

DOI: 10.11779/CJGE201812007

新型透明黏土制配及其物理力学特性研究

孔纲强¹, 周 杨¹, 刘汉龙^{1,2}, 王成青¹, 文 磊¹

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400450)

摘 要: 基于人工合成透明土材料和 PIV 技术的可视化模型试验方法是重要的岩土工程测试手段之一, 然而, 目前已有透明土材料中针对模拟天然黏土的材料仍相对较少。提出以 Carbopol® Ultrez10 聚合物 (简称 U10)、NaOH 粉末和纯净水为原材料, 碳纳米材料掺入作为示踪粒子制成散斑场, 制配一种新型透明黏土材料的技术方案与操作方法。基于调制传递函数 (MTF) 方法, 对新型透明黏土材料的光学透明性进行量化分析, 并与已有透明土材料的光学透明性进行对比分析, 验证其优越性。基于微型十字板剪切试验、压缩固结试验、渗透试验及热传导试验等室内试验方法, 对新型透明黏土材料的物理力学特性进行系统研究, 探讨其模拟天然黏土的可行性。研究结果表明: 新型透明黏土材料的光学透明厚度可达 25~40 cm, 较目前已有常规透明土材料的光学透明厚度提高约 2~3 倍; 新型材料表现为中低灵敏性黏土、强度随时间明显增加, 强度、压缩固结特性与天然淤泥 (尤其是海相淤泥) 或泥炭土的性质相近, 渗透系数为 $2 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-7}$ cm/s, 热传导系数为 $0.62 \sim 0.71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

关键词: 透明黏土; Carbopol® Ultrez10; 光学透明性; 室内试验; 物理力学特性

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)12-2208-07

作者简介: 孔纲强(1982-), 男, 浙江磐安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事桩-土相互作用及能量桩技术与应用方面的教学与研究工作。E-mail: gqkong1@163.com。

Manufacture of new transparent clay and its physical and mechanical properties

KONG Gang-qiang¹, ZHOU Yang¹, LIU Han-long^{1,2}, WANG Cheng-qing¹, WEN Lei¹

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The visual model test based on synthetic transparent soil materials and PIV technology is one of the most important geotechnical engineering measurement technologies. However, there are still relatively few transparent materials which can be used for simulating the natural clay. A new transparent material which can simulate the natural clay is developed. It is manufactured by using Carbopol® Ultrez 10, NaOH powder and distilled water, and nano materials are served as the tracer particles for spackle pattern. The manufacture processes are introduced. Based on the modulation transfer function (MTF) method, the transparency of this material is analyzed, and also compared with that of the previous transparent materials. Based on the laboratory vane tests, consolidation tests, falling head tests and thermal conductivity tests, the geotechnical properties of this synthetic transparent clay are measured. It is shown that the transparent clay presents a good optical transparency within 30~40 cm, which is 2~3 times that of the previous materials. This material is quite consistent with the low or middle-sensitive natural clay, and its strength increases with time obviously. It has similar shear strength and consolidation properties to the natural mud (especially marine mud). Its permeability ranges from $2 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-7}$ cm/s, and its thermal conductivity ranges from $0.62 \sim 0.71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Key words: transparent clay; Carbopol® Ultrez10; optical transparency; laboratory test; physical and mechanical property

0 引 言

近年来, 基于人工合成透明土材料 (如熔融石英砂^[1-2]、透明胶体材料^[3-4]) 与数字图像处理技术相结合的可视化模型试验技术逐步得到发展。透明土试验技术可以实现岩土体内部形变、渗流的可视化观测, 该试验技术的另一大优势是观测方法是非接触式, 可

以有效排除测试元器件埋设对试验结果的干扰。

在透明土材料制配上, 主要分为模拟天然砂土和

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51639002); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX17_0465); 中央高校基本科研业务费 (学生项目) 资助项目 (2017B699X14)

收稿日期: 2017-11-02

黏土两大类。在模拟天然砂土方面: 1994 年 Iskander 等利用硅胶和矿物油制配成透明土材料, 其岩土工程性质与天然砂土相似^[3]; 2011 年 Ezzein 等、2013 年孔纲强等利用熔融石英砂和矿物油制配的透明土材料, 其基本物理力学性质与天然砂土相近, 且较硅胶材料所制配成的透明土材料具有相对更高的光学透明性^[1, 5]; 2012 年 Downie 等基于全氟磺酸树脂材料和三梨糖醇溶液制配成透明土材料, 开展了植物根系生长过程的非嵌入式可视化观测试验, 并与天然土体中的根系生长规律进行了对比分析^[6]; 2017 年孔纲强等通过一系列折射率及黏度试验, 研究可以与熔融石英砂制配透明砂土的新型孔隙液体^[7]。在模拟天然黏土方面: 1994 年 Iskander 等利用无定型硅粉和矿物油制配成透明土材料, 其岩土工程性质与天然黏土相近^[3]。2010 年 Lo 等利用水族珠制配成透明土材料, 模拟污染物在天然土体中的渗流可视化过程^[8]。2015 年 Wallace 等利用 Laponite RD[®] 材料制配成透明土材料, 模拟天然软黏土^[4]。2016 年 Hakhamaneshi 等利用 Gelita 材料制配成透明土材料, 模拟天然黏土^[9]。相关研究结果表明, 熔融石英砂作为制配透明砂土的主要材料, 制配工艺相对成熟、且光学透明性可达 15~20 cm^[1]; 硅粉制配成的透明黏土材料, 其光学透明性相对较低, 其透明度局限于 5 cm 左右的厚度范围^[3]; 水族珠制配而成的透明黏土材料, 其强度近似为零; Laponite RD[®]、Gelita 等材料制配成的透明黏土材料, 其基本物理力学特性与天然黏土仍有一定差距。

因此, 本文基于 Carbopol[®] Ultrez 10 (简称 U10)、NaOH 粉末和纯净水为原材料, 碳纳米材料掺入作为示踪粒子制成散斑场, 研制一种新型透明黏土材料的制配工艺, 并对其光学透明性进行量化分析。基于室内试验方法, 对该材料模拟天然黏土的可行性进行系统分析。开展微型十字板剪切试验, 分析其强度特性、及灵敏性; 开展单向压缩试验, 分析其压缩固结特性; 开展变水头渗透试验和热传导试验, 分析其渗透特性及热传导特性。为该新型透明黏土材料在模拟天然黏土可视化模型试验技术上的应用提供技术支撑。

1 新型透明黏土的制配

1.1 材料选择

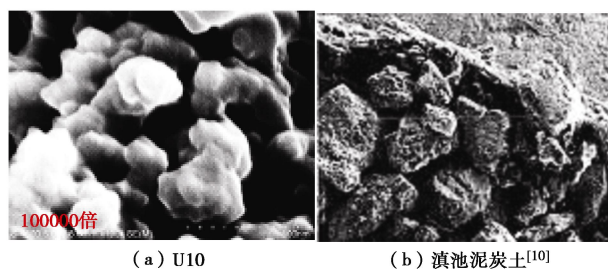
新型透明黏土材料, 由 U10 粉末、纯净水以及 NaOH 溶液制配而成。U10 是一种交联聚丙烯酸聚合物, 常温下为白色粉末状, 如图 1 所示; 颗粒大小相对均匀, 粒径范围为 50~100 nm, 相对密度为 1.4543, 表观密度为 0.21 g/cm³。U10 粉末扫描电镜 SEM (10 万倍) 结果如图 2 所示, 滇池泥炭土^[10]的骨架结构扫

描 SEM 照片也如图 2 所示; 对比分析表明, U10 粉末的粒状与滇池泥炭土的粒状具有一定的相似性。



图 1 U10 粉末实物图

Fig. 1 U10 powder



(a) U10

(b) 滇池泥炭土^[10]

图 2 SEM 扫描图

Fig. 2 Photos of SEM

U10 粉末在与水接触之前呈收缩形态, 在水中分散后, 交联的聚丙烯酸树脂链开始打开, 用碱中和后, 聚合物变成展开的胶体聚合物结构。U10 粉末在中和前易于在水中分散, 黏度小, 便于使用操作; 中和后又具有高黏度、高含水率、高透光率、低折射率等特点; 因此, 可以用于制配人工合成透明黏土材料。本文所选用的中和材料为 NaOH 溶液, 其 NaOH 粉末纯度大于 98%。U10 材料含羧酸基 (-COOH), 是含有聚烯基聚醚交联的丙烯酸聚合物。虽然这些树脂是呈弱酸性, 弱于醋酸, 但很容易反应生成盐类, 其在水中的 PH 值, 随树脂浓度的不同, 在 2.8~3.2 的范围之间。浓度越高羧基浓度也越高, 因此 pH 值便更低。通常将 U10 中和成盐, 使卷曲的分子因电斥力张开而增稠, 氢氧化钠和三乙醇胺是常用的中和剂。为了在透明黏土中实现散斑场, 以追踪相关粒子的运动轨迹, 最终分析土体内部位移场等问题; 在配置过程中将添加纳米材料 (如碳纳米管、碳化硅、纳米硅粉和纳米氧化铝等) 作为示踪粒子。纳米材料的物理特性见表 1 所示。本文选择碳纳米管为散斑场的示踪粒子, 纳米材料质量约为所配置透明黏土质量的 1%。

1.2 制配过程

制配过程中, 需要塑料密封桶、温度传感器、加热器、恒温箱、搅拌器以及真空泵等仪器设备; 以配制 30 L 透明黏土试样为例, 制配过程及主要操作方法如下:

表 1 纳米材料及其物理特性
Table 1 Properties of nano materials

材料	碳纳 米管	纳米 SiC	纳米 硅粉	纳米 氧化铝
外观	黑色粉末	灰绿色 粉末	淡黄色	白色粉末
纯度/%	>91	>99.9	>99.9	>98
粒径/nm	8~15	50	30	—
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	233	60	60	—
密度/(g·cm ⁻³)	0.15	0.09	0.09	—

(1) 安全准备工作：在制配操作之前，为防止细颗粒物质对身体健康造成影响，需提前准备防雾面罩、橡胶手套和护目镜。

(2) 材料准备：材料配比为 U10：NaOH：水=1：0.4：98.6，称取 0.3 kg U10 粉末，0.1 kg NaOH 粉末，及 29.6 L 的纯净水，其中溶解 NaOH 粉末所需纯净水包含在整体设计需水量中。

(3) U10 粉末搅拌：取干净的塑料密封桶，称取纯净水的质量并加入桶中（预留一定的纯净水供溶解 NaOH 粉末之用），利用加热器将水加热至 50℃~60℃；然后，称量并加入 U10 粉末，并在常温下密封静置 8~10 h；采用小功率搅拌器搅拌 30~40 min，搅拌完成后，密封静置 8~10 h。

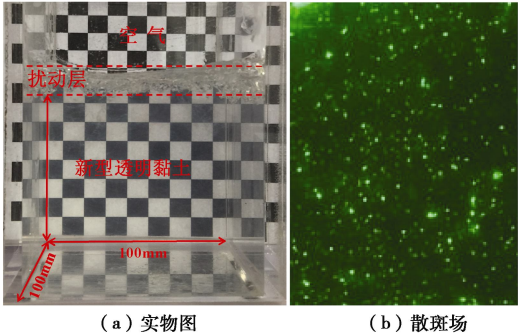
(4) NaOH 溶液搅拌：称量 NaOH 粉末，放入装有 0.5 L 纯净水的量杯中，搅拌、溶解后制配成 NaOH 溶液，并倒入装有 U10 混合液的密封桶中，采用大功率搅拌器快速均匀搅拌 10~15 min 至均匀黏稠状。

(5) 人工制斑：选择一定量的碳纳米管等材料，加入到密封桶内并搅拌均匀，利用真空泵抽真空方法去除由于扰动等工艺造成的气泡，完成新型透明黏土的制配；穿越 10 cm 厚透明黏土试样与穿越空气的光学透明性对比图如图 3（a）所示，在激光下所制配成的透明黏土试样散斑场如图 3（b）所示。

2 光学透明性对比分析

已有研究结果表明，保证良好光学透明性条件下，目前常用制配透明土材料中，硅粉等制配成的透明黏土材料可用厚度为 5 cm 左右^[3]，熔融石英砂制配成的透明砂土材料可用厚度为 15~20 cm^[1]。为了将本文所制配的透明黏土试样与常规透明土（熔融石英砂、水族珠等）进行透明特性对比，将黑色背景板放在透明土的内部（50 mm 的厚度），进行图像像素强度分析。当图像像素强度越接近目标像素强度值则透明材料的透明性越好。穿越 0 和 30 cm 厚透明黏土试样的黑白间隔条透明性如图 4（a）所示。黑色背景在 5 cm 中不同类型透明土中的像素强度如图 4（b）

所示。研究结果表明，本文所制配透明黏土相比于以往的透明材料具有相对更好的光学透明特性。本文制配的透明黏土的可见透明厚度为 25~40 cm，比已有常用透明土的透明厚度提高近 2~3 倍。



（a）实物图 （b）散斑场
图 3 新型透明黏土照片

Fig. 3 Photos of new transparent clay

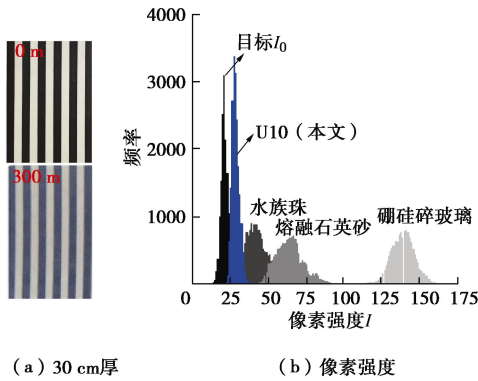


图 4 光学透明性比较

Fig. 4 Comparison of transparency

为进一步量化新型透明黏土的光学透明性问题，基于 Black 等^[11]提出的调制解调函数（MTF）方法为对新型透明黏土材料透明度进行对比试验。测试方法为（图 5）：以黑白间隔条为目标，分别在空气中及透明土中的图像进行像素强度分析，然后由下面公式计算表征透明土中目标与实际值的相似程度的 MTF 值：

$$MTF = \frac{(I_{\max(I)} - I_{\min(I)}) / (I_{\max(I)} + I_{\min(I)})}{(I_{\max(o)} - I_{\min(o)}) / (I_{\max(o)} + I_{\min(o)})}, \quad (1)$$

式中， $I_{\max(I)}$ 和 $I_{\min(I)}$ 分别为在透明土试样中目标的最大及最小像素强度值， $I_{\max(o)}$ 和 $I_{\min(o)}$ 分别为实际目标最大及最小像素强度值。MTF 值越接近 1，则透明土的透明度越高。

本文以黑白条频率分别为 0.1，0.4 对/mm（每 mm 目标中含有的黑白条对数）两种目标，对透明黏土试样进行测试，处理图像并计算得到 MTF 值随透明土厚度变化关系如图 6 所示。由图 6 可知，透明黏土的透明度随土体的厚度增加而降低（当透明土厚度大于 100 mm，每增加 50 mm 厚度其透明度降低 15.4 % 和 18.9%）。

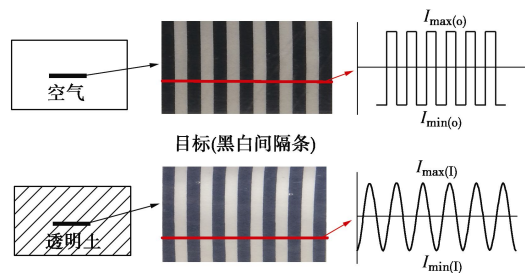


图 5 MTF 计算方法简图^[11]
Fig. 5 Schematic diagram of calculation of MTF^[11]

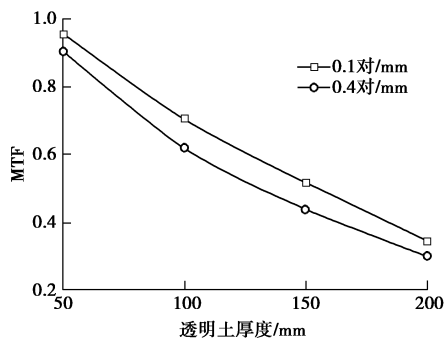


图 6 光学透明性与透明黏土试样厚度关系曲线
Fig. 6 Relationship between curves of transparency and soil thickness

3 物理力学特性试验

3.1 试验方案与工况设计

模拟天然黏土基本特性的新型透明黏土需要具备两个基本特点：①较好的光学透明性；②与天然黏土相似的物理力学特性。已有研究成果中，也提出采用硅粉^[3]、Laponite RD[®]^[4]以及 Gelita 等^[9]材料制配透明黏土；但是，硅粉材料制配成的透明黏土光学透明性相对较低，Laponite RD[®]、Gelita 材料制配成的透明黏土，其物理力学特性与天然黏土特性差异相对较大。由第 2 节可知，本文所制配的透明黏土具有良好的光学透明性；因此，对该新型透明黏土的物理力学特性进行系统研究，包括强度特性、压缩固结特性、渗透特性及热物性；试验工况见表 2 所示。

(1) 剪切强度特性试验方案

基于微型十字板剪切试验方法，测试透明黏土的以下岩土工程特性：剪切强度、随时间强度比及灵敏度。采用的微型十字板（PS-VST-P）剪切仪，测量范围为 0~8.125 kPa。配置的黏土强度随时间变化而增加的现象在本文中以强度比来描述；本文在对透明黏土的研究中将时间作为重要因素考虑在内。在十字板剪切试验中，设置 100 mm×100 mm×150 mm（长×宽×高）的有机玻璃模型槽，通过在槽子底端放置垫片，预留出排水空间，依次放置下透水石、下滤纸，然后将新型透明黏土分别装入模型槽中，然后放置上滤纸、上透水石。允许试样固结 24~720 h，时间从透明黏土制配完成开始算起。试验过程中十字板头应在

新型透明黏土顶部表面的 25 mm 深度以下。每组试验重复 3 个试样；试样 TCS1~6 研究在不同固结时间下透明黏土试样的峰值不排水强度；试样 TCS7~12 研究在不同固结时间下透明黏土试样的扰动后的残余不排水强度。

表 2 透明黏土物理力学特性试验工况

Table 2 Test conditions for properties of transparent clay				
试样编号	尺寸/mm	固结/h	试验类型	测试内容
TCS1	100×100×150	24	十字板剪切	峰值强度
TCS2	100×100×150	72	十字板剪切	峰值强度
TCS3	100×100×150	168	十字板剪切	峰值强度
TCS4	100×100×150	336	十字板剪切	峰值强度
TCS5	100×100×150	504	十字板剪切	峰值强度
TCS6	100×100×150	720	十字板剪切	峰值强度
TCS7	100×100×150	24	十字板转动、剪切	残余强度
TCS8	100×100×150	72	十字板转动、剪切	残余强度
TCS9	100×100×150	168	十字板转动、剪切	残余强度
TCS10	100×100×150	336	十字板转动、剪切	残余强度
TCS11	100×100×150	504	十字板转动、剪切	残余强度
TCS12	100×100×150	720	十字板转动、剪切	残余强度
TCC	$r=30.9, h=20$	168	压缩固结试验	压缩特性
TCP	$r=94.4, h=400$	168	变水头渗透试验	渗透率
TCT	$r=25, h=90$	168	热导率试验	热传导系数

注：柱状试样 r 为半径， h 为高度。

由于受到外界扰动导致其强度降低的特性被称之为灵敏性，灵敏性是软黏土的重要特征之一。1944 年 Terzaghi^[12]最先以灵敏度 S_t （Sensitivity）来衡量软黏土灵敏性大小，并用该指标来评价软黏土结构性的强弱程度。

$$S_t = q_{ui} / q_{ud} \quad , \quad (2)$$

式中， q_{ui} ， q_{ud} 分别为原状和重塑状态下无侧限抗压强度值。

通过十字板剪切试验确定新型透明黏土的灵敏性。即在得到透明黏土的峰值抗剪强度后通过人为转动十字板，测量透明黏土的残余强度，两者比值确定灵敏度。

(2) 压缩固结特性试验方案

透明黏土的压缩固结系数由一维压缩试验获得。透明黏土试样 TCC 在自重固结 168 h 后放于固结仪上。试样大小为 30 cm²×2 cm。机械百分表用于测量变形，精确度为 0.01 mm。试验中用保鲜膜围住固结仪器顶部，防止水分蒸发。由于透明黏土的强度相对较低，因此，试验中设计加载量为 6.25 kPa/级，分为十级加载，每级加载稳定时间间隔为 8 h。在每级荷载作用后，记录随时间变化土体的压缩量。

(3) 渗透特性试验方案

本文所制配的透明黏土属于渗透系数较小的黏性土，故采用变水头试验测定其渗透系数。试样 TCP 直径为 94.4 mm、高为 400 mm。在试验装置中测量渗流量，不同时间点的水头高度，从而计算出渗流速度和

水力梯度, 根据达西渗流定律计算出渗透系数。同时取相同条件下的新型透明黏土测定其含水率, 进而计算孔隙比 e , 建立孔隙比 e 与渗透系数 k 的对应关系。

(4) 热物性试验方案

利用 KD2 Pro 热特性分析仪和土样温控装置, 开展透明黏土的热传导系数测试, 并与天然黏土的热物性进行对比分析。测试仪器采用美国 Decagon 公司研制的热特性分析仪 KD2 Pro, 属于瞬时线形热源方法, 测试探针为 SH-1 型号。KD2 Pro 热导仪及 SH-1 双探针 (探针直径 1.28 mm、长度 30 mm、两针间距 6 mm, 测量针温度分辨率为 0.001℃, 精度可达 5%) 实物图如图 7 所示。温度控制系统为 HD-5015 型电热恒温水浴箱, 利用循环水控制试验温度, 水浴箱控温精度 0.1℃、控制范围为 3℃~90℃, 温控装置实物图如图 7 所示。TCT 研究在固结时间 168 h 下透明黏土试样的热传导系数。

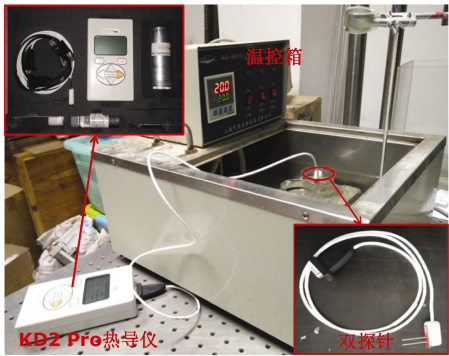


图 7 KD2 Pro 热导仪及温控装置实物图

Fig. 7 KD2 Pro test instrument and temperature control equipment

3.2 试验结果与分析

(1) 剪切强度特性

本文所配制的透明黏土与天然黏土不排水抗剪强度对比结果如图 8 所示。由图 8 可知: 本文所配制的透明黏土的不排水抗剪强度随时间的增加而增加, 与 Moretto^[14]中的天然黏土强度增长规律相似; 呈现明显的随时间增长特性, 并在 7 d 左右达到稳定值; 7 d 稳定强度约为 0.43 kPa, 与在液限时 Harbod 淤泥 (Schlue 等^[13]) 的抗剪强度值 (0.25~0.43 kPa) 相近。

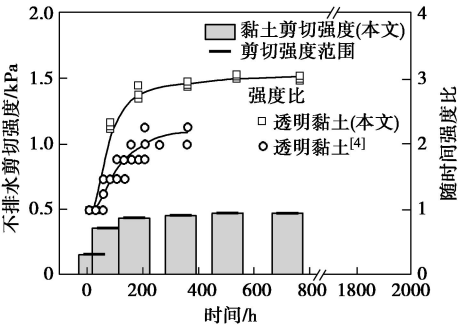


图 8 抗剪强度与时间关系曲线

Fig. 8 Relationship between shear strength and time

新型透明黏土的峰值强度及残余强度随时间的发展规律如图 9 所示。由图 9 可知, 在 7 d 稳定后, 新型透明黏土的灵敏度变化范围为 2.6~3.3, 根据 Skempton 等^[15]对土体灵敏度的划分标准, 该透明黏土为中低灵敏度土。

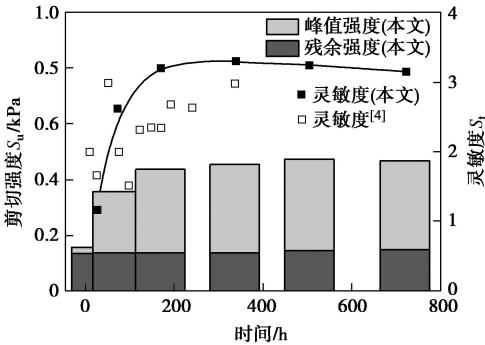


图 9 灵敏度与时间关系曲线

Fig. 9 Relationship between sensitivity and time

(2) 压缩固结特性

6.25~62.5 kPa 荷载作用下, 压缩量与时间平方根关系的压缩固结曲线如图 10 所示。由图 10 可知, 透明黏土曲线与淤泥具有相似性, 随着孔隙比的减小, 压缩系数 (曲线斜率) 也会相应减小, 当外荷载足够大时, $e-p$ 曲线最终趋于平缓, 孔隙比基本稳定在某一固定值; 该透明黏土是一种高压缩性土体; 其压缩量达到了试样总高度的 5.51%。本文透明土试样的固结系数亦随荷载的增加而变小, 与文献 (张长生等^[16]) 中深圳后湾淤泥具有相似的固结特性。试样 TCC 的固结系数为 $1.08 \sim 1.18 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$; 相关研究表明淤泥土的固结系数范围为 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ (房后国^[17])。试验数据整理形成透明黏土的 $e-p$ 曲线如图 11 (a) 所示。根据该曲线计算获得透明黏土试样的压缩系数 a_v 为 0.067 kPa^{-1} 。透明黏土的 $e-\lg p$ 曲线与泥炭土^[10]及深圳湾淤泥^[18]对比结果如图 11 (b) 所示。由 $e-\lg p$ 曲线可计算得到透明黏土的压缩指数 C_c 为 3.18。由此说明, 本文所配制的新型透明黏土与淤泥土具有相似的固结系数, 故可以尝试用于模拟模型试验中的淤泥土。

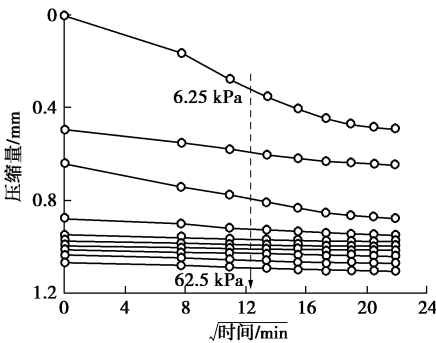


图 10 压缩随时间变化曲线

Fig. 10 Relationship between compression deformation and time

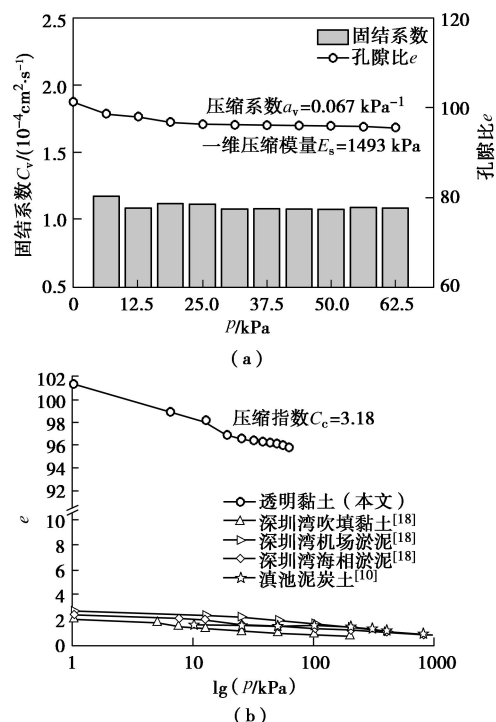


图 11 透明黏土的 $e-p$ 曲线

Fig. 11 $e-p$ curves of transparent clay

(3) 渗透特性

本文所制配的新型透明黏土渗透特性与文献^[19]中的天然黏土 $e-k$ 曲线以及文献[4]中的 Laponite RD[®]透明土的 $e-k$ 曲线对比结果如图 12 所示。由图 12 可知, 7 d 自重固结下的黏土 TSP 试样, 在 20℃时的渗透系数处于 $2\times 10^{-7}\sim 7\times 10^{-7}\text{cm/s}$ 。渗透率变化指数 $C_k=\Delta e/\Delta \lg k$, 用来描述渗透率的变化趋势。 C_k 值介于 $0.93e_0\sim 1.73e_0$ 。当孔隙比下降时, C_k 的变化将导致渗透率的大幅度降低, 这与 Terzaghi 等^[19]的观测结果相一致。本文新型透明黏土的渗透系数与文献[4]中所述的透明土、文献[20]中所述的天然黏土的渗透系数都在 $10^{-7}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ 范围内。由此说明, 本文新型透明黏土是适合模拟天然黏土的渗透特性, 在模拟天然黏土方面拥有良好的潜力。

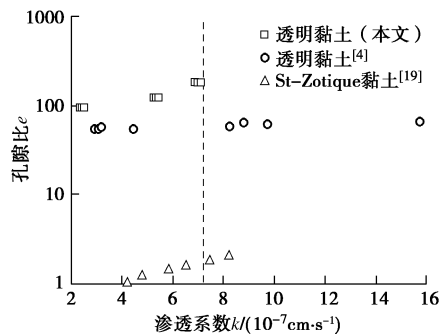


图 12 透明黏土渗透系数与孔隙比关系曲线

Fig. 12 Relationship between permeability and void ratio

(4) 热物性

本文所制配的透明黏土及部分天然黏土材料的热传导系数见表 3 所示。由表 3 可见, 透明黏土的热传

导系数为 $0.62\sim 0.71\text{W}\cdot\text{M}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 与天然泥炭土^[21]的热传导系数值相近。由此说明, 该新型透明黏土材料可应用于岩土工程热物性相关可视化试验中。

表 3 透明黏土及天然黏土的热传导系数值

Table 3 Thermal conductivities of synthetic transparent clay and natural clay

黏土	热传导系数 $/(W\cdot M^{-1}\cdot K^{-1})$	参考文献
水	0.55~0.68 ^a	—
透明黏土	0.62~0.71	本文
Healy 黏土	1.30	文献[21]
Fairbanks 泥炭土	0.49 ^b	文献[21]

注: ^a温度在 0~90℃下; ^b在饱和及非饱和的情况下。

4 讨论及展望

从上述结果和分析可知, 以 U10 为主要材料制配的新型透明黏土具有如下优点: ①有与天然黏土相似的物理力学等性质 (如强度特性、固结特性、导水率和导热系数等), ②较高的光学透明性, ③纳米材料作为散斑材料, 具有更精细的散斑效应。然而, 该新型透明黏土也存在一些缺陷: 高孔隙比 (>50) 和低强度 ($<0.5\text{kPa}$)。本文还分析了渗透率与孔隙比之间的关系。由于高孔隙比, 透明黏土呈现相对低的剪切强度。这种强度特征限制了其与天然黏土的相似性 (除非常低强度的泥浆或其它极软的黏土)。因此, 该透明黏土在未来可能的应用中应考虑强度相似性问题。本文仅对新型黏土的常规部分宏观特性进行研究, 对于透明黏土的电化学、电导性等微观性质, 液塑限等关键参数有待进一步细化研究。

5 结 论

本文提出了一种新型透明黏土材料的制配方法详细介绍了其制配过程, 并对其光学透明性、物理力学性质进行了系统研究, 可以得到如下 4 点结论。

(1) 本文所制配的透明黏土材料, 满足试验要求的光学透明性厚度 25~40 cm, 较常规透明土的透明度提高 2~3 倍; 每增加 5 cm 厚度, 其透明性降低 15.4%~18.9%。

(2) 十字板剪切试验结果表明, 本文所制配的透明黏土材料 7 d 稳定抗剪强度值约为 0.43 kPa, 与部分淤泥的抗剪强度值 (0.25~0.43 kPa) 相近。透明黏土呈现明显的随时间增强特性, 灵敏度值为 2.6~3.3, 属于中低灵敏性黏土。

(3) 本文所制配的透明黏土材料属于高压缩性土体; 其 $e-p$ 曲线与天然黏土的 $e-p$ 曲线相似, 其与天然黏土具有相似的压缩、固结特性。

(4) 本文所制配的透明黏土材料, 渗透系数为 $2 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 与天然黏土的渗透系数 ($10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$) 相近; 热传导系数为 $0.62 \sim 0.71 \text{ W} \cdot \text{M}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 与部分泥炭土的热传导系数值 (0.49) 相近。

尽管本文制配的透明黏土与天然黏土的物理力学特性仍存在一定的差异, 但是, 可以满足特定物理试验模型需求, 可以尝试在模拟天然淤泥土中应用。

参考文献:

- [1] 孔纲强, 刘 璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土与标准砂变形特性对比三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1140 - 1146. (KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Comparative analysis on the deformation characteristics of transparent glass sand and standard sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1140 - 1146. (in Chinese))
- [2] 孔纲强, 孙学谨, 肖 扬, 等. 透明土与标准砂压缩变形特性对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(10): 1895 - 1903. (KONG Gang-qiang, SUN Xue-jin, XIAO Yang, et al. Comparative experimental on compression deformation properties of transparent soil and standard sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(10): 1895 - 1903. (in Chinese))
- [3] ISKANDER M, LAI J, OSWALD C, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, **17**(4): 425 - 433.
- [4] WALLACE J F, RUTHERFORD C J. Geotechnical properties of LAPONITE® RD[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, **38**(5): 574 - 587.
- [5] EZZEIN F M, BATHURST R. J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(6): 590 - 601.
- [6] DOWNIE H, HOLDEN N, OTTEN W, et al. Transparent soil for imaging the rhizosphere[J]. Plos One, 2012, **7**(9): 1 - 6.
- [7] KONG G Q, LI H, HU Y X, et al. New suitable pore fluid to manufacture transparent soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, **40**(4): 658 - 672.
- [8] LO H, TABE K, ISKANDER M, et al. A transparent water-based polymer for simulating multiphase flow[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(1): 1 - 13.
- [9] HAKHAMANESHI M, BLACK J A. Shear strength of transparent gelita-effect of mixture ratio, displacement rate and over-consolidation ratio[C]// Geoichicago. 2016.
- [10] 李 斗. 滇池泥炭土微观结构特征及工程力学模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015. (LI Dou. The study on micro-structure and engineering mechanical model of Dianchi peat soil in Kunming basin[D]. Kunming: Kunming University of science and Technology, 2015. (in Chinese))
- [11] BLACK J A, TAKE W A. Quantification of optical clarity of transparent soil using the modulation transfer function[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, **38**(5): 588 - 602.
- [12] TERZAGHI K. Ends and means in soil mechanics[D]. Boston: Harvard University, 1944.
- [13] SCHLUE B F, MOERZ T, KREITER S. Influence of shear rate on undrained vane shear strength of organic harbor mud[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(10): 1437 - 1447.
- [14] MORETTO O. Effect of natural hardening on the unconfined compression strength of remolded clays[C]// Proceeding of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation. Rotterdam, 1948.
- [15] SKEMPTON A W, NORTHEY R D. The sensitivity of clays[J]. Géotechnique, 2015, **3**(1): 30 - 53.
- [16] 张长生, 高明显, 强小俊. 深圳后海湾海相淤泥固结系数变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 247 - 252. (ZHANG Chang-sheng, GAO ming-xian, QIANG Xiao-jun. Variation laws of consolidation coefficient of marine clay in Houhai Bay of Shenzhen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 247 - 252. (in Chinese))
- [17] 房后国. 深圳湾结构性淤泥土固结机理及模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005. (FANG Hou-guo. The study on consolidation mechanism and model of structural soft soil in Shenzhen Bay[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese))
- [18] 卫国芳. 深圳湾海相淤泥的压缩特性研究[J]. 科学技术与工程, 2013, **13**(3): 795 - 798. (WEI Guo-fang. Study on compression characteristics of marine silt in Shenzhen bay[J]. Science Technology and Engineering, 2013, **13**(3): 795 - 798. (in Chinese))
- [19] TERZAGHI K, PECK R, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1996.
- [20] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **20**(4): 645 - 660.
- [21] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(42): 443 - 458.