

DOI: 10.11779/CJGE2023S10030

桥基岸坡土体剪切强度特性试验研究

王中豪¹, 周慧林²

(1. 长江科学院重庆分院, 重庆 400026; 2. 长江岩土工程总公司(武汉), 湖北 武汉 430010)

摘 要: 为研究对某桥基岸坡稳定性起重要影响的粉质黏土的剪切强度特性和力学参数, 对原状土进行了不同含水状态下的大型原位直剪试验。试验结果表明: 原状土的变形破坏模式呈蠕塑性破坏。饱和和天然状态下原状土的抗剪断峰值强度参数分别为 $\varphi = 17.1^\circ$, $c = 22.1$ kPa 和 $\varphi = 20.6^\circ$, $c = 29.3$ kPa; 饱和状态下土的剪切强度参数比天然状态下降低 20% 左右; 试验结果为该桥基岸坡稳定性分析计算提供取值依据。

关键词: 桥基岸坡; 原状土; 原位直剪试验; 强度参数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0193-04

作者简介: 王中豪(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程试验及稳定性分析工作。E-mail: 779475836@qq.com。

Shear strength characteristics of soils on bank slope of bridge foundation

WANG Zhonghao¹, ZHOU Huilin²

(1. Chongqing Branch of Yangtze River Scientific Research Institute, Chongqing 400026, China; 2. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: Aiming at the problem of foundation stability evaluation of a bridge in disease remediation, in order to study the shear strength characteristics and mechanical parameters of the undisturbed soil of silty clay which plays an important role in the stability of the bridge foundation, the large-scale in-situ direct shear tests on the undisturbed soil under different water contents are carried out. The results show that the deformation failure mode of the undisturbed soil is creep plastic failure. Its shear peak strength parameters in the saturated state are as follows: $\varphi = 17.1^\circ$, $c = 22.1$ kPa, and those in the natural state are that $\varphi = 20.6^\circ$, $c = 29.3$ kPa. The strength parameters of the saturated soil are reduced by about 20% compared with those in the natural state. The test results may provide a basis for the stability analysis and calculation of the bank slope of the bridge foundation.

Key words: bridge foundation slope; undisturbed soil; in-situ direct shear test; strength parameter

0 引 言

跨河大桥常将桥梁基础布置在河道两岸的岸坡上, 岸坡稳定与否是桥梁工程整体稳定性评价的重要组成部分, 王华^[1]采用物理模型试验对某大桥桥基岸坡进行模拟, 研究了在天然状态和加载条件下岸坡岩体的变形破坏过程和模式。费力等^[2]应用工程地质评价和 FLAC^{3D} 数值分析方法对某铁路桥基岸坡进行了稳定性分析, 确定了岸坡的破坏模式、潜在失稳区域、主滑方向、应力应变特征、应力影响系数和安全系数。丁秀丽等^[3]在奉节南桥头滑坡采用有限差分对三峡库水位涨落条件下的稳定性进行了分析, 结果发现三峡水库蓄水后, 滑坡安全系数小于 1。

岸坡稳定性计算分析时, 岩土力学参数取值对稳定分析结果的影响很大。目前主要依据室内及现场试验、工程类比、经验强度准则、参数反演等方法来确定岩土力学参数。曹培等^[4]采用室内三轴压缩试验方

法获得了某高速公路红砂岩风化料湿化后的抗剪强度指标。童军等^[5]基于 GDS 非饱和土直剪系统对原状膨胀土进行了室内直剪试验, 研究了不同吸力条件对剪切强度指标的影响。郭喜峰等^[6]通过现场直剪试验研究了三峡库区碎石土变形破坏特征和物理状态指标对力学强度的影响。汤劲松等^[7]通过原位直剪试验分析了组成材料的性质、颗粒大小、粒径组成、粗糙程度、充填物胶结程度和密实程度对卵砾石土抗剪强度指标的影响。李红英等^[8]在获得临近地区工程岩土参数的基础上, 采用工程类比分析方法确定了滑坡体可靠性计算参数的分布类型及参量, 并基于 Bayes 统计理论对“上田”滑坡体岩土参数进行优化确定。卢阳等^[9]运用 Hoek-Brown 经验强度准则, 提出一种利用钻孔测试成果获取岩体抗剪强度参数的新方法和新途径。

收稿日期: 2023-07-05

阮永芬等^[10]基于粒子群算法优化小波支持向量机反演出了岩土力学参数。

由于大型原位剪切试验试样尺寸大,能将土体中的大粒径组分模拟进去,同时对土体扰动小,使材料处于接近真实的环境状态,因此试验结果能较好地体现岩土材料的变形强度特性。本文通过原位直剪试验,对某长江大桥桥基岸坡的原状土进行了剪切力学特性研究,为岸坡的稳定性评价提供取值依据。

1 工程概况

某市政长江大桥在运行期发现辅桥下部结构桥墩出现倾斜、上部结构局部破损及渗水等病害,主要原因为桥梁基础岸坡在三峡库水位升降作用下出现较大位移的缓慢滑动。为对大桥进行有针对性的病害综合整治,需对桥基岸坡稳定性重新进行评价。该大桥桥基位于斜坡地带,属构造一剥蚀丘陵斜坡地貌。主要地层是褐灰色—褐黄色的粉质黏土,夹含少量长石砂岩块石。块石呈次棱角状及棱角状,块径约 3~10 cm,含量约占 10%~20%。粉质黏土呈可塑—硬塑状,干强度中等,断面稍有光泽,厚度约 10~23 m,最厚达 28 m。

2 土体原位直剪试验方法

2.1 试验原理

土的强度是土体抵抗外荷载的能力,由于土是散体材料,土体的破坏模式为土颗粒之间的相对滑移,该特点决定了剪切破坏为土体破坏的主要表现形式。其中原位直剪试验是较常用的测定土的抗剪强度方法,该方法以库仑破坏准则为依据:

$$\tau = \sigma \tan(\varphi) + c = \sigma f + c \quad (1)$$

在土体原位制备试验预剪面,分级施加竖向应力 σ 和水平应力 τ ,如图 1 所示,测定土体抗剪强度,再按库仑公式拟合抗剪强度指标 (φ 和 c)。

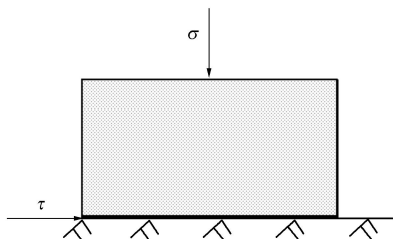


图 1 直剪试验原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of direct shear tests

2.2 试样制备

在原位用挖土机开挖 5 m 深的试验基坑,开挖至距试验位置 50 cm 时,改用人工精细制样,减小对原

状土扰动。用 50 cm×50 cm×35 cm 的剪切钢模套在试样上,将含速凝剂的水泥砂浆注入钢模与试样缝隙中。天然状态试样在水泥砂浆养护 24 h 后,即可进行试验。饱和状态试样,采取现场泡水 48 h 进行饱和和处理后进行试验。

2.3 试验过程

法向荷载反力措施:常规的试验堆载法反力措施工作量大,难以满足应急抢险工期紧迫的要求;土质锚杆反力措施锚固力小,达不到试验最大反力要求。根据现场条件情况,采用挖土机自重作为反力,将法向荷载的千斤顶及配套装置作用在挖土机的底盘上,如图 2 所示。

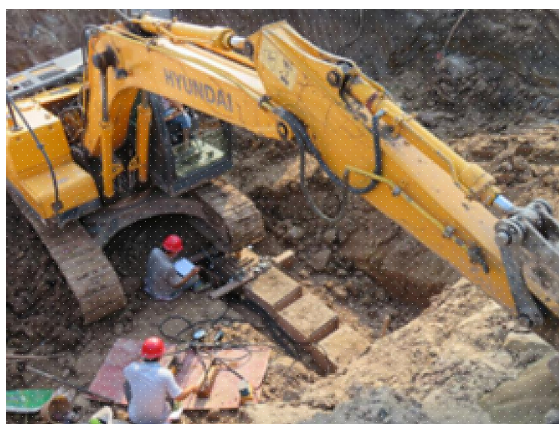


图 2 试验场景照片

Fig. 2 Photo of test scene

加载及测试:①试验采用平推法,剪应力方向平行于岸坡滑动方向;②法向应力范围为 12.1~103.1 kPa,各试点的法向荷载分 2~4 级施加,每级荷载施加后,立即测读位移,当施加到目标法向应力时,每隔 10 min 测读一次位移,当垂直位移达到相对稳定 (0.01 mm/h) 后,即可开始施加剪切荷载;③在整个施加剪切荷载过程中保持法向荷载不变,剪切荷载按照预估剪切强度分 10 级逐级施加,直至极限剪切破坏,每一级剪切荷载加载到目标值后立即测读位移,并立即施加下一级荷载,控制试验在 20 min 内剪完;④试验结束后对剪切面进行描述,确定剪切面破坏形态和有效剪切面积。

3 试验结果及分析

对岸坡土体分别进行了 4 点/组饱和状态下和天然状态下的原位直剪试验,剪应力与切向位移关系曲线分别见图 3、4。根据剪应力-位移关系曲线,确定抗剪断试验的峰值强度、屈服强度及残余强度,获得剪切强度指标,见图 5。

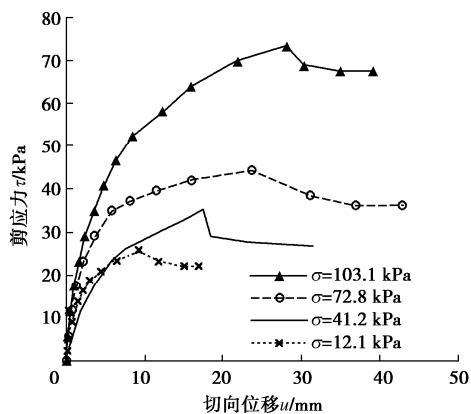


图 3 饱和状态直剪试验 τ - u 关系曲线

Fig. 3 τ - u relationship curves of direct shear tests in saturated state

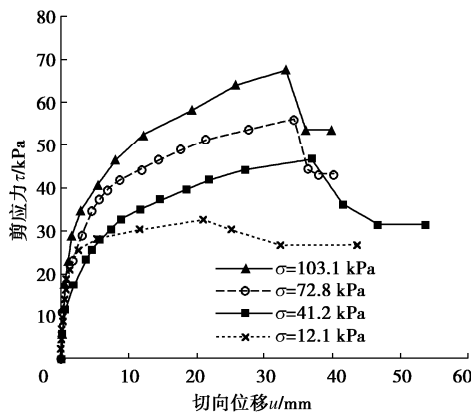


图 4 天然状态直剪试验 τ - u 关系曲线

Fig. 4 τ - u relationship curves of direct shear tests in natural state

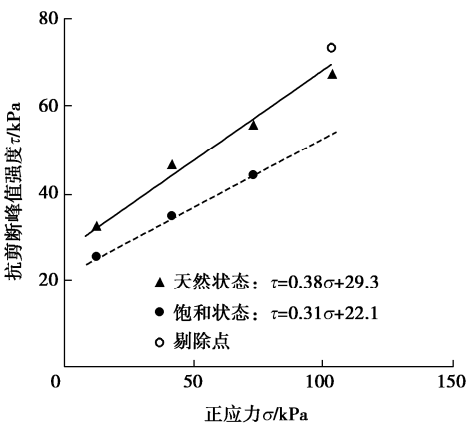


图 5 直剪试验 τ - σ 关系曲线

Fig. 5 τ - σ relationship curves of direct shear tests

3.1 变形破坏特征

由图 3, 4 可见, 在抗剪断试验时, 原状土在压剪作用下, 历经 3 个变形破坏阶段: ①试样受力较小时, 变形较小, 表现为近似的线弹性变形阶段, 在剪切荷载作用下土体产生内部孔隙的压缩。②随着剪切荷载加大, 变形产生屈服点, 进入塑性变形阶段, 土颗粒发生滑移运动, 试样变形先增速后趋于平缓, 但依然

具有一定的承载力, 主要依靠土体颗粒之间的结构效应提供承载力。从试件外观看整个土体试样的剪切破坏面已基本发展成形, 经过一定的变形积累后, 破裂面全部贯通, 应力达到峰值强度。③峰值后, 土体损伤至整体结构完全破坏, 变形迅猛增长, 剪切荷载推动着整个土体上盘试件沿剪切面滑移, 同时应力表现出软化过程, 降低至与土体上下剪切面之间的摩擦力平衡为止, 此时应力为残余强度。

3.2 强度参数取值

如图 5 所示, 饱和状态组试样基本沿预剪面剪断破坏, 其中 3 个试样剪切面都分布个别较小的块石, 剪断面起伏差最大仅为 3 cm, 而另一个试样剪切面含有一块 20 cm 大的块石, 贯通在预剪面上下盘中, 剪断面起伏差达到 13 cm, 导致试验结果严重偏高, 对该点进行剔除后, 剩余的 3 个试样用最小二乘法拟合出 τ - σ 关系曲线具有较高的相关性, 得到峰值强度参数为 $\varphi=17.1^\circ$, $c=22.1$ kPa。而天然状态组试样基本沿预剪面剪断破坏, 4 个试样剪切面都分布个别块石, 造成剪断面起伏差较大, 最大达到 5 cm 左右, 但 4 个样本剪切面含石率的影响呈现出随机分布的特性, 用最小二乘法拟合出 τ - σ 关系曲线具有较高的相关性, 得到峰值强度参数为 $\varphi=20.6^\circ$, $c=29.3$ kPa。

3.3 含水状态对强度参数的影响

直剪试验完成后, 对每个试样, 在剪切面取 3 个土样进行含水率试验, 然后对每 1 组试样剪切面处土样的含水率进行平均统计, 试验结果如表 1 所示。该原状土的天然含水率较高, 达到 21.2%; 泡水 48 h 后, 试样的含水率为 24.3%。饱和状态下比天然状态下的抗剪断峰值强度参数 f 值降低了 0.07, 降低幅度为 18.4%; c 值降低了 7.2 kPa, 降低幅度为 24.6%。强度参数 f 和 c 值降低的幅度在 18.4%~24.6%, 均值为 21.5%。可见水的作用下, 土质发生了软化, 导致抗剪强度参数出现劣化。

表 1 含水率与剪切强度参数结果对比					
Table 1 Comparison of water content and shear strength parameters					
parameters					
试组 编号	试验 条件	含水率/ %	剪切强度参数		
			f	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa
τ_1 组	原位, 饱和	24.2	0.31	17.1	22.1
τ_2 组	原位, 天然	21.2	0.38	20.6	29.3

4 结 论

本文通过对某长江大桥桥基处夹少量块石粉质黏土的原位剪切试验及力学特性分析, 得到了以下 2 点结论。

(1) 饱和状态下原状土的抗剪断峰值强度参数为

$\varphi=17.1^\circ$, $c=22.1$ kPa; 天然状态下原状土的抗剪断峰值强度参数为 $\varphi=20.6^\circ$, $c=29.3$ kPa。

(2) 土体饱和使土质变软, 抗剪强度参数降低, 建议本工程应用时可将天然状态下土体的强度参数折减 20%后作为饱和状态下土体的强度参数。

参考文献:

- [1] 王 华. 桥基岸坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2034-2038. (WANG Hua. Study of deformation and failure mechanism of bridge foundation slope with physical simulation method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2034-2038. (in Chinese))
- [2] 费 力, 关海昌, 王 森, 等. 铁路桥基岸坡稳定性分析: 以云贵高原黔渝铁路某双线大桥为例[J]. 高原科学研究, 2019, **3**(3): 44-51, 60. (FEI Li, GUAN Haichang, WANG Sen, et al. Analysis on bank slope stability of railway bridge foundation—a double-line bridge of Guizhou-Chongqing railway in Yungui Plateau as a case study[J]. Plateau Science Research, 2019, **3**(3): 44-51, 60. (in Chinese))
- [3] 丁秀丽, 付 敬, 张奇华. 三峡水库水位涨落条件下奉节南桥头滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(17): 2913-2919. (DING Xiuli, FU Jing, ZHANG Qihua. Stability analysis of landslide in the south end of Fengjie highway bridge with fluctuation of water level of Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(17): 2913-2919. (in Chinese))
- [4] 曹 培, 杜雨坤. 红砂岩风化土湿化特性的三轴试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(4): 819-824. (CAO Pei, DU Yukun. Experimental study on wetting deformation and strength behavior of a red sandstone weathered soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(4): 819-824. (in Chinese))
- [5] 童 军, 胡 波, 龚壁卫. 原状膨胀土直剪特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, **12**(3): 613-617. (TONG Jun, HU Bo, GONG Biwei. Shear strength behavior of the undisturbed expansive soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, **12**(3): 613-617. (in Chinese))
- [6] 郭喜峰, 晏鄂川, 刘 洋. 三峡库区碎石土滑坡体抗剪强度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, **34**(1): 68-71. (GUO Xifeng, YAN Echuan, LIU Yang. Shear strength of gravel soil landslide in the Three Gorges Reservoir zone[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, **34**(1): 68-71. (in Chinese))
- [7] 汤劲松, 刘松玉, 童立元, 等. 卵砾石土抗剪强度指标原位直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(S1): 167-171. (TANG Jinsong, LIU Songyu, TONG Liyuan, et al. *In-situ* direct shear tests on shear strength indices of pebble and gravelly soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 167-171. (in Chinese))
- [8] 李红英, 谭跃虎, 赵 辉. 某滑坡体岩土参数概率分布统计分析方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(3): 659-665. (LI Hongying, TAN Yuehu, ZHAO Hui. The statistical analysis technique research on probability distribution of geotechnical parameters of one landslide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(3): 659-665. (in Chinese))
- [9] 卢 阳, 谭 新, 郭喜峰, 等. 基于钻孔测试的岩体抗剪强度参数取值方法及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 2): 4116-4124. (LU Yang, TAN Xin, GUO Xifeng, et al. Estimation of rock mass shear strength parameters based on Bole test and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S2): 4116-4124. (in Chinese))
- [10] 阮永芬, 高春钦, 刘克文, 等. 基于粒子群算法优化小波支持向量机的岩土力学参数反演[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3662-3669. (RUAN Yongfen, GAO Chunqin, LIU Kewen, et al. Inversion of rock and soil mechanics parameters based on particle swarm optimization wavelet support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3662-3669. (in Chinese))

(编校: 孙振远)