

文章编号:1672-9331(2021)02-0033-07

改进的膨胀土直剪试验方法研究

张崧铭¹, 龙明旭², 蔡树生², 兰 天², 张 锐²

(1. 中国铁路南宁局集团有限公司, 广西 南宁 530021; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 通过改变加载板结构和加载形式, 改进常规直剪试验装置, 使试样在固结过程中保持体积恒定。以广西百色中膨胀土为研究对象, 对常规和改进直剪试验结果进行了对比; 通过不同干密度下的改进直剪试验, 得到了抗剪强度指标随干密度的变化规律; 结合研究成果进行了案例工程的稳定性分析。结果表明: 改进的直剪试验消除了干密度变化对试验结果的影响, 且低应力条件下抗剪强度具有很好的线性特征; 膨胀土的抗剪强度和黏聚力随干密度的减小而减小, 黏聚力的衰减幅度较大; 膨胀土边坡浅层土体发生膨胀后, 其干密度明显减小。因此, 在稳定性分析时应充分考虑膨胀对抗剪强度的影响。

关键词: 膨胀土; 抗剪强度; 直剪试验; 改进方法; 恒定干密度; 稳定性分析

中图分类号: U416

文献标志码: A

Study on improved direct shear test method of expansive soil

ZHANG Yu-ming¹, LONG Ming-xu², CAI Shu-sheng², LAN Tian², ZHANG Rui²

(1. China Railway Nanning Group Co., Ltd., Nanning 530021, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The conventional direct shear test device was improved by changing loading plate structure and loading form to keep the volume of the sample constant during the consolidation process. Taking medium expansive soil in Baise City, Guangxi Province as the research object, the results of conventional and improved direct shear tests were compared, and the changing laws of shear strength indexes with dry densities were obtained through the improved direct shear test under different dry densities. Combined with the research results, the stability of the case engineering was analyzed. The results show that the improved direct shear test eliminates the influence of dry density change on the test results, and the shear strength under low stress condition has good linear characteristics. The shear strength and cohesion of expansive soil decrease with the decrease of dry density, and the cohesion decreases greatly. After the shallow soil at the expansive soil slope swells, the dry density will decrease obviously. Therefore, the effect of swelling on shear strength should be fully considered in stability analysis.

Key words: expansive soil; shear strength; direct shear test; improved method; constant dry density; stability analysis

收稿日期: 2021-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978085); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(K2020G036)

通讯作者: 张崧铭(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事道路工程方面的研究。E-mail: 164317633@qq.com

膨胀土是富含亲水性矿物蒙脱石及混层矿物的高塑性黏土,是一种具有裂隙性、胀缩性、超固结性的特殊土^[1]。其强度具有变动性,刚修筑成型的膨胀土边坡抗剪强度较高,当边坡表面土体失水后会产生裂隙,水分更容易进入坡体内部,造成土体强度不断衰减^[2]。经过一段时间的干湿循环作用后,膨胀土边坡会发生渐进式、反复式的浅层破坏^[3],将边坡放缓处理后仍会发生垮塌。由于膨胀土的特殊性,用现有直剪试验方法得到的强度指标对坡率大于1:1.5的边坡进行稳定性分析,得到的安全系数很高,但边坡仍然经常发生浅层垮塌^[4]。由此可见,现有的直剪试验方法不能完全反映工程的实际情况。

国内外学者针对膨胀土抗剪强度做了大量的室内试验,主要研究了土样上覆荷载、含水率、裂隙及干湿循环作用对膨胀土抗剪强度的影响,结果表明抗剪强度会随含水率和裂隙的增大、干湿循环次数的增多而显著衰减,但上覆荷载对抗剪强度的衰减能起到抑制作用^[5-9]。其中,干湿循环作用引起膨胀土抗剪强度的衰减主要表现为黏聚力的大幅降低,但内摩擦角变化幅度较小^[10]。有学者研究发现以往得到的抗剪强度指标均取值过大,故开展了低应力条件下不同试验方法的直剪试验,并分析了初始干密度、含水率及上覆荷载等因素对抗剪强度的影响^[11-12]。结果表明,不同试验方法得到的抗剪强度包线均呈非线性,低应力条件下的饱和慢剪强度最小,更适用于膨胀土边坡的稳定性分析,而低应力和初始干密度对抗剪强度有显著影响。此外,有学者研究发现土样发生较小膨胀变形就会造成抗剪强度明显衰减,在无上覆荷载作用而土体完全膨胀后,其强度几乎完全丧失^[13]。膨胀土试样在不同上覆荷载作用下会发生体积压缩或膨胀变形,初始干密度发生改变^[14]。常规直剪试验没有考虑干密度变化对抗剪强度的影响,不同上覆荷载作用下得到的抗剪强度指标 c, φ 值仅为拟合值,不能反映实际土颗粒间的界面形态,失去了其真实的物理意义。

本研究通过改进常规直剪试验装置,保证在试验过程中土样体积不变,即干密度保持恒定,消除了直剪试验过程中土样干密度变化对试验结果的影响,以广西百色中膨胀土和湖北枝江弱膨胀土为研究对象进行饱和慢剪试验,得到了不同干

密度下膨胀土抗剪强度指标的变化规律,并结合工程案例进行了稳定性分析,揭示了膨胀土边坡反复破坏的机理。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

在常规应变控制式直剪仪的基础上进行改进。改进装置主要由竖向加载及竖向变形量测系统、控制试样变形及压力监测系统两部分组成,如图1所示。改进装置主要利用平衡加压法,将试样所受到的上覆荷载与试样产生的竖向膨胀力相互抵消,使其竖向不发生膨胀变形。并设置限位装置,控制试样在较大上覆荷载作用下也不会产生体积压缩,保证剪切前试样体积恒定,干密度保持不变。

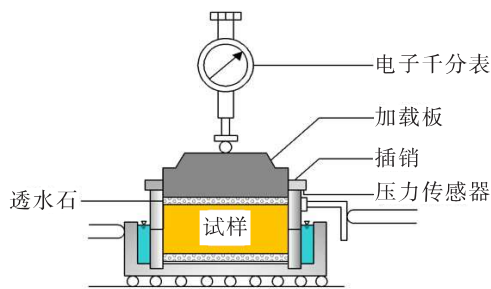


图1 改进直剪仪装置图

Fig. 1 Device diagram of improved direct shear apparatus

利用直剪仪杠杆加载系统将荷载垂直作用在试样上,通过添加不同质量的标准砂为试样施加不同大小的上覆荷载。竖向设有电子千分表,用于监测固结阶段试样的体积变化,千分表发生微小变化(2 h内不超过0.01 mm)即认为上覆荷载和土样竖向膨胀力达到了平衡状态,此时的上覆荷载即为试样在此湿密度状态下的竖向膨胀力。在剪切过程中,试样因为上覆荷载不同、试样颗粒级配不同会发生一定程度的剪胀或剪缩现象,千分表可用于记录竖向变形,反映试样剪切过程中的应力、应变关系。

为保证试样在不同上覆荷载作用下干密度的一致性,在原装置的加载板上设方形小孔,尺寸为61.8 mm×4.0 mm×4.0 mm。孔内带有长条插销,插销底部设有压力传感器,加载板底部与标准高度试样上部透水石的顶面刚好接触,在杠杆调

零过程和加载过程中,插销都能保证试样不会被压缩。当土样竖向膨胀力大于上覆荷载时,插销下的压力传感器读数为 0,竖向千分表开始出现正值,此时添加标准砂增大上覆荷载。当上覆荷载过载时,压力传感器出现读数,此时卸除标准砂减小荷载。当压力传感器读数和千分表读数均为 0 时,试样竖向膨胀力和上覆荷载相互抵消,试样体积未发生变化。

1.2 试验方法

试验基本操作步骤与《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中规定的一致,但加载过程和固结过程与规范要求的有所不同。试验步骤如下:

1) 根据设定的干密度和含水率,称取一定质量的湿土,通过静压制样法制取环刀样。

2) 将固定销插入剪切盒中,放入透水石。利用脱模器将试样从环刀中压入剪切盒内,依次放入试样、透水石、加载板和插销。在杠杆上绑上塑料袋,放入少量标准砂,保证插销底部压力传感器有 1~2 kPa 的初始读数。在安装好竖向千分表后,将其读数清零。

3) 往剪切盒中加入蒸馏水,直至液面与剪切盒上部齐平。当试样开始吸水膨胀、竖向千分表出现读数时,往塑料袋内缓慢放入标准砂。当千分表读数在 2 h 内变化小于 0.01 mm、插销底部传感器数值较小时,说明试样膨胀稳定,将其继续固结 24 h。

4) 在剪切开始时,拔出插销和固定销,将千分表读数清零。按 0.02 mm/min 的速率对试样进行剪切,每隔 5 min 记录竖向变形量、剪切抗力和剪切位移。在剪切位移达到 7 mm 时,停止试验。

5) 从剪切盒中取出试样,测定试样含水率。称量塑料袋内标准砂的质量,换算出试样的上覆荷载。

2 试验土样及方案

试验土样取自我国广西百色市平果县四塘镇,土样呈灰白色,并呈坚硬或硬塑状态。其天然含水率为 20.6%,由湿法重型击实试验得到其最大干密度为 1.72 g/cm³,最佳含水率为 17.9%。根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中的膨胀性强弱判别标准,可判定该土样为中膨胀土。该膨胀土的基本物理性质如表 1 所示。

表 1 膨胀土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of expansive soil

液限/ %	塑限/ %	自由膨 胀率/%	比重	标准吸湿 含水率/%	有效蒙脱 石含量/%
56.3	21.4	82	2.75	6.7	16.6

在常规直剪试验中,土样的干密度按 93% 压实度控制,为 1.60 g/cm³,将初始含水率设为最佳含水率,上覆荷载分别为 12.5, 25.0, 37.5, 50.0, 100.0, 150.0, 200.0 和 250.0 kPa。在改进直剪试验中,土样的干密度同为 1.60 g/cm³,含水率分别按 18%, 20%, 22%, 24% 和 26% 控制,5 组上覆荷载即为 5 种湿密度土样对应的竖向膨胀力。为进一步获取不同干密度条件下抗剪强度的变化规律,补充 4 种干密度土样进行改进直剪试验,每种干密度土样对应 5 种含水率。由于较小干密度试样在剪切过程中易被压缩,可适当增大初始含水率以减小竖向膨胀力及对应的上覆荷载。试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

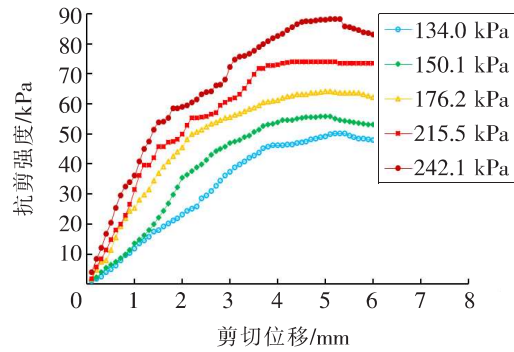
Table 2 Test scheme

试验类型	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%
改进直剪试验	1.60	26,24,22,20,18
	1.55	28,26,24,19,15
	1.50	30,26,24,20,16
	1.45	30,28,26,21,16
	1.40	30,28,26,24,22
常规直剪试验	1.60	18

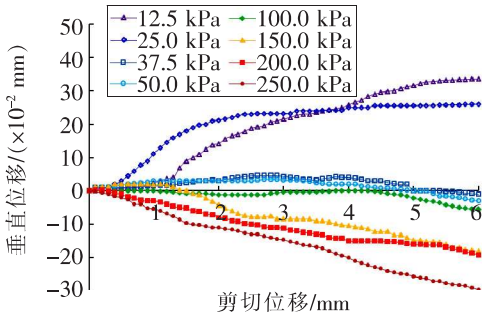
3 试验结果及分析

3.1 试验结果对比

常规直剪试验结果如图 2 所示。分析图 2(a) 可以发现,在剪切过程中,百色膨胀土呈应力软化趋势,上覆荷载越大,土颗粒前期产生的抗力越大,峰值强度也越大。由于重塑土样的内部结构经过多次破坏,应变软化现象不明显。分析图 2(b) 可以发现,在剪切过程中,试样发生了不同程度的剪胀或剪缩现象。当上覆荷载为 150, 200, 250 kPa 时,剪缩现象明显;当上覆荷载为 12.5, 25.0 kPa 时,剪胀现象明显。



(a) 剪切位移-抗剪强度关系曲线



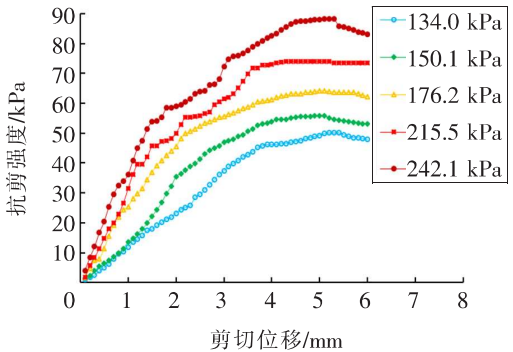
(b) 剪切位移-垂直位移关系曲线

图 2 常规直剪试验结果

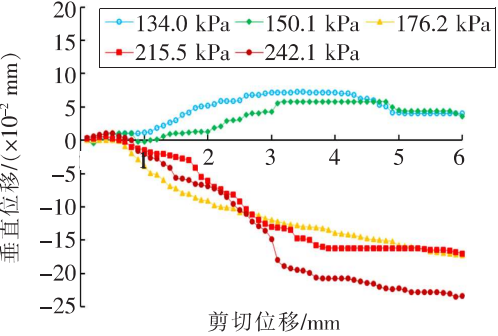
Fig. 2 Results of conventional direct shear test

改进直剪试验结果如图 3 所示。百色膨胀土剪切位移—抗剪强度之间同样呈应变软化型,且应变软化现象较常规直剪试验更加明显。试样在 5 种上覆荷载作用下,峰值强度对应的剪切位移较大,即达到峰值强度所需的剪切位移明显大于常规直剪试验的。剪切位移—垂直位移关系表明,在上覆荷载为 134.0、150.1 kPa 时,试样在整个剪切过程中表现为剪胀;在其余上覆荷载作用下,试样在剪切位移小于 1 mm 时表现为剪胀,在大于 1 mm 时表现为剪缩。由于试样剪切前干密度不变,土体结构未发生明显变化,在较大上覆荷载作用下土颗粒之间发生相对运动,因此仍出现了一定的剪胀现象。

在剪切过程中,随着剪切位移的增大、土颗粒的滚动,摩擦运动由剧烈变为平缓,当上覆荷载和土颗粒运动造成的膨胀力相互平衡时,剪胀、剪缩现象不明显。改进与常规试验的剪胀、剪缩现象有明显的区别。在改进试验中,当上覆荷载为 134.0~150.1 kPa 时,剪胀现象不明显。而在常规试验中,因土样膨胀导致干密度变小,在上覆荷载为 100、150 kPa 时仍出现剪缩现象,且在剪切过程中需要平衡的膨胀力比改进试验的要小,当上覆荷载为 37.5~50 kPa 时,剪胀现象不明显。



(a) 剪切位移-抗剪强度关系曲线



(b) 剪切位移-垂直位移关系曲线

图 3 改进直剪试验结果

Fig. 3 Results of improved direct shear test

在常规试验中,固结过程中的上覆荷载不足以抵消试样的竖向膨胀力,竖向发生膨胀变形造成干密度降低,试验结果如表 3 所示。随着上覆荷载的增大,竖向膨胀率逐渐减小,但干密度降低幅度较小。当上覆荷载为 12.5 kPa 时,干密度最大降低幅度为 5.1%,若无上覆荷载抑制土体膨胀,干密度降低幅度更大。低应力是膨胀土浅层边坡长期所处的力学状态,边坡浅层土体的干密度会因膨胀而发生不同程度的减小。

表 3 常规直剪试验土样干密度变化情况

Table 3 Variation of dry density of soil sample in conventional direct shear test

含水率/ %	干密度/ (g · cm ⁻³)	上覆荷 载/kPa	膨胀率/ %	膨胀后干密度/ (g · cm ⁻³)
17.5	1.60	12.5	6.04	1.50
		25.0	5.25	1.52
		37.5	4.00	1.54
		50.0	2.75	1.56
		100.0	1.30	1.58
		150.0	0.15	1.60
		200.0	0.05	1.60
		250.0	0.00	1.60

在改进试验中,土样未发生竖向变形,其干密度未减小。当上覆荷载为 150.1 kPa 时,改进试验土样的峰值抗剪强度为 55.9 kPa,略大于常规试验上覆荷载为 150 kPa 的抗剪强度 55 kPa。在该荷载作用下土样膨胀率仅为 0.15%,对于干密度影响较小,故两者的峰值强度相差并不大。在高应力条件下两种方法得到的数据点线性拟合精度高,拟合公式见图 4;而在低应力条件下,常规直剪试验土样干密度变化较大,抗剪强度呈明显的非线性变化趋势,采用线性公式进行拟合会造成较大误差。

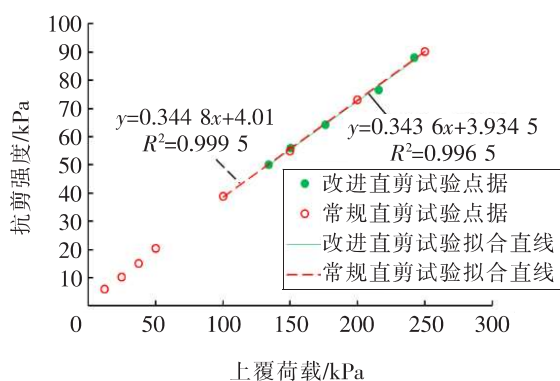


图 4 常规和改进直剪试验抗剪强度与上覆荷载的关系

Fig. 4 Relationship between shear strength and overburden pressure in conventional and improved direct shear tests

分别采用两种试验高应力下的抗剪强度拟合公式预测低应力下的抗剪强度值,并与低应力下抗剪强度实测值进行对比,结果如表 4 所示。分析表 4 可以发现,低应力下常规试验实测值与拟合值存在较大偏差,在上覆荷载为 12.5 kPa 时,两者相差 2.25 kPa,相对误差最大达 37%;而改进试验拟合值与常规试验拟合值非常接近,说明采用改进试验能很好地避免膨胀对抗剪强度的影响,能反映低应力下土体的真实抗剪强度。

表 4 抗剪强度实测值和拟合值

Table 4 Measured and fitted values of shear strength kPa

上覆荷载	抗剪强度		
	实测值	常规试验拟合值	改进试验拟合值
12.5	6.07	8.32	8.23
25.0	10.30	12.63	12.52
37.5	15.10	16.94	16.82
50.0	20.56	21.25	21.11

3.2 改进直剪试验结果分析

图 5 为 4 种不同干密度试样的抗剪强度与上覆荷载的关系。分析图 5 可以发现,峰值抗剪强度与上覆荷载的大小密切相关,不同干密度土样竖向膨胀力相差较大,数据点处于不同应力范围内。1.60 g/cm³ 的土样干密度对应着较大的上覆荷载,此时的抗剪强度也较大。这是由于随着干密度的增大,土颗粒间的接触更密集,且随着剪切位移的增加,土颗粒间发生滑动、滚动所需要的外力增大,同时土颗粒间相互运动产生的抗力也更大。由于改进直剪试验避免了干密度发生变化,高应力和低应力条件下抗剪强度均随上覆荷载呈线性变化,且拟合效果良好。通过分析拟合线可以发现,不同干密度土样抗剪强度指标存在明显差异。

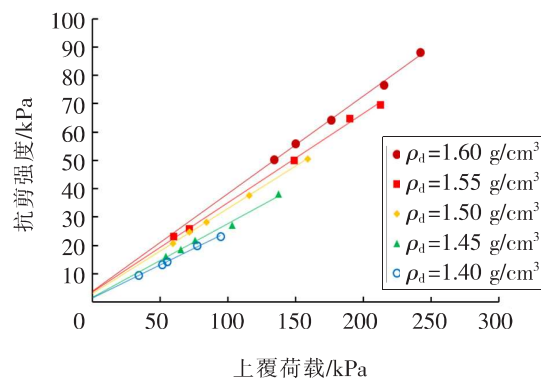


图 5 不同干密度土样抗剪强度与上覆荷载的关系

Fig. 5 Relationship between shear strength and overburden pressure of soil samples with different dry densities

表 5 显示了不同干密度土样的黏聚力和内摩擦角。分析表 5 可以发现,黏聚力和内摩擦角均随干密度的降低而减小,其中黏聚力变化幅度较大。当干密度从 1.60 g/cm³ 降至 1.40 g/cm³ 时,黏聚力减小了 71.2%,内摩擦角降低了 29.7%,说明干密度的降低会造成抗剪强度指标发生不同程度的衰减。因此,在稳定性分析中需考虑干密度变化对强度指标的影响。

表 5 不同干密度土样的黏聚力和内摩擦角

Table 5 Cohesion and internal friction angles of soil samples with different dry densities

干密度/(g · cm ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1.60	5.2	18.5
1.55	3.8	17.5
1.50	3.0	16.7
1.45	1.7	14.6
1.40	1.5	13.0

4 工程案例

湖北省枝江市安福寺至猗亭区古老背公路工程枝江段(简称安猗路)为一级公路,其中约 4 km 路段处于膨胀土区域。在路基施工过程中,有 9 处膨胀土路堑边坡出现坍塌。其中 K9+094~K9+200 左幅为该路段最高边坡,长 106 m,高 11.1 m。边坡开挖后边坡坡率为 1:1.5,在开挖后半年内发生多次滑坡。边坡垮塌情况大多为坡中向坡脚滑动,随后坡顶土体向下迁移,且发生多次浅层滑动。最大裂隙深度为 1.5 m,滑坡体的最大垂直深度为 1.2 m,小于干湿循环影响深度 2.0 m。对湖北宜昌安猗一级公路左幅边坡进行开挖取样,分别选取 0.0、0.5、1.0、1.5 m 4 个深度的样本,并测试其天然干密度和天然含水率,结果如表 6 所示。

表 6 不同深度土样天然干密度和天然含水率

Table 6 Natural dry densities and water content of soil samples at different depths

取样深度/m	天然干密度/(g·cm ⁻³)	天然含水率/%
0.0	1.53	14.0
0.5	1.56	21.0
1.0	1.58	22.8
1.5	1.60	23.0

从表 6 可以看出,随着取样深度的增加,土样的天然干密度逐渐增大。对于浅层边坡而言,干湿循环区内的土体承受的上覆荷载大约为 40 kPa,不足以抑制土样的膨胀。同时浅层边坡所受到的干湿循环作用显著,坡体开挖后裸露土体干密度较大,具有较强的膨胀潜势,易在降雨增湿后发生膨胀,导致干密度减小。随着边坡深度的增加,土体受干湿循环作用的影响较小,且承受的上覆荷载增大,土样膨胀受到抑制,干密度变化幅度较小。

现采用 GeoStudio 软件的 SLOPE/W 模块基于摩尔-库伦准则对边坡进行稳定性分析。将边坡分为两部分进行赋值计算。对干湿循环显著影响区外 2 m 深度处的膨胀土原状土样进行改进直剪试验,得到其内摩擦角和黏聚力分别为 17.3°和 7.8 kPa。在干湿循环显著影响区内,原状土体在天然干密度和含水率下的无荷膨胀率为 6%,膨胀后干密度由 1.60 g/cm³ 降至 1.50 g/cm³ 左右。采用

改进直剪试验得到干密度为 1.50 g/cm³ 时土样的内摩擦角和黏聚力分别为 16.3°和 0.91 kPa。

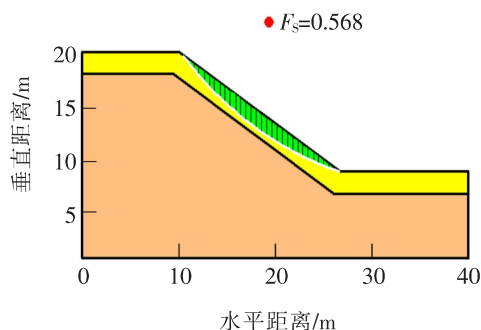


图 6 膨胀土边坡稳定性分析结果

Fig. 6 Stability analysis result of expansive soil slope

图 6 所示为工程案例膨胀土边坡稳定性分析结果。如图 6 所示,该边坡稳定安全系数 F_s 为 0.568,说明边坡很不稳定,存在浅层滑动风险,滑动面位于干湿循环显著区内,滑体最大垂直深度为 1.70 m,垮塌深度符合膨胀土边坡浅层滑坡的工程特性。对膨胀土边坡而言,以往的边坡稳定性分析没有考虑浅层土体膨胀变形的影响,造成抗剪强度指标取值过大,得到的分析结果与边坡的工程实际情况不相符合。现场采集的数据表明膨胀土浅层边坡的干密度并不是一成不变的,在干湿循环作用的影响下,干密度随边坡深度的增加而增大。越靠近边坡表面,干密度变化幅度越大,抗剪强度衰减幅度也越大。在多次增湿-脱湿过程中原状土体黏聚力逐渐衰减至重塑土黏聚力水平,甚至接近于 0。因此,在对膨胀土边坡进行稳定性分析时,应考虑膨胀引起的抗剪强度指标降低的问题。

5 结论

本研究对常规直剪试验装置进行了改进,在试样的固结过程中可以保证试样的体积恒定,即试样的干密度保持不变。将改进直剪试验结果与常规直剪试验结果进行了对比分析,并完成了不同干密度下的改进直剪试验,最后基于本研究成果进行了工程实例分析,得到以下结论:

1) 与常规直剪试验进行对比后发现,改进直剪试验消除了干密度变化对抗剪强度的影响,在低应力条件下抗剪强度具有更好的线性特征。

2) 膨胀土的内摩擦角和黏聚力均随干密度的

减小而降低,黏聚力降低幅度较大,在稳定性分析时应充分考虑膨胀对抗剪强度指标的影响。

3) 膨胀土边坡浅层土体膨胀后,干密度大幅降低,抗剪强度发生较大衰减,坡表土体黏聚力几乎完全丧失,边坡容易发生浅层滑动。

〔参考文献〕

- [1] 冷挺,唐朝生,徐丹,等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报,2018,26(1):112-128.
LENG Ting, TANG Chao-sheng, XU Dan, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 112-128.
- [2] 马全国,张彦钧,汤致松,等. 压实膨胀土饱和抗剪强度的变动性[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2016, 29(4): 629-635.
MA Quan-guo, ZHANG Yan-jun, TANG Zhi-song, et al. Variation of saturated shear strength of compacted expansive soil[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition), 2016, 29(4): 629-635.
- [3] 张良以,陈铁林,张顶立. 降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):70-77.
ZHANG Liang-yi, CHEN Tie-lin, ZHANG Ding-li. Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 70-77.
- [4] 肖杰,杨和平. 膨胀土边坡浅层坍塌破坏原因剖析[J]. 公路交通科技,2016,33(7):47-52.
XIAO Jie, YANG He-ping. Discuss of reasons for shallow landslide of expansive soil slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(7): 47-52.
- [5] 徐彬,殷宗泽,刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(1): 44-50.
XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 44-50.
- [6] Chowdhury R H, Azam S. Unsaturated shear strength properties of a compacted expansive soil from Regina, Canada[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2016, 47(1): 1-11.
- [7] 韦秉旭,黄震,高兵,等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律及其对抗剪强度影响[J]. 公路工程,2015, 40(4):127-130,140.
WEI Bing-xu, HUANG Zhen, GAO Bing, et al. Crack evolution rules of expansive soil and the effect on the shear strength under the action of dry-wet circulation [J]. Highway Engineering, 2015, 40(4): 127-130, 140.
- [8] Xu D, Tang C, Leng T, et al. Shear strength of unsaturated expansive soil during wetting-drying cycles [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(1): 286-296.
- [9] 杨和平,唐咸远,王兴正,等. 有荷干湿循环条件下不同膨胀土抗剪强度基本特性[J]. 岩土力学,2018, 39(7): 2 311-2 317.
YANG He-ping, TANG Xian-yuan, WANG Xing-zheng, et al. Shear strength of expansive soils under wet-dry cycles with loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2 311-2 317.
- [10] 杨和平,王兴正,肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报,2014, 36(5):949-954.
YANG He-ping, WANG Xing-zheng, XIAO Jie. Influence of wetting-drying cycles on strength characteristics of Nanning expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 949-954.
- [11] 肖杰,杨和平,李晗峰,等. 低应力条件下不同密度的南宁膨胀土抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6):15-22.
XIAO Jie, YANG He-ping, LI Han-feng, et al. Shear strength test of Nanning expansive soil with various dry densities and low stresses[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 15-22.
- [12] 肖杰,杨和平,王兴正,等. 南宁外环膨胀土抗剪强度非线性特征及影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10):1-8.
XIAO Jie, YANG He-ping, WANG Xing-zheng, et al. Analysis of nonlinear characteristic of shear strength of Nanning expansive soil and its influencing factors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(10): 1-8.
- [13] Delikta C, Oka E. Influence of swell on undrained shear strength of expansive Ankara clay[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(18): 1-9.
- [14] 张锐,王欢,郑健龙. 恒定初始干密度状态下膨胀土的有荷膨胀试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(2): 1-6.
ZHANG Rui, WANG Huan, ZHENG Jian-long. Experimental research on loaded swelling of expansive soil with constant initial dry density[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(2): 1-6.