

平成22年度（財）港湾空港建設技術サービス センター研究開発助成報告書

助成番号：平成23年1月28日付 第10—2号

研究開発項目：（番号）⑥ 建設副産物リサイクルに関するもの

航路浚渫粘土のセメント処理における 品質管理方法

平成24年4月30日

北海道大学 大学院公共政策学連携研究部
田中 洋行

1. はじめに

管中混合処理,あるいはSGM(Super Geo Material)と呼ばれる工法が最近多く用いられている。両工法とも、高含水比の粘性土にセメントを混合させる工法で、後者の工法ではさらに発泡剤などの軽量材を添加している。これらの工法のメリットは、航路浚渫などで大量に発生した浚渫土を有効利用できることと、従来の埋立材料である砂などと比べて単位体積重量が小さいことにある。単位体積重量が小さいことは、原地盤の沈下を低減、あるいは構造物に作用する土圧を低減できるメリットを有している。

2010年に完成した羽田空港D滑走路にも、管中混合処理やSGM工法で作成されたセメント処理土が大量に用いられた。この滑走路の建設地点は多摩川の河口に当たるため、滑走路を全て埋立構造にすると洪水時の水の流出に問題が生じる。このため、多摩川よりの1/3の滑走路を栈橋構造とした。写真-1に示す写真は、この栈橋部と埋立部の接続部における処理土の打設状況を示したものである。これらの工法を用いた目的は、構造の違いによって生じる沈下量の差を減少させることと、接合部の護岸に作用する土圧を低減するためである。



写真-1 羽田空港D滑走路建設におけるSGMの打設状況

これらの工法では、採取された粘性土をプラントで所定の含水比に調整され、セメントやSGMの場合には軽量材が添加される。このように処理された粘性土は、パイプによって打設現場に圧送され、この間に粘性土はセメントと均一に攪拌・混合される。輸送の距離は数 km にも及ぶため、セメント量が多すぎる、あるいは含水比が小さすぎると、抵抗が大きくなり処理土のパイプ輸送に支障をきたす。逆にセメント量が少なすぎたり、含水比が高すぎると、養生後に所定の強度に至らない場合がある。本論文では、高含水比の粘性土をセメント処理した時の初期の硬化過程を、せん断強度(s)とせん断剛性率 (G) の変化として捉えて、その特性について述べる。

2. 実験手法

セメント処理土の工学的特性は古くから多くの研究者によって研究されてきた。しかしながら、その多くは深層混合処理 (DM) で形成されるセメント処理土を対象としているため、含水比は原位置の値で管中混合処理やSGM と比べて比較的小さく、また養生後の強度も数 MPa 以上と大きい。さらに、養生日数も 1 週間以降が興味の対象であり、今回明らかにしようとしている研究はほとんどなされてはいない。

硬化過程を連続的に捉えるために、ベンダーエレメント(BE)試験によって、 G の変化を捉えた。BE 試験は非破壊試験なので、一個の供試体で試験を行うことができ、また計測時間も比較的短いので、混合直後のセメント処理土の変化を的確に捉えることができる。BE 試験は、図-1 に示すように、一対のピエゾセラミックを用い、一方にパルス状の電圧を加えて“せん断波”を発生させる。このように発生したせん断波は供試体内を伝達し、もう一方のピエゾセラミックで振動を電圧の変化として捉える。このせん断波の到達時間によってせん断波速度(v_s)が求められ、さらに $G=\rho v_s^2$ (ここに ρ は土の湿潤密度) によって、 G が計算できる。関係周波数や到達時間の設定方法などの詳細は、文献 1)を参照されたい。

DM 工法を対象としたセメント処理土の強度は、通常一軸圧縮試験によって計測される。しかしながら、今回対象とする試験では、供試体が自立できないほどの小さな強度も対象としなければならないので、ベーンせん断試験によって強度を測定した。さらに、現場でも容易に測定できることを考えて、フォールコーン(FC)による試験も行った。我が国における FC 試験は、せいぜい液性限界(w_L)の測定に用いられる程度であるが (地盤工学会基準: JGS 0142-2009)、北欧を始め多くの国々では、簡易に強度を測定する方法として多用されている。今回用いた FC は、地盤工学会が定める FC による w_L 測定の学会基準に従い、質量(m) が 60g、コーン先端角度が 60° のコーンを用いた。強度(s)は(1)式によって求め、この時の係

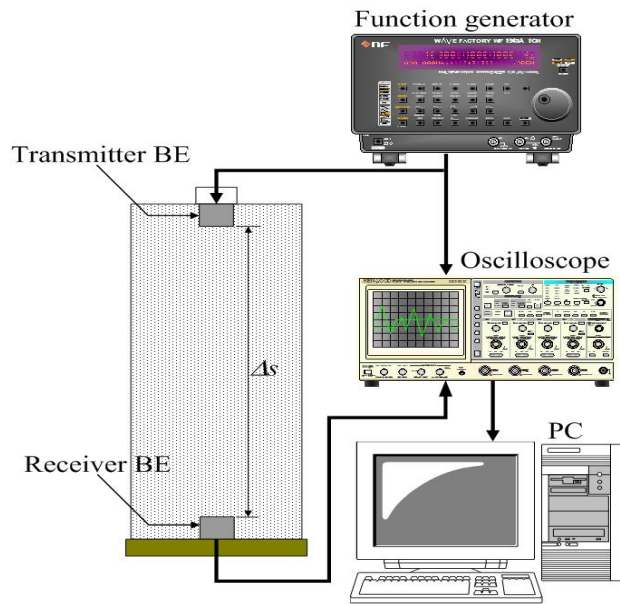


図-1 ベンダーエレメント試験の構成

数 k_a は Wood²⁾に従い 0.29 とした.

$$s = k_a (m g / d^2) \quad (1)$$

ここに, g は重力加速度 (980cm/sec^2), d は貫入後 5 秒後の貫入量である.

実験に用いた試料は 2 種類の市販粘土と, 東京湾で採取された海成粘土である. 主要な特性を表-1 に示す.

表-1 試験に用いた試料と物理特性

粘土試料	塑性限界 (%)	液性限界 (%)	塑性指数
藤森粘土	26	51	25
笠岡粘土	28	62	34
東京湾	33	103	70

3. 実験結果

3.1 剛性率の経時変化

図-2 に、受信波の一例を示す。混合後しばらくの間は、セメント処理土は液体の状態にあるので、せん断波は伝達しないが、図に示す例では、混合後 30 分ほど経過するとせん断波の到達が確認される。さらに時間が経過すると到達時間が短くなり、また受信波の波形の周波数も増加するのが確認される。

図-3 はせん断波の到達時間からせん断波速度(v_s)を求め、 $G=\rho v_s^2$ （ここに ρ は土の湿潤密度）の関係から G を計算し、 G の養生時間による変化を示したものである。セメント処理土の G は養生時間とともに増加するのがわかる。図の縦軸が大きいのでわかり難いが、せん断波の到達が確認できる最低の G はおよそ 12kPa であった。これより小さな場合には、セメント処理土は液体として挙動するのでせん断波が到達できない、あるいは今回用いた試験装置では到達が確認できないものと思われる。

図-3 に示すように、 G の大きさは、対象土、含水比、セメント量によって大きく変化する。しかしながら、図-4 に示すように、混合後 2 時間で得られた $G(120\text{min})$ で正規化すると、興味深い結果が得られる。すなわち、養生時間が 150 分までは、混合条件や対象土によらず、強度増加割合はほとんど同じで、しかも養生時間に対して直線的に G は増加している。さらに興味深いのは、混合後約 15 分の間は G が増加しないことである（図-4b 参照）。この時間はコンクリートの分野で用いられる“凝結”に対応するものと考えられる。

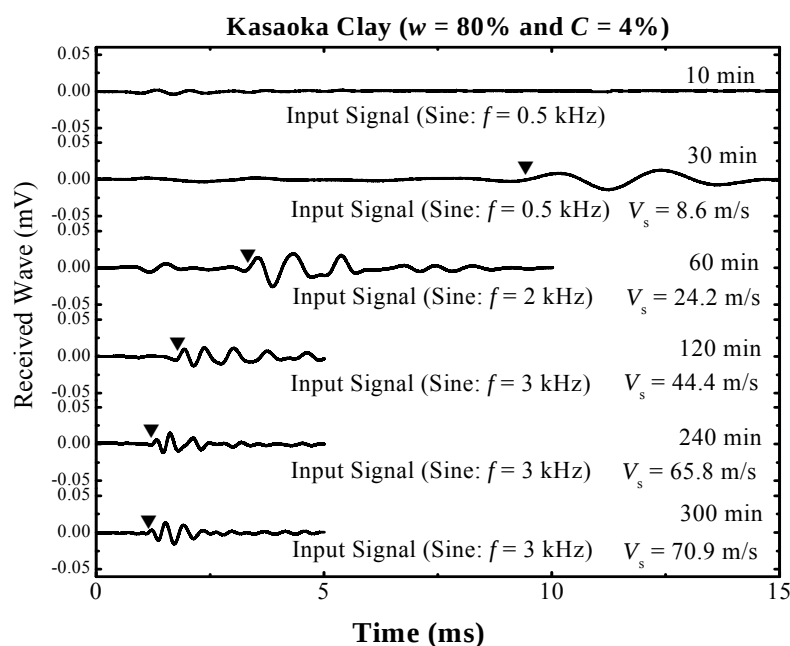


図-2 バンダーエレメント試験で捉えたせん断波速度の増加

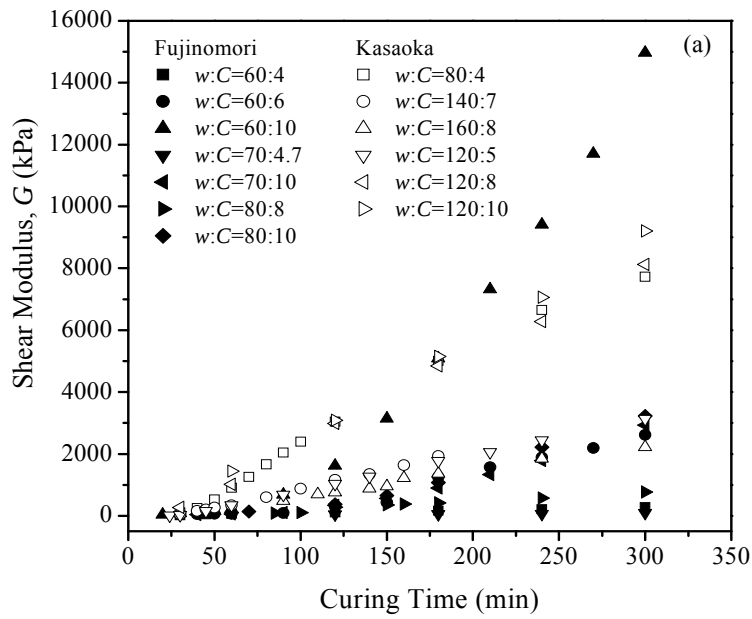


図-3 養生による G の増加

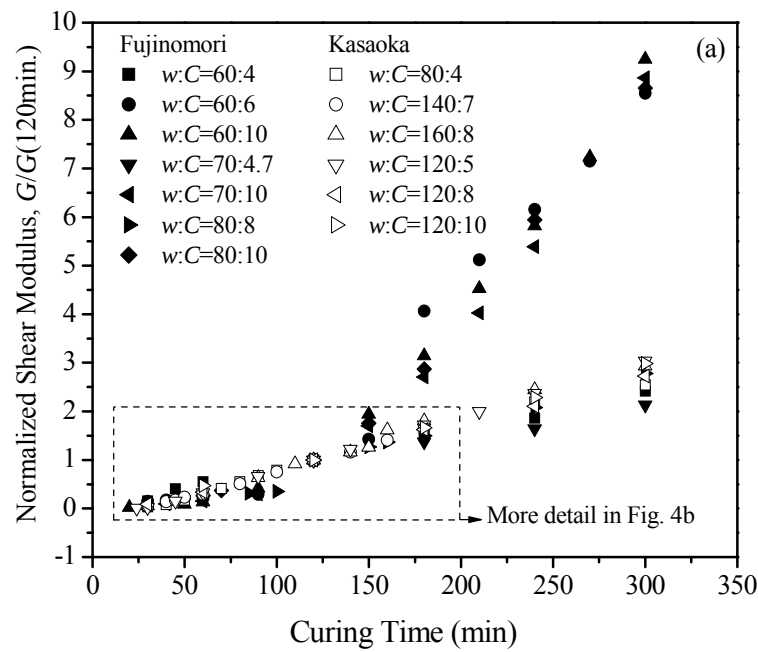


図-4 a 正規化した G の増加

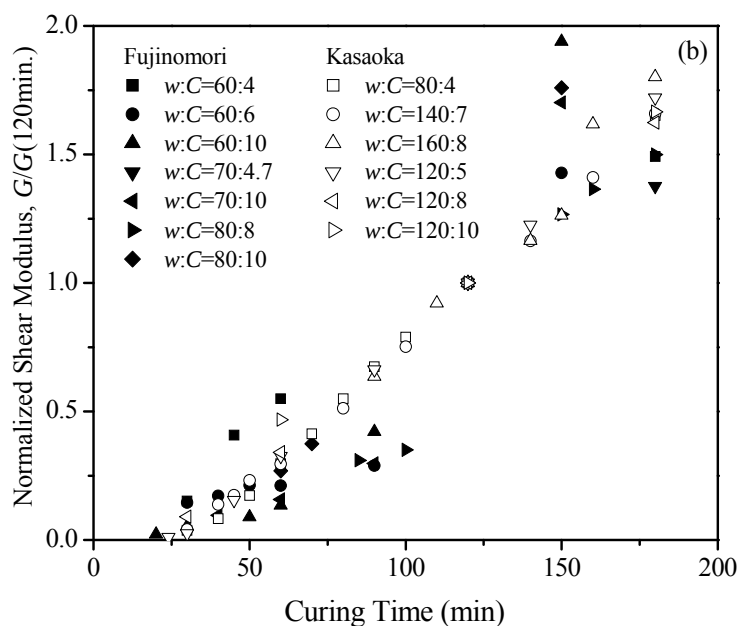


図-4b 図-4aの拡大図

3.2 強度の経時変化

ベーン試験で測定したせん断強度(s)の変化を図-5に示す。 s も時間とともに増加していくのがわかり、また混合条件や対象土によって、大きさが異なるのが読み取れる。そこで、 G の場合と同様に養生時間が120minのときの強度($s(120min)$)で正規化した値を図-6に示す。 G と同様に養生時間が150分までは、時間とともに一様に増加する傾向が認められるが、 G と比べてバラツキが大きい。

ベーン試験に加えてFCによる強度の測定を試みた。図-7にベーンおよびFC試験による強度の比較を示すが、両方の試験から得られた値は同様な値を示すことがわかる。これから、ベーンより簡単な試験であるFC試験から強度を予測することができるので、現場での強度確認に有効と考えられる。

3.3 水セメント比

管中混合処理工法およびSGM工法では、運ばれてきた浚渫土に適当に水を加え攪拌混合して、その後セメント（SGMの場合には、さらに発泡剤）を添加する。コンクリートと異なり、浚渫土は採取した場所あるいは深度によって含水比が異なり、この値を事前を知ることは難しいので、水を加えて攪拌した後の含水比は必ずしも想定した含水比になるとは限らない。したがって、現場では、水・セメント比（ W/C ）によって強度が決定される W/C

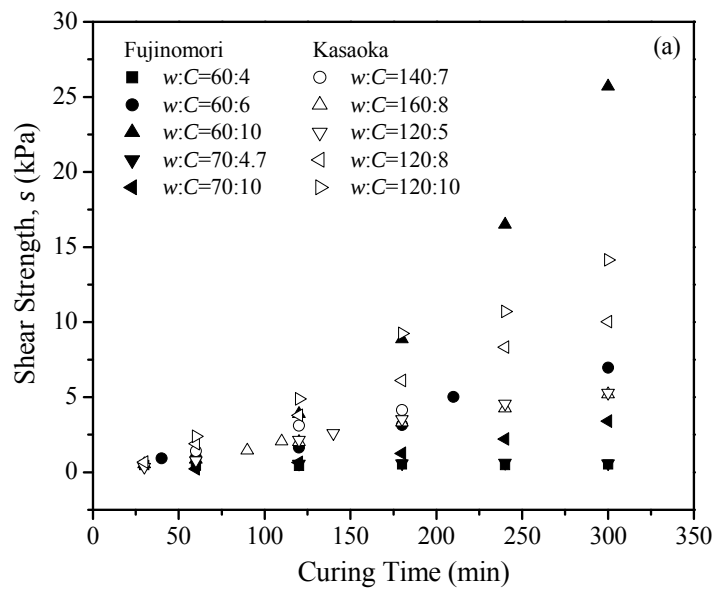


図-5 ベーン試験で測定された強度

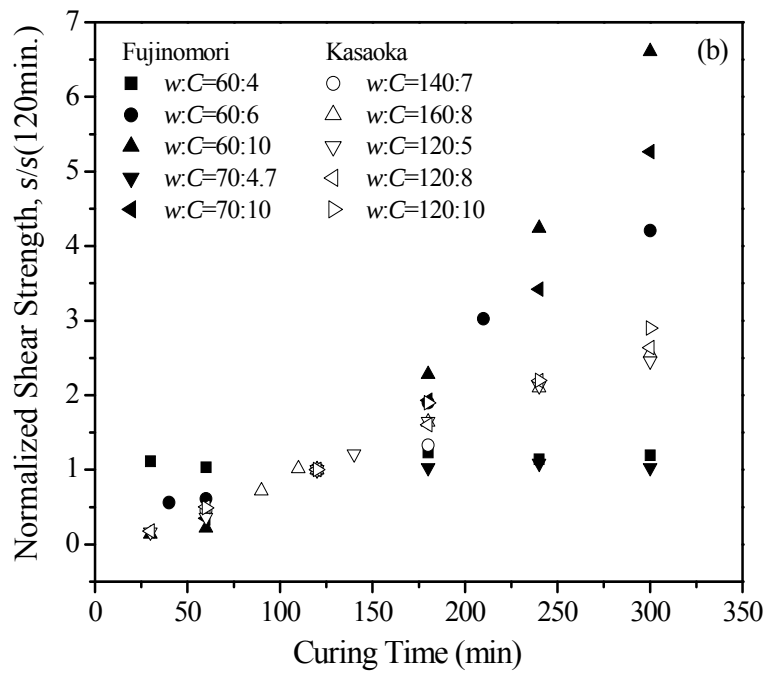


図-6 150分後の強度で正規化したベーン強度

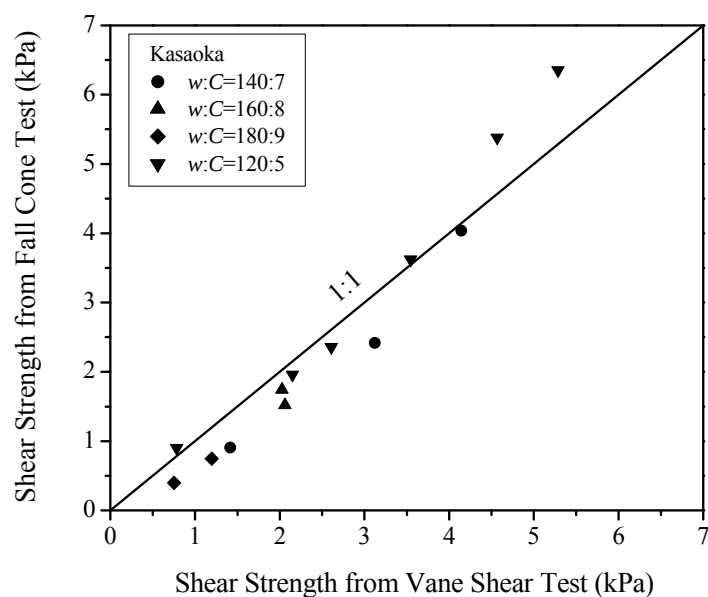


図-7 ベーン試験とフォールコーン測定された強度の比較

ルールによる方法が用いられている。すなわち、予定していた含水比より水を多く入れすぎた場合には、セメント量を多くして所定の強度を確保する方法である。養生後 300 分後の W/C に対する G を図-8 に示す。用いた試料は藤森粘土と笠岡粘土であるが、どちらの試料においても W/C が増加するにつれ G が減少するのが認められるが、同じ W/C の下では笠岡粘土の方がはるかに G が大きいのが認められる。したがって、試料ごとに G と W/C の関係を求めておけば、 G を予測することができる。しかしながら、笠岡粘土の例では、 $w=80\%$ で $C=4\%$ と $w=160\%$ で $C=8\%$ の G を測定した。両者の W/C はどちらも 20 となるので、W/C 一定のルールに従うと G はいずれの場合も同じとなるはずであるが、図に示すように、 $w=160\%$ で $C=8\%$ の G はかなり小さい。したがって、W/C 一定のルールは極端に w や C が異なる場合の適用には注意をすべきである。

3.4 強度と G の関係

地盤の多くの設計では強度ベースで行うことが多い。したがって、 G よりむしろせん断強度が必要である。したがって、打設した処理土の強度の確認は、現地で試料をサンプリングし、一軸圧縮試験による室内試験から行っているのが普通である。すでに述べたように、同様な工法に深層混合処理(DM)工法があるが、この工法は原位置の土と攪拌し、またセメント量も管理されている。しかし、本論文で取り扱うセメント処理土は大量で、しかも対象となる浚渫土は時間とともに異なることが多い。したがって、強度のバラツキの原因と

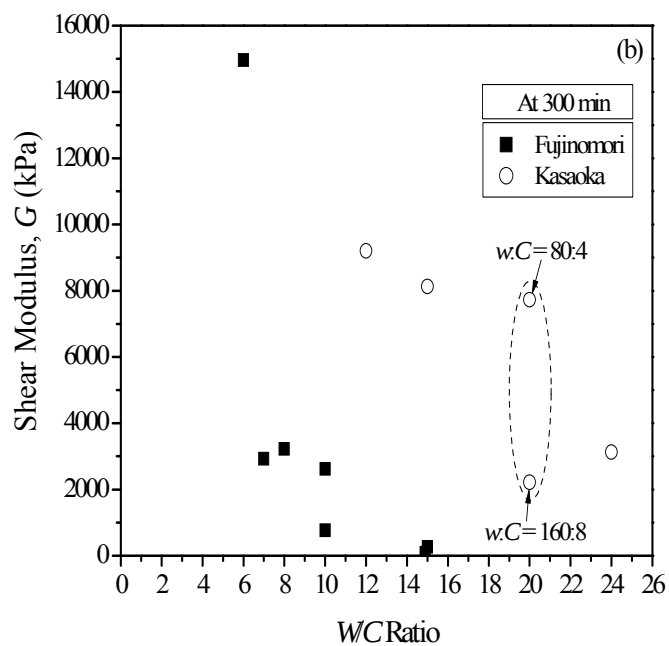


図-8 W/Cと G の関係

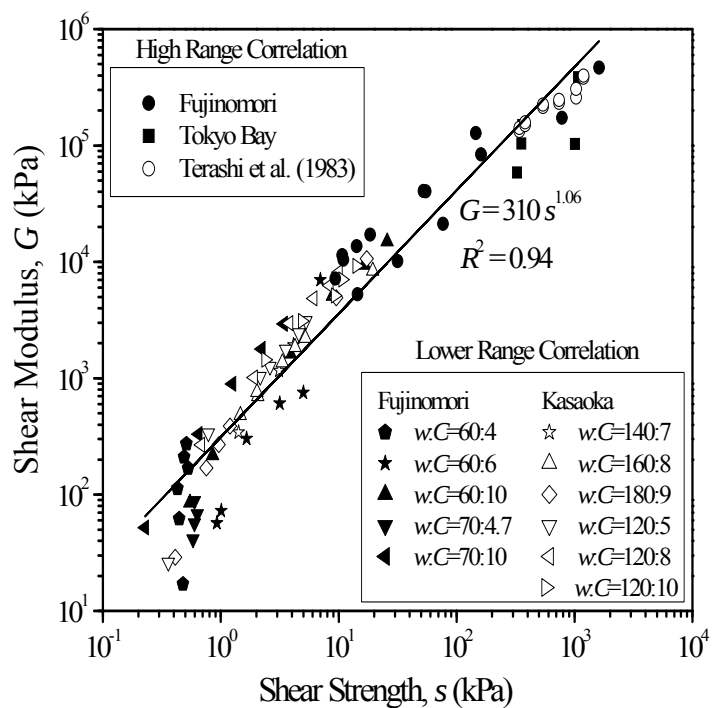


図-9 各養生時間における G と s の関係

なる要因は DM 工法より多いと考えられる。このような場合に、迅速に広範囲の調査を行える表面波探査などの弾性波を用いた地盤調査法が有効となる。この際にも、 G と強度の関係を予め知っておけば便利である。

図-9 に今回行った実験によって得られた G と s の関係を示す。図の中で低強度 (s が 10kPa 以下) は、すでに述べたように s はベーン試験から求めた。また高強度 (s が 10kPa 以上) は、一軸圧縮試験から求めた。高強度のデータについては、寺師ら³⁾が行った関係もプロットしている。ただし彼らのデータでは、 s は一軸圧縮試験、 G は共振円柱試験から求めている。図から、かなり広い範囲内でおおよそ $G=300s$ の関係が得られる。しかしながら、 s が極端に小さな場合 (s が 1kPa 以下) には、上記の関係より下に位置するデータが多い。これが、BS 試験による G の測定の限界なのか、あるいは図-6 に示したように、ベーン試験で測定した s は、必ずしも養生期間とも増加してはいない。さらに、この当たりの処理土の挙動は粘性に大きく左右されられると考えられる。今後の研究課題である。

4. まとめ

高含水比の粘性土を対象としたセメント処理土の、混合直後の養生に焦点を当てて、剛性率とせん断強度の増加特性を述べた。バンダーエメントによって処理土が混合直後からどのように硬化が始まるかが明らかになった。また、せん断強度(s)と剛性率(G)との間には $G=300s$ なる関係を見いだした。

参 考 文 献

- 1) Seng, S. and Tanaka, H.: Properties of cement-treated soils during the initial curing stages, *Soils and Foundations*, 51(5), pp.775~784, 2011.
- 2) Wood, D. M.: *Soil behaviour and critical state soil mechanics*, Cambridge University Press, 1990.
- 3) 寺師昌明・田中洋行・光本 司・本間定吉・大橋照美：石灰・セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究（第3報），港湾技術研究所報告，22(1), pp.69~96, 1983.