

工业甘蔗渣-低碱生态水泥改良膨胀土边坡稳定性数值模拟分析

韦闻睿, 郭炎波*, 陈天力, 蒙法翼, 黄巍, 苏敏成, 陈书卿, 李磊

广西环保产业投资集团有限公司, 广西 南宁 530200

摘要:为研究工业甘蔗渣(在膨胀土中的质量分数为1.2%)—低碱生态水泥(在膨胀土中的质量分数为7.0%)改良膨胀土边坡(以下简称改良膨胀土边坡)在降雨环境下的稳定性,分析其与未改良膨胀土边坡的差异,以及边坡稳定性与变形、渗流的内在联系,基于室内试验获得的土壤参数,采用数值模拟软件COMSOL Multiphysics进行大尺寸边坡降雨强度折减模拟分析,探究降雨过程中2种土质边坡有效饱和度、塑性应变、位移与边坡稳定性系数的变化规律。结果表明:1)连续降雨后,2种土质边坡的有效饱和度整体变化较小,改良膨胀土边坡的有效饱和度大于未改良膨胀土边坡;在仅考虑降雨影响条件下,边坡破坏时改良膨胀土边坡表层部分的有效饱和度大于未改良膨胀土边坡。2)在降雨条件下,未改良膨胀土边坡的塑性变形主要发生在坡脚,改良膨胀土边坡的塑性应变集中在坡顶,改良膨胀土边坡的塑性应变略大于未改良膨胀土边坡。3)降雨后,2种土质边坡的位移均发生在坡顶,未改良膨胀土边坡的位移约为改良膨胀土边坡的2倍;在相对较大的位移范围内,未改良膨胀土边坡受影响土体的面积更大,改良膨胀土边坡受影响范围仅在塑性变形周围50 m内,未改良膨胀土边坡的位移发育至坡脚处。4)考虑降雨强度折减法后,两种土质边坡的坡体内部均出现U型塑性应变区域,表层土体与深层土体发生相对滑动,未改良膨胀土边坡的塑性应变约为改良膨胀土边坡的3倍;未改良膨胀土边坡和改良膨胀土边坡的稳定性系数分别为1.12、1.14,未改良膨胀土边坡的最大位移约为改良膨胀土边坡的4倍。

关键词:膨胀土边坡;稳定性;数值模拟;有效饱和度;塑性应变

中图分类号:U213.1⁺3

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0054-08

引用格式:韦闻睿,郭炎波,陈天力,等.工业甘蔗渣-低碱生态水泥改良膨胀土边坡稳定性数值模拟分析[J].

山东交通学院学报,2025,33(5):54-61.

WEI Wenrui, GUO Yanbo, CHEN Tianli, et al. Numerical simulation analysis of the stability of expansive soil slopes improved by industrial bagasse-low-alkali ecological cement[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(5): 54-61.

0 引言

膨胀土边坡失稳的原因较复杂,一般从滑坡发生机理、变形过程和变形规律方面解释。膨胀土边坡稳定性受土壤的力学性质、膨胀性和渗透性等影响,外界环境因素,如降雨、日晒与冰冻等,是引发膨胀土边坡失稳的重要原因。

殷宗泽等^[1]总结膨胀土边坡裂隙产生机理与膨胀土边坡失稳原因,解释裂隙开展与边坡失稳特征的联系,多裂隙性导致膨胀土边坡易失稳,强调在分析、计算、施工等环节均要考虑膨胀土边坡裂隙影响。陈善雄等^[2]将现场勘测的裂隙空间信息(高程、倾角、厚度、长度)纳入由均质土层、裂隙充填薄层及张拉裂隙组成的模型,考虑裂隙面夹层的强度参数,建立膨胀土裂隙边坡地质模型,分析膨胀土边坡裂隙发育

收稿日期:2023-10-23

第一作者简介:韦闻睿(1993—),男,广西扶绥人,工程师,主要研究方向为环境工程,E-mail:253028282@qq.com。

*通信作者简介:郭炎波(1987—),男,广西蒙山人,工程师,主要研究方向为项目管理和土木工程,E-mail:guoyanbo032@163.com。

后的稳定性与特征,发现考虑地表垂直裂隙与坡脚裂隙后,边坡的安全系数显著减小,产生折线型滑动面,与现场典型滑坡破坏特征基本一致。周健等^[3]通过膨胀土边坡干湿循环模型试验获得膨胀土抗剪强度随边坡干湿循环的变化规律,采用有限元强度折减法分析干湿循环后边坡的稳定性,结果表明随干湿循环次数的增大,边坡黏聚力和内摩擦角不断减小,边坡稳定性降低,安全系数减小,黏聚力下降较明显,内摩擦角变化较小。李炎隆等^[4]基于有限元软件 ABAQUS 考虑降雨入渗的边界条件,采用强度折减法求解边坡的最大位移与安全系数,分析边坡的稳定性,定性分析与数值计算结果均表明,南水北调中线工程淇河倒虹吸基坑边坡稳定。You 等^[5]为保证深基坑开挖安全,认为基坑底部所在上承压含水层的承压水头应低于基坑底部 1 m,下承压含水层的承压水头应降至安全水位,避免出现隆起现象。蔡正银等^[6]采用离心模型试验分析干湿循环作用下的膨胀土渠道边坡稳定性,研究渠道边坡的破坏机理,发现由通水和停水造成的渠道干湿循环破坏模式主要表现为渠坡整体发生浅层失稳破坏。Huang 等^[7]通过三轴应力状态膨胀试验,研究膨胀土全润湿引起的膨胀比、最终含水率和初始含水率与上覆荷载间的关系,发现不同应力状态下的体积膨胀率和最终含水率均随上覆压力或平均主应力的增大而减小,在半对数坐标下呈线性关系。Qi 等^[8]在无限边坡框架下研究浅层膨胀土边坡的破坏机理,采用非饱和土弹塑性本构关系解释膨胀土入渗过程中膨胀引起的应力状态演化;采用扩展的非饱和土 Mohr-Coulomb 破坏准则作为屈服面,通过量化净应力和吸力两个应力状态变量对弹性参数的影响,考虑非饱和土的非线性弹性行为,发现忽略膨胀引起的应力变化及软化行为,会在破坏发生次数和破坏时间上显著高估浸润作用下膨胀土浅层的稳定性。Tiwari 等^[9]研究再生灰与天然纤维的耦合效应对膨胀土无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度和耐久性的控制作用。Zhang 等^[10]通过模拟软件 Hydrus-2D 建立能长期模拟季节性降雨环境下路堤水流的有限元模型,根据实时气候数据模拟生成气候特定的吸力曲线,预测路面边缘的垂直运动,进行敏感性分析,认为初始湿度条件对湿度分布和吸力分布模式的影响最显著,在干燥初始水分状态下路面边缘的垂直运动最大减少 3.0 cm。

为避免膨胀土边坡裂隙发展,在实际工程中常采用改良法进行边坡处理,从根本上改变膨胀土的性质,达到治理效果。水泥改良膨胀土治理效果良好,成本较低,目前应用最广。单一的水泥改良膨胀土存在缺点,例如:水泥改良后的膨胀土在干湿循环作用下裂隙发育依然剧烈,水泥的强碱性影响植物生长,不利于生态环保。纤维与无机黏结剂联合是一种常用的膨胀土改良方法。掺入纤维会对土体进行柔性加筋,增强土体抗压强度,但较少考虑对生态环保的影响。采用低碱生态水泥改良膨胀土,尚需一种合理的材料联合低碱生态水泥共同改良膨胀土,克服单一水泥改良的缺点。广西是中国工业制糖的主要地区,工业甘蔗渣年产量较大,急需拓展规模化利用途径,工业甘蔗渣是一种理想的膨胀土改良材料。对工业甘蔗渣-低碱生态水泥改良膨胀土边坡的数值模拟研究较少。

本文采用考虑强度折减的数值模拟分析工业甘蔗渣(在膨胀土中的质量分数为 1.2%)—低碱生态水泥(在膨胀土中的质量分数为 7.0%)改良膨胀土边坡(以下简称改良膨胀土边坡)的稳定性,探索边坡稳定性与变形、渗流的内在联系,对比改良膨胀土边坡与未改良膨胀土边坡在降雨条件下的稳定性差异,期为改良膨胀土边坡治理提供数据参考,对减少膨胀土带来的工程灾害具有重要意义。

1 数值模拟方法

1.1 研究方案

采用有限元软件 COMSOL Multiphysics,通过达西定律组件与固体力学组件将非饱和膨胀土的渗流与压力耦合,计算边坡失稳时间、饱和度、边坡位移、塑性应变等参数。根据数值模拟计算结果,对比分析未改良膨胀土边坡和工业甘蔗渣-低碱生态水泥改良膨胀土边坡的稳定性。研究方案如图 1 所示。

1.2 大尺度边坡降雨强度折减法

边坡稳定性分析主要有极限平衡法、滑移线法和有限元法。极限平衡法在岩土边坡稳定性分析中应用最广,原理是通过外力与土体内部的抗剪强度提供的抗力间的平衡计算边坡稳定程度,是一种破坏分

析法,分析时土体被视为理想的刚体与塑性体,不考虑计算过程中的土体变形,只假定瞬间的变形机制^[11-12]。极限平衡法只考虑静力平衡,不考虑变形协调与材料本构关系,计算方便快捷,但对复杂情况存在明显的局限性。滑移线法源于塑性力学原理,是一种破坏分析法,未考虑分析过程中的塑性应变。在复杂的岩土边坡环境下,需尽量考虑影响岩土边坡稳定性的因素,使数值模拟结果更贴近实际工程的需要。从理论上讲,考虑静力条件、应变条件和二者间的本构关系,有限元法目前最能满足实际工程需要^[13]。有限元法不受材料、边界条件与几何形状的约束,能分析变形与应力的变化过程。因此,有限元强度折减法是较有效和可靠的分析方法。

采用软件 COMSOL Multiphysics,根据达西定律组件与固体力学组件分别模拟耦合水文与固体力学模型。

通过 Richards 方程设置非饱和土渗流,计算公式为:

$$\rho \left(\frac{C_m}{\rho g} + S_e S \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \rho \left[- \frac{\kappa_s}{\mu} k_r (\nabla p + \rho g \nabla D) \right] = Q_m,$$

式中: ρ 为以 kg/m^3 为单位的流体密度数值, C_m 为持水率, g 为以 m/s^2 为单位的重力加速度数值, S_e 为有效饱和度, S 为储存系数, p 为以 MPa 为单位的压强数值, t 为以 s 为单位的时间数值; κ_s 为水力渗透率, μ 为以 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 为单位的流体动力黏度数值, k_r 为相对渗透率, D 为以 m 为单位的高程数值, Q_m 为以 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 为单位的流体源数值。

COMSOL Multiphysics 中求解压力的理查兹方程提供用于指定模型边界上水头或压力水头的特征,即能直接指定水头或压力水头;也能作为透水层边界条件的一部分,通过透水层等特征指定法向流速或流量。

有效饱和度

$$S_e = \begin{cases} 1/(1 + |\alpha H_p|^n)^m, & H_p < 0 \\ 1, & H_p \geq 0 \end{cases},$$

式中: α 、 n 、 m 为特定介质类型常数,分别取 $\alpha = 1$, $n = 2$, $m = 0.5$; H_p 为以 m 为单位的压力水头数值, $H_p = p/(\rho g)$ 。

采用 VG 模型(Van Genuchten,由荷兰科学家 Martinus Th. van Genuchten 于 1980 年提出)计算 Richards 方程参数,含水率

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + S_e(\theta_s - \theta_r), & H_p < 0 \\ \theta_s, & H_p \geq 0 \end{cases},$$

式中: θ_r 为残余液体体积分数, θ_s 为饱和液体体积分数。

持水率

$$C_m = \begin{cases} [\alpha m (\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m], & H_p < 0 \\ 0, & H_p \geq 0 \end{cases}。$$

相对渗透率

$$k_r = \begin{cases} S_e^{1/u} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, & H_p < 0 \\ 1, & H_p \geq 0 \end{cases},$$

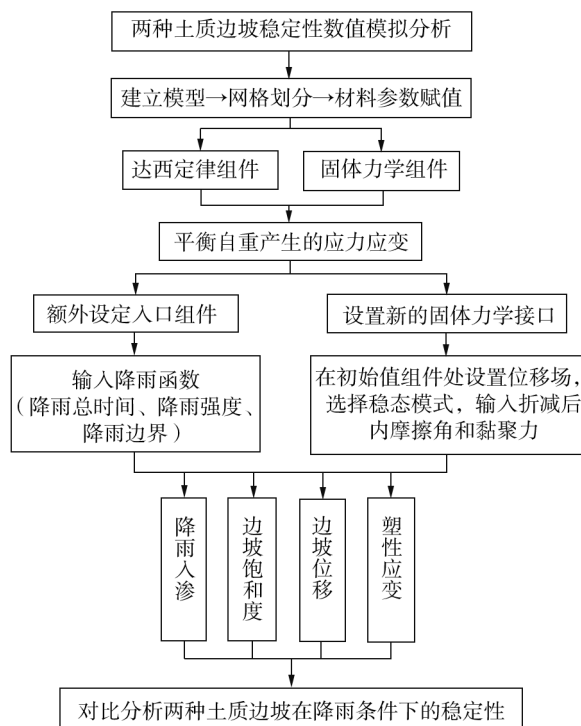


图 1 研究方案

式中: u 为特定介质类型常数,取 $u=2$ 。

在保证外荷载不变的条件下,强度折减法是指通过折减边坡内部的抗剪强度计算边坡稳定性。折减的抗剪强度为荷载产生的剪应力与折减系数之比,假定极限状态下得到的折减系数是边坡的安全系数。折减后的抗剪强度由折减黏聚力 c_m 和折减内摩擦角 φ_m 共同表征。

土体折减黏聚力

$$c_m=c/F_r,$$

式中: c 为黏聚力, F_r 为强度折减系数。

土体折减内摩擦角

$$\varphi_m=\arctan[\tan(\varphi/F_r)],$$

式中 φ 为土体摩擦角。

抗剪强度随 F_r 的增大而减小,当强度曲线与摩尔应力圆相切时,说明土体此时达到极限平衡状态,此时的强度折减系数即为边坡的安全系数 F_s 。

2 数值模拟模型

2.1 模型建立

相同的模拟方法下,大尺度边坡模拟比小尺度边坡更难收敛。对大尺度边坡进行模拟^[14-16]时,边坡坡脚长 50 m,坡顶长 80 m,坡高 50 m,坡长 110 m;地下水位左边界高 83 m,右边界高 60 m。根据实际工程中改良膨胀土的施工方法,综合考虑换填深度,按土层工程性质将整个边坡分为 2 层,改良膨胀土层深 0.5 m,其余为未改良膨胀土。

考虑压力水头的设置,在软件 CAD 中绘制 3 层边坡模型,最上层是改良膨胀土,中间层(地下水位以上)与底层(地下水位以下)均为未改良膨胀土。

将绘制的 CAD 边坡模型导入 COMSOL Multiphysics 中,将每层土体采用自由四边形网格尽量均匀划分为极细化网格,如图 2 所示。为尽可能找到边坡的稳定性系数,设降雨 6 d,时间太短则边坡可能维持稳定,设定降雨强度为 0.04 m/h。

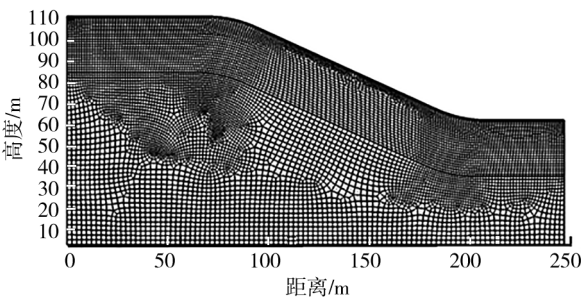


图 2 边坡网格划分

2.2 计算参数

综合考虑土水特征曲线变化、裂隙发育与抗剪强度^[17],对未改良膨胀土与工业甘蔗渣(在膨胀土中的质量分数为 1.2%)—低碱生态水泥(在膨胀土中的质量分数为 7.0%)改良膨胀土边坡模拟进行对比。采用 GDS 静三轴仪与变水头渗透仪可测得弹性模量与饱和渗透率。将测定的材料参数赋予对应土体,2 种土质边坡模拟土壤参数如表 1 所示。

表 1 2 种土质边坡模拟土壤参数

边坡土质	饱和渗透 率/($10^{-9}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚 力/kPa	弹性 模量/MPa	泊松 比	饱和 含水率/%	残余 含水率/%
未改良膨胀土	2.710 1	18	42.2	4.16	0.35	0.50	0.05
改良膨胀土	1.250 1	32	113.0	146.00	0.33	0.57	0.05

采用达西定律组件与固体力学组件对非饱和膨胀土的渗流与压力耦合^[18],计算边坡塑性应变、应力、压力和饱和度等参数。添加降雨后,最终计算结果视作只由降雨导致。平衡初始场后的边坡塑性应变为 0。

3 数值模拟结果

为研究降雨前、后未改良膨胀土边坡与改良膨胀土边坡的有效饱和度变化,输入降雨函数并选定同一天进行模拟,对比边坡有效饱和度。两种土质边坡降雨前、后的有效饱和度如图 3、4 所示。

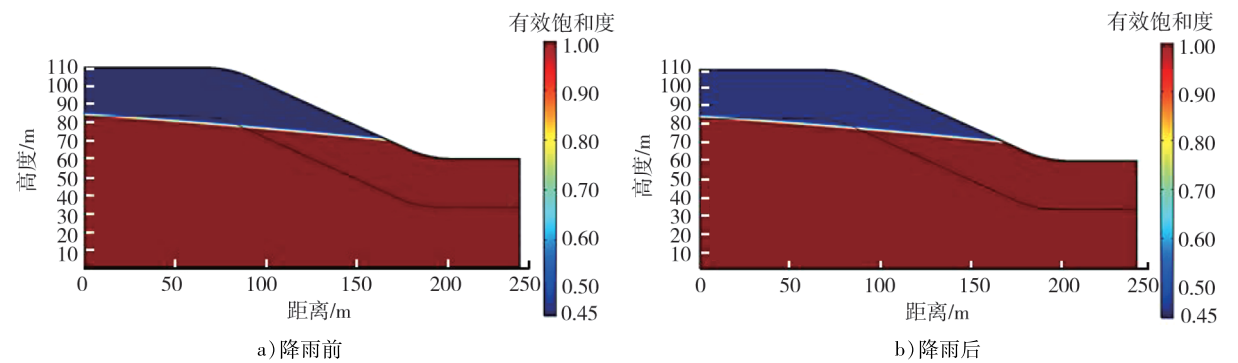


图 3 未改良膨胀土边坡降雨前、后有效饱和度

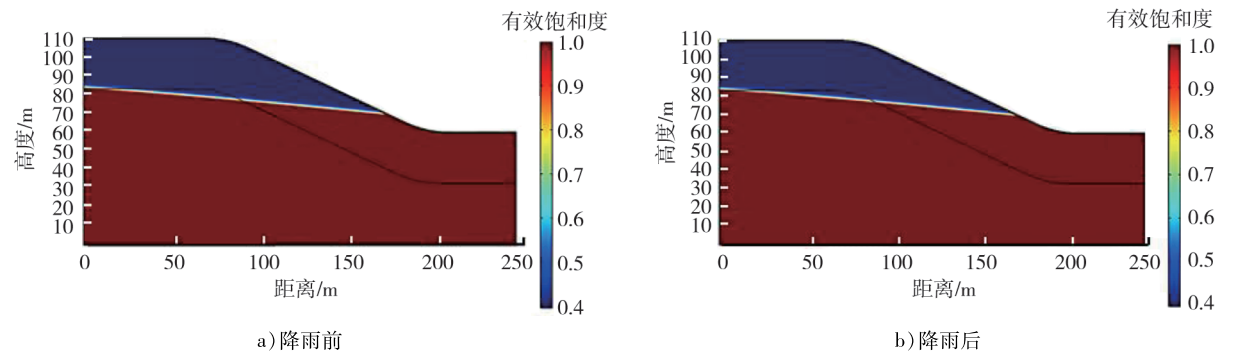


图 4 改良膨胀土边坡降雨前、后有效饱和度

由图 3、4 可知:连续降雨后,两种土质边坡的有效饱和度整体变化较小。原因是试验用土的渗透率较小,雨水入渗较少。在仅考虑降雨影响条件下被破坏时,改良膨胀土边坡表层部分的有效饱和度大于未改良膨胀土边坡。

测定降雨条件下未改良膨胀土边坡与改良膨胀土边坡的塑性应变,分析降雨入渗对边坡塑性变化的影响。设置降雨环境后计算得到两种土质边坡的塑性应变如图 5 所示。由图 5 可知:在降雨影响下,未改良膨胀土边坡的塑性变形主要发生在坡脚,改良膨胀土边坡的塑性应变主要集中在坡顶,原因是改良膨胀土的有效饱和度大于未改良膨胀土,改良膨胀土边坡更应注意坡顶排水;改良膨胀土边坡的塑性应变略大于未改良膨胀土边坡。改良膨胀土边坡的饱和渗流系数更小,雨水入渗后流动较缓,在坡顶出现淤积现象。

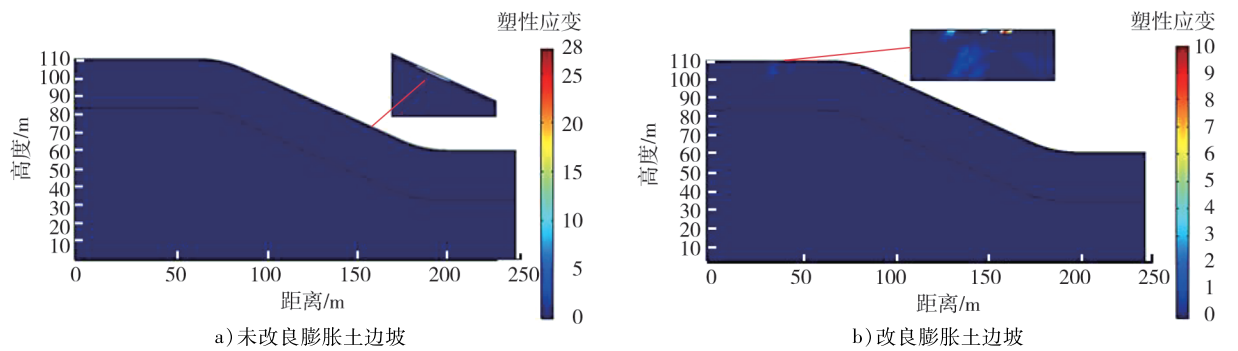


图 5 未改良膨胀土边坡与改良膨胀土边坡降雨后塑性应变

为监测未改良膨胀土边坡与改良膨胀土边坡降雨后的位移情况,在保证降雨一致的条件下模拟运行,得到两种土质边坡的位移如6所示。由图6可知:2种土质边坡的位移均发生在坡顶,未改良膨胀土边坡的位移约为改良膨胀土边坡的2倍。在相对较大的位移范围内,受影响的未改良膨胀土边坡的面积更大。改良膨胀土边坡的位移范围仅在塑性变形周围5 cm内,未改良膨胀土边坡的位移发育至坡脚。

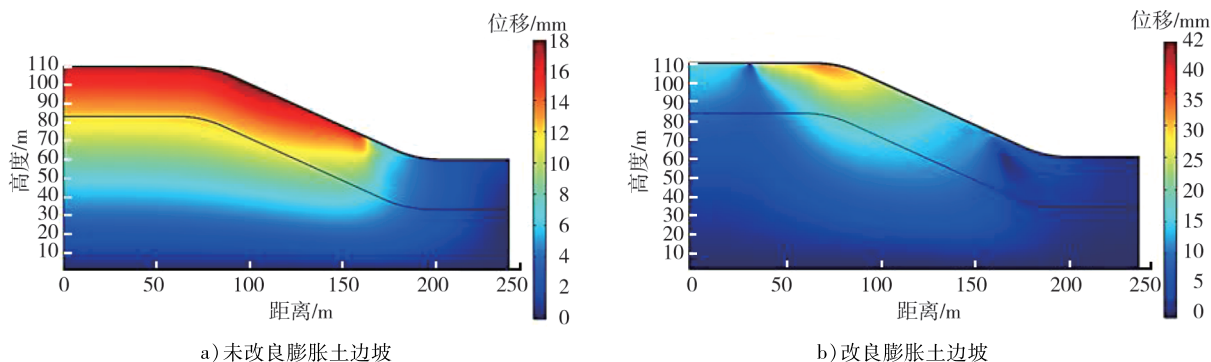


图6 未改良膨胀土边坡与改良膨胀土边坡降雨后位移

进行边坡稳定性数值模拟时,失稳破坏的判据包括有限元计算结果不收敛、坡脚到坡顶形成塑性贯通区、边坡的特征部位发生位移突变。考虑强度折减后,边坡内部的抗剪强度减小,需着重关注边坡塑性应变与边坡位移变化情况。采用降雨强度折减法,对内摩擦角与黏聚力进行折减输入,计算完成后得到两种土质边坡的塑性应变与边坡位移,分析位移变化及发生位置。两种土质边坡强度折减后的塑性应变和位移如图7、8所示。

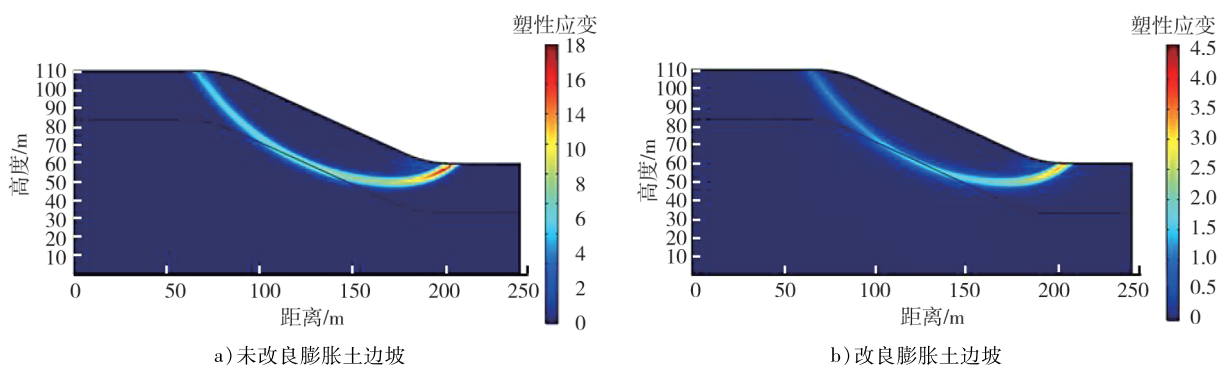


图7 未改良膨胀土边坡与改良膨胀土边坡强度折减后塑性应变

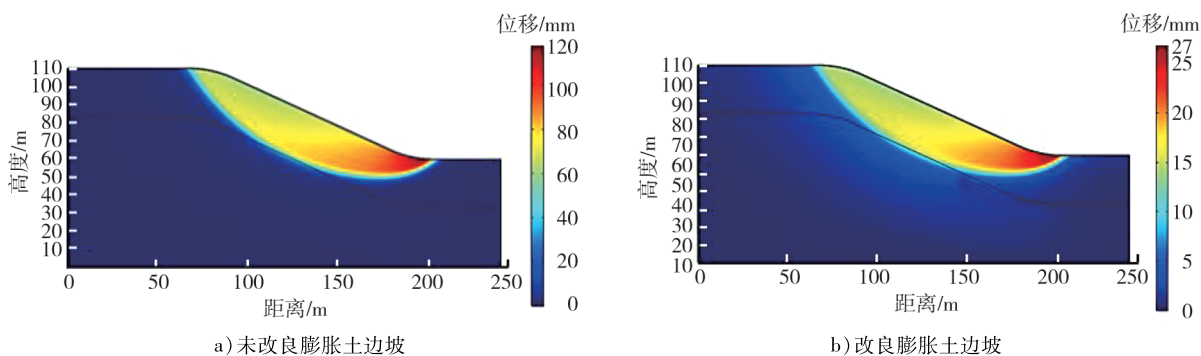


图8 未改良膨胀土边坡与改良膨胀土边坡强度折减后位移

由图7可知:考虑降雨强度折减法后,两种土质边坡坡体内部均出现U型塑性应变区域,与较多实际工程中的滑坡剪切面一致,从坡脚处开始破坏,发展至坡顶,表层土体与深层土体发生相对滑动^[19],从塑性应变上看,此时整个边坡已发生滑坡。未改良膨胀土边坡的塑性应变约为改良膨胀土边坡的3倍。改

良膨胀土层对边坡在降雨强度折减后的塑性变形起到一定的抑制作用,对边坡深层土体起到防护效果,大部分雨水以表面径流形式流走,但改良膨胀土的有效饱和度较高,不影响后期植物的生长用水需求,整个改良膨胀土边坡坡体保持稳定,比未改良膨胀土边坡更安全可靠。工业甘蔗渣与低碱生态水泥的组合能保障膨胀土边坡的稳定性。

由软件 COMSOL Multiphysics 计算可得未改良膨胀土边坡稳定性系数为 1.12,改良膨胀土边坡稳定性系数为 1.14。由图 8 可知:在数值模拟结束时,未改良膨胀土边坡的边坡稳定性不如改良膨胀土边坡,未改良膨胀土边坡的最大位移约为改良膨胀土边坡的 4 倍。

4 结论

1)采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 对未改良膨胀土边坡与工业甘蔗渣-低碱生态水泥改良膨胀土边坡进行数值模拟研究,改良膨胀土边坡有效饱和度较大,渗透性较小,雨水以径流为主,渗流为辅。

2)在相同的降雨条件下,改良膨胀土边坡塑性应变与位移比未改良膨胀土边坡小,稳定性更优。

3)考虑强度折减后,未改良膨胀土边坡的最大位移约为改良膨胀土边坡的 4 倍,未改良膨胀土边坡的塑性应变约为改良膨胀土边坡的 3 倍。表明改良膨胀土具备良好的防护能力,可作边坡护坡层,防止雨水入侵。

后续研究中可进行模型试验或现场试验,以验证数值模拟结果,提高研究结果的适用性。

参考文献:

- [1] 殷宗泽,袁俊平,韦杰,等.论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J].岩土工程学报,2012,34(12):2155-2161.
- [2] 陈善雄,戴张俊,陆定杰,等.考虑裂隙分布及强度的膨胀土边坡稳定性分析[J].水利学报,2014,45(12):1442-1449.
- [3] 周健,徐洪钟,胡文杰.干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2):152-156.
- [4] 李炎隆,陈波,马成成,等.基于 ABAQUS 的降雨入渗条件下基坑边坡稳定性分析[J].应用力学学报,2017,34(1):555-566.
- [5] YOU Y, YAN C H, XU B T, et al. Optimization of dewatering schemes for a deep foundation pit near the Yangtze River, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018,10(3):149-160.
- [6] 蔡正银,陈皓,黄英豪,等.考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J].岩土工程学报,2019,41(11):1977-1982.
- [7] HUANG B, CHENG Z L, ZHANG W, et al. Expansion model test of expansive soil in different stress state[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2015, 52(2): 57-67.
- [8] QI S C, VANAPALLI S K. Influence of swelling behavior on the stability of an infinite unsaturated expansive soil slope[J]. Computer and Geotechnics, 2016, 76: 154-169.
- [9] TIWARI N, SATYAM N, PUPPALA A J. Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 29:100556.
- [10] ZHANG J, LITTLE D N, HARIHARAN N, et al. Prediction of climate specific vertical movement of pavements with expansive soils based on long-term 2D numerical simulation of rainwater infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 115:103172.
- [11] 唐朝生,施斌,刘春.膨胀土收缩开裂特性研究[J].工程地质学报,2012,20(5):663-673.
- [12] OBERHOLLENZER S, TSCHUCHNIGG F, SCHWEIGER H F. Finite element analyses of slope stability problems using non-associated plasticity[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018,10(6): 1091-1101.
- [13] JOHARI A, GHOLAMPOUR A. A practical approach for reliability analysis of unsaturated slope by conditional random finite element method[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 102: 79-91.
- [14] 许杨少君.水泥改性膨胀土坡面防护及边坡稳定性研究[D].南宁:广西大学,2020.
- [15] 潘兆远.生物炭改良膨胀土的工程特性研究及边坡稳定性分析[D].南宁:广西大学,2020.

- [16] LIU Y, XIAO H W, YAO K, et al. Rock-soil slope stability analysis by two-phase random media and finite elements[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(6): 1649–1655.
- [17] 刘维正,徐阳,石志国,等. 湿化作用下改良膨胀土永久变形特性多级加载试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 296–305.
- [18] LIU Q L, WANG E Y, KONG X G, et al. Numerical simulation on the coupling law of stress and gas pressure in the uncovering tectonic coal by cross-cut[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 103(6): 33–42.
- [19] 张柯龙. 矿渣+水泥改良膨胀土工程特性研究[D]. 西安:西安工业大学, 2023.

Numerical simulation analysis of the stability of expansive soil slopes improved by industrial bagasse-low-alkali ecological cement

WEI Wenrui, GUO Yanbo^{*}, CHEN Tianli, MENG Fayi, HUANG Wei,
SU Mincheng, CHEN Shuqing, LI Lei

Guangxi Environmental Protection Industry Investment Group Co., Ltd., Nanning 530200, China

Abstract: To study the stability of industrial sugarcane residue (mass fraction of 1.2%)-low alkali ecological cement (mass fraction of 7.0%) improved expansive soil slopes (hereinafter referred to as improved expansive soil slopes) under rainfall conditions, this research analyzes the differences between improved and unimproved expansive soils slope, as well as the intrinsic relationship between slope stability, deformation, and seepage. Based on soil parameters obtained from laboratory tests, numerical simulation software COMSOL Multiphysics is used to conduct large-scale slope rainfall intensity reduction simulations to explore the changes in effective saturation, plastic strain, displacement, and slope stability coefficient of the two types of soil slopes during rainfall. The results show that: 1) After continuous rainfall, the overall change in effective saturation of the two types of soil slopes is small, with the effective saturation of the improved expansive soil slope greater than that of the unimproved expansive soil slope; under the condition of considering only the influence of rainfall, the effective saturation of the surface layer of the improved expansive soil slope at failure is greater than that of the unimproved expansive soil slope. 2) Under rainfall conditions, plastic deformation in the unimproved expansive soil slope mainly occurs at the toe, while the plastic strain in the improved expansive soil slope concentrates at the crest, with the plastic strain of the improved expansive soil slope slightly larger than that of the unimproved expansive soil slope. 3) After rainfall, displacements in both types of soil slopes occur at the crest, with the displacement of the unimproved expansive soil slope being about twice that of the improved expansive soil slope; within a relatively large displacement range, the area of affected soil in the unimproved expansive soil slope is larger, while the affected range of the improved expansive soil slope is limited to within 50 m around the plastic deformation, with the displacement of the unimproved expansive soil slope extending to the toe. 4) Considering the rainfall intensity reduction method, U-shaped plastic strain zones appear within both types of soil slopes, with relative sliding occurring between the surface soil and deep soil; the plastic strain in the unimproved expansive soil slope is about three times that of the improved expansive soil slope; the stability coefficients of the unimproved expansive soil slope and improved expansive soil slope are 1.12 and 1.14, respectively, with the maximum displacement of the unimproved expansive soil slope being about four times that of the improved expansive soil slope.

Keywords: expansive soil slope; stability; numerical simulation; effective saturation; plastic strain

(责任编辑:王惠)