

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.015

基于流-固耦合的膨胀土边坡渗流分析*

梁松林, 张瑞富, 杨超, 秦猛

(广西路建工程集团有限公司, 广西南宁 650500)

摘要: 基于流-固耦合理论、非饱和渗流计算模块, 通过 C++ 和 FLAC^{3D} 内置 FISH 语言构建考虑膨胀效应的非饱和流-固耦合模块, 结合工程实例, 分析膨胀土边坡在不同耦合方式和降雨工况下非饱和渗流规律及相关影响因素。结果表明, 降雨入渗对边坡孔隙水压力的影响集中在边坡浅层范围内, 采用流-固耦合模块计算所得土体饱和度的增速、增幅及降雨入渗深度都比非耦合情况时小, 且随着降雨的持续, 两者之间的差距越来越大; 在总雨量相同的条件下, 强度小而历时长的降雨会造成边坡土体内雨水滞留量增多, 滞留时间变长。

关键词: 公路; 膨胀土边坡; 流-固耦合; 渗流特性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)01-0075-06

膨胀土具有显著的胀缩性、裂隙性、超固结性等, 常给基础设施建设带来严重危害。大量工程案例表明, 膨胀土失稳破坏多发生在雨季^[1]。降雨入渗不仅使边坡土体重度增加、抗剪强度降低, 还会造成大气影响深度范围内土体产生附加膨胀变形和膨胀应力, 导致下滑力增大, 进而引起膨胀土边坡渐进性浅层失稳破坏, 雨水入渗是膨胀土边坡发生失稳破坏的主要原因^[2]。国内外学者对降雨条件下非饱和渗流和膨胀土增湿膨胀过程进行了系列研究, 如文献[3-5]基于湿度应力场理论, 采用热-固耦合的方式模拟了土体的降雨入渗, 但无法反映降雨过程中土体的实际水分迁移及持水的特性; 文献[6-8]依据饱和-非饱和渗流理论, 采用有限元软件对降雨条件下膨胀土边坡渗流及稳定性展开研究, 主要强调膨胀土非饱和强度特性对边坡稳定性的影响, 未考虑膨胀性和流-固耦合的影响; 文献[9]基于 ABAQUS 有限元软件二次开发平台实现降雨条件下膨胀土重度、抗剪强度随含水率变化的数值模拟, 研究多影响因素下膨胀土边坡的稳定性, 但忽略了膨胀变形对边坡的影响; 文献[10-11]围绕膨胀土的胀缩性、软化及剪胀等特性展开研究, 但未考虑膨胀土变形过程中流体流动与固相变形之间的相互作用; 文献[12-15]采用 FLAC^{3D} 内置 FISH 语言编写非饱和区渗透系数实时更新函数、降雨下渗边

界函数及非饱和土有效应力修正函数, 分别对饱和-非饱和渗流模块和有效应力模块进行二次开发, 进一步完善了 FLAC^{3D} 软件非饱和流-固耦合计算功能, 为非饱和膨胀土相关数值分析提供了新的计算思路。总的来说, 对于降雨条件下膨胀土边坡雨水入渗流-固耦合过程的研究仍存在局限性, 借鉴已有多场耦合数值计算思路开发一种引入膨胀效应的非饱和流-固耦合模块十分必要。本文基于流-固耦合理论, 通过在 FLAC^{3D} 软件 Mohr-Coulumb 本构模型中引入膨胀应变, 利用内嵌 FISH 语言对非饱和渗流计算模块中的饱和度、渗透系数及有效应力进行改进, 建立考虑膨胀效应的流-固耦合计算模块, 对降雨入渗过程中膨胀土边坡吸湿膨胀变形及非饱和渗流过程展开研究, 对比分析不同耦合方式、不同降雨强度下边坡非饱和渗流场的差异。

1 非饱和膨胀土流-固耦合分析法

1.1 基于 FLAC^{3D} 的饱和-非饱和渗流控制方程

采用 FLAC^{3D} 进行饱和-非饱和渗流分析时, 针对非饱和和多孔介质结构, 假设不考虑孔隙气压力的影响, 基于准静态比奥理论的流体连续性方程为:

$$\frac{1}{s} \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{M} \frac{\partial u_w}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (1)$$

式中: s 为饱和度; ξ 为流体体积变化量; t 为迁移时

* 基金项目: 2022 年度广西交通运输行业重点科技项目; 国家自然科学基金项目(52178413; 51408059); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ2431)

间; M 为比奥模量; u_w 为孔隙水压力; n 为孔隙率; α 为比奥系数, 忽略土颗粒的压缩性时, $\alpha = 1$; ϵ_v 为体积应变。

采用 FLAC^{3D} 进行降雨入渗下边坡饱和-非饱和渗流分析时, 主要涉及的边界形式有不透水边界、透水边界、固定流量入渗边界、固定压力入渗边界, FLAC^{3D} 默认模型边界为不透水边界。透水边界可采用:

$$q_n = h(p - p_c) \quad (2)$$

式中: q_n 为水的流速在边界外法线方向的分量; h 为渗透系数; p 为边界上的孔隙水压力; p_c 为渗透出口处孔隙水压力。

流量入渗边界可采用:

$$-k_{rl}k_r(s)\hat{n} \frac{\partial \mu_w}{\partial x_j} = \bar{v}_w, \forall x \in \Gamma_v, t \in T \quad (3)$$

压力入渗边界可采用:

$$\mu_w(x, t) = \bar{\mu}_w(x, t), \forall x \in \Gamma_w, t \in T \quad (4)$$

式中: \bar{v}_w 、 $\bar{\mu}_w$ 分别为已知边界上的孔隙水流速和孔隙水压力。

进行饱和-非饱和渗流分析时, 岩土体的饱和度和孔隙水压力的关系 (SWCC) 一般采用 VG 模型描述^[16], 模型的方程表达式为:

$$s = s_r + \frac{s_s - s_r}{[1 + (au_w)^n]^m} \quad (5)$$

式中: s 为土的饱和度; s_r 、 s_s 分别为土体的残余、饱和体积含水率; a 、 n 、 m 为拟合参数, $0 < m < 1$, $m = 1 - 1/n$; u_w 为基质吸力。

渗透系数可利用 SWCC 曲线间接确定, 非饱和渗透系数 k 等于饱和渗透系数 k_s 与相对渗透系数 $k_r(s)$ 的乘积, 即:

$$k = k_s k_r(s) = k_s s^2 (3 - 2s) \quad (6)$$

式(6)中, 饱和渗透系数 k_s 并不是一个定值, 依据文献[17], 饱和渗透系数与体积应变之间的关系表达式为:

$$k_s = \frac{k_{s0} (1 + \epsilon_v/n_0)^3}{1 + \epsilon_v} \quad (7)$$

式中: k_{s0} 为初始渗透系数; ϵ_v 为体积应变, $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$; ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 分别为第一、第二、第三主应变; n_0 为初始孔隙率。

根据式(6)、式(7), 膨胀土的非饱和渗流系数与初始渗透系数、体积应变、初始孔隙率、饱和度有关, 考虑非饱和渗透系数随体积变形、饱和度变化的表达式为:

$$k = \frac{k_{s0} s^2 (3 - 2s) (1 + \epsilon_v/n_0)^3}{1 + \epsilon_v} \quad (8)$$

1.2 膨胀性的引入

降雨入渗时膨胀土会产生膨胀变形。可将膨胀应变以附加应变的方式引入总应变中^[17-19], 总应变更新为:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^w \quad (9)$$

式中: ϵ_{ij} 为总应变张量; ϵ_{ij}^e 为有效应力引起的应变张量; ϵ_{ij}^w 为膨胀应变张量。

式(1)可更新为:

$$\frac{1}{s} \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{M} \frac{\partial u_w}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} + \alpha \left(\frac{\partial \epsilon_{ij}^e}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon_{ij}^w}{\partial t} \right) \quad (10)$$

假设膨胀土为各向同性且均质的材料, 各方向上产生的膨胀应变相同, 切应变为零, 膨胀土体的应力应变和膨胀应变遵循广义 Hooke 定理, 考虑膨胀应变的总应力分量表达式为:

$$\sigma_{ij} = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \epsilon_{kk} + \frac{E}{1 + \mu} \epsilon_{ij} - \frac{E}{1 - 2\mu} \epsilon_{ij}^w \quad (11)$$

式中: σ_{ij} 为总应力分量; μ 为泊松比; E 为弹性模量; ϵ_{kk} 为主应变之和。

应力超出剪切准则和张拉准则时, 对塑性进行修正, 其剪切屈服函数 f^s 、张拉屈服函数 f^t 的修正公式为:

$$\begin{cases} f^s = \left(\sigma_1 - \frac{E}{1 - 2\mu} \beta \Delta w \right) - \left(\sigma_3 - \frac{E}{1 - 2\mu} \beta \Delta w \right) \cdot \\ \quad N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} \\ f^t = \sigma^t - \sigma_3 \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为第一、第三主应力; β 为膨胀系数; Δw 为含水率增量; $N_\varphi = (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi)$; c 、 φ 分别为黏聚力和内摩擦角; σ^t 为拉应力。

$f^s < 0$ 、 $f^t < 0$ 时, 膨胀土分别发生剪切屈服和拉伸屈服。

1.3 流-固耦合数值模块的建立

(1) 基于流-固耦合理论, 对 FLAC^{3D} 提供的 Mohr-Coulumb 模型内嵌源代码进行二次开发, 通过在 Visual studio 2010 平台对源文件 (.cpp) 中的 Initialize() 函数和 Run() 函数进行开发, 生成动态数据库文件 (.dll), 将膨胀变形引入本构模型中。

(2) 采用 FISH 语言对 FLAC^{3D} 中的渗流模块 (Model Configure Fluid) 进行二次开发。先设置流体抗拉强度 (Fluid-tension) 并利用 FISH 函数生成

初始孔压场;再通过内置命令 gp.pp 和 zone.pp 获取整个模型的孔隙水压力,并利用变量 gp.sat、zone.extra、zone.fluid.prop 和 zone.strain.inc 对各土层的饱和度和渗透系数进行修正;然后利用 interface 功能获取坡面渗透系数,实现降雨入渗与出渗边界的设置;最后通过 FISH 函数对有效应力模块进行修正,并调用 FISHCALL 循环命令,实现动态时间步下非饱和降雨入渗的数值模拟。

(3) 通过配置修正后的膨胀土本构模型,实现非饱和膨胀土在流—固耦合下的渗流分析。耦合原理为:根据有效应力原理,降雨入渗引起非饱和渗流场的改变,导致膨胀应变产生,造成应力场中应力应变发生改变;体积变形又使渗流场中渗透系数产生变化,对非饱和渗流场的时空分布产生影响。以此相互影响、交互式反复迭代直至收敛。流—固耦合程序流程见图 1。

2 非饱和膨胀土边坡模型

对广西宁明北江—板烂二级公路某膨胀土路堑边坡建立计算模型(见图 2)。边坡地表 2 m 范围内为风化土层,裂隙发育(上层土),其下为未风化土层,裂隙不发育(下层土)。

计算参数:上下土层的物理力学参数见表 1,图 3 为各土层的土—水特征曲线。采用文献[20]中的试验方法得到膨胀变形 ϵ_w 随含水率的变化(见图 4),其多元非线性回归方程为:

$$\epsilon_w = 0.621e^{-11.584w_0} \ln(w - 1.343w_0 + 0.098) + 1.419e^{-9.58w_0} \quad (13)$$

式中: w_0 、 w 分别为初始含水率和过程含水率。

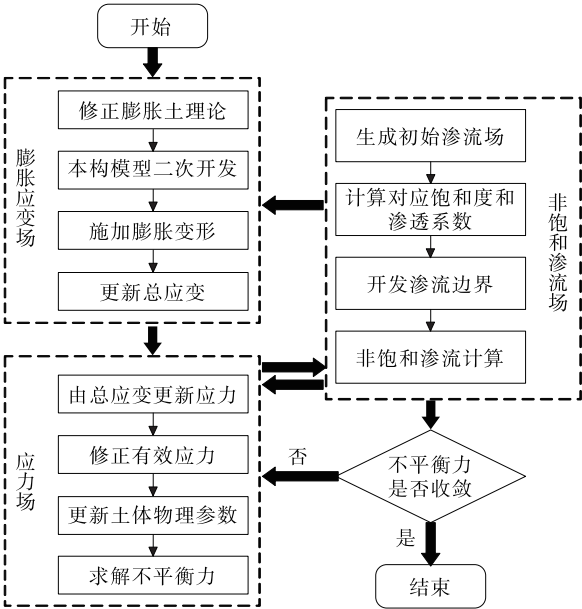


图 1 流—固耦合程序流程

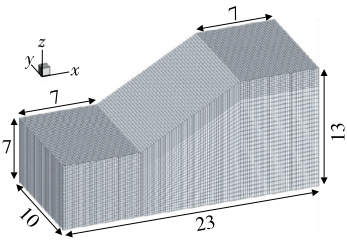


图 2 边坡模型(单位:m)

表 1 各土层材料参数取值

土层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^\circ$)	杨氏模 量/MPa	泊松比	孔隙率	初始渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	饱和渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
上层土	17.7	13	15	16	0.31	0.40	9.2×10^{-9}	2.1×10^{-7}
下层土	18.6	54	21	30	0.30	0.35	5.8×10^{-9}	6.5×10^{-8}

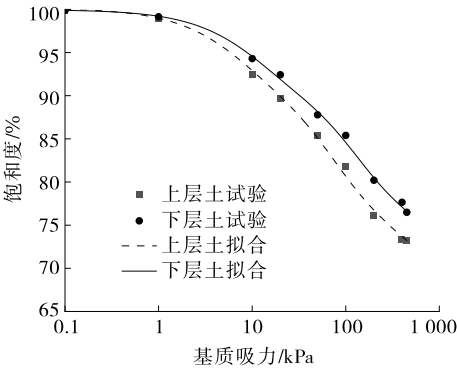


图 3 各土层的土—水特征曲线

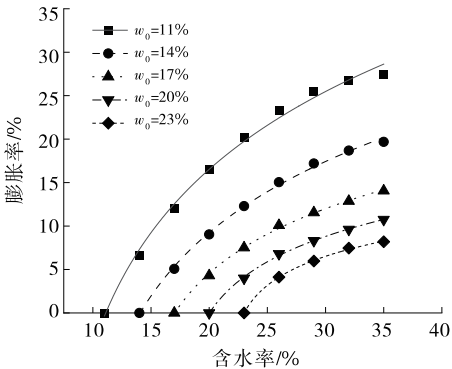


图 4 膨胀变形随含水率的变化

降雨过程中,降雨强度小于坡面入渗能力时为无压入渗阶段,该阶段为流量边界;降雨强度大于坡面入渗能力时为有压入渗阶段,该阶段为压力边界。降雨结束后,根据水分出、入渗情况对边界条件进行重新设置,当坡内水分向外溢出时,坡面孔隙水压力逐渐变为正值,边界设置为零压力边界;当水分因重力作用继续向坡内迁移时,坡面孔隙水压力逐渐变

为负值,边界设置为零流量边界。拟定降雨强度为 8×10^{-7} m/s,降雨和停雨历时各3 d。

3 计算结果与分析

3.1 孔隙水压力分布

不同降雨历时时膨胀土边坡的孔隙水压力分布见图5。

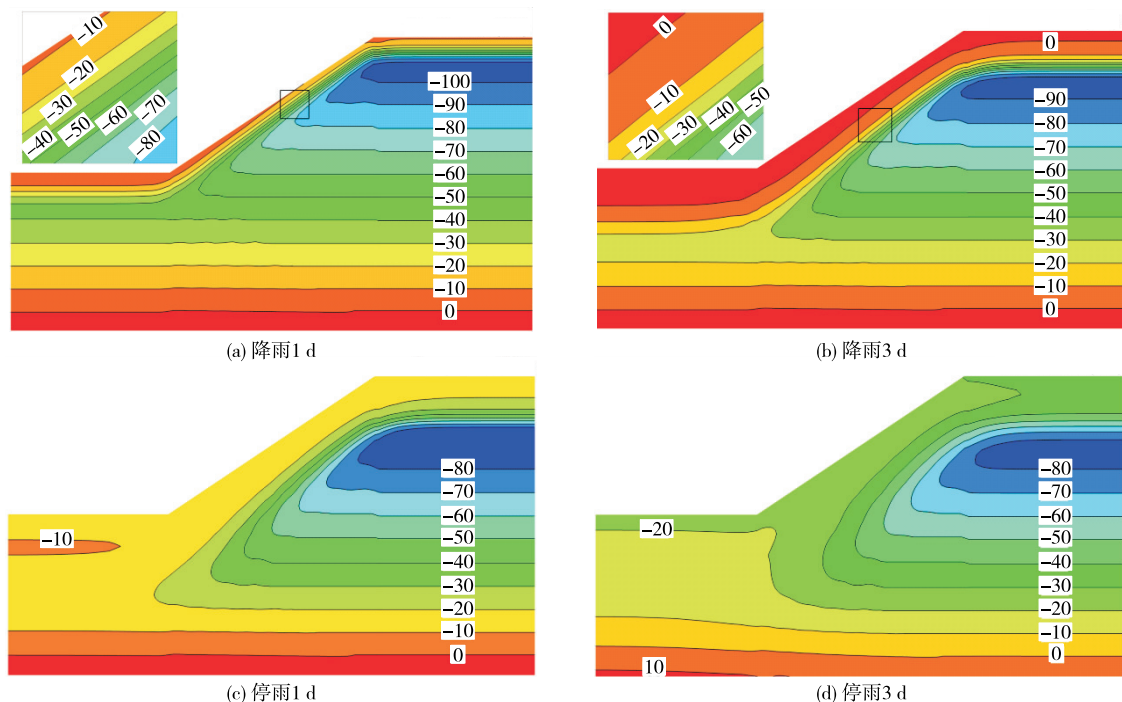


图5 孔隙水压力分布云图(单位:kPa)

从图5可以看出:边坡孔隙水压力的变化与降雨密切相关。降雨期间,整个坡面的孔隙水压力与降雨时间呈正相关,坡面最先出现暂态饱和区,雨水在重力作用下下渗,坡底面及坡脚处受降雨影响最剧烈;停雨期间,由于失去雨水的补给,湿润锋被均化,边坡浅层的孔隙水压力逐渐消散,吸力慢慢恢复,而留存在土体中的雨水在重力作用下继续下渗,使坡体内部的雨水在重力作用下继续下渗,坡体内部孔隙水压力增加,但扩展速率随深度增加逐渐变缓。在整个降雨、停雨的过程中,由于下层土的渗透性低于上层土,降雨形成的湿润面很难渗透过渗透系数低的下层土,雨水入渗对上层土孔压场的影响比下层土的大,导致上层土体的孔隙水压力增加、有效应力降低,进而导致土体抗剪强度降低,这是降雨诱发边坡破坏多发生在浅层的原因。

3.2 耦合方式对非饱和膨胀土湿度场的影响

图6、图7分别为耦合和非耦合方式下非饱和

渗流场中饱和度的分布。参数不变,耦合情况为考虑渗透系数随体积变形和饱和度变化的情况,即式(7)、式(8)。从图6、图7可以看出:降雨1 d时,受降雨入渗影响,边坡浅层土体的饱和度快速增大,且在重力作用下,越接近坡底面和坡脚处的土体的饱和度增加幅度和反应速率越快,暂态饱和区的扩散深度沿坡底面至坡顶方向逐渐减小。降雨3 d时,悬挂型暂态饱和区的范围持续增大,浅层深度1 m范围内土体达到饱和,同时在上下层土位置形成明显的饱和度变化带。

图8为不同耦合方式对土体饱和度的影响。从图8可以看出:降雨1 d时,考虑流-固耦合时土体表面饱和度为92.4%,比非耦合条件下饱和度(97.3%)小,耦合与非耦合条件下降雨入渗深度分别为1.6 m和1.8 m。降雨持续至3 d时,耦合条件下暂态饱和区与非耦合之间的差距进一步拉大,两者入渗深度分别为2.7 m和3.1 m。其原因是考虑

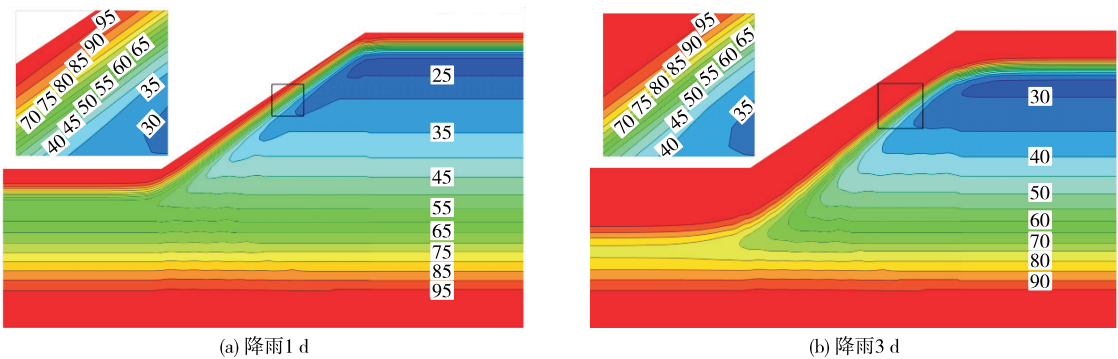


图 6 非流—固耦合下饱和度分布云图(单位: %)

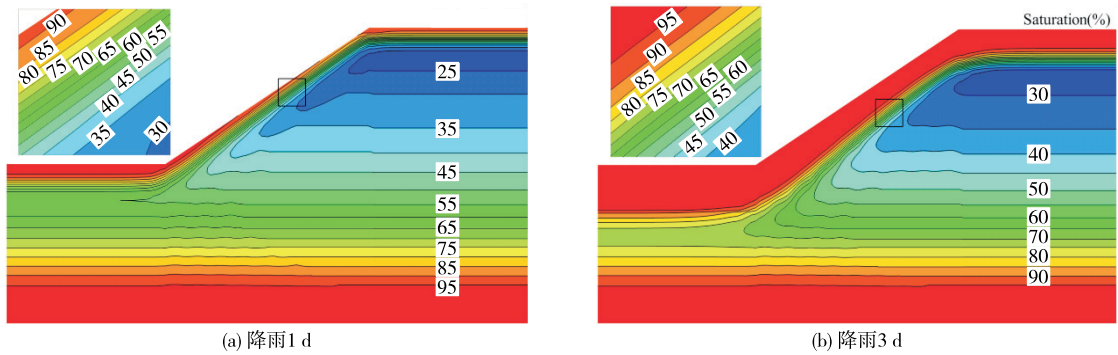


图 7 流—固耦合下饱和度分布云图(单位: %)

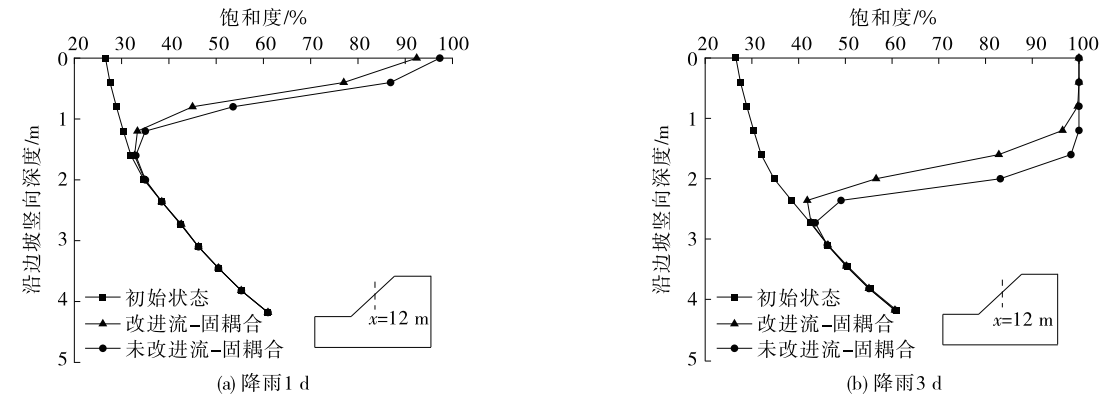


图 8 不同耦合方式下不同深度处饱和度比较(边坡中部)

流—固耦合的渗流计算中每个渗流时间步都包含一个力学时间步,由于土体的自重应力和吸水膨胀,每个计算时间步计算单元体不断变化,该变化影响土体的渗透系数,导致流—固耦合下形成的暂态饱和区范围及降雨入渗深度比非耦合方式下的小。

3.3 不同降雨工况对膨胀土边坡暂态饱和区的影响

拟定 2 种降雨方案(见表 2),对比分析不同降雨工况下暂态饱和区的分布。

为直观和定量展现降雨条件下暂态饱和区面积随时间的变化趋势,采用图形像素处理技术,提取整

表 2 降雨方案

工况 编号	降雨强度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	时间/d		总雨量/ mm
		降雨	停雨	
工况 1	8×10^{-7}	3	5	207
工况 2	4×10^{-7}	6	2	207

个降雨、停雨期间暂态饱和区像素面积与初始条件下非饱和区像素面积,将两者之比定义为暂态面积比 Ω ,其表达式为:

$$\Omega = \frac{A_s(m^2)}{A(m^2)} \times 100 = \frac{A_s(pt)}{A(pt)} \times 100 \tag{14}$$

式中: $A_s(m^2)$ 、 $A(m^2)$ 分别为暂态饱和区、初始条件下非饱和区的实际面积; $A_s(pt)$ 、 $A(pt)$ 分别为暂态饱和区、初始条件下非饱和区的像素面积。

两工况下暂态面积比随时间的变化见图9。从图9可以看出:随着时间的增加,两工况下暂态面积比呈先上升后下降的趋势,分别在5.75 d和8 d时达到最大值,分别为17.6%和18.9%。两工况下暂态面积比随时间的变化过程存在明显差异,降雨前3 d,工况1下暂态面积比的增幅和增速明显高于工况2;3~6 d时工况1下暂态面积比的增速明显变缓,而工况2增速依旧在增加;5.75 d后,工况1下暂态面积比开始缓慢降低,而工况2一直在增加。究其原因,工况1下降雨强度远大于工况2下降雨强度且接近土体的饱和渗透系数,降雨期间工况1下边坡土体的雨水入渗量远大于工况2,工况1下暂态面积比增速和增幅高于工况2;随着降雨的结束,降雨期间渗入膨胀土边坡中的水分受到重力作用,湿润锋呈饱和状态并向坡内扩展,停雨期间悬挂型暂态饱和区的面积继续增加并趋于缓慢,最后由于水分的消散作用,面积比逐渐减小。对比发现,在总雨量相同的条件下,采用降雨强度小而历时长的工况,降雨造成边坡土体内雨水滞留量增多,滞留时间变长,对边坡的稳定更不利。

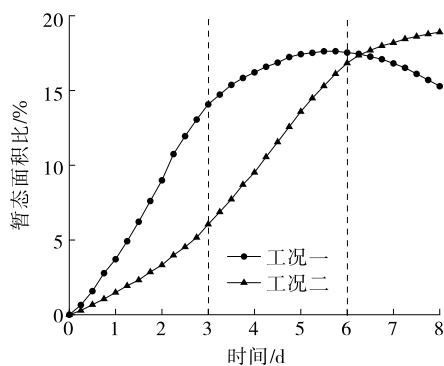


图9 不同工况下暂态面积比随时间的变化

4 结论

(1) 降雨期间,边坡浅层土体孔隙水压力迅速增大,逐渐增加为正孔隙水压力;降雨间歇期,随着雨水的消散,表层土体的基质吸力逐渐增加,随着湿润锋在重力作用下继续向坡内推进,深层土体的基质吸力继续降低。

(2) 降雨入渗使边坡浅层土体的饱和度逐渐增大,呈现悬挂型暂态饱和区分布;采用流-固耦合模

块计算所得土体饱和度的增速、增幅及降雨入渗深度都比非耦合情况时小,且随着降雨的持续,两者之间的差距越来越大。

(3) 在总雨量相同的条件下,降雨强度小而历时长的工况会造成边坡土体内雨水滞留量增多,滞留时间变长,对边坡的稳定更不利。

参考文献:

- [1] 廖世文.膨胀土与铁路工程[M].北京:中国铁道出版社,1984.
- [2] 范峥,李金明,何李.降雨条件下膨胀变形对膨胀土边坡暂态饱和区的影响研究[J].公路与汽运,2021(6):69-73.
- [3] 卢爱红,茅献彪,徐金海,等.膨胀岩巷道变形及其控制的数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(2):193-195.
- [4] 李康全,周志刚.基于湿度应力场理论的膨胀土增湿变形分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2005,2(4):1-6.
- [5] 丁金华,陈仁朋,童军,等.基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究[J].岩土力学,2015,36(S1):159-168.
- [6] 吴波鸿,莫疆.膨胀土路堑边坡降雨入渗稳定性分析[J].建筑结构,2016,46(S1):851-855.
- [7] 平扬,刘明智,郑少河.降雨入渗条件下的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(S1):4478-4484.
- [8] 湛文涛,肖杰,陈冠一,等.膨胀土边坡渗流数值模拟及稳定性分析[J].工业建筑,2018,48(9):133-139.
- [9] 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.
- [10] 卢再华,陈正汉.非饱和原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型研究[J].岩土工程学报,2003,25(4):422-426.
- [11] 金旭,赵成刚,刘艳,等.非饱和原状土的弹塑性损伤本构模型[J].北京交通大学学报,2010,34(1):78-82+88.
- [12] 蒋中明,熊小虎,曾铃.基于FLAC^{3D}平台的边坡非饱和和降雨入渗分析[J].岩土力学,2014,35(3):855-861.
- [13] 谢强,田大浪,刘金辉,等.土质边坡的饱和-非饱和渗流分析及特殊应力修正[J].岩土力学,2019,40(3):879-892.
- [14] 唐静,夏永胜.不同降雨入渗条件下路堑边坡渗流特性研究[J].交通科学与工程,2021,37(3):22-29.

(下转第100页)

有突出的高温抗永久变形能力,其力学强度、水稳定性和低温抗裂性能也比 SBS 改性沥青、抗车辙剂沥青混合料有显著改善,较适合高速公路匝道等苛刻工况。

(2) 无车辙沥青路面施工工艺与常规沥青路面施工基本一致,不会增加操作难度,施工完成后可快速开放交通,具有良好的可行性和灵活性。

(3) 现场检测结果显示,无车辙沥青路面的各项性能均符合相关技术要求,具有一定推广应用价值。

参考文献:

- [1] 邵楠.混凝土匝道桥沥青铺装层工作状态研究[D].大连:大连理工大学,2021.
- [2] 陈广秀,李志栋,黄晓明,等.水泥砼弯坡桥沥青铺装系统设计关键指标研究[J].大连交通大学学报,2017,38(2):88-93.
- [3] 李志栋,史贵军.混凝土弯坡桥沥青铺装系汽车荷载组成及平面布置研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(3):13-21+29.
- [4] 梅亮,余晖,吉增晖,等.干线公路沥青路面平交道口抗车辙剂应用性能试验研究[J].石油沥青,2021,35(6):57-62.
- [5] 王晨.基于重载交通下沥青混合料抗车辙性能研究[D].唐山:华北理工大学,2021.
- [6] 黄卫东,莫定成,吕泉,等.基于汉堡车辙试验的TB复合改性沥青混合料高温性能评价[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(6):12-21.
- [7] 陈其龙,覃峰,靳卫华,等.新型高强沥青SHRP试验及混合料抗水侵蚀性能研究[J].公路与汽运,2022(4):81-85+124.
- [8] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F 40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [9] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [10] 张磊,伍石生,黄卫,等.面向桥面铺装动力响应分析的多尺度桥梁模型[J].中国公路学报,2012,25(3):87-93.
- 收稿日期:2022-03-02
- *****
- (上接第80页)
- [15] 唐凇,杨晓松,查旭东,等.基于含水率的重塑低液限黏土抗剪强度关系模型试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(2):26-32.
- [16] 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.
- [17] 吴礼舟,黄润秋.非饱和土渗流-变形耦合的数值分析[J].土木建筑与环境工程,2011,33(3):63-67.
- [18] 缪协兴,杨成永,陈至达.膨胀岩体中的湿度应力场理论[J].岩土力学,1993,14(4):49-55.
- [19] 路德春,杜修力,许成顺.有效应力原理解析[J].岩土工程学报,2013,35(S1):146-151.
- [20] 韦秉旭,周玉峰,刘义高,等.基于工程应用的膨胀土本构模型[J].中国公路学报,2007,20(2):18-22+50.
- 收稿日期:2022-09-03
- *****

《中外公路》2023 年征订通知

《中外公路》(原《国外公路》)创刊于1980年,双月刊,由长沙理工大学主管、主办,邮局公开发行至全国公路、市政、铁路、水利、建筑等系统和相关行业。属RCCSE中国核心学术期刊、首届中国高校特色科技期刊、中国高校技术类优秀期刊、中国科技核心期刊、湖南省十佳科技期刊、中国期刊全文数据库及中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,“桥梁工程与隧道工程”栏目荣获首届(2008年)湖南省优秀栏目,2009年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖,多次被评为交通部、湖南省优秀期刊。

2023年《中外公路》为大16开,每册定价15.00元,全年6期共90.00元。

邮发代号:42-63。读者也可通过邮局或银行汇款至编辑部直接订阅。

地址:长沙理工大学云塘校区58号信箱

邮编:410114

收款单位:《中外公路》编辑部

户名:长沙理工大学

账号:190101600910988886

开户行:工商银行长沙银迅支行

电话:0731-85258033(带传真)

联系人:白雪

E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com