

DOI: 10.11779/CJGE2019S2014

透明黏土可视度及物理力学特性研究

雷华阳^{1, 2}, 刘英男¹, 翟塞北¹, 屠慈科¹, 刘敏¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 透明土是用于岩土工程模型试验可视化研究的一种重要材料, 明确其可视度控制因素与物理力学特性具有重要的意义。采用#15白油与正十二烷作为孔隙液体, 无定形硅粉作为固相材料, 通过对比不同的孔隙液体配比和掺入硅粉的质量比, 发现可视度达到最佳时的配比为15号白油:正十二烷=10:3(体积比), 孔隙液体:无定形硅粉=1.5:1(质量比)。针对最佳可视度的透明黏土进行了变形与强度特性试验, 试验结果表明透明黏土属于高压缩性土, 并且与天津滨海软黏土的压缩变形特征相近, 二者压缩系数和压缩模量相差在10%以内; 固结快剪试验表明当透明黏土的当应力水平较低(不大于200 kPa)时, 透明黏土的抗剪强度指标可以取 $c\approx 11$ kPa, $\varphi=14^\circ\sim 18^\circ$, 当应力水平较高(大于200 kPa)时, 可以取 $c=20.28\sim 22.62$ kPa, $\varphi\approx 17^\circ$ 。

关键词: 透明黏土; 可视度; 孔隙液体配比; 压缩特性; 强度特性; 超固结比

中图分类号: TU449 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0053-04

作者简介: 雷华阳(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研工作。E-mail: leihuayang74@163.com。

Visibility and mechanical properties of transparent clay

LEI Hua-yang^{1, 2}, LIU Ying-nan², ZHAI Sai-bei², TU Ci-ke², LIU Min²

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Safety Education Department on Littoral Area, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The transparent soil is a kind of important material for the visualization researches model tests in geotechnical engineering. It is of great significance to clarify its visibility control factors and physical and mechanical properties. The white oil No. 15 and n-dodecane are used as the pore liquid, and the amorphous silicon powder is used as the solid phase material. By comparing the ratio of different pore liquids and the mass ratio of silicon powder, it is found that the visibility is the best when the ratio of the white oil No. 15 to the n-dodecane is 10:3 (volume ratio) and that of the pore liquid to the amorphous silicon powder is 1.5:1 (mass ratio). The deformation and strength characteristics of the transparent clay with the best visibility are tested. The test results show that the transparent clay is a highly compressive soil, and its compression deformation characteristics are similar to those of Tianjin coastal soft clay, and their differences in compression coefficient and compression modulus are within 10%. The consolidated quick shear tests show that when the stress level of transparent clay is relatively lower (≤ 200 kPa), the strength indices can be taken as $c\approx 11$ kPa, $\varphi=14^\circ\sim 18^\circ$, and when the stress level is relatively higher (> 200 kPa), the strength indices can be taken as $c=20.28\sim 22.62$ kPa, $\varphi\approx 17^\circ$.

Key words: transparent clay; visibility; ratio of pore liquid; compression characteristic; strength characteristic; OCR

0 引言

应用透明土材料和数字照相技术, 可以实现在不扰动岩土体自身的情况下, 获取较为真实的土体内部位移场, 有助于对岩土工程更加全面和深入的研究。透明土始于国外学者利用碎玻璃模拟土料来进行模型试验研究。Allersma等^[1]利用碎玻璃和具有相同折射率的间隙流体配成透明土, 并研究了单剪条件下的应力分布; 其后, Konagai等^[2]在其研究基础上进行了地震荷载下饱和堤防的应力变化研究, 研究表明碎玻璃

透明土与天然土体具有较大的差异性。Mannheimer^[3]首次配成真正意义上的透明泥浆, 并研究了泥浆的非牛顿流体问题。Pincus等^[4]、Iskander等^[5]的试验结果显示松散的人工合成透明砂具有应变硬化特征, 而密实的透明砂则具有应变软化特征。孔纲强等^[6]采用透

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578371); 国家重点研发计划项目(2017YFC0805407); 天津市自然科学基金京津冀合作专项项目(16JCJDJC40000); 土木工程防灾国家重点实验室开放课题基金项目(SLDRCE17-01)

收稿日期: 2019-04-29

明砂土进行了管桩、X型桩的沉桩模型试验。宫全美等^[7]采用#15白油和正十二烷配制了透明黏土,表明其压缩特性与上海④层灰色淤泥质黏土基本相似。

应用透明土材料进行岩土工程问题的研究时,存在两方面问题,一方面是可视度的要求,这是由于透明土需要通过激光束对其进行切面,再利用数字照相技术进行图像采集与分析;另一方面是透明土材料本身的物理力学特性应当与真实岩土体的性质接近。目前对于透明黏土可视度的定量化分析及其基本的物理力学特性的研究仍不充分,因此本文针对上述两点问题展开了透明土可视度的定量化分析并通过对比透明黏土和天然黏土的物理力学特性,探讨其用于模拟天然黏土的可行性。

1 透明黏土配制方法

1.1 透明黏土配制材料

配制透明黏土的材料选用无定形硅粉作为固相材料, #15白油和正十二烷作为孔隙液体。无定形硅粉的密度为0.056~0.230 g/cm³(干燥状态),与天然黏土的密度值相比较小。正十二烷,化学式C₁₂H₂₆,熔点-9.6℃,沸点215℃~217℃,不溶于水,无色液体。

具体材料配比方案如表1所示。

表1 材料配比方案

Table 1 Schemes of material ratio

#15白油 V ₁ /mL	正十二烷 V ₂ /mL	V ₁ /V ₂	液体质量 m ₁ /g	硅粉质量 m ₂ /g	$\frac{m_1}{m_2} / \%$
272	27	10:1	252	168	150
250	50	10:2	251	168	150
230	70	10:3	250	167	150
214	86	10:4	250	166	150
200	100	10:5	249	166	150
188	112	10:6	249	166	150
230	70	10:3	250	179	140
230	70	10:3	250	157	160

1.2 透明黏土配制注意事项及方法

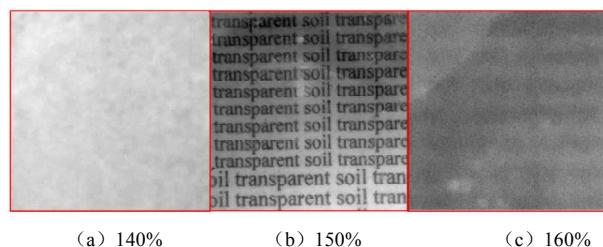
在透明黏土的配制中,需要特别注意搅拌和真空排气,以及保持实验室温度基本不变^[8]。

按照表1所示的材料配比方案,分别配制同等体积的透明黏土于相同的烧杯中。具体配制步骤如下:①首先利用量筒称量所需体积的#15白油和正十二烷,并将二者混合搅拌均匀,静置3~5 min。②称量所需质量的无定形硅粉,慢慢撒入混合好的液体之中,撒入硅粉的过程中要不断用玻璃棒搅拌,确保硅粉均匀地分散在孔隙液体之中。③上述搅拌后的透明土中存在大量的气泡,对此,采用真空抽气装置加快透明土的排气过程。④抽气之后的透明土静置1~2 h,即可除去内部气泡,并且具有较好的可视度。

2 透明黏土的可视度评价

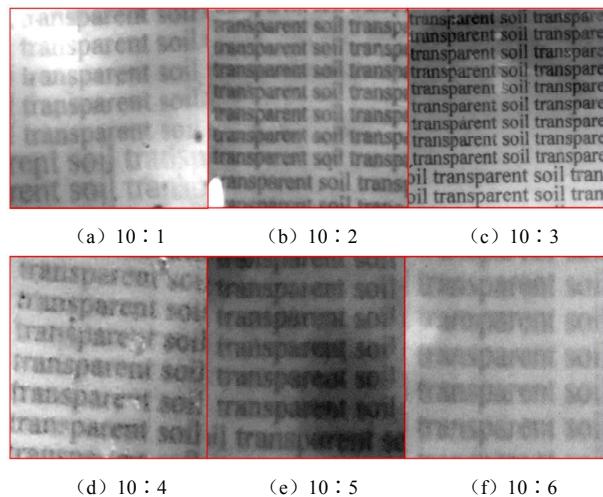
配制厚度同为10 cm的透明黏土,配制后的不同

m_1/m_2 和V₁/V₂下的透明土可视度如图1,2所示。



(a) 140% (b) 150% (c) 160%
图1 不同 m_1/m_2 下的透明土可视度

Fig. 1 Visibility of transparent soil under different values of m_1/m_2



(a) 10:1 (b) 10:2 (c) 10:3
(d) 10:4 (e) 10:5 (f) 10:6
图2 不同 V_1/V_2 下的透明土可视度

Fig. 2 Visibility of transparent soil under different values of V_1/V_2

从图1可以看出硅粉含量对透明黏土的可视度影响较大,当 $m_1/m_2=150\%$ 时,可视效果最佳。这是由于硅粉含量会影响透明黏土体系内的固相材料和液相材料折射率匹配度,从而影响可视度。为了定量化评价它们的可视度,取厚度为10 cm时,经过透明黏土可以观察到的最小字号作为其可视度评价标准。定量分析不同 V_1/V_2 下的透明土可视度下可以观察到的最小字号,其结果如图3所示,可以看出, $V_1/V_2=10:3$ 时的透明黏土可视度效果最佳,表明在此配比下,孔隙液体的折射率能够实现与硅粉之间的最佳匹配。

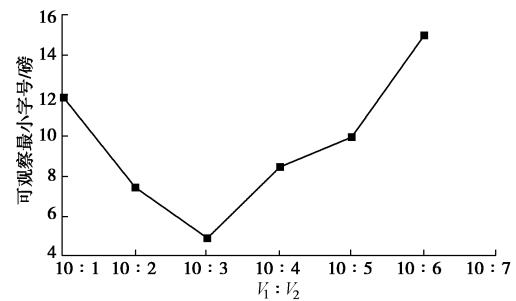


图3 V_1/V_2 与可观察到最小字号关系曲线

Fig. 3 Relationship between V_1/V_2 and observable minimum font size

3 透明黏土物理力学特性试验

3.1 无定形硅粉粒度特征

无定形硅粉的颗粒级配曲线结果如图4所示。可

以看出, 无定形硅粉的粒径主要集中于 4~10 μm 之间。根据建筑地基基础设计规范 (GB50007—2002) 中关于土的分类标准, 无定形硅粉的粒径处于粉质黏土的颗粒粒径范围内, 因此可认为试验选用的无定形硅粉具备模拟实际的黏土颗粒的条件。

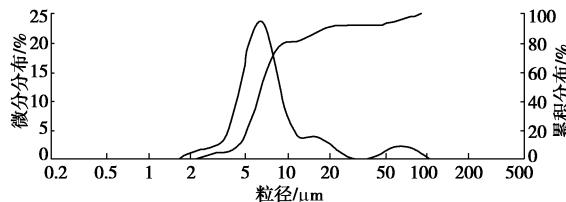


图 4 无定形硅粉的颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curves of amorphous silica powder

3.2 密度特征分析

密度试验结果如表 2 所示。可以看出, 透明黏土的密度仅为 1.08~1.10 g/cm^3 , 这与天然黏土的密度相差较大, 仅为 40%~50%。这是由于透明土中固体颗粒存在大量的毛细孔道, 且吸油能力强, 而混合液的又相对密度较小。因此在利用透明土进行模型试验的时候必须考虑土体重度的相似关系。此外可以发现, 只要 m_1/m_2 的值固定, 透明土的密度将基本保持一致。本文在涉及透明黏土密度特征的相关计算时, 如孔隙比等, 统一取密度值为 1.10 g/m^3 。

表 2 透明黏土密度试验结果

Table 2 Results of density tests on transparent clay

V_1/V_2	编号	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	平均值 $\bar{\rho}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
10:3	1	1.08	1.10
	2	1.11	
	3	1.10	
10:4	4	1.10	1.09
	5	1.08	
	6	1.08	
10:5	7	1.08	1.08
	8	1.07	
	9	1.09	

3.3 透明黏土压缩特性

常规的黏土孔隙比的确定方法不能直接用于透

表 3 透明黏土和天津滨海软黏土物性指标对比

Table 3 Comparison of physical properties of transparent clay and Tianjin coastal soft clay

土性	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水(油)率 $w/\%$	初始孔隙比 e_0	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩指数 C_c	压缩模量 $E_{s(0.1-0.2)}/\text{MPa}$	回弹指数 C_s
本文透明黏土	1.08	150	1.224	0.879	0.543	2.531	0.0006
天津滨海新区粉质黏土 ^[10]	1.757	50.3	1.34	0.81	0.65	2.81	—
上海第四层灰色淤泥质黏土 ^[11]	1.731	49.95	1.361	1.02	0.541	2.23	—
连云港原状淤泥质黏土 ^[12]	—	66.4	1.775	2.2	0.664	1.261	—
Ariake clays ^[13]	—	87.4	2.25	3.8	0.98	0.855	—
Kitakyushu clays ^[13]	—	59.4	1.582	1.6	0.548	1.614	—

明黏土, 这是由于透明土中的无定形硅石粉末为多孔材料, 颗粒内存在大量毛细孔道, 因此需以颗粒间的空隙反映土样孔隙比才更具代表性^[5]。Mannheimer 等^[9]测得单位质量无定形硅石粉末颗粒内孔隙的吸油量 α 为 2.1 cm^3/g , 并提出颗粒间孔隙比 e_i 的计算式:

$$e_i = \frac{V_v - V_{vi}}{V_s + V_{vi}} = \frac{e - \alpha \gamma_s}{1 + \alpha \gamma_s} \quad (1)$$

式中 V_v 为单位质量土样总的孔隙体积; V_{vi} 为单位质量土样固体颗粒内的孔隙体积; V_s 为单位质量土样固体颗粒体积; e 为土样总孔隙比; γ_s 为固体颗粒重度。

根据式 (1) 进行计算, 得到透明黏土的压缩系数 $a_{1-2}=0.879 \text{ MPa}^{-1}$, 压缩模量 $E_{s(0.1-0.2)}=2.531$, 表明透明黏土属于高压缩性土。此外, 根据本文结果和其他相关文献绘制了透明黏土和其他天然黏土的 e - $\lg p$ 曲线, 如图 5 所示, 并总结了它们的土体物理特性指标, 如表 3 所示。通过对比可以看出, 透明黏土和天津滨海新区粉质黏土的压缩曲线十分接近。

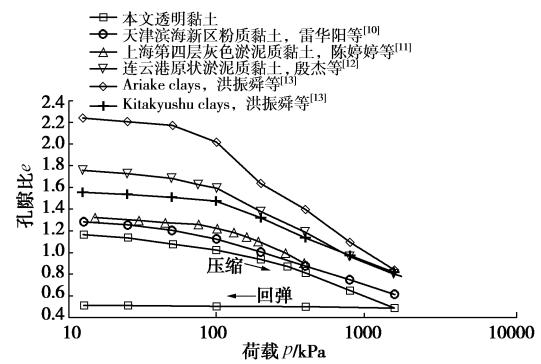


图 5 透明黏土和其他地区黏土的 e - $\lg p$ 曲线

Fig. 5 e - $\lg p$ curves of transparent clay and other soft clays

3.4 透明黏土剪切强度特性

不同先期固结压力下的透明黏土强度包线如图 6 所示。可以看出, 当应力水平较低时, 透明黏土抗剪强度可取 $c \approx 11 \text{ kPa}$, $\varphi = 14^\circ \sim 18^\circ$, 当应力水平较高 ($> 200 \text{ kPa}$) 时, 可取 $c = 20.28 \sim 22.62 \text{ kPa}$, $\varphi \approx 17^\circ$ 。上述指标与天津滨海地区典型黏土的抗剪强度指标基本一致^[11], 表明其可以用于模拟天津地区软黏土。

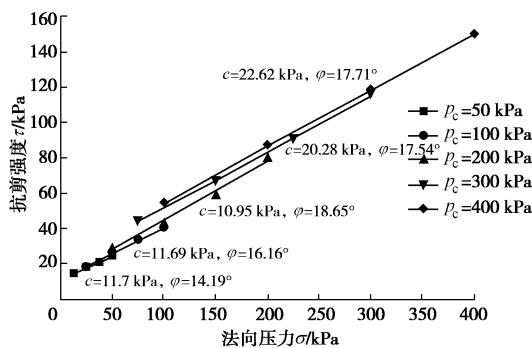


图 6 固结快剪强度包线

Fig. 6 Envelopes of consolidated quick direct shear strength

4 结 论

本文在现有的透明黏土研究基础上, 研究了可视度影响因素及其物理力学性质, 得到了以下 3 点结论:

(1) 透明黏土可视度最佳时的配比为: #15 白油: 正十二烷=10:3 (体积比), 孔隙液体: 无定形硅粉=1.5:1 (质量比)。

(2) 透明黏土的压缩系数 $a_{1-2}=0.879 \text{ MPa}^{-1}$, 压缩模量 $E_{s(0.1-0.2)}=2.531$, 表明透明黏土属于高压缩性土, 且压缩特性与天津滨海地区的软黏土相似。

(3) 当透明黏土的应力水平较低 (不大于 200 kPa) 时, 可取 $c \approx 11 \text{ kPa}$, $\varphi=14^\circ \sim 18^\circ$, 当应力水平较高 (大于 200 kPa) 时, 可取 $c=20.28 \sim 22.62 \text{ kPa}$, $\varphi \approx 17^\circ$ 。

参考文献:

- [1] ALLERSMA H G B. Photo-elastic stress analysis and strain in simple shear[C]// IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials. 1982.
- [2] KONAGAI K, TAMURA C, RANGELOW P. Laser-aided tomography: a tool for visualization of changes in the fabric of granular assemblage[J]. Struct Eng Earthquake Eng, 1992, 9(3): 193 - 201.
- [3] MANNHEIMER R. Slurries you can see through[J]. Technology Today, 1990(3): 2.
- [4] PINCUS H J, ISKANDER M G, LAI J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(4): 425 - 433.
- [5] ISKANDER M G, LIU J, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(3): 262 - 273.
- [6] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140 - 1146. (KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1140 - 1146. (in Chinese))
- [7] 宫全美, 周俊宏, 周顺华, 等. 透明土强度特性及模拟黏性土的可行性试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 853 - 860. (GONG Quan-mei, ZHOU Jun-hong, ZHOU Shun-hua, et al. Strength property and feasibility test of transparent soil to model clayey soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science) 2016, 44(6): 853 - 860. (in Chinese))
- [8] ZHANG Y P, LI L, WANG S Z. Experimental study on pore fluid for forming transparent soil[J]. Journal of Zhejiang University, 2014, 48(10): 1828 - 1834.
- [9] MANNHEIMER R J, OSWALD, et al. Development of transparent porous media with permeabilities and porosities comparable to soils, aquifers, and petroleum reservoirs[J]. Groundwater, 2010, 31(5): 781 - 788.
- [10] 雷华阳, 任倩, 卢海滨, 等. 相对厚度变化下双层软黏土地基固结特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 705 - 711. (LEI Hua-yang, REN Qian, LU Hai-bin, et al. Research on consolidation property of double layer soft clay foundation under different relative thickness conditions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(3): 705 - 711. (in Chinese))
- [11] 陈婷婷, 高彦斌, 徐超, 等. 结构性对上海软黏土的压缩特性影响[C]// 全国工程地质大会. 上海, 2008. (CHEN Ting-ting, GAO Yan-bin, XU Chao, et al. Influence of Soil Structure on the Compressibility of Shanghai clay[C]// Chinese National Engineering Geology Conference. Shanghai, 2008. (in Chinese))
- [12] 殷杰. 土结构性对天然软黏土压缩特性的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 48 - 52. (YIN Jie. Effect of soil structure on compression behavior of natural soft clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 48 - 52. (in Chinese))
- [13] 洪振舜, 刘松玉, 于小军. 关于结构土屈服破坏的探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 684 - 687. (HONG Zhen-shun, LIU Song-yu, YU Xiao-jun, et al. On destructuration of structured soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 684 - 687. (in Chinese))

(责编: 孙振远)