

標準貫入試験による弾性波速度の評価

An Evaluation of Elastic Wave Velocities Generated by Standard Penetration Test

亀井 健 史 (かめい たけし)

基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤物性室 室長

中 村 嘉 博 (なかむら よしひろ)

基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤探査室 室長

1. はじめに

標準貫入試験は、原位置における地盤の硬軟あるいは締め具合の程度を簡便にある程度評価することができる。また、 N 値の測定後、乱された状態ではあるが試料の採取が可能であるため、原位置における土試料を直接に肉眼で観察することができ、その試料を用いて簡単な物理試験もできる。さらに、諸外国で試験法が基準化されており、結果の評価や対比が容易である。

一方、標準貫入試験による動的な貫入抵抗値から地盤の静的・動的すべての土質定数を推定することは、地盤を評価する際に不合理な面も生じることは容易に考えられる。しかしながら、標準貫入試験は、その簡便さ、適用範囲の広さとその結果の明りょうさから、試験結果として得られる N 値は各種の土質定数と相関性を有していることが報告されており、わが国の多くの設計基準や指針などで非常に重要な地盤情報の一つとしてよく用いられている。このような観点から、標準貫入試験は現在の地盤調査においては、必要不可欠な地盤調査法の一つとして広く実施されている。

最近のコンピューターの進歩と優れた解析モデルの提案により、より精度の高い土質定数が必要な場合も多くなってきている。しかしながら、一般的には数多くの地盤調査が実施される場合は多くなく、現状よりさらに正確な土質定数が必要となると、 N 値そのものがそれほど精度の高くない指標であるため、 N 値との相関より求めた土質定数には信頼性の観点から疑問が残る。

地盤の地震応答解析には P 波速度・ S 波速度に代表される弾性波速度は最も重要な土質定数の一つであると考えられている¹⁾。これらの定数は通常、原

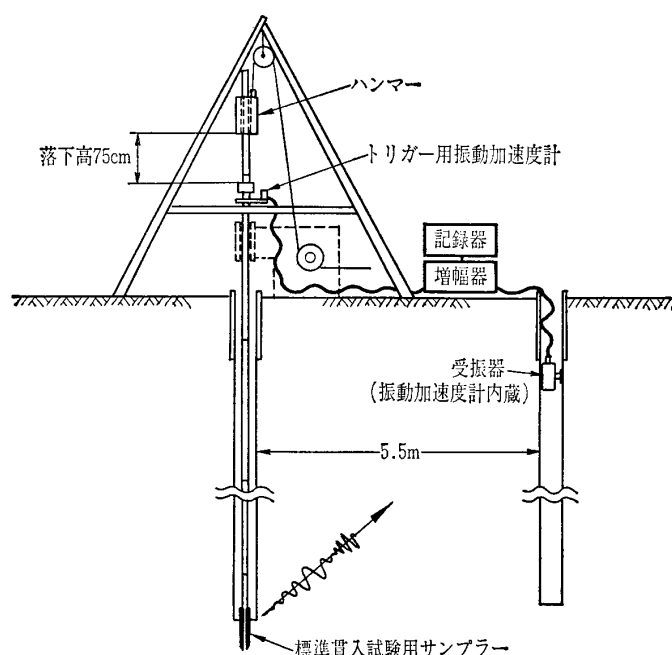
位置における PS 検層と呼ばれている弾性波速度試験から得られる。試験方法としては、ダウンホール法、クロスホール法およびサスペンション法等があるが、この原位置試験法は時間と経費の面から、手軽に実施するには、制約が大きい場合もある。

この場合、工学的な観点から、標準貫入試験から得られる N 値と PS 検層試験から得られる S 波速度の関係には相関性が指摘されており、数多くの経験式が提案されている。一般的にはこの経験式より S 波速度を推定している場合が多くみられるが、実測値と経験式より得られた値にはかなりの誤差が認められる場合も多い。この点に関して、これらの経験式が多くの現場における実測値に基づいた回帰式であり、真の V_s 値は推定値の $1/2 \sim 2$ 倍程度の範囲にばらつき、 N 値から推定した V_s 値の誤差が地盤の地震応答解析結果に影響を及ぼすことが最近報告されている²⁾。また、後藤ら³⁾は、標準貫入試験に伴って発生する弾性波に着目して、標準貫入試験の衝撃力を地表面において受振するアップホール法により弾性波速度を求めた例を報告している。

本調査では上記の点に着目し、一般の地盤調査において最も多用されている標準貫入試験時の打撃波から直接弾性波速度の評価が可能と考えられるアップホール法により、その伝播波を別孔において受振し、原位置における弾性波速度の計測を行った。さらに、得られた試験結果の信頼性を検討するために、同一箇所におけるダウンホール法およびクロスホール法による PS 検層試験結果⁴⁾との比較検討を行った。

2. 調査概要

現地調査は、千葉県千葉市稲毛区長沼原町の関東ローム層と成田砂層からなる洪積地盤において行った。調査深度は約8mであり、発振源は最終深度の

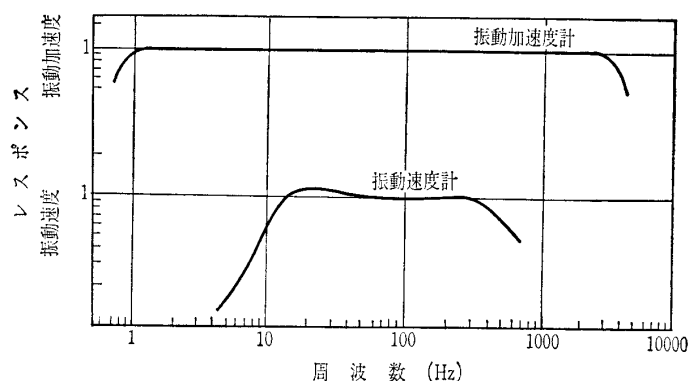


図—1 測定システムの概要

孔底で標準貫入試験を実施し、受振は5.5m離れた既設のボーリング孔を使用し、受振器を深度7mより順次引き上げて0.5mを最終深度とした、いわゆるアップホール法で行った。後藤ら³⁾が行ったアップホール法は、標準貫入試験に伴って発生する弾性波を地表で測定しているが、今回実施した手法は、上記のように標準貫入試験の実施孔とは別孔において弾性波を受振した、いわゆるダウンホール法の発受振点を逆にしたアップホール法である。

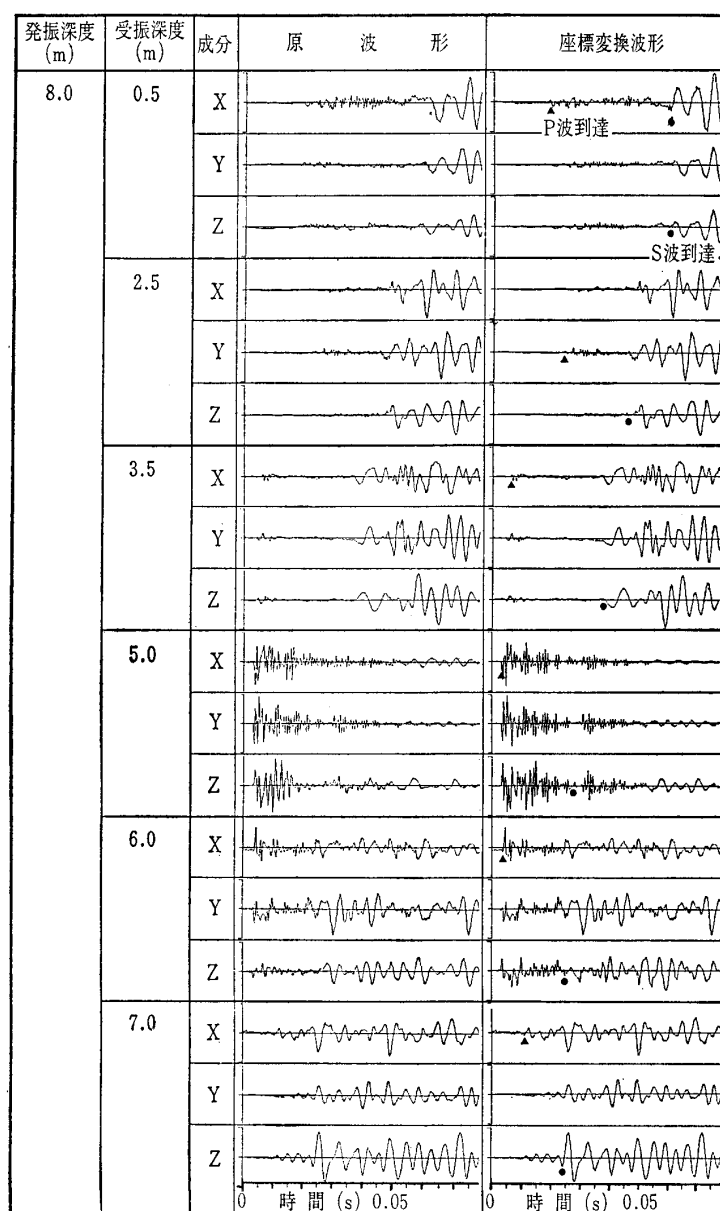
図—1に本調査の測定システムの概要を示す。受振器はボーリング孔中にあり、コードで吊られている。受振器は、所定の深度に引き上げた後、内蔵されたエアピストンの突出により孔壁に固定する。この受振器の測定成分は、直交水平方向2成分と鉛直方向1成分の計3成分である。なお、受振器の水平成分に関しては、各深度において水平方向のX・Y成分（X成分：波の伝播方向に対して前後方向成分，Y成分：波の伝播方向に対して左右方向成分）が変化している可能性がある。したがって、波形の再生時に、伝播波の伝播方向成分に合わせて、座標変換処理することにより波形の修正を行った。

今回は、伝播波の受振には波形の立上がり把握しやすい、いわゆる高周波成分が卓越する振動加速度を受振するため振動加速度計を使用

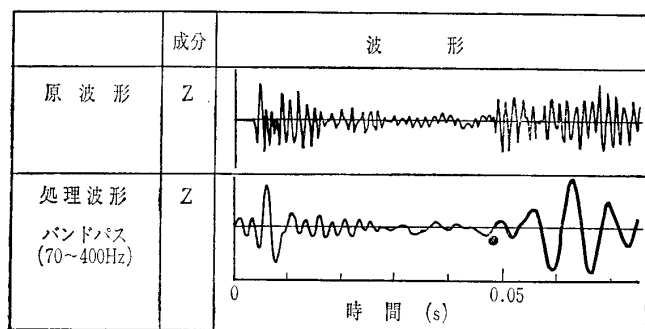


図—2 総合周波数特性曲線

した。この振動加速度計は、圧電型であり、感度は360 mV/Gとなっている。また、ダウンホール法で用いた振動速度計は、動電型であり、その感度は40



図—3(a) アップホール法による記録波形



図—3(b) 原波形と処理波形の比較例

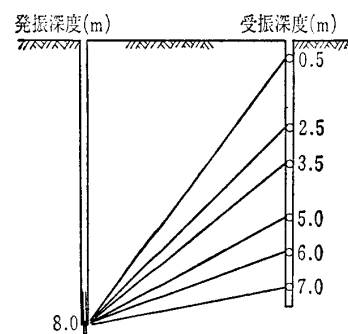
mV/kine であった。その受振器と増幅器の総合周波数特性とダウンホール法を実施したときの振動速度計の総合周波数特性を図—2 に示した。

受振した伝播波は、マイクロコンピュータにより A/D 変換（サンプリング間隔 0.0004 秒，サンプリング数 512 個，サンプリング時間 0.2048 秒）し，フロッピーディスクに記録した。

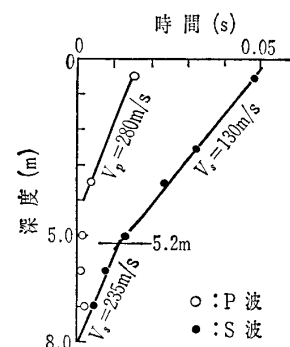
記録された波形はノイズと比べて比較的大きい振幅のため，スタッキングは行わなかった。図—3(a) は発振源深度を 8.0m としたアップホール法によって得られた各深度における X・Y・Z 成分の原波形を示している。なお，先述したように今回の手法では直交水平方向 2 成分が不定となるため，一般的によく用いられているような座標変換を行い，その結果得られた波形も比較のため同図に示した。

一般的には座標変換後の波形は原波形より，明りょうで初動の位置が読み取りやすい場合が多いが，今回の変換では両者の間には大きな変化は認められなかった。図より P 波の到達時間は水平方向の X 成分（Y 成分）から読み取ることができ，S 波の到達時間は鉛直方向の Z 成分より読み取ることができる。S 波の到達時間は発振源に近づくに従って短くなっているが，P 波の到達時間は深度 5 m 付近で最も短くなっている。

深度 5 m では得られた波形に P 波と考えられる高周波成分の波形が，P 波の立上がりから減衰することなく S 波の到達時間付近まで続いており，S 波成分の立上がり時間の読み取りを困難にしている。この高周波成分をバンドパスフィルター処理により取り除いた例を図—3(b) に示す。図より高周波成分を取り除くことによって，S 波の立上がりが見りょうに読み取ることが可能となる。以上のように，高周



図—4 発振源と受振位置



図—5 走時曲線

波成分やノイズ成分が含まれた波形はバンドパスフィルター等の処理により，正確な S 波成分波形を得ることができる。そのため複雑な波形の評価を行う際には注意が必要である。

なお，受振深度 2.5m の P 波に関しては，その到達時間がローム層の上下の深度における到達時間と傾向がかなり異なっていたため，ここでは削除した。

図—4 は，発振深度と受振深度の波線を示している。ここで，各深度において得られた弾性波の到達時間は弾性波が波線の距離を伝播して計測された時間である。この伝播時間は，ダウンホール法において一般的に行っているように鉛直距離の伝播時間に換算し，走時時間として図—5 に示した。さらに，同図には走時時間の平均勾配より求めた P 波・S 波の平均速度も示した。

なお，3.8m 以深の V_p 値は P 波の走時時間の変動が大きいために，走時時間の平均勾配より平均速度を求めることには問題がある。そのため，水の伝播速度と同程度の $V_p=1500$ m/s と評価した。

3. 試験結果および考察

今回実施したアップホール法によって得られた記録波形と，同一敷地内で実施されたダウンホール法

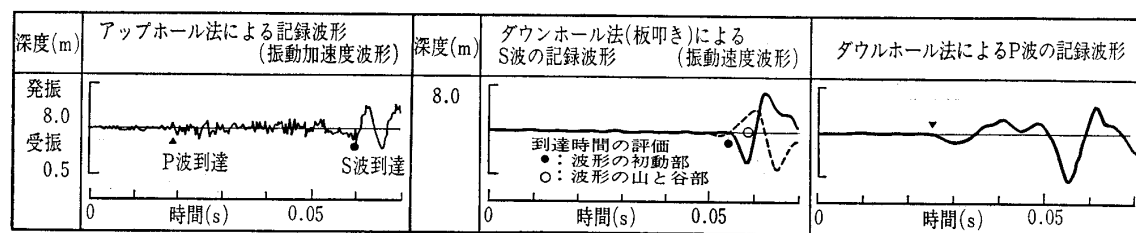


図-6 アップホール法とダウンホール法による代表的な記録波形

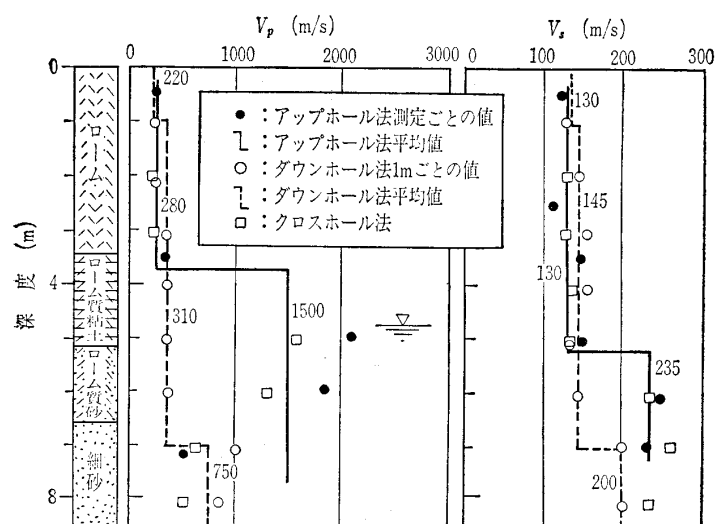


図-7 アップホール法、ダウンホール法、クロスホール法による弾性波速度の比較

による波形の一部を図-6に示す。アップホール法では振動加速度成分の波形を記録し、ダウンホール法では振動速度成分の波形を記録したため、両者の振幅および周波数はかなり異なる。

いま初動の立上がりに着目すると、アップホール法によるP波・S波の立上がりはかなり鋭いが、ダウンホール法ではゆるやかな立上がりを示している。これより、ダウンホール法においても●印で示した初動の立上がり時間を読み取ることができるが、一般的には、その立上がりはゆるやかであり、ノイズ等により初動が不鮮明な場合が多く、その結果、読取り精度を高くすることが困難となる。したがって、一般的にはS波の到達時間の読取りに際しては、○印で示したように最初の反転した山と谷の部分でその到達時間を評価している。

読み取った初動時間よりP波速度(V_p)・S波速度(V_s)を求め、その結果を図-7に示した。ここでは、今回得られた弾性波速度の信頼性を検討するために、既往のダウンホール法およびクロスホール法による結果も示した。関東ローム層における V_s 値は、アップホール法では112~153 m/s (平均値130

m/s)を示しているが、クロスホール法では127~136 m/s (平均値131.5 m/s)、ダウンホール法では130~154 m/s (平均値145 m/s)となっており、わずかなばらつきは認められるものの、平均値を求めると3手法ともほぼ同程度の値を示している。

この結果により、アップホール法とクロスホール法による V_s 値は、よく一致しており、ダウンホール法による値は両者よりわずかに大きめの値を示していることが明らかになった。さらに、クロスホール法によって得られた V_s 値は一般にほかの手法と比較して精度が高いことが報告されているが¹⁾、今回のようなアップホール法によってもクロスホール法と同等の値が得られることが明らかになった。

砂質土と砂層の V_s 値に関しては、アップホール法とクロスホール法は同程度の V_s 値を示しているが、ダウンホール法の V_s 値とは地層区分および N 値分布が異なるため、よい一致は認められなかった。

全測定値に対してクロスホール法による V_s 値($V_{s(CH)}$)とアップホール法による V_s 値($V_{s(UH)}$)を

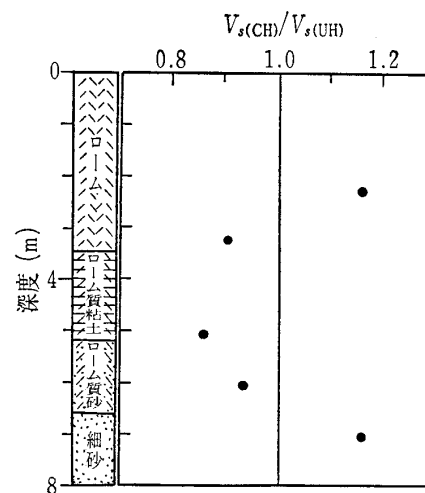


図-8(a) アップホール法とクロスホール法によるS波速度の比較

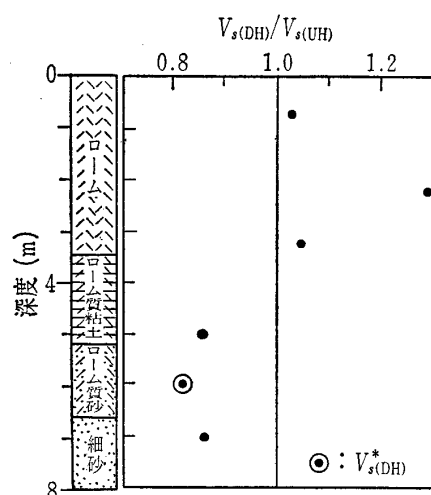


図-8(b) アップホール法とダウンホール法による
S波速度の比較

同深度で比較すると、図-8(a)に示すように、両者の比は、0.85～1.15の範囲にあった。また、ダウンホール法による V_s 値 ($V_{s(DH)}$) とアップホール法による V_s 値 ($V_{s(UH)}$) の比較では図-8(b)に示したようにローム層の3深度のうち2深度の V_s 値はほぼ同じ値であるが、1深度の V_s 値の比はアップホール法による値が30%程度小さな値となった。また、深度5m以深の砂質土層における3深度における比では、アップホール法による V_s 値は15～20%程度大きい値となった。

なお、図-8(b)の深度6mにおける値は、 N 値より土層構成が異なっていることが想定できるため、ダウンホール法により得られた V_s 値を用いず、 N 値に基づいた経験式⁵⁾ ($V_s = 91.0 N^{0.337}$) により求めた補正 V_s 値 (V_s^*) を用いた。これはアップホール法を実施した地点とクロスホール法を実施した地点はすぐ近傍であるが、ダウンホール法を実施した地点は両者の地点から10m程度離れていたために、地層の変化により N 値および土質定数がわずかに異なっていたためである。

上記のような探査手法の違いが V_s 値に及ぼす影響に関して、Woods (ウッズ)¹⁾ は Wilson (ウィルソン) ら⁶⁾ によるデータに関してダウンホール法とクロスホール法による V_s 値を比較し、その比は0.7～1.3の範囲内にあり平均値としては0.95程度の値を示しており、ダウンホール法による V_s 値はクロスホール法によるそれよりも5%程度過小評価している可能性があることを報告している。

一方、 V_p 値に着目すると、地下水位以上の地点における V_p 値はアップホール法で260～300 m/s (平均値280 m/s)、クロスホール法で223～235 m/s (平均値229 m/s)、ダウンホール法で227～342 m/s (平均値310 m/s) となり、アップホール法による値はダウンホール法のそれよりも30 m/s程度小さな値を示しているが、クロスホール法による値はアップホール法による値よりもさらに50 m/s小さめの値を示している。このことにより、アップホール法による V_p 値はダウンホール法による値とクロスホール法による値のほぼ中間の値が得られることが明らかになった。

なお、地下水位がダウンホール法を実施した時期より大きく上昇しているために、地下水位が変動した層の V_p 値は大きく変化した。また、地下水位以深では極端に速い値と遅い値が記録されているが、この原因に関しては現在検討しているが、明りょうな結論は得られていない。

今回の測定では、2本のボーリング孔を使用し、最終深度の孔底で標準貫入試験を実施し、他の孔において、受振器を移動して伝播波を受振するダウンホール法の発受振点を逆にした、いわゆるアップホール法で行った。その結果、標準貫入試験の最終深度における打撃波を別孔において最終深度より順次1m間隔で受振することによって、PS検層試験が可能となり得ることを示唆した。

以上の結果より、標準貫入試験の打撃に伴って発生する弾性波をアップホール法により受振することで、地盤の弾性波速度 (V_p , V_s) を比較的簡単に評価できることが明らかになった。

4. ま と め

一般の地盤調査において最も多用されている標準貫入試験に付随して直接弾性波の評価が可能なアップホール法を適用し、原位置における弾性波速度 (V_p , V_s) を求め、その妥当性を検討した。以下に、本調査より得られた主要な結論を列記する。

1) 標準貫入試験時の打撃に伴って地盤中に発生した弾性波をアップホール法により受振することで、原位置における弾性波速度 (V_p , V_s) がある程度精度良く評価できることを示唆した。

2) S波速度に関しては、アップホール法とクロ

報文—2225

スホール法による V_s 値は、よい一致性を示しており、ダウンホール法による値は両者よりわずかに大きめの値を示している。一方、アップホール法による P 波速度はダウンホール法による値とクロスホール法による値のほぼ中間の値が得られた。

3) 今回行った標準貫入試験を応用したアップホール法による PS 検層試験結果は、クロスホール法よりも簡便に実施することができる。また、得られた値はダウンホール法による値よりも、測定精度が高いと評価されているクロスホール法による値に近い結果が得られた。このことより、本手法の工学的有意性を実証した。

参 考 文 献

- 1) Woods, R.D.: Measurement of dynamic soil properties, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. 1, pp. 91~178, 1981.

- 2) 東畑郁生・Ronteix, S.: N 値から推定した V_s の誤差が地盤の地震応答解析結果に及ぼす影響, 第23回土質工学研究発表会 発表講演集, pp. 825~828, 1988.
- 3) Goto, N., Kagami, H., Shiono, K. and Ohta, Y.: An easy-capable and high-precise shear wave measurement by means of the standard penetration test, Proc. VIth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 6, pp. 2322~2327, 1977.
- 4) 中村嘉博・酒井運雄・亀井健史: 発振源の違いが PS 検層試験結果に及ぼす影響, 土と基礎, Vol. 39, No. 4, pp. 21~26, 1991.
- 5) Imai, T.: P-and S-wave velocities of the ground in Japan, Proc. IX ICSMFE, Vol. 2, pp. 257~260, 1977.
- 6) Wilson, S.D., Brown, E.R., Jr. and Schwarz, S. D.: In situ determination of dynamic soil properties, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM, STP654, Denver Symposium, pp. 295~317, 1977.

(原稿受理 1992. 5. 21)