

不同颗粒级配透明黏土的固结与渗透特性

武亚军¹, 李俊鹏¹, 姜海波¹, 孔纲强²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 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)

摘 要: 为可视化研究黏土固结过程中的内部变形, 需要配制与黏性土固结特性变化规律相似的透明黏土. 选用无定形硅粉与白矿物油和正十二烷混合液配制出能够模拟黏性土固结的透明黏土, 并对不同颗粒级配下的透明黏土进行了渗透试验和压缩固结试验. 研究表明: 透明黏土的 $e - \lg k$, $C_v - p$, $E_s - p$ 曲线变化规律与天然黏土相似; 并且土体的黏粒含量越高, 渗透系数越小, 固结系数越小, 压缩性越高. 透明黏土在固结与渗透变化规律方面与天然黏土的这种相似性, 说明了透明黏土用于定性模拟天然黏土固结变形的可行性.

关 键 词: 透明黏土; 颗粒级配; 固结特性; 渗透特性; 定性模拟

中图分类号: TU 41

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)06-0875-06

Consolidation and Permeability Characteristics of Transparent Clay with Different Grain Composition

WU Ya-jun¹, LI Jun-peng¹, JIANG Hai-bo¹, KONG Gang-qiang²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering(Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China.

Corresponding author: WU Ya-jun, E-mail: wyjldz@163.com)

Abstract: In order to visualize the internal deformation of clay during consolidation, transparent clay with similar consolidation characteristics needs to be prepared. A transparent clay which can simulate the consolidation of clay soil was prepared by using amorphous silica powder, the mixture of white mineral oil and n-dodecane. Permeability test and compression consolidation test on transparent clay with different grain composition were carried out. The experimental results show that the $e - \lg k$, $C_v - p$ and $E_s - p$ curves of transparent clay are similar to those of natural clay. The higher the clay content is, the smaller the permeability coefficient is, and the smaller the consolidation coefficient is, the higher the compressibility is. The similarity between transparent clay and natural clay in consolidation and permeability shows the feasibility of using transparent clay to qualitatively simulate the consolidation deformation of natural clay.

Key words: transparent clay; grain composition; consolidation characteristic; permeability characteristic; qualitative simulation

天然土体对可见光不透明, 模型试验过程中很难直接观测到土体内部变形和位移路径. 人工合成的透明土具有与天然土体相似的物理力学特性, 将人工合成的透明土结合光学观测技术和图像处理技术可以深入研究土体内部位移场与渗流场的变化规律^[1-2]. Yuan 等^[3]开展了三维透明土模型试验, 得到了桩-土复合地基在外荷载作用下的三维位移场. Wang 等^[4]采用透明土进行模

型试验, 研究了基坑降水过程中防渗墙和抽油井的耦合效应. Zhao 等^[5]对有桩帽和无桩帽的单桩分别进行了一系列的室内小型透明土模型试验, 研究了桩帽效应、桩径效应和桩长效应. Sui 等^[6]通过透明土试验来观察水位下降过程中边坡的破坏过程, 利用 PIV 技术对透明土颗粒位移进行了测量, 并使用有机染料来跟踪斜坡内液体的流动路径.

以上这些研究都集中在模拟砂性土的特性方面,关于透明黏土及与之相关的研究主要包括: Iskander 等^[7]利用无定形硅粉和具有相应折射率的孔隙流体制配并研究出了物理力学性质与普通黏土相似的透明黏土. Liu^[8]进行了固结不排水剪切试验,发现透明土的应力-应变曲线特征与典型黏土相似. 宫全美等^[9]采用白矿油和十二烷混合液与无定形硅粉制配成透明土以模拟黏性土,验证了透明黏土应用于模型试验研究的可行性. 姜海波等^[10]开展了超软土真空预压透明土模型试验,结合可视化技术研究了塑料排水板周围的土桩的形成机理.

事实上,透明黏土的性质与其颗粒组成密切相关,颗粒级配往往决定了变形、渗透、强度等物理力学特性^[11]. 然而,目前已有研究多集中在对某一种透明黏土的综合特性以及采用已经制配好的透明黏土进行一些特定的试验研究方面,往往忽略了颗粒级配对透明黏土性质的影响. 为了探明颗粒级配对透明黏土性质,特别是固结与渗透特性的影响,采用更合适的透明黏土开展相关研究,本文对 6 种不同粒径分布下的无定形硅粉类透明黏土进行了室内土工试验,围绕其粒径分布、压缩固结和渗透特性等展开对比分析,探讨颗粒级配对透明黏土性质的影响.

1 透明土的制配与试验方案

1.1 透明土的制配

将 5#白矿物油和正十二烷混合均匀制配孔隙液体,用阿贝折射仪测定混合液体的折射率,并调试两种液体比例,保证混合液与无定形硅石粉末的折射率相匹配. 将质量比为 1:7 的无定形硅粉与孔隙液体搅拌混合至均匀黏稠状,然后置于密封桶中进行抽真空,去除试样中产生的气泡,使之达到饱和状态;为了使试样在自重作用下充分固液分离,将除气后的试样静置 48 h,之后吸走上清液,取余下部分作为试验土样.

1.2 试验方案

制配土样时选用不同粒径的无定形硅粉,包括:0.075,0.020,0.005,0.003,0.001 mm. 同时,为了完善透明土的颗粒级配,添加 0.4~0.8,0.2~0.4 和 0.1~0.2 mm 的熔融石英砂. 熔融石英砂的折射率与无定形硅粉基本一致,因此,两者可以混合用于制配透明土样. 通过调整各粒径无定形硅粉和熔融石英砂的质量占比,获得 6 种不同级配的土样,分别命名为土样 A,B,C,D,E,F.

为定量描述各级配土样内的颗粒分布情况,将粒径大于 0.075 mm,0.075~0.005 mm 和小于 0.005 mm 的颗粒含量列于表 1. 将三个粒径内的颗粒分别称为砂粒、粉粒和黏粒,将粉粒和黏粒的质量比称为粉黏比,6 组透明土样(A~F)不同粒径的占比见表 1.

表 1 无定形硅粉颗粒基本指标					
Table 1 Basic indexes of amorphous silica particle					
土样	ρ	砂粒	粉粒	黏粒	粉黏比
	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	%	%	%	
A	2.11	9.85	31.16	58.99	0.53
B	2.08	9.75	44.77	45.48	0.98
C	2.12	9.47	52.09	38.45	1.35
D	1.95	7.80	61.95	30.24	2.05
E	1.91	12.66	58.69	28.65	2.05
F	1.86	17.51	55.43	27.06	2.05

不同级配的透明土样的粒径分布曲线如图 1 所示. 由于制作工艺限制,无定形硅粉的颗粒粒径并不是定值,其实际粒径的波动范围可能较大. 因此,本文以实际测定的颗粒分布情况为准. 为突出各个土样粒径分布特征之间的主要区别,将

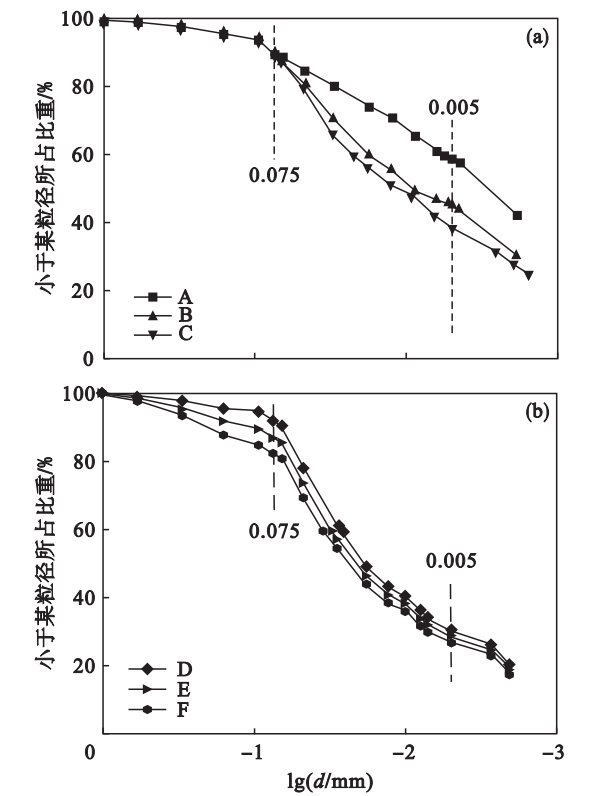


图 1 组 1 和组 2 的粒径分布曲线
Fig. 1 Size distribution curves of group 1 and group 2
(a)—组 1; (b)—组 2.

6 个土样分为:组 1 (土样 A,B,C)和组 2 (土样

D,E,F). 组1透明土样的砂粒含量基本一致,粉黏比不同. 组2透明土样的粉黏比相同,砂粒含量不同.

2 试验结果分析

透明土试样制配完成后,按照《土工试验规程》(SL237—1999)^[12]进行渗透试验和标准固结试验,并对各项试验结果进行分析.

2.1 渗透特性分析

图2为各级配透明土试样渗透系数 k 与孔隙比 e 之间的半对数关系曲线. 由图2可知,渗透系数 k 和孔隙比 e 的关系近似线性. 随着孔隙比的减小,各级配透明土的渗透系数 k 均降低,数值在 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ cm/s内变化. 随着黏粒含量的增加,在骨架颗粒周围的黏粒逐渐聚集,骨架颗粒排列变得紧密. 土样的孔隙结构发生变化,微孔隙通道增多,大孔隙通道相对减少. 透明土样的粉黏比越大,渗透系数越大;砂粒含量越高,渗透系数越大,与天然土体的规律基本一致^[13]. 事实上,透明土内孔隙液体的运动黏滞度要高于自然界中的水,但试验结果表明透明土的渗透系数较同等孔隙

比下的天然黏土高1~2个数量级^[14]. 本文认为造成这种现象的原因主要是透明土中不存在类似天然黏性土中的结合水膜.

天然黏土的黏土颗粒表面带有一定的电荷,同时自然界的水中含有各种水化离子和水分子. 由于静电作用力,在黏土颗粒表面会形成吸附水膜,吸附水膜的存在会减小土体中的孔隙的有效半径,该部分吸着水的存在会降低土体的渗透性. 而本文中透明黏土的孔隙液体为白矿物油和正十二烷的混合液体,是由非极性子溶液组成的油脂,其内无电子活性或电子活性很小. 同时,模拟土颗粒的无定形硅粉颗粒表面不带电荷,颗粒表面也就没有类似天然黏性土中结合水膜的存在. 因此,相同孔隙比下,透明土具有比天然黏性土更大的渗透系数.

透明黏土的渗透系数比相同孔隙比下的天然黏土在数值上高1~2个数量级,但渗透系数随孔隙比的变化规律与天然土体的试验结果基本一致^[13]. 黏粒含量越高,渗透系数越小;砂粒含量越高,渗透系数越大. 试验结果表明选用透明黏土研究天然黏土内部渗透规律是可行的,同时可大大缩短渗透试验时间.

2.2 压缩固结特性分析

图3和图4分别为6组土样的 $e-p$ 和 $e-\lg p$ 曲线,反映孔隙比 e 随荷载 p 的变化情况. 各级配土样的 $e-p$ 曲线都是上凹的平滑曲线,且在加载的初期对所施加的荷载较为敏感,表明无定形硅粉类透明土类似于欠固结土.

将计算得出的各级配透明土样的压缩指标列于表2. 6组透明黏土的压缩模量 E_{s1-2} (100~200 kPa 压力级别下的压缩模量)的变化范围为1.054~2.256 MPa. 回弹指数 C_r 的变化范围分别为0.038~0.088,压缩指数 C_c 的变化范围为0.212~0.507. C_r/C_c 的变化范围为0.15~0.18,与文献[15]得到的天然黏性土 C_r/C_c 值范围0.02~0.2比较接近. 按照压缩性指标划分标准^[16],本文制配的各级配下的透明土均属于高压缩性黏土.

2.2.1 压缩模量变化规律

各透明土样不同压力级别范围内的压缩模量 E_s 与荷载 p 的关系曲线如图5所示. 由图5可知,透明黏土的压缩模量随着荷载由0 kPa 增到800 kPa 而逐渐增大,这种变化规律与上海重塑黏土^[17]一致.

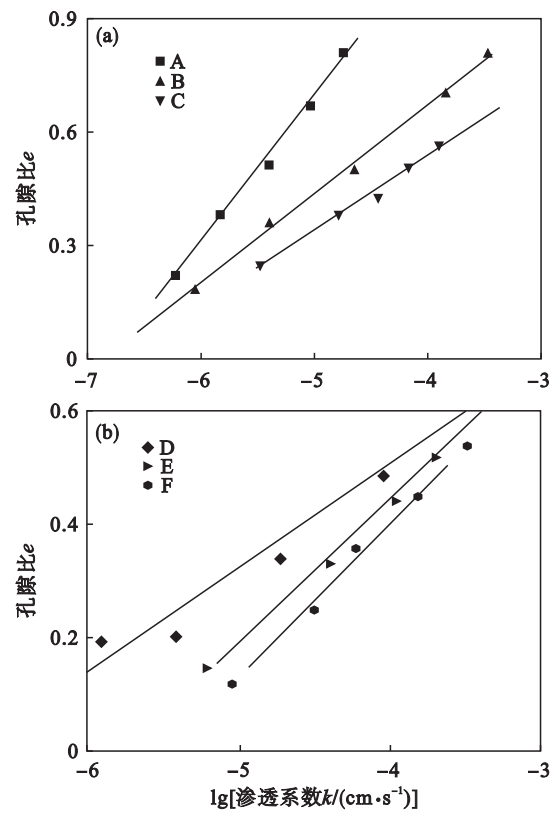


图2 渗透系数随孔隙比的变化曲线
Fig.2 Permeability vs. pore ratio curves
(a)—组1; (b)—组2.

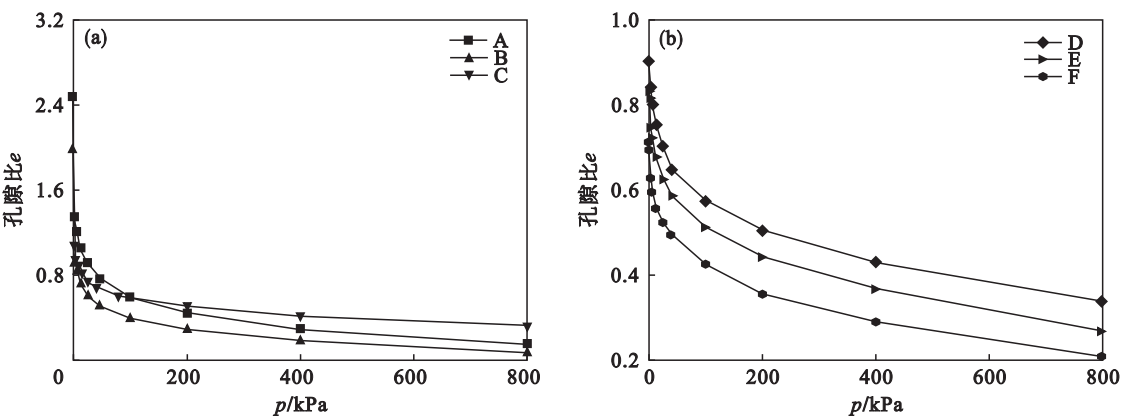


图 3 组 1 和组 2 的土样压缩 $e-p$ 曲线
Fig. 3 Compression $e-p$ curves of soil samples in group 1 and group 2
(a)—组 1; (b)—组 2.

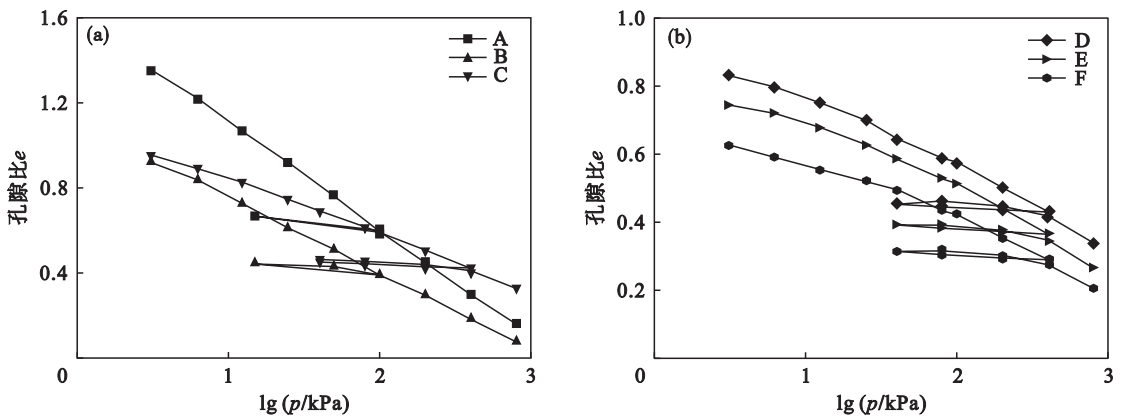


图 4 组 1 和组 2 的土样压缩 $e-\lg p$ 曲线
Fig. 4 Compression $e-\lg p$ curves of soil samples in group 1 and group 2
(a)—组 1; (b)—组 2.

表 2 不同级配透明黏土的压缩性指标
Table 2 Compressibility indexes of transparent clay with different grain compositions

土样	初始孔隙比 e_0	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	回弹指数 C_r	压缩指数 C_e	C_r/C_e
A	2.474	1.054	0.088	0.507	0.175
B	1.978	1.302	0.064	0.357	0.180
C	1.095	1.890	0.042	0.279	0.150
D	0.905	1.978	0.040	0.246	0.162
E	0.831	2.151	0.041	0.239	0.170
F	0.711	2.175	0.038	0.212	0.178

当土体中的砂粒含量相同时,粉黏比会对土体的压缩性产生较大影响.为了直观地反映土体压缩模量随粉黏比的变化规律,将压缩模量 E_{s1-2} 与粉黏比关系曲线绘于图 6.由图 6 可知,无定形硅粉类透明土(土样 A,B,C)的粉黏比对其压缩模量有较大影响,随着粉黏比的增大,土体的压缩模量逐渐增大.总体来说,透明黏土的压缩性随着粉黏比的增大而降低.

当粉黏比相同时,砂粒含量也会对土体的压缩性产生较大影响,将压缩模量 E_{s1-2} 与砂粒含量

关系曲线绘于图 7.由图 7 可知,无定形硅粉透明土(土样 D,E,F)的砂粒含量对其压缩模量有明显影响.随着砂粒含量的增加,土体的压缩模量逐渐增大.总体来说,透明黏土的压缩性随砂粒含量的增加而降低,说明砂粒在土体中具有一定的骨架作用.随着砂粒含量的增多,土体的压缩性降低,这一规律与天然土体基本一致^[18-19].

2.2.2 固结系数变化规律

固结系数的大小能够直观反映土体的固结快慢程度,因此,准确测定固结系数对于预测土层的

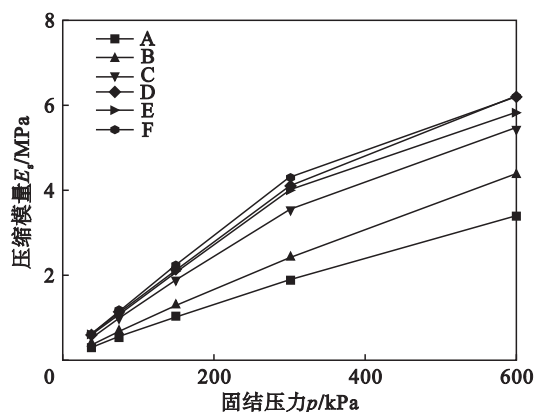


图5 压缩模量变化曲线
Fig. 5 Compression modulus curves

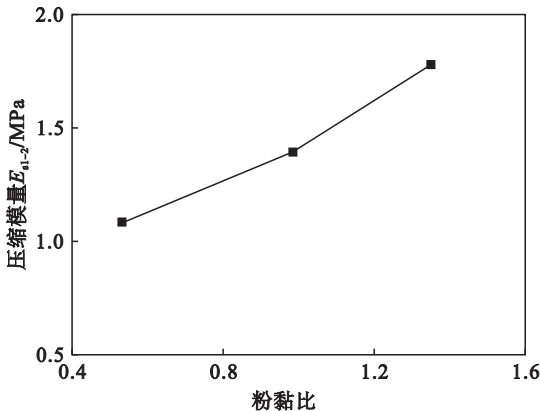


图6 压缩模量与粉黏比关系曲线
Fig. 6 Compression modulus versus powder-to-viscosity ratio curve

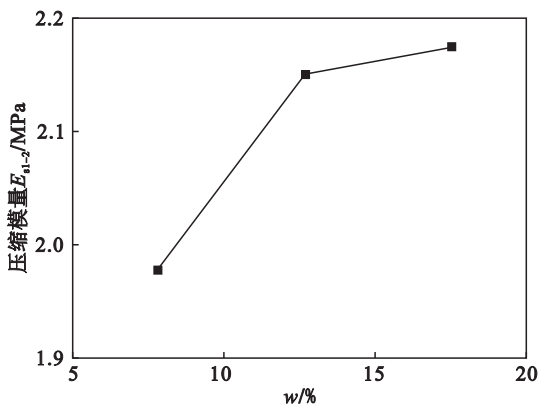


图7 压缩模量与砂粒质量分数关系曲线
Fig. 7 Relationship between compression modulus and sand content

排水固结速率和固结度有重要意义. 本文采用时间平方根法计算得各级配土样在各级荷载下的固结系数. 荷载由小到大取 5 个等级, 分别为 50, 100, 200, 400, 800 kPa. 为了研究固结系数随应力水平的变化规律, 这里给出了各个土样固结系数 C_v 随荷载 p 的变化曲线, 如图 8 所示.

由图 8 可知, 透明土的固结系数随应力水平的提高总体呈现逐渐降低的趋势, 其中土样 A, B

的固结系数随应力水平的提高持续下降, 土样 C, D, E, F 存在固结系数在较低应力水平下稍有上升, 之后持续下降的现象. 本文关于无定形硅粉类透明土固结系数随应力水平变化规律与天然土体的试验规律相似^[20]. 总体看来, 土体的粉黏比越小, 固结系数越小. 土样 A, B 的固结系数数量级在 $10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 土样 C, D, E, F 的固结系数数量级在 $10^{-1} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

太沙基一维固结理论中渗透系数与固结系数的关系公式为 $C_v = kE_s/\gamma_w$, 式中, k 为土体渗透系数, E_s 为土体的压缩模量, γ_w 为孔隙液体重度. 透明土的压缩模量与天然土体压缩模量数值虽有差异, 整体还是比较接近^[15]. 但是透明土体的渗透系数较天然土体的渗透系数高 1 ~ 2 个数量级, 固结系数的计算结果也表明, 透明土的固结系数数量级在 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 较天然土体大 1 ~ 2 个数量级. 虽然数值不同, 但考虑到透明黏土的固结系数随荷载的变化规律与天然土体相似, 故采用透明黏土进行天然黏土固结规律研究是可行的.

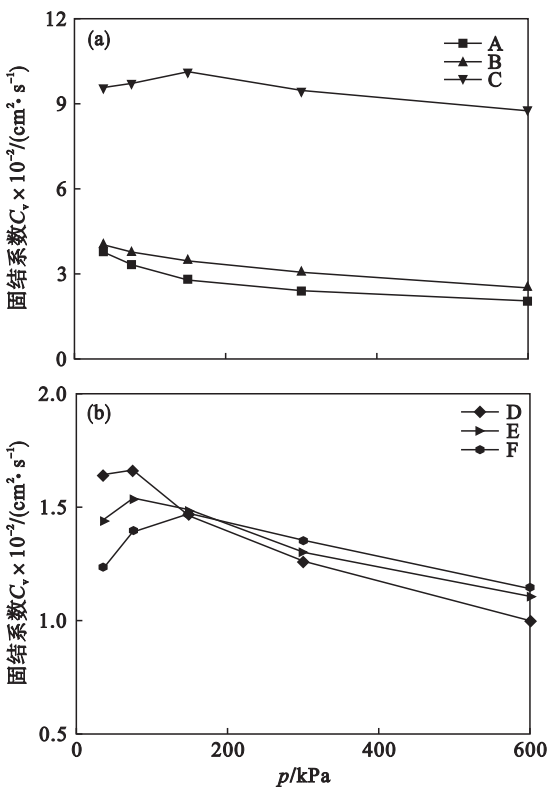


图8 固结系数随荷载变化曲线
Fig. 8 Consolidation coefficient versus load curves
(a)—土样 A, B, C; (b)—土样 D, E, F.

3 结 论

1) 透明黏土的渗透系数在 $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ 范围内变化, 在数值上比天然黏土大. 透明黏土的

孔隙比与渗透系数的半对数关系呈现明显的线性,曲线的变化规律与天然土体相似.同时,颗粒级配对透明土的渗透性有较大影响,粉黏比越大,土体的渗透系数越大.可以采用透明黏土定性研究天然黏土内部渗流规律.

2) 按照压缩性指标的划分依据,各级配透明土均属于高压缩性土.并且土体的粉黏比越大,压缩模量越小,土体的压缩性越高.砂粒含量越高,压缩模量越大,土体压缩性越低.

3) 透明黏土的固结系数随应力水平的提高大致呈逐渐下降的趋势,某些级配下的土样会出现在较小应力水平下略微上升,之后持续下降的趋势.透明黏土的 $C_v - p$ 曲线的变化规律与天然土体相似.总体看来,土样的粉黏比越小,固结系数越小.

4) 颗粒级配对透明土的渗透系数和固结系数有较大影响,土体的粉黏比越大,渗透系数越小,固结系数越大.透明黏土的渗透系数和固结系数在数值上比天然黏土要大,但是,透明黏土的 $e - \lg k$ 和 $C_v - p$ 曲线的变化规律与天然土体相似,故可以采用透明黏土定性研究天然黏土内部渗流规律和固结变化规律.

参考文献:

[1] Iskander M, Bathurst R J, Omidvar M. Past, present, and future of transparent soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015,38(5):557 – 573.

[2] Sun J, Liu J. Visualization of tunnelling-induced ground movement in transparent sand [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2014,40:236 – 240.

[3] Yuan B, Sun M, Wang Y, et al. Full 3D displacement measuring system for 3D displacement field of soil around a laterally loaded pile in transparent soil [J]. *International Journal of Geomechanics*,2019,19(5):04019028.

[4] Wang J, Liu X, Liu S, et al. Physical model test of transparent soil on coupling effect of cut-off wall and pumping wells during foundation pit dewatering [J]. *Acta Geotechnica*, 2019,14(1):141 – 162.

[5] Zhao H, Yu S, Sang Y, et al. The loading test on the single pile with pile cap in transparent soil model[J]. *Geotechnical Testing Journal*,2018,42(2):385 – 406.

[6] Sui W, Zheng G. An experimental investigation on slope stability under drawdown conditions using transparent soils [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018,77(3):977 – 985.

[7] Iskander M G, Lai J, Oswald C J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*,1994,17(4):425 –

433.

[8] Liu J. Visualization of 3D deformations using transparent “soil” models[D]. New York:Polytechnic University,2003.

[9] 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.)

[10] 姜海波,武亚军,孔纲强,等. 超软土真空预压透明土模型试验及土桩形成机理[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(2):33 – 40.

(Jiang Hai-bo, Wu Ya-jun, Kong Gang-qiang, et al. Transparent soil model test of vacuum preloading method on ultra-soft soil and formation mechanism of “soil pile” [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*,2020,52(2):33 – 40.)

[11] Salarashayeri A F, Siosemarde M. Prediction of soil hydraulic conductivity from particle-size distribution [J]. *World Academic Science Engineering Technology*,2012,61:454 – 458.

[12] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程 (SL237—1999) [S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

(Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China. Geotechnical test code (SL237—1999) [S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press,1999.)

[13] Tavenas F, Jean P, Leblond P, et al. The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics [J]. *Canadian Geotechnical Journal*,1983,20(4):645 – 660.

[14] Zeng L L, Hong Z S, Cai Y Q, et al. Change of hydraulic conductivity during compression of undisturbed and remolded clays[J]. *Applied Clay Science*,2011,51(1/2):86 – 93.

[15] Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. Soil mechanics in engineering practice [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范 (GB 50007—2011) [S]. 北京:中国建材工业出版社,2011.

(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People’s Republic of China. Code for design of building foundation (GB 50007—2011) [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press,2011.)

[17] 陈婷婷. 土的结构性特征对上海黏性土压缩特性的影响 [D]. 上海:同济大学,2009.

(Chen Ting-ting. Effects of soil structural characteristics on compressive properties of Shanghai clay [D]. Shanghai: Tongji University,2009.)

[18] Yin J H. Properties and behaviour of Hong Kong marine deposits with different clay contents [J]. *Canadian Geotechnical Journal*,1999,36(6):1085 – 1095.

[19] Kanny K, Jawahar P, Moodley V K. Mechanical and tribological behavior of clay-polypropylene nanocomposites [J]. *Journal of Materials Science*,2008,43(22):7230 – 7238.

[20] Olson R E. Settlement of embankment on soft clays [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*,1998,124(4):278 – 288.