

微動チェーンアレー探査による支持地盤の推定

An Estimation for the Depth of Bearing Stratum by the Microtremor Chain Array Method

五十嵐治人*¹ 伊藤 仁*²

概 要

近年、既製杭の支持地盤未達による建物の沈下、傾斜が問題となっている。これは、事前のボーリング調査などによる地盤の調査が不十分なために起こることであるが、支持地盤に起伏がある場合、これを十分把握できるように地盤調査を実施することは非常に困難である。

ボーリング調査などは、その結果の信頼性が高いが調査した1点のみの情報しか得られず、これを複数箇所行うことである程度の連続性を持たせて対応することが多い。しかし、ボーリング調査は費用も高額となり、またどの程度の間隔で実施すれば問題なく支持地盤深度を推定できるかを判定することも難しい。

そこで、地表面の人為的なものによらない自然の振動から支持地盤を推定する手法として微動アレー、微動チェーンアレー探査に着目し、これを実施した。更にその後、実際に建設する建物の全杭位置において先行掘削を実施し、その結果との比較を行った。本報はその結果を報告し、今後の課題について述べる。

key words : 微動アレー探査、せん断波速度、表面波、位相速度

1. はじめに

本報は、地盤地表面で生じている自然振動(人為的な加振を行わない)の測定のみで、その地盤の地下構造、ひいては支持地盤の深度分布を推定し、効果的にボーリング試験等の位置を選定できる技術として微動アレー探査、微動チェーンアレー探査(以下、本探査)を実施した結果を報告する。また、これとボーリング試験、およびオートマチックラムサウンディング試験(以下、総称してサウンディング試験)、更に杭位置における先行掘削を実施し、これらの支持地盤深度の評価結果を比較して、本探査の精度の傾向、有用性についての考察も示す。

近年、支持杭の支持地盤未達により建物が沈下、傾斜、ひいては外壁等にひび割れが発生する事例が見られた。これは当初、サウンディング試験などで想定した支持地盤の深度を実際よりも浅い位置に評価し、杭先端が支持地盤に到達していないために沈下したことが考えられる。結論としてサウンディング試験本数が不足していたことが原因となるが、実際にどの程度の本数のサウンディング試験を実施すれば適切に支持地盤深度を評価できるかを定量的に評価することは難しく、安全側に本数を増やすことで対応せざるを得ない。これに対し本探査は造成地等調査すべき範囲が広く、支持地盤に起伏のあることが予想される場合において、その傾向を掴み、サウンディング試験結果を補完することが期待できる。

2. 各種試験概要

2.1 敷地概要

図-1 に探査地の平面図を示す。探査地周辺は、旧地形では丘陵地内を河川が流れ、複雑に入り組んだ地形であった。現在では土地開発により大きく改変され、敷地の大半は盛土であるが、一部において切土となっており、表層から基盤岩が露出している部分もある。

図-1 にサウンディング試験を実施した箇所を示す。また、本探査を実施した箇所も併せて示す。サウンディング試験は、表記された以外にも実施しているが、ここでは本探査を実施した箇所に対応する箇所のみを示した。微動アレー探査は測点1~6の6箇所、微動チェーンアレー探査はA-A'、B-B'、C-C'の3測線、延べ340mに渡ってそれぞれ実施した。探査実施中は天候にも恵まれ、現場では準備工事程度で目立った人為的な振動は殆ど生じなかった。

表-1 に敷地の高さ分布を示す。これは設計で想定したGL±0m面からの高さを示した。番号は図-1中のボーリング試験番号に対応する。これを見ると、概ね平坦に造成されていることが分かる。参考に、敷地の現況を写真-1、本探査に用いた微動計、記録計を写真-2に示す。本探査は人為的な加振を行わないため、ある程度の雑草の除去が必要で、雨天での実行が困難などの制約もあるが、簡便な機器、装置で安価に実施できる特長がある。

*1 Haruhito IGARASHI 技術本部技術研究所 主席研究員

*2 Hitoshi ITO

技術本部技術研究所 研究員

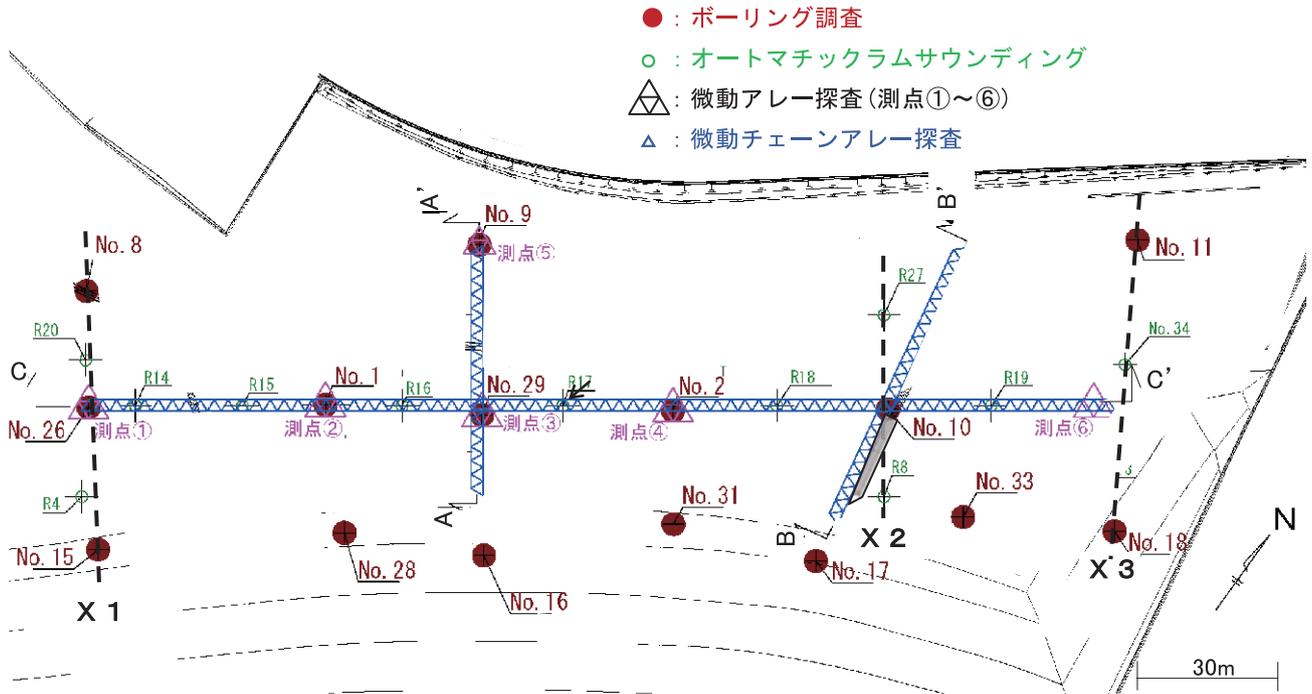


図-1 探査地平面図、試験位置概要

2.2 地盤概要(サウンディング試験結果)

図-2 に代表的な地点のボーリング試験結果を示す。深度は当該位置の地表面を GL±0m とした値を示す。全面的に盛土されており、その深さは位置によって異なる。一部風化泥岩が見られ、その下部は支持地盤となる地層である。

図-3 に各直線上のボーリング試験結果によるN値、およびオートマチックラムサウンディング試験結果による補正打撃回数N d 値の柱状図を示す。これは、図-1 中のX 1、X 2、X 3、A-A'、C-C' 線上でサウンディング試験を実施した結果を並べたものである。ここでは、地表面がほぼ同じ高さとなるように、深度方向にずらして示した。No. ○の表記がボーリング試験結果、R ○の表記がオートマチックラムサウンディング試験結果を示す。なお、ボーリングNo. 26、No. 29に関しては、支持地盤深度の確認を主な目的としたため、盛土下部(旧地盤高+3m 付近)までの層を素掘りとし、それ以深でボーリング調査を実施した。このため、素掘りした部分は、N 値を計測していない。

これらより、地盤の支持地盤深度の傾向について以下のことが言える。

- a) 支持地盤は、南北方向に大きな傾斜が見られた。50m 程度の間で6m 以上の高低差があった。
- b) また、東西方向も大きな起伏が見られた。220m 程度の間で10m 以上の高低差があった。
- c) 敷地の北側は、支持地盤が露出している部分がある。また、法面となっているNo. 16 よりもNo. 29 の方が支持地盤は深いなど、留意すべきと考えられる。

表-1 ボーリング位置の地表面高さ

No.	高さ(m)	No.	高さ(m)	No.	高さ(m)
1	1.19	11	-0.16	26	0.98
2	1.44	15	-1.43	28	-3.45
8	0.21	16	-3.60	29	1.44
9	1.47	17	-2.95	31	0.06
10	0.61	18	-3.77	33	0.41

※設計 GL からの高さを示す。



写真-1 敷地現況



(左)微動計 (右)記録計

写真-2 観測機器

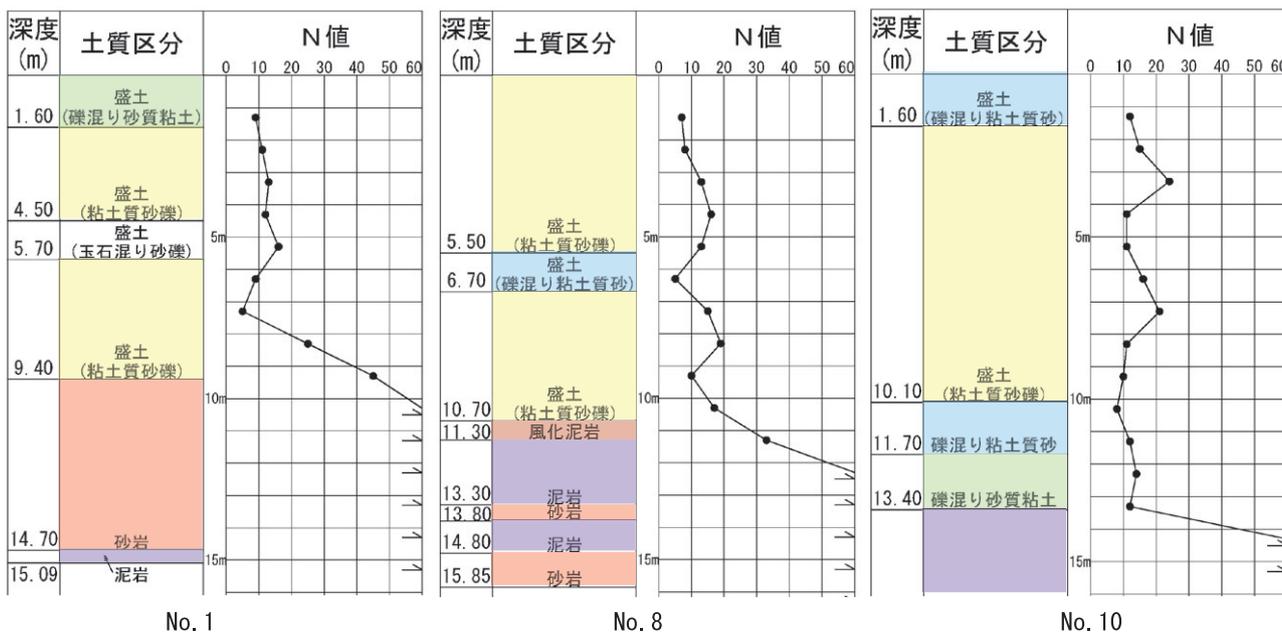


図-2 ボーリング柱状図

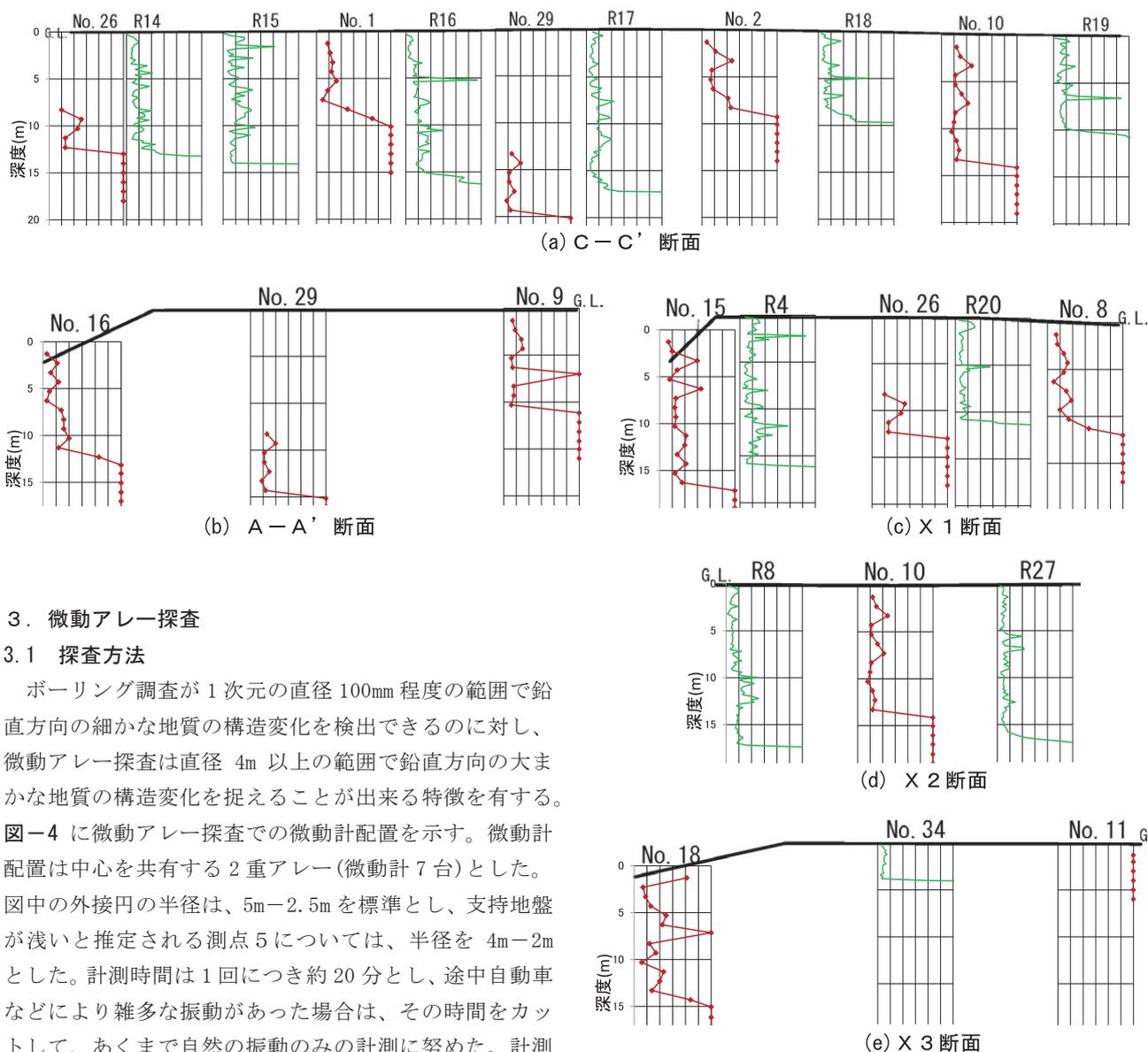


図-3 N値および補正打撃回数Nd値

3. 微動アレー探査

3.1 探査方法

ボーリング調査が1次元の直径100mm程度の範囲で鉛直方向の細かな地質の構造変化を検出できるのに対し、微動アレー探査は直径4m以上の範囲で鉛直方向の大まかな地質の構造変化を捉えることが出来る特徴を有する。図-4に微動アレー探査での微動計配置を示す。微動計配置は中心を共有する2重アレー(微動計7台)とした。図中の外接円の半径は、5m-2.5mを標準とし、支持地盤が浅いと推定される測点5については、半径を4m-2mとした。計測時間は1回につき約20分とし、途中自動車などにより雑多な振動があった場合は、その時間をカットして、あくまで自然の振動のみの計測に努めた。計測の状況を写真-3に示す。

- 得られた波形は、以下の手順に基づき処理を行った。
- 空間自己相関法 (SPAC 法) を用い、アレー中心点と各円周各点間の波形相関性を複素コヒーレンス関数 (実部) で表現する (式 1)。
 - 得られた結果を全周平均、空間自己相関係数 $\rho(f)$ を求める (式 2)。
 - 式 2) にて得られた値が、理論的に位相速度を変数に含む第 1 種 0 次ベッセル関数と等しくなることより、その逆関数から位相速度を算出する (式 3)。これにより、周波数-位相速度関係 (分散曲線) を求める。
 - 得られた分散曲線はレイリー波基本モードとし、アレー直下の地下構造を多層半無限水平成層構造としてこれに適合する S 波速度構造モデルを逆解析により決定する。ここでは、遺伝的アルゴリズムによる地下構造推定法を用いた。

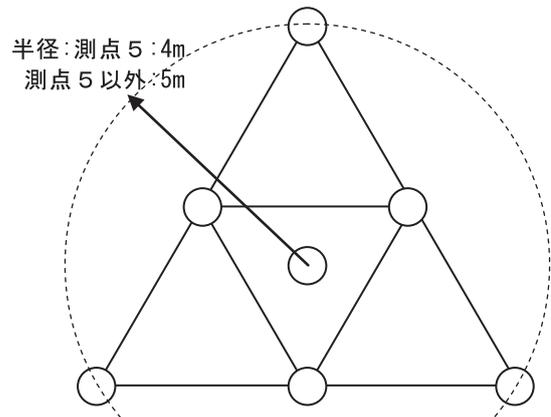


図-4 微動アレー探査 微動計配置状況

$$\gamma_{xy}(f, \theta; r) = \frac{\text{Re}[S_{xy}(f, \theta; r)]}{\sqrt{S_x(f) \cdot S_y(f, \theta; r)}} \dots\dots\dots 1)$$

$$\rho(f) = \int_0^{2\pi} \gamma_{xy}(f, \theta; r) d\theta \dots\dots\dots 2)$$

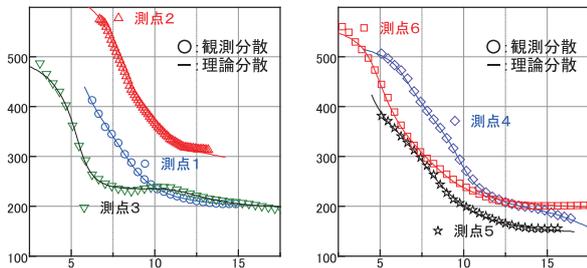
$$\rho(f) = J_0\left(\frac{2\pi fr}{c(f)}\right) \Rightarrow c(f) = \frac{2\pi fr}{J_0^{-1}(\rho(f))} \dots\dots\dots 3)$$

ここで、
 $\rho(f)$: 自己相関関数 $c(f)$: 位相速度 r : 半径
 $J_0(\)$: 第 1 種 0 次ベッセル関数 f : 周波数

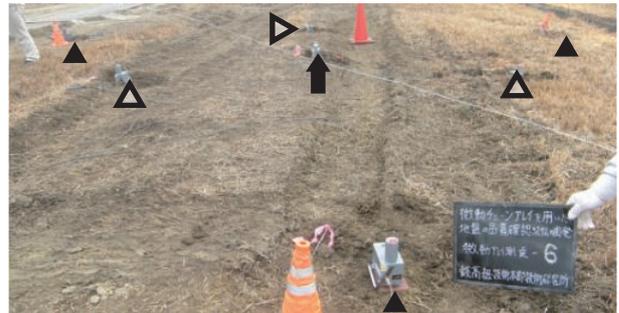
3.2 探査結果

図-5 に、周波数-位相速度関係の理論分散、観測分散曲線を併せて示す。(a)に測点 1、2、3、(b)に測点 4、5、6 の結果を示す。

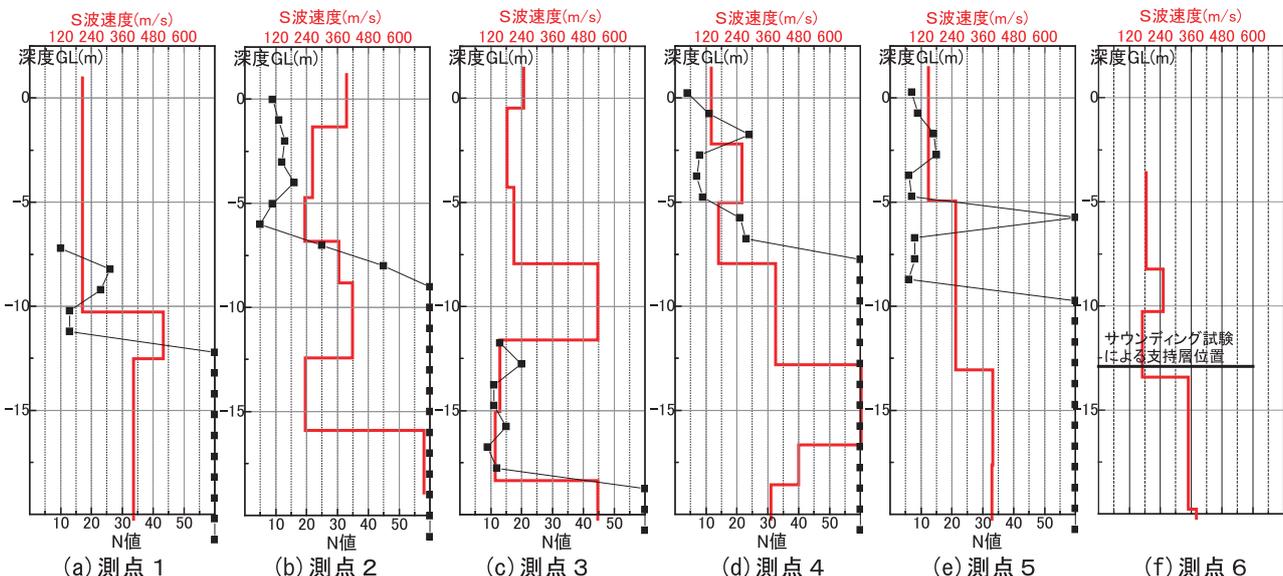
これに基づき、逆解析により求めた各測点における深度方向の S 波速度、N 値、Nd 値分布比較図を図-6 に示す。



(a) 測点 1、2、3 (b) 測点 4、5、6
 図-5 分散曲線



(↑: 中心、▲: 外側、△: 内側)
 写真-3 微動アレー探査実施状況



(a) 測点 1 (b) 測点 2 (c) 測点 3 (d) 測点 4 (e) 測点 5 (f) 測点 6
 図-6 S 波速度、N 値、Nd 値分布比較

各測点近傍におけるサウンディング試験結果を重ねて示す。ここでは設計上の地盤面をGL±0mとして表記した。これらによると以下のことが言える。

- a) 観測分散曲線は、概ね低周波数の領域で位相速度が大きくなる傾向が見られた。
- b) 測点1は、N値50となる深度の直上で、S波速度がその下部よりも大きくなる現象が見られた。
- c) 測点5は、GL-6m付近に玉砂利の層が見られた。S波速度300(m/s)となる深度は、N値50となる深度よりも約4m下側であった。
- d) その他の測点は、S波速度300m/sとなる深度とサウンディング試験でN値50となる深度は良い対応を示した。

4. 微動チェーンアレー探査

4.1 探査方法

図-7に微動チェーンアレー探査における微動計配置を示す。1回の測定で微動計8台を正三角形が6個並ぶように配置した。三角形の1辺の距離は、想定される支持地盤深さを考慮し3mとした。またn回目探査の最後方の微動計2個(図-7中の実線⑦、⑧)と(n+1)回目の最前方の微動計2個(図-7中の破線①、②)が同じ位置となるように配置し、データの連続性を持たせた。

計測時間は、1回につき約15分とした。ここでも、自然の振動を得るよう、自動車等による振動があった場合は、その時間帯の結果をカットしてデータ収集した。これを、図-1中のA-A'、B-B'、C-C'測線に沿って実施した。なお、A-A'、B-B'測線の延長上に、ボーリング試験No.16、No.17を実施した位置があるが、これらの付近は傾斜があり、微動チェーンアレー探査を実施できなかった。探査は表層がほぼ平坦である部分のみについて実施した。微動チェーンアレー探査の実施状況を写真-4に示す。

得られた波形は、微動アレー探査と同様、周波数一位相速度関係を算出し、ここでは周波数を波長に変換して深度方向の位相速度分布を求めた。

比較のために行った先行掘削による支持地盤深度の確認は、以下の点を参考にし、総合的に判断した。

- a) 掘削機の電流値
- b) 掘削機の振動
- c) 掘削機の抵抗度合い
- d) 採取された土

掘削機の電流値による支持地盤深度の確認は困難であった。写真-5に採取された土を示す。ここでは、掘削機の支持地盤到達は、掘削土の変化により確認することが最も有効であった。

4.2 探査結果

図-8に探査結果を示す。図中、コンターは位相速度の大きさを4段階に分けて示す。これにサウンディング試験結果によりN値、Nd値が50となった深度、微動アレー探査結果でS波速度が300m/sとなった深度、先行掘削により確認された支持地盤深度を重ねて示す。

図-8中、(a)A-A'、(b)B-B'測線は杭を打設する通りよりずれているため、直近の先行掘削した位置より補完して得られた深度を示す。これらによると以下のことが言える。

- a) 全体的に、微動チェーンアレー探査結果の位相速度深度分布は、他の試験結果による支持地盤深度の分布と同様の傾向を示した。しかし、位相速度の絶対値から支持地盤深度を推定することは難しく、微動アレー探査を並行して、局所的にS波速度を確認しながら進めることが有効と考えられる。

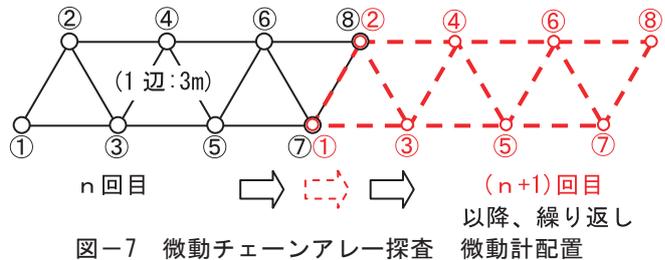


図-7 微動チェーンアレー探査 微動計配置



(▲:微動計)

写真-4 微動チェーンアレー探査実施状況



写真-5 掘削土

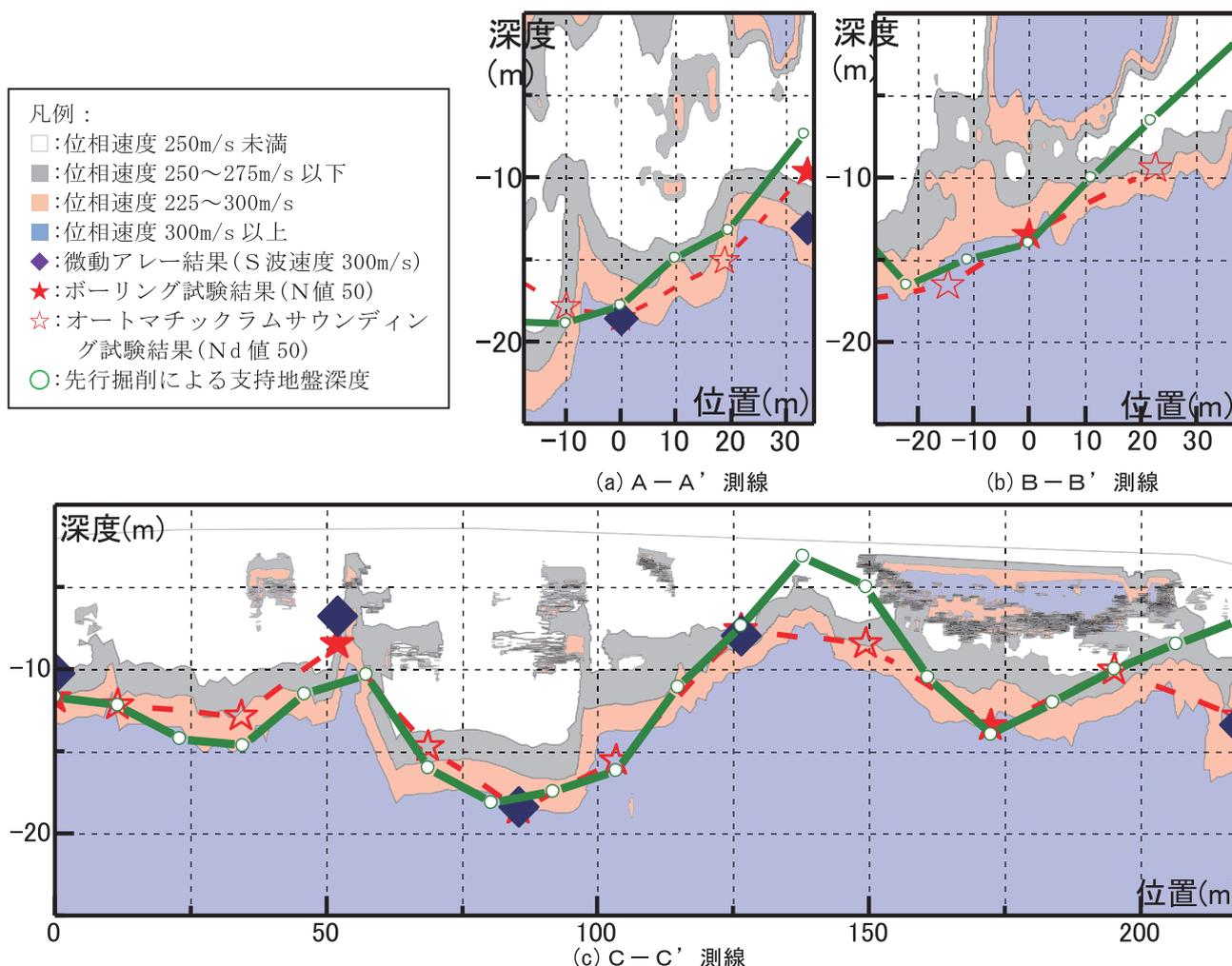


図-8 微動チェーンアレー探索結果 位相速度深度分布図

- b) A-A'測線では、各試験結果による支持地盤深度の傾向は、全体的には良好な対応を示した。しかし、水平位置 30m 付近(敷地北西側)では、本探索結果は先行掘削結果よりも 4m 程度深めに支持地盤深度を推定した。これは、それより上層の浅い位置に位相速度の高い層があることなどが起因していると考えられる。
- c) B-B'測線では、A-A'測線と同様、全体的に試験結果同士は良好な対応を示したが、敷地北西側(水平位置 20～30m)では先行掘削結果よりも深めに評価した。
- d) C-C'測線では、各試験結果同士は良好な対応を示した。敷地北東側(水平位置 200～220m)では、オートマッチングサウンドイング試験結果とは良い対応を示したが、先行掘削結果に対しては支持地盤深度を深めに評価した。

5. おわりに

支持地盤に起伏のある地盤について、微動アレー探索、微動チェーンアレー探索を実施し、支持地盤深度の推定を試みた。その結果、支持地盤の起伏の傾向を把握し、ボーリング試験、オートマッチングサウンドイング試験など、点の地盤情報を与える試験を実施する位置の特定には十分有用であると考えられる。ただし、支持地盤深度を他の試験結果とは大きく異なる評価をする部分があった。これらは、今後事例を増やして総合的に傾向を分析する必要があると考えられる。

【謝辞】

本探索実施、本報作成に関して、林久夫氏(ジオックスコンサルタント)には貴重なご助言、ご指導を賜りました。ここに、深甚なる謝意を表します。

【参考文献】

林他「微動アレー探索法の試み -チェーンアレー探索法の適用について-」
地盤工学会誌 2010/08 pp.10～13