

透明土强度特性及模拟黏性土的可行性试验

宫全美, 周俊宏, 周顺华, 季 昌

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 采用体积比为 2.5 : 1 的 15 号白矿油和正十二烷混合液与无定形硅石粉末配制成透明土以模拟黏性土. 进行了 120 个不同应力状态透明土样的直剪固结强度试验及常规固结压缩试验, 给出了透明土在不同应力状态下的抗剪强度值, 并与典型黏性土进行了对比分析, 得知两者在强度及压缩特性上具有高度相似性; 通过等沉降速率的室内压板载荷试验, 得到了荷载-沉降曲线、土体极限承载力、土体速度场、土体位移场, 与既有研究结果进行了对比, 验证了透明土模拟黏性土应用于模型试验的可行性.

关键词: 透明土; 黏性土; 激光源; $P-S/b$ 曲线; 直剪试验
中图分类号: TU449 **文献标志码:** A

Strength Property and Feasibility Test of Transparent Soil to Model Clayey Soil

GONG Quanmei, ZHOU Junhong, ZHOU Shunhua, JI Chang
(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The transparent soil was developed to model clayey soil, which was composed by amorphous silica powder, white mineral oil and dodecane mixture (2.5 : 1 by volume). Based on the consolidated quick direct shear tests of 120 transparent soil samples with different stress states and normal consolidated compression tests, the shear strength under different stress states was given, also the strength and deformation properties were studied and showed high similarity to clayey soil. The loading-settlement curves, ultimate bearing capacity, and velocity field displacement field were obtained by plate loading tests with the same settlement rates. The feasibility of using transparent soil to model clayey soil was finally verified by comparing with some known results.

Key words: transparent soil; clayey soil; laser source; $P-S/b$ curves; direct shear test

一般岩土工程的模型试验只能观测到土体表面的位移场, 而土体表面常因边界效应不能完全反映真实情况; 还有一些试验需要观测土体内部的位移场变化及渐进性的破坏过程, 如注浆过程浆液的走向及土体的破坏发展规律等, 传统方法是在土体内部埋设传感器, 但该方法一方面影响土的连续性, 另一方面因传感器静动力特性与土体相差较大而影响测试结果, 对于小比例模型试验该问题更为突出.

为了实现非接触式观测土体内部连续位移场, Sadek 等^[1]首先采用无定形硅石凝胶和具有相同折射率的孔隙液体配制成可模拟砂土的透明土, 并对其物理力学特性进行研究; Iskander 等^[2]、Liu 等^[3]采用白矿油与正十二烷质量比 1:1 的混合液与无定形硅石粉末配制成透明土, 并进行三轴压缩试验、渗透试验, 认为该土样在宏观力学指标上可用于模拟黏性土, 但研究只针对部分前期固结压力较大土样, 而透明土的透明度存在随固结压力增大而减弱现象, 在模型试验中为保证透明度, 土样固结压力往往较小, 其试验结果无法满足不同试验中土样强度取值要求, 需进一步对不同固结压力下的强度特性进行分析; Ni 等^[4]结合粒子图像测速 (PIV) 技术 (可实现非接触、瞬时、连续、动态地测定速度场) 将上述透明土应用于等截面圆形桩沉桩挤土效应模型试验, 得到了观测沉桩过程土体内部连续位移场的方法. 目前, 国内仅部分学者对透明砂土进行了研究, 对于透明土模拟黏性土应用于模型试验的可行性等问题有待开展. 吴明喜^[5]选用熔融石英砂和溴化钙溶液配制成透明砂土, 并采用三轴试验对该透明砂土力学特性进行研究; 张仪萍等^[6]为了选择与熔融石英砂相匹配的孔隙流体, 对 $\text{CaCl}_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ 溶液、 CaBr_2 溶液、白矿油的折射率、平均色散、黏度等性质进行研究, 得出温度和质量分数是控制折射率的关

收稿日期: 2015-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(41472247, 51478353)

第一作者: 宫全美(1967—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土工程、铁路线路动力学等.

E-mail: gongqm@tongji.edu.cn

通讯作者: 周俊宏(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为岩土工程、隧道工程. E-mail: 2zhoujh@tongji.edu.cn

键因素,在土样配制时须加以控制;孔纲强等^[7]、曹兆虎等^[8-10]采用玻璃砂和正十二烷及白矿油的混合物配制成模拟砂土的透明土样,并采用该透明砂土进行了管桩、X型桩的沉桩模型试验。

鉴于此,本文采用无定形硅石粉末、15号白矿油、正十二烷为原料配制成透明土以模拟黏性土,详述土样配置方法,并对该透明土样进行强度特性、压缩特性试验,与天然黏性土对比,说明两者相似程度,同时进行等沉降速率的室内压板载荷试验。

1 透明土配比确定及制备方法

1.1 透明土配比确定方法

以粒径2000目($6.5\ \mu\text{m}$)的无定形硅石粉末模拟固体颗粒,15号白矿油、正十二烷的混合液模拟孔隙液体,将三者按一定比例混合后制备成透明土。土样透明度的高低取决于固相与液相材料折射率的匹配性,而白矿油与正十二烷单一材料的折射率均与无定形硅石粉末不同^[5]。因此,为达到土样透明的目的,关键需确定白矿油与正十二烷的配比,以保证混合液与无定形硅石粉末的折射率相匹配。

液体材料的折射率可通过阿贝折射仪测定,而对于无定形硅石粉末这种多孔粉末的折射率却无直接的测定方法^[5]。因此,试验中采用试配法,即在固定的温度条件下($20\ ^\circ\text{C}$)配制不同白矿油与正十二烷体积比的混合液并与无定形硅石粉末混合制备成透明土,通过对比不同配比土样的透明度确定液相材料的配比。

目前,暂无标准化的透明度确定方法,试验时多采用目测法,但该方法准确性不足。采用透明土进行模型试验的主要目的为:消除边界效应,并借助PIV等观测手段实现土体内部非接触式的连续位移场观测。图1为采用透明土结合PIV观测技术进行模型试验的示意图,图中 d_1 为面激光入射面至模型箱边界的距离,面激光照亮的面即为观测面,试验时需保证在该面上的示踪粒子清晰可见, d_1 越小边界效应越明显; d_2 为激光入射深度, d_2 的大小直接决定了模型试验的尺寸。

基于以上特点,给出了量化描述土样透明度的双参数评估指标。

(1)透视性(反映 d_1):采用15号白矿油与正十二烷体积比不同的混合液与无定形硅石粉末制备成透明土,并将其置于长、宽、高、厚分别为200,50,50,2 mm的有机玻璃模型盒中,透明土配置过程中须保证除混合液配比外其他条件均相同,不同透明土样中的无定形硅石粉末与混合液质量比也须保持一致

(本文试验时取1:5)。试验中在模型盒背面放置标有不同数字大小的网格纸,以透过50 mm土样时所能识别的最小数字大小来表征透视性,如图2所示。

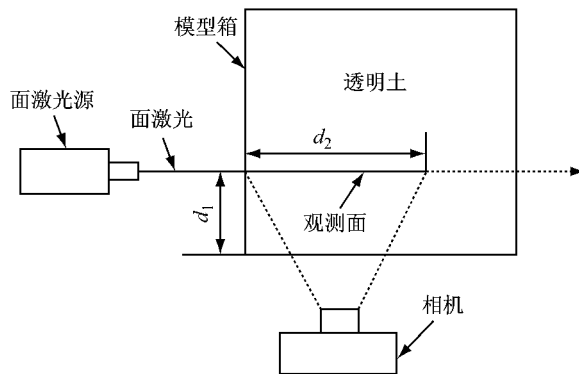


图1 透明土模型试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of model test using transparent soil

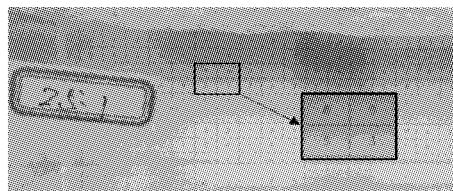


图2 透视性

Fig.2 perspectivity

(2)激光入射深度(反映 d_2):通过在透明土中混入相同示踪粒子(本次试验中采用粒径 $30\ \mu\text{m}$ 的珠光粉),在2.5 W强度面激光源的照射下,采用CCD(charge coupled device)相机采集图像,以所能观测到示踪粒子的最大深度作为激光入射深度,如图3。

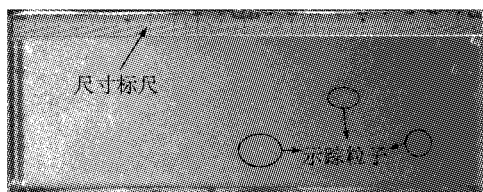


图3 激光入射深度

Fig.3 laser incident depth

通过上述方法最终确定混合液配比为15号白矿油与正十二烷体积比为2.5:1,透明土在未加压力固结情况下所能识别的最小数字大小为5磅,激光入射深度为170 mm。

试验发现,无定形硅石粉末与混合液的质量比会影响真空除气时间及加压固结的可操作性:质量比过大,导致真空除气时间过长而加长土样制备时间;质量比过小,会因土样过软导致加压固结过程中易出现加载板偏压、土体挤出等现象。综上,通过试配知当质量比为1:5时土样在真空环境中3~4 h

即可达到透明的效果,真空除气时间较短,且软硬适中,加压固结过程也较易操控,因此建议在透明土制备过程中无定形硅石粉末与混合液质量比取 1:5。

1.2 透明土制备关键步骤

透明土制备过程主要包含以下 3 步:材料混合、真空除气、加压固结,各步骤操作过程如图 4。

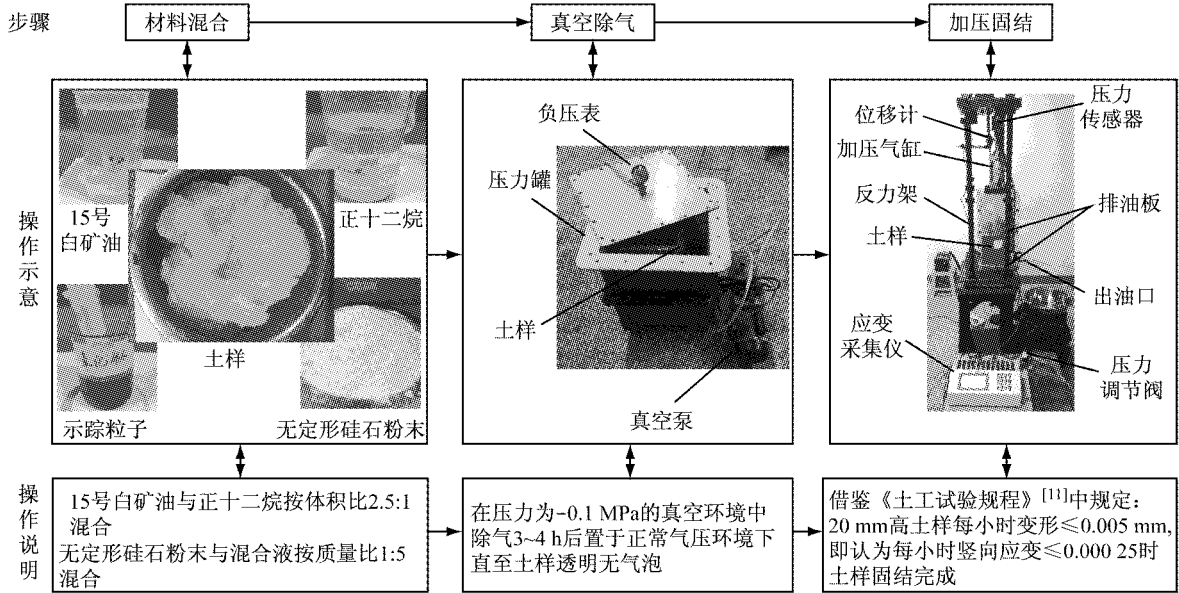


图 4 透明土制备关键步骤

Fig.4 Key steps of transparent soil preparation

2 透明土物理力学特性

2.1 密度及含油率

透明土中固体颗粒存在大量的毛细孔道,吸油能力极强,而混合液的密度较小,仅为 $788.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,因此透明土密度相对较小,在 $910.0 \sim 930.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,为天然黏性土的 1/2 左右。

在测定透明土样含油率时,Iskander 等^[2]采用烘干法,但混合液中的白矿油沸点高,用烘干法无法完全蒸发,因此需根据混合液的配比换算才能得到含油率。考虑到混合液中的正十二烷及 15 号白矿油均为可燃物质,因此本文借鉴酒精燃烧法测定透明土样含油率。为了验证燃烧法测定透明土含油率的可靠性,将无定形硅石粉末与混合液按质量比 1:5 制备成透明土后,在未加压固结的情况下直接取样进行燃烧法试验,试验结果如表 1 所示。表中, m_1 为盒质量, m_2 为总质量, m_3 为剩余质量, w_1 为实测含油率, w_2 为真实含油率, $w_1 = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100\%$, η 为测定误差, $\eta = \frac{w_1 - w_2}{w_2} \times 100\%$ 。试验发现采用该法测定的含油率误差可控制在 5.00% 内。根据该方法测得不同固结压力下透明土样的含油率如图 5。

2.2 压缩特性

透明土中的无定形硅石粉末为多孔材料,颗粒

表 1 燃烧法测定含油率误差情况

Tab.1 Error of oil content measured with combustion method

序号	m_1/g	m_2/g	m_3/g	$w_1/\%$	$w_2/\%$	$\eta/\%$
1	7.33	16.43	8.83	506.67	500	1.33
2	7.52	15.72	8.91	489.93	500	-2.01
3	7.26	16.36	8.72	523.29	500	4.66
4	7.38	17.65	9.11	493.64	500	-1.27

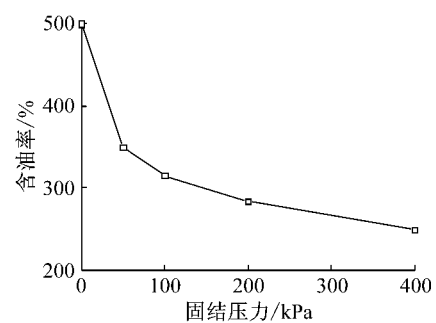


图 5 不同固结压力下透明土含油率

Fig.5 Oil content of transparent soil under different consolidation pressure

内存在大量毛细孔道,而在压缩试验中赋存于颗粒内的孔隙并不会被压缩,因此需以颗粒间的空隙反映土样孔隙比才更具代表性^[2]。Mannheimer 等^[11]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 ,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。

采用图4所示的加压固结设备,使透明土样在37.5 kPa的固结压力下固结稳定,然后采用环刀取样,并将取得的土样置于固结仪中,再施加37.5 kPa的法向力,直至土样稳定后参照《土工试验规程》^[12]的规定进行标准固结试验。试验结果结合式(1)得到 e_i-p 曲线和 $e_i-\lg p$ 曲线如图6所示,计算得到其压缩系数 $a_{v0.1\sim 0.2}=1.566 \text{ MPa}^{-1}$, 压缩模量 $E_{s0.1\sim 0.2}=1.345 \text{ MPa}$, 属于高压缩性土。通过与表2中上海黏土层的压缩指标对比得,透明土的压缩系数与压缩

模量大小在上海④层灰色淤泥质黏土压缩系数和压缩模量大小的变化范围内。表2中 ρ 为土体密度, c 为土体黏聚力, φ 为土体内摩擦角。

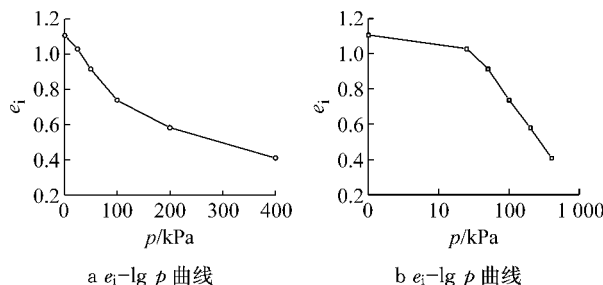


图6 压缩特性曲线

Fig.6 Curve of compressibility behaviour

表2 上海黏土层物理力学指标^[13-14]

Tab.2 Physical mechanical parameters of Shanghai clayey soils^[13-14]

土层名称	土层序号	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	e	$a_{v0.1\sim 0.2}/\text{MPa}^{-1}$	$E_{s0.1\sim 0.2}/\text{MPa}$	直剪固快	
						c/kPa	$\varphi/(\circ)$
灰色淤泥质粉质黏土	③1, ③3	1.71~1.86	1.00~1.36	0.300~1.030	2.20~5.97	8.5~14.2	12.1~28.0
灰色淤泥质黏土	④	1.64~1.79	1.12~1.67	0.550~1.650	1.32~3.58	11.5~15.7	8.5~16.9
褐灰色黏土	⑤, ⑤1	1.75~1.90	0.85~1.22	0.280~0.710	3.00~6.77	11.5~20.0	12.7~27.4

2.3 直剪固快强度特性

2.3.1 强度指标

参照《土工试验规程》^[12]中所规定的操作步骤,对前期固结压力在12.5~300.0 kPa之间的透明土进行了30组不同应力状态的直剪固快强度试验,其中每组应力状态取4个试样。土样制备时,先在图4所示的加压固结设备内施加12.5 kPa的固结压力进行加压固结,稳定后采用环刀取样并将其置于直剪仪中施加试验所需的前期固结压力进行进一步固结。表3为不同应力状态下透明土的直剪固快强度值。表3中为 σ_{ear} 前期固结压力, σ 为法向压应力。

通过表3试验结果可绘制不同前期固结压力透明土在不同法向力下的直剪固快剪切强度包络图。图7为前期固结压力为50.0 kPa、法向力在0~300.0 kPa时透明土的直剪固快强度包络图。在理论分析中可根据土中应力状态结合强度包络图确定土体的抗剪强度指标。如图7所示,以前期固结压力为50.0 kPa的透明土为例,对部分应力状态下的抗剪强度指标取值进行说明:试验过程土中应力状态在0~25.0 kPa之间时,强度指标可取为: $c=7.71 \text{ kPa}$, $\varphi=22.24^\circ$; 应力状态在100.0~200.0 kPa之间时,强度指标可取为: $c=0.92 \text{ kPa}$, $\varphi=27.98^\circ$ 。

对表3所有不同应力状态透明土进行分析得到透明土直剪固快强度指标变化范围:黏聚力在0~24.18 kPa之间,内摩擦角在19.44~28.63°之间,

表3 直剪固快强度

Tab.3 Consolidated quick direct shear strength

$\sigma_{\text{ear}}/\text{kPa}$	σ/kPa	抗剪强度/kPa			
		样1	样2	样3	样4
12.5	0	5.3	5.2	4.6	5.5
12.5	12.5	8.5	9.6	9.1	9.1
25.0	0	5.5	5.4	5.2	5.5
25.0	12.5	10.1	11.2	10.3	11.1
25.0	25.0	14.5	14.2	14.1	14.1
37.5	0	5.3	7.2	7.1	7.3
37.5	12.5	11.3	10.8	10.9	11.1
37.5	25.0	15.7	17.7	16.6	17.6
37.5	37.5	20.8	23.1	21.0	21.6
50.0	0	7.1	7.8	7.1	8.5
50.0	12.5	13.0	12.6	12.5	13.9
50.0	25.0	17.7	18.0	18.3	17.4
50.0	37.5	22.6	23.8	22.4	24.0
50.0	50.0	27.3	29.1	29.1	27.6
62.5	62.5	35.7	35.7	34.3	34.9
75.0	75.0	39.3	39.9	43.2	41.6
100.0	0	9.2	10.3	9.3	10.9
100.0	50.0	30.0	30.0	30.1	30.5
100.0	100.0	52.1	55.9	52.8	55.2
150.0	0	10.6	10.8	10.7	10.4
150.0	50.0	33.6	34.8	34.2	37.6
150.0	100.0	56.4	59.5	60.5	63.6
150.0	150.0	82.0	81.7	79.4	79.7
200.0	0	10.4	11.4	9.9	10.9
200.0	50.0	41.0	40.4	44.6	44.4
200.0	100.0	60.9	68.5	67.6	64.0
200.0	150.0	85.1	86.2	88.5	94.6
200.0	200.0	109.1	109.5	105.0	104.9
250.0	250.0	128.1	130.2	135.7	136.7
300.0	300.0	151.9	158.6	161.2	152.4

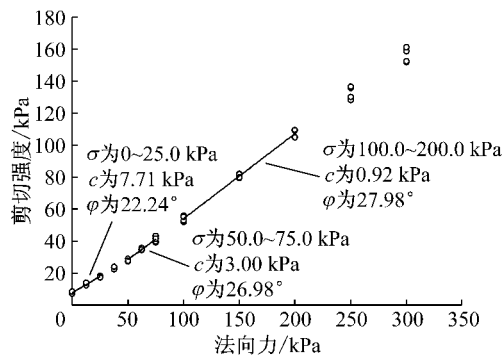


图7 直剪固快强度包络图

Fig.7 Envelope graph of consolidated quick direct shear strength

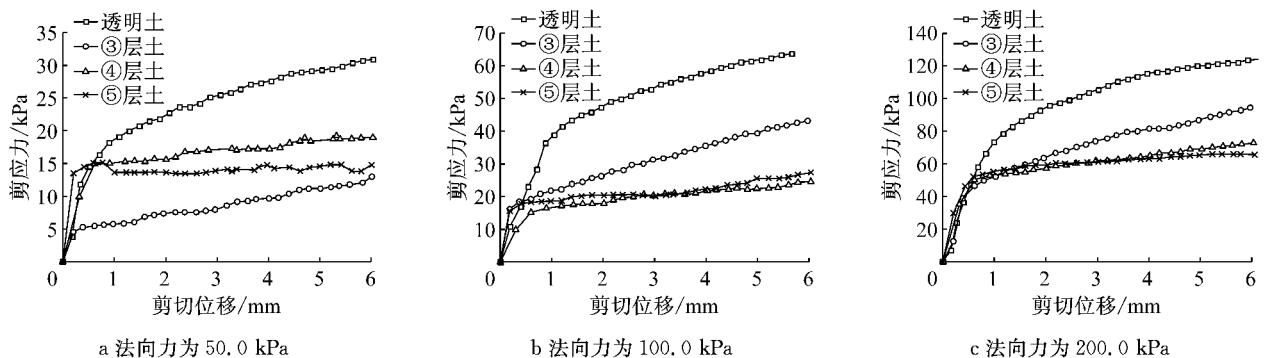


图8 透明土及上海黏性土剪应力-剪切位移关系

Fig.8 Relationship between shear strength and displacement of transparent soil and Shanghai clayey soils

特征曲线如图9所示。其应力位移变化特征与天然黏性土相似:当法向力为0~50.0 kPa时,土样属于超固结土,应力位移曲线中具有明显的峰值,且随着法向力的增大,达峰值时的剪切位移也增大;当法向力为150.0~200.0 kPa时,土样属于正常固结土,土样表现出应变硬化特性,随着剪切位移的增大剪

上海③,④,⑤层典型黏性土的强度指标均在该变化范围内,在模型试验中,可通过调整透明土的前期固结压力来调整土体的抗剪强度。

2.3.2 剪应力-剪切位移特性

透明土样与上海③,④,⑤层土重塑土样的剪应力-剪切位移特征曲线^[15]如图8,可知:剪切位移较小时,透明土与上海③,④,⑤层土重塑土的应力位移特征均极为相似;随着剪切位移增大,相比④,⑤层土,透明土表现出更为明显的硬化特征,与③层土较为相似,但其强度值比③,④,⑤层土均要大。

以前期固结压力为150.0 kPa的透明土样为例,绘制其在不同法向力作用下的剪应力-剪切位移

应力也增大;法向力为100.0 kPa时,土样虽然属于超固结土,但曲线中并无明显峰值,而是表现为轻微的硬化特性,其主要是由于土样虽为超固结土但固结比较小,且进行直剪固快试验时,在土样固结完成后,需卸载至试验所需的法向力引起的。

3 透明土模拟黏性土的模型试验可行性

为验证透明土模拟黏性土应用于模型试验的可行性,采用透明土进行等沉降速率的室内压板载荷试验,并将试验得到的 $P-S/b$ (其中 P 为压板底的平均压应力, S 为压板的沉降量, b 为压板宽度)曲线、土中速度场、位移场等与既有研究成果进行对比。

3.1 试验方法

3.1.1 试验系统

模型试验系统如图10所示,其主要由图像采集控制系统、CCD相机、面激光源、加压反力架、等速加载仪、拉压力传感器、有机玻璃模型箱、刚性加载板、应变采集仪组成。由于面激光源强度为2.5 W时,其在透明土中的入射深度为170 mm,因此所用有机玻璃模型箱内尺寸长、宽均设计为200 mm,高450

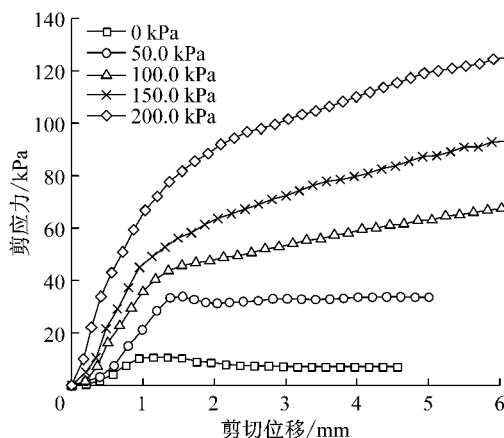
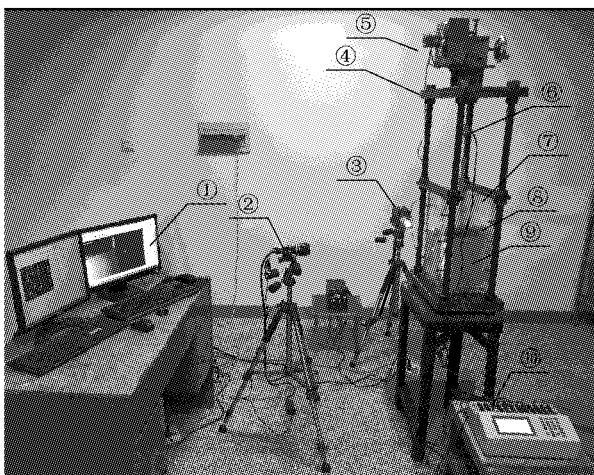


图9 前期固结压力150.0 kPa透明土剪应力-剪切位移关系

Fig.9 Relationship between shear strength and displacement of transparent soil consolidated under pressure of 150.0 kPa

mm,有机玻璃板厚 20 mm;等速加载仪的最大行程为 100 mm,加载速率为 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;采用黑色聚氯乙烯硬塑料材料模拟刚性加载板,板长 198 mm,宽 20 mm,高 45 mm;激光器为集成化 5W 半导体激光器,激光波长为 532 nm;采用科研级芯片 CCD 相机,相机分辨率 2456 像素 \times 2056 像素,像素尺寸 $3.45 \mu\text{m}$,通过计算机控制系统可实现最大拍摄频率为 $16 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$;通过采用 PIV 软件对图像进行后处理可得到土中连续位移场。



①图像采集控制系统;②CCD相机;③面激光源;④加压反力架;⑤等速加载仪;⑥拉压力传感器;⑦有机玻璃模型箱;⑧刚性加载板;⑨透明土;⑩应变采集仪

图 10 模型试验系统

Fig.10 model test devices

与既有研究中的透明砂土不同,模拟黏性土的透明材料在激光照射下并无法产生明显的散斑场,因此需在土中加入示踪粒子,试验中仍采用粒径为 $30 \mu\text{m}$ 的珠光粉,由于所采用的珠光粉为大红色,因此试验过程中肉眼看到的透明土也呈红色.土中示踪粒子含量极低(与固体颗粒质量比小于 0.05%),且不会与土样发生反应,因此并不会对土体的物理力学特性产生影响.在试验过程中示踪粒子会跟随着土体运动,通过分析示踪粒子与激光相互作用形成的散斑场即可得到土体的位移场。

3.1.2 试验方案及步骤

根据土体的前期固结压力不同,分别进行了前期固结压力为 12.5, 25.0, 37.5 kPa 的 3 组压板载荷试验,试验采用等沉降速率法^[16],沉降速率为 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.马少坤等^[17]通过红黏土的刚性基础离心试验得出:垂直方向距基底约 $4b$ 以下的区域、水平方向离基底中心 $4b$ 以外的区域在整个试验过程中都几乎没有发生变形,因此为了消除边界影响,本次试验中压板置于模型箱中间,压板中心线距模型

箱边界为 $5b$,固结完成后的土样高度保证在 $6b$ 以上.具体试验步骤如下:

(1)调整激光源,通过旋转面激光发生器使照射在模型箱外壁上的面激光达到最薄,同时调整激光源与模型箱之间的距离,使面激光的高度与所需观测高度一致,以减小激光能量的损失,微调面激光发生器,保证面激光竖直。

(2)打开图像采集控制软件,结合软件调整 CCD 相机,保证相机镜头面与观测面平行,且使相机恰好能观测到整个模型土观测面。

(3)根据模型中事先设置的尺寸标尺及压板的沉降速率计算图像采集频率,同时将压力传感器采集频率与图像采集频率设置一致。

(4)打开等速加载仪,进行等沉降速率的压板载荷试验,试验完成后将 CCD 相机采集的图像通过 PIV 软件进行后处理分析。

3.2 试验结果分析

3.2.1 P - S/b 曲线

试验得到的 P - S/b 曲线如图 11,其中 $b=20 \text{ mm}$.可知,前期固结压力为 12.5~37.5 kPa 的透明土在压板载荷试验时体现为典型的局部剪切破坏特性,与一般黏土的浅埋基础的荷载沉降曲线发展规律相似^[18]:在荷载逐步增大的初始阶段(AB 段),板底压应力与沉降量大致成正比,在该阶段说明地基土尚可认为处于弹性变形阶段;当基底压力超过直线段后出现一段曲线段(BC 段),荷载沉降曲线的梯度随荷载的增大而增大,此时基底出现局部剪切破坏区;当荷载超过某一特定值后(C 点),荷载沉降曲线斜率不随荷载增大而增大,又近似表现为一段直线,而该特定压力值就是所要取的极限承载力。

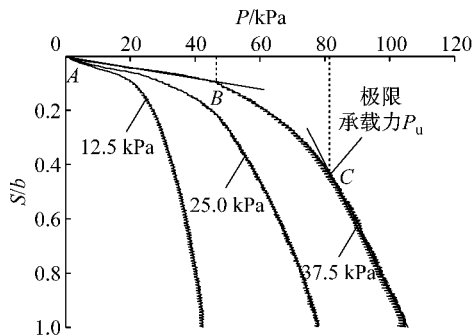


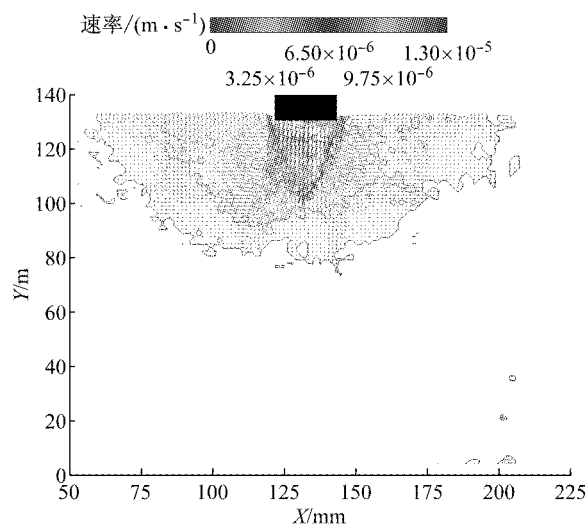
图 11 P - S/b 曲线

Fig.11 Relationship between P and S/b

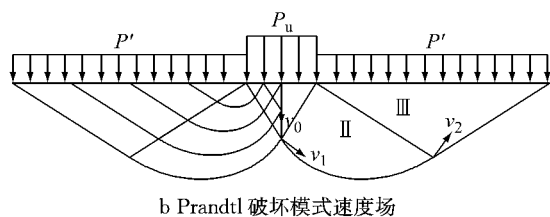
3.2.2 土体速度场

各方案压板沉降过程中板下土体的速度场及位移场分布规律基本一致,因此仅以前期固结压力为

25.0 kPa 的情况为例进行说明. 通过 PIV 后处理软件分析得到压板沉降量为 8 mm(0.4*b*)时板下土体内的速度场分布特征如图 12a 所示, 图中矢量表示各个位置的速度大小及方向, 曲线为速度等值线, 其中 *X* 表示水平距离, *Y* 表示垂直距离. 图 12b 为 Prandtl 破坏模式的速度场, 图中 P' 表示地表荷载, v_0 为刚性块体区 I 区的速度, v_1 为非均匀变形区 II 区与 I 区交界面位移相对周围土体的速度, v_2 为刚性块体区 III 区的速度. 由图可知, 模型试验得到的速度场与 Prandtl 破坏模式速度场形状相似, 但有所不同的是模型试验得到的土中速度在 Prandtl 速度场所对应的 II, III 区离压板越远速度值越小, 这主要是由于本试验得到的为局部剪切破坏形式, II, III 区并未出现完整滑移面, 处于非极限状态.



a 试验所得速度场



b Prandtl 破坏模式速度场

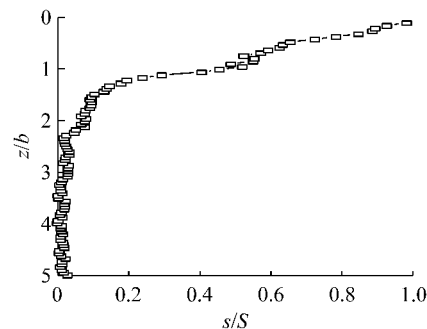
图 12 速度场

Fig.12 Velocity field

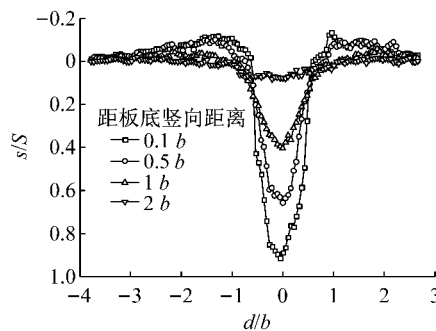
3.2.3 土体位移场

压板竖向位移为 8 mm 时, 板底土中的沉降 *s* 情况如图 13 所示. 图 13a 为压板底中点以下不同深度土体的沉降情况: 板底 1.5*b* 深度范围内土体的沉降量较大, 这可能是由于该深度范围内土体处于如图 12 所示 Prandtl 破坏模式的 I 区范围内, 该范围内土体理论上考虑为随压板运动的刚性体, 因此位移量较大, 而实际情况中 I 区土体除了随压板刚性下沉外仍有部分压缩变形, 因此沉降量有随深度减小

趋势; 同时可得到压板下压过程中的最大影响深度为 3.2*b* 左右. 图 13b 为板底不同深度土体沿水平方向的沉降分布情况: 板底以下宽度范围内土体随压板下沉, 宽度范围以外土体因挤压作用表现为向上隆起, 这一分布规律也与局部剪切破坏情况相似, 水平方向最大影响范围为距压板底中心线 3*b* 左右.



a 沿深度沉降



b 分层沉降沿水平方向的变化

图 13 板底土体位移

Fig.13 Deformation in the soil under plate

4 结论

(1) 采用体积比 2.5 : 1 的 15 号白矿油和正十二烷混合液与 2 000 目的无定形硅石粉末配制透明土, 并给出了透视性、激光入射深度这 2 项量化描述土样透明度的评估指标.

(2) 通过固结压缩试验得到, 前期固结压力为 37.5 kPa 透明土的压缩系数 $a_{v0.1 \sim 0.2} = 1.566 \text{ MPa}^{-1}$, 压缩模量 $E_{s0.1 \sim 0.2} = 1.345 \text{ MPa}$, 其在上海④层灰色淤泥质黏土的压缩系数及压缩模量大小变化范围内.

(3) 通过与上海重塑黏性土的剪应力-剪切位移的特征曲线对比得出当剪切位移较小时, 透明土与上海③, ④, ⑤层土的应力-位移特征极为相似; 随着剪切位移增大, 相比④, ⑤层土, 透明土表现出更为明显的应变硬化特性, 与③层土较为相似, 但其强度值比③, ④, ⑤层土均要大.

(4)给出了可用于计算土样在不同应力状态下直剪固快强度指标的强度表,得到前期固结压力为12.5~300.0 kPa时透明土强度指标变化范围为黏聚力为0~24.2 kPa、内摩擦角为19.44°~28.63°,模型试验中可结合强度表,通过调整透明土的前期固结压力来调整土体的抗剪强度。

(5)室内压板载荷试验得到的 $P-S/b$ 曲线及土体位移场与一般黏土中的浅埋基础的试验规律一致,表现为局部剪切破坏特性,土体中的速度场大小分布上与经典Prandtl破坏模式速度场有一定差别,但其分布形状相近。

参考文献:

- [1] Sadek S, Iskander M G, Liu J. Geotechnical properties of transparent silica[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 111.
- [2] Iskander M G, Liu J, Sadek S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(3): 262.
- [3] Liu J, Iskander M G, Sadek S. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica [J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(4): 390.
- [4] Ni Q, Hird C C, Guymer I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Géotechnique, 2009, 60(2): 121.
- [5] 吴明喜. 人工合成透明砂土及其三轴试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
WU Mingxi. Study on transparent synthetic sand and its triaxial test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [6] 张仪萍, 李亮, 王思照. 透明土中孔隙流体的实验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014, 48(10): 1828.
ZHANG Yiping, LI Liang, WANG Sizhao. Experimental study on pore fluid for forming transparent soil [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(10): 1828.
- [7] 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.
KONG Gangqiang, LIU Lu, LIU Hanlong, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1140.
- [8] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土材料的沉桩过程土体三维变形模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 395.
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on 3-D soil deformation during pile penetration using transparent soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 395.
- [9] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1564.
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1564.
- [10] 曹兆虎, 孔纲强, 周航, 等. 极限荷载下X形桩和圆形桩破坏形式对比模型试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(12): 10.
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, ZHOU Hang, et al. Contrast model tests on failure modes of X-section pile and circle pile under ultimate load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(12): 10.
- [11] Mannheim R, Oswald C. Development of transparent porous media with permeabilities and porosities comparable to soils, aquifers, and petroleum reservoirs[J]. Groundwater, 1993, 31(5): 781.
- [12] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL237—1999 Specification of soil test [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [13] 上海市建设委员会. DGJ08—11—1999 地基基础设计规范[S]. 上海: [s. n.], 1999.
Shanghai Municipal Commission of Construction. DGJ08—11—1999 Foundation design code[S]. Shanghai: [s. n.], 1999.
- [14] 上海市城乡建设和交通委员会. DGJ08—11—2010 地基基础设计规范[S]. 上海: [s. n.], 2010.
Shanghai Construction and Traffic Committee. DGJ08—11—2010 Foundation design code[S]. Shanghai: [s. n.], 2010.
- [15] 陈敏, 管飞. 上海重塑黏性土的直剪特性研究[J]. 上海国土资源, 2012, 33(1): 79.
CHEN Min, GUAN Fei. The shearing properties of remoulded clay soils in the Shanghai region [J]. Shanghai Land & Resource, 2012, 33(1): 79.
- [16] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute. Technological manuals of geotechnical test [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [17] 马少坤, 黄茂松, 刘怡林, 等. 红黏土地基承载力的离心模型试验与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 276.
MA Shaokun, HUANG Maosong, LIU Yilin, et al. Centrifugal model test and numerical simulation on bearing capacity of red clay ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 276.
- [18] 刘成宇. 土力学[M]. 北京:中国铁道出版社, 1990.
LIU Chenyu. Soil mechanics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990.