

原位剪切试验在工程滑坡勘察中的应用

张祥恒^{1,2}, 王振³, 曹凡^{*2,4}, 王延宁^{2,4}, 陈柏林⁵

(1. 烟台鲁东勘察测绘有限公司, 山东烟台 264004; 2. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004;
3. 中兵勘察设计院有限公司, 北京 100053; 4. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004;
5. 自然资源部地质灾害自动化监测技术创新中心(重庆地质矿产研究院), 重庆 401120)

摘要: 岩土体的抗剪强度指标, 尤其是作为薄弱层的岩体结构面的抗剪强度, 在滑坡稳定分析中起着至关重要的作用。现场原位剪切试验, 试样受扰动小, 试验状态与岩土体所处真实状态较为吻合, 得到的参数也更加真实, 是滑坡勘察原位测试的重要手段之一。适用于测定边坡的岩土结构面、岩土接触面、滑动面以及含碎石黏土的混合土层和其他粗颗粒土层的抗剪强度。重庆华宇·观澜华府项目工程滑坡勘察, 在现场做原位剪切试验的同时, 采集原状样品进行室内直剪试验, 获取2种不同试验下的抗剪强度参数, 分别取用2种参数对不同工况下的滑坡体进行稳定性分析计算, 并与滑坡体的实际变形特征进行比较, 从而验证了原位剪切试验确定岩土体抗剪强度参数的合理性, 可为类似工程提供参考和借鉴。

关键词: 滑坡勘察; 抗剪强度; 原位剪切试验; 变形特征; 稳定性分析

中图分类号: P642.2; TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)01-0139-08

Application of in-situ shear test in engineering landslide investigation

ZHANG Xiangheng^{1,2}, WANG Zhen³, CAO Fan^{*2,4}, WANG Yanning^{2,4}, CHEN Bolin⁵

(1. *Yantai Ludong Survey and Mapping Co., Ltd., Shandong Province, Yantai Shandong 264004, China;*
2. *Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China;*
3. *China Ordnance Industry Survey & Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China;*
4. *Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China*
5. *Technology Innovation Center of Geohazards Automatic Ministry of Natural Resources (Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources), Chongqing 401120, China)*

Abstract: The shear strength of the rock-soil body, especially the shear strength of the rock body structural plane of the weak layer, plays a vital role in the stable analysis of landslides. The sample was lightly disturbed and the test status was more consistent with the real state of the rock-soil body in the in-situ shear test, moreover, the parameters obtained were more real, which is one of the important methods of in-situ test for landslides investigation. It is suitable for determining the shear strength of the rock and soil structure surface, geotechnical contact surface, sliding surface, mixed soil layer and other coarse granular soil layers. This study takes Chongqing Huayu · Guanlanhuafu project as an example, the original sample was collected for laboratory direct shear test while the in-situ shear tests were made, by which two shear strength parameters under different experiments were obtained. The stability of the landslides under

收稿日期: 2023-05-25; 修回日期: 2023-09-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.01.019

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目“龙河流域的生态环境质量时空演变特征及变化机理研究”(编号: CSTB 2022NSCQ-MSX1466)

第一作者: 张祥恒, 男, 汉族, 1990年生, 注册岩土工程师, 地质学专业, 主要从事地质灾害治理及岩土工程研究工作, 山东省烟台市芝罘区机场路271号, 1246232527@qq.com。

通信作者: 曹凡, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 土木工程专业, 主要从事地质灾害治理及岩土工程研究工作, 山东省烟台市芝罘区机场路271号, 122295247@qq.com。

引用格式: 张祥恒, 王振, 曹凡, 等. 原位剪切试验在工程滑坡勘察中的应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 139-146.

ZHANG Xiangheng, WANG Zhen, CAO Fan, et al. Application of in-situ shear test in engineering landslide investigation[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 139-146.

different operating conditions were analyzed and calculated using the above two parameters, and compared with the actual deformation characteristics of the landslide body, thereby the rationality of the rock-soil body shear strength parameter was verified, which can provide reference for similar projects.

Key words: landslide investigation; shear strength; in-situ shear test; deformation feature; stability analysis

0 引言

岩土体在剪切作用下所能发挥的抗剪强度,尤其是作为薄弱层的岩体结构面的抗剪强度,在滑坡稳定分析中起着至关重要的作用,是滑坡稳定性定量评价和支挡工程设计时计算下滑力所必需的参数^[1]。获取岩土体抗剪强度指标目前常用有3种方法:(1)自滑坡体或滑坡带采集原状土样,进行室内直剪试验^[2-3]或三轴试验^[4]; (2)对滑坡体或滑坡带进行现场原位剪切试验^[5-8]; (3)基于极限平衡原理的滑面指标反算法^[9-10]。室内直剪试验或三轴试验,所采集原状土样已脱离原应力环境^[11-12],试样在室内制取和试验过程中不可避免的会造成扰动,所获取的试验指标和原位应力条件下的抗剪强度往往存在一定差异,在滑坡稳定性分析过程中,会有较大偏差^[13-14]。滑面指标反算法从物理意义而言较为明确,且可操作性较强,所反映出的滑坡稳定状态一般较真实,但是具有严格的限制条件^[15-16],应用范围受限制。对于现场原位剪切试验,试样受扰动更小,试验状态与滑坡体内岩土体所处状态较为吻合,得到的参数也更加真实^[13],对于测定边坡内部发育的结构面、岩土层接触面、边坡滑动面,适用性较强,同时也是测定颗粒成分较复杂的混合土层的抗剪强度的重要手段之一^[17-19]。

重庆华宇·观澜华府项目工程滑坡勘察,在现场做原位剪切试验的同时,采集原状样品进行室内直剪试验,获取两种不同试验下的抗剪强度参数,分别取用两种参数对不同工况下的滑坡体进行稳定性分析计算,并与滑坡体的实际变形特征进行比较,验证了原位剪切试验确定土体抗剪强度参数的合理性。

1 工程概况

重庆市大渡口区大渡口组团D分区D10-3-1地块华宇·观澜华府项目,该项目位于重庆市大渡口区八桥镇,包含16栋楼,10栋多层住宅、4栋高层以及2栋配套用房,项目总建筑面积21.57万 m^2 ,其中地上建筑面积16.16万 m^2 ,地下建筑面积5.41万 m^2 ,场区地貌类型为山地,地势起伏较大,整体呈北高南

低,场区 ± 0 标高为287.2 m,北侧山体标高约290.0~310.0 m,高差约20.0~25.0 m,在场地平整开挖过程中,场地东侧2号楼北侧出现了滑坡现象,滑坡体位置信息见图1。



图1 滑坡位置

Fig.1 Landslide location

1.1 滑坡空间形态

该处滑坡平面形态呈圆弧状,滑坡纵向长约40 m,横向宽约70 m,面积约1800 m^2 ,滑体厚度为5.0~7.1 m,平均厚度约6.2 m,总体积约9500 m^3 ,属中型滑坡,主滑方向 228° ,滑坡体的总体平面图见图2。

1.2 滑坡物质组成及结构特征

据勘探揭露,滑体物质主要由第四系全新统残坡积粉质粘土组成,呈褐红、紫褐色,稍湿,可塑状,土质不均,夹有少量砂、泥岩碎块。滑带位于土体与基岩接触处,厚度一般为1~20 cm,主要由紫褐色粉质粘土夹岩石碎块组成,呈软塑状,多呈绿灰、紫褐色,可见滑动镜面。滑床为侏罗系中统沙溪庙组砂质泥岩,纵向沿主滑方向呈折线形,倾角为 $3^\circ\sim 14^\circ$,横向呈“U”字型,其典型工程地质剖面见图3。

1.3 滑坡变形特征及形成机制分析

滑坡体范围内未经土石方开挖平场时处于稳定状态,未见变形迹象。土石方开挖导致前缘形成临空面,2017年1月10日开始发现坡体中后缘出现多条平行的张拉裂缝,并有逐渐扩展的趋势,到2017年1月18日测量的最大裂缝残余宽0.3 m,深0.5~

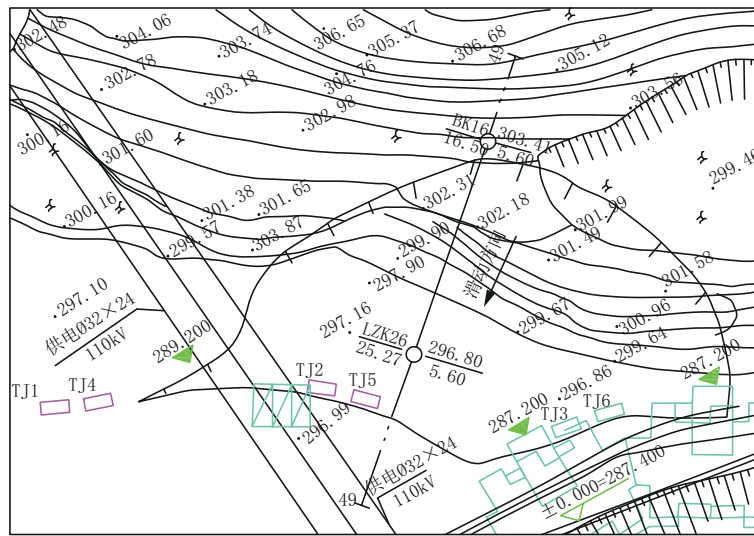


图2 滑坡平面图

Fig.2 Plan of the landslide

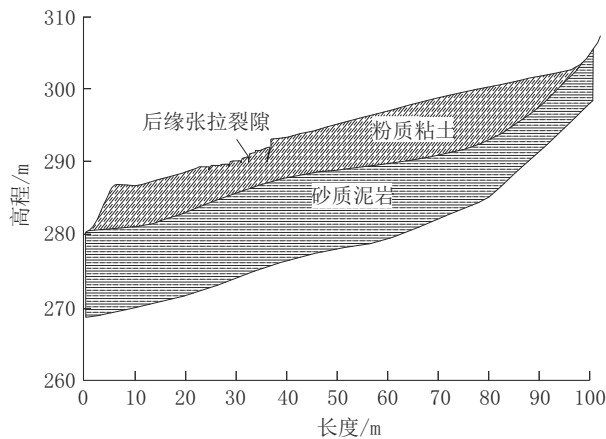


图3 典型工程地质剖面

Fig.3 Typical engineering geological section

1.2 m,长10 m,裂缝总体走向呈140°。此后该滑坡体仍处于缓慢整体蠕变变形状态,2017年1月22日施工单位进行了坡前反压处理后变形稳定。

经分析,该滑坡体发育在山体斜坡地带,以第四系坡残积物为主,土石方开挖改变了斜坡原有的应力状态,是本次出现工程滑坡的主要诱因之一。滑坡体后缘有一鱼塘,土石方平场施工过程中将鱼塘挖开后其塘内水体流经滑坡体范围内,沿岩土孔隙或地面洞穴下渗,在第四系残积夹碎石的粉质粘土层和侏罗系中统上沙溪庙组砂质泥层的接触面汇集,改变了滑带内各岩土体的物理力学性质,也导致土体沿滑面产生滑动破坏。综上分析并结合现场滑坡变形特征判定,该处滑坡破坏机制为蠕滑-拉裂。

2 现场原位剪切试验

2.1 试验点布置

土-岩界面原位剪切试验目的主要是提供土-岩界面在天然含水状态下以及人工浸水状态下的抗剪强度指标。本次试验在该滑坡体前缘布置了6个试验点,编号为TJ1~TJ6,其中试验点TJ1~TJ3为天然含水状态,试验点TJ4~TJ6为浸水饱和状态(对试验位置注水24 h,现场采集样品测定饱和度,饱和度>85默认为饱和),具体布置参见图2。

原位剪切试验采用2500 cm²剪切仪,剪切面积为2500 cm²,剪切盒内边长50 cm,试块高度为30 cm。以人工开挖的方式进行,试块间距以相互不产生不良应力影响为宜。在预留深度处开挖出略大于预定试样的试件块体,然后再用切割机、钎等工具进行细部人工修正,将试件周围岩土面修凿平整,直至规格为50 cm×50 cm×30 cm。所有试块四周均开挖至滑动面(岩土界面)以下3~5 cm。每个试验点含3个试块,分别满足法向荷载为140、280、420 kPa时剪切要求。

2.2 试验设备及安装

2.2.1 试验设备

(1)法向荷载系统由HC-30(300 kN)型数显拉拔仪、钢垫板、滚轴排、传力筒等组成。剪切荷载系统由HC-10(100 kN)型数显拉拔仪、前后座钢垫板、传力筒等组成。

(2)测量系统设备由大量程百分表、磁力表座

等组成。

2.2.2 设备安装

(1)法向系统安装:在试体顶部铺一层细砂并找平,使试体顶面与预定剪切面平行,然后放上钢垫板,在其上依次安放滚轴排、垫板、千斤顶、传力筒、顶部钢垫板等。整个法向系统垂直于剪切面,法向荷载的作用方向通过预定剪切试块的几何中心。加载的反力装置由现场的工字钢、钢板、砂袋等组成。

(2)水平系统安装:水平推力装置由千斤顶和垫板等组成,在试样制作时应在施加水平荷载一边预留一定距离放置千斤顶和垫板,放置千斤顶时要保持其平衡,并使合力作用点位于剪切面的中心,推力方向与预定剪切方向平行,千斤顶的反力由试槽侧壁提供。

加载过程中,试样的水平位移和垂直位移各采用2个精度为0.01 mm的百分表测定。

2.3 荷载施加

试验时先施加垂直荷载,再观测垂直位移,待位移稳定后,保持垂直荷载不变,再施加水平向荷载。

(1)法向荷载施加:3个试体的最大法向应力分别设定为140、280、420 kPa,为了使试样产生充分应变,以便于详细观察记录应变各阶段特征,按分配法将垂直荷载等分5级施加于每个试样,每级垂直荷载施加时间间隔为5 min,最后一级荷载施加完成后,每间隔5 min测读一次垂直位移,当连续两次位移之差 ≥ 0.01 mm时,方可施加水平荷载。

(2)剪切荷载施加:开始按预估最大剪切荷载的10%分级施加剪切荷载,剪切荷载采用时间控制,每间隔5 min加载一级。当剪切位移增量达到前级位移增量的1.5倍时,剪切荷载改为5%等量施加。

2.4 试验成果

2.4.1 剪断面特征

现场6组原位剪切试验均沿预定剪切面剪断,各组试验的结构面两侧岩性一致,且试体剪断面层面一致,剪断方向能代表岩土层潜在滑动方向,各试验位置布置合理,相互间无不良应力影响,较为客观真实的反映了试验层面的剪切性能,其典型剪切面特征见图4、图5。

2.4.2 试验结果

根据各组试样试验计算抗剪强度指标见表1、表2,典型抗剪强度曲线见图6、图7。由试验结果可

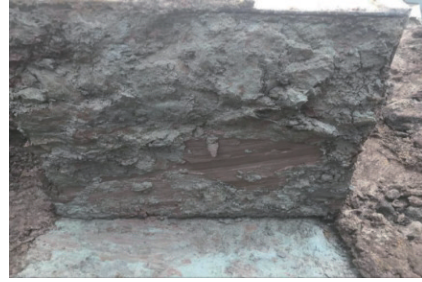


图4 TJ2剪切面

Fig.4 Shearing surface of TJ2



图5 TJ4剪切面

Fig.5 Shearing surface of TJ4

知:(1)饱和状态下的抗剪强度参数较天然状态下的抗剪强度参数下降,其中粘聚力 c 下降约35%,内摩擦角 φ 下降约20%;(2)残余抗剪强度参数较峰值抗剪强度参数下降,其中粘聚力 c 下降约29%,内摩擦角 φ 下降约33%。

为了进一步探索剪切过程中岩-土分界面的变

表1 天然工况原位剪切试验结果统计

Table 1 Statistics of in-situ shear test results under natural working conditions

试 点 编 号	试 块 编 号	法向 应力/ kPa	峰值 剪应 力/ kPa	残余 剪应 力/ kPa	抗剪强度 (峰值)		抗剪强度 (残余)		
					φ / ($^{\circ}$)	c / kPa	φ / ($^{\circ}$)	c / kPa	
TJ1	1	140	44.73	32.5					
	2	280	84.83	54.6	13.7	12.5	9.7	7.8	
	3	420	113.13	80.5					
TJ2	1	140	49.95	31.5					
	2	280	80.01	58.8	14.5	11.7	9.8	8.5	
	3	420	122.35	79.6					
TJ3	1	140	46.7	33.6					
	2	280	92.4	53.6	15.1	11.6	9.4	8.8	
	3	420	122.2	79.5					
平均值						14.4	11.9	9.6	8.4

表 2 饱和工况原位剪切试验结果统计
Table 2 Statistics of in-situ shear test results of saturated working conditions

试 点 编 号	试 块 编 号	法 向 应 力/ kPa	峰 值 剪 应 力/ kPa	残 余 剪 应 力/ kPa	抗剪强度 (峰值)		抗剪强度 (残余)	
					φ / (°)	c/ kPa	φ / (°)	c/ kPa
TJ4	1	140	39.1	23.2				
	2	280	65.79	45.6	12.3	7.3	7.6	5.7
	3	420	100.14	60.7				
TJ5	1	140	33	23.2				
	2	280	68.29	46.8	11.1	8.2	7.9	5
	3	420	87.85	60.5				
TJ6	1	140	34.65	26.9				
	2	280	67.47	41.6	11.5	7.6	7.9	6
	3	420	91.63	65.6				
平均值					11.6	7.7	7.8	5.6

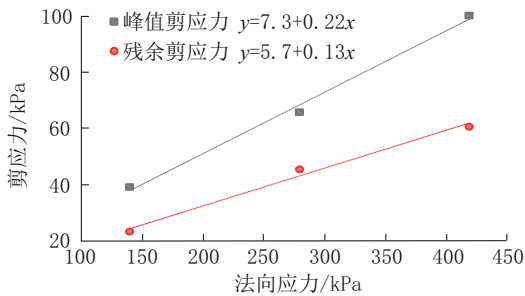


图 6 TJ2(天然)抗剪强度曲线

Fig.6 Shear strength curve of TJ2 (natural)

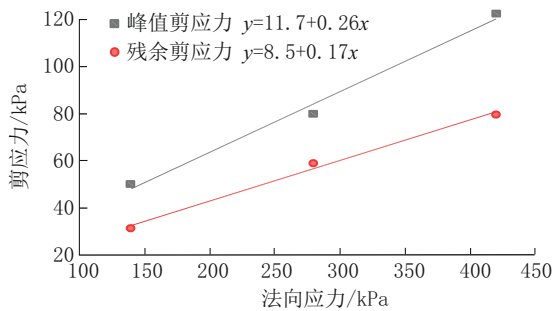


图 7 TJ4(饱和)抗剪强度曲线

Fig.7 Shear strength curve of TJ4 (saturated)

形规律,绘制剪切应力-剪切位移关系曲线,见图 8、图 9。

从曲线中可以看出,各试体不同应力状态下,剪应力-剪切位移关系曲线形态基本保持一致,呈现出较为理想的应力屈服和塑性变形特征。剪应力-位

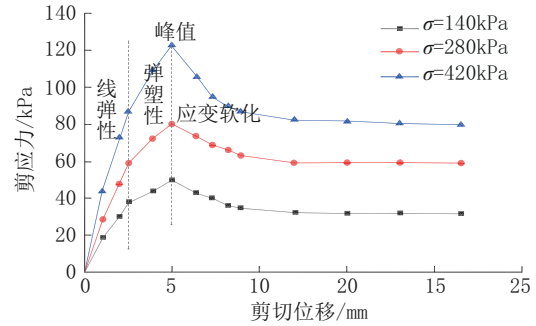


图 8 TJ2(天然)剪应力-剪切位移关系

Fig.8 Relationship between shear stress and displacement of TJ2 (natural)

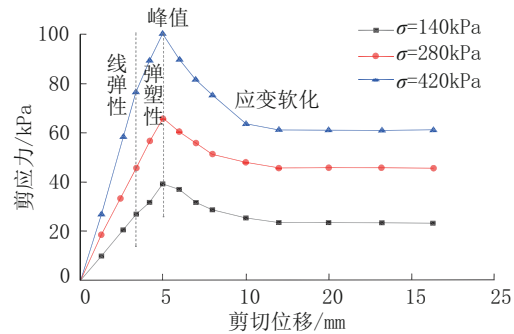


图 9 TJ4(饱和)剪应力-剪切位移关系

Fig.9 Relationship between shear stress and displacement of TJ4 (saturated)

移曲线可划分为 4 个明显的阶段:

(1)线弹性变形阶段,即试样受力变形的初始阶段,应变随应力近似呈线性变化,在剪应力-位移曲线中,呈现由直线逐渐变弯的过程,由试验现场观测可知,此阶段试样已开始产生了一些小变形,但仅是局限于试样的底部,尚未形成较明显的贯通剪切面;

(2)弹塑性变形阶段,试样现场可以观测到破裂,但是破裂传播的速度还处于比较缓慢的阶段,说明此阶段试样开始逐步形成剪切面并继续发展;

(3)峰值段,随着所施加应力的继续增大,应变速度相较于上一阶段也出现明显增大,破裂开始在试样内部快速传播,相较于前两阶段,该阶段呈现出小应力增幅,大应变增幅的特征,说明在应变的快速持续增大过程中,试样的极限位置已产生破坏;

(4)应变软化段,此阶段出现在峰值应力点以后,随着应变继续增大,应力逐渐下降到一平稳值,最后形成强度的残余值。

3 室内试验与原位抗剪强度参数对比与分析

3.1 参数对比

为说明原位剪切试验指标和室内剪切试验指标的差异,本次试验还在原位剪切试验试坑中利用刻槽法采集原状土样7组进行室内试验,并对其试验参数进行了比较,见表3。

表3 原位剪切试验与室内试验抗剪强度对比

Table 3 Comparison of shear strength between in-situ and laboratory shear test

试验项目	天然		饱和		
	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	
现场原位 试验	峰值强度	11.9	14.4	7.7	11.6
	残余强度	8.4	9.6	5.6	7.9
室内试验	峰值强度	24.7	14.9	17.5	10.4
	残余强度	13.5	8.3	10	6.4

从表3中可以看出,室内试验中测得的指标平均值均较原位大型剪切试验指标平均值高。分析认为造成上述差异的原因主要有以下2点:

(1)大面积直剪试验剪切试件横截面积为2500

cm²,而室内剪切试验试件面积30 cm²。由于滑动的岩土成分复杂,剪切面积大,往往更具有代表性。本项目所剪切的滑移面为夹碎石的粉质粘土原状土,原位剪切试验所得实验结果更能代表真实滑动带岩土体抗剪强度特性,而室内直接剪切试验,剪切土样小,土样基本为纯粉质粘土,土体的结构性强,因此所得的抗剪强度参数偏大。

(2)根据本项目特点,滑动带厚度一般为1~20 cm,位于土岩分界面,并且可见明显的绿灰色滑动镜面,呈软塑状,想要在土岩界面精确取样比较困难,实际取样位置位于粉质粘土层中下部,粉质粘土抗剪强度参数并不能代表滑动接触面的抗剪强度参数。

3.2 滑坡体的稳定性分析

根据现场原位剪切试验参数和室内直接快剪试验参数,分别对滑坡稳定性进行自重工况(工况1)及自重+暴雨工况(工况2)下的计算,计算简图见图10,计算方法采用《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)中A.0.3规定的传递系数法,计算结果见表4。

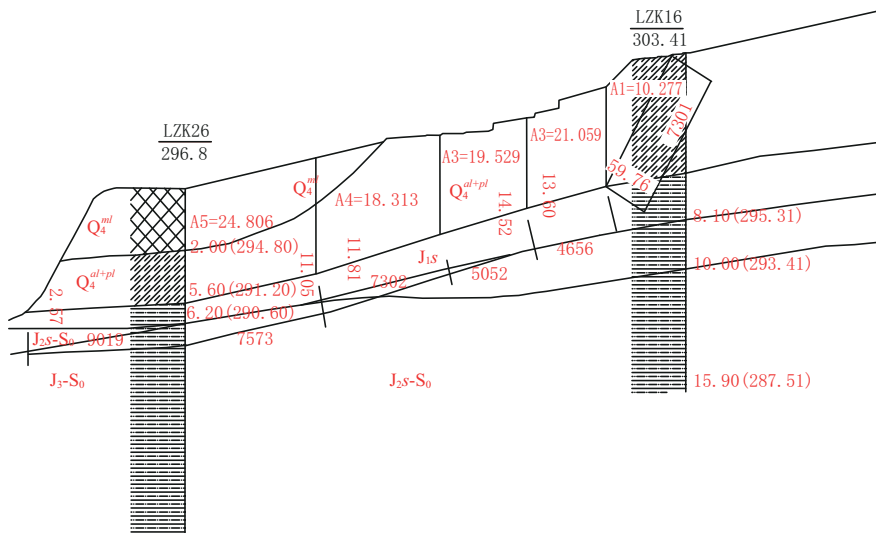


图10 传递系数法计算简图

Fig.10 Diagram of transmit coefficient method

根据计算结果可知:现场原位试验抗剪强度参数在工况2下处于欠稳定状态,在工况1下处于稳定状态,室内快剪试验抗剪强度参数在工况2下处于基本稳定状态,在工况1下处于稳定状态。

由滑坡体的实际变形特征可知,在经历了前期

的剧烈滑动之后,大部分势能已经被释放,其后几天时间内均保持缓慢蠕滑状态,处于临界状态-欠稳定状态之间,因此根据现场原位剪切试验抗剪强度参数的计算结果更加符合滑坡体状况的实际表现。

值得说明的是,本项目试验得出室内试验测得

表4 稳定性分析对比

Table 4 Comparison of stability analysis

抗剪强度参数	稳定系数 F_s	
	自重工况	自重+暴雨工况
现场原位试验	1.366	1.011
室内试验	1.639	1.213

的指标平均值均较原位大型剪切试验指标平均值高的结论只针对该项目,并不具有普适性。有关文献曾得出室内试验中二次剪切和饱和残余剪测得的指标平均值均较原位大型剪切试验指标平均值低,特别是内摩擦角 φ 差异较大。也有文献曾得出对于黏聚力,饱和状态下两种试验的结果差异较大,天然状态下则差别不明显;对于内摩擦角,天然状态下前者的试验结果较小,而对于饱和状态,前者的试验结果则大于后者。这恰恰说明传统的室内剪切试验因代表性差结果存在一定差异,因此单凭室内剪切试验结果判定滑坡体的稳定是有局限的。在条件允许的情况下实施原位大型剪切试验,用室内实验结果作为辅助验证是合理的。

4 结论

(1)室内剪切试验结果可能存在较大偏差。主要原因有3个方面:①滑带土厚度一般规模较小,大多集中在几毫米到几十厘米之间,且处于不同发育阶段的滑动体,其滑带土状态也不同,正在活动或者活动时间不久的滑坡,其滑带土大部分呈软塑状,力学性质软弱,按照常规取样方法,取样难度和样品所受扰动极大;②由于滑带土成分复杂,多为非均质、不连续的结合体,成分的复杂性所带来的是其颗粒级配及孔隙率等指标也各不相同,室内试样由于尺寸较小,不具备客观代表性,因此剪切试验试件的大小在某种程度上影响了试验成果的准确性和适用性;③滑动带除了土材料之外,还包括节理、裂隙等软弱结构面,而室内试验试样难以包含这些软弱结构面。

(2)原位剪切试验对边坡岩土体抗剪强度指标的选取及边坡的工程治理优化具有重要参考价值。不管是从尺寸效应上还是应力状态上,原位剪切试验结果均较室内试验结果有较大优势和可信度建议大型边坡工程勘察治理设计时进行原位大型剪切试验。

(3)原位试验方法和试验结果可靠,可做为该边坡稳定性评价和加固设计的依据。本项目根据原位剪切试验得出滑带土饱和和残余抗剪强度参数: $c=5.6 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=7.9^\circ$,由此计算得到的边坡稳定性与实际情况吻合,而采用室内试验结果得出的结论可能存在一定的风险。

(4)原位剪切试验应力-应变曲线具有明显的应力屈服和塑性变形特征,具体可分为4个阶段,即线弹性变形段、弹塑性变形段、峰值段、应变软化段,可以为考虑滑坡渐进破坏理论的研究提供依据。

参考文献(References):

- [1] 杨喆,林杜军,李寅良,等.边坡岩土体抗剪强度原位试验研究[J].工程勘察,2012,8:18-22.
YANG Zhe, LIN Dujun, LI Yinliang, et al. Study on the shear strength of rock and soil mass in slopes with in-situ tests[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 8:18-22.
- [2] 殷坤龙,张贵荣.滑坡灾害风险分析[M].北京:科学出版社,2010.
YIN Kunlong, ZHANG Guirong. Risk Analysis of Landslide Disasters[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [3] 李海亮,黄润秋,吴礼舟,等.非均质土坡降雨入渗的耦合过程及稳定性分析[J].水文地质工程地质,2013,40(4):70-76.
LI Hailiang, HUANG Runqiu, WU Lizhou, et al. Rainfall infiltration coupling process and stability analysis of a heterogeneous soil slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(4):70-76.
- [4] 徐德敏,黄润秋,邓英尔,等.低渗透软弱岩非达西渗流拟启动压力梯度试验研究[J].水文地质工程地质,2008,35(3):57-60.
XU Demin, HUANG Runqiu, DENG Ying'er, et al. Non-darcy flow quasi-threshold pressure gradient experimental study for low permeability soft rock[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3):57-60.
- [5] 石豫川,冯文凯,刘汉超,等.某水电站高边坡变形破坏模式及机制分析[J].西南交通大学学报,2004,17(5):609-613.
SHI Yuchuan, FENG Wenkai, LIU Hanchao, et al. Patterns and mechanisms of high slope deformation and failure of hydro-power station in Southwest China[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 17(5):609-613.
- [6] 黄润秋.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-433.
HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th Century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3):433-433.
- [7] 艾国栋,李云青,资丽君,等.天然和暴雨条件下的物质点滑坡变形机制分析[J].钻探工程,2023,50(5):23-28.
AI Guodong, LI Yunqing, ZI Lijun, et al. Analysis of deforma-

- tion mechanism of landslide under natural and rainstorm conditions based on material point method [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(5):23-28.
- [8] 苗朝,张勇,李乾坤,等.基于PFC2D的缓倾顺层滑移-溃曲型岩质滑坡破坏机制分析[J].*钻探工程*,2023,50(5):11-17.
MIAO Zhao, ZHANG Yong, LI Qiankun, et al. The deformation mechanism analysis of gently inclined and consequent sliding-buckling rock landslides based on PFC2D[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(5):11-17.
- [9] 李剑伟,杨培果,陈清泉.反算法在某滑坡稳定性评价中的应用[J].*四川水力发电*,2014,33(3):89-91.
LI Jianwei, YANG Yuguo, CHEN Qingquan. Application of inverse algorithm in stability evaluation of a certain landslide [J]. *Sichuan Water Power*, 2014, 33(3):89-91.
- [10] 杨朝发,刘发祥.综合评价法确定岩质顺向坡软弱结构面的强度参数[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2012,39(8):72-74,78.
YANG Chaofa, LIU Faxiang. Determination of strength parameter of weak structural plane of consequent rock slope by comprehensive evaluation method[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2012, 39(8):72-74,78.
- [11] 陈关顺,沙德智.土质滑坡滑带土取样方法的新尝试[J].*山地学报*,2003,21(3):380-381.
CHEN Guanshun, SHA Dezhi. New tries of sampling methods for slip soils of landslides [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(3):380-381.
- [12] 任三绍,郭长宝,张永双,等.川西巴塘茶树山滑坡发育特征及形成机理[J].*现代地质*,2017,31(5):979-989.
REN Sanshao, GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, et al. Development characteristics and formation mechanism of Chashushan Landslide in Batang, Western Sichuan[J]. *Geoscience*, 2017, 31(5):979-989.
- [13] 刘钟森,胡伟,张硕,等.现场大面积直剪试验在滑坡稳定性分析中的应用研究[J].*公路工程*,2015,40(1):5-8.
LIU Zhongsen, HU Wei, ZHANG Shuo, et al. Application of large-area direct shear test on stability analysis of landslides[J]. *Highway Engineering*, 2015, 40(1):5-8.
- [14] 郑现磊,贾向新,张西坤,等.土方直剪试验数据采集管理系统的设计与实践[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2015,42(11):50-53.
ZHENG Xianlei, JIA Xiangxin, ZHANG Xikun, et al. Design and practice of earthwork direct shear test data collection and management system[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(11):50-53.
- [15] 周海清,刘东升,陈正汉,等.基于传递系数法的滑面指标反算方法的研究[J].*地下空间与工程学报*,2010,6(6):1161-1167.
ZHOU Haiqing, LIU Dongsheng, CHEN Zhenghan, et al. Research on back calculation algorithms for slide face parameter based on the transmitting coefficient method[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(6):1161-1167.
- [16] 李元勋,朱彦鹏,李京榜,等.深层顺层滑坡抗剪强度参数反算分析[J].*兰州理工大学学报*,2016,46(5):117-121.
LI Yuanxun, ZHU Yanpeng, LI Jingbang, et al. Back calculation analysis of shear strength parameters for deep layered landslides[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2016, 46(5):117-121.
- [17] 黄润秋.岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J].*岩石力学与工程学报*,2008,27(8):1525-1544.
HUANG Runqiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8):1525-1544.
- [18] 王振,叶晓明,刘永新.考虑滑坡渐进破坏的改进简布条分法[J].*岩土力学*,2018,39(2):675-683.
WANG Zhen, YE Xiaoming, LIU Yongxin. Improved Janbu slices method considering progressive destruction in landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2):675-682.
- [19] 张茂省,胡炜,朱立峰,等.饱和土体原位大型剪切试验方法与实践[J].*地质通报*,2013,32(6):919-924.
ZHANG Maosheng, HU Wei, ZHU Lifeng, et al. The method for large scale in-situ shear test of saturated soils and its application [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(6):919-924.

(编辑 王文)