

文章编号: 1007-2993(2026)03-0430-06

自重预压固结荷载条件下饱和软土 抗剪强度特性试验分析

李高山¹ 王寒冻² 胡智豪¹ 陆柯延¹ 郑捷¹

(1. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江宁波 315012;

2. 宁波市市域铁路投资发展有限公司, 浙江宁波 315012)

【摘要】 宁波沿海平原区浅部饱和软土厚度一般 30~40 m, 不同深度土体自重应力具有一定差异, 而室内直剪固结快剪试验采用统一标准的固结预压荷载, 势必会造成固结压力与自重应力不匹配的现象, 由此导致各试样因固结程度不同而对其抗剪强度产生影响。针对饱和软土实际应力条件, 开展了规范法、自重预压荷载作用下的室内对比试验。结果表明: 与规范法相比, 自重预压固结法得到的饱和软土黏聚力提高幅度为 48%, 内摩擦角降低 13%。当预压固结荷载小于其自重应力时, 试样未充分固结变形, 其颗粒间的胶结作用和摩擦、嵌入咬合作用减弱, 导致其黏聚力及内摩擦角均相应降低; 预压固结荷载大于土体自重应力时, 孔隙水的排出使试样产生较大的固结变形, 土颗粒重新排列, 胶结作用产生的固结黏聚力减小, 而咬合作用产生的内摩擦角则相应提高。最终呈现出自重预压荷载作用下饱和软土出现黏聚力增大, 内摩擦角降低的抗剪强度特性。

【关键词】 饱和软土; 固结快剪; 自重预压固结; 固结变形

【中图分类号】 TU411

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0587

Analysis of shear strength characteristics of saturated soft soil under self-weight preload consolidation load conditions

LI Gaoshan¹ WANG Handong² HU Zhihao¹ LU Keyan¹ ZHENG Jie¹

(1. Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo 315012, Zhejiang, China; 2. Ningbo Regional Railway Investment and Development Co., Ltd., Ningbo 315012, Zhejiang, China)

【Abstract】 In the Ningbo coastal plain area, the thickness of shallow saturated soft soil is generally 30~40 meters, the self-weight stress of soil at different depths has certain differences. Using a unified standard consolidation preload in the indoor consolidated quick shear test would inevitably lead to a mismatch between the consolidation and the self-weight pressure, thus affecting the shear strength of the samples due to different degrees of consolidation. Focusing on the actual stress conditions of saturated soft soil, indoor comparison tests under standard method and self-weight preload were carried out in this research. The results show that compared to the standard method, the cohesion of saturated soil increased by 48% and the internal friction angle decreased by 13% after consolidation with self-weight preload. When the pre-consolidation load is less than its self-weight stress, the sample is not fully consolidated. The cementation between particles and the friction, interlocking and biting action are weakened, leading to a decrease in cohesion and internal friction angle. When the preloading consolidation load is greater than the self-weight stress of the soil, the drainage of pore water causes the sample to undergo greater consolidation, and the soil particles are rearranged. The cohesive force generated by the cementation effect is reduced, and the internal friction angle generated by the interlocking effect increased correspondingly. The shear strength characteristics of saturated soft soil under self-weight preload show an increase in cohesion and a decrease in the internal friction angle.

【Key words】 saturated soft soil; consolidated quick direct shear test; self-weight preloading consolidation; consolidation deformation

0 引言

抗剪强度是土体的重要力学指标之一, 是岩土

工程设计的重要参数, 主要用于土坡稳定、地基承载力、土压力等相关计算, 直接关系到工程安全性和造

作者简介: 李高山, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土)。研究方向: 饱和软土抗剪强度特性。E-mail: lgs1384235@163.com

价^[1-3]。关于饱和软土固结快剪试验, 规范^[4-6]对固结预压荷载一般取 50, 100, 200, 300 kPa, 在对应的垂直荷载下, 采用 1.2 mm/min 的速率剪切, 获得抗剪强度指标。室内直剪固结快剪试验仪器简单、操作方便、经济快速, 被广泛应用于土体抗剪强度指标的测定。在直剪固结快剪试验中, 除了仪器本身局限之外(如: 排水条件控制不足、应力不明确、剪切面固定等), 剪切速率、预压荷载及剪切垂直荷载的选择都将对试验结果造成一定的影响。专家对此开展了大量研究, 如蔡渊蛟等^[7]从剪切速率、垂直荷载两个方面对土体抗剪强度指标的影响进行了分析, 对垂直荷载的选择提出了相关建议; 潘永坚等^[8]对软土在不同剪切速率下进行了固结快剪对比试验, 对不同剪切速率下抗剪强度指标的差异性进行分析, 提出适合软土的剪切速率; 孔令伟等^[9]以湛江强结构性黏土为对象, 采用室内三轴试验系统地研究了剪切速率对其力学性质的影响; 李佐良等^[10]对重塑软土开展了不同固结度下的三轴固结不排水(CU)剪切试验, 得出了固结度对重塑软土抗剪强度及其指标的影响规律; 陈秀云等^[11]从预压时间、剪切速率等方面对软土固结快剪强度指标的影响进行了分析, 从有效控制剪切过程试样排水方面, 对剪切速率的选择提出了相关建议; 杨俊等^[12]以风化砂改良膨胀土的抗剪强度指标为研究对象, 针对不同垂直荷重对其抗剪强度指标的影响开展了研究; 吕宾林等^[13]通过三轴试验和直剪试验, 研究了剪切速率对于饱和黏土三轴不排水抗剪强度与固结快剪强度的影响; 刘红军等^[14]通过直剪试验和单向压缩固结试验, 研究了固结压力为 100 kPa 时软土的抗剪强度及其与固结度之间的关系; 戚玉红等^[15]对海口市某软土进行三轴固结不排水剪试验, 得出了不同固结度下软土抗剪强度的变化规律; 黄朝焯^[16]基于抗剪强度莫尔包络线理论, 推求了超固结淤泥质地基土任意固结度下地基土总应力抗剪强度指标解析计算式, 并与实际检测结果进行了对比分析; 王振祥等^[17]对南京长江漫滩相原状软土进行一系列试验, 探讨了不同固结条件下漫滩相软土抗剪强度的变化规律, 给出内摩擦角和黏聚力随固结度的变化关系; 崔志鹏等^[18]通过固结和剪切试验, 分析了预固结时间及固结度对南京长江漫滩相软土抗剪强度的影响, 得出了抗剪强度与固结度的相关关系。

对于垂直荷载, 由于常用 0~400 kPa 垂直压力能够满足一般土体的应力状态, 并且可用直线型莫尔-库仑强度准则, 因此在室内直接固结快剪试验中, 对于预压荷载选取, 规范^[4-6]对于较硬的土采用

100, 200, 300, 400 kPa 的垂直压力, 对于较软的土采用 50, 100, 200, 300 kPa。但在实际岩土工程中, 由于沿海软土地区浅部软土埋深一般 30~40 m, 且地下水位埋深较浅, 其自重应力一般相对较小, 按照规范要求, 固结快剪试验中施加的固结压力值往往与其实际的自重应力不匹配, 当预压固结压力小于自重应力时, 试样未得到充分固结, 表现出欠固结土体的性状, 而当预压固结压力大于其自重应力时, 饱和试样在较大的附加应力作用下, 孔隙水排出, 试样固结产生充分固结变形, 又呈现出超固结土体的性状, 因此导致室内试验条件与土体实际的应力状态出现一定的差异, 固结试验成果不能真实反映土体的抗剪强度特性。目前关于自重预压荷载作用下饱和软土抗剪强度特性这方面的研究相对较少。本文基于饱和软土的实际受力状态, 开展了自重预压荷载和规范预压荷载作用下饱和软土抗剪强度特性室内试验, 对比分析了不同预压荷载条件下饱和软土固结快剪抗剪强度指标之间的差异性和规律性, 同时分析了指标差异性的原因, 提出了相关建议。研究成果对提高饱和软土地区岩土工程稳定性分析的安全度和可靠性等方面具有一定的实际意义和应用价值。

1 场地与试样

取样场地位于宁波沿海平原区, 地貌属于冲湖积平原, 地势开阔平坦, 浅部沉积类型为第四系海相软土层。场地表层为冲湖积粉质黏土(硬壳层), 下部地层系由全新世淤泥、淤泥质黏土及淤泥质粉质黏土组成的典型深厚层软土, 软土组合厚度一般 35~40 m, 地下水位埋深 0.5~1.0 m。试验取样场地浅部地基土分布及其物理力学性质指标见表 1。

布置 2 个对比取样钻探孔, 钻孔编号分别为 K1、K2, 钻孔间距 5 m。采用敞口薄壁取土器快速静力连续压入法, 对场地④₁层淤泥质粉质黏土进行现场钻探取样, 取样深度区间 15~25 m, 取样间距 1.0 m, 取样管尺寸 100 mm×300 mm(D×L), 两钻孔取样编号分别为 K1-1—K1-10、K2-1—K2-10, 土样质量均达到 I 级。

2 试验方案

根据土样采取深度及实际应力状态, 并结合相关规范^[4-6]规定, 对两组(每组 10 个土样, 深度 15.0~25.0 m)饱和软土土样开展室内对比试验, 第一组(K1)预压固结荷载取自重荷载 150 kPa, 第二组(K2)预压固结荷载取 50, 100, 200, 300 kPa。对比试样均采用一次加压, 施加固结压力后, 以每小时固结变形不大于 0.005 mm 作为固结变形稳定标准。充分预

表1 取样浅部土层分布及物理力学性质表

Tab. 1 Distribution of shallow soil layers and their physical and mechanical properties

编号	土层名称	分布深度/m	密度/(g·cm ⁻³)	含水量/%	孔隙比	液限/%	饱和度/%	塑性指数	液性指数	固结状态
① ₂	黏土	0~1.2	1.79	38.4	1.09	47.5	95.2	21.6	0.71	
② ₂	淤泥	1.2~10.0	1.68	58.1	1.59	44.5	100	21.2	1.64	
③ ₂	淤泥质黏土	10.0~15.0	1.74	44.9	1.23	39.4	100	21.2	1.64	正常固结
④ ₁	淤泥质粉质黏土	15.0~28.0	1.78	37.2	1.04	34.3	100	16.4	1.18	
④ ₂	淤泥质黏土	28.0~40.0	1.77	45	1.25	43.3	100	18.6	1.09	

压固结后,均在垂直荷载 50, 100, 200, 300 kPa 下进行剪切试验。试验采用电动应变控制式直剪仪,剪切速率 1.2 mm/min,即手轮每分钟匀速旋转 6 圈。取剪应力与剪切位移关系曲线上剪应力峰值为抗剪强度,当无峰值时,取剪切位移 4 mm 对应的剪切应力作为相应垂直压力下的剪切应力。具体试验方案见表 2。

表2 室内试验方案
Tab. 2 Indoor test plan

组号	样号	土样中心点深度/m	中点自重压力/kPa	预压固结荷载/kPa	剪切垂直荷载/kPa
	1	15.85			
	2	16.85			
	3	17.85			
	4	18.85			
K1, K2	5	19.85	约150	K1: 150	50, 100, 200, 300
	6	20.85		K2: 50, 100, 200, 300	
	7	21.85			
	8	22.85			
	9	23.85			
	10	24.85			

3 试验结果

3.1 剪应力与剪切位移关系分析

基于室内试验成果,以 5#试样为代表,在采用不同预压固结荷载充分固结处理后,其同一剪切垂直压力作用下各环刀试样剪应力与剪切位移关系曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出,当剪切垂直压力小于试样固结压力(自重应力)时,土体的抗剪强度峰值呈现出与固结预压荷载正向增长的趋势,即相同垂直压力作用下,采用自重预压固结荷载的试样表现出较大的抗剪强度特征;而当剪切垂直压力大于试样固结压力(自重应力)时,对比试验得到的抗剪强度曲线基本一致或重合,表现出相同的特征,即试样抗剪强度不再随着固结预压荷载的增大而增长。由此表明,对于饱和软土室内固结快剪试验,预压固结荷载的选择对

土体抗剪强度特性存在一定的影响。

3.2 抗剪强度与垂直压力关系分析

基于室内对比试验成果,图 2 给出了采用 150 kPa(自重压力)和 50, 100, 200, 300 kPa 预压荷载固结处理后的 4 组饱和软土抗剪强度-垂直压力关系曲线。图 2 显示,在相同的垂直剪切压力作用下,采用自重预压固结处理后土体的总抗剪强度总体上稍大于规范法数值,从曲线的对比关系上可以看出,两者斜率相差较小,但自重预压作用下曲线斜率总体上稍小于规范法,在抗剪强度轴线上的截距差异相对较大,自重预压作用下截距总体上大于规范法,即内摩擦角差异性较小,黏聚力差异性相对较大。总体表现为自重压力预压固结处理后直剪试验得到的饱和软土内摩擦角稍小于规范法数值,而黏聚力大于规范法得到的数值。

3.3 饱和软土抗剪强度指标取值分析

按库仑抗剪强度理论,对不同的预压荷载处理后的两组土样的垂直荷载-抗剪强度曲线采用最小二乘法拟合后,得到饱和软土抗剪强度指标 c 、 φ 值,见表 3 和图 3。

不同预压固结荷载作用下试验结果表明:采用自重压力固结预压得到的黏聚力均值 21.1 kPa,与规范法均值 14.2 kPa 之比为 1.48,提高幅度约为 48%;内摩擦角均值 7.3°,与规范法均值 8.4°之比为 0.87,降低约 13%。即与规范法比较,采用自重预压固结时,饱和软土的黏聚力有较大幅度的增加,内摩擦角有所降低,但降低幅度相对较小。

4 结果分析

土体作为弹塑性材料,在现场取样过程中,由于应力状态的改变,围压的释放,土体发生一定的回弹变形,土体结构发生相应改变。在室内固结快剪试验中,如采用规范方法进行固结预压处理,当预压固结荷载小于其自重应力时,试样因未充分固结,呈现出欠固结土的特征,由于应力释放,其颗粒间的胶结作用和摩擦、嵌入咬合作用减弱,导致其黏聚力及内摩

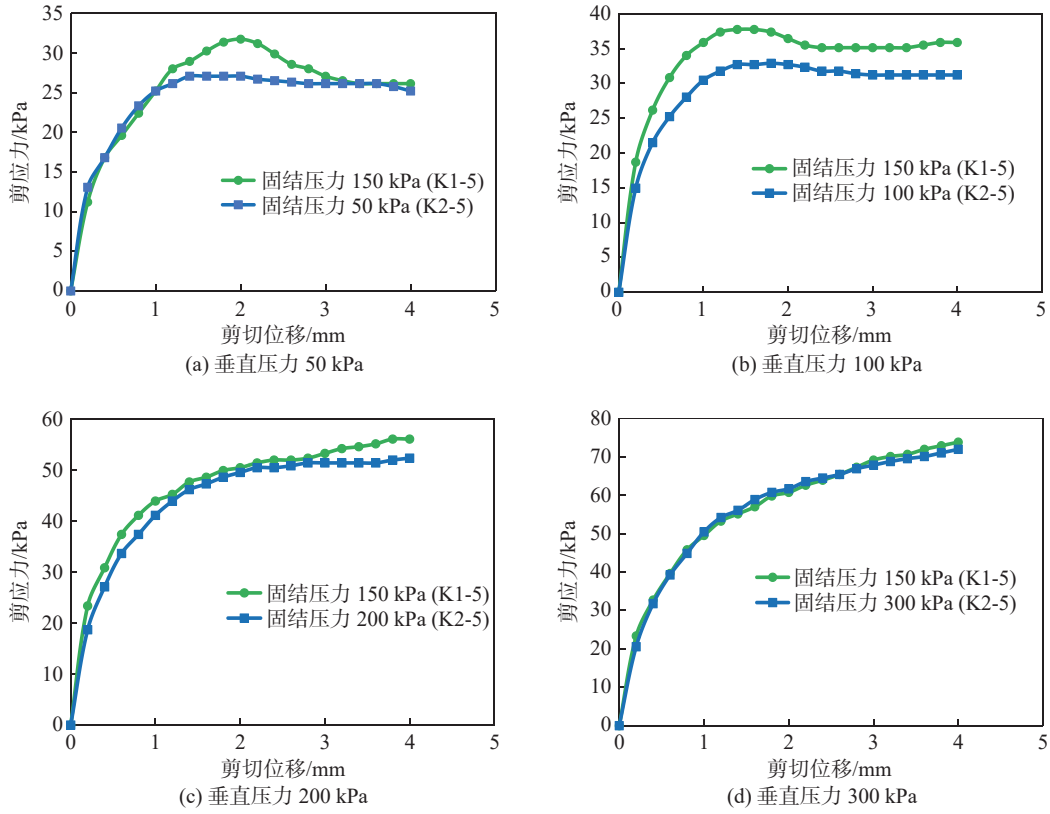


图 1 不同固结压力固结后土样在各级垂直压力作用下的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 1 Shear stress-displacement curves under different vertical pressures for soil samples consolidated at different pressures

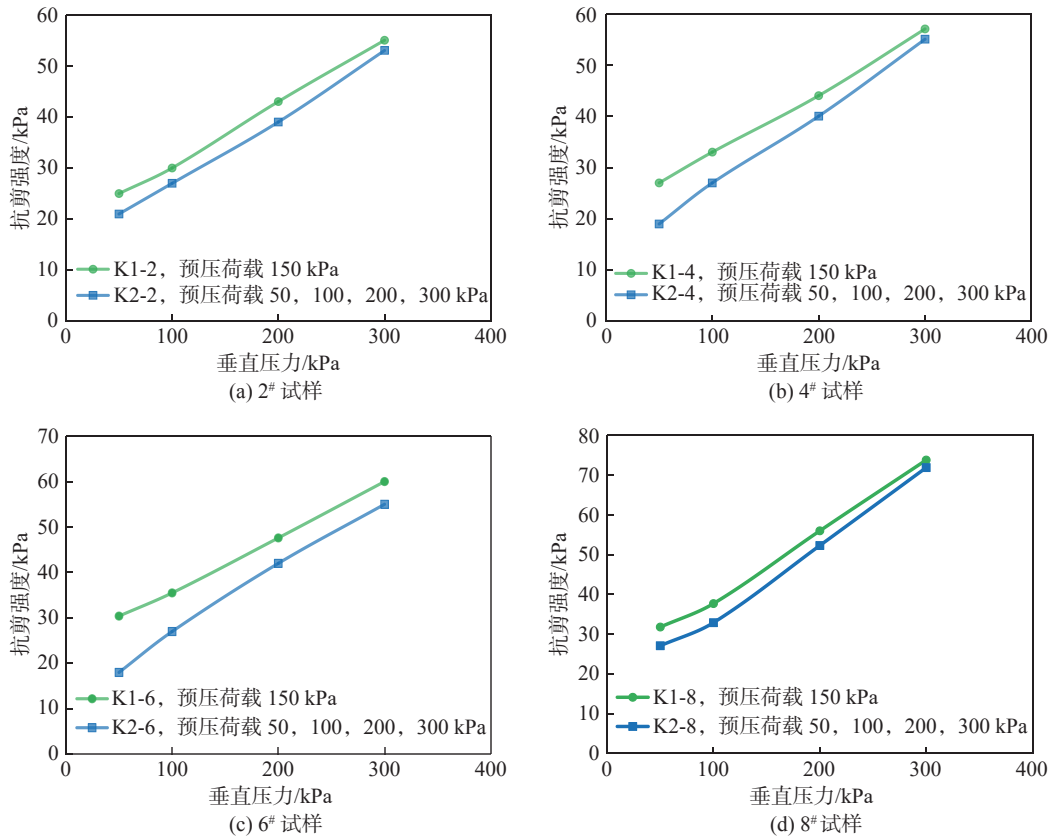


图 2 试样抗剪强度与剪切垂直压力关系曲线

Fig. 2 Curve of the relationship between sample shear strength and vertical pressure

表3 土样抗剪强度指标取值
Tab. 3 Values of shear strength parameters for soil samples

样号	抗剪强度指标		样号	抗剪强度指标	
	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$		黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
K1-1	18.0	6.5	K2-1	13.6	7.5
K1-2	18.5	6.9	K2-2	14.3	7.6
K1-3	19.3	7.0	K2-3	14.0	7.5
K1-4	20.9	6.8	K2-4	12.1	8.1
K1-5	21.2	6.9	K2-5	13.5	8.2
K1-6	22.5	6.8	K2-6	12.5	8.4
K1-7	23.4	7.5	K2-7	14.7	8.8
K1-8	22.0	8.2	K2-8	16.3	9.3
K1-9	22.5	8.0	K2-9	15.2	9.0
K1-10	23.2	8.2	K2-10	16.0	9.5
均值	21.1	7.3	均值	14.2	8.4

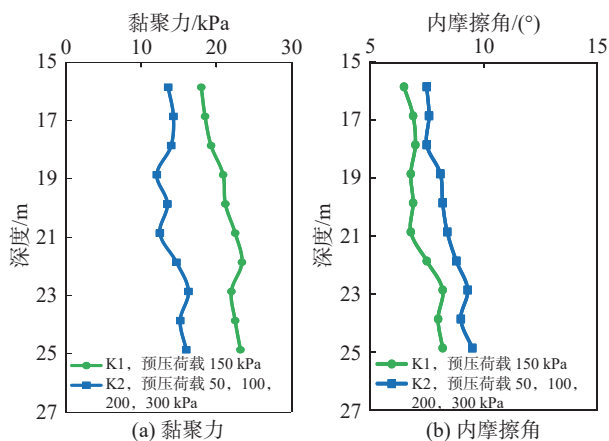


图3 饱和软土抗剪强度指标对比曲线

Fig. 3 Comparison curves of shear strength parameters for saturated soft soils

擦角均相应降低;而当预压固结载荷超过土体自重应力时,孔隙水的排出导致饱和试样产生较大的固结变形,表现出超固结土的特性,土颗粒重新排列,由胶结作用产生的固化黏聚力减小,但由土颗粒的咬合作用产生的内摩擦角则得到相应提高。总体上,黏聚力产生一定的损失,而内摩擦角表现出适当的增大特性。

而采用自重压力固结预压处理的试样,由于其最接近于土体初始应力状态,与原状土体表现出一致的抗剪强度特性,因此,相比规范法,自重预压荷载作用下饱和软土表现出黏聚力大幅度增大、内摩擦角小幅度降低的抗剪强度特性。

5 结论

(1)采用规范法进行土体固结快剪直剪试验,当预压固结荷载小于试样原位自重应力时,试样未充分

固结,其颗粒间的胶结作用和摩擦、嵌入咬合作用减弱,导致其黏聚力及内摩擦角均相应降低;而当预压固结载荷超过试样原位自重应力时,孔隙水的排出导致饱和试样产生较大的固结变形,由胶结作用产生的固化黏聚力减小,但由土颗粒的咬合作用产生的内摩擦角则得到相应提高。

(2)与规范法相比,采用自重预压荷载固结后饱和软土的直剪固结快剪黏聚力有较大幅度的增加,内摩擦角有所降低,但降低幅度相对较小。

(3)饱和软土室内固结快剪抗剪强度指标试验应结合土体的实际受力状态,设置与之相对应的固结预压荷载,获取相对接近工程实际工况的土体抗剪强度指标,以保证指标的安全度和可靠性。

参考文献

- [1] 龚晓南. 软黏土地基土体抗剪强度若干问题[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1596-1600. (GONG X N. Some problems concerning shear strength of soil in soft clay ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1596-1600. (in Chinese))
- [2] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013. (LI G X, ZHANG B Y, YU Y Z. Soil mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Qinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [3] 潘永坚, 姚燕明, 李高山, 等. 滨海软土城市工程勘察关键技术[M]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2021. (PAN Y J, YAO Y M, LI G S, et al. Key technologies for engineering investigation in coastal soft soil city[M]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University Press, 2021. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [5] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTG E40—2007[S]. Beijing: People's Communications Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [6] 宁波市住房和城乡建设委员会. 宁波市土工试验技术细则: 2018甬DX-02[S]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2018. (Ningbo Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development. Technical rules for

- geotechnical test in Ningbo: 2018 Yong DX-02[S]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University Press, 2018. (in Chinese))
- [7] 蔡渊蛟, 裴生虎, 丁荣富. 直接快剪试验条件对抗剪强度的影响 [J]. 西部探矿工程, 2003, 15(12): 40-42. (CAI Y J, PEI S H, DING R F. Influence of direct fast shear test conditions on shear strength[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15(12): 40-42. (in Chinese))
- [8] 潘永坚, 楼希华. 不同剪切速率下软土的直剪固结快剪抗剪强度 [J]. 工程勘察, 2005(2): 37-39. (PAN Y J, LOU X H. Strength for the consolidation quick direct test of soft clay at different shear rate[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005(2): 37-39. (in Chinese))
- [9] 孔令伟, 张先伟, 郭爱国, 等. 湛江强结构性黏土的三轴排水蠕变特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 365-372. (KONG L W, ZHANG X W, GUO A G, et al. Creep behavior of Zhanjiang strong structured clay by drained triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 365-372. (in Chinese))
- [10] 李佐良, 杨爱武, 许再良, 等. 不同固结度对软土强度及变形的影响 [J]. 中国港湾建设, 2012(2): 47-50. (LI Z L, YANG A W, XU Z L, et al. Impact of different consolidation degrees on strength and deformation of soft soil[J]. China Harbour Engineering, 2012(2): 47-50. (in Chinese))
- [11] 陈秀云, 陈春芳, 楼希华, 等. 土工试验中的几个问题探讨 [J]. 科技通报, 2012, 28(9): 50-53. (CHEN X Y, CHEN C F, LOU X H, et al. Discussion of several issues in geotechnical test[J]. Bulletin of Science and Technology, 2012, 28(9): 50-53(in Chinese))
- [12] 杨俊, 童磊, 张国栋, 等. 不同垂直荷重对风化砂改良膨胀土抗剪强度影响研究 [J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 591-597. (YANG J, TONG L, ZHANG G D, et al. Effects of different vertical loads on shear strength of weathered sand modified expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 591-597. (in Chinese))
- [13] 吕宾林, 王金文, 蔡德钧. 剪切速率对黏土不排水强度影响的试验研究 [J]. 铁道建筑, 2013(1): 73-75. (LÜ B L, WANG J W, CAI D G. Experimental study of influence of shear rate on clay undrained strength[J]. Railway Engineering, 2013(1): 73-75. (in Chinese))
- [14] 刘红军, 靳晨杰. 软土的固结状态对抗剪强度影响的研究 [J]. 公路, 2015, 60(10): 51-55. (LIU H J, JIN C J. Research on the impact of the soft soil consolidation state on shear strength[J]. Highway, 2015, 60(10): 51-55. (in Chinese))
- [15] 戚玉红, 田伟, 杨鸿钧, 等. 海口市东海岸软土抗剪强度随固结度变化规律研究 [J]. 港工技术, 2016, 53(3): 98-100. (QI Y H, TIAN W, YANG H J, et al. Soft soil shear strength at east coast of Haikou city changes with degree of consolidation[J]. Port Engineering Technology, 2016, 53(3): 98-100. (in Chinese))
- [16] 黄朝焯. 软土地基预压加固处理后抗剪强度指标分析 [J]. 中国水利水电, 2019(1): 127-131,136. (HUANG C X. An analysis of shear strength index after soft soil foundation preloading treatment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(1): 127-131,136. (in Chinese))
- [17] 王振祥, 王军, 钟萍, 等. 固结度对长江漫滩相软土抗剪强度的影响 [J]. 地质学刊, 2021, 45(4): 438-443. (WANG Z X, WANG J, ZHONG P, et al. Effect of consolidation degree on shear strength of soft soil of Yangtze River floodplain facies[J]. Journal of Geology, 2021, 45(4): 438-443. (in Chinese))
- [18] 崔志鹏, 严刚, 王军, 等. 预固结对长江漫滩相软土抗剪强度的影响研究 [J]. 岩土工程技术, 2024, 38(1): 116-120. (CUI Z P, YAN G, WANG J, et al. Influence of preconsolidation on the shear strength of the soft soil in floodplain facies of Yangtze River[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(1): 116-120. (in Chinese))

收稿日期: 2024-12-16