

II-1 首都圏における表層地盤の地質工学的特性に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 17～平 17

担当部署：技術推進本部

研究担当者：稲崎 富士

【要旨】

表層地盤の地質工学的特性のうち、特に S 波速度、あるいは初期せん断剛性率に着目し、それと他の物性指標との間の関連性について検討した。検討にあたって、首都圏の沖積層地盤を対象に実施された高精度 S 波速度検層データと同一孔で実施された各種土質試験データを収集し、S 波速度値と比較した。また独自にも S 波速度検層を実施し、信頼度の高いデータの収集に努めた。

地震時に観測される局所的な地震動増幅や地盤破壊現象は、表層地盤の構成とその地質工学的特性に基本的に支配されている。特に表層地盤の S 波速度構造は最も主要な地盤物性の一つであり、それから増幅特性を直接的に計算することができ、また液状化などの地盤破壊のポテンシャルを評価することも可能である。しかし S 波速度構造の実測データは少なく、従来は N 値など他の物性指標から経験的な方法で推定されていたが、その方法は 30 年来再検討されてきていなかった。本研究では高精度の S 波速度測定データを収集し、従来の経験的推定法の適用限界を明らかにするとともに、他の物性指標との関連性についても再検討した。

本研究の結果、従来の N 値から表層地盤の S 波速度を推定する経験式は、N 値に不良データが多く含まれていることから相関性が低いことが確認された。一方、沖積層を堆積環境に基づいて層相区分し、その層相区分ごとに土質試験値と S 波速度データと比較したところ、よい相関が見出された。これに加え、高精度 Vs 値が各種土質試験データの品質管理、不良データの抽出にも有用であることが示された。

キーワード：首都圏、表層地盤、S 波速度、N 値、土質工学的特性

1. はじめに

首都圏の地震防災機能強化は、将来的に安全安心な国土を保持する上で最も重要な国家的課題の一つであるが、効果的な地震防災対策の遂行にはまず表層地盤の地質工学的特性とその局所的変動を適切に評価することが必要とされる。地震時の強震動特性や地盤破壊のポテンシャルを左右する主要な物性パラメータは S 波速度構造であり、逆に対象サイトの S 波速度構造が与えられれば、事前にそのサイトの地震危険度を評価することが可能となる。しかし表層地盤に対する S 波速度の実測例は多くなく、首都圏においてもどの程度の測定実績があるか不明であった。このため従来は他の物性指標と S 波速度との間の関連性を経験的に求め、間接的に S 波速度構造を推定する、という手法が採用されてきた。その一つの方法が、標準貫入試験で求められる N 値データを指標として使用する方法である。N 値は、ほぼ全孔において基本的に 1m 間隔で測定されており、ボーリングに伴う基本物性情報として扱われている。たとえば今井・殿内¹⁾は、全国から収集した約 1600

のデータから、層相（土質区分）、時代別に N 値と Vs の回帰式を提案している。一方太田・後藤²⁾は約 300 組のデータを数量化理論で解析し、S 波速度を N 値、時代、深度、および層相をパラメータとして説明する関係式を提案した。彼らの提案式は、30 年近くを経た今日でも設計に活用されている。ただしこの方法は、ボーリング地点の評価に適用が限定され、地域的なゾーニングには面的な補間が必要である。

これに対し松岡・翠川³⁾は、国土数値データとして整備されている地表地形分類を利用し、それとの経験的な関係から平均的な S 波速度構造（AVS30）を推定する、という方法を提案した。彼らの方法は、地域的な地震被害評価に広く採用されてきているが、元々地表地形分類と表層 S 波速度構造の間には地質学的な因果関係は存在せず、実際相関性は高くない。さらにこれらの経験的方法では、低品質の測定データを取捨選択しないで使用しているという重大な問題点を有している。彼らが使用した S 波速度データは、基本的にダウンホール法で測定されたもの

であり、それは数 m 区間の平均速度として算出されている。さらに当時のアナログ出力波形の解析では、数 10%の読みとり誤差が含まれていたと推定される。N 値データについても、S 波速度算出区間に対応した平均化処理が施されている。不良データをそのまま統計的に解析しても有意な関連性を見出すことが可能であるという保障はない。経験的、あるいは本質的な関連性を見出すには、データの品質を評価し、高品質なデータのみを使用して解析検討することが不可欠である。

現在、原位置で最も高精度で S 波速度を測定できる方法の一つに、サスペンション PS 検層法がある。同法では、基本的に 1m 毎の区間速度データが連続的に得られるため、同じく 1m 毎に測定される N 値データと 1 対 1 対応が可能である (N 値はほぼ 30cm の変区間の離散データであり、正確には 1 対 1 対応しない)。サスペンション PS 検層で得られる高精度の S 波速度 (V_s) データを、N 値や他の土質試験データと比較することで、より信頼度の高い関係式を得られることが期待される。吉田ほか⁴⁾は、サスペンション PS 検層データを用い、大阪平野部の表層地盤を対象に N 値と層相、有効上載圧を用いて V_s を推定する式を新たに提案している。

S 波速度は、他の物性値ともよい相関を示すことが知られている。たとえば Ayres & Theilen⁵⁾は浅海堆積物の V_s がバルク密度、細粒分含有率、含水比などの土質特性と良い相関があることを示している。Foti & Lancellotta⁶⁾は Biot⁷⁾の式を変形し、未固結層の間隙率を原則的に V_p と V_s とで表す近似式を示し、サスペンション PS 検層および室内試験で得られた V_s データを解析したところ、10%以下の誤差で間隙率を推定できたとしている。稲崎ほか⁸⁾は、近接した 5 本のボーリング孔でサスペンション検層を実施し、同一孔で実施された土質試験値と比較したところ V_s と中心粒径、固相体積率 (間隙率の補数) とが直線的な関係を示すこと、層相・堆積年代によってその傾向が変化することを見いだした。しかし残念ながらデータ数が少なく、この変化が有意なものであるかについての検討を深めることができなかった。今回それを再解析するとともに、新たに他サイトの検層データおよび土質試験データを収集・再解析し、 V_s と土質特性との関連性について検討を加えた。データ収集・解析とも研究期間が単年度であったため十分とはいえないが、現段階で明らかになったことを以下に報告する。

2. 研究方法および結果

2.1 高精度 PS 検層データ収集

首都圏において高精度 PS 検層データおよび土質試験データを収集したサイトと収集データ数を表-1に、位置を図-1に示す。収集サイトは 4 地区で、事業に関連して線状に実施されたものが主体である。収集したデータは孔数で 49 孔、測定深度で約 2300 深度に達した。検層データの収集に際しては、可能な限り生データ (デジタル波形データ) の収集に努めたが、発注機関はもちろん、受注会社においても生データの保管が不良で、独自に計測を実施した孔を除き、多くは紙出力のアナログ波形記録を利用せざるを得なかった。生データに対しては改めて波

表-1 首都圏 PS 検層データ収集数

地域項目	草加・越谷	新線	新木場	湾岸市川	総計
測定孔数	7	14	5	23	49
孔累計深度	465	778	266	1052	2561
V_s 測定深度	454	694	225	982	2355



図-1 首都圏 PS 検層データ収集孔位置 (稲崎⁹⁾に加筆)

形処理し、各区間の初動走時差から S 波速度を高精度で求めた。同検層法における通常の計測条件では、サンプリング間隔を S 波測定時で 10~50 μ s に、P 波測定時は 2~5 μ s 程度に設定する。走時の読み取り精度は、この間隔の 2~4 倍程度以下であり相対的な走時決定誤差は S 波で 2% 程度以下、P 波でも 5% 以下と見積もることができる。

これらの孔ではほぼ 1m 間隔で標準貫入試験が実施されており、その採取試料を用いた乱した試料の土質試験、スポット的に採取された不かく乱試料を用いた力学試験データを入手し、主として S 波速度との関連性について検討を加えた。一部の孔については土質試験を追加している。また新木場地区の 2 孔では密度検層・中性子検層を実施しており、その数値化されたデータも解析に利用した。

2.2 土質試験データとの比較

2.2.1 N 値との比較

標準貫入試験で求められる N 値データは、ほぼ全孔において基本的に 1m 間隔で存在しており、ボーリングに伴う基本物性情報として扱われている。また前述のようサスペンション PS 検層データと計測区間がほぼ同一であることから、捨てがたい地盤特性指標値である。しかしその測定は依然として目視によるものがほとんどで、不良データが多量に含まれていることが懸念される。たとえば右図-2 は、新木場地区で実施された 7 本のボーリング孔において、標高-15~-35m 付近に共通して出現する堆積ユニット (Unit4 : 有楽町層上部泥層) に対する N 値データのうち N 値=3 の出現頻度を、出現確率と比較したものである。このユニットでは、合計 123 点で N 値が測定され、そのうち N 値=3 を示した測定点は、A 社担当孔で 61 点、B 社で 40 点であった (余 22 点は N 値 2~6)。確率論的には、3 回の打撃による総貫入量は、30cm から 40cm 程度まではほぼ 7.5% の確率で出現し、40cm 以上になると徐々に小さくなるはずである。これに対し A 社の測定データの実に 50% が総貫入量 30cm、B 社では約 40% が総貫入量 35cm に集中しており、きわめて異常な分布を示している。この異常な分布は、測定値に対して何らかの加工 (この場合は丸め込み) が施されたことを強く示唆している。軟弱泥層や深部に出現する高 N 値砂礫層で、このような創作・加工が多い傾向があるようである。層相の追跡や他の物性指標の推定に N 値を利用しようとする場合、上述のような問題点を踏まえデータ

を吟味することが必要とされる。

標準貫入試験では、測定法自体固定区間長ではないことも問題として指摘されるべきであろう。従来標準貫入試験結果は、1m 間隔にプロットして折れ線表示されてきたが、これは不適切な表示法であると言わざるを得ない。さらに測定レンジが通常は 1~50 の間で、軟弱泥層では感度が悪く、逆に礫層では局所的な不均質性 (礫の分布状態) の影響を強く受ける。N 値データを活用するには、測定レンジの拡張と不良データの除去が不可欠である。通常 N 値が 50 以上の場合、貫入深度を補間した換算 N 値が用いられる。一方 N 値が 1 以下 (自沈) の場合、通常は N 値=0 として扱われる。しかし自沈量も何らかの情報を含んでいるはずで、補間によりその情報を定量化することが期待される。そこで以下の経験式によって N 値=0 の場合の補間 N 値を算出した。

$$\tilde{N} = a \times 30 / PD \times ((D+3) \times 4 + 64) / 100 \quad (1)$$

ここで、 a : 経験的補正係数 (通常 0.2), PD : 自沈量 (cm), D : 測定深度 (m) であり、自沈量と静的荷重 (ロッドとハンマーの重量) を変数とした補間式になっている。

図-3 は、高精度 PS 検層によって求められた S 波速度プロファイルを、N 値と比較したものである。通常の直線表示 (図左) では低 N 値部の細かな変動は表現できず、また高 N 値部はスケールオーバーしており、表示されていない。これに対し、上記補間後の対数表示 (図中) では、低 N 値部も高 N 値部の変動も表現されており、そのパターンは S 波速度のそれとよく対応している。このことは、S 波速度と対数 N 値との間に直線関係があることを意味してい

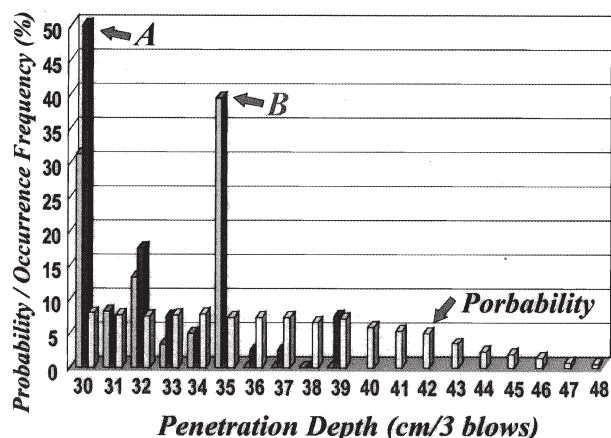


図-2 同一堆積ユニットにおける N 値の異常分布 (稲崎¹⁰⁾)

る。このVsとN値との片対数関係は図-4に示した比較図でも明らかである。同図右の線形軸グラフ上では高N値側で分散が大きくなることが示されている。換算N値300とは、50回の打撃で貫入深度が5cmに過ぎなかったことを意味している。このわずか5cmの測定情報を1mの区間速度と対比していることに強分散の原因がある。換言すれば、砂礫などの高N値指示層は、N値が大礫の存在など局所的な不均質性の影響を強く受けること、S波速度は区間の平均的な物性情報をより反映していること、がわかる。加えて図-4で特徴的であるのは、片対数軸グラフ上で、N値とVsとの関係がN値10付近を境に2つの直線で近似できる、ということである。すなわち、

$$\begin{aligned} Vs &= 20 \log N + 130 \text{ (for } N < 10) \\ Vs &= 190 \log N + 40 \text{ (for } N > 10) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし同図では、データを年代、層相で区分していない。より適切な経験式の算出には、これらのパラメータを含めた多変量解析が必要とされる。

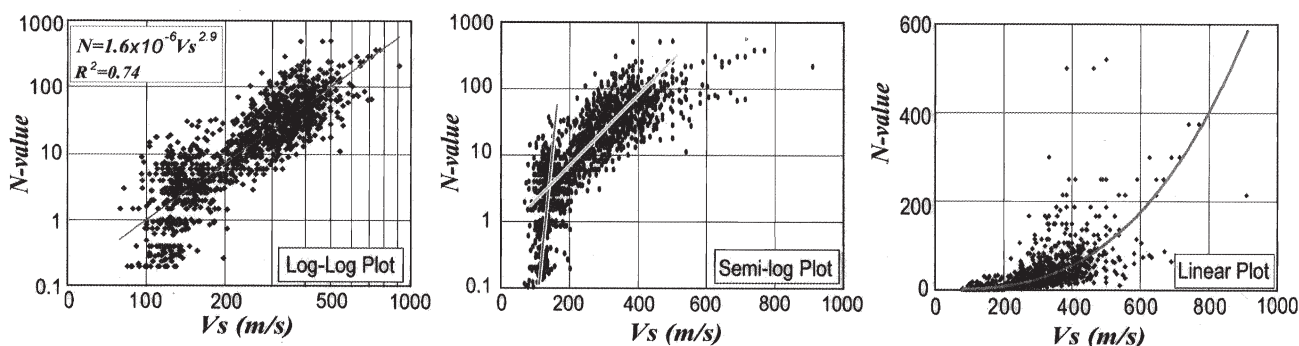


図-4 高精度PS検層で得られたS波速度と同一深度でのN値との関係 (稲崎⁹⁾を改変)

2.2.2 S波速度と各種土質特性との比較

未固結堆積物のS波速度が層相に依存することはよく知られている。そこでまず土質特性として層相に着目し、粒度を指標に「礫」、「砂」、「シルト」、「泥」の4区分に分類した。さらに特定のボーリング孔、あるいはサイトについては、コアに対する詳細な層序解析結果を参考に、沖積堆積物をいくつかの堆積ユニットに区分し、ユニット毎にVsと土質特性の関係を検討した。また粒度試験データについても、「中心粒径」をφスケール(対数)に変換し、層相区分の参考にするとともにVsとの相関を検討した。なお層相区分にあたっては、柱状図の不完全な記載によらず、既往文献や地盤図等を参照に対象サイトのモデル層序をあらかじめ作成し、それに基

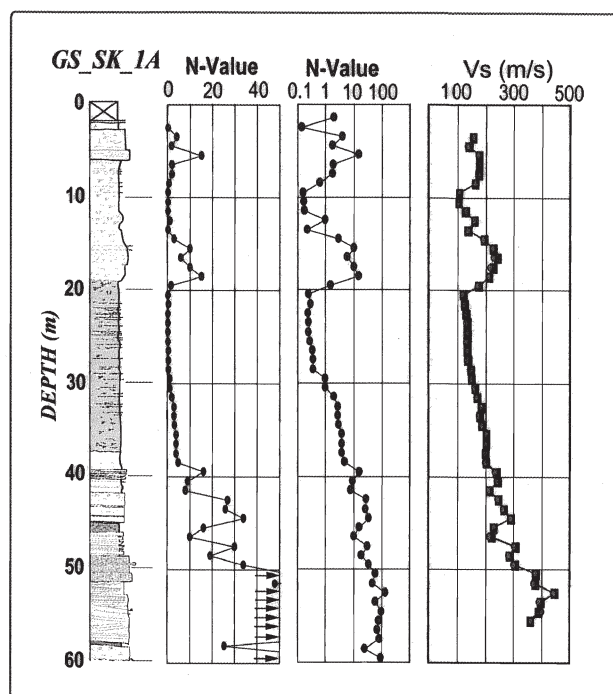


図-3 N値およびS波速度プロファイル (GS_SK_1孔)

づいて区分し直している。

新木場地区における沖積層のN値、固相堆積率、中心粒径およびバルク密度とS波速度との関係を図-5に示す。これらのうち特に固相堆積率およびバルク密度とVsとの間に高い相関が認められる(図下)。さらに泥系では堆積ユニットごとに異なった直線上にのる傾向が認められる。出現層準が深い(時代が古い)ユニットほど上方にシフトし、また傾きも大きくなる。年代効果(圧密固化作用)を反映したものと考えられる。一方砂系では最上部氾濫原砂層(△)、中間砂層(◇)では分散が大きいが、下位の氾濫原砂層(□)、段丘砂礫(◆)はそれぞれのグラフ上でも分布が集中しており、また泥系ユニットの傾向とも調和的である。中心粒径とVsとの関係(図

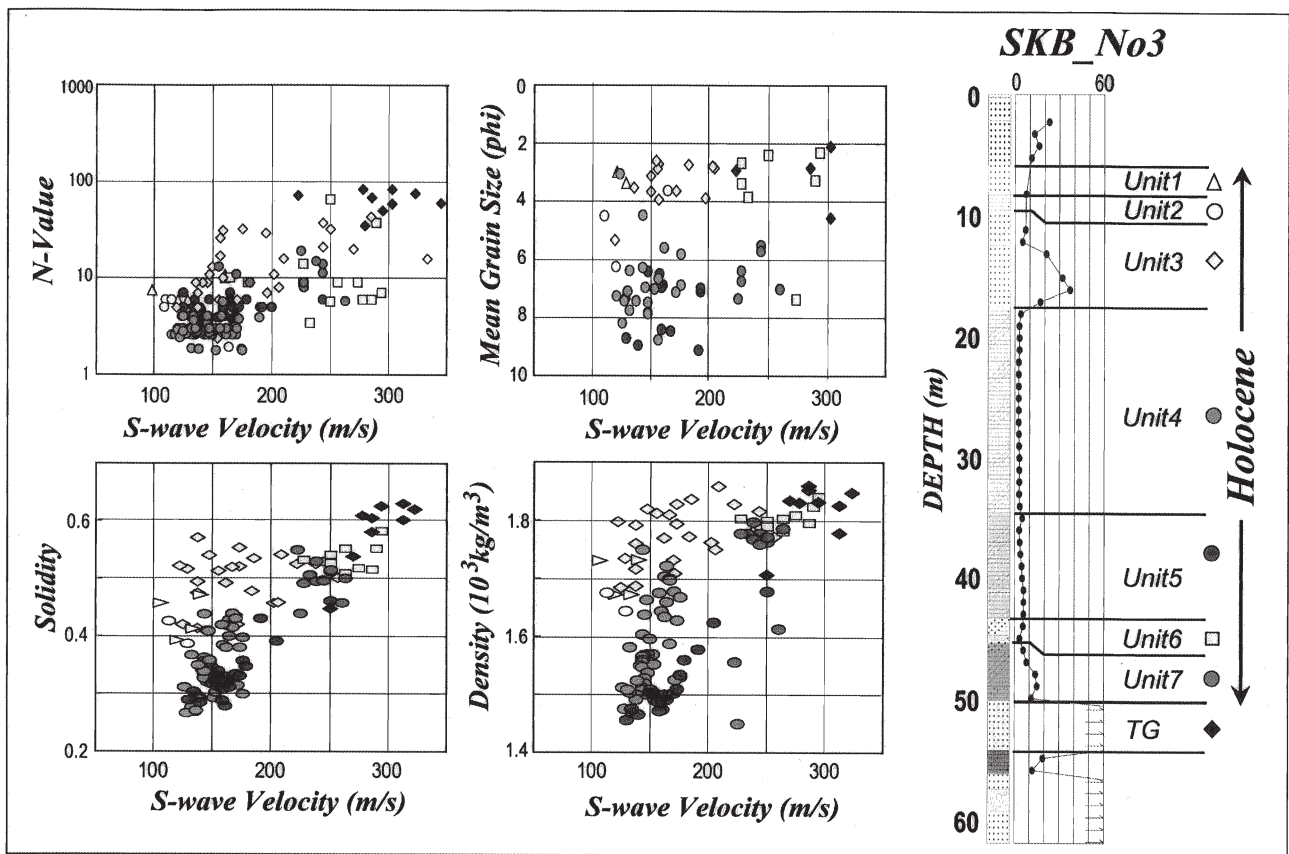


図-5 S波速度と主要土質特性との関係 (新木場地区)

(稲崎⁹)を改変)

中上)では、全体として中心粒径が大きくなるとVsも大きくなる傾向が認められるものの、相関性は高くない。逆に堆積ユニットごとに特徴的な分布を示している。基本的に泥系では中心粒径とVsとの相関性が低い。一方砂系では粗粒化するにしたがってVsが大きくなる傾向が認められる。

N値(対数表示)とVsとの関係(図左上)では、砂系でばらつきが大きく、泥系ではクラスター分布を示す。ただしこれは、前述のようにこのデータセットではN値の丸め込みが行なわれていることに起因するものである。

右図-6は、原位置で測定したVsと当該区間の湿潤密度値を用いて計算したせん断剛性率(Gf)と、振動三軸試験における微小ひずみ領域での応答から推定された初期せん断剛性率(G0)を比較したものである。データの多くは1:1の直線付近に分布するが、一部は著しく下方にシフトしている。上述のようにVsの測定精度は高く、また湿潤密度の変動は概して小さい。したがってこのシフトは原位置せん断剛性率の算出過程にではなく、室内試験での初期せん断剛性率を求める過程での問題、たとえば採取時の試料の乱れ、あるいは試験時の計測上の不具合

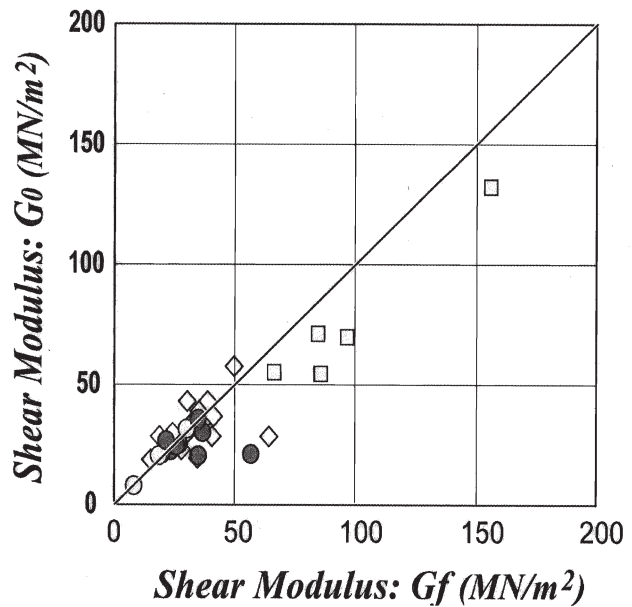


図-6 初期せん断剛性率の比較(Gf: 原位置Vsデータから計算; G0: 振動三軸試験データ)(稲崎¹⁰)

に起因するものと考えられる。このことは、Vs値との対比により室内試験結果の品質評価が可能であることを意味している。

以上から、沖積層堆積物のVsが基本的に固相の

量比に支配されていること、さらに年代効果により固相の結合が進むと剛性率あるいは V_s が増大する、という関係が推定される。逆に V_s とこれらの土質物性パラメータから、堆積環境および年代の違いを識別できる可能性がある

4. まとめ

沖積層を対象に実施されたサスペンション PS 検層データを収集し、各種土質試験値との関連性について検討を加えた。従来表層地盤の S 波速度を N 値から推定する経験式が提案されてきたが、N 値は測定精度に問題があり、相関性も高くない。これに対し、沖積層を堆積環境に基づいて層相区分し、その層相区分ごとに土質試験値と S 波速度 (V_s) データと比較したところ、よい相関が見出された。このことは、高精度で計測された V_s 値が、沖積層堆積物の物性を評価する重要な示標として利用できることを示している。これに加え、高精度 V_s 値が各種土質試験データの品質管理、不良データの抽出にも有用であることが示された。本研究は平成 17 年度の単年度に実施されたものであるが、来年度以降は課題を整理し、標準貫入試験や粒度試験などの個別の試験法や分析手法についてより詳細な検討を加える予定である。

本研究に使用したデータの収集にあたり旧道路公団、鉄道運輸機構、都市再生機構、関東地方整備局を初めとする多くの公的機関ならびに地質調査会社に協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 今井常雄・殿内啓司 (1982) : N 値と S 波速度の関係およびその利用例, 基礎工, 70-76.
- 2) 太田裕, 後藤典俊 (1976) : S 波速度を他の土質的指標から推定する試み, 物理探鉱, 29, 251-261.
- 3) 松岡昌志・翠川三郎 (1994) : 国土数値情報とサイス ミックマイクロゾーニング, 第 22 回地盤震動シンポジウム資料集, 23-34.
- 4) 吉田邦一・山本浩司・関口春子 (2004) : 大阪堆積盆地の表層速度構造モデルの作成, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, 203-203.
- 5) Ayres, A. and Theilen, F., (1999): Relationship between P- and S-wave velocities and geological properties of near-surface sediments of the continental slope of the Barents Sea, *Geophysical Prospecting*, 47, 431-441.
- 6) Foti, S., and Lancellotta, R., (2004): Soil porosities from

seismic velocities, *Geotechnique*, 54, 551-554.

- 7) Biot, M. A., (1955): Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Anisotropic Solid, *J. Appl. Phys.*, 26, 182 - 185.
- 8) 稲崎富士・長沢政和 (1991) : 土質調査ボーリング孔における各種物理検層の適用と課題, 物理探査学会第 84 回学術講演会講演論文集, 30-33.
- 9) 稲崎富士 (2005) : 沖積層堆積物の S 波速度と土質特性の関係について, 物理探査学会第 113 回学術講演会講演論文集, 217-220.
- 10) 稲崎富士 (2006) : 沖積地盤の工学的特性—特に S 波速度値との関係—, 日本第四紀学会主催シンポジウム講演要旨集, 45-52.