

考虑干湿循环的膨胀土航道边坡稳定分析及治理措施*



王艳芳^{1,2}, 江 涛³, 印 昊¹, 夏 炎², 张 磊²

(1. 金陵科技学院, 江苏南京 211169; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏南京 210017;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对航道边坡土体为膨胀土时极易产生季节性、浅层性滑动, 影响航运能力及工程安全的问题, 依托芜申航道南京段失稳边坡处治工程, 对膨胀土进行往复干湿循环后的直剪试验和考虑干湿循环效应的稳定性分析。结果表明: 随干湿循环次数的增加, 膨胀土的黏聚力、内摩擦角逐渐衰减, 其衰减主要发生在前3次干湿循环过程中, 之后趋于稳定; 黏聚力的衰减程度远大于内摩擦角; 考虑干湿循环效应引起的土体强度衰减, 是获得膨胀土边坡真实稳定系数的正确计算方法。针对失稳边坡提出采用门字形抗滑桩的处治措施, 应用效果良好, 具有较好的工程借鉴意义。

关键词: 膨胀土; 干湿循环; 强度衰减; 门字形抗滑桩; 稳定分析

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0179-07

Swelling soil slope stabilization analysis and treatment measures considering wet and dry cycles in navigation project

WANG Yan-fang^{1,2}, JIANG Tao³, YIN Hao¹, XIA Yan², ZHANG Lei²

(1.Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2.JSTI Group, Nanjing 210017, China;
3.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Regarding the problem of seasonal and shallow sliding when the slope of the navigation channel is swelling soil, which affects the shipping capacity and engineering safety, we carry out the straight shear test of swelling soil after reciprocal wet and dry cycles and the stability analysis considering the effect of wet and dry cycles based on the treatment project for the destabilized slope of Nanjing section of the Wu-Shen Navigation Channel. The results show that the cohesion and internal friction angle of swelling soil decay gradually with the increase of the number of wet and dry cycles, and the decay mainly occurs in the first three dry and wet cycles, and then gradually stabilizes. The decay degree of cohesion is much larger than that of internal friction angle. Considering the soil strength decay caused by the wet and dry cycle effect is the correct calculation method to obtain the true stability coefficient of swelling soil slopes. The treatment measure of using gate-shaped anti-slip piles is proposed for the unstable slope, and has good application effect and engineering reference significance.

Keywords: swelling soil; wet and dry cycles; strength decay; gate-shaped anti-slip pile; stabilization analysis

膨胀土是一种富含蒙脱石、伊利石等亲水性矿物, 具有吸水膨胀、失水收缩且胀缩变形可逆

等特性的高塑性黏土^[1-3]。膨胀土边坡滑坡具有季节性、浅层性等特点, 一般发生在降雨过程中或

收稿日期: 2022-01-25

*基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2019YFC15098000); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908278); 江苏省高校自然科学基金面上项目(19KJD410002); 金陵科技学院高层次人才科研启动项目(jit-b-202017)

作者简介: 王艳芳(1983—), 女, 博士, 副教授, 从事膨胀土灾害治理、岩土工程相关科研及教学。

雨后,且滑坡深度通常不超过 6 m。即使是坡比很缓的膨胀土边坡,仍会发生滑坡灾害,据统计坡比缓于 1:5 的膨胀土边坡具有滑坡先例^[4-6]。与一般土质边坡的滑坡相比,膨胀土边坡滑坡更为复杂,采用常规抗剪强度指标对膨胀土边坡的稳定性进行分析时,计算所得稳定系数较高,但边坡仍有可能发生失稳。

目前,国内外已对膨胀土特性的边坡破坏开展了大量研究,如 Tripathy 等^[7]、杨和平等^[8]对击实黏土进行干湿循环试验,研究表明膨胀土膨胀变形及抗剪强度均随干湿循环次数的增加而降低;刘华强等^[9]、魏星等^[10]通过直剪试验研究干湿循环作用对重塑膨胀土抗剪强度的影响,结果证实裂隙的开展会导致膨胀土抗剪强度的降低,且黏聚力降低程度远大于内摩擦角;张坤勇等^[11]通过对简单膨胀土边坡开展了干湿循环后浅层稳定性分析,得出完全软化强度指标的合理使用范围为距地表 4.0 m 以内的土层。袁俊平等^[12]、李新明等^[13]通过有限元方法计算分析在裂隙与降雨条件下边坡稳定性,结果表明裂隙是雨水浸入膨胀土边坡的主要通道,裂隙的存在对边坡水利条件的改变有重要影响;Castellanos 等^[14]、曾召田等^[15]、Gregory^[16]对众多浅层膨胀土边坡滑坡案例进行分析,结合膨胀土室内试验,提出膨胀土浅层滑坡的发生主要是因为土体受干湿循环影响,裂隙发育导致土体发生软化、强度降低。

本文依托芜申航道南京段膨胀土边坡,该边坡中赋存蒙脱石、伊利石等亲水性矿物,且由于所处地理位置特殊,加之天然地质作用及人为影响的干扰,导致多次出现滑移^[17]。该边坡的稳定性需要考虑干湿循环效应的影响,本文基于有限元场变量考虑干湿效应对土体强度的影响,着重讨论膨胀土边坡在强度衰减前后稳定系数的差异性。

1 工程概况

航道边坡位于芜申线航道南京红卫桥一下坝段,本段航道按 III 级航道整治,航道水深、底宽、最小转弯半径分别为 3.2、45、480 m。经过多年自然作用,边坡发生多次滑坡,原地形坡度

约 12°,滑坡区域在平面上呈“圈椅状”,主滑方向与航道接近垂直,滑体纵向轴长 72 m,滑坡前缘宽约 150 m,后缘宽约 200 m,见图 1a)。经补勘发现场地内的换填土与黏土均为膨胀土,具有胀缩性,易膨胀开裂,在降雨作用下容易引发降雨入渗,使土体软化,影响岸坡的稳定性,滑动面主要位于可塑状黏土层③内,滑体主要为填土①、填土②及可塑黏土③,见图 1b)。

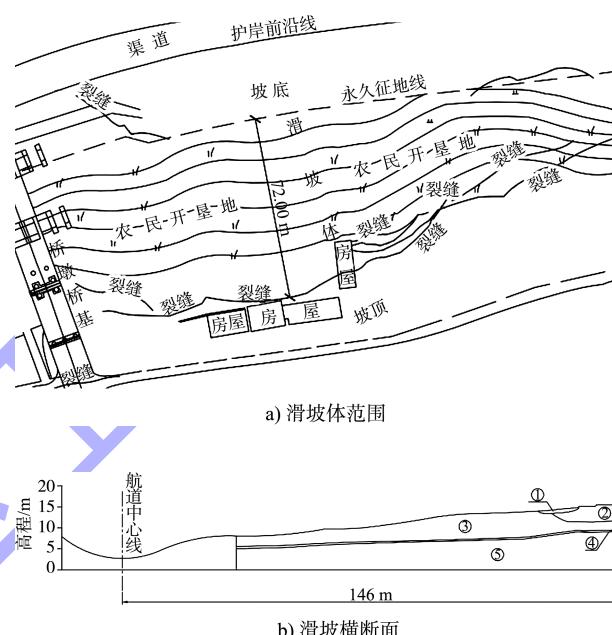


图 1 滑坡范围以及滑坡横断面

2 膨胀土干湿循环强度试验

2.1 试验土样及制备

试验土样取自滑体范围内的膨胀土,其基本物理性质指标见表 1,根据 GB 50112—2013《膨胀土地区建筑技术规范》,滑坡区域膨胀土为弱膨胀土。

表 1 试验用膨胀土物理性质指标

膨胀土名称	天然含水率/%	天然密度/ $(t \cdot m^{-3})$	液限/%	塑限/%	自由膨胀率/%
填土①	21.9	1.88	37.9	19.9	47.9
填土②	20.5	1.85	33.8	18.6	45.8
可塑黏土③	32.5	1.84	50.6	25.6	47.6

2.2 试验方案

用高为 20 mm、直径为 61.8 mm 的环刀将两种膨胀土原状样分别切削 30 个土样,选取密度相近(差值 $\leq 0.03 g/cm^3$)的 24 个作为试验用样,并

将其分为6组, 用于不同循环次数下的试验。将土样装入饱和容器并浸泡在水中进行抽气饱和, 使其均达到饱和含水率, 取出其中1组进行直剪试验, 作为膨胀土的初始强度, 其余5组分别进行1~5次的干湿循环。干湿循环过程分为两个阶段: 1) 脱湿阶段。将饱和土样放入烘箱内进行脱湿(温度控制在40℃), 脱湿过程中通过定时称质量监测土样含水率变化。当土样含水率降至缩限, 结束脱湿阶段。2) 饱和阶段。重新将土样装入饱和容器中进行抽气饱和, 抽气时间控制为1 h, 浸泡时间控制为12 h以上, 饱和阶段也是通过称质量监测土样含水率变化, 当土样12 h内质量恒定, 认为土样完全饱和, 此时即完成1次干湿循环。室内直剪试验采用快剪方法, 上覆压力分别取100、200、300及400 kPa, 剪切速率为0.8 mm/min, 剪切变形达6 mm时停止剪切。总体试验方案见表2。

表2 膨胀土重塑样干湿循环试验方案

土样 编号	初始含水 率/%	干密度/ (t·m ⁻³)	循环 幅度	脱湿温 度/℃	干湿循 环次数
1~4			用称质量 法控制土 样含水 率。循 环幅 度为缩 限~饱 和含水 率	40	0
5~8					1
9~12	20	1.65			2
13~16					3
17~20					4
21~24					5

2.3 试验结果及分析

弱膨胀土黏聚力 c 、内摩擦角 φ 随干湿循环次数的变化如图2所示。可以看出, 受干湿循环效应的影响, 3种膨胀土的抗剪强度均出现一定程度的衰减, 且随着干湿循环次数的增加, 抗剪强度衰减幅度逐渐减小, 其数值见表3。

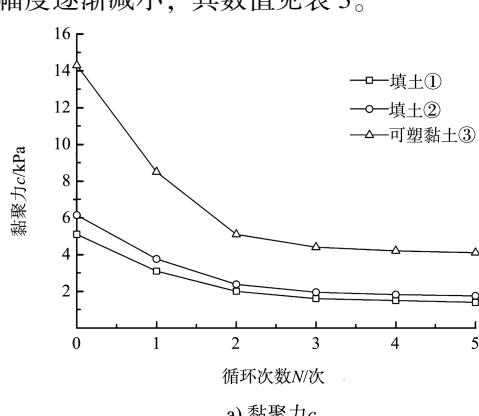
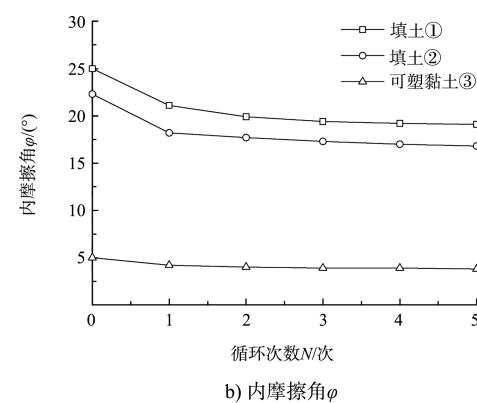
a) 黏聚力 c 图2 黏聚力 c 、内摩擦角 φ 随干湿循环次数的变化

表3 干湿循环次数对快剪强度指标的影响

膨胀土	干湿循 环次数	c/kPa	c 衰减 程度/%	$\varphi/(^{\circ})$	φ 衰减 程度/%
填土①	0	5.1	-	25.0	-
	1	3.1	39.2	21.1	15.6
	2	2.0	60.8	19.9	20.4
	3	1.6	68.6	19.4	22.4
	4	1.5	70.6	19.2	23.2
填土②	0	6.15	-	22.3	-
	1	3.76	26.5	18.2	18.4
	2	2.38	48.8	17.7	20.6
	3	1.95	58.5	17.3	22.4
	4	1.82	68.3	17.0	23.8
可塑黏土③	0	14.3	-	5.0	-
	1	8.5	40.6	4.2	16.0
	2	5.1	64.3	4.0	20.0
	3	4.4	69.2	3.9	22.0
	4	4.2	70.6	3.9	22.0
	5	4.1	71.3	3.8	24.0

由图2、3及表3可知, 随着干湿循环次数的增加, 弱膨胀土的黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的衰减主要发生在前3次干湿循环过程中, 之后均趋于稳定。干湿循环5次后, c 值衰减至原值的70%左右, φ 值衰减至原值的25%左右。黏聚力 c 的衰减幅度要比内摩擦角 φ 大, 其原因为随着干湿循环次数的增加, 膨胀土体的内部裂隙不断发展, 土体结构整体性遭到破坏, 土体内部因干湿循环产生损伤裂缝不可恢复, 故极大削弱了土体黏聚力, 大幅降低土体的抗剪强度。

3 干湿循环条件下航道膨胀土坡稳定分析

3.1 干湿循环的模拟

在有限元软件 ABAQUS 中通过设置抗剪强度参数 c 和 φ 随场变量变化实现干湿循环过程中 c 和 φ 大小的衰减。模拟步骤为：第 1 步，定义一个场变量，场变量值按表 3 的 c 和 φ 的衰减程度进行设置；第 2 步，定义随场变量变化材料模型参数；第 3 步，场变量初始值为 1，对应为未干湿循环时的土体状态；第 4 步，在后续的分析步中增加场变量大小，计算中止(数值不收敛)后对结果进行处理；第 5 步，确定稳定系数。稳定系数的确定方法有两种：1) 在整个计算过程中以数值计算不收敛作为土坡稳定的评价标准，对应的稳定系数 FV_1 为 1.01；2) 以顶部节点水平位移拐点为评价标准，得稳定系数为 0.99。这两个值非常相似，都十分接近极限平衡分析方法中给出的稳定系数 1。如图 3 所示，这两个值非常相似，都十分接近极限平衡分析方法中给出的稳定系数 1，说明了基于有限元场变量考虑干湿效应对土体强度的影响，分析膨胀土边坡稳定系数的可行性。

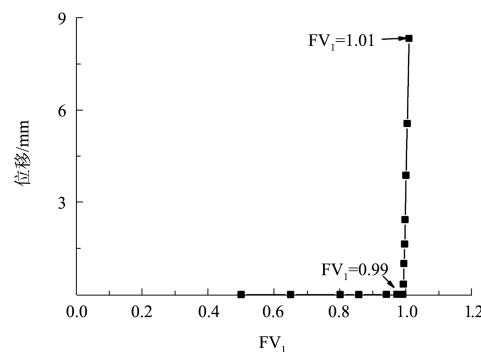


图 3 稳定系数随坡顶位移变化关系

3.2 膨胀土航道边坡稳定性分析

3.2.1 模型的建立

建立膨胀土边坡模型，见图 4。岩土体从上到下依次为：填土①、填土②、可塑黏土③、强风化土④、中风化土⑤。利用 ABAQUS 中所提供的场变量模拟干湿效应对土体强度的折减，对膨胀土边坡进行稳定性分析，计算干湿循环前、干湿循环 3 次、干湿循环 5 次 3 种工况下的边坡稳定系数。计算时土体选用摩尔-库仑本构模型，土层参数见表 4。

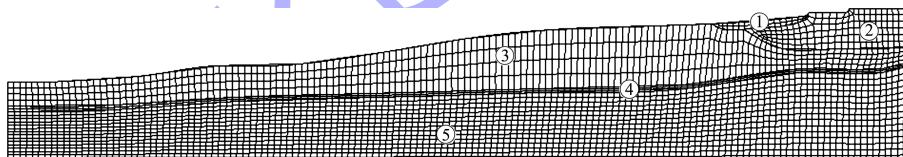


图 4 膨胀土边坡模型

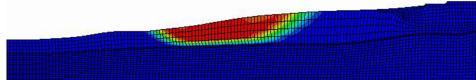
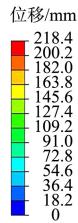
表 4 膨胀土边坡各土层计算参数

土层	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力 c /kPa	摩擦角 φ /°
填土①	2	0.41	5.1→1.6→1.4	25.0→19.4→19.1
填土②	2	0.41	6.15→1.95→1.75	22.3→17.3→16.8
可塑黏土③	5	0.42	14.3→4.4→4.1	5.0→3.9→3.8
强风化土④	7	0.40	35	20
中风化土⑤	8	0.40	40	20

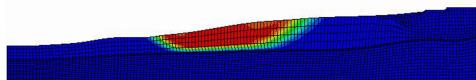
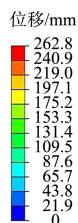
3.2.2 计算结果分析

不同干湿循环次数下土坡位移等值线扩展云图及塑性应变区扩展云图见图 5、6，膨胀土航道边坡稳定系数值见图 7。由数值计算结果可看出，未经历干湿循环时膨胀土航道边坡的 FV_1 值为

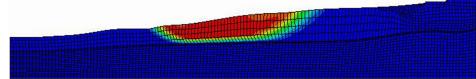
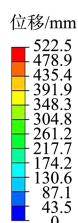
1.530~1.540，其中以边坡顶部出现水平位移拐点为边坡失稳评判标准，取值为 1.530；以数值计算中迭代不收敛为评判标准，则取值为 1.540，二者数值十分接近，说明此时膨胀土边坡稳定系数介于 1.530~1.540，为稳定状态。经历了 3 次干湿循环后膨胀土航道边坡稳定系数急剧衰减， FV_1 降低为 1.109~1.111，边坡不安全。第 5 次干湿循环时膨胀土航道边坡处于极限平衡状态， FV_1 为 1.011~1.012，边坡欠稳。因此，在用极限平衡法分析时，若采用不考虑干湿循环影响的膨胀土天然强度或饱和强度会导致结果无法反映工程的实际情况，存在安全风险。



a) 干湿循环0次

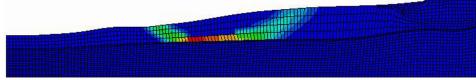
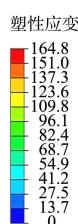


b) 干湿循环3次

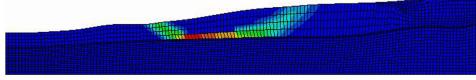
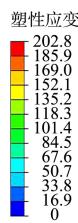


c) 干湿循环5次

图5 土坡中位移等值线扩展对比云图

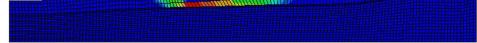


a) 干湿0次



b) 干湿3次

塑性应变



c) 干湿5次

图6 土坡中塑性应变区扩展对比云图 (单位: m)

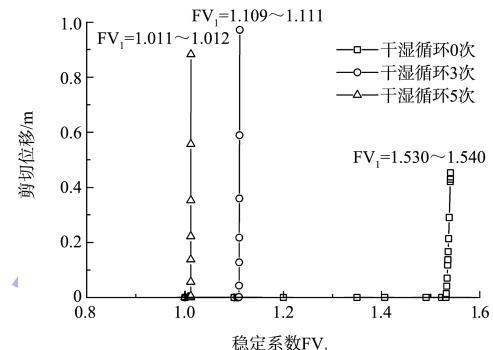


图7 不同干湿循环次数下航道膨胀土边坡稳定系数

4 膨胀土航道边坡治理措施及监测

按照“一次根治、不留后患”的治理原则, 膨胀土滑坡治理过程中, 抗滑桩是常选的支撑结构, 采用以挡为主, 排、截、支、护相结合的方案。鉴于本航道工程滑坡治理中的抗滑桩须同时起到保护临近的胥河大桥桥梁桩基免受膨胀土滑坡牵连造成基础破坏的目的, 故要求抗滑桩有足够的抗弯刚度, 能保证桩体抵抗滑坡的下滑力, 且不能有过大的水平向变形。选择门字形抗滑桩作为主要的支撑结构。膨胀土航道边坡的具体治理方案为: 沿着边坡设置3排门字形抗滑桩, 桩长25 m、桩径2 m, 桩顶采用连梁连接; 为减少临近桥梁区域外侧下滑位移的拖曳作用, 在减载换填区域的边缘设置隔离桩, 形成隔离带, 隔离桩孔间距350 mm, 深8~10 m, 共设3排, 交错布置, 孔内填充聚乙烯泡沫颗粒, 并用黄泥封孔; 考虑到膨胀土的胀缩特性, 在河道影响下易形成牵引型滑坡, 须采用有效的防渗措施尽量减少岸坡土体的湿度变化, 因此采用“两布一膜”形式复合土工膜作为防渗层, 膜上覆盖层采用掺石灰改良后的膨胀土作为换填土层, 要求其自由膨胀率不大于20%, 厚度约2 m, 并进行局部减载的措施; 坡体底部结合航道整治做桩基直立式挡墙, 治理方案断面见图8。

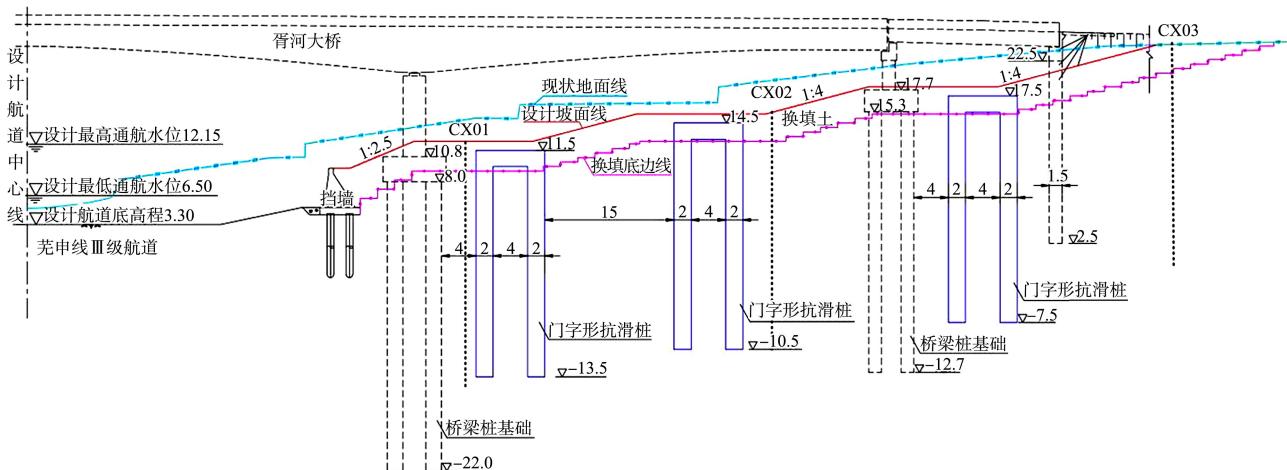


图 8 膨胀土航道边坡治理方案断面 (单位: m)

鉴于本次滑坡治理工程具有复杂性、多风险性，故在抗滑桩后侧土体中设置监测点，从2012年1月—2013年5月开展施工期和运营期的干湿循环条件下的土体深层水平位移监测，用于保证施工安全和质量，同时对处理方案的使用效果进行评价。各监测点的监测结果见图9，在地面以下10~15 m深度，深层水平位移出现明显的变化凸起分界点，与前期探测发现的裂缝深度

基本一致，此处为滑动面所在位置。在 2012 年 4—10 月抗滑桩桩基础开挖期间深层水平位移变化速率明显增大，随着 2012 年底抗滑桩施工完成开始发挥抗滑力，深层水平位移变化速率逐渐变小，至 2013 年 5 月已基本趋于稳定。监测结果显示，采用门字形抗滑桩+隔离桩+复合土工膜+换填+航道护岸挡墙是治理膨胀土滑坡的可行方案。

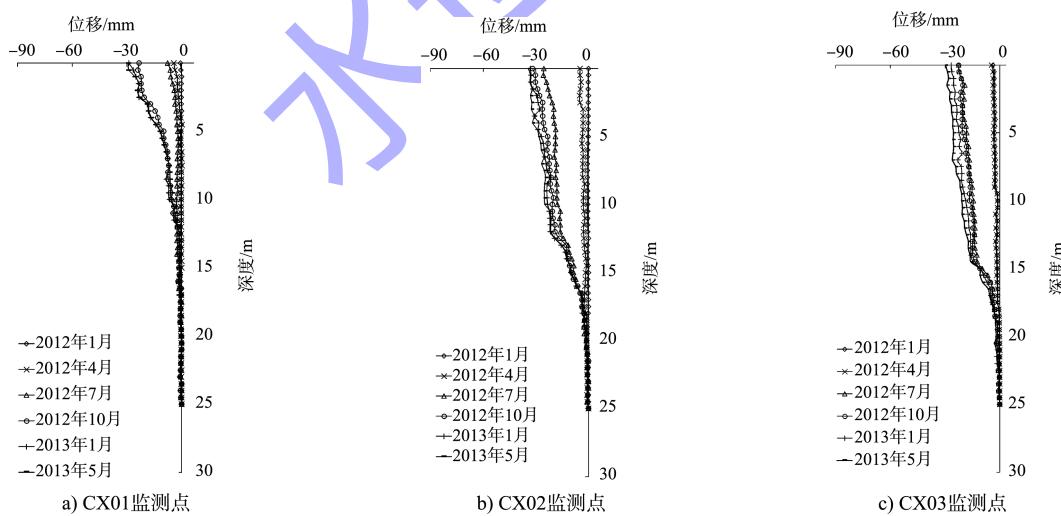


图 9 边坡深层水平位移监测结果

5 结论

1) 膨胀土的抗剪强度指标随着干湿循环次数的增加而衰减, 衰减主要发生在前3次干湿循环过程中, 之后的衰减程度很小, 抗剪强度指标趋于稳定。黏聚力 c 的衰减程度远大于内摩擦角 φ , 说明膨胀土边坡在自然状态下受气候影响, 其抗

剪强度也会不断降低。

2) 未经历干湿循环的膨胀土边坡, 采用天然抗剪强度指标与饱和抗剪强度指标的稳定性计算结果显示边坡均处于稳定状态。经历多次干湿循环后的膨胀土边坡, 采用其衰减后的抗剪强度指标的计算结果显示边坡将处于不稳定状态。因

此, 在对膨胀土边坡的整治与处理等工程中, 相关参数必须采用多次干湿循环后衰减的值, 否则无法保证工程的安全与质量。

3) 在膨胀土航道滑坡治理工程中, 选择门字形抗滑桩作为支撑结构, 是一种安全可靠、技术可行的支撑措施。

参考文献:

- [1] 程展林, 龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [3] 蔡正银, 朱润, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4555-4563.
- [4] 殷宗泽, 徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 454-459.
- [5] 曹玲, 王志俭, 张振华, 等. 降雨-蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 413-421.
- [6] CHEN T L, ZHOU C, WANG G L, et al. Centrifuge model test on unsaturated expansive soil slopes with cyclic wet-dry and inundation at the slope toe[J]. International journal of civil engineering, 2018, 18(10): 1341-1360.
- [7] TRIPATHY S, RAO K S, FREDLUND D G. Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils[J]. Canadian geotechnical journal, 2002, 39(4): 938-959.
- [8] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936-1941.
- [9] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 727-731.
- [10] 魏星, 王刚. 干湿循环作用下击实膨胀土胀缩变形模拟[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1423-1431.
- [11] 张坤勇, 徐娜, 陈恕, 等. 膨胀土完全软化强度指标试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 1988-1995.
- [12] 袁俊平, 殷宗泽. 考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1581-1586.
- [13] 李新明, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于工程包边法的膨胀土抗剪强度干湿循环效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 675-682.
- [14] CASTELLANOS B A, BRANDON T L, VANDENBERGE D R. Use of fully softened shear strength in slope stability analysis[J]. Landslide, 2016(13): 697-709.
- [15] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环效应及其对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 934-939.
- [16] GREGORY C H. On railway cutting and embankments: with an account of some slips in the London clay, on the line of the London and Croydon railway[J]. Minutes of the proceedings, 1844, 3(1): 135-145.
- [17] 夏炎, 刘海笑, 刘军. 膨胀土地区土工膜结合抗滑桩结构在滑坡治理与桥梁桩基防护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 248-252. (本文编辑 王璁)

(上接第 160 页)

2) 采用部件编辑器建立全参数化航道断面模型, 可控制航道参数沿程变化, 提高了航道和基准曲面的契合度, 并实现了“一次建模、参数控制”的多方案快速分析。

3) Civil 3D 软件在养护分析过程中存在数据互通性不足的缺点, 为提高效率需要对航道尺度定量分析等功能进行二次开发。Civil 3D 软件在航道养护分析中的思路及应用可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 程健, 赖普文. 内河航道安全管理与维护研究[J]. 中国水运, 2017(4): 38-39.
- [2] 长江航道局, 东海航海保障中心. 航道养护技术规范:

JTS/T 320—2021[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2021.

- [3] 望毅, 陈青红, 刘松. 水运工程勘察设计企业 BIM 技术体系探索[J]. 水运工程, 2018(8): 109-112.
- [4] 刘珂. 内河航道维护水平评价研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [5] 徐华, 薛伟, 闫杰超, 等. 巢湖风浪特征及泥沙运动对口门航道淤积的影响[J]. 水运工程, 2021(6): 115-120.
- [6] 张成. Civil 3D 在小清河复航工程施工图设计中的应用[J]. 人民长江, 2018, 49(S2): 144-147.
- [7] 李锐, 李正, 王飞. BIM 正向设计在内河航道疏浚工程中的应用[J]. 水运工程, 2019(12): 123-126.

(本文编辑 王璁)