

K-NETと横浜市強震計ネットワークの 地盤調査データに基づくS波速度推定式

田村 勇¹・山崎文雄²

¹正会員 修(工) 株式会社 日本総合研究所 (〒102-0082 東京都千代田区一番町16番)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

地盤のS波速度は、地盤応答解析などに必須のパラメータであるが、PS検層で観測される場合が少なく、N値などの地盤調査データから推定されることが多い。しかし、既往のS波速度推定式は、統一かつ広範なデータに基づくものとはいえない。本研究では、K-NET地震計の設置地点1000箇所と横浜市地震計の設置地点150箇所におけるPS検層と標準貫入試験を含むボーリングデータを用いて、N値、土質分類、地質年代を説明変数とするS波速度の推定式を多重回帰分析により求めた。また、深い深度までを含む横浜市データに対する推定式をK-NETのデータに対して適用することにより、この推定式を日本各地へ適用可能であることを確認した。

Key Words : S-wave velocity, SPT N value, borehole data, Yokohama seismometer network, K-NET

1. はじめに

S波速度は動的地盤物性を表すパラメータとして地盤の地震応答解析に必須のものであるとともに、表層の平均S波速度^{1),2)}は地盤増幅度の広域での評価にも用いられている。しかし、ボーリング孔において直接的に弾性波速度を観測するPS検層³⁾が実施されることは稀で、標準貫入試験によるN値など、他の地盤調査データに基づいてS波速度の推定を行う必要が生じることが多い。

耐震設計や地震動分布推定などにおいて表層地盤のS波速度が必要な場合、道路橋示方書⁴⁾に示されている推定式が一般によく使用される。同示方書では、S波速度の説明変数として、N値と2種類の土質分類(砂質土, $0 \leq N \leq 50$; 粘性土, $0 \leq N \leq 25$)が用いられており、簡便に使用できる反面、推定結果のばらつきも大きい。

このほかにも、地盤調査データに基づいてS波速度を推定する経験式は、従来より数多く提案されている^{例えは5)-8)}。これらの研究ではいずれも、N値、土質分類などを説明変数とした多重回帰分析によって、S波速度の推定式を構築しており、道路橋示方書のものよりも多くの説明変数を考慮することによって、S波速度の推定精度が向上することを示している。

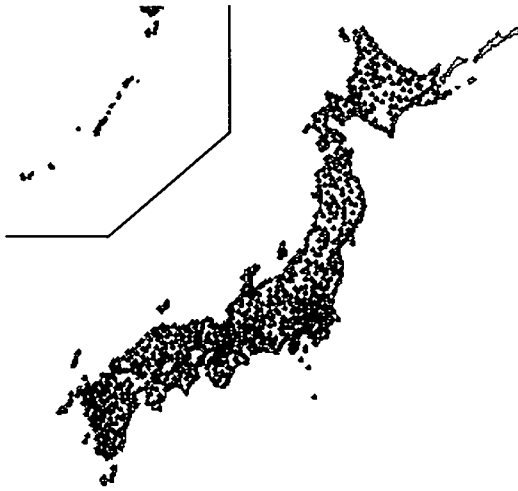
しかし、これらの研究^{5),7),8)}で用いられたS波速度データの多くは、限定された地域で収集されたものであり、そのようなデータに基づくS波速度推定式は、日本全国への適用性の確認が必要と思われる。しかし、これまでは全国規模で統一的行わ

れたPS検層は存在していなかったために、これらのS波速度推定式の汎用性を確認することは困難であった。また、全国各地からPS検層データを収集した研究⁹⁾においても、統一的地盤調査データを用いているわけではない。

1995年兵庫県南部地震以降、震度分布の早期把握や早期地震被害推定、さらには研究データの蓄積を目的として、地震計ネットワークの整備が急速に進められた⁹⁾。これらのなかには、各地震観測点でPS検層を含む詳細かつ統一的地盤調査が実施されているものもあり、これに基づいて信頼性のあるS波速度推定式を構築することが可能であると思われる。

詳細な地盤調査データが得られている地震計ネットワークの全国規模のものとしては、科学技術庁が全国1,000箇所の自由地表面に強震計を設置したK-NET¹⁰⁾がある。K-NETでは、各観測点において深度20mまでのPS検層、N値、土質分類などの詳細な地盤調査データが得られており、インターネットやCD-ROM¹¹⁾でその情報が公開されている。一方、地域的な高密度地震計ネットワークの代表例としては、横浜市強震計ネットワーク¹²⁾があり、これは横浜市内に150箇所もの地震観測点を有している。ここでの地盤調査は、軟岩層が出現するまで行っており、場所によっては90m以上も深い位置のデータも存在する。このデータによってS波速度の推定式を構築すれば、深さ方向に対して非常に広い適用範囲を持つことになると考えられる。

以上の背景により、本研究ではK-NETと横浜市の地震計設置地点でのPS検層を含む地盤調査デー



(a) K-NET : 1,000 地点



(b) 横浜市強震計ネットワーク : 150 地点

図-1 2つの地震計ネットワークにおける地震観測位置

表-1 K-NETおよび横浜市の地盤調査データの特徴

地震計ネットワーク	K-NET	横浜市
地点数	1000	150
N 値深度ピッチ	1m	1m
データ数	7677	1836
N 値	最大 50	最大 1500 (換算 N 値)
ボーリング深度	最大 20m (打ち止め)	最大 92m (軟岩の出現まで)
土質分類数	8	10
地質年代区分	2	2 (本研究)

に基づいて、S波速度推定式の構築を試みる。さらに、これらの2つの地盤調査データから構築したS波速度推定式を相互に比較するとともに、それぞれの適用範囲や得失を考慮して、日本全国に適用可能と思われる新しいS波速度の推定式を提案する。

2. S波速度推定式の関数型および使用するPS検層データ

(1) S波速度推定式の関数型

本研究では、N値がせん断強度を示す指標と考えられることより¹³⁾、S波速度推定の基本となる説明変数とみなし、既往の研究成果等⁵⁾⁻⁸⁾を考慮して、その他の説明変数として深度、土質分類、地質年代(沖積層:A、洪積層:D)を選んだ。すなわち、以下の関数型に基づいて、S波速度推定式を構築する。

$$V_s = k N^\alpha d^\beta C_1 C_2 \quad (1)$$

ここに、 V_s はS波速度、 N はN値、 d は深度、 C_1 、 C_2 はそれぞれ土質分類および地質年代ごとの係数、 k 、 α 、 β は回帰分析によって決定される係数である。実際の回帰は式(1)の両辺の常用対数を取り、式(2)の形にして多重回帰分析を行う。

$$\log V_s = \log k + \alpha \log N + \beta \log d + \log C_1 + \log C_2 \quad (2)$$

ここで、土質分類、地質年代は離散量であるため、これらの変数を考慮するときは数量化理論I類¹⁴⁾⁻¹⁶⁾に基づく回帰分析を行った。本研究では、K-NET、横浜市のデータそれぞれに対して、幾つかのパターンの説明変数の取り方を考え、これらに対してS波速度の推定式を構築する。

構築された回帰式(推定式)の精度の比較の際には、「重相関係数」および「標準誤差」を使用する。重相関係数は、以下に定義される実測値と予測値の間の相関の程度を表す0から1の間をとる指標であり、この値が1に近いほど回帰式の当てはまりが良く、0に近いほど当てはまりが悪い。

$$R = \frac{\sum (V_{obs} - \bar{V}_{obs})(V_s - \bar{V}_s)}{\sqrt{\sum (V_{obs} - \bar{V}_{obs})^2} \sqrt{\sum (V_s - \bar{V}_s)^2}} \quad (3)$$

ここに、 R は重相関係数、 V_{obs} はS波速度の実測値、上付き棒は平均値であることを示す。

標準誤差は、式(2)の関数型より、観測値の対数と推定値の対数の間のばらつきを表す指標として以下のように定義される。

表-2 K-NETデータの回帰分析に用いる3通りの土質分類と凡例

K-NET 8分類	データ数	5分類	2分類
礫 (G)	1095	礫 (G)	砂質土 (S)
礫質土 (GF)	1134		
砂 (S)	1977	砂 (S)	砂質土 (S)
砂質土 (SF)	1031		
シルト (M)	1069	シルト (M)	粘性土 (C)
粘土 (C)	889	粘性土 (C)	
火山灰質粘土 (V)	122		
有機質土 (O)	360	有機質土 (O)	

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\log V_{obs} - \log V_s)^2}{\nu}} \quad (4)$$

ここに、 σ は標準誤差、 ν は自由度 (=データ数-1)を示す。(2)の関数型より、 σ の10の累乗を取ることによって、推定値の実測値に対する平均的な上下の倍率のばらつきを示すことができる。

(2) PS検層データ

本研究では、全国1,000箇所に配置されているK-NETおよび、横浜市150箇所に配置されている横浜市強震計ネットワークの観測点で行われたPS検層を含む地盤調査データに基づいて、S波速度推定式の構築を行う。両地震計ネットワークにおける地震計位置を図-1に、また本研究で使用する地盤調査データの概略を表-1に示す。これよりK-NETでは、N値、ボーリング深さに上限値(N値50まで、調査深度20mまで)が設けられていることがわかる。したがって、K-NETは全国規模で展開されているが、その地盤調査データは、深さ方向への適用が限定される可能性がある。一方、横浜市の地盤調査データでは、N値については、硬い地層において50回の打撃で30cmの貫入が得られない場合は、換算N値 (=50 x 30cm/50回の打撃による貫入量cm)を採用している。また、調査深度については、横浜市では基本的に軟岩が出現するまで行われていることから、測定範囲はK-NETと比較して遙かに広い。

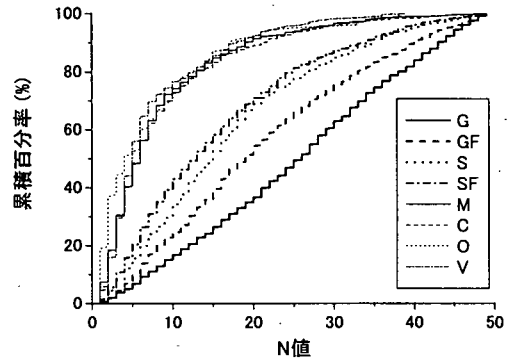
本研究では、K-NETデータおよび横浜市データに基づいてS波速度推定式を構築し、その一般性を相互に確認することにより、適用範囲の広いS波速度推定式が提案可能と考えた。

3. K-NETデータに基づくS波速度推定式

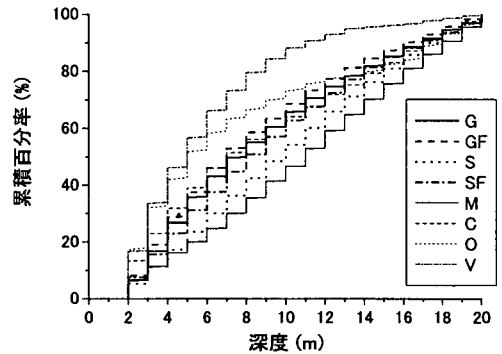
(1) 説明変数

まず、K-NETの地盤調査データを用いてS波速度推定式を構築する。

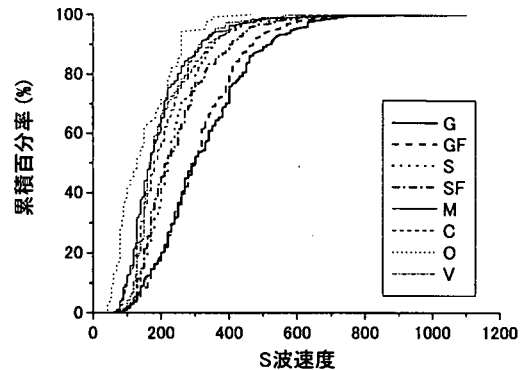
土質分類および地質年代を説明変数として採用したので、まず、土質分類および地質年代ごとに



(a) N値の累積百分率



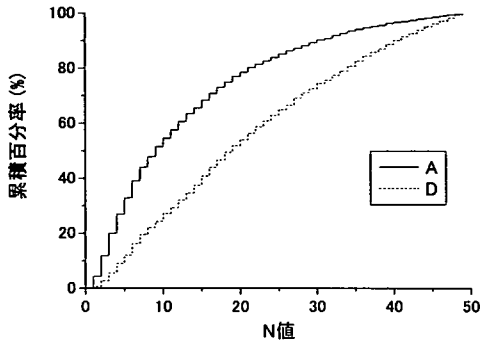
(b) 深度の累積百分率



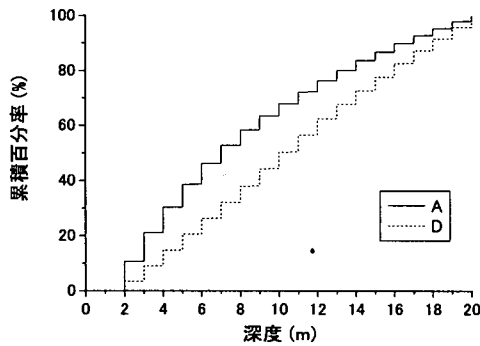
(c) S波速度の累積百分率

図-2 K-NETデータにおける土質分類ごとのN値、深度、S波速度の累積分布

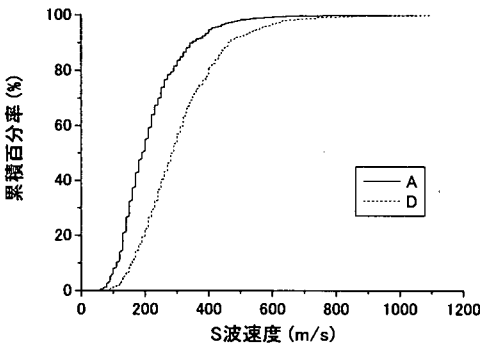
説明変数の頻度分布に違いがあるかどうかについて検討する。これにより、土質分類・地質年代を説明変数として加えることの妥当性が確認できる



(a) N 値の累積百分率



(b) 深度の累積百分率



(c) S 波速度の累積百分率

図-3 K-NET データにおける地質年代ごとの N 値, 深度, S 波速度の累積分布

と思われる。また, 説明変数間の多重共線性の有無を確認するために, N 値と深度の関係についても検討する。

表-2にK-NETの地盤調査データで用いられている土質分類(8分類)と, S波速度推定式の構築の際に用いるそれらをグループ化した分類(5分類, 2分類)

表-3 K-NET データを用いた S 波速度推定式の各ケースの説明変数の取り方と重相関係数・標準誤差

	N 値	深度	土質分類数	地質年代	重相関係数 R	標準誤差 σ
I	○	×	5	○	0.602	0.156
II	○	×	8	○	0.603	0.156
III	○	×	2	○	0.582	0.159
IV	○	○	8	○	0.642	0.148
V	○	○	5	○	0.641	0.149
VI	○	○	5	×	0.620	0.152
VII	○	×	5	×	0.568	0.161
VIII	○	×	×	×	0.545	0.165
IX	○	×	2	×	0.546	0.164

を示す。

a) 各変数と土質分類の関係

各変数と土質分類の間の関係を知るために, 土質分類ごとにN値, 深度, S波速度の累積分布を図-2に示す。これらのグラフより各変数とも土質分類ごとに分布が異なることが明らかとなった。また地質年代についても, 各変数との対応を図-3に示すが, 沖積層(A)と洪積層(D)の相違は大きく, 地質年代がN値, 深度, S波速度などに対して大きな影響を与えていることが分かる。したがって, S波速度の説明変数として, 土質分類および地質年代を考慮することが必要と考えられる。

b) N 値と深度の関係

密度が同じ土でも, 深度の増加とともに土かぶりによる有効応力が大きくなるために, N値が大きくなることが知られている。すなわちN値はそれを測定した位置での拘束圧の関数であることから, N値と深度の間には相関があることが推察される。しかし, この相関が非常に大きい場合は, 片方の説明変数だけで目的変数が十分に説明可能となるため, 片方の説明変数を除去して回帰を行う必要がある¹⁶⁾。

砂質土と粘性土では物理的な特性が異なることから, ここでは表-2に基づいてデータを2区分に分けてN値と深度の重相関係数を調べると, 全体では $R = 0.285$, 粘性土(C)では $R = 0.244$, 砂質土(S)では $R = 0.340$ となり, 砂質土の方がややN値と深度の間の相関が高いが, 全体的には深度とN値の間の相関が高いとはいえない。しかし実際には, 上述のようにN値と深度の間には, ある程度の相関があるものと思われる。ここでN値と深度の相関係数が小さい理由は, K-NETデータは深度が最大で20mと浅いため, 深度によるN値への影響があまり出なかったものと考えられる。

(2) S波速度推定式

S波速度推定式の構築の際には, 説明変数の取り方に多くのパターンが考えられる。本研究では, (1)での考察および実用性を重視し, 1)土質分類はある程度グループ化すること, 2)土質分類ごとに別個に回帰式を作成することはせず, 土質分類の影

表-4 K-NETデータに基づくS波速度推定式の
回帰係数

	k	α	β	C_1				C_2	
I	1160	0225	-	G	1.18	A	1.00	D	123
				S	1.00				
				M	0.96				
				C	1.00				
				O	0.75				
II	1177	0226	-	G	1.13	A	1.00	D	123
				GF	1.18				
				S	0.97				
				SF	1.01				
				M	0.95				
				C	1.00				
				V	0.94				
				O	0.74				
III	1094	0241	-	S	1.09	A	1.00	D	123
				C	1.00				
IV	1058	0187	0179	G	1.20	A	1.00	D	1.18
				GF	1.24				
				S	0.97				
				SF	1.03				
				M	0.89				
				C	1.00				
				V	1.02				
O	0.76								
V	1079	0185	0178	G	1.21	A	1.00	D	1.18
				S	0.98				
				M	0.89				
				C	1.00				
				O	0.75				
VI	897	0211	0196	G	1.19	-	-	-	-
				S	0.96				
				M	0.87				
				C	1.00				
				O	0.74				
VII	1098	0278	-	G	1.14	-	-	-	-
				S	0.97				
				M	0.94				
				C	1.00				
VIII	1110	0293	-	-	-	-	-	-	-
				S	1.07				
IX	1098	0278	-	C	1.00	-	-	-	-

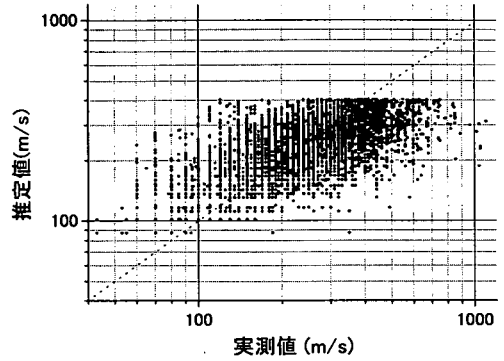


図-4 K-NETのS波速度実測値とK-NET推定式(I)によるS波速度推定値の関係

表-5 横浜市データの回帰分析に用いる4通りの土質分類と凡例

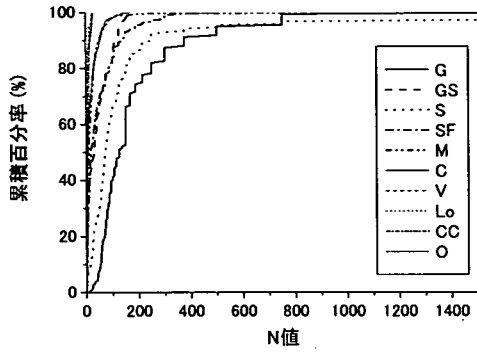
横浜市10分類	データ数	6分類	5分類	2分類
礫(G)	185	礫(G)	礫(G)	砂質土(S)
砂礫(GS)	45			
砂(S)	229	砂(S)	砂(S)	
細砂(SF)	216			
シルト(M)	691	シルト(M)	シルト(M)	粘性土(C)
粘土(C)	305	粘性土(C)	粘性土(C)	
火山灰(V)	50			
凝灰質粘土(CC)	86			
ローム(Lo)	15	ローム(Lo)		
腐植土(O)	14	腐植土(O)	腐植土(O)	

よびそれぞれの推定式から得られた重相関係数と標準誤差を示す。N値、土質分類、地質年代の3つの説明変数を考慮したのがケースIである。ケースIVが、最も条件を多く考慮した推定式である。表-4に、各ケースについて求められたS波速度推定式の回帰係数を示す。ケースIについて、図-4に実測値と推定値の関係を示す。推定値が頭打ちとなっているのは、K-NETのN値は50を上限としているためである。また、推定値がばらついている理由としては、K-NETは全国にまたがるデータであることから各地の地盤における堆積環境の地域性が現れている可能性が高いと思われる。なお、図-4のポイントを土質分類ごとに記号を変えてプロットしてみたが、明確な違いは見られなかった。

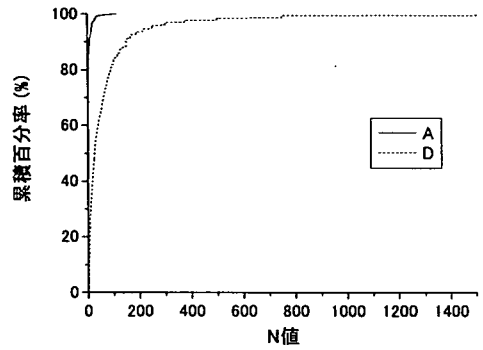
表-3より、説明変数が多いほど実測値と推定値の相関が大きくなるのが分かる。また、標準誤差も説明変数が増加するにしたがって減少していることが読みとれる。また、表-4より各ケースとも土質分類ごとに係数の値がかなり異なっていることがわかる。これを無視してケースIIIのように

響は係数の違いで表現することと、3)K-NETデータでは深さが限定されているため、説明変数として深さは基本的には考慮しないこととした。したがって、説明変数は、N値、土質分類、地質年代の3つが基本となる。ここで2)の土質分類の影響を係数で表現するやり方は、データ数の確保と他の回帰係数の共通化のために、既往の研究⁵⁾⁸⁾でも採用されている。

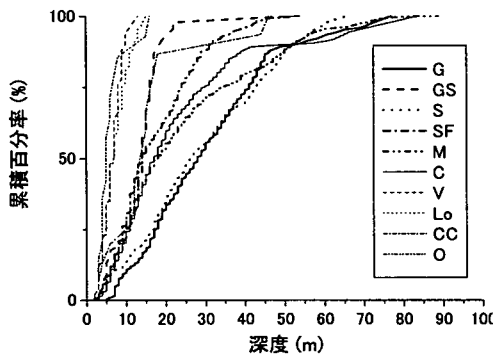
本研究では、この基本ケースを軸に、深度を含むケース、地質年代を含まないケースについてもS波速度の推定式を構築する。表-3に検討ケースお



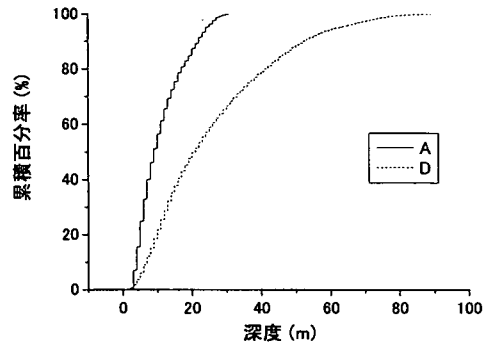
(a) N 値の累積百分率



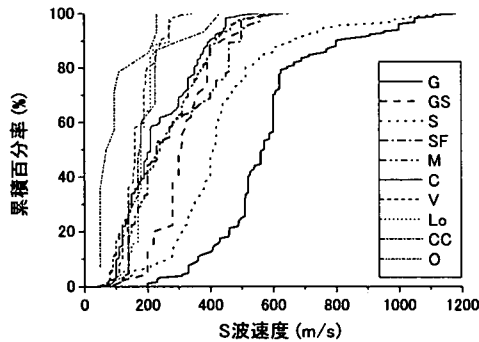
(a) N 値の累積百分率



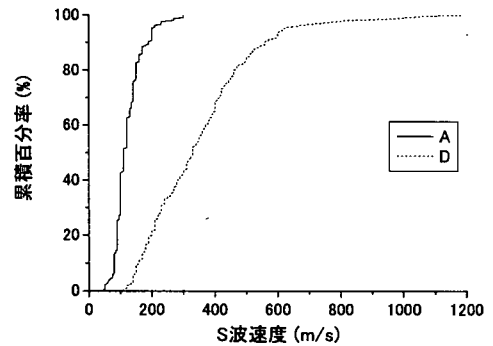
(b) 深度の累積百分率



(b) 深度の累積百分率



(c) S 波速度の累積百分率



(c) S 波速度の累積百分率

図-5 横浜市データにおける土質分類ごとの N 値, 深度, S 波速度の累積分布

図-6 横浜市データにおける地質年代ごとの N 値, 深度, S 波速度の累積分布

土質分類を 2 つに分けた場合には、標準誤差が大きくなる。これは、土質分類を「砂質土」と「粘性土」に大きくグループ化した結果、同じグループ内の係数の違いが反映されなくなったために、推定値の実測値に対するばらつきが大きくなった

ものである。このことから、土質分類はある程度詳細に表現すべきと考えられる。

ケース I とケース VII を比較した場合、地質年代を考慮することによって推定精度が向上することがわかる。また、ケース I とケース VI を比較した場合

表-6 横浜市データを用いたS波速度推定式の各ケースの説明変数の取り方と重相関係数・標準誤差

	N値	深度	土質分類数	地質年代	重相関係数R	標準誤差σ
I	○	×	5	○	0.861	0.109
II	○	×	10	○	0.864	0.108
III	○	×	6	○	0.861	0.109
IV	○	×	2	○	0.853	0.112
V	○	○	10	○	0.874	0.105
VI	○	○	5	○	0.872	0.105
VII	○	○	5	×	0.859	0.114
VIII	○	×	5	×	0.843	0.118
IX	○	×	×	×	0.837	0.121
X	○	×	2	×	0.837	0.121

は、深度を説明変数に加えることによって地質年代を考慮した場合よりも推定精度が向上していることがわかる。しかし、K-NETでは深度のデータ範囲が20mまでと限定されているため、これを説明変数として含む推定式を深度20m以深のデータに適用する際には、他のデータを用いた外挿部分に関する検討が必要となる。

4. 横浜市データに基づくS波速度推定式

(1) 説明変数

つぎに、横浜市地震計ネットワークの地盤調査データについて、K-NETの場合と同様の説明変数を用いたS波速度推定式を構築する。ただし、横浜市PS検層データには、地質年代は含まれていない。そこでここでは、150箇所のボーリング地点について、既存資料¹⁷⁾を参考にして、土質柱状図とN値に基づき独自に沖積層と洪積層の境界を設定した。

a) 各変数と土質分類の関係

表-5に横浜市の地盤調査データで用いられている土質分類(10分類)と、S波速度推定式の構築の際に用いるそれらをグループ化した分類(6分類, 5分類, 2分類)を示す。ここで、5分類と2分類は、K-NETデータの分析で用いたものと対応する区分となっている。また、土質分類ごとのN値、深度、S波速度の累積分布を図-5に、地質年代ごとのこれらの累積分布を図-6に示す。

図-5より、K-NETの場合と同様に、土質分類ごとに各変数の頻度分布が大きく異なることがわかる。また図-6より、地質年代ごとに各変数の累積頻度分布が大きく異なることがわかる。とくに、地質年代においては、沖積層(A)と洪積層(D)の間の変数の分布形状の違いはK-NETと比較して大きくなっている。したがって、横浜市データに対するS波速度推定式においては地質年代を考慮すべきといえよう。

b) N値と深度の関係

K-NETの場合と同様にN値と深度の関係について考察を行う。全データを「砂質土」と「粘性土」

表-7 横浜市データに基づくS波速度推定式の回帰係数

	k	α	β	C ₁		C ₂		
I	94.8	0.275	-	G	1.15	A	1.00	
				S	0.96			
				M	1.01			
				C	1.00	D		1.39
				O	0.69			
II	96.7	0.258	-	G	1.16	A	1.00	
				GS	1.10			
				S	1.00			
				SF	0.91			
				M	1.00			
				C	1.00	D		1.40
				V	0.92			
				CC	0.93			
				Lo	0.92			
				O	0.68			
III	94.8	0.264	-	G	1.15	A	1.00	
				S	0.96			
				M	1.01			
				C	1.00	D		1.39
				Lo	0.95			
O	0.69							
IV	93.4	0.275	-	S	1.00	A	1.00	
				C	1.00	D	1.38	
V	79.3	0.238	0.090	G	1.19	A	1.00	
				GS	1.16			
				S	1.03			
				SF	0.95			
				M	1.00			
				C	1.00	D		1.37
				V	1.00			
				CC	0.94			
Lo	1.01							
O	0.74							
VI	78.8	0.242	0.091	G	1.18	A	1.00	
				S	0.98			
				M	1.00			
				C	1.00	D		1.37
				O	0.72			
VII	87.8	0.291	0.105	G	1.10	-	-	
				S	0.94			
				M	0.97			
				C	1.00			
				O	0.67			
VIII	108.5	0.319	-	G	1.08	-	-	
				S	0.93			
				M	1.00			
				C	1.00			
				O	0.64			
IX	106.4	0.321	-	-	-	-		
X	106.1	0.327	-	S	0.96	-	-	
				C	1.00			

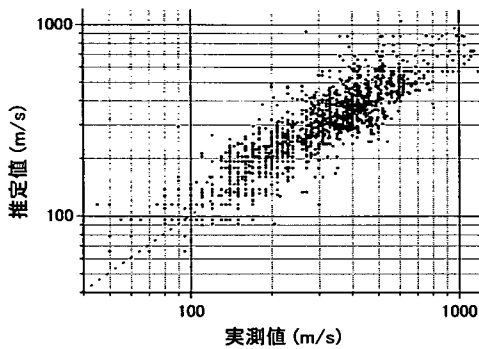


図-7 横浜市のS波速度実測値と横浜市推定式(I)によるS波速度推定値の関係

表-8 既往の研究におけるS波速度推定式の説明変数と使用データの諸元

研究	説明変数	対象地域	データ数	地点数
太田・後藤(1976)	N値, 深度, 土質分類(3種), 地質年代(2種)	首都圏	284	-
今井ら(1982)	N値	全国各地より収集	756	-
正木(1984)	N値, 深度, 土質分類(4種), 地質年代(3種)	名古屋市	728	39
福和ら(1999)	N値, 深度, 土質分類(4種), 地質年代(8種)	名古屋市	-	35

に分類してそれぞれでN値と深度の重相関係数を求めると、全体では $R = 0.496$ 、粘性土(C)では $R = 0.501$ 、砂質土(S)では $R = 0.518$ となり、K-NETの場合と比較してN値と深さの相関がかなり高くなっている。

(2) S波速度推定式

横浜市のデータに基づいて、S波速度の推定式を構築する。説明変数は、K-NETの場合と同様にN値、深度、土質分類、地質年代の4つとする。基本ケースの土質分類法として、K-NETデータにも対応する5種類の土質分類法を適用する。これを軸に深度を含むケース、地質年代を含まないケースについて考察する。

表-6に各ケースにおける説明変数の取り方、そのときに構築された推定式の重相関係数(R)と標準誤差(σ)を示す。また表-7に、各ケースで構築された推定式の回帰係数を示す。

表-6より、横浜市データに対する推定式は、K-NETデータに対するものより、いずれも重相関係数が遙かに大きく、標準誤差も小さいことが読みとれる。各ケース間では、重相関係数については説明変数が増加するとやや増加し、標準誤差はや

表-9 既往の研究のS波速度推定式の係数(いずれも粘性土または粘土(C)の係数を1に基準化して示す)

	k	α	β	C_1		C_2	
太田・後藤(1976)	62.5	0.218	0.226	G	1.10		
				S	1.07		
				C	1.00		
	90.0	0.173	0.195	G	1.11	A	1.00
				S	1.09		
				C	1.00		
今井ら(1975)	97.0	0.314	-	-		-	
正木(1984)	126.7	0.170	0.104	G	0.98	A	1.00
				S	0.84	D	1.30
				M	0.87	T	1.66
				C	1.00	※1	
福和ら(1999)	102.7	0.129	0.118	G	1.11	※2	
						1.00	
						1.35	
				S	1.11	1.22	
						1.22	
						1.16	
				M	0.98	1.37	
C	1.00	1.51					
道路橋示方書	100	1/3	-	S	0.80	-	
				C	1.00	-	

※1: 凡例Tは第三紀層を示す。

※2: 上から(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)

や減少する。また、土質分類が10種の場合と5種や6種とした場合を比較すると、相関は同程度に高く、「砂質土」と「粘性土」の2グループに分けた場合は、グループ内の係数の違いが平均化され、相関が低下することがわかる。

全ての説明変数を考慮したケースVおよびケースVIは相関が最も高い部類となる。両ケースでは土質分類の数は異なるが、10分類を5分類(および6分類)にする際に、土質分類ごとの係数の値も考慮しているため、推定精度にはほとんど違いが生じていない。

ケースIとケースVIIを比較すると、地質年代を加えることによって、S波速度の推定精度がかなり向上することがわかる。同様に、ケースVIIとケースVIを比較すると深度を加えた場合でも推定精度はかなり向上する。地質年代を考慮したケースIと深度を考慮したケースVIIは同程度の相関を持つが、標準誤差で比較した場合はケースIの方が小さい。したがって、ケースIの方がS波速度の推定精度が高く、地質年代の方が有効な説明変数であるといえる。

図-7に横浜市のS波速度の実測値と横浜市推定式(I)による推定値の関係を示す。K-NETの場合(図-4)と比較して、推定値の実測値に対するばらつきが大幅に減少していることがわかる。これは、横浜

市という限定された地域でのデータに基づく回帰分析であることによるところが大きいと思われる。以上の考察により、横浜市データに基づくS波速度推定式の説明変数として、N値、土質分類、地質年代を考慮すれば実用上は充分であると思われる。

5. 既往の研究との比較

ボーリングデータに基づくS波速度の推定に関する研究は、以前より数多く行われている。表-8に代表的な研究で使用されたデータの諸元を、また表-9に構築されたS波速度推定式の係数を示す。どの研究においても、基本的に、N値、深度、土質分類、地質年代を説明変数としている。福和らの研究⁹⁾では、地質年代を地域に応じて詳細に考慮していることが特徴的である。一方、土質分類については、各研究とも礫・砂・シルト・粘性土の4分類をしており、道路橋示方書の2分類と比較すると、やや詳細な分類法が採用されている。ここでは、説明変数の取り方ごとに、本研究とこれらの既往の研究の比較を行う。

a) N値

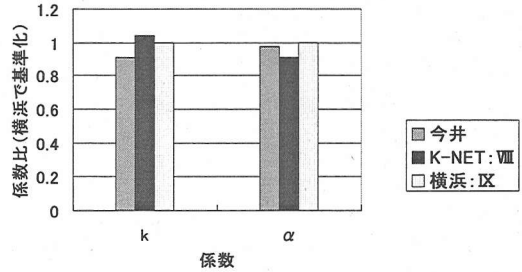
N値のみを説明変数とした代表的なS波速度推定式として今井ら⁶⁾の式がある。図-8(a)に示すように、N値の係数 α の大きさを横浜市データの回帰式IXで基準化して比較すると、それぞれかなり近い値をとることがわかる。また、定数項 k も既往の研究との差は殆どない結果となった。

b) N値、深度、土質分類

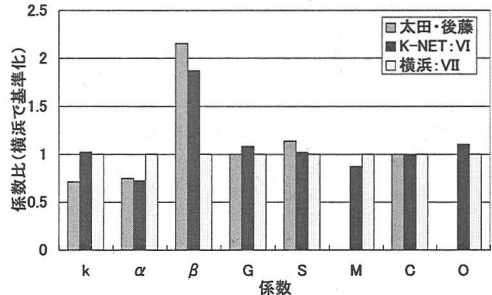
N値、深度、土質分類を説明変数とした研究としては、太田・後藤⁵⁾の研究がある。本研究では、K-NET推定式(VI)および横浜市推定式(VII)が対応している。ここでは、横浜市推定式(VII)の係数の値で各推定式の係数を基準化して、各研究結果を図-8(b)に比較する。これより、太田・後藤によるN値、深度、および土質分類の係数は、K-NET推定式(VI)のものと同様に近似しており、定数項にはやや差があることが読みとれる。横浜市推定式(VII)については、N値の係数と深度の係数はかなり異なるものの、土質分類の係数の値は比較的近い値を取っている。このような深度の係数の違いが生じたのは、データベースで扱っているボーリングデータの深さ分布の差が主たる原因であると考えられる。たとえば横浜市推定式は、深度の大きいデータをK-NETデータなどに比べて多く含むために深度の係数が小さく、その分のバランスを式(2)でとるようにN値の係数が大きくなっている。

c) N値、深度、土質分類、地質年代

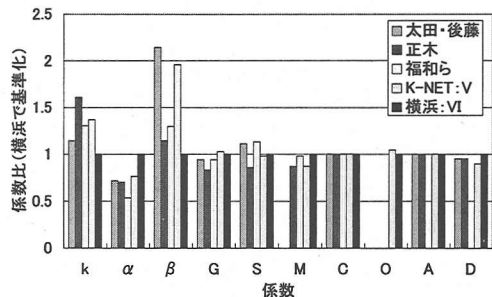
N値、深度、土質分類、地質年代によってS波速度推定式を構築した研究としては、太田・後藤⁵⁾、正木⁷⁾、福和ら⁹⁾などの研究がある。本研究では、K-NET推定式(V)、横浜市推定式(VI)がこれらにほぼ対応する。各推定式の係数を横浜市推定式(VI)の係数で基準化して、図-8(c)に比較する。ただし、



(a) N値のみを説明変数とした場合



(b) N値、深度、土質分類を説明変数とした場合



(c) N値、深度、土質分類、地質年代を説明変数とした場合

図-8 説明変数の取り方ごとの既往の研究と本研究の回帰係数の比較 (各係数は本研究の横浜市データによる回帰式の係数で基準化)

正木の研究の「第三紀層(T)」および福和らの研究の地質年代は、本研究のデータでは考察できないため、本研究との係数の比較は行わず、本研究で使用した説明変数に対応する部分についてのみ図示した。

土質分類の係数については、いずれの研究とも近い値となっている。N値の係数 α については、福和らの研究がやや小さい値をとり、本研究の横浜市推定式のものやや大きい。しかしこれらの違いは、定数項の値 k の違いによって、ほぼバランスが保たれるように読みとれる。

深度の係数 β は、各研究で大きくばらついてい

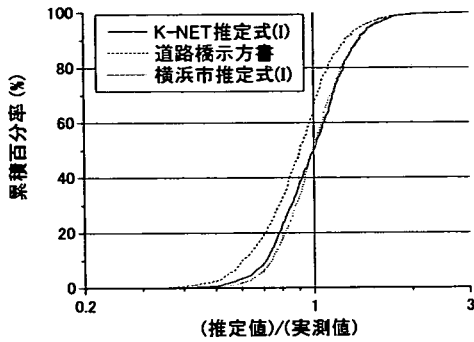


図-9 横浜市データに対して各推定式を使用した場合の S 波速度の(推定値)/(実測値)の累積分布

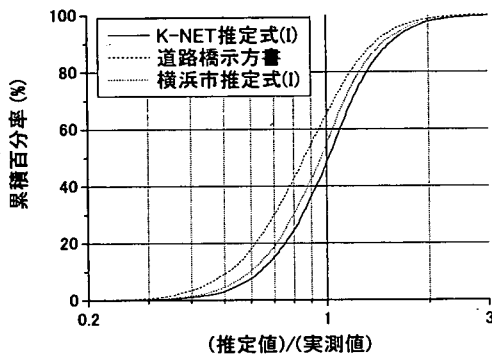


図-10 K-NET データに対して各推定式を使用した場合の S 波速度の(推定値)/(実測値)の累積分布

る。K-NET推定式(V)と太田・後藤式に近い値をとり、横浜市推定式(VI)と正木式に近い値をとっている。これは、b)でも述べたように、深度データの違いによって生じたものと思われる。

以上、本研究の結果と既往の研究結果を比較したが、これらは概ね整合しており、本研究の提案は、妥当なものと思われる。

6. S波速度推定式の提案

(1) 提案式の関数型

これまでの検討により、S波速度の推定を精度よく行うためには、ある程度詳細な土質分類が必要であることが分かった。また、地質年代がS波速度に対し大きな影響を持つことが分かった。深度を考慮することでS波速度の推定精度は向上することが確認されたが、説明変数として採用した場合、K-NETではボーリングが20mまでしか行われていないため、推定式の深度の定義域が限定されてしまうことが問題となる。また、横浜市でも地質年代の代わりに深度を用いた場合、推定式の重相関係

数はほぼ同じであったものの、標準誤差が比較的大きく、必ずしも深度が有効な説明変数ではないことが分かった。

以上より、本研究で提案するS波速度の推定式の説明変数は、N値、土質分類(5分類)、地質年代とする。したがって最終的に提案するS波速度推定式は、K-NET推定式(I)および、横浜市推定式(I)を採用することにした。

ここで、横浜市の方が深い位置までのボーリング調査を行っていることから、深い位置までのS波速度推定への利用を考慮すると、横浜市推定式(I)を使用した方が望ましいと思われる。そこで、横浜市推定式(I)が全国に対して適用可能かどうかについて、K-NETデータを用いて検証を行う。

(2) 道路橋示方書の推定式との比較

現在、S波速度の推定式としては、一般的には以下に示す道路橋示方書の推定式が用いられている。

$$V_{est} = \left(\frac{80_s}{100_c} \right) N^{1/3} \quad (5)$$

ただし、N値の定義域は、砂質土(S)については $0 \leq N \leq 50$ 、粘性土(C)については $0 \leq N \leq 25$ の範囲である。

この推定式をK-NETデータに対して適用した場合は、 $R=0.502$ 、 $\sigma=0.186$ となり、横浜市データに対して適用した場合は、 $R=0.815$ 、 $\sigma=0.135$ という重相関係数と標準誤差が得られた。なお、ここでは式(5)におけるN値の定義域は無視してS波速度の推定を行った。K-NETデータに対しては、道路橋示方書の推定式の推定精度は非常に低いといえる。一方、横浜市データに対しては、重相関係数は0.8前後と高い値を持っているものの標準誤差が大きいため、推定精度が高いとはいえない。表-3、表-6より、本研究での提案式は、(そのもととなったデータに対してなので当然ではあるが)、道路橋示方書の推定式を使用した場合よりも推定精度が高いといえる。

つぎに、K-NET推定式(I)および横浜市推定式(I)について精度の比較を行う。ここでは、推定値と実測値の比を取り、その累積分布を求めて精度を比較した(図-9、図-10)。本研究の推定式を用いて求めた推定値は、いずれも、道路橋示方書の推定値と比較して(推定値)/(実測値)の比が1.0に近い値を取ることが多いことが読み取れる。とくに、K-NET推定式(I)が横浜市データについても精度が高いこと、また横浜市推定式(I)がK-NETデータについても精度が高いことが注目される。

道路橋示方書の推定式が実測値と比較して全体的に小さい値を推定する理由としては、表-4、7、9を比較してわかるように、砂質土の係数が小さいことの影響が大きいと考えられる。

以上の考察により、本研究によるS波速度推定式は、道路橋示方書の推定式よりも有効であること

が示されたといえよう。

(3) 横浜市推定式の汎用性とデータの一般性

本研究では、K-NETおよび横浜市の地震計設置地点の地盤調査データを用いて、S波速度の推定式を構築した。K-NETは全国各地の地盤データを含んでいるが、ボーリング深さなどに制限があるため、このデータから構築された推定式の定義域が限定される恐れがある。一方、横浜市のデータは、限定された地域で得られたものながら、軟岩に達する深さまでのボーリング調査を行っており、このデータから構築されたS波速度推定式の深さ方向の定義域は広い。このような推定式の実用性を考えると、ある程度の深さにまで適用できることが望ましい。

以上の理由により、まず、K-NETデータから構築されたS波速度推定式を横浜市データに対して適用し、横浜市データの分布が一般的なものと判断できるかどうか吟味する。次に、横浜市のデータから構築されたS波速度推定式の汎用性をK-NETデータを用いて検証する。

横浜市データに対してK-NET推定式(I)を適用した結果を図-9に示すが、これより、横浜市推定式(I)による推定値とK-NET推定式(I)による推定値がほぼ重なっていることがわかる。とくに分布形状が大きく異なるという傾向は見られず、横浜市データとK-NETデータとは全体的に近い性質を持つことが明らかとなった。

次に、K-NETデータに対して、横浜市推定式(I)による推定値と実測値の比の累積分布と、K-NET推定式(I)による推定値と実測値の比の累積分布を図-10に比較する。横浜市推定式(I)による推定値が若干小さめの値を推定する傾向があるものの、ほぼK-NET推定値(I)と同程度の結果となっている。K-NETデータに対する推定値同士の重相関係数は $R=0.989$ 、標準誤差は $\sigma=0.044$ であった。これより、両推定式によって得られる推定値はほぼ近い値で、標準誤差も小さく、横浜市推定式(I)による推定値はK-NET推定式(I)の推定値に対して小さな誤差範囲に収まっていることが分かった。

また、K-NETデータに対して、K-NET推定式(I)を適用した場合の重相関係数および標準誤差は、表-3より $R=0.602$ 、 $\sigma=0.156$ であり、横浜市推定式(I)を適用した場合は $R=0.596$ 、 $\sigma=0.162$ と求められ、両推定式はK-NETデータに対して、ほぼ同程度の精度を持つことが分かった。これより、横浜市推定式(I)をK-NETの地盤調査データに対して適用しても問題ないことが確認でき、横浜市推定式(I)の日本各地の地盤への適用性が示されたといえよう。

以上より、本研究では、データの深さ方向の定義域が広く、通常の地盤調査データから推定が可能な、以下の横浜市推定式(I)を最も推奨するS波速度推定式として提案することにした。

$$V_{est} = 94.8N^{0.275} \begin{pmatrix} 1.15_G \\ 0.96_S \\ 1.01_M \\ 1.00_C \\ 0.69_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.00_A \\ 1.39_D \end{pmatrix} \quad (6)$$

また、本研究でのこのほかの提案式も地盤調査データの種類や特性によっては、利用可能と思われる。

7. 結論

S波速度は動的地盤物性のパラメータとして最も重要なものであるが、PS検層が実施される場合は少なく、N値などの地盤調査データに基づいて推定されることが多い。本研究では、K-NETおよび横浜市の強震ネットワーク観測点で行われたPS検層を含む広範な地盤調査データに基づいて、S波速度の推定式の構築を行った。

説明変数としては、N値、深度、土質分類、地質年代を考慮した。説明変数に対する多重回帰分析の結果、土質分類はある程度詳細に分類することでS波速度に対する影響を表現可能なこと、および地質年代の違いがS波速度に対する影響が大きいことが明らかとなった。一方、深度については、K-NETでは深さ20mまででボーリングが打ち止めになっていること、また横浜市ではN値の影響の方が卓越していることから、説明変数として加えることは余り適当でない判断した。

横浜市ではボーリング調査を深くまで行っていることから、データの深さ方向の定義域が広く、本研究では横浜市データに基づくS波速度推定式を最も推奨するものとした。そこで、K-NETデータを用いて、横浜市推定式とK-NET推定式との比較を行い、横浜市推定式が日本の他の地域に適用して問題ないことを示した。また、既往の他の研究とも比較して、回帰式の妥当性を検証した。

以上により、横浜市地震計ネットワークのPS検層データに基づき、N値、土質分類(5種)、地質年代を説明変数としたS波速度推定式を提案した。本論文では、現時点で入手可能な我が国のデータに基づく、最良の一般的な回帰式を作成したと思われる。しかし、K-NETデータの推定精度を勘案すると、堆積環境の地域性の違いがS波速度推定式に影響していることが懸念され、今後、地域による差異の検討が必要であろう。

謝辞：横浜市地震計ネットワークの地盤調査データは、横浜市と東京ガスの地震防災に関する共同研究を通じて、横浜市災害対策室より提供いただいた。東京大学生産技術研究所の若松加寿江博士には、横浜市150地点の地質年代の区分など、本研究についてさまざまなご指摘をいただいた。日本

技術開発(株)の磯山龍二博士，石田栄介博士には，横浜市データに関して，貴重なご意見をいただいた。記して謝辞を表す。

参考文献

- 1) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した地盤の平均S波速度の推定，日本建築学会構造系論文報告集，第443号，pp. 65-71，1993.
- 2) 紺野克昭，片岡俊一：レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案，土木学会論文集，No.647/1-51，pp. 415-423，2000.
- 3) 地盤工学会：地盤調査法，1995.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，1996.
- 5) 太田裕，後藤典俊：S波速度を他の土質的指標から推定する試み，物理探査，第29巻，第1号，pp.31-41，1976.
- 6) 今井常雄，麓秀雄，横田耕一郎：日本の地盤における弾性波速度と力学的性質，第4回日本地震工学シンポジウム，pp.89-95，1975.
- 7) 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，東京工業大学博士学位論文，1984.
- 8) 福和伸夫，荒川正和，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.
- 9) 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムの現状と展望，土木学会論文集，No.577/1-41，pp. 1-15，1997.
- 10) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seismological Research Letters*, Vol. 69, No. 4, pp. 309-332, 1998.
- 11) 防災科学技術研究所 地震・火山防災研究室：Kyoshin Net 強震データ（平成8年）土質データ，CD-ROM，1997.
- 12) 翠川三郎，阿部進：横浜市における細密震度分布の即時評価，第10回日本地震工学シンポジウム，pp. 3467-3432，1998.
- 13) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1976.
- 14) 有馬哲，石村貞夫：多変量解析のはなし，東京図書，1987.
- 15) 林知己夫：数量化理論とその応用（V），統計数理研究報，第8巻，149-151，1961.
- 16) 駒澤勉：数量化理論とデータ処理，林知己夫監修，朝倉書房，1982.
- 17) 神奈川県：土地分類基本調査「横浜・東京西南部・東京東南部・木更津」，1988.

(2001. 4. 5 受付)

ESTIMATION OF S-WAVE VELOCITY BASED ON GEOLOGICAL SURVEY DATA FOR K-NET AND YOKOHAMA SEISMOMETER NETWORK

Isamu TAMURA and Fumio YAMAZAKI

The S-wave velocity is one of the most important parameters in seismic response analysis of soil layers. However, PS-logging, which measures S-wave velocity in borehole, is not so frequently carried out. Hence the S-wave velocity is often estimated using SPT N-value and other soil parameters. In this paper, the results of comprehensive geological surveys conducted at K-NET sites and Yokohama seismometer network sites are employed to propose reliable estimation models of S-wave velocity. Based on a multiple linear regression analysis, the S-wave velocity is expressed as a function of N-value, soil type, and geologic age. The proposed equations are then compared with existing relationships.