

干湿循环下水泥改性膨胀土坡面防护边坡稳定性数值模拟研究

许杨少君 韩辉 姜静 王威 张成 张炎

宣城职业技术学院 建筑艺术系

DOI:10.32629/etd.v7i2.18983

[摘要] 为明确水泥改性膨胀土坡面防护层的防护效能,基于四种工况现场原位试验数据,采用FLAC3D软件,结合强度折减法与温度场等效模拟湿度场理论,开展降雨入渗及干湿循环耦合作用下边坡数值模拟,分析不同防护工况对边坡安全系数及位移场的影响,探究防护机制。结果表明:无防护边坡经三次干湿循环后,安全系数降幅达5.45%,X、Z方向最大位移分别为10mm和22mm;水泥改性防护可有效遏制强度衰减与位移变形,安全系数最大降幅仅2.92%,位移均控制在5mm以内;水泥掺量与边坡稳定性正相关,5%掺量防护效果最优。本研究可为膨胀土边坡防护工程设计提供理论支撑与数值参考。

[关键词] 膨胀土边坡;水泥改性;降雨入渗;干湿循环;数值模拟;边坡稳定性

中图分类号: U416.1+4 文献标识码: A

Research on Numerical Simulation of Slope Stability for Cement-Modified Expansive Soil Slope Protection under Wet-Dry Cycles

Shaojun Xuyang Hui Han Jing Jiang Wei Wang Cheng Zhang Yan Zhang

Department of Architecture and Art, Xuancheng Vocational and Technical College

[Abstract] To clarify the protective efficiency of the cement-modified expansive soil slope protection layer, based on the in-situ test data under four working conditions, the FLAC3D software was adopted to carry out the numerical simulation of slopes under the coupling effect of rainfall infiltration and wet-dry cycles, combined with the strength reduction method and the theory of simulating the humidity field with the temperature field equivalently. The influences of different protection working conditions on the slope safety factor and displacement field were analyzed, and the protection mechanism was explored. The results show that after three wet-dry cycles, the safety factor of the unprotected slope decreases by 5.45%, with the maximum displacements in the X and Z directions being 10 mm and 22 mm respectively; the cement-modified protection can effectively inhibit the strength attenuation and displacement deformation, with the maximum decrease of the safety factor being only 2.92% and all displacements controlled within 5 mm; the cement content is positively correlated with the slope stability, and the protection effect with 5% cement content is the optimal. This study can provide theoretical support and numerical reference for the design of expansive soil slope protection engineering.

[Key words] expansive soil slope; cement modification; rainfall infiltration; wet-dry cycle; numerical simulation; slope stability

引言

膨胀土具有显著的胀缩性、裂隙发育及强水敏感性的特点,在降雨入渗与干湿循环交替作用下易发生吸湿膨胀、强度劣化,诱发边坡浅层滑移,威胁基础设施安全^[1-3]。FLAC3D有限差分软件凭借高精度计算与直观可视化优势,在岩土工程数值模拟中应用广泛^[4-5]。水泥改性作为常用化学处治技术,可降低膨胀土胀缩性、提升力学强度,其坡面防护层能阻断水分交换,减轻环境因素对坡体的不利影响^[6-7]。目前,水泥改性防护层对边坡稳

定性的定量影响及耦合工况下的数值模拟研究仍需深化。基于此,本文依托现场试验数据,采用FLAC3D软件,对四种防护工况(无防护、3%、4%、5%水泥掺量)开展数值模拟,探究边坡安全系数与位移场变化规律,评价防护效能。

1 数值模拟方法与模型建立

1.1 FLAC3D边坡强度折减法

强度折减法由Zienkiewicz于1975年首次提出,是直接评估边坡稳定性的有效技术手段^[8]。其核心是在保持外荷载不变的

前提下,逐步折减土体粘聚力 c 、内摩擦角 ϕ ,直至边坡失稳,此时的折减系数即为安全系数^[8]。折减公式如下:

$$c_F = c / F_{\text{trial}} = 0 \quad (1)$$

$$\phi_F = \tan^{-1}((\tan\phi) / F_{\text{trial}}) \quad (2)$$

式中: c --土体实际的粘聚力; ϕ --土体实际的内摩擦角; c_F --折减后的粘聚力; ϕ_F --折减后的内摩擦角; F_{trial} --折减系数。

FLAC3D通过solve fos命令求解安全系数,适用于摩尔库伦本构模型,以计算收敛性作为失稳判断依据。

1.2 边坡模型建立

以现场原位试验4个典型工况坡段为研究载体,分别设定为无防护(1号坡)、3%(2号坡)、4%(3号坡)、5%(4号坡)水泥掺量防护坡段,坡率均为1:1.5,水泥石防护层厚度为10cm。模型网格划分采用“大气影响层加密、深层区域疏化”的原则,通过计算将大气急剧影响层统一设定为1.5m。

边坡土体采用摩尔库伦本构模型,参数基于现场及室内试验确定,见表1。容重、弹性模量、泊松比保持恒定,剪胀角设为 0° ,重点关注 c 、 ϕ 随干湿循环的衰减规律。模型先进行初始地应力平衡计算,平衡后清零初始位移场,确保模拟结果真实可靠。

表1 各土体初始参数取值表

	容重 (kN/m^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比	黏聚力 (kN)	内摩擦角 ($^\circ$)	剪胀角 ($^\circ$)
边坡土体	2100	6.579	0.37	43.7	18	0
3%水泥土	1600	13.552	0.35	67.8	23.4	0
4%水泥土	1600	14.934	0.35	83.5	25.6	0
5%水泥土	1600	15.855	0.34	103.6	27.9	0

1.3 强度衰减与吸湿膨胀模拟

降雨入渗与干湿循环耦合作用下,膨胀土边坡大气影响深度范围内的土体易产生裂隙、含水率上升,导致 c 、 ϕ 出现衰减,且衰减程度由浅至深逐步减小,大气影响深度以下的土体强度基本维持稳定。现场原位试验数据表明,该区域土体强度衰减呈线性分布特征,因此采用FLAC3D软件的FISH语言自定义编程,对大气影响深度范围内土体的 c 、 ϕ 进行线性折减,以此模拟土体强度的衰减过程。

膨胀土吸湿后会产生体积膨胀,膨胀势受约束时将产生膨胀力,改变坡体应力状态并增加失稳风险。由于FLAC3D难以直接模拟土体湿度场的分布与演化,采用缪协兴等^[9]提出的温度场等效模拟湿度场理论,利用温度场的升温膨胀效应,等效模拟湿度场引发的土体吸湿膨胀效应。

温度场与湿度场均遵循扩散/传导方程,且温度变化产生的热应变与湿度变化产生的湿应变表现形式一致。基于室内试验数据,测得膨胀土在饱和含水率条件下的膨胀力为65kPa,通过试算确定土体温度线膨胀系数为 $2.5 \times 10^{-5} / ^\circ C$ 。模拟过程中设定土体初始温度为 $0^\circ C$,表层饱和土体温度为 $200^\circ C$,温度沿坡体深度呈线性分布,通过温度膨胀效应精准模拟土体的吸湿膨胀过程。

2 数值模拟结果与分析

2.1 边坡安全系数变化分析

四种工况坡段初始及三次干湿循环后安全系数变化如图1所示。

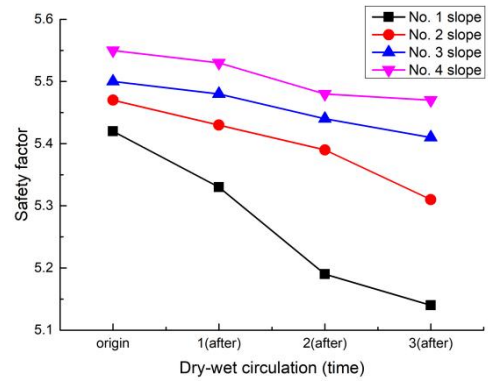


图1 数值模拟下边坡安全系数变化图

结合图1的数值模拟结果,各坡段安全系数的变化具有明显的规律性,具体分析如下:

初始状态下,各坡段安全系数均 >5.4 ,稳定性良好;水泥防护坡段初始安全系数高于无防护坡段,且随水泥掺量增大而提升。

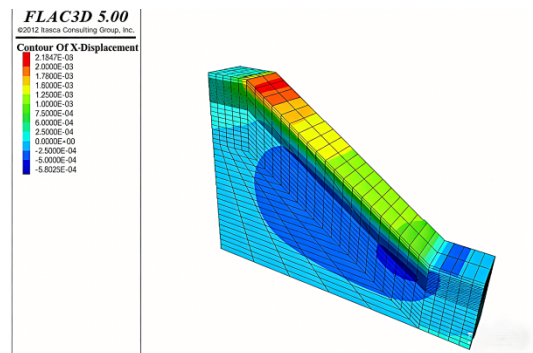
随干湿循环次数增加,各坡段安全系数均下降,但降幅差异显著。无防护坡段降幅5.45%;2号、3号、4号坡降幅分别为2.92%、1.64%、1.44%,仅为无防护坡段的53.6%、30.1%、26.4%。表明水泥掺量越高,边坡稳定性越优,能有效抑制强度衰减。

2.2 边坡位移场变化分析

各坡段初始及三次干湿循环后X、Z方向最大位移如表2所示,位移场分布如图2所示。

表2 各坡段X、Z方向最大位移变化表

坡段类型	初始状态 X 方向最	三次干湿循环后 X 方向	初始状态 Z 方向最大	三次干湿循环后 Z 方
	大位移 (mm)	最大位移 (mm)	位移 (mm)	向最大位移 (mm)
1号坡	2.1	10.0	4.8	22.0
2号坡	1.0	1.8	2.2	4.7
3号坡	0.9	1.5	2.0	4.2
4号坡	0.8	1.2	1.8	3.8



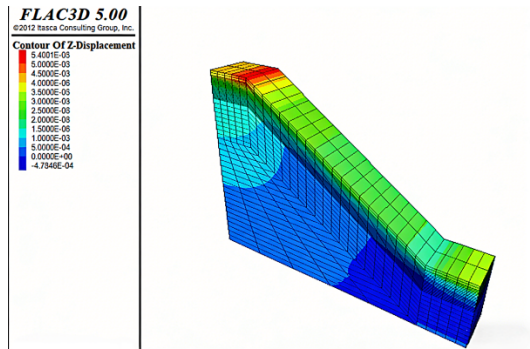


图2 5%水泥掺量防护坡段三次干湿循环后位移场分布图

结合表2位移数据及图2位移场分布特征, 可对各坡段位移演化规律得出如下分析:

初始状态下, 各坡段位移量较小, 且水泥掺量越高, 初始位移越小。

三次干湿循环后, 无防护坡段位移增长最显著($X=10.0\text{mm}$ 、 $Z=22.0\text{mm}$), 远超工程允许范围; 水泥防护坡段位移均控制在5mm以内, 且掺量越高, 位移增长越小。位移场分布显示, 无防护坡段位移集中在表层及坡脚, 水泥防护坡段位移分布均匀, 表层位移显著减小, 表明防护层可有效阻隔水分入渗、抑制膨胀变形。

3 结语

综合数值模拟与现场试验数据, 得出以下结论:

(1) 无防护膨胀土边坡在降雨与干湿循环作用下稳定性衰减显著, 三次干湿循环后安全系数降幅5.45%, 位移远超允许范围, 易发生浅层滑塌。

(2) 水泥改性防护层可有效提升边坡稳定性, 安全系数最大降幅仅2.92%, 位移控制在5mm以内, 满足工程安全要求。

(3) 水泥掺量与防护效果正相关, 5%水泥掺量防护方案综合效果最优。

(4) 温度场等效模拟湿度场结合FISH编程, 可精准模拟边坡

强度衰减与吸湿膨胀过程, 为膨胀土边坡数值模拟提供可行路径。

[课题]

宣城职业技术学院科研计划振兴项目: 刚性支挡+柔性防护复合膨胀土边坡支护方式效果研究(ZXPY2-2309)。

[参考文献]

[1]陈祖煜. 土质边坡稳定性分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.

[2]刘金龙, 栾茂田, 许成顺. 膨胀土边坡稳定性研究进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1601-1616.

[3]张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2017.

[4]李海枫, 张磊, 王鹏. FLAC3D在岩土工程数值模拟中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 789-796.

[5]赵尚毅, 郑颖人, 时卫民. 强度折减法在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1234-1240.

[6]杨果林, 张可能, 刘龙武. 水泥改性膨胀土的力学特性及微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 321-328.

[7]陈永贵, 李建林, 张世殊. 膨胀土边坡水泥改性防护技术研究[J]. 水利学报, 2020, 51(4): 456-463.

[8]Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.

[9]缪协兴, 陈荣华, 刘卫群. 温度场模拟湿度场的理论与实践[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2891-2898.

作者简介:

许杨少君(1996--), 男, 蒙古族, 安徽宣城人, 硕士生, 主要从事土木工程专业教学和科研工作。