の存在が判明した事例

前節で述べた通り、三次元地層推定技術を用いることで、工事における設計・施工を補助する強力なツールとなり得る。その一方で、補間情報でなめらかに地盤構造を可視化することは、重要な情報を見逃す可能性があるということに言及する必要がある。三次元地層推定技術は、ボーリング情報から地層面を滑らかに生成するため、埋没谷や断層等の地層構造の急変を見落とす可能性もあり得る。Fig. 6は追加ボーリング調査によって埋没谷の存在が判明した事例の地層断面図である。Fig. 6(a)が既存のボーリング調査結果から推定した地層構成であり、比較的成層に堆積した地盤のように見える。しかし、敷地面積が大きく、ボーリング調査間隔が100m以上離れている場所が存在したため、追加ボーリング調査が行われた。すると、Fig. 6(b)に示すような粘性土層が窪地形状の地層構成となっていることが判明した。自明のことであるが、ボーリング調査結果に表れない情報を三次元地層推定によって予測することは不可能である。三次元地盤モデルは、地盤構造を分かり易く可視化できる反面、信頼性の程度が判断できなくなることが懸念される。地盤に関する設計・施工上で工学的判断を下すのに必要十分な情報となり得るか否かが、三次元地層推定技術における課題と言える。



(a) 当初調査結果から推定した地層構成



(b) 追加調査結果を反映した地層構成

Fig. 6 埋没谷の存在が判明した事例
Instance of Buried Valley

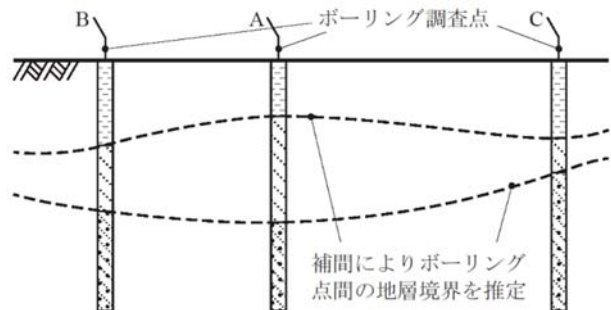


Fig. 7 地層推定の概念図⁵⁾
Conceptual Diagram of Stratum Distribution Estimation

3. 三次元地層推定に用いる手法と信頼性

三次元地層推定とは、調査点における地層境界の出現深度の情報に基づいて、未調査区間を補間し、連続した曲面を生成する技術である。3章ではその推定手法と信頼性について述べる。

3.1 代表的な地層推定手法

地層推定とは、Fig. 7に示すように、ボーリング調査によって得られた地層境界の出現深度を補間し、連続的な地層推定面を作成する手法である。

三次元的な地層推定に用いられる手法にはいくつかの

研究がある。代表的な手法をFig. 8に示す。領域全体に渡り、ボーリング調査点を頂点とする三角形パッチに分割する三角網補間法(Fig. 8(a))、ボーリング調査点を制御点とするNURBS(非一様有理Bスプライン)曲面を生成する手法(Fig. 8(b))、最適化手法を用いて曲率変化が最小となる曲面を生成するBS Horizon⁵⁾⁶⁾(Fig. 8(c))等が挙げられる。

特にBS Horizonは、地層境界の高さデータのみならず、走行傾斜や、地層層序など複数の制約条件を取り扱うことが可能で、地層推定問題を扱うソフトウェアでの採用事例が報告されている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

ここで、三次元地層推定で作成した地盤モデルの信頼性は、ボーリング調査の数に大きく依存する。日本建築学会はFig. 9に示すボーリング調査数の目安¹¹⁾を示している。一般的には建築面積が大きいほど、また地層の不陸が大きいほど、ボーリング調査数が必要であるとされている。Fig. 10は、採用するボーリング調査の数を変化させたときの三次元地層推定結果の比較である。地層推定法にはBS-Horizonを用いた。6本、18本、35本と調査数が増加するに伴い、小さな起伏も反映されていることが分かる。これは、ボーリング調査数や調査密度が明示されない場合、尤もらしい推定結果のみが先立ち、信頼性が無視される可能性を示唆している。

3.2 クリギング法

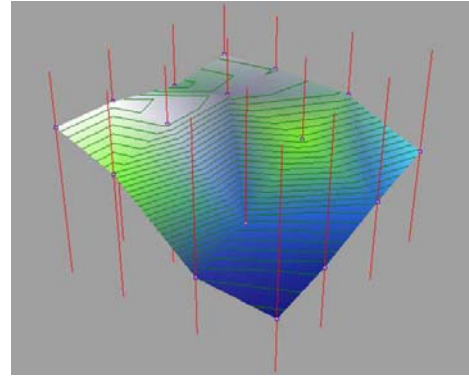
前節で述べたように、地層推定に採用事例が多い空間補間法には、地層構成をモデル化するのに適している面が多い一方で、信頼性を評価することはできない。

そこで、地層推定の信頼性を定量的に把握できる方法として、統計的な地層推定手法であるクリギング法が研究されている¹²⁾¹³⁾。

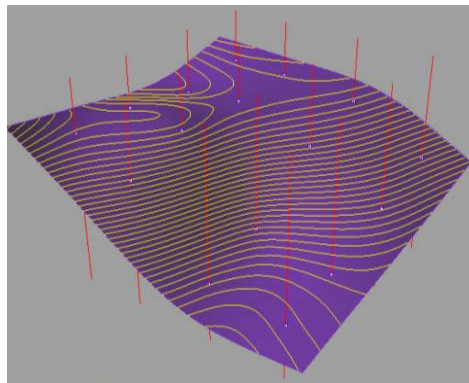
Fig. 11にクリギング法の概念図を示す。地点Aの地層境界の標高が z_A と判っており、地点Bの地層境界が未知であるとき、2地点の距離 r が十分小さければ、地点Bの地層境界も z_A の近傍に見つかる可能性が高い。クリギング法は、距離 r が近い2つの地点では、地層境界の出現深度に相関があることを利用する。

まず、既知のボーリング調査点の情報から、離間距離と共分散(相関)の関係を定量化することで、未調査の点における地層境界の標高を予測する。クリギング法による地層推定では、Fig. 11に示すように、地層境界の存在確率を表す確率分布が得られる。地層境界の存在確率は、標準偏差 σ によりその確からしさを評価できる。すなわち、標準偏差 σ が大きいほど、存在確率が広く分布しており、予測の信頼性は低くなる。

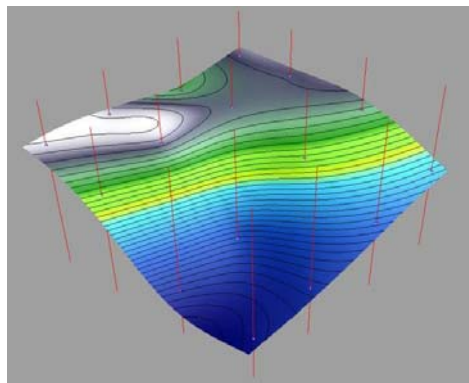
Fig. 12に、Fig. 10(a)と同様のモデルについてクリギング法を用いて推定した場合の、標準偏差 σ の分布を示す。ボーリング調査位置に近いほど標準偏差 σ は小さく、調査間隔が広く開いているほど標準偏差 σ の値が大きいことが分かる。すなわち、標準偏差 σ が大きい範囲に、追加調査位置を設定すると合理的であることが定量的に示されている。



(a) 三角網補間



(b) NURBS



(c) BS-Horizon

Fig. 8 三次元的な地層推定に用いられる手法⁷⁾
3D Stratum Distribution Estimation Methods

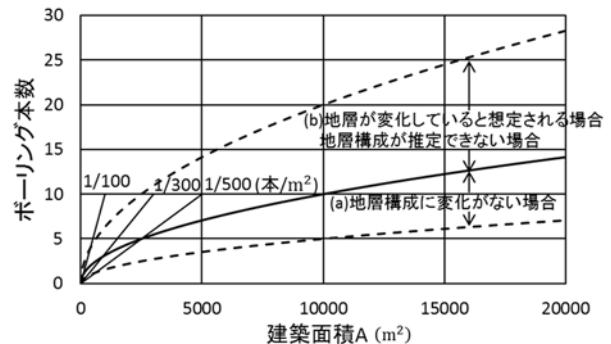


Fig. 9 ボーリング調査数の目安¹¹⁾
Recommendations for the Number of Boring Investigation

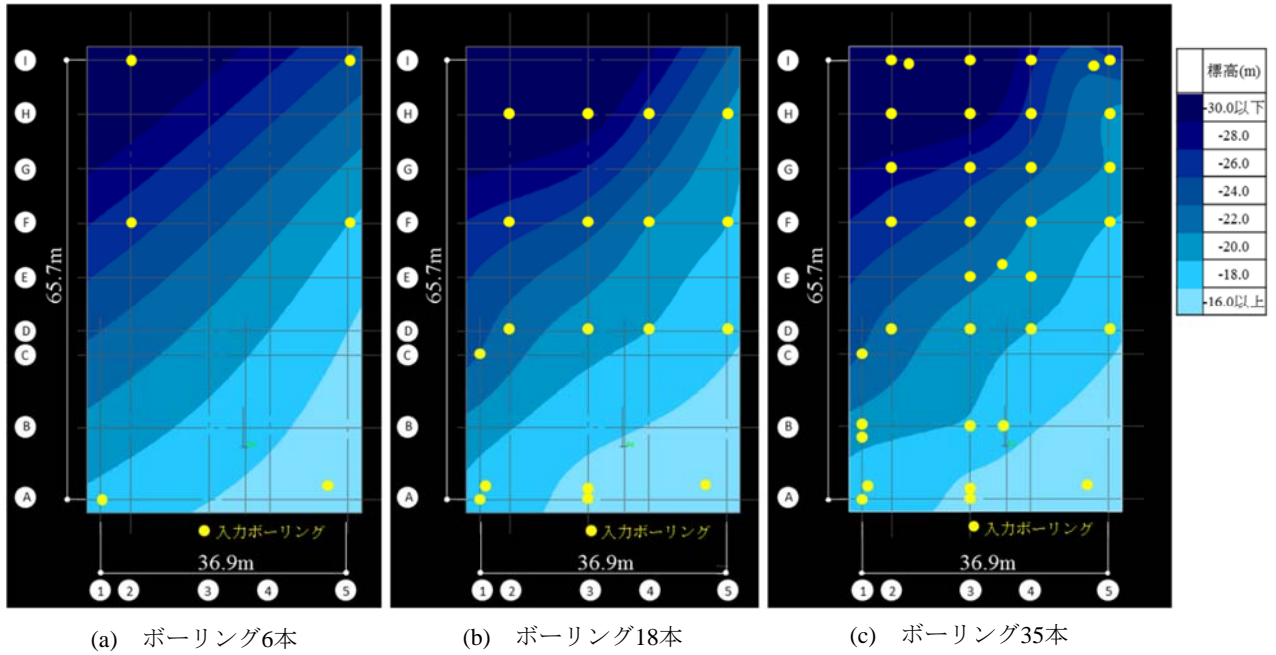


Fig. 10 ボーリング調査数に応じた地層深度コンター
Stratum Contour According to the Number of Boring

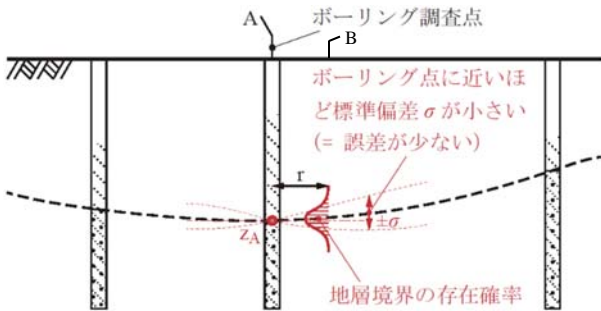


Fig. 11 クリギング法の概念図¹³⁾
Conceptual Diagram of Kriging

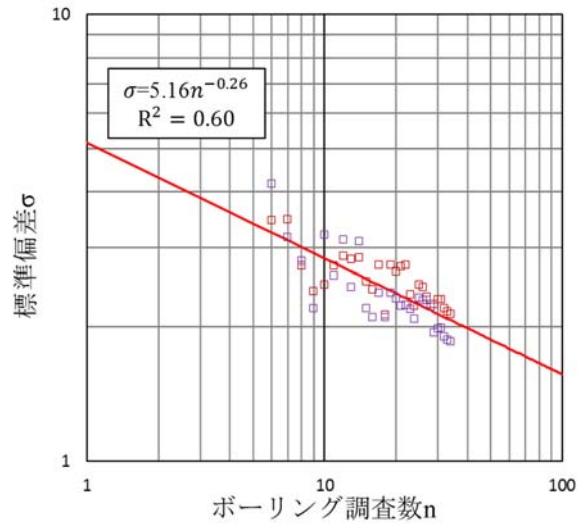


Fig. 13 ボーリング調査数と標準偏差の関係
Relationship between the Number of Boring and
Estimated Standard Deviation

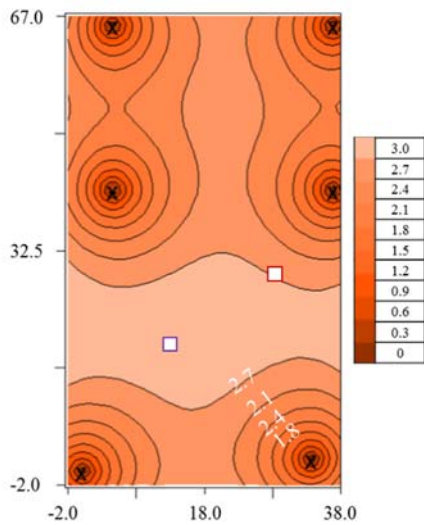


Fig. 12 クリギング法における標準偏差コンター
Estimated Standard Deviation Contour of Kriging

3.3 信頼性の評価

BS-Horizonやクリギング法を用いて、地盤の地層構成を推定することは可能であるが、地層推定とはあくまでも補間であり、2章で述べたように調査点に現れない大きな不陸を探知することのできる手法ではない。Fig. 13には、Fig. 12に示した標準偏差評価点における標準偏差 σ とボーリング調査数の関係を示す。推定に採用するボーリング調査数を増加させた場合、予測の確からしさを示す標準偏差 σ は小さくなる。これはすなわち、推定の信頼性がボーリング調査数に依存すると言える。

以上のことから、どの手法を用いて地層構造を三次元

的に推定する場合においても、その推定結果の信頼性はボーリング調査数に依存し、十分な調査数・調査密度が重要であることが分かる。

4. 微動探査技術

3章で述べた通り、三次元地層推定の精度を向上させるためには、ボーリング調査を高密度に行うことが不可欠である。一般に、地盤調査は建設プロジェクトの初期段階での基本設計のために一度にまとめて行うことが多い。しかし、一度にまとめて行った場合、支持層に不陸があると、正確に支持層を確認することは困難である。その課題に対応するためには、支持層の変化に応じて柔軟に対応が取れるように多段階の地盤調査が有効であるとされている¹⁴⁾。本章では、多段階地盤調査における簡易な1次調査手法として活用が可能な微動探査により、基盤深さを推定した事例を示す。

微動とは、車両交通などの人間活動や、海洋波浪などの自然現象によって常に発生している、人間には感じるような小さな振動のことである¹⁵⁾。特に、地表面における微動の水平成分のスペクトルを上下成分のスペクトルで除したものをH/Vスペクトルと呼び、スペクトル分布から地盤の構造を推定できることが知られている。H/Vスペクトルの周期特性を利用して、平行成層な地盤を対象とした地盤構造推定が数多く行われている^{例えば16)17)}。近年では、平行成層な地盤構造だけでなく、埋没谷状などの不規則な地盤構造推定にも用いられ、誤

差はあるものの有効性が認められている¹⁴⁾¹⁸⁾。

4.1 測定方法と解析の概要

微動の測定にはPhoto 1に示すような加速度計を用い、1点あたり30分程度の測定時間とし、移動を繰り返し多点の測定を行う(Photo 2)。測定間隔は、杭配置に従いおおむね20mとした。なお、既存の地盤調査位置での測定も行うことで信頼性を確認する。

解析の振動数範囲は、0.1Hz~10Hzとする。解析は、まず、各観測点で観測波形について加速度振幅の2乗平均値の小さい順に20区間を選定する。この際、1区間の長さは40.96秒とする。選定した区間の波形データに対して、ゼロ線補正などを行ったうえで周波数分析を実施しH/Vスペクトルを求める¹⁸⁾。

支持層の深さの推定は、各観測点において求めたH/Vスペクトルの卓越振動数と、以下に示す4分の1波長則とを用いて行う。

$$H = \frac{Vs}{4f} \quad (1)$$

$H(m)$: 支持層深さ(表層地盤の層厚)

$Vs(m/s)$: 表層地盤のせん断波速度

$f(Hz)$: 卓越振動数

まず、支持層深さが既知のボーリングにおいて(1)式を適用し Vs を求める。次に、その Vs と(1)式とを用いて各観測点の支持層深さを求める。

4.2 推定結果と杭施工時の支持層深さとの比較

前節の手順により、敷地全体における基盤深さを求め

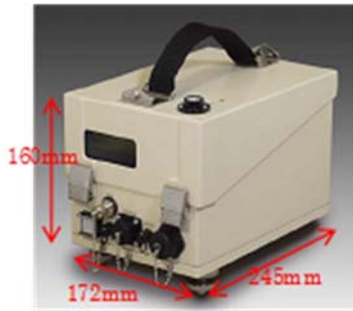


Photo 1 使用した機器
Instruments of Microtremor

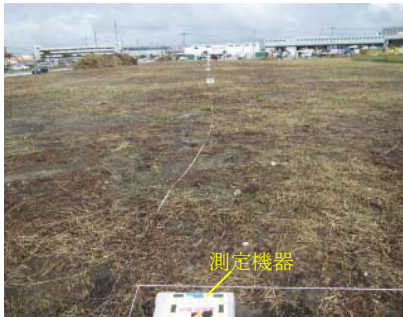
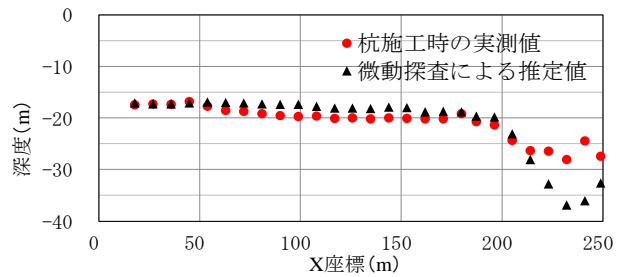
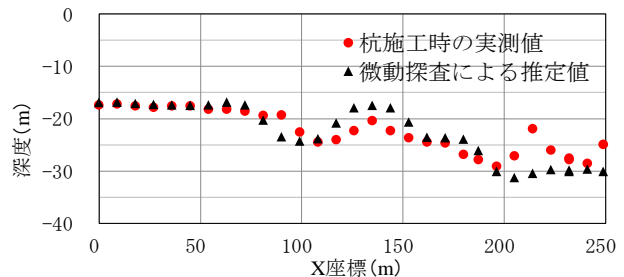


Photo 2 測定状況
Situation of the Measurement



(a) 測線1



(b) 測線2

Fig. 14 支持層深度の微動による推定値と杭施工時の実測値との比較

Comparison of Engineering Bedrock Depth between Estimation via Microtremor Measurement and Result of the Construction

た。各観測点で求めた支持層深さと実際の杭施工時の支持層深さとを比較したものをFig. 14に示す。Fig. 14(a)の測線1ではX=230m付近で推定値と実支持層と10m程度異なっている。また、Fig. 14(b)の測線2でも、X=215m付近の局所的に浅くなっている支持層をとらえられていない。しかし、図示した2断面ともXが増加するとともに、深くなるという大まかな傾向はとらえられている。

以上のように、微動を用いた支持層深さ推定は誤差があるものの、ボーリングの適正配置などに利用する1次調査としては有効であると考えられる。ただし、微動のH/Vスペクトルは直下の地盤構造のみで決まらない場合があり、適用する場合には注意が必要である¹⁴⁾。

5. 地盤リスク低減のための検討フロー

前章までに述べた通り、三次元地層推定を用いて地盤構造を可視化する技術は、重要な役割を担う一方で、その信頼性を常に確認して用いる必要がある。そこで、地盤構造を可視化する技術を用いる上で、Fig.15に示すフローを提案する。最初に既存のボーリング調査の結果から三次元地層推定を行うが、即座に地盤構造モデルを確定せず、追加ボーリング調査の必要性を検討する。すなわち、地層の不陸の有無を微動探査技術によって確認することや、既存ボーリング調査間隔が大きく開いている場所はクリギング法の標準偏差が大きいところを指標として確認することによって、三次元地盤モデルの信頼性を検討する工程を取り入れることを重要視している。ボーリング調査の適切な位置や調査密度を明示する手法は未だ存在しないが、クリギング法により信頼性が低い(標準偏差が大きい)場所を調査対象としたり、微動探査技術によって地層に不陸があると判断される場所を追加調査したりすることは可能である。これらの技術を併用し、追加のボーリング調査を適切に行うことによって、より信頼性を向上させた三次元地盤モデルを設計・施工に適用することが望ましい。

6. まとめ

本報告では、三次元地層推定手法を用いた可視化技術を建設工事における設計や施工に活用することが、地盤リスクを伴う建設工事において、有効な手段となり得ることを紹介した。地盤構造を可視化することで、従来の方法では見落とされる可能性のあったリスクを回避し得るため、その価値は大きい。一方で、三次元地盤モデルの信頼性は常に確認することが肝要であることを埋没谷の事例を基に示した。また、推定手法の特徴や既往の研究から、推定結果の信頼性向上には、ボーリング調査の追加が不可欠であり、調査間隔が広い場所においては、追加ボーリング調査の検討の重要性を示した。クリギング法を用いて信頼性が低いと判断される場合には、追加ボーリングを行い、地層を再推定することが望ましい。

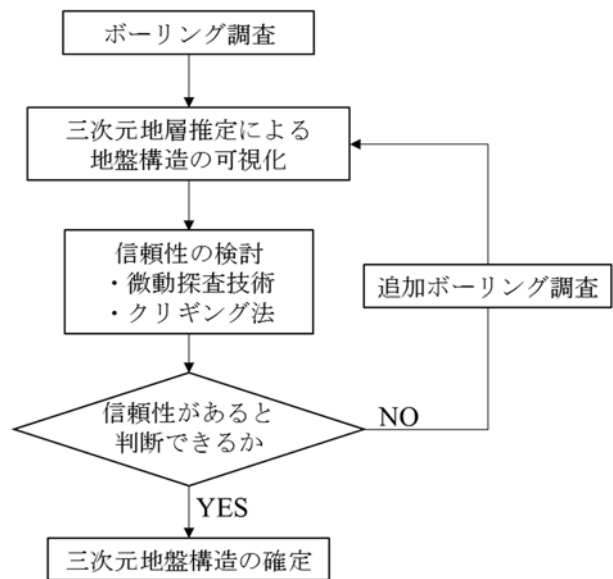


Fig. 15 三次元地層推定を取り入れた検討フロー
The Comprehensive Examination Procedure using 3D
Stratum Distribution Estimation

ボーリング調査を行う場所の選定については、微動探査技術を併用することが有効である。これらの技術を組み合わせることで、追加ボーリング調査を行うことで、より信頼性の高い三次元地盤モデルを得られると考える。

参考文献

- 1) 東京都土木技術研究所編著：東京都総合地盤図 I，技法堂，1977
- 2) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報数値標高モデル，<https://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 3) 東京地盤調査研究会編著：東京地盤図，技法堂，1959
- 4) 日本建設業連合会：施工CIM 事例集，2015.5
- 5) 塩野清治，能美洋介，升本眞二，坂本正徳：Horizon2000: 等式・不等式制約条件や傾斜データを活用した地層面推定プログラムの改良. 情報地質, Vol. 12, No. 4, pp. 229-249, 2001
- 6) 野々垣進，升本眞二，塩野清治：3次B-スプラインを用いた地層境界面の推定. 情報地質, Vol. 19, No. 2, pp. 61-77, 2008
- 7) 3次元地質解析技術コンソーシアム：3次元地質解析マニュアル Ver1.5, 2019.3
- 8) 山根裕之，榊原辰雄：三次元地質解析システム「GEORAMA ver. 3.0」. 第3回日本情報地質学会講演会講演予稿集, pp. 57-58, 1992
- 9) 豊田守，西開地一志：Geomap3Dのシステム紹介. 情報地質, Vol. 16, No. 2, pp. 146-147, 2005
- 10) 米澤剛，升本眞二，根本達也，坂本正徳，塩野清治：拡張地質関数を用いた地層境界線の表示. 情報地質,

Vol. 15, No. 4, pp. 193-206, 2004

- 11) 日本建築学会：建築基礎設計のための地盤調査計画指針，第3版．2009
- 12) 田口智也，金子治，福田健：支持層に不陸がある地盤における支持層推定に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 595-596，2017
- 13) 児島理士，渡辺和博，佐原守：杭の支持層深度の推定誤差とボーリング本数の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 489-490，2018
- 14) 日本建築学会：建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A，日本建築学会，pp.24-25，35-41，2015.11
- 15) 新井洋：地盤における微動H/Vスペクトルの利用法，微動の利用技術，日本地震工学会微動利用技術研究委員会，pp.1-34，2011.12
- 16) 新井洋：微動の分散特性とH/Vスペクトルの逆解析によるS波速度構造の推定，第10回日本地震工学シンポジウム，Vol.1，pp.613-618，1998
- 17) 若松邦夫，安井謙：短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第471号，pp.61-70，1995.5
- 18) 萩原由訓，他：単点常時微動観測を用いた基盤深さ推定に関する研究，大林組技術研究所報，No.79，2015.12