

恒久グラウトにより改良した固結砂の力学特性および変形特性

若築建設(株) 正会員 ○水野 健太
 強化土エンジニアリング(株) 正会員 佐々木 隆光

1. 目的

恒久用途で薬液注入工法を適用しようとする場合、性能規定型の設計においては動的な有効応力解析などによって施設の変形照査が実施される。この際、解析コードの構成式や境界条件として、固化改良土の力学・変形特性、透水特性、液状化特性などを適切に反映させることが重要となる。しかしながら、施工前の事前調査において、現場土を採取し室内配合試験結果に基づいて注入仕様を決定することはあっても、工法選定や設計の段階で固化改良土を対象としたこれらの試験が実施されることはほとんどない。そこで本研究では、変形照査に資するデータを提供する目的で、恒久グラウトにより改良した固結砂の一連の各種力学試験を実施した。

2. 試験概要

使用した砂は、豊浦砂および珪砂5号である。砂の物理特性を表-1、粒径加積曲線を図-1に示す。使用した注入材は、活性シリカコロイドを主材とする溶液型恒久グラウト「パーマロック ASF-II α」である。供試体サイズは直径5cm、高さ10cmとし、拘束圧下浸透法¹⁾により作成した。具体的には、乾燥砂を相対密度が60%となるように空中落下でモールドに投入し、間隙を二酸化炭素で置換し、脱気水を通水した後に注入材を供試体下部からゆっくりと注入して作成した。

試験項目および試験条件を表-2に示す。試験は、一軸圧縮試験、圧密非排水(CU)三軸圧縮試験、繰返し非排水三軸試験(以下、液状化試験)、変形特性を求めるための繰返し試験(以下、繰返し三軸試験)を実施した。繰返し三軸試験については豊浦砂と珪砂5号を用い、その他は豊浦砂のみとした。材令は28日、薬液濃度は4、6、8%の3ケースとして力学特性の濃度依存性を調べた。繰返し三軸試験については、履歴減衰率 h やせん断剛性率 G の拘束圧依存性を調べるため、拘束圧を50、100、200kN/m²に変化させて試験を行った。

3. 試験結果

(1)一軸圧縮試験：図-2(a)にシリカ濃度と一軸圧縮強さ q_u の関係、図-2(b)に q_u と変形係数 E_{50} の関係を示す。8%供試体の一つが全6%供試体よりも低い強度を示しているものの、一軸圧縮強さはシリカ濃度の増加とともに大きくなり、変形係数は線形近似($E_{50}=106q_u$)できることがわかる。

(2)圧密非排水三軸圧縮試験：表-3に三軸CU試験結果を示す。シリカ濃度6%以上の固結砂は未改良砂よりも大きな内部摩擦角 ϕ' を有しているが、これと比較して粘着力 c' の濃度依存性は大きくない。既往の知見では、

表-1 砂の物理特性

項目	豊浦砂	珪砂5号
土粒子密度 (g/cm ³)	2.645	2.627
最大密度 (g/cm ³)	1.646	1.554
最小密度 (g/cm ³)	1.335	1.290
乾燥密度 (g/cm ³) ($D_r=60%$)	1.502	1.439

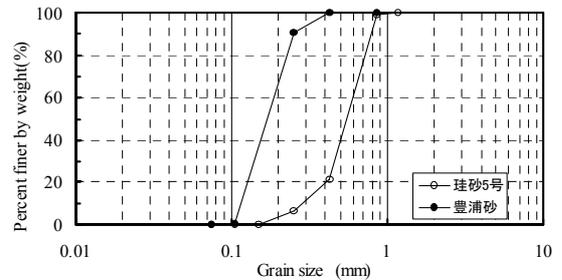


図-1 粒径加積曲線

表-2 試験項目および条件

試験項目	砂	薬液濃度 (%)	拘束圧または圧密圧力 (kN/m ²)
一軸圧縮試験	豊浦砂	4, 6, 8	—
三軸CU試験	豊浦砂	4, 6, 8	100, 200, 300
液状化試験	豊浦砂	4, 6, 8	100
繰返し三軸試験	豊浦砂	4, 6, 8	50, 100, 200
	珪砂5号	4, 6, 8	100

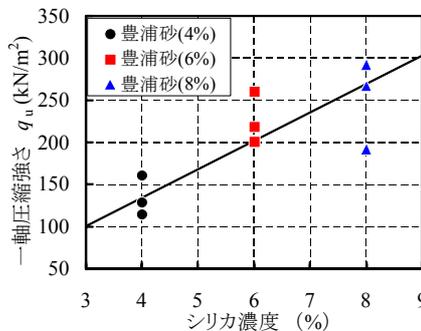


図-2(a) シリカ濃度~ q_u

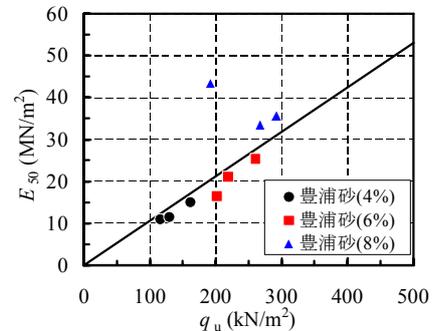


図-2(b) q_u ~ E_{50}

「薬液による固化改良土は、砂が有する内部摩擦角を変化させず、粘着力を付与する」と解釈されてきた。しかし、最近の研究成果によれば、「固化改良土は間隙中のゲル化物の作用でせん断時に正のダイレイタンスが生じ、内部摩擦角が未改良砂よりも大きくなる」との報告²⁾もある。この点については、砂の種類や検体数を増やして検証する必要があると考える。 $c = q_u / 2 \cdot \tan(45 - \phi/2)$ の関係を用いて三軸圧縮試験結果から一軸圧縮強さを推定(換算 q_u)した結果、一軸圧縮試験による平均値 q_u との相関性は低く、三軸圧縮試験結果は全体的に設計上安全側の結果を与えている。

表-3 三軸CU試験結果

薬液濃度	c' (kN/m ²)	ϕ' (度)	換算 q_u (kN/m ²)	q_u (平均) (kN/m ²)
未改良	0.0	36.2	—	—
4%	38.8	36.0	152	135
6%	34.2	38.3	141	226
8%	41.4	43.1	190	250

(3) 液状化試験: 図-3(a)に繰返し载荷回数と繰返し応力振幅比の関係, 図-3(b)に q_u と液状化強度 $R_{120,5\%}$ の関係を示す。シリカ濃度 6%以上の固結砂は, $R_{120,5\%}$ が 1.0 以上と高く, 4%であっても 0.45 を発揮している。豊浦砂のような均質な砂の場合は, 一軸圧縮強さと液状化強度の相関性は高いと言えるが, 礫を含んだ場合や均等係数が大きい砂については, このような有意な関係が当てはまらないことも考えられるため, 室内配合試験においては注意を要する。

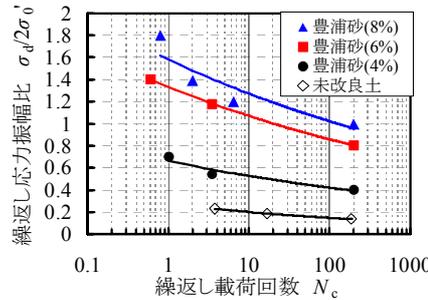


図-3(a) 液状化試験結果

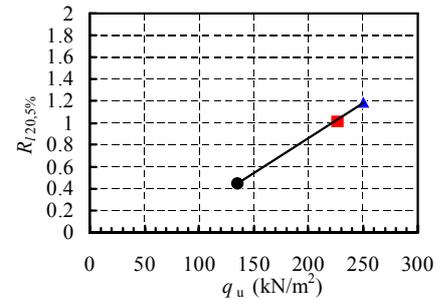


図-3(b) $q_u \sim R_{120,5\%}$

(4) 繰返し三軸試験: 図-4(a)および図-4(b)に, 豊浦砂および珪砂5号に対する等価せん断剛性率 G_{eq} と片振幅せん断ひずみ γ_{SA} の関係を示す。図-5(a)および図-5(b)に, 履歴減衰率 h と γ_{SA} の関係を同様に示す。図-6 は拘束圧 p と初期せん断剛性率 G_0 / 拘束圧 p の関係である。初期せん断剛性 G_0 は拘束圧の増加に伴い大きくなるが, シリカ濃度に対する感度は拘束圧が小さいほど低くなる。また, 砂の種類によって固結砂の初期せん断剛性は異なり, 拘束圧 100kN/m² 下

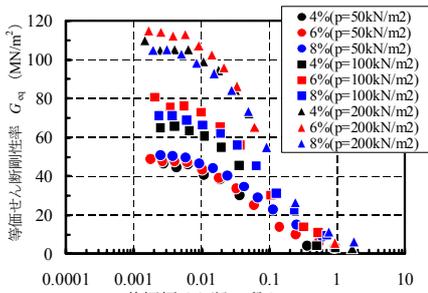


図-4(a) $G_{eq} \sim \gamma_{SA}$ (豊浦砂)

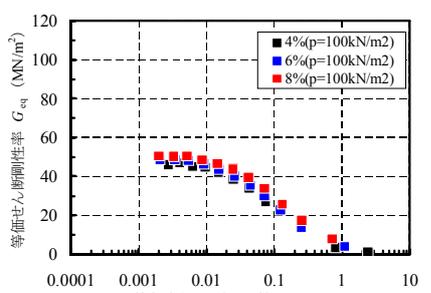


図-4(b) $G_{eq} \sim \gamma_{SA}$ (珪砂5号)

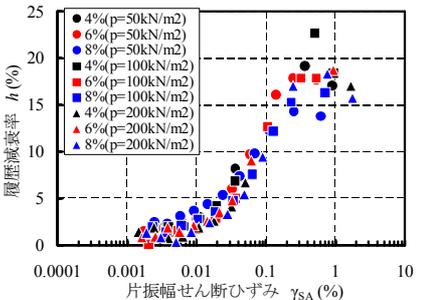


図-5(a) $h \sim \gamma_{SA}$ (豊浦砂)

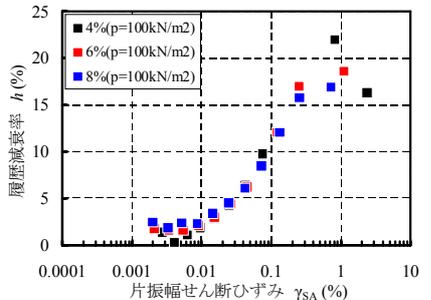


図-5(b) $h \sim \gamma_{SA}$ (珪砂5号)

での珪砂5号の G_0 は, 拘束圧 50kN/m² 下での豊浦砂の G_0 と同程度の値であった。図-6 のような整理で見ると, 拘束圧で除した初期せん断剛性率 G_0/p は, 拘束圧の増加に伴い低下し, ある拘束圧で収束するような傾向を示す。一方, 履歴減衰率 h は, 拘束圧やシリカ濃度, 砂の種類に関係なくほぼ同じ傾向を示している。

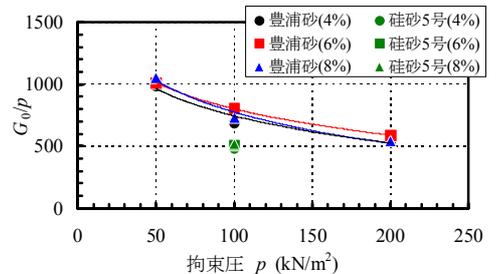


図-6 拘束圧 $\sim G_0/p$

4. まとめ

豊浦砂および珪砂5号を対象に恒久グラウトにより改良した固結砂の力学・変形特性を示した。今後は, 動的な有効応力解析におけるパラメータの検討を進めていく予定である。

参考文献 1)東畑ら: 地震と地盤の液状化-恒久・本設注入によるその対策-, インデックス出版, pp.190-194, 2010.
2)諏訪ら: 薬液注入供試体のせん断挙動におけるダイレイタンス特性の把握, 第33回土木学会関東支部技術研究発表会, 2006.