

ベンダーエレメントによる土の弾性定数の測定

福山大学工学部

福山大学大学院

岡田組

四国道路エンジニアリング

正会員

学生会員 ○

西原 晃

桂 勸

河野 幸宏

三木 徳雄

1. はじめに

深層混合処理工法によって改良された地盤の改良効果の判定方法の一つとして弾性波を利用した探査法が行われている。この弾性波探査法では、主にP波（圧縮波）が用いられているが、過去の土質地盤におけるP波・S波速度検層結果から、地盤のS波（せん断波）速度の方がP波速度よりも地盤の地層境界や物理変化をより敏感に反映することが知られている。本研究では近年開発された、ピエゾセラミック・ベンダーエレメントを用いて、セメント混合土内のS波とP波の伝播速度の測定を行い、セメント混合土の弾性定数を求めるとともに一軸圧縮強度との関係について調べた。

2. 試料と実験概要

(1) 試料 試料は、表-1に示すように、含水比120%のカオリナイトにセメントを2, 4, 6%混合した3種類のセメント混合土を使用した。試料は一軸供試体用のモールド（内径50mm、高さ100mm）で作成した後、水中養生し、1, 2, 3, 7, 14, 21, 28日の時点で弾性波の測定と一軸圧縮試験を行った。

(2) 弾性波の測定

ピエゾセラミック・ベンダーエレメントは、電気・機械的な運動の変換機で、機械的なエネルギーを電気のエネルギーに変換あるいはその逆の変換を行うことができる。本実験では、ベンダーエレメントとして、パイモルフ型アクチュエーター（村田製作所製）を使用した。このベンダーエレメントをセメント混合土の円柱供試体の上下端にさし込み、試料上部の発振エレメントに電気信号を与えて振動させ、この振動を下部の受振エレメントで感知し、電気信号に変換してオシロスコープに写し出し、伝播時間を測定する。

図-1は、受振した弾性波を示したもので、初期微動の開始点をP波の到達時点、それに続く大きな波の開始点をS波の到達時点とした。発振用の電気信号としては矩形波を与え、発振信号と弾性波の到達時点の時間差として弾性波の伝播速度が求められる。弾性波の伝播速度は、伝播時間を波の伝播距離で除して求められるが、予備実験の結果、P波の伝播距離は供試体の全長、S波の伝播距離は上下のベンダーエレメントの先端間の距離となることがわかった。

3. 実験結果

弾性波の伝播理論によれば、S波の伝播速度（ V_s ）とP波の伝播速度（ V_p ）より、弾性係数（ E ）、せん断弾性係数（ G ）、ポアソン比（ ν ）を以下のように求めることができる。

$$G = \rho V_s^2 \quad (\rho : \text{密度}) \quad (1)$$

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 / 2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (2)$$

表-1 試料

No	C/(S+W)	W/S
A	0.02	1.20
B	0.04	1.20
C	0.06	1.20

S:土 W:水 C:セメント

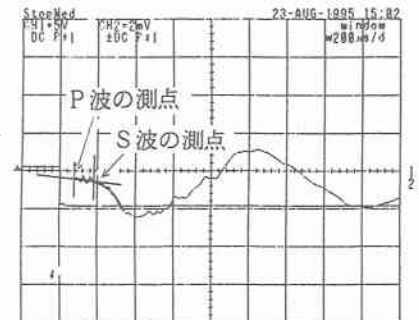


図-1 受振波

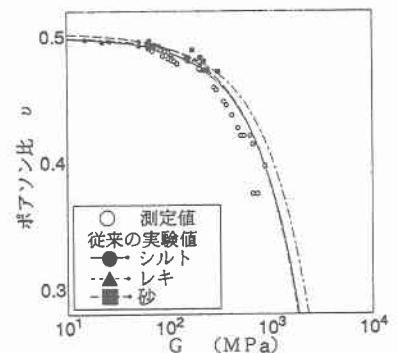


図-2 Gとνの関係

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3)$$

図-2はベンダーエレメントで求めたポアソン比とせん断弾性係数との関係を表したもので、過去に報告されている結果もあわせて示している。今回の実験で求められたポアソン比とせん断弾性係数の関係は、従来報告されている結果とよく対応しており、ベンダーエレメントにより、S波、P波が適切に測定できたものと考えられる。

従来より一軸強度 qu とせん断弾性係数 G の間には比例関係が成り立つことが報告されている。図-3は本実験より得られた G と qu の関係を示したもので、一軸強度はせん断弾性係数にほぼ比例し、 $qu = 6.67 \times 10^{-4} G$ (相関係数: 0.748) (4)

の関係が得られた。また、この比例関係には、セメントの混合割合、養生日数による差は見られなかった。

せん断速度 V_s からせん断弾性係数を求めるには、土の密度 ρ が必要となってくる。しかし原地盤における弾性波探査では、 V_s から直接的に一軸強度を求められることが望ましい。そこで、本実験での密度の平均値 $\rho = 1.478 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ を用いて、 qu と V_s の関係を求めると、

$$qu = 0.975 V_s^2 \quad (5)$$

の関係が得られる。また、通常のセメント混合土の密度は $(1.4 \sim 1.8) \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ であるから、この値を用いると、

$$qu = (0.934 \sim 1.200) V_s^2 \quad (6)$$

となる。図-4は、一軸強度とせん断波速度の関係を示したもので、式(5)、(6)の関係がほぼ満足されることがわかる。

遠山らは、セメント混合による地盤改良土の圧縮波速度 V_p と qu の間に、 $qu = 1.114 \times 10^{-9} V_p^{3.322}$ (7)

の関係が成り立つことを報告している。図-5は、本実験で得られた V_p と qu の関係を示したものであるが、測定結果はばらつき、 V_p と qu の間に高い相関性は見られなかった。

4. 結論

本実験の結果、ベンダーエレメントにより、弾性波の伝播速度が簡便にまた適切に測定できること、また伝播速度から土の弾性定数を適切に求めることができることがわかった。さらに、一軸圧縮強度との相関については、圧縮波にくらべてせん断波の相関が高く、地盤改良の判定においては、せん断波を用いた探査が有効であることがわかった。なお、本実験で使用したバイモルフ型アクチュエーターは村田製作所の御好意により提供していただいたものである。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>1) Rune Dyvik Christia Madhus "LAB MEASUREMENTS OF G_{max} USING BENDER ELEMENTS" 2) 遠山邦夫、茶山和博、大内義仁、西田正晴: "土と基礎" Vol.35 No.5 3) A Workshop in NAPORI: "Experimental characterization and modelling" 4) 石田研而: "土質動力学の基礎" 5) 第一回改訂版 編集委員会: "土質調査試験結果の解釈と適用例"

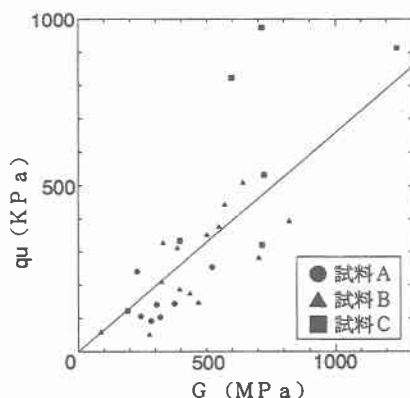


図-3 qu と G の関係

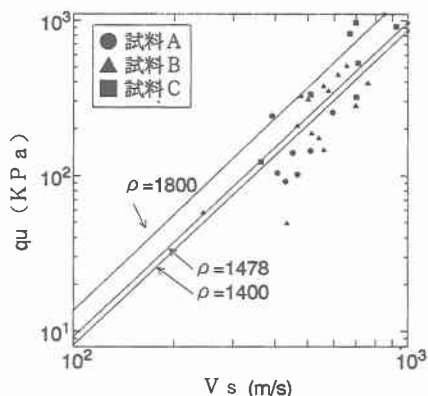


図-4 qu と V_s の関係

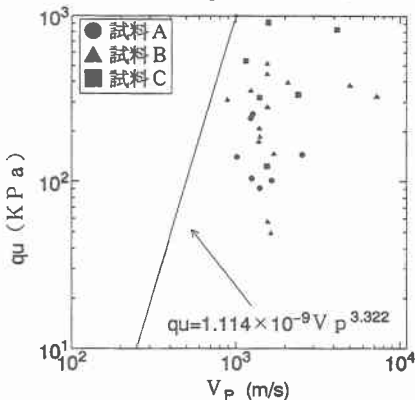


図-5 qu と V_p の関係