

降雨及水位骤降作用下 膨胀土边坡换填加固效果数值研究

李强¹, 蔡舒凌², 俞翔³, 张福海^{3,4}, 刘峥嵘³

(1. 南京诚明建设咨询有限公司, 江苏南京 210012; 2. 南京城市建设管理集团有限公司, 江苏南京 210006;

3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

4. 河海大学疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏常州 213022)

摘要:为探究降雨及水位骤降作用下膨胀土边坡换填加固效果,以南京秦淮东河一期工程典型膨胀土边坡断面为研究对象,分析了水泥改良膨胀土的可行性,并基于FLAC3D软件建立了有限差分边坡模型,对不同换填深度及工况下膨胀土边坡的水分场和稳定性开展了分析。研究表明:换填法加固表层膨胀土可提高土体强度、减少降雨入渗量从而显著提高边坡稳定性;边坡安全系数与换填深度呈非线性关系,换填深度较小时,边坡发生局部浅层滑动,通过增加换填深度可使得滑动面下移并过渡到深层整体滑动,这一过程中边坡安全系数随换填深度的提高迅速增加,当潜在滑动面上不存在裂隙膨胀土时,边坡稳定性几乎不受换填深度影响。

关键词:膨胀土边坡;降雨;改良土换填;边坡稳定性;有限差分法

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2025)08-0049-0009

Numerical study on replacement and reinforcement effect of expansive soil slope under rainfall and sudden water level drop

LI Qiang¹, CAI Shuling², YU Xiang³, ZHANG Fuhai^{3,4}, LIU Zhengrong³

(1. Nanjing Chengming Construction Consulting Co., Ltd., Nanjing 210012, China;

2. Nanjing Urban Construction Management Group Co., Ltd., Nanjing 210006, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 4. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education,

Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: To explore the replacement and reinforcement effect of expansive soil slopes under rainfall and sudden water level drop, the typical expansive soil slope section of the first-phase project of Nanjing Qinhuai East River is taken as the research object. The feasibility of cement-modified expansive soil is analyzed, and a finite difference slope model is established based on FLAC3D software. The moisture field and stability of expansive soil slopes under different replacement depths and working conditions are analyzed in this study. The research results show that: Reinforcement of surface expansive soil by replacement method can improve soil strength, reduce rainfall infiltration, and thus significantly enhance slope stability; the safety factor of the slope has a non-linear relationship

收稿日期: 2025-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778211)

作者简介: 李强(1971—),男,高级工程师,本科,主要从事建筑、市政、水利工程等工程管理工作。E-mail:2942421045@qq.com

通信作者: 刘峥嵘(1997—),男,博士研究生,主要从事软土地基方面研究。E-mail:97zrlu@hhu.edu.cn

with the replacement depth. When the replacement depth is small, local shallow sliding occurs in the slope. Increasing the replacement depth can cause the sliding surface to move downward and transition to deep overall sliding. During this process, the slope safety factor increases rapidly with the increase of replacement depth. When there is no fractured expansive soil on the potential sliding surface, slope stability is hardly affected by the replacement depth.

Key words: expansive soil slope; rainfall; improved soil replacement; slope stability; finite difference method

膨胀土是一种具有吸水膨胀、失水收缩性质的特殊黏土,在干湿循环条件下会产生大量裂隙从而极易引起膨胀土河堤边坡产生变形以及滑坡事故。常见的膨胀土边坡的治理措施有削坡减载、砂浆锚杆、伞形锚杆结合简易抗滑桩、钢板桩、改良土换填等^[1]。其中改良土换填法通过压重和控制含水率双重作用控制裂隙发育,是处理膨胀土边坡的有效方法,若原边坡裂隙高度发育,则可采用部分挖除并换填裂隙土体以降低成本。

由于部分未换填的膨胀土仍受干湿循环作用,在采用极限平衡法分析膨胀土边坡稳定性时,这部分土体通常需根据裂隙发育程度等因素对强度进行折减^[2]。贺伟明等^[3]考虑了特定约束条件下的多向膨胀作用及其对土体抗剪强度的影响,王晓磊等^[4]在此基础上进一步建立了膨胀土受力状态与抗剪强度关系。为反映膨胀特性对边坡稳定性影响,极限平衡法通常直接对土条施加一定的膨胀力,然而膨胀力大小与降雨入渗量、膨胀变形量相关,传统极限平衡法在应用于膨胀土边坡时往往与实际有较大出入。

随着强度折减法被提出并应用于边坡稳定性分析,众多学者利用有限元开展了复杂工况下膨胀土边坡失稳机理研究。饶鸿等^[5]建立了非饱和膨胀土抗剪强度指标与含水率关系,探究了位移场在降雨过程中的演化规律;张良以等^[6]考虑了膨胀土强度随等效塑性应变的衰减并模拟了膨胀土边坡渐进性破坏过程;张坤勇等^[7]通过室内试验和有限元模拟,指出裂隙引起的土体强度衰减是导致边坡失稳的直接原因,而膨胀变形对边坡稳定性影响很小。

现有研究对改良膨胀土工程特性及原膨胀土边坡失稳机理已有较为充分的研究,但对降雨作用下膨胀土边坡换填加固效果的研究仍相对较少^[8-9]。为此本文选取秦淮东河工程典型断面,通过引入空气单元建立了裂隙坡面非均匀降雨入渗模型,分析不同换填深度下膨胀土边坡稳定性,为膨胀土边坡

治理设计和稳定性分析提供参考。

1 室内改良试验

1.1 试验方案

试验用膨胀土取自秦淮东河工程区沿线,膨胀土土样颜色为褐黄色,可见铁锰质斑、结核(图1),室内试验测得其自由膨胀率为51%,干湿循环后黏聚力为4.4 kPa,内摩擦角为10°。为减小对秦淮东河水质的影响,工程最终选择P·O 42.5普通硅酸盐水泥作为改良剂改性工程沿线的膨胀土。



图1 试验用膨胀土

室内改良试验首先对掺入不同含量的水泥改良膨胀土开展自由膨胀率试验以确定水泥最优掺量,随后根据轻型击实试验得到膨胀土及改良土最大干密度和最优含水率,按95%压实度制得环刀样后将其放置于相同水泥掺量的土中养护,养护14 d后进行无荷膨胀率试验、渗透试验和干湿循环试验,每次干湿循环结束后开展直剪试验,当强度指标基本稳定后试验终止。需要说明的是,水泥与土体拌匀后静置养护一段时间后再开展击实试验,以模拟现场施工条件。

1.2 试验结果

改良土自由膨胀率随水泥掺量变化曲线如图2

所示。水泥掺量小于3%时土体自由膨胀率受掺量变化影响很大,掺入3%水泥后改良土自由膨胀率为21%,此时膨胀性已基本消除。从膨胀土和水泥改良膨胀土击实曲线(图3)可见,掺入3%水泥后土体最大干密度和最优含水率有略微降低。室内试验测得的水泥改良土的物理力学参数见表1,其中黏聚力与内摩擦角为干湿循环试验中改良土强度稳定后的强度指标。

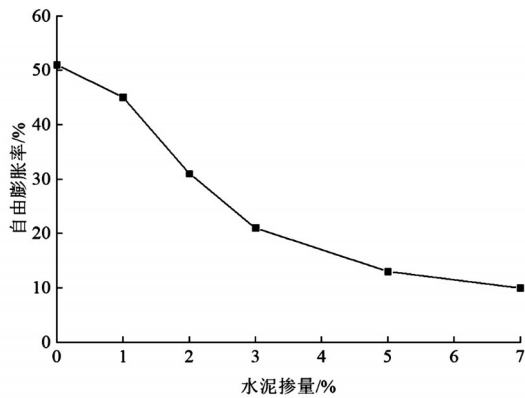


图2 自由膨胀率与水泥掺量关系

2 多场耦合数值分析方法

2.1 饱和和非饱和渗流计算

FLAC^{3D}软件基于达西定律计算饱和和非饱和渗流:

$$q_i = -k_{ij} \hat{k}(s) [p - \rho_f x_j g_j]_i \quad (1)$$

式中: q_i 为单位流量向量; k_{ij} 为饱和土渗透系数张量; s 为饱和度; $\hat{k}(s) = s^2(3 - 2s)$ 为基于饱和度 s 的修正系数; p 为孔隙水压力; ρ_f 为流体密度; x_j 为笛卡

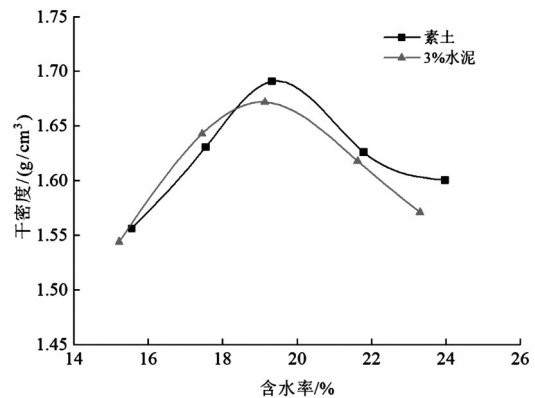


图3 击实试验结果

表1 水泥改良土物理力学参数

最大干密度/ (g/cm ³)	最优含水率/ %	自由膨胀率/ %	无荷膨胀率/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	渗透系数/ (10 ⁻⁶ cm/s)
1.67	19.1	21	2.0	63.1	24.0	17.6

尔坐标分量; g_j 为重力加速度分量。

对于土体饱和情况,当不考虑热膨胀效应时,孔压由流体本构方程控制:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (2)$$

式中: M 为 Biot 模量, Biot 模量可由流体模量 K_f 和孔隙率 n 直接计算: $M = K_f / n$; t 为时间; n 为孔隙率; ζ 为流体扩散作用引起的单位体积多孔介质中流体体积改变量,当流体不可压缩时,其值等于单元流量改变量; α 为 Biot 系数,本文假设固体颗粒不可压缩时, $\alpha = 1$; ε 为体应变。

对于非饱和渗流,本文通过 FISH 语言二次开发,选用 V-G 模型建立了孔压与饱和度的数学关系。V-G 模型一般形式如下^[10]:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (p/a)^n\right]^m} \quad (3)$$

式中: θ 为体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为

饱和体积含水率; a 、 n 、 m 为拟合参数。

为方便使用,本文将饱和度与含水率关系式 $\theta = ns$ 带入上式并整理得到:

$$p = a \left[\left(\frac{1 - s_r}{s - s_r} \right)^{1/m} - 1 \right]^{1/n} \quad (4)$$

式中: s_r 为残余饱和度。

2.2 基于空气单元法的裂隙坡面降雨入渗

未经处理的膨胀土边坡坡面在干湿循环后很容易产生开裂,形成由主裂隙和次生裂隙共同构成的膨胀土裂隙系统。其中,主裂隙在降雨入渗过程中起主控作用且数量有限,因此在降雨入渗分析时对主裂隙单独处理。风化层内众多的次生裂隙对膨胀土渗透性的影响同样不可忽略,本文将风化层内的膨胀土渗透系数取原状膨胀土的100倍^[11]。

对于降雨强度较高的工况,雨水会优先流向土体表面渗透性较强的裂隙从而发生不均匀渗透,传统流量入渗边界无法模拟这一过程^[12],也容易产生

地表单元的孔压大于0的不正确结果。本文在裂隙土上表面额外设置一层较薄且不参与力学计算的空气单元,从而自然地模拟地表径流顺沿裂隙渗入边坡内部的过程,其渗透系数根据现有文献取膨胀土渗透系数的1 000倍^[13]。

2.3 边坡稳定强度折减基本理论

强度折减法采用将土体抗剪强度参数 c 和 $\tan \varphi$ 同比例折减至边坡进入极限状态的方法计算安全系数,潜在滑面由强度折减程序自动确定。边坡折减至极限平衡状态时,土体强度参数表达式为

$$c_{\text{cri}} = c/F_s, \quad \varphi_{\text{cri}} = \arctan(\tan \varphi/F_s) \quad (5)$$

式中: c_{cri} 和 φ_{cri} 分别为边坡失稳时的临界黏聚力和内摩擦角; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; F_s 为安全系数。

为获取不满足稳定条件的边坡的安全系数,本文先采用一个较大的系数 A 对抗剪强度参数同比例放大,使边坡满足稳定条件,再调用强度折减法程序进行求解,此时边坡安全系数定义为

$$F_s = \frac{c'}{A \tan \varphi_{\text{cri}}} = \frac{\tan \varphi'}{A \tan \varphi_{\text{cri}}} \quad (6)$$

式中: c' 和 φ' 分别为放大后黏聚力和内摩擦角; A 为放大系数。

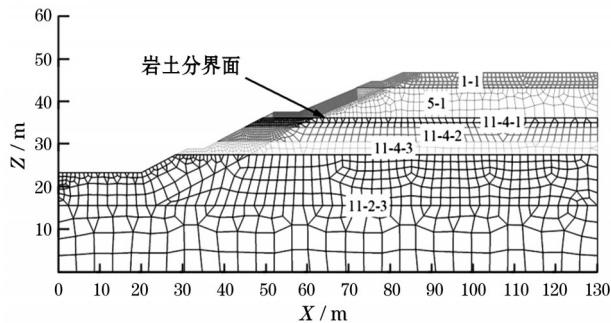


图4 典型断面有限差分模型

3 数值模型

3.1 有限差分模型

本文选取南京秦淮东河一期工程西村隧洞出口至九乡河起点段 X8+700 断面作为典型断面,其地质结构为土/岩双层结构 II,上部为具有弱膨胀性的 5-1 粉质黏土层,下部为基岩。综合考虑现有膨胀土边坡治理措施和经济性,工程拟按 1:2.5 放坡并以改良土回填的形式处理开挖坡面,对膨胀土层表面网格局部加密后得到的有限差分网格,如图 4 所示。

本文根据 Pei 等^[14]的研究成果,对原膨胀土边坡设置了主裂隙,如图 5 所示,其深度为 1 m,间距为 2 m,同时在边坡表面设置了一层较薄的空气单元以模拟雨水不均匀入渗。

3.2 土体参数

将膨胀土分为 2 层强度不同的土层以反映次生裂隙对边坡稳定性的影响^[2],如图 6 所示,大气影响深度 h 范围内的土体被划分为上下两个区域:上部 $2/3 h$ 厚度为裂隙充分发育区,土体强度采用裂隙充分发展强度;下部 $1/3 h$ 厚度为过渡区,土体强度采

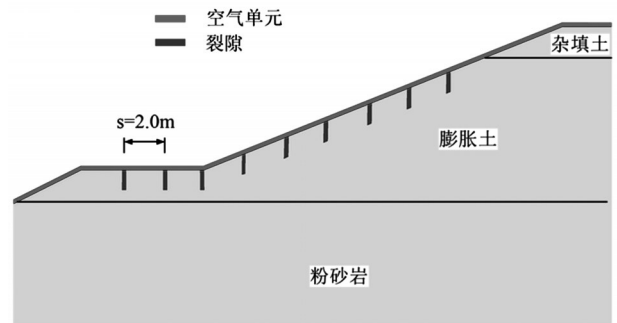


图5 基于空气单元法的坡面入渗模型

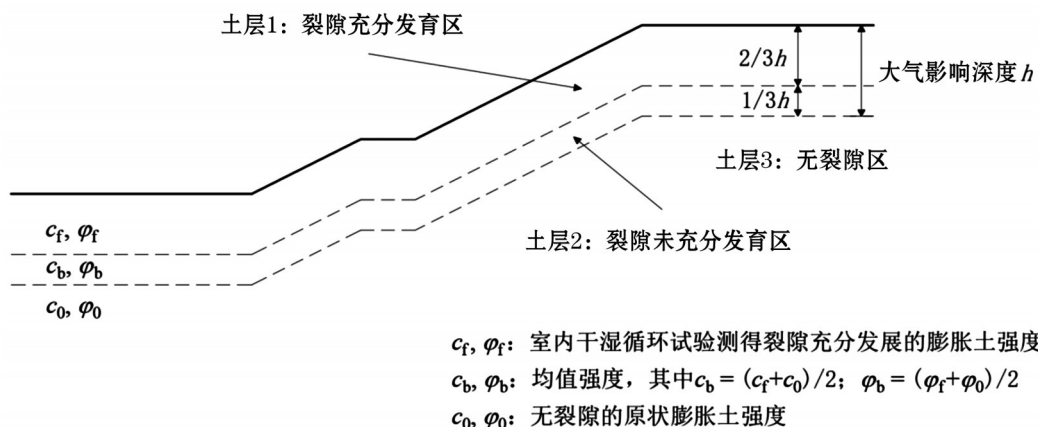


图6 大气影响深度范围内的土体强度折减模式

用裂隙充分发展和无裂隙原状膨胀土的均值强度。本文进一步假设大气影响深度与改良土层厚度无关,且大气影响深度范围内的非改良土层强度保持不变。

岩土体物理力学参数见表2,水土特征曲线参考典型弱膨胀土压力板试验结果^[15],如图7所示,通过数据拟合得到基于Van-Genuchten模型的非饱和和渗流参数(表3)。需要说明的是,受试验条件限制,水泥改良土的水土特征曲线尚未测得,采用膨胀土的水土特征曲线作为替代,这可能导致相同含水率下膨胀土吸力略微增大。

3.3 计算工况

本文根据《膨胀土边坡防治技术规程》(DB32/T4302—2022)给出的非膨胀性土料覆盖层厚度建议值及相关工程经验选取水泥改良土换填深度为0 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m,其中对于0 m换填工况,膨胀土坡面按2.2节所述方法设置主裂隙以考虑不均匀入渗。

数值模拟分为3个阶段:①降雨开始前,河道水位为5.08 m(常水位工况),坡内初始孔压依高程线性分布,最大负孔压为-50 kPa^[16]。②基于空气单元法模拟降雨,按100年一遇设计单日降水量确定降

表2 岩土体物理力学参数

地层	土层名称	天然密度/ (g/cm ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	渗透系数/ (10 ⁻⁶ cm/s)
1-1	杂填土	1.98	6.00	0.30	20.0	16.7	100.00
5-1	粉质黏土、黏土(弱膨胀性)	2.01	8.64	0.30	40.6	16.9	0.06
11-2-3	微风化粉砂质泥岩	2.59	3 000.00	0.32	1 500.0	48.2	20.00
11-4-1	强风化粉砂岩	2.70	5 000.00	0.22	60.0	20.0	100.00
11-4-2	弱风化粉砂岩	2.70	6 500.00	0.22	3 500.0	48.8	80.00
11-4-3	微风化粉砂岩	2.71	8 000.00	0.27	4 000.0	48.8	20.00

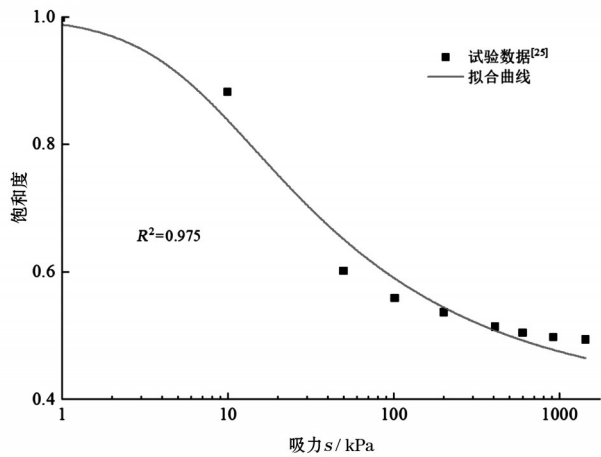


图7 弱膨胀土典型水土特征曲线

表3 基于Van-Genuchten模型的非饱和和渗流参数

孔隙率/ <i>n</i>	残余饱和度 <i>S_r</i> / %	Van-Genuchten模型参数		
		<i>a</i> / kPa	<i>n</i>	<i>m</i>
0.5	40	6.078	1.429	0.286

度迅速降低,在吸力达到最大负孔压后保持不变,对应饱和度最小值为0.6505。降雨1 d后,0~3 m深度范围内的土体饱和度相比初始状态有明显上升(图9),其中未经改良土换填的膨胀土坡面由于设置了裂隙,坡面土体整体饱和度显著高于存在换填的工况,说明改良土换填加固膨胀土边坡可通过抑制坡面主裂隙发育有效减少降雨入渗量。另一方面,由于水泥改良土渗透系数低于次生裂隙发育的膨胀土,深度3m处的土壤饱和度随改良土换填厚度的增加而降低,表明增加换填厚度可减缓降雨入渗速率。

由于无裂隙膨胀渗透系数远小于上部裂隙发育膨胀土,以大气影响深度(3m)为分界线,雨水下渗至分界线处后在裂隙发育区底部聚集。从图9可见,饱和度先随深度的增加而降低,后又略微提高,

雨强度为200 mm/d,历时1 d,河道水位维持在洪水水位8.8 m。③降雨结束,洪水位以0.5 m/d速率^[17]骤降至常水位。

4 计算结果及分析

4.1 水分场分析

边坡初始饱和度云图及测线位置节点饱和度随深度变化规律如图8所示,水位线以上土体饱和

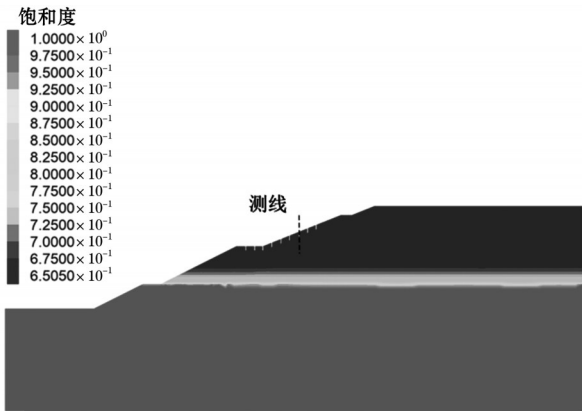


图8 膨胀土边坡初始水分场

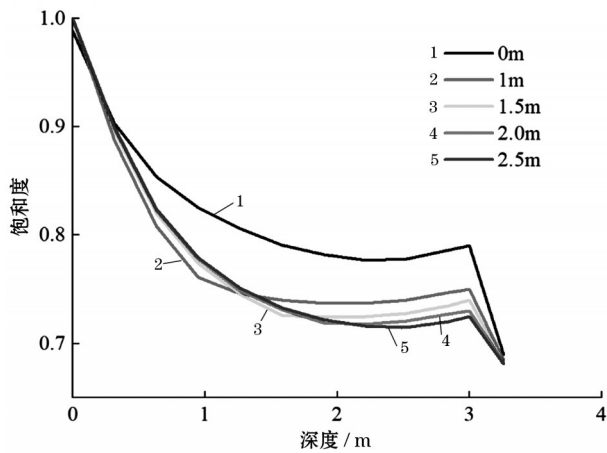


图9 降雨1 d后饱和度随深度变化

并以深度3 m为拐点,饱和度迅速降低至初始饱和度和。

降雨结束后,坡面土体饱和度高与坡内土体饱和度,说明此时雨水仍存在下渗趋势。为研究不同深度土体的含水率变化,以换填深度2.5 m的膨胀土边坡为例,先采用强度折减法确定潜在滑动面后,在滑动面上设置监测点,如图10所示,测点A位于滑动面下部,靠近坡面且位于大气影响深度内;测点B位于滑动面中部且在大气影响范围外。降雨结束、水位骤降过程中监测点孔压变化如图11所示。可以看出,在重力作用下,湿润锋下移使测点A在降雨结束约1.4 d后孔压达到峰值-16.9 kPa,由于表层土体失去水分补给的影响,孔压随后逐渐下降;测点B上部为渗透系数较小的无裂隙膨胀土,孔压缓慢上升且变化幅度小。

4.2 破坏模式及稳定性分析

通过上述方法得到常水位工况不同换填深度下的边坡安全系数。如图12所示,换填加固表层1 m膨胀土并不能显著提高边坡安全系数,此时安

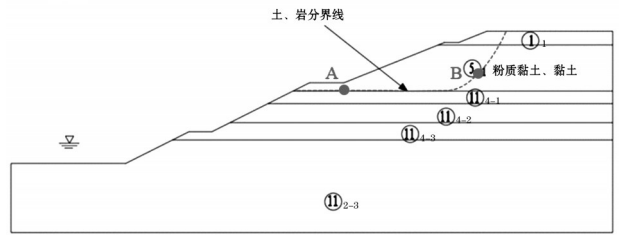


图10 断面监测点布置

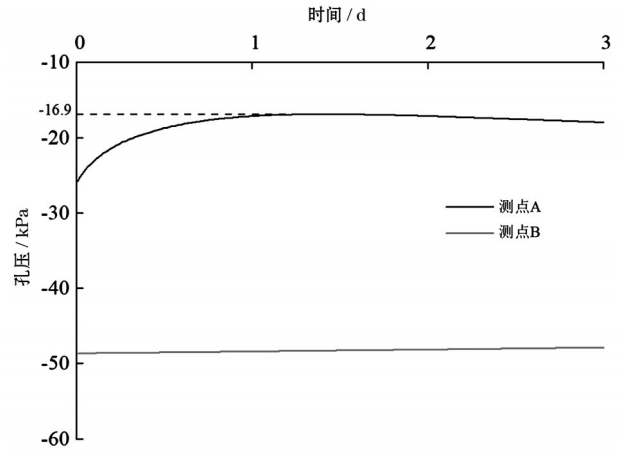


图11 监测点孔压变化

全系数为1.13,仍不满足规范要求;换填1 m到2 m时,安全系数随换填深度迅速增加并达到2.28,但继续增加换填厚度已无法继续提高边坡稳定性。因此,对于常水位工况,最优换填深度处于1.5 m到2 m之间。

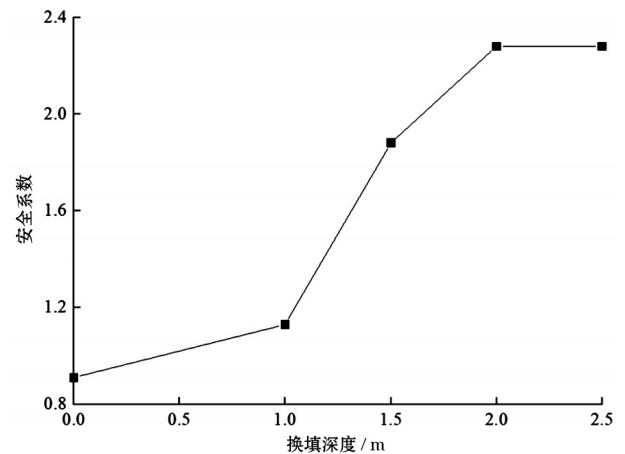


图12 常水位工况下边坡安全系数与换填深度关系

通过失稳临界状态的坡内最大剪应变增量得到常水位工况下潜在滑动面形状。如图13所示,换填深度为0 m和1 m时,潜在滑动面大部分区域为直线,刚好位于裂隙充分发育区和未充分发育区分

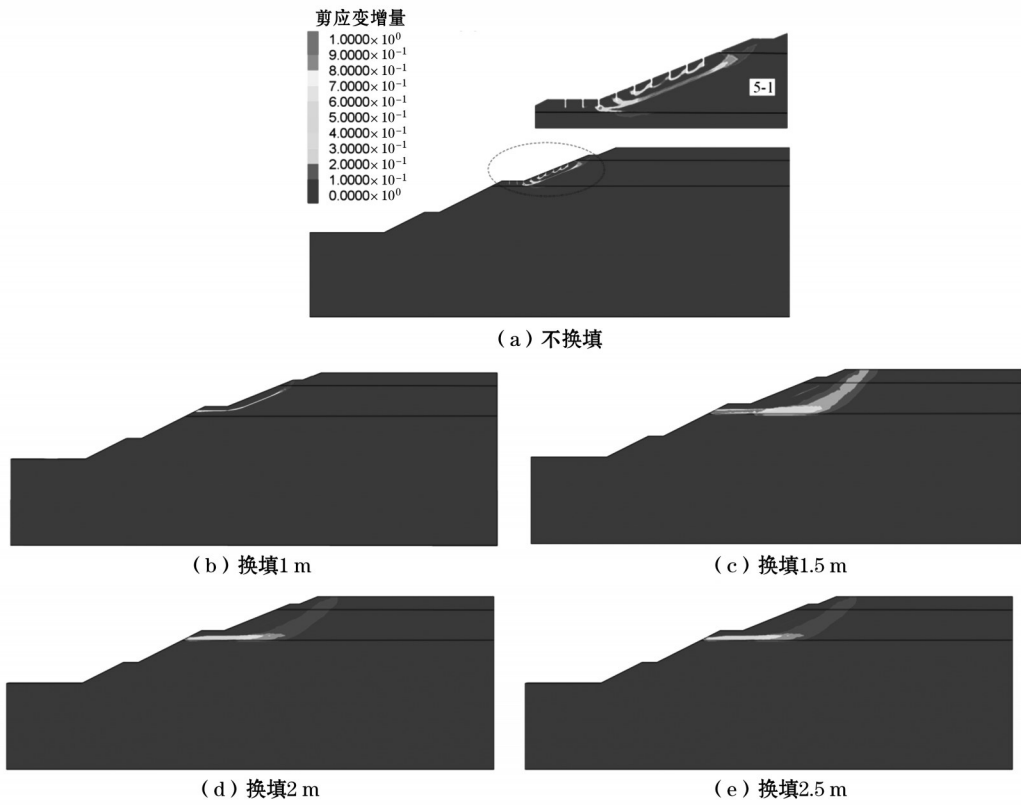


图13 常水位工况下边坡破坏模式

界面,滑动面少部分区域穿过改良土层,此时具有较高强度的改良土不能显著提高滑动面上的抗滑力,因而安全系数增长不明显。当换填厚度为1.5 m时,滑动面从裂隙充分发育区和未充分发育区分界面移动到更深位置,主要穿过无裂隙区膨胀土,滑动面形状的改变使边坡安全系数迅速提高。换填厚度提高至2 m时,潜在滑动面位置几乎不再产生变化,但安全系数仍有提高,原因在于换填1.5 m时,滑动面下端仍有少量未经改良且位于大气影响深度范围内的膨胀土,当这部分膨胀土也被改良后,滑面上只存在杂填土、无裂隙膨胀土、改良土,此时继续增加换填深度已无法进一步提高边坡稳定性。

降雨是诱发土质边坡滑坡的重要因素之一,图14反映了降雨1 d后边坡安全系数与换填深度关系,可以看出此时安全系数随换填深度的变化趋势与图12相似,换填深度0~2 m时安全系数迅速增加,但与常水位工况不同,继续增加换填深度后安全系数仍有微弱提高,换填深度2 m、2.5 m时安全系数分别为1.85和1.87。通过图15与图13对比可见,对于存在改良土换填的膨胀土边坡,降雨前后滑动面形状保持不变,因此可以判断,当潜在滑面上不存

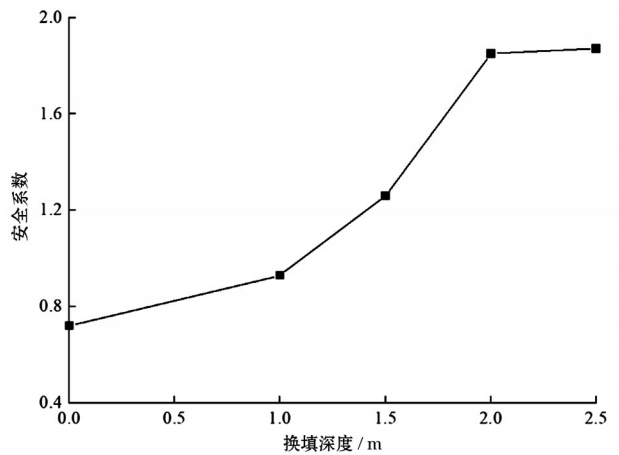


图14 降雨1 d后边坡安全系数与换填深度关系

在裂隙膨胀土时,增加换填深度仍然可以通过改善表层土壤防渗性、降低坡内土体含水率的形式提高边坡稳定性。结合失稳临界状态下的剪应变增量云图(图13)及饱和度分布规律(图9)还可以看出,降雨1 d后边坡更容易沿主裂隙产生一系列小的浅层滑动面,这说明降雨对诱发自然膨胀土边坡特有的浅层局部滑动有重要影响。

利用强度折减法在不同时刻对边坡开展稳定性分析,得到了水位骤降过程中边坡安全系数时程

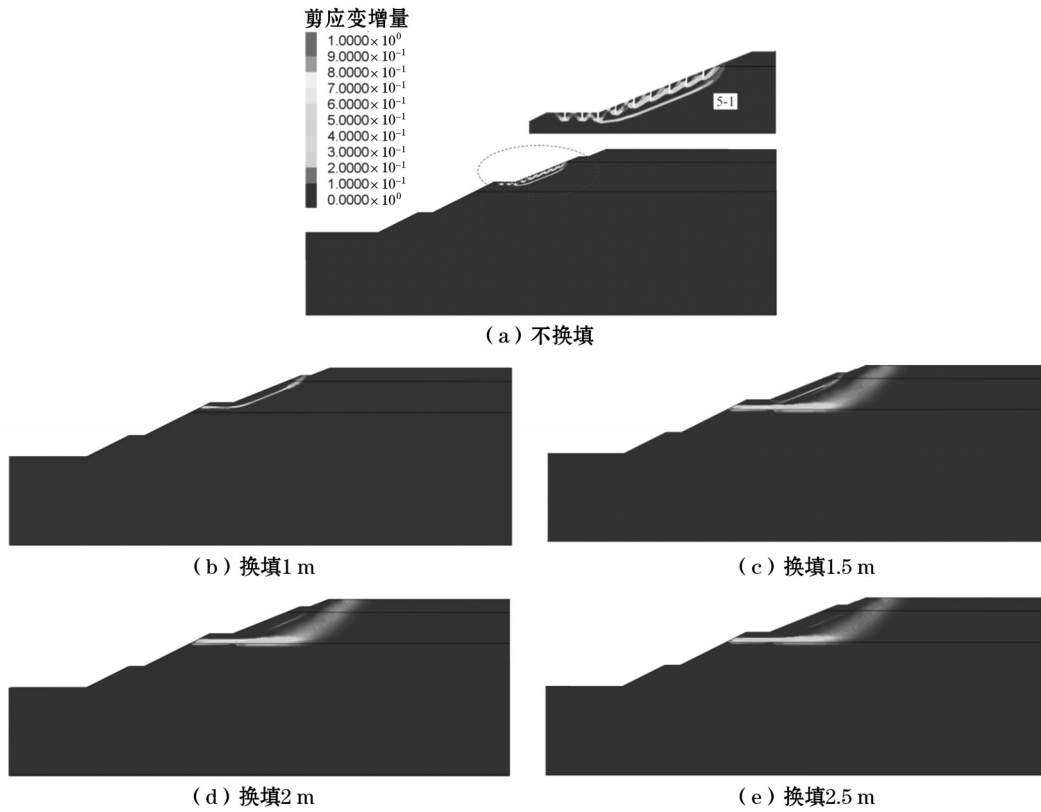


图15 降雨1d后边坡破坏模式

曲线,如图16所示,水位骤降约1.5 d后安全系数达到最小值1.74。一般认为水位骤降会使渗流力指向河岸从而加剧下滑力,使边坡稳定性进一步降低,而对于本案例中的膨胀土边坡而言,其降雨结束时水位线低于岩土分界面(图17),因而水位骤降对安全系数影响较小,结合图11可以看出,安全系数最小值和测点A孔压最大值出现时刻基本吻合,故可推断湿润峰在重力作用下下移至滑动面是造成安全系数降低的主要因素。

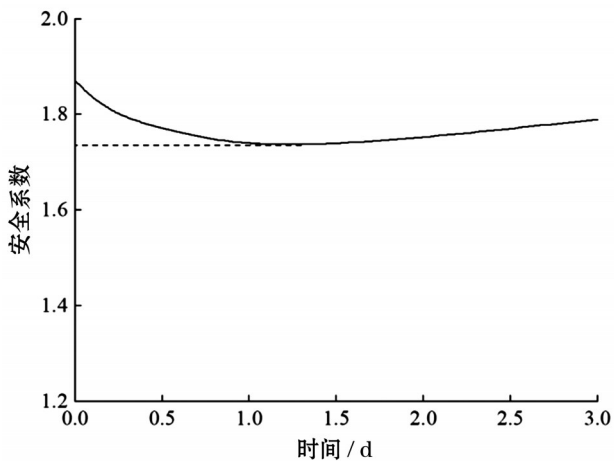


图16 水位骤降工况下安全系数时程曲线

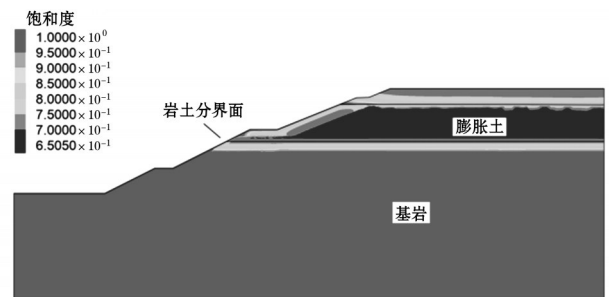


图17 降雨结束后边坡饱和度

5 结论

本文在膨胀土室内改良试验的基础上,建立了考虑裂隙发育、非饱和渗流的膨胀土边坡有限差分模型,对降雨及水位骤降作用下不同换填深度的膨胀土边坡开展了水分场及稳定性分析,主要得出以下结论:

(1)换填加固膨胀土边坡可显著提高膨胀土边坡稳定性,换填深度增加至2 m过程中,边坡由局部浅层滑动过渡为深层整体滑动,这一过程中安全系数迅速上升,在此基础上继续增加换填厚度仅对降雨工况下边坡稳定性有微弱影响。

(2)改良土换填可提高土体强度、减少降雨入

渗进而提高边坡稳定性,其中土体强度的提高占主导。换填厚度为2 m时,潜在滑动面上已不存在裂隙膨胀土;换填厚度增加至2.5 m时,常水位工况的边坡安全系数保持不变,降雨工况的安全系数提高了0.02。

(3)降雨结束时坡内水位线低于岩土分界面,因此河道内水位骤降对边坡稳定性影响较小,湿润锋在重力作用下持续下移,使潜在滑面部分区域的孔压持续上升,是造成安全系数进一步下降的原因。

参考文献:

- [1] 汪恩良,杜世林,姜海强,等. 不同改良方法下膨胀土性能变化试验研究[J]. 东北农业大学学报,2023,54(12): 72-87.
- [2] 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.
- [3] 贺伟明,石胜伟,蔡强,等. 考虑膨胀作用对抗剪强度影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(增刊2):3524-3533.
- [4] 王晓磊,田存,黄丽丽,等. 裂隙膨胀土边坡稳定性分析方法研究[J]. 湘潭大学自然科学学报,2016,38(1):27-32.
- [5] 饶鸿,王金淑,赵志明,等. 基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析[J]. 水文地质工程地质,2021,48(1):154-162.
- [6] 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.
- [7] 张坤勇,孙斌,李威,等. 膨胀土边坡失稳机理分析及基于完全软化强度的边坡极限平衡计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):75-94.
- [8] 翟聚云,樊姝芳,言志信,等. 建筑垃圾膨胀土回填地基工程特性及应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(3):321-327.
- [9] 王教辉,王振友,茆丽霞,等. 刘老洞泵站地基膨胀土特征及改良研究[J]. 江苏水利,2014(3):13-16,19.
- [10] Van GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5): 892-898.
- [11] 郑少河,姚海林,葛修润. 裂隙性膨胀土饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学,2007,28(增刊1):281-285.
- [12] 侯晓萍,徐青,陈胜宏. 用空气单元法求解渗流场的逸出边界问题[J]. 岩土力学,2015,36(8):2345-2351.
- [13] 胡静,陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. 岩土力学,2003(2):281-283,287.
- [14] PEI P, ZHAO Y, NI P, et al. A protective measure for expansive soil slopes based on moisture content control [J]. Engineering Geology,2020,269(5):105527.
- [15] 孙德安,张俊然,吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学,2013,34(7):1839-1846.
- [16] 唐栋,李典庆,周创兵,等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学,2013,34(11):3239-3248.
- [17] 张珂峰. 库水位骤降联合降雨边坡稳定敏感性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(6):17-20.