

# 弾性波試験による安定処理土の強度測定

喜田大三 久保 博  
漆原知則

## Estimating Strength of Stabilized Soil by Velocity of Elastic Waves

Daizo Kita Hiroshi Kubo  
Kazunori Urushibara

### Abstract

Estimation of stabilized soils by elastic waves was studied. In laboratory tests, clay, sand, and combinations (two kinds) of the two were used mixing with cement, compacting after mixing with cement, compacting, and stabilizing Kanto loam by compacting after mixing with lime. (1) Velocities of S-waves ( $V_s$ ) were correlated with the unconfined compressive strength ( $q_u$ ) of  $V_s \approx 186 q_u^{0.534}$  in stabilized clay, sand, and their mixtures, and of similar correlation with natural ground in stabilized Kanto loam, and consequently useful in estimating  $q_u$ . (2) Velocities of P-waves ( $V_p$ ) were correlated with  $q_u$ , density, and with degree of saturation in a part of the samples which were of relatively low degrees of saturation. (3) The  $q_u$  gained from  $V_s$  in layer samples of various values of  $q_u$  were generally similar to the average  $q_u$  of the layer sample. (4) Values of  $V_s$  were correlated with those of  $q_u$  in the field, and may be useful in estimating  $q_u$ .

### 概要

弾性波（S波、P波）による安定処理土の強度測定を検討した。室内試験では、港湾埋立地の粘土、砂および両者の混合試料（2種）のセメント混合試料、セメント混合→突固め試料、突固め試料、また関東ロームの消石灰混合→突固め試料を用いた。その結果、

- (1) 室内試験において、S波速度( $V_s$ )は、関東ローム処理土以外では試料の種類、処理方法、養生日数に関係なく、 $V_s \approx 186 \cdot q_u^{0.534}$  ( $q_u$ ; 一軸圧縮強さ)、また関東ローム処理土では既往資料の自然地盤の  $V_s \sim q_u$  関係と類似し、 $V_s$  を  $q_u$  推定に適用可能と認められた。
- (2) 室内試験において、P波速度( $V_p$ )は、飽和度の比較的低い試料では強度、密度および飽和度と相関を示す場合がある。
- (3) 室内試験において、強度の異なる層状試料の  $V_s$  から推定した強度は、試料の平均強度よりも小さいが、通常の場合には大差ない。
- (4) 港湾埋立地の表層セメント安定処理工事における現地試験の結果、現地でも  $V_s$  を  $q_u$  推定に適用できる可能性が示唆された。

### 1. まえがき

土質安定処理工事における施工管理では、安定処理土の強度管理が重要な位置を占める。強度測定の方法として、現在広く採用されているのは、①コーン貫入試験、②一軸圧縮試験、③標準貫入試験などである。しかし、これらは安定処理土に適用する際にそれぞれ難点もある。例えば、①は非常に簡易であるが、精度面で劣り、また強度の大きい地盤では困難である。②は精度面で優れているが、供試体の採取・成形にかなりの労力を要する。さらに、③は深いところまで地盤強度を把握できる

が、精度面で劣り、また装置が大がかりである。

ところで、従来から弾性波(特にS波)の伝ば速度は土の力学的性質と高い相関を示すことが知られている。弾性波試験は、比較的簡単な操作で試験でき、迅速に結果が得られ、また非破壊試験であるなどの特長を有する。

そこで、安定処理土の強度測定方法として弾性波試験(超音波パルス透過法、板たたき法)の適用を検討した。

### 2. 供試土と試験方法

室内試験では、表-1に示すように5種類(A~E)の土を用いた。AおよびDはT港湾埋立地から採取した

粘土および砂である。そして、BおよびCは、AとDの中間的な粒度組成の試料を得るため、AとDを同表に示すような比率で、それぞれ混合した試料である。また、Eは関東ローム（立川ローム層）である。

試料	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)	粒度による分類	調製含水比 (%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	I <sub>p</sub>	G <sub>s</sub>	備考
A	69	17	14	粘土	90~150	99	28	71	2.66	港湾埋立地の粘土
B	38	15	47	粘土	17~90	55	19	36	2.63	A : D = 1 : 1で混合
C	21	13	66	粘土質砂	50	NP	NP	—	2.61	A : D = 1 : 3.8で混合
D	9	11	80	砂	30	NP	NP	—	2.60	港湾埋立地の砂
E	23	55	22	粘土質シルト	110~120	170	82	88	2.79	関東ローム

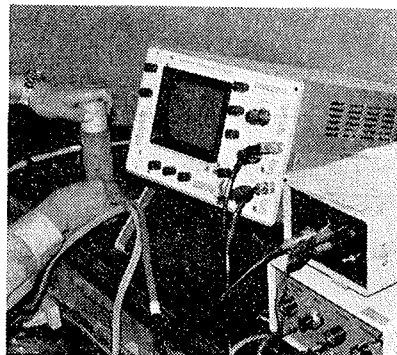
表一 供試土の性状

処理の概要	混合材の量 (湿潤質量比)	突固めエネルギー	養生日数	対象試料土
セメント混合 (突固めなし)	2~15%	なし	7日, 60日	A, B, C, D
セメント混合 + 突固め	2~8%	2~40kgf/cm <sup>2</sup>	14日	B
突固め	なし	2~40kgf/cm <sup>2</sup>	14日	B
消石灰混合 + 突固め	10~25%	20kgf/cm <sup>2</sup>	14日	E

\*飽和度はほぼ100%の流動状試料のため突固めを必要としない。

表二 安定処理土供試体の作製方法

つぎに、試験方法について概述する。まず、室内試験においては、表一に示すように4種類の処理によって供試体を作製した。各供試体の大きさはいずれも直径5cm、高さ10cmとした。そして、供試体の上面および底面を滑らかになるように成形したのち、写真一のようにして超音波パルス透過法を用いた試験器によって、S波速度（以下、V<sub>s</sub>）およびP波速度（以下、V<sub>p</sub>）を測定した。発生器の周波数は、S波で40kHz、P波で100kHzである。また、弾性波が透過し難い試料では供試体の高さを短かくして試験した。そして、弾性波試験に引き続き、同一試料について一軸圧縮試験を行なった。また、現地試験は、T港湾埋立地で施工中の表層セメント安定処理工事の現場において行なった。この



写真一 室内試験における弾性波試験 (超音波パルス透過法)



写真二 現地試験における弾性波試験 (板たたき法)

れた超軟弱な地盤において、シート敷設および覆土に先立って、表層1mを幅4mの格子状に固化処理することが行なわれている。弾性波試験は、地盤強度の異なる場所を選定して合計8地点で行ない、S波およびP波を板たたきで発生させ、それを表層に列に埋設（50cm間隔で12個）した受振器によって検出しV<sub>s</sub>およびV<sub>p</sub>を求める方法で行なった(写真一)。そして、各測定地点において3カ所からブロック状試料を採取し、成形して一軸圧縮試験を行なった。

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 強度とV<sub>s</sub>, V<sub>p</sub>の関係

室内試験における安定処理土の強度とV<sub>s</sub>の関係を図一に示す。両者の関係は両対数紙上でほぼ直線の関係を示した。そして、「試料Eの消石灰混合・突固め土(図中△印)」を除くと、V<sub>s</sub>は処理土の粒度組成および含水比、セメント添加量、突固めエネルギー、養生日数などによってほとんど影響されず、最小2乗法によって次式で表わされた。

$$V_s = 186 \cdot qu^{0.534} \dots\dots\dots(1)$$

(試料数: 110 相関係数: 0.95)

V<sub>s</sub>: S波伝ば速度 (m/s)

qu: 一軸圧縮強さ (kgf/cm<sup>2</sup>)

この関係式は、図中に併記している小泉ら<sup>1)</sup>によるセメント固化土の場合と非常によく一致している。

しかし、(1)式によるV<sub>s</sub>は、矢野ら<sup>2)</sup>によるセメント固化土の試験結果、および嶋・大谷ら<sup>3)</sup>による各種地盤(沖積土、洪積土、ローム、泥岩)の現地試験結果に比べて、大きな値を示した。そして、(1)式から大きくはずれた傾向を示した「試料Eの消石灰混合・突固め土」は、ばらつきが大きいけれども、嶋・大谷ら<sup>3)</sup>による試験結果と類似した値を示す場合が多かった。

以上のことから、安定処理土のV<sub>s</sub>は強度と高い相関を示し、土粒子および結合物質の性状などと密接な関係のあることが示唆される。そして、V<sub>s</sub>は多少のばらつきを有するが、室内試験における安定処理土の強度測定に適用しうると考えられる。但し、その際、土の性状および安定処理の方法などによって、V<sub>s</sub>~qu関係式が異なる場合があるので、予備試験によって対象試料のV<sub>s</sub>~qu関係式を求めておく必要があると考えられる。

つぎに、強度と  $V_p$  の関係を図-2に示す。 $V_p$  は試験結果全体に対しては強度との相関を示さないけれども「試料Bのセメント混合・突固め土（図中○および●印）」のうち、飽和度が80%以下の試料（○印）のみに着目すると、強度との間に相関を示すことが認められる。このことは以下のように推察される。

周知のように、水中の  $V_p$  は約 1,500 m/s である。他方、処理土の間隙には水分が存在している。従って、P波は、飽和度の高い土では間隙水の部分を通過する機会が多いのに対して、飽和度の低い土では土粒子や結合物質などの固体の部分を通過する機会が多いと考えられる。そのため、飽和度の低い土における  $V_p$  は、土粒子や結合物質の性状を反映している強度にも影響され、強度とともに増大すると考えられる。

しかし、図-2において、「試料Aのセメント混合土（●印）」の一部は飽和度がほとんど100%であるにもかかわらず、 $qu$  0.5~1.5 kgf/cm<sup>2</sup> の試料の一部で  $V_p \approx 700 \sim 1,000$  m/s と小さい値を示しており、この原因については明らかでなく、今後さらに究明していく必要がある。

さて、図-3に  $V_s$  と  $V_p$  の関係を示す。両者の関係からポアソン比 ( $\nu$ ) が、 $\nu = (V_p^2/2V_s^2 - 1)/(V_p^2/V_s^2 - 1)$  によって求められる。同図のように、飽和度がほとんど100%の「試料A~Dのセメント混合土（●印）」の  $\nu$  は0.4~0.5に近く、飽和度が比較的低い試料（●印以外）の  $\nu$  は0.35~0.45を示す場合が多かった。

### 3.2. 密度、飽和度と $V_p$ の関係

密度（ここでは湿潤密度をいう）と  $V_p$  の関係を図-4に示す。 $V_p$  は土の性状および安定処理の方法によって、密度と相関を示す場合と、相関を示さない場合がある。「試料Bの突固め土（図中×印）」の場合、 $V_p$  は密度とともに増大し、井上ら<sup>4)</sup>の報告している突固めた粘

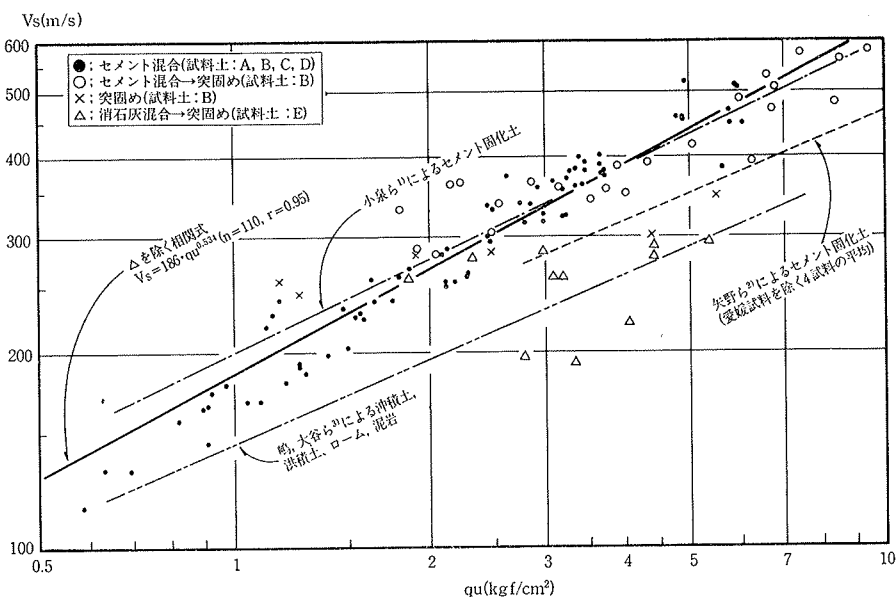


図-1 一軸圧縮強さとS波伝ば速度の関係

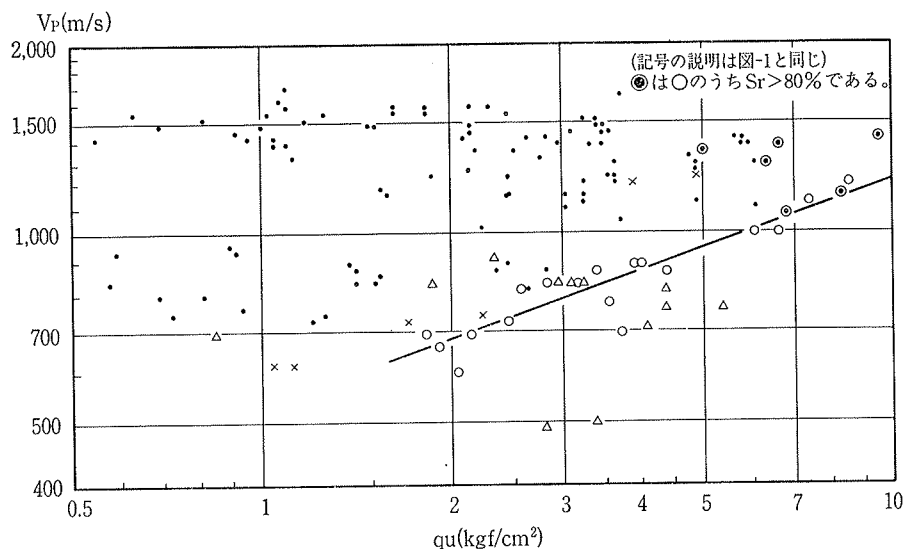


図-2 一軸圧縮強さとP波伝ば速度の関係

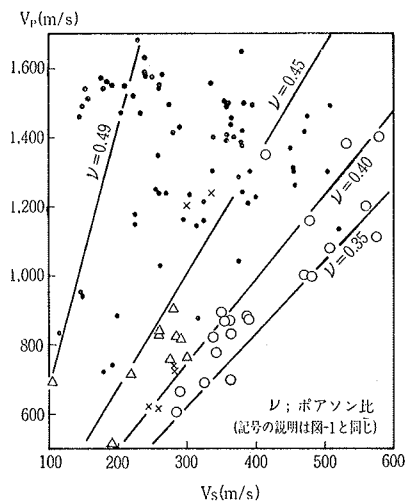


図-3 S波伝ば速度とP波伝ば速度の関係

性土の結果とほぼ同じ値を示した。また、「試料Bのセメント混合・突固め土(○印)」および「試料Eの消石灰混合・突固め土(△印)」の場合、ばらつきが大きいけれども、 $V_p$  は密度とともに増大する傾向が僅かに認められる。一方、「試料A～Dのセメント混合土(●印)」の場合、 $V_p$  は密度との相関を示さなかった。

これらのことから、突固めを行なった試料では  $V_p$  が密度との相関を示すことが示唆される。従って、突固めを行なった試料のように、飽和度が比較的低い試料においては、 $V_p$  が密度との相関を有すると考えられる。

つぎに、飽和度と  $V_p$  の関係を図-5に示す。「試料Bのセメント混合・突固め土(○印)」および「試料Bの突固め土(×印)」では、 $V_p$  は飽和度とともに増大することが認められた。

以上、 $V_p$  は飽和度の比較的低い安定処理土では密度および飽和度に関する情報を与える場合があることが判明した。なお、 $V_s$  と密度、飽和度との相関は明らかにされなかった。

### 3.3. 強度の異なる層状試料の強度と $V_s$ の関係

3.1. に述べたように、室内試験では  $V_s$  を安定処理土の強度測定に適用し得る。そこで、つぎに  $V_s$  を現場での強度測定に適用する際の問題点として、以下のような検討を行なった。

すなわち安定処理を行なった現場の地盤は完全に均一というわけではなく、ある程度の強度のばらつきは避けられない。このように異なる強度の部分からなる安定処理地盤において、 $V_s$  の値から強度を推定した場合、その強度はどのような意味をもつかについて検討した。

室内試験において、表-3に示すように、強度の異なる3種類の円柱形固土試料(試料Aにセメントを混合して作製、直径5cm)を作製し、所定の高さに切断し上・

下面を滑らかに成形した。そして、各試料を2層あるいは3層に積重ねた試料(ここでは層状試料という)について、S波伝ば速度を測定した。その結果を表-3に示す。

層状試料の  $V_s$  および  $q_u$  はつぎの計算式より求まる。

$$\bar{V}_{sa} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{\frac{l_1}{V_{s1}} + \frac{l_2}{V_{s2}} + \dots + \frac{l_n}{V_{sn}}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$\bar{V}_{sa}$ ; 層状試料のS波速度  
n; 層状試料の層数

$l_1, l_2, \dots, l_n$ ; 第1, 2, ..., n

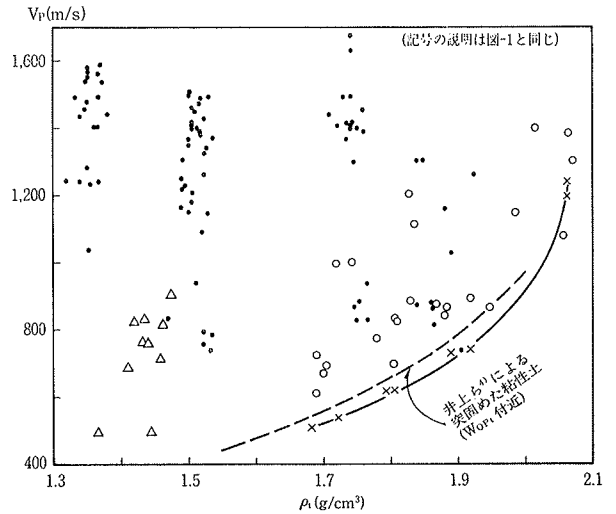


図-4 湿潤密度とP波速度の関係

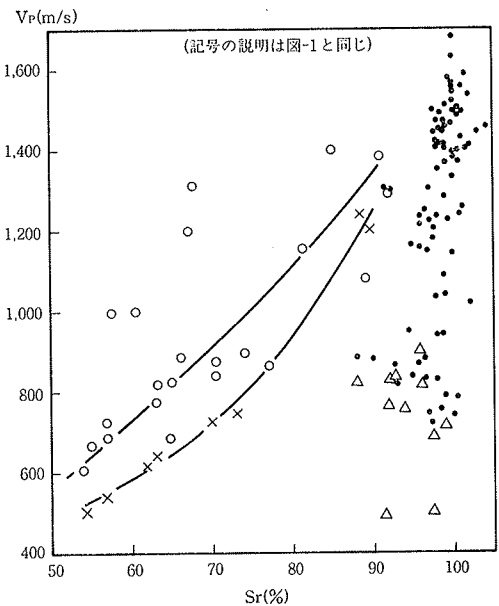


図-5 飽和度とP波速度の関係

No.	1	2	3
実験概要 (供試体はφ5cm)			
平均強度 $\bar{q}_{ua}$	3.29kgf/cm <sup>2</sup>	2.89kgf/cm <sup>2</sup>	4.97kgf/cm <sup>2</sup>
計算による平均速度 $\bar{V}_{sa}$	329m/s	306m/s	381m/s
実測による速度 $\bar{V}_{sb}$	332m/s	296m/s	379m/s
$\bar{V}_{sb}$ に対応する強度 $\bar{q}_{ub}$	2.96kgf/cm <sup>2</sup>	2.39kgf/cm <sup>2</sup>	3.80kgf/cm <sup>2</sup>
$\bar{q}_{ub}/\bar{q}_{ua}$	90%	83%	76%

表-3 層状試料の一軸圧縮強さおよびS波伝ば速度

層の層厚

$V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sn}$ ; 第 1, 2, ..., n 層の S 波速度

なお, 表-3 に示すように,  $V_{sa} \doteq \bar{V}_{sb}$  であった。

$\bar{V}_{sb}$ : 層状試料の実測による S 波速度

$$\bar{q}_{ua} = \frac{l_1 \cdot q_{u1} + l_2 \cdot q_{u2} + \dots + l_n \cdot q_{un}}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \dots\dots\dots(3)$$

$\bar{q}_{ua}$ : 各層の一軸圧縮強さから計算される層状試料の一軸圧縮強さ

$q_{u1}, q_{u2}, \dots, q_{un}$ : 第 1, 2, ..., n 層の一軸圧縮強さ

ところで,  $q_u$  と  $V_s$  の関係は(1)式のように,  $V_s = r \cdot q_u^\delta$  ( $r, \delta$  は定数) で表わされるが, ここでは  $q_u$  が  $0.5 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲内で次のような一次式を用いても, 実用上ほとんどさしつかえない。

$$V_s = \alpha + \beta \cdot q_u \dots\dots\dots(4)$$

( $\alpha, \beta$  は定数)

(4)式を変形した(5)式を(3)式に代入すると, (6)式を得る。

$$q_u = \frac{V_s - \alpha}{\beta} \dots\dots\dots(5)$$

$$\bar{q}_{ua} = \frac{\frac{V_{s1} - \alpha}{\beta} l_1 + \frac{V_{s2} - \alpha}{\beta} l_2 + \dots + \frac{V_{sn} - \alpha}{\beta} l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \dots\dots\dots(6)$$

また,

$$\bar{q}_{ub} = \frac{\bar{V}_{sb} - \alpha}{\beta} \dots\dots\dots(7)$$

$\bar{q}_{ub}$ : 層状試料の実測 S 波速度から推定される層状試料の一軸圧縮強さ

現場で測定した S 波速度から強度を推定する場合, (7)式によって  $\bar{q}_{ub}$  を求めることになる。しかし,  $\bar{q}_{ub}$  は実際に求めようとする層状試料の平均強度  $\bar{q}_{ua}$  とは異なり,  $\bar{q}_{ub} < \bar{q}_{ua}$  の関係にある。表-3 に示した結果では,  $\bar{q}_{ub}/\bar{q}_{ua}$  比は  $76 \sim 90\%$  であった。

そこで,  $\bar{q}_{ub}/\bar{q}_{ua}$  比に影響を及ぼす層数  $n$ , 各層の層厚  $l_n$ , および各層の S 波速度  $V_{sn}$  について検討した。その結果,  $\bar{q}_{ub}/\bar{q}_{ua}$  比は,  $n$  が少ないほど, 各層の層厚  $l_n$  の差が小さいほど, また各層の  $V_s$  の差が大きいほど減少することが判明した。そして, 現場で通常認められる強度のばらつき程度では,  $\bar{q}_{ub}$  を用いて管理するとやや安全側の管理となるけれども, 実用上ほとんど問題なく適用できることが明らかになった。

3.4. 現地における強度と  $V_s$  の関係

T 港湾埋立地のセメント表層固化工事の現場における強度と  $V_s$  の関係を図-5 に示す。測定地点が 8 地点と少なく, またかなりばらつきはあるが, 現地の  $V_s$  は強

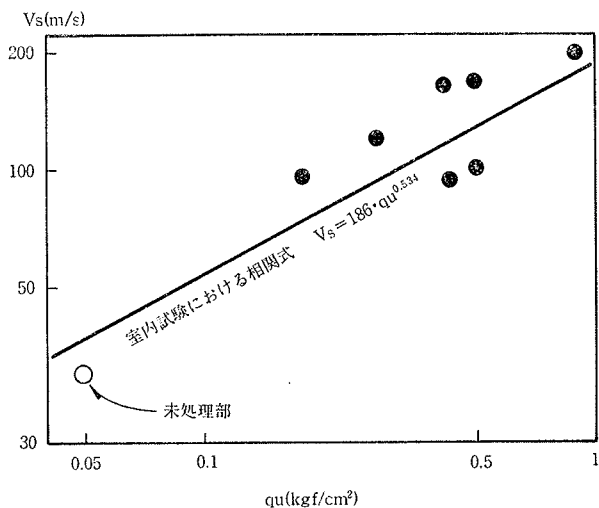


図-6 現地における強度と S 波速度の関係

度とともに増大する傾向にあり, 室内試験の結果とはほぼ類似することが認められた。

このことから, 現地強度の測定にも  $V_s$  を適用できる可能性が示唆される。しかし, その実用化のためには, 試験機の改良, 測定精度の向上, データの集積ならびに解析手法の確立などが必要と考えられる。

4. あとがき

以上述べたように, 安定処理土の強度測定方法として弾性波の伝ば速度を用いる方法は, 強度との相関がかなり高く有望な方法であると考えられる。

この弾性波試験による安定処理土の強度測定を広く実用化するためには, 今後さらに調査・検討を行ない, 測定精度および結果の信頼性の向上などが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 小泉, 酒向, 新井, 岸山: セメントスラリーの軟弱地盤への適用について, 第12回土質工学研究発表会講演集, (1977), pp.1289~1292
- 2) 矢野, 徳永, 楨元: 固化土の非破壊試験による強度推定, 第14回土質工学研究発表会講演集, (1979), pp.1657~1660
- 3) 今井, 吉村: 地盤の弾性波速度と力学的性質, 物理探査, Vol.25, No.6, (1972), pp.15~24
- 4) 井上, 谷口: 弾性波を利用した土層の密度探査法, 土と基礎, Vol.24, No.3, (1976), pp.27~31