

コンシステンシーとせん断強さの関係に基づく改良土の強度発現特性に関する検討

佐賀大学工学部 ○学 松尾友誠 佐賀大学共同研究員 正 碓井博文
 佐賀大学工学部 正 日野剛徳 大分工業高等専門学校 正 姫野季之

1. はじめに 筆者らの属する研究グループは、佐賀低平地の深層混合処理工法における改良柱体頭部の品質不良について究明している。改良柱体頭部は蓮池層上部に相当することが多く、同地層は堆積環境の都合で有機物に富むことなどにその主因が求められている¹⁾。本報では、セメントスラリーを用いた蓮池層上部における粘性土（以下、蓮池粘土（上部）と呼ぶ）の強度発現特性の検討に際し、フォールコーン試験を適用した。次に、コンシステンシーとせん断強さの関係に基づき、同強度発現特性について考察した。

2. 蓮池粘土（上部）の基本的性質 佐賀市嘉瀬町中原における蓮池粘土（上部）を以後の検討に供した。表-1に、その基本的性質を示す。土の詰まり具合、隙間の量、などの観点に照らして軟弱といえる。表-2に、蓮池粘土（上部）のコンシステンシーについて抜粋した。後述の検討に資するために、フォールコーン試験によるコンシステンシー限界も求めた。なお、フォールコーン試験による液性限界試験はJGS 0142-2020に定められているが、塑性限界試験は定められていないため、甲本ら³⁾の方法に従った。甲本ら³⁾によれば、塑性限界時の非排水せん断強さは液性限界時の非排水せん断強さの約100倍との結果に基づいて、貫入量1.15mmにおける含水比が塑性限界として提案されている。蓮池粘土（上部）におけるキャサグランデ法による液性限界 $w_L=108.1\%$ 、塑性限界 $w_p=45.4\%$ 、フォールコーン試験による $w_L=116.9\%$ 、 $w_p=53.4\%$ のように、各限界について試験法の違いによらずほぼ等しい値が得られた。

3. 供試体の作製方法とフォールコーン試験の適用 表-1に示す蓮池粘土（上部）を用い、JGS 0821-2020に従って改良土を作製した。セメント系固化材の添加量 C を 110kg/m^3 に固定し、水セメント比 W/C を0.5, 1.0, 1.5のように変化させて攪拌混合する。

蓮池粘土（上部）に蒸留水とセメント系固化材を加え、ソイルミキサーで10分間攪拌混合する。以上のように作製された改良土について、JGS 0142-2009に従ってフォールコーン試験の供試体とした。本検討では12個のフォールコーン試験容器を準備し、経過時間ごとの計測に対応させた。なお、改良土の攪拌混合終了から10分経過直後の供試体が最初の計測に供せられることになる。それぞれの供試体をフォールコーン試験に設置させた後、コーンを自重によって貫入させ、5秒後の貫入量を計測値とし、10分から120分におけるデータの取得を積み重ねた。

4. コンシステンシーとせん断強さの関係に基づく強度発現特性に関する検討 図-1に、蓮池粘土（上部）における改良後120分までの経過時間に伴う強度発現特性について、各ドットによって示している。 W/C が低いほど短時間で強度発現が認められるが、ばらつきも目立つ。 W/C が高いほど強度発現は緩やかになるが、ばらつきは抑えられる⁴⁾。次に、藤川・甲本⁵⁾は下記の式(1)を公表し、コンシステンシーとせん断強さの関係を併せて論じることを可能にしている。

$$c_u = K \frac{Q}{h^2} \quad (1)$$

ここに、 c_u ：非排水せん断強さ (kPa)、 K ：係数、 Q ：フォールコーン試験におけるコーンの重量 (N)、

表-1 各配合実験における蓮池粘土（上部）の基本的性質（項目の順序は三笠（1964）²⁾に基づく）

項目	蓮池粘土（上部）	
粒度組 成	礫分(%)	0.0
	砂分 (%)	0.9
	シルト分 (%)	43.7
	粘土分 (%)	55.4
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.74	
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³) (JGS 0821 2020)	1.371	
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.594	
間隙比 e	3.61	
飽和度 S_r (%)	99.2	

表-2 蓮池粘土（上部）のコンシステンシー特性

項目	キャサグランデ法	フォールコーン法
自然含水比 w_n (%)	130.7	130.7
液性限界 w_L (%)	108.1	116.9
塑性限界 w_p (%)	45.4	53.4
液性指数 I_L	1.2	1.2

h : 貫入量 (mm)

式(1)によれば, 本検討に用いたフォールコーン試験の先端部の角度は 60° により $K=0.305$, $Q=600\text{N}$ のように代入することで貫入量から c_u を求めることができる. さらに, フォールコーン試験において液性限界 w_L に相当する $h=11.5\text{mm}$, 塑性限界 w_p に相当する $h=1.15\text{mm}$ ³⁾であり, それぞれの h を式(1)に代入して非排水せん断強さ c_u に換算すると, $w_L=1.36\text{kPa}$ (kN/m^2), $w_p=135.73\text{kPa}$ (kN/m^2) のように得られる. この値を 図-1 に重ねて検討すると, 蓮池粘土 (上部) の改良土は少なくとも攪拌混合後の約 60 分以降から塑性限界への移行の加速がうかがえ, この傾向は W/C が低下するほど顕著といえる. 他方, 塑性状態の領域を液性指数 I_L で表したときのコンシステンシー変化を 図-2 に示す. 同図は嘉門ら⁶⁾によって示されたものの再掲であり, コンシステンシーとせん断強さの関係が明示された稀有な図として注目し続けている. 同図によれば, 液状と塑性状の境である w_L のせん断強さ $\tau_f=0.01\text{kgf/cm}^2$ (1kN/m^2), 塑性状と固体状 (半固体状) の境である w_p の $\tau_f=1.0\text{kgf/cm}^2$ (100kN/m^2) と示されていて, 上述の藤川・甲本⁵⁾による知見との間の類似がうかがえる. また, 塑性状におけるコンシステンシーの程度について, 四分割からなる範囲によって区分している. 図-3 では, 嘉門らによって示された 図-2 中のコンシステンシーの表現を重ねた. 攪拌混合後 120 分の各値のピークは「中位の軟らかさ」の表現にとどまったものの, 短時間において 3 段階の表現の変化を示した. 以上のような塑性限界への移行の加速, ならびにコンシステンシーに関する表現の変化について, W/C が高くなるほど抑えられているといえる.

5. 考察 改良柱体の施工プロセスとして, 往路でセメントスラリーが吐出され, 攪拌混合される. 復路ではセメントスラリーは添加されず, 攪拌翼は攪拌混合のみによって改良柱体頭部に達する. この所要時間は施工スピードや改良長に依存するが, 改良柱体頭部における攪拌翼の往復の時間差が 60 分以上を超えることは十分にあり得る. 前章までの検討を重ねてきた結果, 改良柱体頭部ほどコンシステンシーの変化に伴うせん断強さの増加が進み, その傾向は W/C が低いものほど顕著なことがわかった. 改良柱体頭部は, 攪拌翼にとって復路ほど攪拌混合し難い状態に陥っていることが示唆される.

6. おわりに 本報で得られた知見を要約すると, 次のとおりである: 1) 蓮池粘土 (上部) の改良土は攪拌混合後の約 60 分以降から塑性限界への移行の加速がうかがえる. また, 攪拌混合後 120 分における各値のピークはコンシステンシーにおける「中位の軟らかさ」の表現にとどまったが, 短時間で 3 段階の表現の変化を示すものがあつた; 2) 改良土におけるコンシステンシーとせん断強さの変化は, 水セメント比 W/C が低いほど顕著であり, W/C が高いほど隠微である.

謝辞: 本報の検討に際し, 甲本達也佐賀大学名誉教授には, 土のコンシステンシーとせん断強さの関係の考え方について多大なるご指導をいただいた. 記して感謝の意を表します.

参考文献: 1) 三浦ら: 軟弱地盤, No.15, pp.83-102, 2018. 2) 三笠: 土と基礎, Vol.12, No.4, pp.17-24, 1964. ; 3) 甲本ら: 土壌の物理性, 第 62 号, pp.63-67, 1991. ; 4) 川添ら: 令和 3 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, CD-ROM, 第三部門, pp.345-346, 2022. ; 5) 藤川・甲本: 農業土木学会論文集, 第 83 号, pp.38-43, 1979. ; 6) 嘉門ら: 16 土の力学 (I) ~ 土の分類・物理化学的性質~, 新体系土木工学 (土木学会編), 技報堂出版, pp.87-97, 1988.

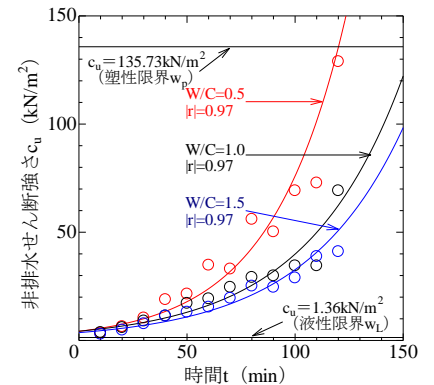


図-1 改良後の経過時間に伴う強度発現特性 (甲本ら^{3),5)}併記)

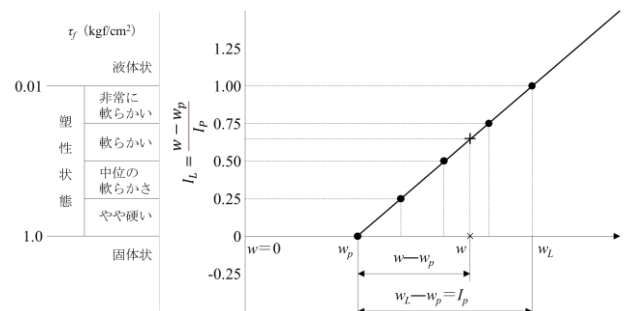


図-2 塑性状態の領域を I_L で表したときのコンシステンシー変化⁶⁾

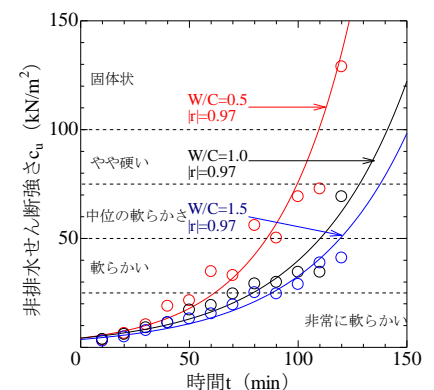


図-3 改良後の経過時間に伴う強度発現特性 (嘉門ら⁶⁾併記)