

ベンダーエレメント試験で測定した養生初期のセメント処理土の弾性係数と 発現した強度の関係

Relationship between Shear Modulus Measured by Bender Element Test and Unconfined Compressive Strength of Cement Treated Clays

姜 庚吾 Gyeong-o KANG (広島大学大学院工学研究科)
脇岡宏行 Hiroyuki WAKIOKA (鹿島建設(株))
土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究院)

本研究ではベンダーエレメント試験を利用して短い期間で連続的にセメント処理土の弾性係数の増加傾向を測定し、その結果から養生3日の強度を予測することを目的として実験的検討を行った。セメント処理土の養生時間、セメント添加率、含水比を変化させてベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数と一軸圧縮強度を測定することにより、両者の関係を明らかにした。せん断弾性係数と一軸圧縮強度は、養生時間によって同様の挙動を示し、いずれも養生時間3日前後を境として増加傾向が変化することがわかった。一連の試験結果より、ベンダーエレメント試験で求めたせん断弾性係数を用いた一軸圧縮強度推定式を提案した。

キーワード：セメント処理土，せん断弾性係数，一軸圧縮強度 (IGC:D-6)

1. はじめに

毎年、日本では港湾や水路の維持管理のために川や海の底に堆積している多くの粘土質の土砂を浚渫している。浚渫土の処分には、多くの処理コストと処分場所が必要になるので、その有効利用が大きな課題となっている。近年軟弱地盤上の廃棄物埋立地や空港・港湾建設のために現場で発生する浚渫粘土は、管中混合処理工法によってセメントと混合され、土構造物の本体を構成する材料として使用されている¹⁾²⁾。また、これらの浚渫土に気泡やEPSのような軽量化材料とセメントを混合して軽量土を造成し、岸壁などの裏込め材料として使用する場合もある³⁾⁴⁾。

一般的に、セメント処理浚渫粘土の強度は一軸圧縮試験と三軸圧縮試験のような室内試験を通じて評価されている。これらの室内試験は、様々な養生時間で多くの供試体を作製し、それに応じて実験を行うため、多くの時間や手間、費用がかかる。Kogureら⁵⁾は、再整形粘土に対して一軸圧縮試験、ベーンせん断試験、直接せん断試験を実施した。研究結果によると、ベーンせん断試験から得られた強度は一軸圧縮試験と直接せん断試験から得られた強度よりも大きく評価されている。これは、室内試験の種類によって、処理土の強度評価が変わることを示している。また、一軸圧縮試験などの破壊試験は同一した条件で作製された供試体を用いても強度にばらつきが生じる場合があり、

たとえば同一条件の試料が養生期間によってどのように強度が変化するかを調べる場合、供試体のばらつきによって養生時間の影響が明確に現れない場合がある。配合試験から得られたセメント処理土の強度が同一の試料を用いた非破壊試験により、短い期間で連続的に強度増加傾向を調べた結果から強度を予測できれば、工学的に有用であると考えられる。以上の考えから、本研究では非破壊試験の一つとしてベンダーエレメントにより測定したセメント処理土の弾性係数を用いることを検討した。

ベンダーエレメントは、三軸セルのキャップに設置され、供試体の剛性測定にトランスデューサーとして Shirley and Hampton⁶⁾によって初めて地盤工学分野に活用された。ベンダーエレメントを使用して、せん断弾性係数を測定し、強度や密度などの既存の物性値の相関関係を究明するために、これまでに多くの研究が行われてきた⁷⁾。Consoliら⁸⁾は、セメントで固結された砂のせん断弾性係数と一軸圧縮強度を測定し、間隙/セメント体積比で相関関係を示した。Flores et al. (2010)⁹⁾は、高炉スラグとポルトランドセメント、カオリンナイトについて室内でせん断弾性係数を測定し、計測されたせん断弾性係数を用いて一軸圧縮強度との相関関係を導出した。また、Seng and Tanaka¹⁰⁾は、5時間以内の初期養生段階でセメント処理土のせん断弾性係数とベーンせん断試験とフォールコーン試験を通じて得られた非排水せん断強さの相関関係を究明した。しかし、

ベンダーエレメントで試験を行うためには、供試体にベンダーエレメントを貫入しなければならず、このような過程で乱れが発生する問題がある。また、セメント処理土の初期養生強度が予測できればセメント処理土の配合工程及び打設の過程において有用であると考えられる。しかし、セメント処理土のせん断弾性係数の測定に関する研究は十分でなく、初期養生段階すなわち3日以内のせん断弾性係数を用いた一軸圧縮強度の推定式は提案されていない。

本研究では、セメント処理土の強度予測のためにベンダーエレメント試験から求めたせん断弾性係数と一軸圧縮強度の相関関係を比較分析した。徳山浚渫粘土に様々なセメント添加率(10%, 20%, 30%)と含水比(1.5w_L, 2.0w_L)の条件で供試体を製作し、5時間から90日までの幅広い範囲の条件で養生した。養生された供試体に対して、ベンダーエレメント試験と一軸圧縮試験を実施した。本実験の結果から得られたせん断弾性係数は、含水比と体積比の相関関係を用いて、養生時間5時間から3日までのせん断弾性係数の推定式を提案した。また、せん断弾性係数と一軸圧縮強度の相関関係に基づいて強度の推定式を提案した。

2. 供試体の組成とベンダーエレメント試験

実験試料は徳山港において浚渫された粘土（以下、徳山港粘土と表記）を用いて行った。表-1に徳山港粘土の物理特性を示す。また、セメントは普通ポルトランドセメント(ρ_c=3.15g/cm³)を使用した。本研究で実施された一軸圧縮試験およびベンダーエレメント試験は、表-2に示すように、様々な条件で行われており、セメント添加率は、式(1)のように土の乾燥質量とセメント質量の総和に対するセメント質量の割合と定義する。

$$c^* = \frac{m_c}{m_s + m_c} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここで、m_sは土の質量、m_cセメントの質量である。

本研究では、セメント添加直後からの強度の変化を検討するうえで、セメント添加による固体成分の増加による効果と、セメントの化学反応の効果に分けることを考え、固体成分の質量(m_s+m_c)に注目した。ここで、セメント添加による固体成分の増加による効果とは、セメントを添加することで固体成分が増加し、物性が変化することを指している。

2.1 供試体の組成

浚渫粘土は貝殻などの不純物を除去するために2mmふ

表-1 徳山港粘土の物理特性

液性限界 w _L (%)	塑性限界 w _p (%)	塑性指数 I _p	強熱減量 L _i (%)	土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)
107.6	35.4	72.2	10.02	2.64

表-2 セメント固化処理土の配合条件と養生時間

含水比 (セメント添加前) (%)	セメント 添加率 c* (%)	養生時間
1.5 w _L (164.4) 2.0 w _L (215.2)	10, 20, 30	5, 7, 10, 15 (hr) 1, 2, 3, 7, 28, 90 (days)

るいを通過させて裏ごしした。セメントは、水と接触した後、数分以内に発熱をしながら水和反応が発生するため、攪拌時間に応じて強度発現が変わる可能性がある。また、初期水和反応は温度に依存する。本実験では、粘土とセメントを混合する際のセメントと水の反応による発熱を抑制することにより、試験片の製作過程中に水和反応を遅延させるために、浚渫粘土と蒸留水を0-2°Cの冷蔵保管した¹¹⁾。セメントミルクは、蒸留水とセメントを1:1または1:0.5の重量比で調整した。この時、セメントミルク中の水分を考慮することにより、設定した初期含水比になるように調整した。浚渫粘土にセメントミルクを添加した後、2分間ハンドミキサーで混合した。その後、真空ミキサーを用いて30分間混合した。ここで、上記したように、混合中に水和反応による硬化を防止するために真空ミキサー容器の下を氷水と接触させて、0~2°C程度の水温を維持しながら攪拌した。攪拌した後、直径50mm×高さ100mmのサミットモールド(一軸圧縮試験供試体)と直径50mm×高さ100mmのアクリルモールド(ベンダー試験供試体)に試料を充填した。供試体は3層に分かれ、充填しながら軽く叩くことにより、エアギャップを除去した。それぞれの供試体は、室温20±3°Cの部屋に水槽の中で水中養生を行った。以上の方法から攪拌終了後供試体を製作する過程は、約30分の時間がかかるので、養生開始時間は攪拌終了時点から起算した30分に設定した。

既存の文献で、室内実験のためのセメント処理土の攪拌時間は非常に多様であり、まだ明確に決まっていない。したがって、本研究では、攪拌時間の間、化学反応を抑制し、均質に混合することができるようにすることで、セメント添加による固体成分増加の効果と、養生時間によるセメントの化学反応の効果による強度発現をセメント添加直後から検討することができた。本研究で提案した攪拌方法を用いて示された結果は、実際の施工の攪拌時間を養生時間に含ませて適用が可能と判断される。

2.2 ベンダーエレメント試験

ベンダーエレメントとは、圧電セラミックの薄板を2枚貼り合わせたバイモルフ型振動子の呼称であり、土中の弾性波速度測定を目的として使用される。圧電セラミックは、高電界印加により結晶軸の方向を特定の方向に揃える分極処理を行うと圧電性を現す。分極処理が施されたセラミックは、応力を加えると電気分極を生じ電界を発生し、逆に電界を与えて電気分極を起こさせるとひずみを生じる特性を有している。

2.2.1 実験に用いたベンダーエレメント

ベンダーエレメントは厚み方向に分極された圧電セラミックを弾性補強、かつ電極の役割を果たすニッケルやリン青銅のシム材の両側に貼り合わせた構造となっている。また、セラミック表面には銀電極やニッケル電極が取り付けられており、防水・絶縁のためにエポキシ樹脂などで表面がコーティングされている。このような特性を有するベンダーエレメントを片端固定にし、電圧を印加すると上部の圧電セラミックは圧電効果により縮み、下部の圧電セラミックは伸びる。その結果、ベンダーエレメント全体としては上部に曲がることとなる。本研究で使用したベンダーエレメントの概略図を図-1に示した。セラミック表面には銀電極やニッケル電極が取り付けられており、防水・絶縁のためのエポキシ樹脂などで表面がコーティングされている。ベンダーエレメントは、実験モールドに設置しやすくするために、金属合金キャップに入れられている。また、金属合金キャップに高強度エポキシが充填され、ベンダーエレメントが固定されている。固定されたキャップ上に突出したセンサーは、幅13mm、高さ5mmそして厚さ1.5mmの大きさを持っている。

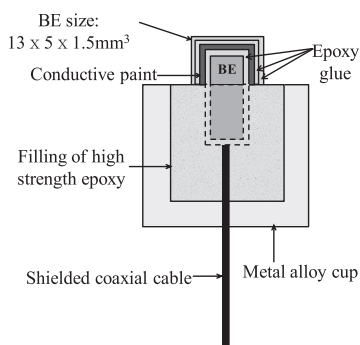


図-1 ベンダーエレメントの概略図

2.2.2 ベンダーエレメント試験機

本研究で使用したベンダーエレメント試験機の概略図を図-2に示した。提案された試験機は、ベンダーエレメント貫入時の供試体の乱れを防止し、一軸圧縮試験の供試

体サイズと養生方法と同じ条件になるように製作された。試験機は、PVC台座、直径50mm、高さ120mmの寸法を持つ内部の円形アクリルモールドと直径110mm、高さ150mmの寸法を持つ外部のアクリルモールドで構成されている。また、内部の円形アクリルモールドはPVC台座の上に金属製の合金板と4つのナットで固定することができる。PVC台座の封止部の溝にあるOリングにより、水中養生時に外部のアクリルモールドとPVC台座の水密性を維持することができる。発信ベンダーエレメントはOリングと一緒にPVC台座に固定し、受信ベンダーエレメントは図に示すように、幅48mm、高さ25mmの大きさのポーラスストーンで作製されたキャップの中に金属合金に入ったベンダーエレメントを固定して、水中養生時の水分が供給されるようにした。

ベンダーエレメント試験準備過程は、次の通りである。

- (1) ベンダーエレメント試験のそれぞれの構成要素の重量を測定する。
- (2) 発信のベンダーエレメントをPVC台座に固定させた後、内部のアクリルモールドを金属合金板と4つのナットでPVC台座に固定する。
- (3) セメント処理土は、ベンダーの高さ(挿入深さ)がそれぞれ5mmであるため、固定された内部のアクリルモールドに高さ110mmまで充填する。
- (4) セメント処理土充填完了後には、重量を測定して、セメント処理土の密度を決定する。
- (5) セメント処理土の供試体の上にペーパーフィルターを置いて、ポーラスストーンで作製したキャップの中に固定された受信ベンダーエレメントを設置する。
- (6) 最後に、水を注いだ後、水中養生を実施する。

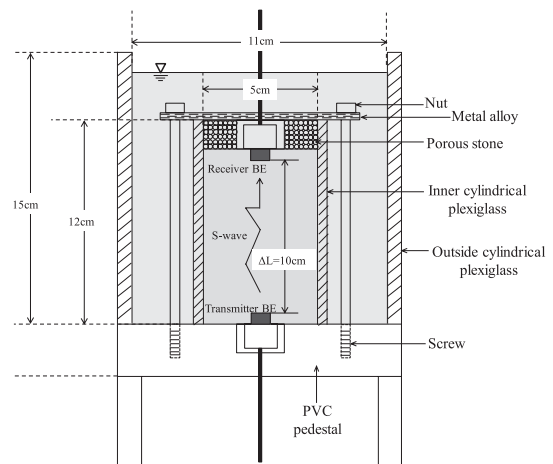


図-2 ベンダーエレメント試験機の概略図

2.2.3 せん断波速度およびせん断弾性係数の決定

ベンダーエレメント試験システムを図-3に示した。図

のようにファンクションジェネレーターで信号を発生させ、発生させた信号は波形増幅器により増幅され、供試体の台座に設置された発信ベンダーエレメントでせん断波を発生させる。本研究では、せん断波の測定は、ひずみ0.0001%未満で2kHzから10kHzまでの範囲に及ぶ様々な周波数で行い、正弦波の入力信号は、±10から±40Vまでを使用した。ここで発生させたせん断波は供試体を介して伝播し、供試体上部のキャップに設置した受信ベンダーエレメントに到達する。発生した信号と到達した信号は、オシロスコープに表示され、せん断波の伝搬時間(t)を測定することができる。せん断波速度(V_s)は式(2)のようにせん断波の移動距離(L)を伝播時間(t)で割って計算する。

$$V_s = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (2)$$

本研究では、ベンダーエレメントを用いてせん断波速度を求める際のせん断波の移動距離を供試体の先端間の距離として定義し(tip-to-tip)、せん断波の伝搬時間は、発信されたせん断波の開始点と受信されたせん断波の開始点の時間差から(start-to-start)決定した。したがってせん断弾性係数は弾性体理論を基礎とした式(3)のように供試体の密度とせん断波速度によって計算することができる。

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (3)$$

ここで、 ρ は供試体全体の密度である。

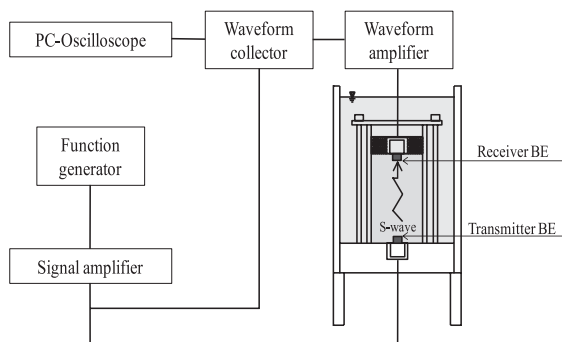


図-3 本試験装置のシステムの概略図

図-4は、ベンダーエレメントで受信した波の経時変化の一例(1.5wL, $c^*=10\%$)である。本研究ではせん断波速度の測定を養生開始30分後に行ったが、波形が現れず、最初にせん断波速度が測定できたのは表-2に示す通り養生期間5時間のときであった。これは、養生期間5時間までのセメント固化処理土が液体状態にあり、せん断波が伝達しなかったためであると考えられる。また、せん断波が最初に観測された養生期間5時間時の受信波と比べ、養生期間15時間、24時間後の受信波は周波数が増加しており、せん断波の到達時間も短くなっていることがわかる。

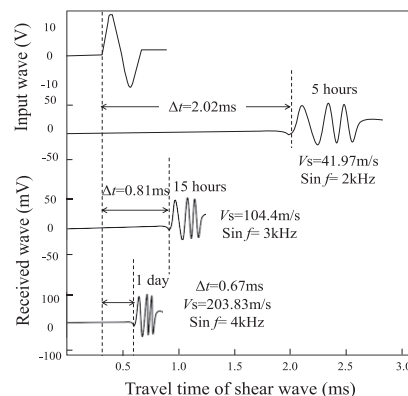


図-4 ベンダーエレメントによる送・受信波の観測例

3. 結果

3.1 養生期間のせん断弾性係数の経時変化の検討

図-5は、養生期間90日までのせん断弾性係数と養生期間の関係性を両対数グラフと片対数グラフで表している。せん断弾性係数の対数と養生期間の対数の関係性を示した図-5より、せん断弾性係数と養生期間の関係性は誤差があるものの全体的に養生期間72時間前後で変化しており、養生期間72時間前後まではせん断弾性係数Gの対数は養生期間の対数に対して直線的に増加していることがわかる。さらに、せん断弾性係数と養生期間の対数の関係性を示す図-5より、養生期間72時間以降のせん断弾性係数Gは養生期間の対数に対して直線的に増加することがわかる。したがって、本研究で用いたセメント固化処理土のせん断弾性係数は、養生期間72時間を境に2つの過程に分類できることが示された。本研究では、上記の2つの過程におけるせん断弾性係数の増加を72時間以内の養生時間について定量的に評価することを試みる。

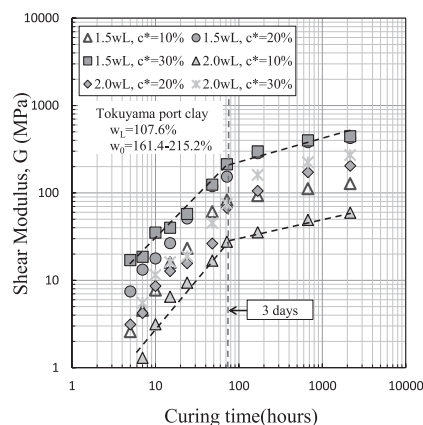


図-5 せん断弾性係数の経時変化

3.2 養生期間のせん断弾性係数の経時変化の検討

図-5(a)より、せん断弾性係数の対数は養生時間の対数の増加に対して直線的に増加することがわかる。したがっ

て、せん断弾性係数と養生時間の関係は次式のように表すことができる。

$$\ln(G) = \ln(\alpha_1) + \beta_1 \ln(t) \quad (4)$$

$$G = \alpha_1 t^{\beta_1} \quad (4)'$$

ここで、 G はせん断弾性係数 (MPa)、 α_1 は養生期間 1 時間時のせん断弾性係数 (MPa)、 β_1 は前期剛性増加係数 (せん断弾性係数と養生期間の関係を示す両対数グラフの勾配)、 t は養生期間 (hours) を示している。パラメータ α_1 と β_1 は 72 時間以内のすべてのデータに回帰分析を使用して決定した。

ここで、セメントスラリーを粘土に添加したときの含水比 w と体積比 v の変化を考える。1 時間養生のせん断弾性係数 α_1 は液性限界によって正規化された含水比 w と体積比 v を利用して相関関係を示した。液性限界とセメント添加後粘土の含水比、 w_L 、 w' 、そして液性限界の体積比とセメント添加後粘土の体積比、 v_L 、 v' はそれぞれ式(5)、式(6)で表される。 w' と v' は土やセメントを固体粒子として含水比と体積比を定義した。

$$w_L = \frac{m_w}{m_s}, w' = \frac{m_w}{m_s + m_c} \quad (5)$$

ここで、 m_w は水の質量を示す。

$$v' = \frac{V_s + V_w}{V_s}, v = \frac{V_s + V_c + V_w}{V_s + V_c} \quad (6)$$

ここで、 V_s と V_c は土とセメントの体積であり、 V_w は水の体積である。

図-6 は粘土スラリーにセメントを添加したときの含水比 w' を液性限界で正規化し、対数表示化した $\ln(w'/w_L)$ と、1 時間養生のせん断弾性係数 α_1 の関係である。この図に示すように、セメント添加率差に関係なく、これらの関係を次の式で表すことができた。

$$\ln(\alpha_1) = \gamma_1 - \gamma_2 \ln(w'/w_L)$$

$$\alpha_1 = \exp(\gamma_1)(w'/w_L)^{-\gamma_2} \quad (7)$$

ここで、 γ_1 は初期の含水比が液性限界と同じ時、強度の対数であり、 γ_2 は正規化含水比とせん断弾性係数の相関関係の勾配である。本研究で行ったセメント添加率 10% 以上の試験では、1 時間養生のせん断弾性係数 α_1 は、セメント添加率と初期の含水比に関係なくセメント添加後の正規化含水比 w'/w_L によって決定できた。

図-7 は 1 時間養生のせん断弾性係数と体積比の関係である。ここで 1 時間養生のせん断弾性係数は体積比を用いて、次の式(8)で表すことができる。

$$\ln(\alpha_1) = \delta_1 - \delta_2 (\ln v' / \ln v_L - 1)$$

$$\alpha_1 = \exp(\delta_1 + \delta_2) v'^{-n} \quad (8)$$

ここで、 $n = \delta_2 / \ln v_L$ 、 δ_1 は体積比が液性限界時の体積比 v_L に等しいときのせん断弾性係数の対数、 δ_2 は体積比指数の減少によるせん断弾性係数増加を表すパラメータである。以上のように、養生期間 1 時間時のせん断弾性係数 α_1 は、正規化含水比を用いた式(7)、もしくは体積比指数を用いた式(8)によって概ね予測できる。

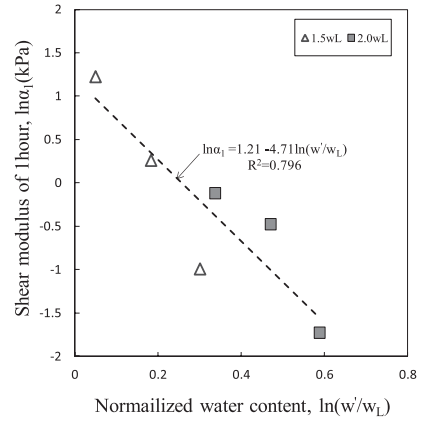


図-6 養生期間 1 時間時のせん断弾性係数 α_1 と正規化含水比 w'/w_L の関係

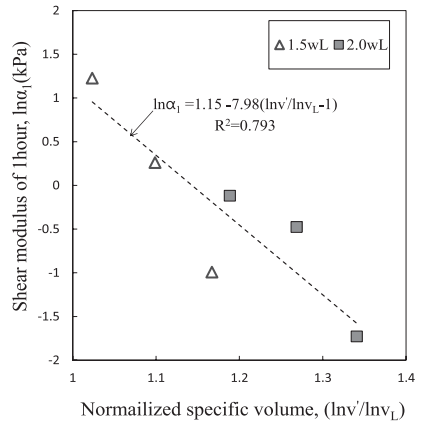


図-7 養生期間 1 時間時のせん断弾性係数 α_1 と体積比指数 v'/v_L の関係

次に、剛性発現過程におけるせん断弾性係数の増加を示すパラメータである前期剛性増加係数 β_1 (両対数グラフにおけるせん断弾性係数と養生期間の関係の傾き) について検討する。図-8 は前期剛性増加係数 β_1 とセメント添加率 c^* の関係である。この図より、本研究で行ったセメント添加率 c^* が 10~30% の範囲では、セメント添加率 c^* が増加しても前期剛性増加係数 β_1 はほぼ一定という傾向が得られ、前期剛性増加係数 β_1 は次式で表すことができる。

$$\beta_1 = 1.11 \quad (9)$$

増加係数の平均値と標準偏差は 1.11 と 0.13 である。1 時間養生のせん断弾性係数を予測することができる正規化含水比をもとにした式(7)と正規化体積比を用いた式(8)

を式(9)と一緒に式(4)に代入して整理すると、72時間以内のせん断弾性係数の発現過程でせん断弾性係数は、次のような式で予測することができる。

$$G_{(within\ 72\ hours)} = \exp(\gamma_I)(w' / w_L)^{-\gamma_2} \cdot t^{\beta_I} \quad (10)$$

$$G_{(after\ 72\ hours)} = \exp(\delta_1 + \delta_2)v'^{-n} \cdot t^{\beta_I} \quad (11)$$

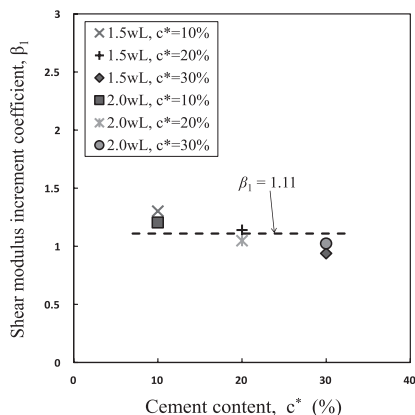


図-8 前期剛性増加係数 β_I とセメント添加率 c^* の関係

式(10)と式(11)を用いて養生期間72時間以下のセメント固化処理土のせん断弾性係数 G の予測を行い、予測値と実測値の比較を行う。図-9に正規化含水比を用いたせん断弾性係数予測式から得られた予測せん断弾性係数と実測せん断弾性係数の関係を、図-10に体積比指数を用いたせん断弾性係数予測式から得られた予測せん断弾性係数と実測せん断弾性係数の関係を示す。これらの図より、正規化含水比を用いた予測式と体積比指数を用いた予測式はほぼ同程度の精度でせん断弾性係数の予測ができるといえる。また、どちらの予測式で求めたせん断弾性係数も実測値と比べて多少のばらつきが見られるが、多くの試験ケースにおいて実測強度と予測強度が概ね一致していることがわかる。したがって、原料土の初期含水比やセメント添加率等の条件が異なってもせん断弾性係数の予測は概ね可能である。

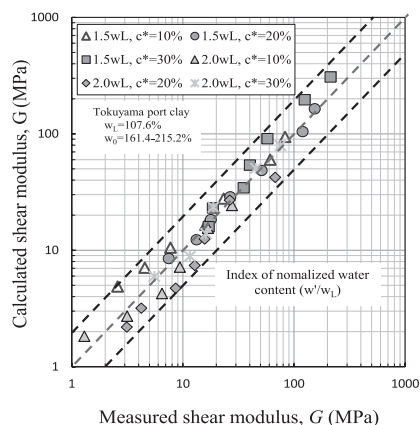


図-9 せん断弾性係数の実測値と予測値の関係(正規化含水比を用いた式)

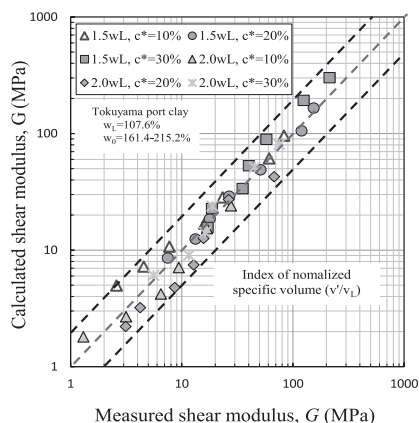


図-10 せん断弾性係数の実測値と予測値の関係(体積比指数を用いた式)

3.3 せん断弾性係数と一軸圧縮強度の相関関係

図-11は、一軸圧縮強度の経時変化を示している。図-5と図-11での両グラフは、養生期間72時間前後でグラフの勾配が変化しており、直線的に増加する傾向を示す。したがって一軸圧縮強度とせん断弾性係数の養生時間に応じて増加挙動は同じような傾向であることがわかった。これらを元に養生時間によるせん断弾性係数を用いて一軸圧縮強度を予測できることを確認した。

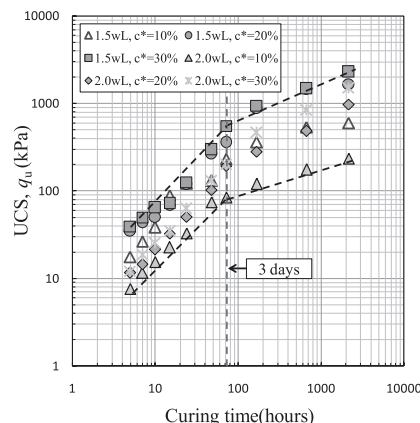


図-11 一軸圧縮強度の経時変化

図-12はすべての養生時間のせん断弾性係数と一軸圧縮強度の関係を示している。この図より、せん断弾性係数と一軸圧縮強度の線形関係は式(12)のように高い決定係数 ($R^2=0.950$)と一緒に指数関数式とよく適合した。

$$G = 298.21q_u^{1.00} \quad (12)$$

式(12)に示すようにせん断弾性係数の一軸圧縮強度の指数は1である。これはせん断弾性係数が、含水比、セメント添加率、養生時間と関係なく、一軸圧縮強度より約298倍大きいことを示している。

3.4 養生 24 時間までのせん断弾性係数を用いた養生 48 時間, 72 時間強度の予測

せん断弾性係数と一軸圧縮強度の間には, 3.3 節に示した通り, おおよそ一定の関係があった. この結果を踏まえて, 本節では, ベンダーエレメント試験を用いたせん断弾性係数測定によって一軸圧縮強度の予測が可能かどうかを検討する. 養生期間 72 時間までのせん断弾性係数は式(4)' で表すことができ, 式(4)' を式(12)に代入することで式(13)が得られ, 養生期間 72 時間までの一軸圧縮強度はせん断弾性係数を用いて推定することができる. 図-13 は養生期間 24 時間未満のせん断弾性係数の経時変化を示しており, この図を用いて養生期間 1 時間時のせん断弾性係数 α_1 と前期剛性増加係数 β_1 を決定した. 決定した α_1 , β_1 を表 3 に示す.

$$q_u = \left(\frac{\alpha_1 t^{\beta_1}}{298.21} \right) \quad (13)$$

表-3 に示す養生期間 24 時間以下のせん断弾性係数から得られたパラメーター α_1 , β_1 と式(13)を用いて, 養生期間 48 時間および養生期間 72 時間時の一軸圧縮強度の予測を行い, その結果を図-14 に示す. この図より, 一部のデータ(2.0w_L, c^{*}=10%, 72hours)において実測強度の 2 倍近く過大評価しているものが存在する. 予測強度が実測強度より過大評価となった理由として, 一軸圧縮強度とせん断弾性係数の関係が全データを用いた近似値であり, 2.0w_L, c^{*}=10%のデータと多少のずれがあったためであると考えられる.

本研究ではせん断弾性係数を測定する非破壊ベンダーエレメント試験を用いて養生時間に応じて強度発現をモニタリングすることにより, 従来の破壊強度測定方法の代替的な選択肢として示すことができた. また, セメント処理土の強度を, せん断弾性係数を使用して予測することは, 養生の初期段階でのセメント処理土の打設と設計において効果的であると予測される. しかし, 提案された結果を広範囲に適用するためには含水比, セメント含有率, 土の物理的特性, 粘土の種類, 有機物質などの様々な条件による試験が要求される.

表-3 各供試体におけるパラメーター α_1 , β_1

初期含水比 w(%)	セメント添加率 c*(%)	α_1	β_1
1.5w _L	10	0.27	1.44
	20	1.23	1.17
	30	4.45	0.82
2.0w _L	10	0.07	1.60
	20	0.57	1.10
	30	1.06	0.95

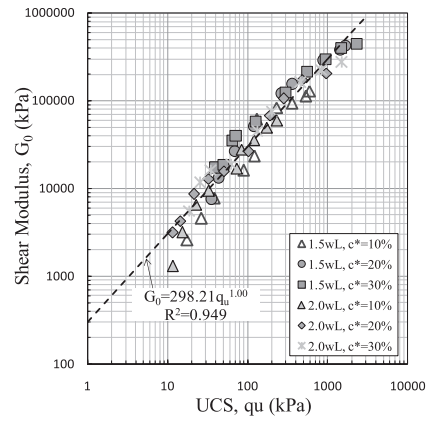


図-12 せん断弾性係数と一軸圧縮強度の関係

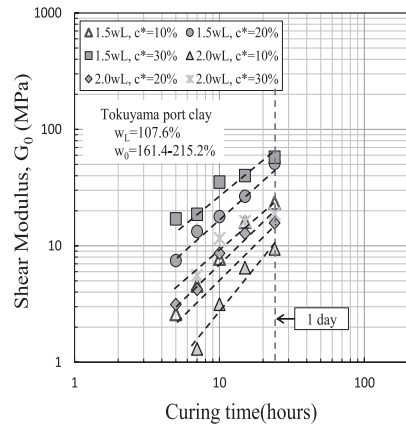


図-13 養生期間 24 時間未満のせん断弾性係数の経時変化

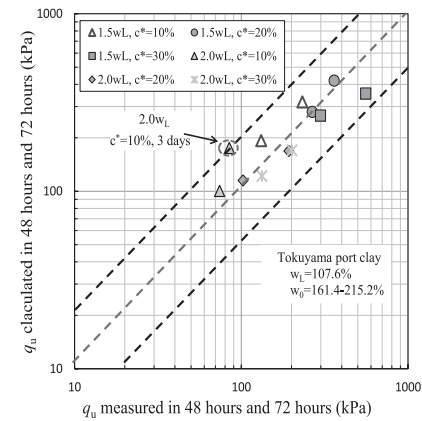


図-14 実測強度と予測強度の比較

4. まとめ

セメント処理土の強度は配合試験の一軸圧縮試験によって決定されるが, 同一の試料を用いた非破壊試験により短時間で連続的に強度増加傾向を調べた結果から強度が予測できれば, 工学的に有用である. また, 今後の研究で初期養生における強度だけでなく, 養生 28 日の強度が予測可能となればさらに有用である. 本研究では非破壊試験の一つとしてベンダーエレメントにより測定したセメン

ト処理土の弾性係数を用いて実験的に検討した結果, 以下の結果を得た.

- (1) セメント固化処理土のせん断弾性係数の増加傾向は養生期間 72 時間前後で変化し, 前期剛性発現過程(養生期間 72 時間以前)と後期剛性発現過程(養生期間 72 時間以降)に分類できる.
- (2) 前期剛性発現過程のせん断弾性係数は養生期間との両対数グラフ上で直線的に増加し, 養生期間 1 時間時のせん断弾性係数 α_1 と前期剛性増加係数 β_1 によって決定される.
- (3) 養生期間 1 時間時のせん断弾性係数 α_1 は, 正規化含水比あるいは体積比指数を用いて表すことができる.
- (4) 前期剛性増加係数 β_1 は, 初期含水比やセメント添加率に関係なくほぼ一定である.
- (5) (3), (4)で得られた結果から, 養生期間 72 時間までのせん断弾性係数の予測式を式(7)と(8)のように提案した.
- (6) せん断弾性係数と一軸圧縮強度より 298.21 倍大きく, この関係を用いることで短期のせん断弾性係数から一軸圧縮強度を予測することができる.

謝辞

本研究は, 平成 25 年度文部科学省科学研究費による研究課題「第 3 の土木材料—固化処理土—の強度発現メカニズムの解明 (課題番号 25289146)」の成果の一部である. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) Tang, Y.X., Miyazaki, Y. and Tsuchida, T.: Practices of reused dredgings by cement treatment, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.5, pp.129-143, 2001.
- 2) Port and Harbour Bureau, Ministry of Land, Infrastructures, Transport and Tourism, Japan: On the development of technical guideline on ocean disposal and effective use of the dredged soils, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/11/110619_.html, 2006.

- 3) Watabe, Y., and Noguchi, T.: Site-investigation and geotechnical design of D-runway construction in Tokyo Haneda Airport, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.6, pp.1003-1018, 2011.
- 4) Tsuchida, T., Tang, Y.X., and Watabe, Y.: Mechanical Properties of Lightweight Treated Soil Cured in Water Pressure, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.4, pp.731-748, 2007.
- 5) Kogure, K., Tamaguchi, H., and Ohira, Y.: Comparison of strength and soil thrust characteristics among different soil shear tests, *J. Terramech.* Vol.25, No.3, pp.201-221, 1988.
- 6) Shirley, D.J. and Hampton, L.D.: Shear wave measurements in laboratory sediment, *J. Acoustical Society of America*, Vol.63, No.2, pp.607-613, 1978.
- 7) Chan, C.M. and Ch'ng, S.S.: Preliminary study of S-wave velocity and unconfined compressive strength of cement-palfstabilised kaolin, *International Journal of Intergrated Engineering*, Vol.2, No.2, pp.27-34, 2010.
- 8) Consoli N.C., Viana da Fonseca A., Cruz R.C. and Heineck K.S.: Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand, *J. Geotech. Geoenviron. Engineering*, Vol.135, No.9, pp.1347-1353, 2009.
- 9) Flores, R.D.V., Emidio, G.D. and Impe, W.F.V.: Small-strain shear modulus and strength increase of cement-treated clay, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.33, No.1, pp.62-71, 2010.
- 10) Seng, S., and Tanaka, H.: Properties of cement-treated soils during initial curing stages, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.5, pp.775-784, 2011.
- 11) 土田孝, 平原毅, 平本真也, 宇高薫: 少量のセメントを添加し再圧密した再構成海成粘土のせん断特性, *地盤工学ジャーナル*, Vol.9, No.1, pp.71-84, 2014.

(2015 年 6 月 22 日 受付)