

DOI: 10.11779/CJGE20220107

人工制备互层土的静三轴剪切力学特性研究

申志福, 徐琪尔, 朱玲裕, 王志华, 高洪梅*

(南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 互层土是一种广泛分布的特殊土体, 目前对其基本力学特性的认识仍不充分。采用人工制备的粉质黏土与粉砂互层土, 通过固结不排水三轴试验对其基本力学特性进行研究, 重点分析了层厚比对互层土不排水剪切应力-应变、孔压、抗剪强度及破坏形态的影响规律。研究表明, 互层土的力学性质介于两单层土(正常固结粉质黏土与中密粉砂)的力学特性之间, 但并非二者的某种简单组合, 而是受粉质黏土层与粉砂层的层厚比影响; 随着互层土中粉质黏土层厚的增加, 其应力-应变曲线由软化型变为硬化型, 孔压发展由负孔压转变为正孔压, 应变局部化(剪切带)破坏模式受到抑制, 粉质黏土层的控制作用逐渐增强。

关键词: 互层土; 粉质黏土; 粉砂; 应力-应变关系; 抗剪强度; 破坏模式

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)04-0840-07

作者简介: 申志福(1988—), 男, 四川绵阳人, 工学博士, 副教授, 主要从事宏微观土力学方面研究工作。E-mail: zhifushen@njtech.edu.cn。

Experimental study on static triaxial shear behavior of artificially prepared interlayered soil

SHEN Zhifu, XU Qier, ZHU Lingyu, WANG Zhihua, GAO Hongmei

(School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: The interlayered soil is a type of widely distributed special soil. Its mechanical behavior has not been fully understood so far. The soil samples of silty clay interlayered by silty sand are artificially prepared for experiments. The consolidated-undrained triaxial tests are carried out to study the basic mechanical behavior of the prepared interlayered soils. The effects of the layer thickness ratio on the stress-strain relationship, pore pressure responses, shear strength and sample failure modes are analyzed. The results show that the mechanical behavior of the interlayered soil falls in between the behavior of the two constituent layers of soil, i.e., a normally consolidated silty clay and a medium dense sand, but it is not a simple combination of the two. Instead, the layer thickness ratio plays an important role. As the thickness ratio of silt clay increases in the interlayered soil, its stress-strain curve transits from the softening type to the hardening one, the pore pressure changes from negative to positive, and the shear band type localization is suppressed, implying an enhanced role of silty clay layer.

Key words: interlayered soil; silty clay; silty sand; stress-strain relationship; shear strength; failure mode

0 引言

由于沉积环境的改变, 河流、波浪携带泥沙进行周期性的往复作用常形成多种土类交替出现的地层, 并呈现独特的水平层理和沉积韵律。以两类土交替出现为例, 薄层与厚层的厚度比大于 1/3 的土定义为互层, 厚度比在 1/10~1/3 定义为夹层, 厚度比小于 1/10 时称为夹薄层(或间层)。其中互层土也常被称为“千层饼”、天然沉积“中间土”^[1]、夹花层^[2]、迭层土^[3]等。互层土空间分布范围广泛, 如中国海域普遍分布该土层^[3-4]; 长江中下游现代河漫滩土层的过渡相是典型的粉砂与黏性土互层(或夹层), 由不稳定的沉积环境形成^[5]; 在长江口历史上多次海进海退及北岸砂坝

并陆事件而形成全新世薄层黏土与粉细砂互层结构^[6]; 国外如新西兰 Christchurch^[7]、土耳其 Çark Canal^[8]都分布有典型的互层土。典型原状互层土照片如图 1 所示。

中国沿江、沿海城市地下空间开发的大量结构物位于互层土中^[9], 沿海港口、大桥基础也常贯穿该类

基金项目: 江苏省科技厅自然科学基金青年基金项目(BK20190667); 国家自然科学基金青年基金项目(51908284); 国家自然科学基金面上项目(52178336); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB560015); 江苏省高等学校自然科学研究重点项目(18KJA560002); 江苏高校“青蓝工程”中青年学术带头人项目

收稿日期: 2022-01-24

*通信作者 (E-mail: hongmei54@163.com)

土层^[6], 海洋工程活动更是多与互层土相关^[3-4]。研究表明, 互层(或含夹层)场地在基坑支护结构变形^[9]、边坡稳定性^[10]、隧道开挖面稳定性^[11-12]、场地抗液化能力^[7-8, 13-16]等方面有明显的特殊性, 但目前对此认识还不全面、不充分。

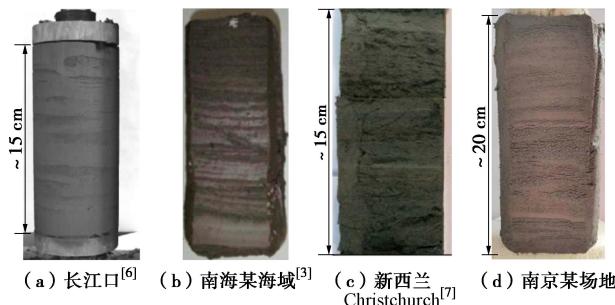


图1 典型原状互层土照片

Fig. 1 Photos of typical interlayered soils

在工程实践中, 物理指标多采用扰动后的混合土测试得到, 不能反映互层土的层理结构特征。而由于砂层的存在导致固结排水快, 互层土具有物理性质指标偏软偏差、力学指标偏硬偏好的特征, 即物性与其力学性质指标不完全吻合^[17], 给工程应用带来困惑。工程实践表明, 鉴于各单层间的主要力学指标差异较大, 且其厚度与含量不均, 不宜采用平均值作标准值, 应结合不同的力学指标进行参数修正或进行不同形式的加权平均^[2, 18]。正是由于互层土物理、力学特性的特殊性与复杂性, 确定互层土的承载力等工程参数时一般以力学试验指标结合原位测试方法为主, 而物理指标因难以反映土体的结构特征而只能起辅助作用^[2-3, 5, 18-20]。此外, 对互层土开展力学试验时排水条件的选择尤为重要, 由于砂层的存在, 室内三轴不排水剪切试验(UU试验)确定的不排水强度明显偏低, 是现场CPTU确定的不排水抗剪强度的下限值^[3]。

目前对互层土力学特性的系统研究还很初步, 且集中于其动力特性研究。陈国兴等^[21-23]采用原状试样试验发现粉质黏土-粉砂互层土的振动孔压响应及抗液化性能与围压、固结应力比有关; Tasiopoulou等^[15]基于原状样动三轴试验指出黏性土层可提高互层土的抗液化能力。由于原状试样获取困难且变异性大, 周健等^[24]、杨永香等^[25]制备了含粉粒夹层的饱和土样进行动三轴剪切试验发现, 随着粉粒夹层厚度的增加, 饱和砂土的抗液化强度并不是单调增加的, 而是存在一个临界点。

综上, 当前对于互层场地工程性质还缺乏深入的认识, 工程设计还缺乏系统的理论支撑, 互层土的勘察和设计参数取值还没有统一方法。这是互层土空间变异性大, 力学特性复杂的体现。互层土独特的层理

构造赋予其不同于各单一土层的力学特性, 不能简单套用一般软土或砂土的理论框架和经验参数。互层土的力学参数如何受各单层特性、层厚比等因素的影响, 在不同工况下是否由某一土层起主导作用等问题还需深入系统地研究。

本文采用人工制备的粉质黏土与粉砂互层土研究其静力强度与变形特性, 分析层厚比对互层土强度发挥、强度指标、试样破坏形态的影响规律, 成果将提升学术界和工程界对互层土这一类特殊土体的力学特性认识。

1 互层土试样制备与试验方法

1.1 试验材料与试样制备方法

试验原料土取自南京漫滩相地层中的粉质黏土层与粉砂层。粉质黏土经自然风干, 用粉碎机将风干土打碎、过筛, 密封保存。其主要物理性质指标见表1, 其级配曲线如图2。粉砂经烘干筛分后, 取用粒径小于0.25 mm范围的颗粒, 级配如图2所示; 粉砂的土粒相对质量密度 $G_s = 2.68$, 最小孔隙比 $e_{min} = 0.75$, 最大孔隙比 $e_{max} = 1.35$ 。

表1 粉质黏土物理性质

Table 1 Physical properties of silty clay

天然含水率 $w/\%$	天然重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	土粒相对质量密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P
39.6	17.64	2.72	36.8	23.3	13.5

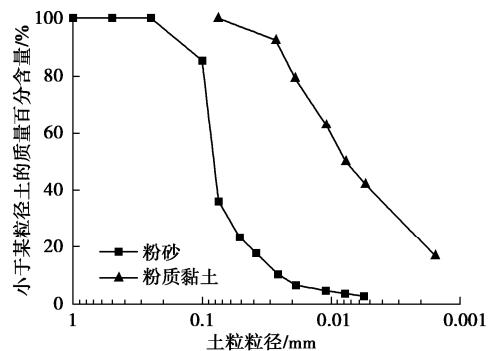


图2 试验土体级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of test soils

本试验的互层土为重塑的粉质黏土与粉砂互层土, 试样于三瓣模具中由粉质黏土与粉砂交互填装成层, 后预压成形, 制样方法详见文献[26]。

1.2 层厚与层厚比

本研究基于文献报道的典型互层土层厚范围确定试样中各层厚度。渤海石油开发区海底面砂土或黏土层的单层厚度为2~3 mm^[4]; 南京地区互层土中砂层最大厚度可达10 mm、平均厚度约5 mm, 粉质黏土层平均厚度约4 mm^[21]; 武汉地区互层土中粉质黏土

呈软塑—可塑状, 粉土、粉砂呈松散—稍密状或稍密—中密状, 其中薄互层者单层厚度约 1~10 mm, 多呈“千层饼”状^[2, 19]。

综合试样尺寸和文献数据, 本研究取粉砂层厚为 4.0 mm, 而粉质黏土层分别为 2.0, 5.0, 6.5, 8.0, 12.0 mm, 共制备 5 组互层样, 如表 2 中试样 1~5。此处层厚均指装样时的厚度。上述试样中薄层与厚层的厚度比均大于或等于 1/3, 满足“互层”的定义。典型重塑互层样的剖面如图 3, 图 3 中均为预固结后、三轴试验前的真实试样自中部纵剖切割观察。钢丝锯切割操作对层面的平直度有一定的影响, 对完整的试样从层面掰开观察到的层面为平面, 满足分层平直的预期。

此外, 还制备了与重塑互层土中各单层具有相同初始孔隙比的粉质黏土样和粉砂样作为对比, 如表 2 中的试样 6, 7。为保证粉砂样的饱和, 采用水沉法进行制备。粉质黏土样的制样过程与重塑互层土中粉质黏土层的制样方法一致, 先调制黏土膏, 后加入模具进行预固结, 施加与互层土一致的预固结压力, 后拆模切样。

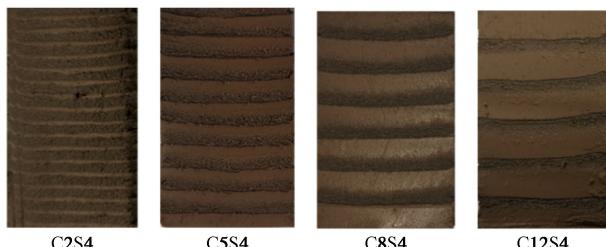


图 3 典型试样纵剖面

Fig. 3 Sample profiles exposed on a vertical section

值得注意的是, 从图 1 可以看出, 实际互层土的层厚在室内试验单元尺寸范围变异性很大, 且层面不一定水平、平整。本研究采用水平层面和均匀互层厚度原则制备试样是对实际情况的高度简化, 旨在先厘清影响互层土力学特性的基本因素, 在后续研究中将尝试深入分析试样内互层厚度空间变化的作用。

表 2 试验试样

Table 2 Soil samples in experiments

试样 编号	试样 名称	粉质黏土层厚/ mm	粉砂层厚/ mm
1	C2S4	2.0	4.0
2	C5S4	5.0	4.0
3	C6.5S4	6.5	4.0
4	C8S4	8.0	4.0
5	C12S4	12.0	4.0
6	S-Clay	—	—
7	S-Sand	—	—

1.3 试验设备与试验方案

试验采用英国 GDS 公司生产的应变控制式静力

三轴系统。试样安装完成后, 对试样进行分级反压饱和; 对饱和后的试样进行 B 值测定, 若 $B > 0.95$ 则认为试样已饱和; 后对试样进行等向固结, 1 h 内排水量变化小于 100 mm³ 即认为固结已经完成。各试样在 $\sigma'_c = 100$, $\sigma'_c = 200$ 和 $\sigma'_c = 400$ kPa 有效围压下等向固结后剪切, 不排水剪切试验的剪切应变速率为 0.1 %/min, 检验表明该加载速率下试样内孔压能实现平衡。

1.4 孔隙比控制

试样 6 中粉质黏土与互层土中的粉质黏土层应具有相同的孔隙比, 试样 7 中的粉砂与互层土中的粉砂层也应具有相同的孔隙比, 才能使得互层结构与非互层结构的试样在力学特性方面具有可比性。为此, 选用 C5S4 互层土 (试样 2) 进行多次重复制样与 (预) 固结, 检验上述孔隙比的一致性, 确保结果可比性。

本研究制备互层土的粉质黏土土膏与制备粉质黏土的土膏含水率相同, 对应的孔隙比为 1.63; 施加 30 kPa 预固结压力后, 采用小环刀^[26]测得的互层土中粉质黏土层孔隙比为 0.94~0.97, 而粉质黏土 (试样 6) 的孔隙比预固结后降低到 0.98~1.02, 略大于互层土中粉质黏土层, 这可能是由于互层土中粉砂有利于固结排水所致。将在各围压下等向固结后的互层土取出测定各粉质黏土层孔隙比, 与各围压下固结后的粉质黏土 (试样 6) 孔隙比对比如表 3 所示, 可以看到二者在各围压下略有差异但差别很小, 说明互层土中的粉质黏土层与粉质黏土样 (试样 6) 具有可比性。粉砂层的孔隙比一致性验证也列于表 3, 各围压下固结后互层中粉砂层的孔隙比与固结后的粉砂样 (试样 7) 的孔隙比差异很小, 也满足一致性要求。

表 3 试验不同阶段孔隙比

Table 3 Void ratios at different stages of tests

土样 类型	固结围压 σ'_c /kPa	制样 孔隙比	预固结后 孔隙比		固结后 孔隙比
			互层 土	C5S4	
粉质黏土层	100				0.78
	200	1.63	0.94~0.97		0.72
	400				0.61
	100				0.97
粉砂层	200	1.05	0.97~1.01		0.94
	400				0.93
粉质 黏土	100				0.79
	200	1.63	0.98~1.02		0.74
	400				0.60
粉砂	100		—		0.98
	200	1.05	—		0.96
	400		—		0.90

因此, 本研究的重塑互层土制样方法通过控制粉

质黏土层土膏含水率、粉砂层孔隙比与纯粉质黏土样和纯粉砂样分别相同, 并经历相同的固结历史, 确保了三轴剪切前互层土各单层与粉质黏土、粉砂的物理状态相同, 保证了后续数据分析的合理性。由于是从土膏开始制样, 粉质黏土(层)可视为正常固结状态; 而粉砂制样时孔隙比 1.05 对应的相对密实度为 0.5, 为中密状态。

2 层厚比对互层土力学特性的影响

2.1 应力-应变与孔压响应规律

图 4 为粉砂、粉质黏土及 5 种不同层厚比互层土在围压 100 kPa 下不排水剪切的应力-应变曲线。由于粉砂处于中密状态, 不排水剪切的应力-应变曲线为软化型; 而正常固结的粉质黏土应力-应变曲线为硬化型, 互层土的应力-应变曲线介于粉质黏土与粉砂之间; 相同轴向应变下, 随着粉质黏土层厚增加, 互层土偏应力减小并逐渐接近粉质黏土偏应力。当粉质黏土层厚为 2.0, 5.0 mm 时(即试样 C2S4 和 C5S4), 互层土的应力-应变曲线与粉砂曲线相似, 都表现为软化型, 但随粉质黏土厚度增加, 软化程度明显减弱; 当粉质黏土层厚大于 5.0 mm 时, 互层土的应力-应变曲线与粉质黏土曲线相似, 无明显峰值, 表现为硬化型。综上, 粉质黏土与粉砂的应力-应变曲线分别是互层土应力-应变曲线的上、下限, 随粉质黏土层厚逐渐增加, 互层土的应力-应变关系逐渐从由粉砂起控制作用向由粉质黏土起控制作用转变; 对粉砂层厚为 4.0 mm 的互层土, 力学特性转变的临界粉质黏土层厚度为 5.0~6.5 mm。

图 5 为粉砂、粉质黏土及 5 种不同层厚比互层土在围压 100 kPa 下不排水剪切的孔压变化响应曲线。可以看到, 中密状态的粉砂在初期由于剪缩趋势而孔压增大, 在轴向应变 2% 后因剪胀趋势而孔压开始降低, 在轴向应变 7% 后孔压比剪切起点时刻还低, 表现出明显的剪胀趋势; 孔压的这种变化与剪胀性土先剪缩后剪胀的一般规律一致; 当轴向应变超过 22.5% 后, 试样应变局部化(剪切带)变得明显, 负孔压稍有回落。而粉质黏土表现为孔压先快速增大, 随后增长速度逐渐减缓并最终趋于某一稳定值, 这是剪缩性土的典型响应特征。对于互层土, 随着粉质黏土层厚度增大, 孔压发展由正转负的程度减弱; 当粉质黏土层厚大于 5.0 mm 时, 孔压响应随粉质黏土层厚的变化不再明显, 此时互层土的孔压响应与粉质黏土非常相似, 而粉砂的孔压特征几乎不能表现出来。值得注意的是, 粉质黏土的孔压响应曲线并非位于所有曲线

的最下方, 其在剪切初期正孔压发展速度最慢; 在轴向应变超过 12% 后, 粉质黏土的孔压响应曲线才与粉质黏土层厚大于 5.0 mm 的几个互层土的孔压响应曲线渐次相交, 并趋向于发展为所有曲线的下限。

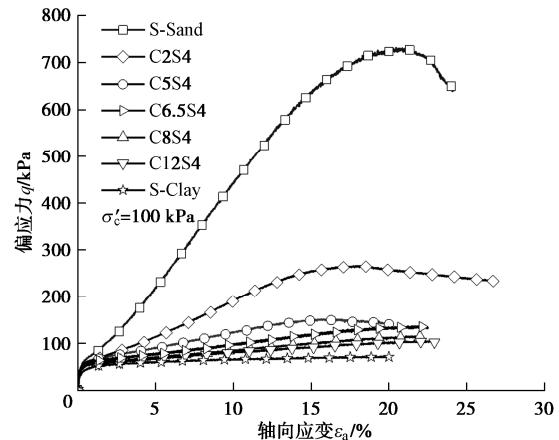


图 4 层厚比对互层土应力-应变曲线的影响

Fig. 4 Effects of layer thickness ratio on stress-strain curves of interlayered soil

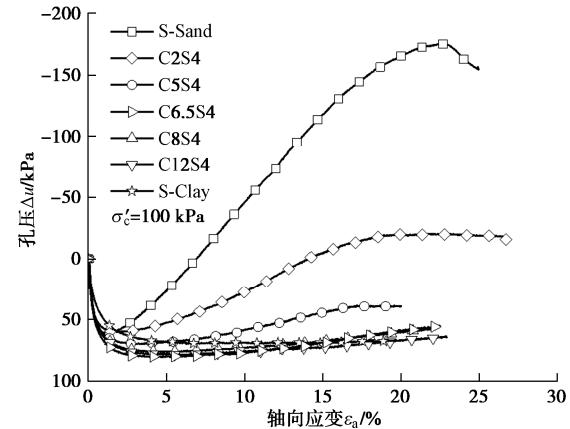


图 5 层厚比对互层土孔压响应的影响

Fig. 5 Effects of layer thickness ratio on pore pressure responses of interlayered soil

综上, 互层土中各单层的层厚比对其力学响应有显著影响。随粉质黏土层厚逐渐增加, 互层土的孔压响应逐渐从粉砂起控制作用转变为粉质黏土起控制作用; 对粉砂层厚为 4.0 mm 的互层土, 力学特性转变的临界粉质黏土层厚度为 5.0~6.5 mm。虽然互层土的孔压响应特征整体上介于粉质黏土与粉砂之间, 但互层土的孔压响应曲线并不是简单地以粉砂和粉质黏土的孔压曲线为上、下限。这可能是由于试验测得的是试样端部的孔压, 而互层土中存在粉质黏土层中孔隙水(正孔压)向粉砂层(负孔压)中渗流的过程, 这使得互层土剪切过程中试样内部应力分布复杂, 其宏观力学特性不能视为粉砂与粉质黏土力学特性的某种简单组合, 其机理还需后续研究深入探讨。

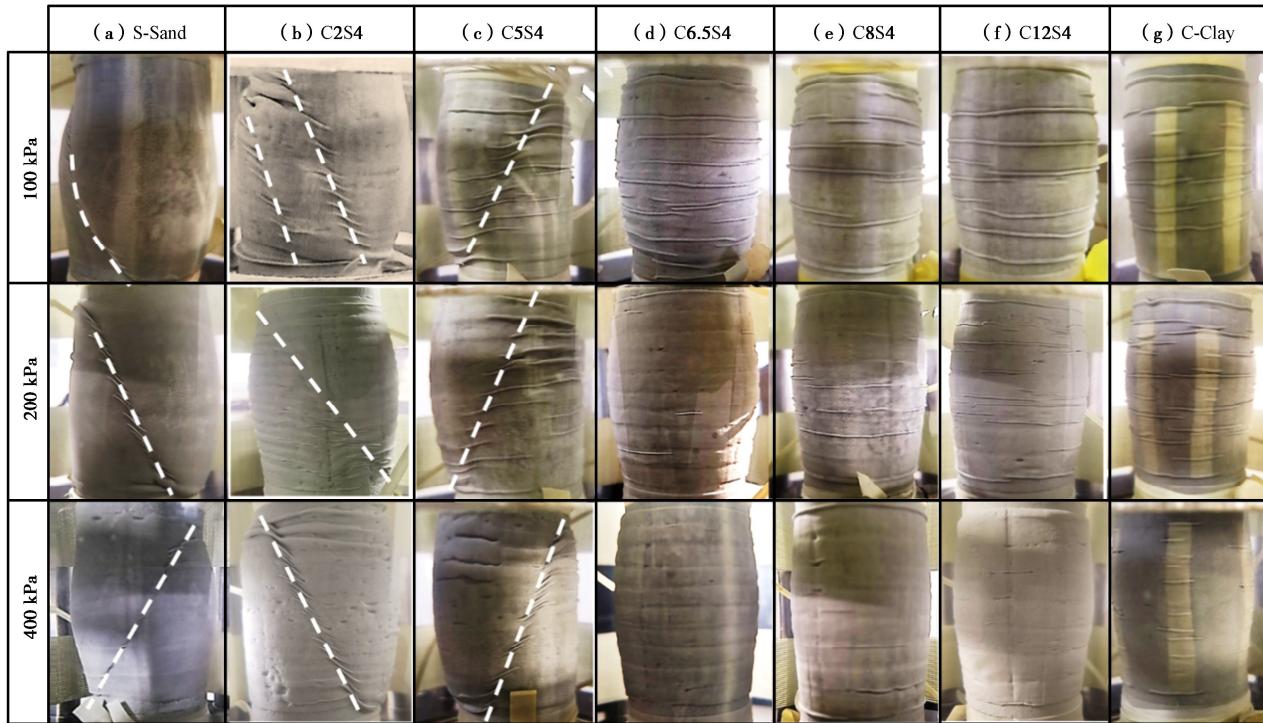


图 6 不同围压下互层样及粉砂样、粉质黏土样的加载结束时的破坏形态

Fig. 6 Final failure modes of interlayered soils, silt sands and silty clays under three different confining pressures

2.2 试样变形与破坏形态

图 6 为 3 种不同围压下 (100, 200, 400 kPa) 互层土及粉砂、粉质黏土在剪切加载结束时的试样形态, 对应的轴向应变均大于 20%。中密状态的粉砂呈现出明显的应变局部化 (剪切带) 破坏模式, 而正常固结的粉质黏土样呈现出鼓胀变形模式。粉质黏土层厚为 2.0, 5.0 mm 的互层土 (即试样 C2S4 和 C5S4) 破坏形态与粉砂类似, 表现为应变局部化 (剪切带), 互层土的剪切带比粉砂的略厚, 试样 C2S4 在有效围压 100 kPa 时有两条平行的剪切带, 从橡皮膜褶皱的扭曲程度可判断粉砂的局部化更明显; 剪切带倾角与互层结构间未观察到明显规律; 当互层土中的粉质黏土层厚大于 5.0 mm 时, 互层土的变形形态与粉质黏土类似, 均表现为鼓胀模式。可以推知, 在粉砂层厚度为 4.0 mm 的互层土中, 当粉质黏土层厚度小于或接近粉砂层厚度时, 粉砂层的局部化变形模式能够“突破”粉质黏土层的“约束”, 使得相邻粉砂层的局部化变形能够“贯通”, 从而使剪切带能够贯穿整个试样; 而当粉质黏土层厚度大于粉砂层时, 粉质黏土层的“约束”作用较强, 粉砂层不能形成局部化变形。由于粉砂与粉质黏土力学特性的差异明显, 在互层土中相邻的粉砂层和粉质黏土层可能存在变形的不协调性, 进而引发二者应力状态与纯粉砂和纯粉质黏土试样的应力状态有明显差异。因土体的应变局部化发生条件与其应力状态、应力路径方向等因素密切相关^[27], 互层结构

使得粉砂层的应力及其变化不再满足应变局部化的发生条件, 这是就粉质黏土层对粉砂层应变局部化“约束”机理的推测性定性解释, 有必要在后续研究中采用更加先进的试验技术 (如剪切同时进行 CT 扫描) 与数值模拟技术对该机理开展更深入研究。

综上, 随着粉质黏土层厚的逐渐增加, 互层土的破坏形态逐渐由粉砂控制转变为粉质黏土起控制作用。对于粉砂层为 4.0 mm 的情形, 互层土破坏形态转变的临界粉质黏土层厚度为 5.0~6.5 mm。

2.3 强度指标

根据各试样的应力路径末尾段拟合强度包线, 换算的有效内摩擦角如表 4 所示。表中情形呈现出有效内摩擦角随粉质黏土比例的增加而逐渐降低的整体规律。

表 4 试验土样的有效内摩擦角

Table 4 Effective internal friction angles of test soils

试样名称	S-Sand	C2S4	C5S4	C6.5S4	C8S4	C12S4	S-Clay
有效内摩擦角	36.1°	35.1°	35.3°	34.7°	34.3°	33.4°	31.4°

3 结 论

本文采用人工制备的粉质黏土与粉砂互层样, 基于固结不排水三轴剪切试验, 探讨了具有不同粉质黏土与粉砂层厚的人工制备互层土的静力力学特性, 分

析其破坏变形特征, 得到以下两点结论。

(1) 互层土的应力-应变曲线介于粉质黏土与粉砂之间, 且随着互层中粉质黏土层厚的增加, 应力-应变曲线应变软化型过渡至应变硬化型(更接近于粉质黏土), 孔压响应由负孔压为主转变为正孔压为主, 应变局部化(剪切带)发展受到抑制。

(2) 对于粉砂层为4.0 mm的互层土, 其应力-应变响应、孔压响应和破坏形态转变的临界粉质黏土层厚度为5.0~6.5 mm。

值得注意, 本文报道的互层土试验严格地讲不是一个均匀应力/应变单元试验, 试样变形模式和内部孔隙水压分布非常复杂, 后续工作将结合数值模拟进行对比分析。

参考文献

- [1] 石名磊, 张波, 洪振舜. 天然沉积中间土的力学特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1753-1756. (SHI Minglei, ZHANG Bo, HONG Zhenshun. Mechanical properties of natural sedimentary intermediate soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1753-1756. (in Chinese))
- [2] 张三定. 武汉地区“夹花层”土的力学参数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 134-139. (ZHANG Sanding. Research on mechanical parameter of interbedded soils in the Wuhan area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 134-139. (in Chinese))
- [3] 李飒, 徐保照, 刘剑涛, 等. 南海迭层土物理力学特性的研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊1): 203-208. (LI Sa, XU Baozhao, LIU Jiantao, et al. Study of characteristics of laminated soil in South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S1): 203-208. (in Chinese))
- [4] 吴秋云, 周扬锐, 冯秀丽, 等. 自升式钻井船基础刺穿分析方法在渤海石油开发区的应用[J]. 海岸工程, 1999, 18(4): 16-21. (WU Qiuyun, ZHOU Yangrui, FENG Xiuli, et al. Applying of the punch through analysis method of rig drilling ship in Bohai open up oilfields[J]. Coastal Engineering, 1999, 18(4): 16-21. (in Chinese))
- [5] 刘世凯. 长江中下游现代河漫滩土层物理力学性质及工程地质评价[J]. 工程地质学报, 2001, 9(2): 141-144. (LIU Shikai. Physical-mechanical properties and engineering-geological evaluation of fooldplain land in the modern heach of the middle and the lower of yantze river[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(2): 141-144. (in Chinese))
- [6] 刘志彬, 刘松玉, 周伯明, 等. 长江口海陆交互相沉积土成因及其空间特征[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 102-108. (LIU Zhibin, LIU Songyu, ZHOU Boming, et al. Geological genesis and spatial variability characteristic of the interactive marine and terrestrial soft deposit in Yangtze River Estuary[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 102-108. (in Chinese))
- [7] BEYZAEI C Z, BRAY J D, CUBRINOVSKI M, et al. Characterization of silty soil thin layering and groundwater conditions for liquefaction assessment[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(2): 263-276.
- [8] BOULANGER R W, MUNTER S K, KRAGE C P, et al. Liquefaction evaluation of interbedded soil deposit: Cark canal in 1999 M7.5 Kocaeli earthquake[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9): 5019007.
- [9] 唐传政, 唐冬云, 李宇红. 武汉轨道交通6号线某主体车站基坑工程变形问题分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊1): 198-201. (TANG Chuanzheng, TANG Dongyun, LI Yuhong. Deformation analysis of foundation pit of a subject station of Metro Line 6 in Wuhan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 198-201. (in Chinese))
- [10] 李明, 张嘎, 张建民, 等. 开挖条件下含水平砂土夹层边坡破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 185-189. (LI Ming, ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, et al. Research on failure mode of clay slope containing horizontal sand interlayer under excavation conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 185-189. (in Chinese))
- [11] 王志杰, 徐海岩, 唐力, 等. 层厚比对互层地层隧道围岩稳定性的影响探究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3): 50-55. (WANG Zhijie, XU Haiyan, TANG Li, et al. Research on the influence of thickness ratio on surrounding rock stability of tunnel in interbedded strata[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3): 50-55. (in Chinese))
- [12] 徐海岩, 王志杰, 陈昌健, 等. 土砂互层隧道塌方及演变规律的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1050-1058. (XU Haiyan, WANG Zhijie, CHEN Changjian, et al. Model investigation on the characteristics and evolution of tunnel collapse in soil sand interbedded strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1050-1058. (in Chinese))
- [13] ZHOU H, WOTHERSPOON L M, HAYDEN C P, et al. Assessment of existing SPT-CPT correlations using a new zealand database[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(11): 4021131.
- [14] BEYZAEI C Z, BRAY J D, VAN BALLEGOOY S, et al.

- Depositional environment effects on observed liquefaction performance in silt swamps during the Canterbury earthquake sequence[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, **107**: 303-321.
- [15] TASIOPOULOU P, GIANNAKOU A, CHACKO J, et al. Liquefaction triggering and post-liquefaction deformation of laminated deposits[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, **124**: 330-344.
- [16] ECEMIS N. Experimental and numerical modeling on the liquefaction potential and ground settlement of silt-interlayered stratified sands[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, **144**: 106691.
- [17] 柳艳华, 石名磊. 海陆交互下黏性土性状辨析及评价研究[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(2): 523-528. (LIU Yanhua, SHI Minglei. Evaluation research and distinguishing of cohesive soil properties in the interactive marine & terrestrial deposit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(2): 523-528. (in Chinese))
- [18] 曹圣华. 滨滩相互层土工程特性初步研究[J]. *地质学刊*, 2010, **34**(1): 61-66. (CAO Shenghua. A preliminary study on engineering characters of interbedded soils in littoral and river facies[J]. *Journal of Geology*, 2010, **34**(1): 61-66. (in Chinese))
- [19] 高 健, 粟玉英, 孟照蔚, 等. 汉口 I 级阶地 3-5 互层特性及对地铁工程的影响[J]. *资源环境与工程*, 2013, **27**(4): 592-595. (GAO Jian, SU Yuying, MENG Zhaowei, et al. The interbedded characteristics of the terraces i in Hankou and its influence on subway project[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2013, **27**(4): 592-595. (in Chinese))
- [20] 朱宜生, 胡一钢, 程新生. 层状构造土的岩土工程特性及勘察要点[J]. *水运工程*, 2004(1): 24-27. (ZHU Yisheng, HU Yigang, CHENG Xinsheng. Geotechnical engineering characteristics and key points of investigation of stratified soil[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2004(1): 24-27. (in Chinese))
- [21] 陈国兴, 刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(1): 79-82. (CHEN Guoxing, LIU Xuezhu. Study on dynamic pore water pressure in silty clay interbedded with fine sand of Nanjing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 79-82. (in Chinese))
- [22] 陈国兴, 刘雪珠, 庄海洋. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的抗液化性能试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, **23**(2): 28-34. (CHEN Guoxing, LIU Xuezhu, ZHUANG Haiyang. Experimental study of liquefaction resistant characteristics of silty clay with fine sand interbed and fine sand in Nanjing[J]. *Journal of Seismology*, 2003, **23**(2): 28-34. (in Chinese))
- [23] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 南京新近沉积土动剪切模量比与阻尼比的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(8): 1023-1027. (CHEN Guoxing, LIU Xuezhu, ZHU Dinghua, et al. Experimental studies on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of recently deposited soils in Nanjing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(8): 1023-1027. (in Chinese))
- [24] 周 健, 陈小亮, 杨永香, 等. 饱和层状砂土液化特性的动三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(4): 967-972, 978. (ZHOU Jian, CHEN Xiaoliang, YANG Yongxiang, et al. Study of liquefaction characteristics of saturated stratified sands by dynamic triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(4): 967-972, 978. (in Chinese))
- [25] 杨永香, 胡金虎, 贾敏才, 等. 粉粒夹层对饱和砂土液化特性影响的试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, **8**(6): 1215-1220. (YANG Yongxiang, HU Jinhui, JIA Mincai, et al. Effects of silty interlayer on liquefaction characteristics of saturated stratified sands[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, **8**(6): 1215-1220. (in Chinese))
- [26] 申志福, 徐琪尔, 朱玲裕, 等. 重塑粉质黏土与粉砂互层土试样制备方法[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(增刊 2): 96-99. (SHEN Zhifu, XU Qi'er, ZHU Lingyu, et al. A method for preparing remolded samples of silty clay interbedded with silty sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(S2): 96-99. (in Chinese))
- [27] 吕奎琳, 黄茂松, 钱建固. 真三维状态下土体强度及变形分叉影响[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(1): 21-26. (LÜ Xilin, HUANG Maosong, QIAN Jiangu. Strength of soils considering the influence of deformation bifurcation under true triaxial condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(1): 21-26. (in Chinese))