

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.023



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 考虑非饱和土水-力耦合特性的加筋路堤湿化变形数值模拟研究

吴昊<sup>1</sup>, 栾晓寒<sup>1</sup>, 曾长贤<sup>2</sup>, 郑俊杰<sup>1</sup>, 郑烨炜<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 中铁第四勘察设计研究院有限公司, 武汉 430063)

**摘要:**路堤填土通常处于非饱和状态,降雨引起的雨水入渗会导致非饱和填土发生润湿,因而产生变形,从而导致路堤边坡发生变形。土工合成材料具有较高的抗拉强度,能减小路堤变形,并提高其稳定性。提出考虑非饱和土水-力耦合行为的本构模型,通过二次开发嵌入有限差分程序 FLAC,根据加载和湿化路径的三轴试验数据对本构模型进行验证。利用验证的非饱和土本构模型模拟路堤填料,研究非饱和土加筋路堤在降雨条件下的湿化变形行为,并对比研究筋材对路堤湿化变形的影响。结果表明:筋材在未加筋区几乎不产生影响,但能有效减小加筋区土体单元的体积应变和剪应变。筋材对路堤中线附近未加筋区的顶面沉降几乎不产生影响,但能有效减小路肩处的顶面沉降和路堤边坡的侧向位移。筋材越长,对减小路堤的顶面沉降和路堤边坡的侧向位移效果越好,路堤内部的潜在破坏面距坡面越远。

**关键词:**非饱和土;水-力耦合;本构模型;湿化变形;降雨入渗;加筋路堤

中图分类号:U416.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)04-0046-12

## Numerical simulation of wetting-induced deformations of reinforced embankments considering hydro-mechanical coupled behavior of unsaturated soils

WU Hao<sup>1</sup>, LUAN Xiaohan<sup>1</sup>, ZENG Changxian<sup>2</sup>, ZHENG Junjie<sup>1</sup>, ZHENG Yewei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan 430063, P. R. China)

**Abstract:** The embankment fills are typically of an unsaturated state. Rainfall infiltration results in deformations of unsaturated fills due to wetting, leading to deformations of embankment slope. Geosynthetics have high tensile strength, which can effectively reduce the deformations of embankment and improve the stability. A constitutive model that considers the hydro-mechanical coupled behavior of unsaturated soils was introduced and implemented in the finite difference program FLAC. Triaxial testing data involving loading and wetting paths were used to validate the constitutive model implemented in FLAC. Using the validated constitutive model to

收稿日期:2024-02-03

基金项目:国家自然科学基金(52078392、52078236);国家重点研发计划(2022YFC3080400)

作者简介:吴昊(1999-),男,主要从事非饱和土研究,E-mail:ahwuhao@whu.edu.cn

郑烨炜(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:yzheng@whu.edu.cn。

Received: 2024-02-03

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 52078392, 52078236); National Key R & D Program of China (No. 2022YFC3080400)

**Author brief:** WU Hao (1999-), main research interest: unsaturated soils, E-mail: ahwuhao@whu.edu.cn.

ZHENG Yewei (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yzheng@whu.edu.cn.

simulate the embankment fill, the deformation behavior of unsaturated reinforced embankments subjected to rainfall infiltration was investigated. The influence of geosynthetic reinforcement on the wetting-induced deformations of embankments was investigated. The results show that the reinforcements have negligible impact in the unreinforced zone. However, the reinforcements could effectively reduce the volumetric strains and shear strains of the soil elements in the reinforced zone. The reinforcements have a negligible effect on surface settlement in the unreinforced zone near the centerline of embankment but are effective in reducing surface settlement at the shoulder and lateral displacements of embankment slope under rainfall. The longer reinforcements are more efficient in reducing surface settlements of embankment and lateral displacements of slope and could also increase the distance between the slope surface and the potential failure surface.

**Keywords:** unsaturated soil; hydro-mechanical coupling; constitutive model; wetting-induced deformation; rainfall infiltration; reinforcement embankment

地表大部分土体都处于非饱和状态,湿化变形是非饱和土的一个重要特征<sup>[1-2]</sup>。降雨引起的雨水入渗会导致非饱和路基发生润湿而产生变形,从而导致路堤边坡发生变形甚至失稳<sup>[3]</sup>。钱纪芸等<sup>[4]</sup>利用离心机试验研究了降雨过程中边坡的变形发展规律。Wang 等<sup>[5]</sup>进行了一系列离心模型试验,研究了降雨强度和初始条件(如坡度、孔隙比和土体饱和度等)对降雨引起的路堤边坡变形行为和破坏模式的影响。孔郁斐等<sup>[6]</sup>利用有限元法对非饱和土边坡进行计算,分析了在降雨入渗过程中边坡孔隙水压及稳定安全系数的变化情况。目前,针对降雨条件下路堤边坡变形的研究主要通过模型试验开展,缺少相关的数值和理论分析来揭示非饱和路堤边坡的变形机理,主要原因在于缺少合适的非饱和土本构模型用于研究该类工程问题。

Alonso 等<sup>[7]</sup>于 20 世纪 90 年代初建立了非饱和土的弹塑性本构模型,称为 barcelona basic model (BBM)。该模型以净应力和基质吸力为应力状态变量,利用 BBM 能解释非饱和土的湿化变形行为。许多学者在 BBM 的基础上建立了更为复杂的非饱和土本构模型<sup>[8-10]</sup>,但这些模型无法实现非饱和与饱和状态的过渡,也没有考虑饱和度对应力-应变行为的影响,而相关研究表明,饱和度或者含水量对非饱和土的力学特性有重要影响<sup>[11-12]</sup>。Wheeler<sup>[13]</sup>首先发现了非饱和土的水-力耦合行为,如饱和度对土体抗剪强度的影响<sup>[14]</sup>、孔隙比对土-水特征曲线的影响<sup>[15]</sup>,之后越来越多的学者意识到非饱和土水-力耦合行为的重要性,开始将持水特性引入到非饱和土的本构模型中<sup>[16-17]</sup>。该系列水-力耦合本构模型多采用 Bishop 有效应力形式,在有效应力中引入饱和度<sup>[18-20]</sup>。此类模型不仅能较为准确地描述非饱和土的水-力耦合行为,还能较好地模拟非饱和土的湿化变形特性。

非饱和土的本构模型较为复杂,很少被编译到

数值软件中用于研究复杂的工程问题。一些学者将经典的 BBM 嵌入到数值软件中,用以研究非饱和土相关的工程问题。Costa 等<sup>[21]</sup>在有限元软件 CODE\_BRIGHT 中用 BBM 模拟非饱和填料,研究了土坝在施工和蓄水阶段的变形行为。Rutqvist 等<sup>[22]</sup>在 TOUGH-FLAC 模拟器中实现了 BBM 的热弹塑性版本,通过将吸力引起的应变等效为平均净应力模拟吸力变化引起的变形,研究了在热-水-力耦合作用下膨胀土回填隧道中膨胀土的力学响应。Zheng 等<sup>[23]</sup>在 FLAC 中实现了 BBM,并研究了非饱和路堤的湿化变形。然而,以上基于 BBM 的非饱和土本构模型没有考虑非饱和土的水-力耦合特性,不能准确描述非饱和土在湿化路径下的力学特性。因此,有必要建立考虑非饱和土水-力耦合特性的本构模型,并嵌入数值软件中,用于研究复杂的非饱和土相关工程问题。

土工合成材料加筋土技术被广泛用于提高挡墙、路堤、边坡等土工结构的工作性能<sup>[24-26]</sup>。Esmaili 等<sup>[27]</sup>采用有限元模拟和室内试验研究了土工格栅对路堤沉降和稳定性的控制作用,土工格栅层数越多路堤沉降越小。张嘎等<sup>[28]</sup>通过离心机模型试验对比研究了土工织物对边坡变形与破坏模式的影响,发现土工织物可以有效限制变形的发展,并增强边坡的稳定性。杨庆等<sup>[29]</sup>开展了室内小比尺模型试验,研究了土工格栅类型和加筋层数对路堤边坡在静载作用下的变形规律,结果表明,土工格栅的抗拉强度越高、加筋层数越多变形越小。以上研究表明,土工合成材料筋材能有效减小路堤变形和提高边坡稳定性,但对降雨条件下路堤湿化变形的影响机制尚不明确。

笔者提出一个可以考虑非饱和土水-力耦合特性的本构模型,并嵌入到有限差分软件 FLAC 中,根据文献中加载和湿化路径的三轴试验数据对本构模型进行验证,利用验证的非饱和土本构模型模

拟路堤填料,研究降雨条件下非饱和加筋路堤的湿化变形行为,并分析筋材长度和竖向间距对路堤湿化变形的影响。

## 1 非饱和土水-力耦合本构模型

非饱和土水-力耦合本构模型主要基于 Sun 等<sup>[30]</sup>提出的考虑非饱和土持水特性的弹塑性本构模型,力学模型部分与 Sun 等<sup>[30]</sup>的模型保持一致,并在水力模型部分做了一定简化,是 Sun 等<sup>[30]</sup>模型的一种变换形式。为了便于嵌入有限差分软件 FLAC,持水曲线采用 FLAC 软件中内置的 van Genuchten (vG) 模型<sup>[31]</sup>,并考虑孔隙比对持水曲线的影响。由于主要关注降雨条件下非饱和土的湿化变形行为,单调湿化过程中不存在干湿循环作用下的水力滞回效应,因此,该非饱和土水-力耦合本构模型不考虑非饱和土的水力滞回特性。

### 1.1 应力-应变关系

采用平均骨架应力  $p'$  和基质吸力  $s$  作为应力状态变量,土骨架应变  $e$  和饱和度  $S_r$  作为应变状态变量。平均有效应力,即平均骨架应力  $p'$  的表达式<sup>[32]</sup>为

$$p' = p - u_a + S_r s' \quad (1)$$

式中: $p$  为平均总应力;  $u_a$  为孔隙气压力。

图 1 为在各向等应力状态下的加载塌陷(LC)屈服线。描述  $p'$ - $s$  平面上非饱和土屈服应力  $p'_y$  与饱和土屈服应力  $p'_{0y}$  和吸力  $s$  之间关系的 LC 屈服线的表达式<sup>[30]</sup>为

$$p'_y = p'_n \left( \frac{p'_{0y}}{p'_n} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (2)$$

式中: $p'_{0y}$ 、 $p'_y$  分别对应饱、状态下和吸力为  $s$  时土体的有效屈服应力; $p'_n$  为当吸力减小时不发生变形的有效应力,即不同吸力下土体压缩曲线相交时对应的平均有效应力; $\kappa$  为土体的回弹指数; $\lambda(0)$ 、 $\lambda(s)$  分别对应饱和状态下和吸力为  $s$  时的压缩指数;其中

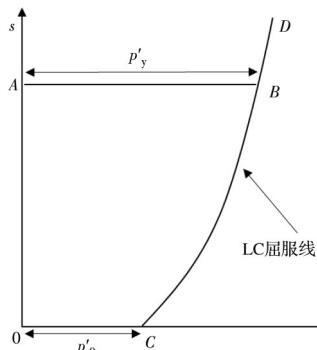


图 1 各向等应力状态下的 LC 屈服线

Fig. 1 Yield curve of LC under isotropic stress state

$\lambda(s)$  采用的计算式为<sup>[30]</sup>

$$\lambda(s) = \lambda(0) + \frac{\lambda_s s}{p_a + s} \quad (3)$$

式中: $\lambda_s$  为  $\lambda(s)$  随吸力  $s$  变化程度的参数; $p_a$  为标准大气压力。

模型采用与修正剑桥模型相同形式的屈服函数  $f$  和塑性势函数  $g$ ,采用平均骨架应力代替饱和土的有效应力。

$$f = g = q^2 + M^2 p'(p' - p'_y) = 0 \quad (4)$$

式中: $M$  为临界状态线斜率; $q$  为偏应力。图 2(a)、(b) 分别为  $s > 0$  和  $s = 0$  情况下的屈服曲线和  $p'$ - $q$ - $s$  空间中的屈服面。

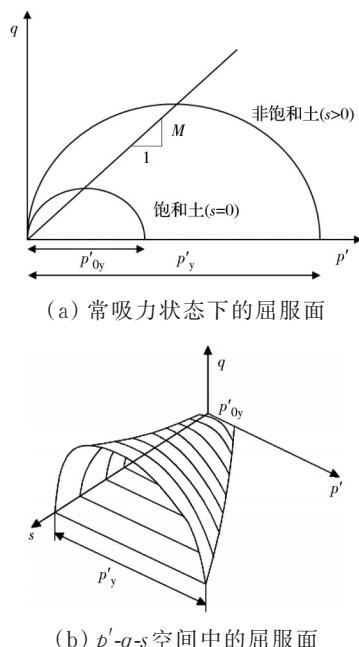


图 2 屈服面

Fig. 2 Yield surface

当应力状态位于屈服面内部时,弹性体积应变增量  $d\varepsilon_v^e$  的计算式为

$$d\varepsilon_v^e = \frac{dp'}{K} = \frac{\kappa dp'}{(1+e)p'} \quad (5)$$

式中: $e$  为当前孔隙比; $K$  为体积模量。当应力状态位于屈服面上时,塑性体积应变增量  $d\varepsilon_v^p$  的计算式为

$$d\varepsilon_v^p = \frac{(\lambda(0)-\kappa)dp'_{0y}}{(1+e)p'_{0y}} \quad (6)$$

### 1.2 持水特性

采用 vG 模型描述饱和度  $S_r$  与基质吸力  $s$  之间的关系,假设残余饱和度  $S_r^w$  为 0,其形式为

$$S_r = \left( \frac{1}{1 + (\alpha s)^n} \right)^m \quad (7)$$

式中: $1/\alpha$  为进气值; $m$ 、 $n$  为拟合参数,并假定  $m = 1 - 1/n$ 。

为考虑非饱和土孔隙体积变化对持水特性的影响,在vG模型的基础上嵌入了孔隙比 $e$ 与进气值 $1/\alpha$ 之间的关系。模型采用Nuth等<sup>[33]</sup>提出的进气值 $1/\alpha$ 与 $e$ 之间的线性关系式

$$1/\alpha = -Ae + B \quad (8)$$

式中: $A$ 和 $B$ 为拟合参数,可以通过不同孔隙比对应的持水曲线中的进气值进行拟合确定,如图3所示。

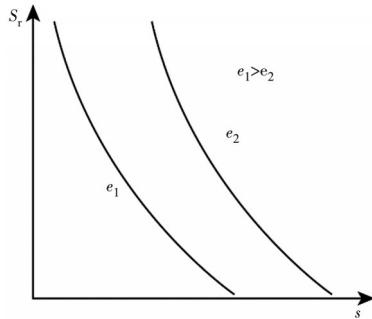


图3 不同孔隙比对应的持水曲线

Fig. 3 Water-retention curves at different void ratios

## 2 本构模型的实现与验证

### 2.1 本构模型在FLAC中的实现

在FLAC的两相流模式中,采用Bishop有效应力进行计算,其中,有效应力参数 $\chi$ 换成饱和度 $S_r$ 。因此,其有效应力形式与提出的本构模型中的有效应力形式保持一致。考虑非饱和土水-力耦合特性的本构模型在FLAC两相流模式中具体实现流程如图4所示。由初始应力状态进行力学计算可以得到孔隙比 $e$ ,随后利用式(8)可以计算得到 $\alpha$ 值,再结合此时的吸力 $s$ ,利用式(7)计算得到饱和度 $S_r$ 。此时水力参数更新完成并赋值到模型的每一个单元节点,从而得到更新的有效应力 $p'$ ,力学部分会根据此时的吸力对屈服应力 $p'_y$ 和压缩曲线斜率 $\lambda(s)$ 进行更新,随后再进行力学计算,通过计算得到的体积应变 $\epsilon_v$ 和塑性体积应变 $\epsilon_v^p$ 更新孔隙比 $e$ ,形成1个循环。

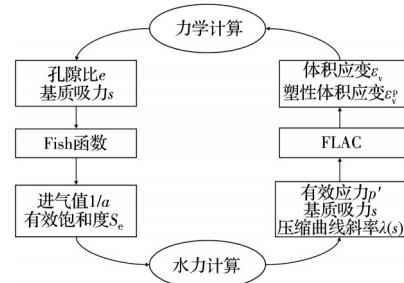


图4 水-力耦合本构模型计算流程图

Fig. 4 Flow chart of the hydro-mechanical coupled constitutive model

### 2.2 模型验证

Sun等<sup>[30]</sup>开展了一系列等向压缩条件下非饱和土的应力和吸力路径试验,图5为恒定吸力条件下等向压缩的应力路径和恒定总应力条件下的吸力路径。利用FLAC开展轴对称条件下对应的单元体数值模拟。在脱湿阶段,仅对单元体底部垂直方向进行约束,土体内部水流从侧面流出。在等向压缩阶段,控制其水平和垂直方向以相同的恒定速率进行压缩,水可以从底部流出。在吸湿阶段,其位移条件与脱湿阶段一致,而水流从侧面往内部流入。表1汇总了数值模拟中非饱和压实黏土的力学和水力参数<sup>[30]</sup>。

图6为三轴试验和数值模拟结果对比,结果表明,数值模拟和三轴试验在力学和水力响应方面的吻合程度均较高。在脱湿的阶段过程BC,土体在恒定应力条件下吸力从130 kPa增加到147 kPa,饱和度从52%减小到51%,但是由于吸力变化范围较

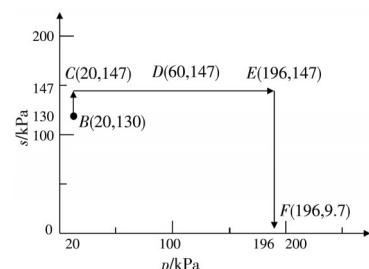


图5 等向应力状态下的应力和吸力路径

Fig. 5 Stress and suction paths of isotropic loading tests

表1 压实黏土模型参数<sup>[30]</sup>

Table 1 Parameters for pearl clay soil<sup>[30]</sup>

力学参数	数值	水力参数	数值
干密度 $\rho/(kg/m^3)$	1 500	初始饱和度 $S_r/%$	52
饱和状态压缩曲线斜率 $\lambda(0)$	0.12	拟合参数 $(1/\alpha)/kPa$	1.322
回弹曲线斜率 $\kappa$	0.03	拟合参数 $m$	0.12
临界状态线斜率 $M$	1.1	水平渗透系数 $k_h/(cm/s)$	$1.0 \times 10^{-7}$
初始比体积 $v$	2.35	垂直渗透系数 $k_v/(cm/s)$	$5.0 \times 10^{-8}$
标准大气压力 $p_a/kPa$	101	饱和状态初始有效屈服压力 $p'_{oy}/kPa$	15
泊松比 $\nu$	0.3	吸力减小时不发生变形的有效应力 $p_n'/MPa$	1.7
反应 $\lambda(s)$ 随 $s$ 变化的参数 $\lambda_s$	0.12		

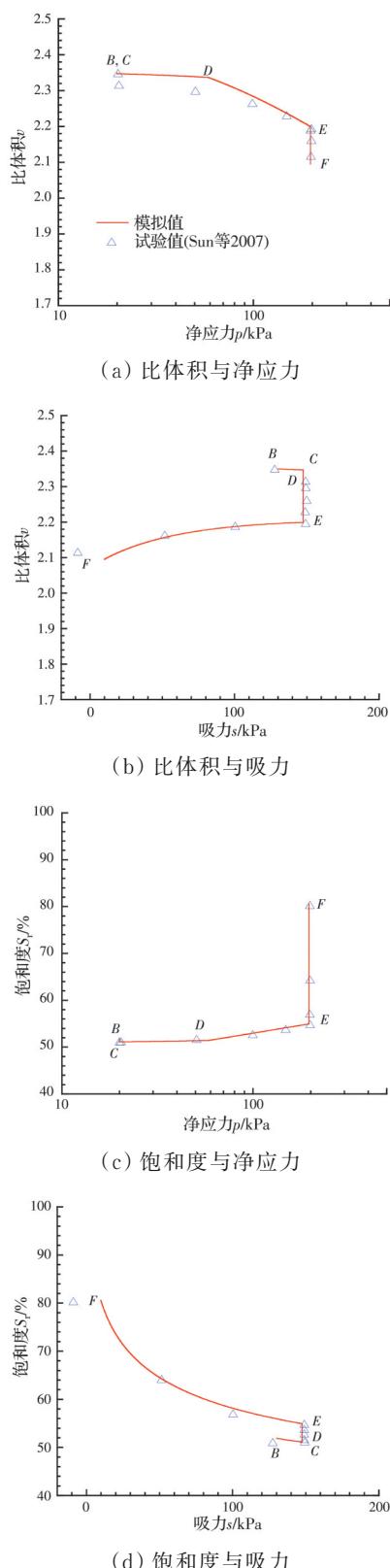


图 6 三轴试验与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison between experimental and simulated results of triaxial test

小,单元体的比体积变化几乎不变(图 6(a))。在等向压缩 CDE 段,土体在恒定吸力条件下净应力从 20 kPa 增加到 196 kPa,比体积先从 C 点逐渐减小到 D 点,在 D 点发生屈服,并迅速减小到 E 点(图 6

(a))。在等向压缩过程中,单元体体积减小,同时饱和度从 51% 增加到 55%(图 6(d)),表明在恒定吸力条件下,由于孔隙体积的变化,饱和度并不是一个恒定值,说明该本构模型可以考虑非饱和土的力学特性对持水特性的影响。在吸湿阶段的过程 EF, 土体在恒定应力条件下吸力从 147 kPa 减小到 9.7 kPa,饱和度非线性增加到 81%,比体积大幅减小,发生湿陷变形(图 6(a))。在吸湿过程中,随着吸力的减小,有效应力发生变化,先期有效固结应力减小,压缩指数增大,导致土体的孔隙体积减小,说明该本构模型可以考虑湿化条件下水力特性对力学特性的影响。总体而言,对比验证结果说明该本构模型可以较为准确地模拟非饱和土的水-力耦合特性。

### 3 降雨条件下非饱和加筋路堤湿化变形数值模拟

#### 3.1 路堤模型

采用验证的非饱和土水-力耦合本构模型研究降雨条件下的非饱和加筋路堤的湿化变形行为。由于该路堤是一个对称结构,故取路堤的一半结构开展数值模拟。图 7 为路堤模型的尺寸和边界条件。根据公路路基设计规范要求<sup>[34]</sup>,对于一般路基,路堤高度小于 8 m 时其边坡坡率不宜陡于 1:1.5。因此,选取路堤高度为  $H=6$  m,顶面宽度为 8 m,边坡坡率为 1:1.5(垂直比水平)。地基土厚度为 6 m,总宽度为 30 m。土工格栅长度  $L_r=4.2$  m( $0.7H$ ),沿坡面向内布置,根据 FHWA 设计规范<sup>[35]</sup>,加筋边坡筋材的典型竖向间距  $S_v=0.6$  m。cable 单元被广泛用于模拟加筋土结构中的土工格栅,并通过界面模拟土工格栅与填料之间的相互作用<sup>[36]</sup>,主要考虑 cable 单元与填料之间的摩擦作用,cable 单元可以通过水平和竖向弹簧模拟土工格栅与周围土体的相互作用。在界面剪切力小于界面剪切强度时,筋材与土体单元变形保持协调。界面强度参数取值通过对填料的强度参数进行折减确定<sup>[37]</sup>。土工格栅的抗拉刚度取 1 000 kN/m,属于实际工程中比较常见的筋材拉伸刚度<sup>[38]</sup>,筋材-填土界面的摩擦角取 31.3°。由于土工格栅的网孔平面开口尺寸较大,故假定其完全透水。同时,建立一个没有筋材的路堤模型,用于对比研究降雨条件下筋材对路堤湿化变形的影响。

模型的底部边界在垂直和水平方向上固定,左右两边的边界只约束其水平方向。底部和左侧设定为不透水边界,模型的顶部和右侧被设定为透水边界。根据中国气象局标准<sup>[39]</sup>,降雨强度设置为

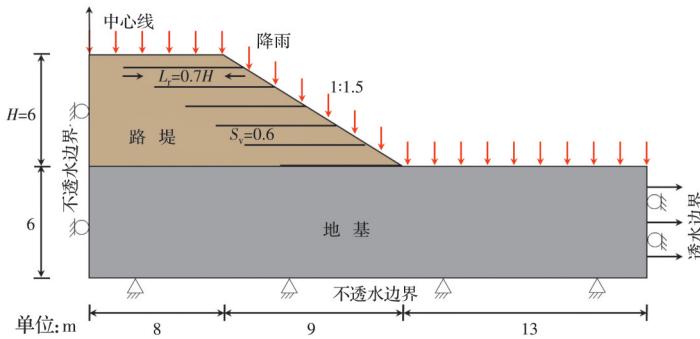


图7 路堤模型尺寸和边界条件

Fig. 7 Geometry and boundary conditions of embankment model

20 mm/d,以模拟中雨情况。

路堤填料假设为模型验证中的压实粉质黏土,模型参数见表1。根据公路路基施工技术规范要求<sup>[40]</sup>,针对一般二级公路路基设计要求,填料的相对压实度应不小于94%。Tatsuoka等<sup>[41]</sup>通过试验发现,填料的最优饱和度为80%左右,为了确保相对压实度大于94%,饱和度一般在最优饱和度的-20%~+5%范围内。因此,假设路堤压实填料的初始饱和度为70%。

地基土采用Mohr-Coulomb模型模拟,其摩擦角 $\phi=46^\circ$ ,泊松比 $\nu=0.3$ ,弹性模量 $E=40$  MPa。假设地下水位在地基土顶面,因此,雨水入渗不会影响地基土的行为。实际工程中,路堤施工通过分层填筑完成。在模拟过程中,首先建立地基土的地应力平衡状态,然后分层施工填筑压实路堤并铺设水平筋材,通过分层填筑更加准确地模拟土体的应力状态。路堤填筑完成后,在模型上部边界,包括路堤顶面和坡面以及地基土表面施加降雨入渗条件。

### 3.2 路堤典型单元LC屈服线分析

图8为路堤中心线不同高度处土体单元C、D、E从初始状态到完全饱和时LC屈服线的变化情况。初始状态下,由于上覆荷载较大,完工后深层土体单元屈服应力高于浅层土体单元。初始吸力相同

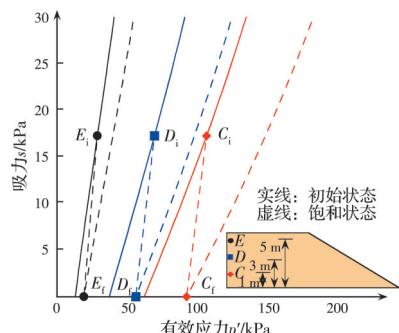


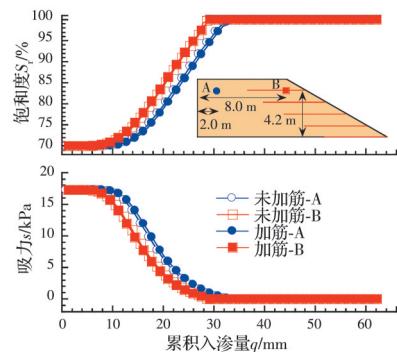
图8 降雨过程中路堤土体单元LC屈服线的变化过程

Fig. 8 Evolutions of embankment soil element's LC curves during rainfall

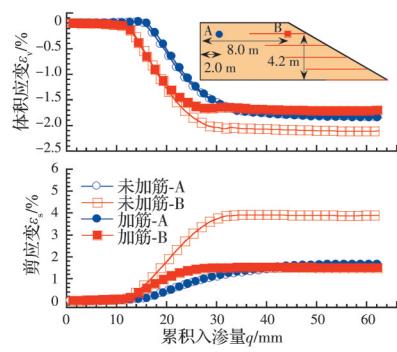
的3个土体单元在整个降雨过程中有效应力逐渐减小,而LC屈服线一直向外扩张,说明土体单元在降雨过程中发生了屈服,产生了塑性体变。

### 3.3 路堤典型单元结果分析

选取路堤高4.2 m,距中线2.8 m处的土体单元A和B进行分析。图9(a)为路堤土体单元饱和度与吸力随累积入渗量 $q$ 变化的曲线。在整个降雨过程中,对于单元A和B,未加筋和加筋工况下饱和度与吸力的变化规律基本一致,这是由于筋材的存在不会影响雨水的渗入。对比单元A和B的饱和度变化曲线,虽然两个单元处于同一高度,但靠近路肩处的单元B饱和度变化要稍快于靠近中心线附近的单元A,表明路肩处的入渗速率比中心线处更快。



(a) 饱和度与吸力



(b) 体积应变与剪应变

图9 降雨过程中路堤土体单元的水力响应

Fig. 9 Hydro-mechanical response of embankment soil element during rainfall

图9(b)为路堤土体单元A和B的体积应变与剪应变随累积入渗量的变化曲线。在整个降雨过程中,对于靠近中线附近的单元A,未加筋与加筋工况中的体应变和剪应变基本一致,可见,筋材对于靠近中线处的土体(未加筋区域)几乎没有影响。对于靠近路肩处的单元B,当累积入渗量小于15 mm时,未加筋和加筋路堤中单元B的体积应变基本一致。随着累积入渗量持续增加,加筋路堤中单元B的体应变逐渐小于未加筋路堤,并在累积入渗量达到30 mm(完全饱和)后,两个工况中的体应变都达到稳定值。此时,未加筋和加筋路堤中单元B的体应变分别为2.1%、1.7%。对于单元B的剪应变,当累积入渗量小于13 mm时,未加筋与加筋路堤中的剪应变值均较小,仅为0.15%。随着累积入渗量不断增大,加筋对于减小土体剪应变的效果变得越来越明显。当单元B达到完全饱和时,未加筋路堤中的剪应变为3.9%,而加筋路堤中仅为1.5%,表明筋材能有效阻止边坡土体剪应变的发展。

### 3.4 路堤顶面沉降结果分析

图10(a)是未加筋路堤顶面沉降随累积入渗量的变化曲线。在降雨入渗初期,累积入渗量达到10 mm时,未加筋路堤顶面沉降整体较为均匀,大约为8 mm。当累积入渗量达到20 mm时,路堤顶面沉降开始大幅增加,距离中线5 m范围内顶面沉降约为25 mm,但随着距离增大,沉降迅速增加,尤其在靠近路肩处,沉降达到了48 mm左右。路堤顶面中线处和路肩处的差异沉降达到了23 mm。随着降雨入渗量持续增加,路堤顶面沉降进一步发展,中线处和路肩处的差异沉降也进一步增大。当累积入渗量超过50 mm后,路堤接近饱和,顶面沉降趋于稳定。

对于图10(b)中的加筋路堤,当累积入渗量达到10 mm时,路堤顶面沉降与未加筋路堤基本相同。当累积入渗量达到20 mm时,路堤顶面沉降整体较为均匀,中线处和路肩处的差异沉降约为4 mm,仅为未加筋路堤的17%。随着累积入渗量持续增加,路堤顶面沉降进一步发展,靠近边坡的路堤顶面沉降稍大于靠近中线处,并在距离中心线4.2 m处形成大约10 mm差异沉降,这是由于该位置处于筋材末端,筋材的存在使得路堤刚度发生了变化,但沉降总体较为均匀,说明筋材可以减小路堤顶面的差异沉降。当累积入渗量达到60 mm时,加筋路堤路肩处沉降为140 mm,而未加筋路堤该处沉降达到185 mm,说明筋材可以有效减小降雨条件下路肩处沉降。

图10(c)为路堤顶面中线处和路肩处的差异沉

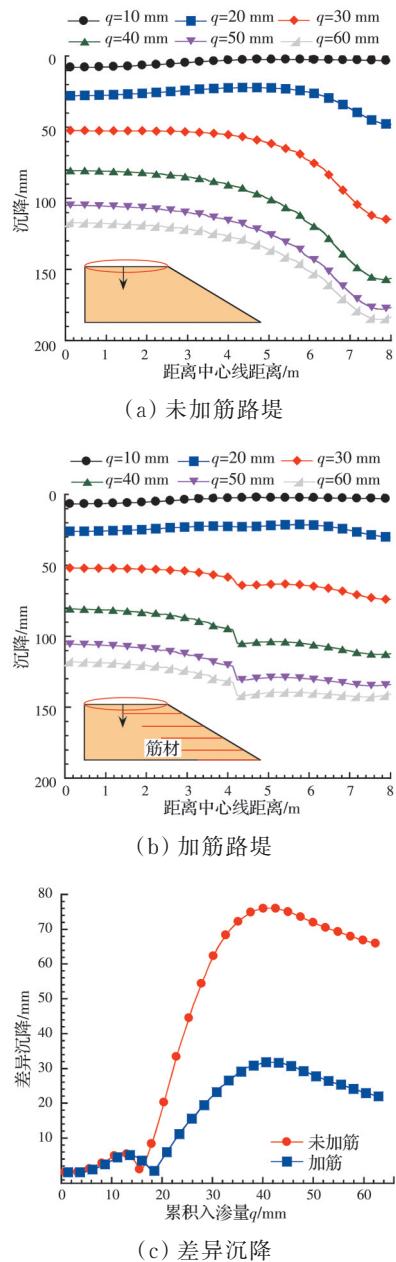


图10 雨期路堤顶面沉降

Fig.10 Top surface settlement of embankment during rainfall

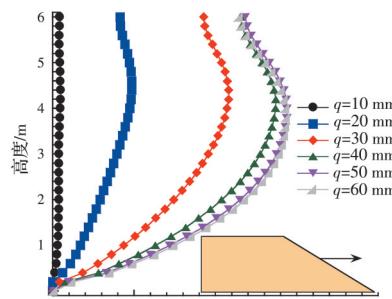
降随累积入渗量发展曲线。当累积入渗量小于16 mm时,未加筋和加筋路堤顶面沉降基本一致,整体较小。随着累积入渗量持续增大,路堤顶面差异沉降迅速发展,并在累积入渗量40 mm时达到最大值,对应未加筋和加筋路堤顶面的差异沉降分别为75、30 mm,进一步说明筋材可以有效减小路堤顶面的差异沉降。当累积入渗量超过40 mm后,差异沉降有所减小,主要是由于路堤中心线处渗透路径比边坡处更长,此时中心处的沉降比路肩处发展更多,因此差异沉降减小。

### 3.5 路堤坡面侧向位移结果分析

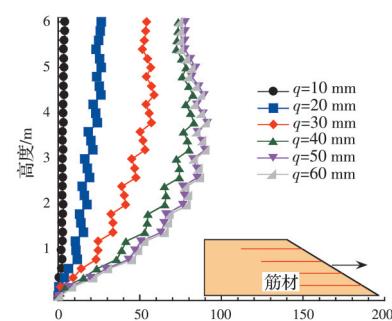
图11(a)是未加筋路堤坡面侧向位移随累积入渗量的变化曲线。当累积入渗量达到10 mm时,未

加筋路堤坡面侧向位移较小,大约为5 mm。当累积入渗量达到20 mm时,路堤坡面侧向位移开始快速增大,路堤坡面侧向位移最大值约为50 mm,发生在约4 m高处。随着降雨的持续进行,路堤坡面侧向位移进一步发展,在累积入渗量超过50 mm后,路堤坡面侧向位移基本达到稳定,最大侧移为143 mm。

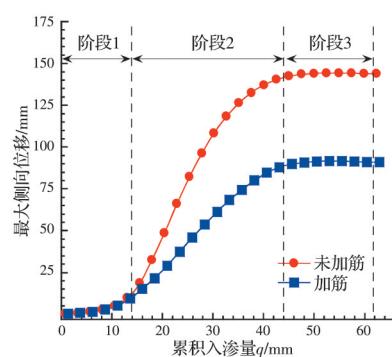
对于图11(b)中的加筋路堤,与顶面沉降类似,在累积入渗量小于10 mm时,坡面侧向位移较小。当累积入渗量达到30 mm后,4 m高处的侧向位移值约为55 mm,为未加筋路堤的50%,表明筋材减小侧向位移的效果开始显现。随着累积入渗量不断增加,侧向位移也持续发展,但远小于未加筋路堤中相应侧向位移。当累积入渗量达到60 mm时,未加筋与加筋路堤的最大侧向位移分别为142、90 mm,说



(a) 未加筋路堤



(b) 加筋路堤



(c) 最大侧向位移

图11 降雨过程中坡面侧向位移

Fig.11 Lateral displacement of slope during rainfall

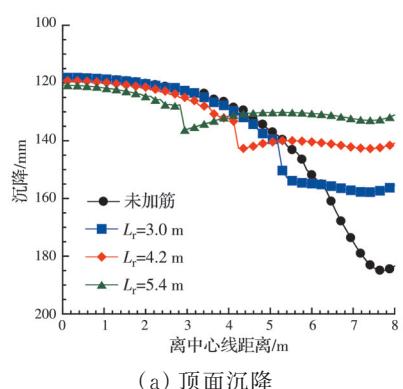
明筋材可以有效减小降雨条件下路堤边坡的侧向位移。

图11(c)为未加筋与加筋路堤边坡面最大侧向位移随累积入渗量的变化曲线,其变化可以分为3个阶段,分别为低速发展阶段、快速增长阶段和稳定阶段。当累积入渗量小于14 mm时,未加筋与加筋路堤坡面侧向位移发展较为缓慢,最大侧移基本相同。当累积入渗量进一步增大时,最大侧移开始快速增长,未加筋路堤的最大侧移发展速率比加筋路堤更快。当累积入渗量达到44.3 mm时,未加筋与加筋路堤的最大侧移均达到稳定。

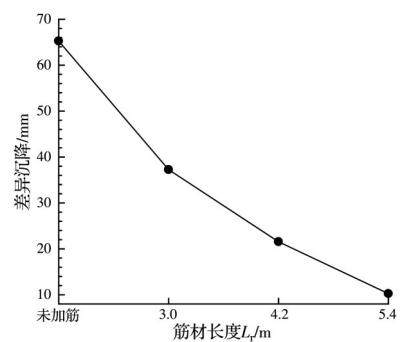
## 4 参数分析

### 4.1 筋材长度的影响

选取筋材长度  $L_r = 3.0 \text{ m} (0.5H)$ 、 $4.2 \text{ m} (0.7H)$ 、 $5.4 \text{ m} (0.9H)$  3种工况进行参数分析,并与未加筋工况进行对比,各工况中筋材竖向间距  $S_v$  均为0.6 m。图12(a)为降雨条件下路堤达到完全饱和后不同筋材长度的路堤顶面沉降曲线。路堤顶面的沉降在靠近边坡的加筋区明显小于未加筋路堤,且沉降随筋材长度增加而减小,在加筋区末端存在一定的差异沉降,这主要是由于路堤刚度发生突变所致。在靠近路堤中线的未加筋区,加筋与未



(a) 顶面沉降



(b) 差异沉降

图12 筋材长度对路堤顶面沉降的影响

Fig.12 Effect of reinforcement length on surface settlement of embankment

加筋路堤沉降基本保持一致,筋材长度的影响很小。图 12(b)展现了不同筋材长度下路堤顶面的最终差异沉降值。未加筋路堤顶面的最大差异沉降值为 68 mm,当筋材长度为 3.0 m 时,差异沉降值减小到 37 mm,随着筋材长度的增加,减小差异沉降的效果也继续提高。

图 13(a)为降雨条件下不同筋材长度的路堤完全饱和后的坡面侧向位移曲线。由图 13(a)可见,筋材能有效限制边坡侧向位移的发展,侧向位移的最大位置均发生在 3~4 m 高处。图 13(b)为不同筋材长度下路堤坡面最大侧移值。未加筋时其最大侧移为 144 mm,当筋材长为 3.0、4.2、5.4 m 时,最大侧移分别为 101、91、80 mm,坡面最大侧移值随着筋材长度的增加而减小。

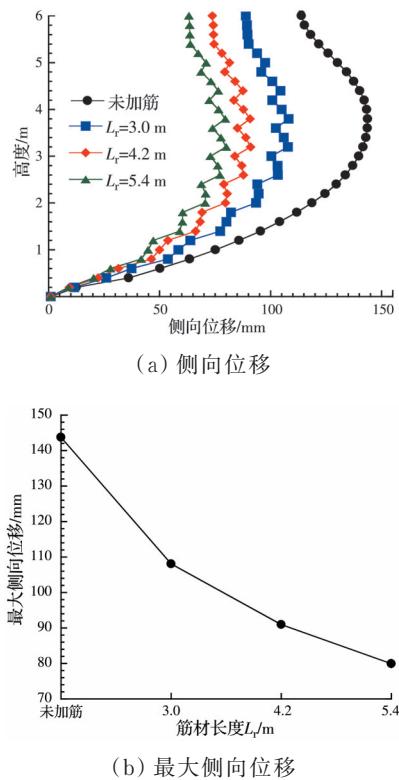


图 13 筋材长度对坡面侧向位移的影响

Fig.13 Effect of reinforcement length on lateral displacement of slope

图 14 为降雨条件下不同筋材长度的路堤饱和时的剪应变云图。一方面,路堤中最大剪应变值随着筋材长度的增加而减小,说明筋材能有效提高路堤边坡的稳定性。另一方面,筋材的存在还会影响最大剪应变值出现的位置。当未加筋时,潜在破坏面出现在距离坡面约 2 m 处。当筋材长度从 3.0 m 增加到 4.2 m,再增加到 5.4 m 时,潜在破坏面的位置距离坡面依次约为 3.1、4.6、5.8 m,潜在破坏面离坡面的距离越来越远,说明潜在破坏面的位置随

着筋材长度的增加而不断向路堤内部移动。

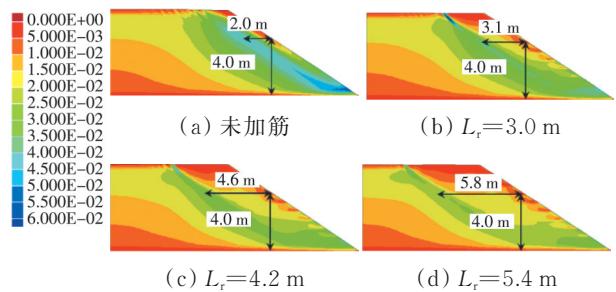
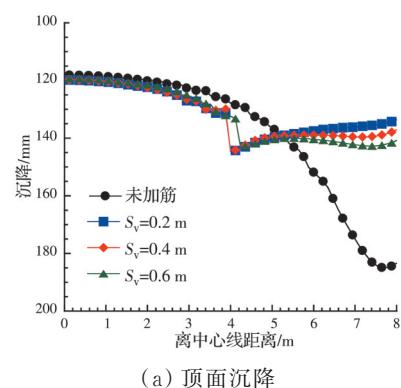


图 14 筋材长度对路堤剪应变的影响

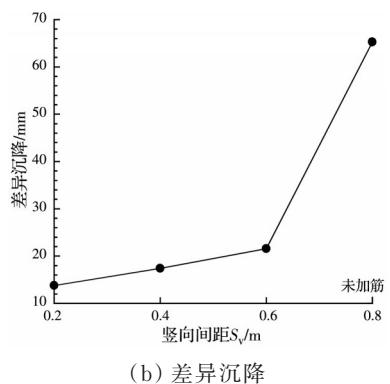
Fig.14 Effect of reinforcement length on embankment shear strain

#### 4.2 筋材竖向间距的影响

选取筋材竖向间距  $S_v=0.2、0.4、0.6\text{ m}$  三种工况进行参数分析,长度均为 4.2 m,并与未加筋工况进行对比。图 15(a)为降雨条件下不同筋材竖向间距的路堤完全饱和后路堤顶面沉降曲线。路肩处的顶面沉降随着筋材竖向间距的减小而稍有减小,但在筋材末端的沉降值基本一致。图 15(b)展现了不同筋材竖向间距下路堤顶面的最终差异沉降值。当竖向间距从 0.6 m 减小到 0.2 m 时,差异沉降依次为 21、17、14 mm。虽然竖向间距变小以后差异沉降有所减小,但减小效果并不明显。



(a) 顶面沉降



(b) 差异沉降

图 15 筋材竖向间距对路堤顶面沉降影响

Fig.15 Effect of reinforcement vertical spacing on surface settlement of embankment

图16(a)为降雨条件下不同筋材竖向间距的路堤完全饱和时坡面侧向位移曲线。随着筋材竖向间距从0.6 m减小到0.2 m,路堤坡面的侧移有所减小,但效果并不明显。图16(b)为不同筋材竖向间距下路堤边坡面的最大侧移值。竖向间距为0.6 m时,最大侧移值为91 mm,相比未加筋工况减少了36%。随着竖向间距的进一步减小,最大侧移稍有减小。图17为不同筋材竖向间距的路堤在完全饱和后的剪应变云图。竖向间距从0.2 m变化到0.6 m时剪应变云图几乎没有区别,表明筋材竖向间距对潜在破坏面的影响较小,加密筋材并没有改变其潜在破坏面的位置。

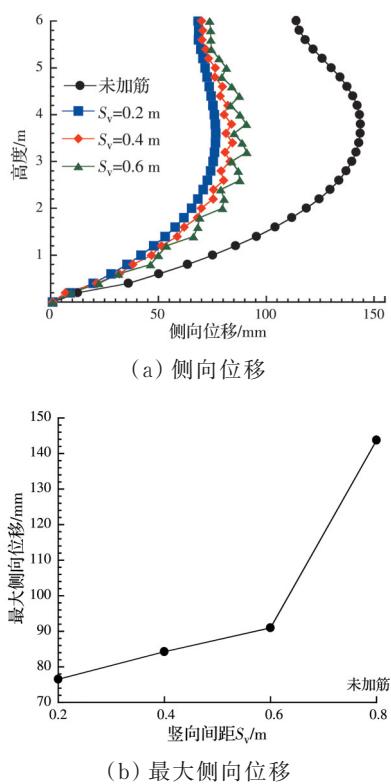


图16 筋材竖向间距对坡面侧向位移影响

Fig.16 Effect of reinforcement vertical spacing on lateral displacement of slope

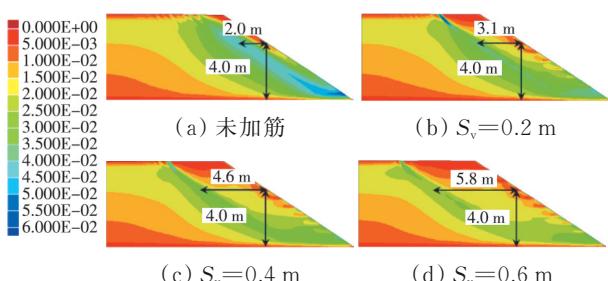


图17 筋材竖向间距对路堤剪应变影响

Fig.17 Effect of reinforcement vertical spacing on embankment shear strain

## 5 结论

提出了一个考虑非饱和土水-力耦合特性的本构模型,并在有限差分软件FLAC中进行二次开发,利用文献中的三轴试验数据对模型进行验证。利用该本构模型研究非饱和加筋路堤在降雨过程中的湿化变形特性,得到以下主要结论:

1)该本构模型既考虑了饱和度和吸力对力学特性的影响,也考虑了孔隙比对持水特性的影响,验证结果表明,该模型可以较好模拟非饱和土的水-力耦合特性。

2)在降雨过程中,加筋与未加筋路堤中土体单元的饱和度和吸力变化规律基本一致,表明筋材基本不会影响雨水的渗入。同时,筋材对靠近路线中线处(未加筋区)土体单元的体应变与剪应变影响较小,但筋材可以有效减小路肩处(加筋区)土体单元的体应变与剪应变。

3)随着降雨入渗量的增加,路堤顶面沉降不断增大。筋材能有效减小降雨条件下路肩处的顶面沉降,但对于路堤中线附近的未加筋区的顶面沉降基本没有影响。

4)路堤坡面最大侧向位移发生在约4 m高处。筋材能有效减小路堤边坡的侧向位移。对于未加筋与加筋路堤,随着累积入渗量的增加,路堤边坡的最大侧向位移发展可以分为3个阶段:低速发展阶段、快速增长阶段和稳定阶段。

5)筋材的长度和竖向间距都会对路堤的顶面沉降和边坡的侧向位移产生影响。当筋材长度越长、竖向间距越小时,其减小路堤湿化变形的效果越好。同时,筋材长度越长,路堤内部的潜在破坏面距坡面也越远。

6)加筋可以显著减小非饱和路堤在降雨条件下引起的湿化变形,在筋材布置的设计中,建议采用0.6 m的竖向间距,同时长度不小于2.0 m,并且尽可能采用较长的筋材。

## 参考文献

- [1] 缪林昌. 非饱和土的本构模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 855-860.
- [2] MIAO L C. Research of constitutive model of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 855-860. (in Chinese)
- [3] MILLER G A, MURALEETHARAN K K, LIM Y Y. Wetting-induced settlement of compacted-fill embankments [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1755(1): 111-118.

- [3] LE T M H, GALLIPOLI D, SANCHEZ M, et al. Rainfall-induced differential settlements of foundations on heterogeneous unsaturated soils [J]. *Géotechnique*, 2013, 63(15): 1346-1355.
- [4] 钱纪芸, 张嘎, 张建民, 等. 降雨时黏性土边坡的离心模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 829-833.  
QIAN J Y, ZHANG G, ZHANG J M, et al. Centrifuge model tests of cohesive soil slopes during rainfall [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2009, 49(6): 829-833. (in Chinese)
- [5] WANG S, IDINGER G, WU W. Centrifuge modelling of rainfall-induced slope failure in variably saturated soil [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(9): 2899-2916.
- [6] 孔郁斐, 宋二祥, 杨军, 等. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(6): 16-21.  
KONG Y F, SONG E X, YANG J, et al. Rainfall's effect on the stability of unsaturated slopes [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(6): 16-21. (in Chinese)
- [7] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils [J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 405-430.
- [8] WHEELER S J, SIVAKUMAR V. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil [J]. *Géotechnique*, 1995, 45(1): 35-53.
- [9] CHIU C F, NG C W W. A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(9): 809-829.
- [10] 姚仰平, 牛雷, 崔文杰, 等. 超固结非饱和土的本构关系[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 833-839.  
YAO Y P, NIU L, CUI W J, et al. UH model for unsaturated soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(6): 833-839. (in Chinese)
- [11] SIVAKUMAR V, WHEELER S J. Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 1: Wetting and isotropic compression [J]. *Géotechnique*, 2000, 50(4): 359-368.
- [12] SUN D A, SUN W J, XIANG L. Effect of degree of saturation on mechanical behaviour of unsaturated soils and its elastoplastic simulation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, 37(5): 678-688.
- [13] WHEELER S J. Inclusion of specific water volume within an elasto-plastic model for unsaturated soil [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(1): 42-57.
- [14] LEE I M, SUNG S G, CHO G C. Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(2): 624-631.
- [15] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(1): 105-112.
- [16] SUN W J, SUN D A. Coupled modelling of hydro-mechanical behaviour of unsaturated compacted expansive soils [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012, 36(8): 1002-1022.
- [17] 孙德安. 非饱和土的水力和力学特性及其弹塑性描述 [J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3217-3231.  
SUN D A. Hydro-mechanical behaviours of unsaturated soils and their elastoplastic modelling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3217-3231. (in Chinese)
- [18] GALLIPOLI D, GEN S A, SHARMA R, et al. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(1): 123-135.
- [19] WHEELER S J, SHARMA R S, BUISSON M S R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(1): 41-54.
- [20] 马田田, 韦昌富, 陈盼, 等. 非饱和土毛细滞回与变形耦合弹塑性本构模型[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3263-3270.  
MA T T, WEI C F, CHEN P, et al. An elastoplastic constitutive model of unsaturated soils with capillary hysteresis and deformation coupling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3263-3270. (in Chinese)
- [21] COSTA L M, ALONSO E E. Predicting the behavior of an earth and rockfill dam under construction [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(7): 851-862.
- [22] RUTQVIST J, IJIRI Y, YAMAMOTO H. Implementation of the Barcelona Basic Model into TOUGH-FLAC for simulations of the geomechanical behavior of unsaturated soils [J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(6): 751-762.
- [23] ZHENG Y W, HATAMI K, MILLER G A. Numerical simulation of wetting-induced settlement of embankments [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(3): D4017001.
- [24] SELVADURAI A P S, GNANENDRAN C T. An experimental study of a footing located on a sloped fill: Influence of a soil reinforcement layer [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26(3): 467-473.
- [25] SHARMA J S, BOLTON M D. Centrifuge modelling of an embankment on soft clay reinforced with a geogrid [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1996, 14(1): 0266114496000039.
- [26] 杨广庆, 牛笑笛, 周诗广, 等. 复合式整体刚性面板加筋土挡墙结构行为试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42

- (7): 1794-1802.
- YANG G Q, NIU X D, ZHOU S G, et al. Experimental study on structural behavior of reinforced retaining wall with composite full-height rigid facing [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(7): 1794-1802. (in Chinese)
- [27] ESMAEILI M, NADERI B, NEYESTANAKI H K, et al. Investigating the effect of geogrid on stabilization of high railway embankments [J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(2): 319-332.
- [28] 张嘎, 王爱霞, 张建民, 等. 土工织物加筋土坡变形和破坏过程的离心模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2057-2060.
- ZHANG G, WANG A X, ZHANG J M, et al. Centrifuge modeling of the failure of geotextile-reinforced slopes [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, 48(12): 2057-2060. (in Chinese)
- [29] 杨庆, 季大雪, 栾茂田, 等. 土工格栅加筋路堤边坡结构性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1243-1246, 1252.
- YANG Q, JI D X, LUAN M T, et al. Studies on structural performance of embankment slopes reinforced by geogrids with model tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1243-1246, 1252. (in Chinese)
- [30] SUN D A, SHENG D C, SLOAN S W. Elastoplastic modelling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated soils [J]. *Mechanics of Materials*, 2007, 39(3): 212-221.
- [31] 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.
- [32] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils [J]. *Géotechnique*, 1963, 13(3): 177-197.
- [33] NUTH M, LALOUI L. Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils [J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(6): 835-844.
- [34] 公路路基设计规范: JTGD30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Specifications for design of highway subgrades: JTGD30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [35] Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes-Volume I: FHWA-NHI-10-024, FHWA GEC 011-Volume I [R]. Washington, D. C.: National Highway Institute, Federal Highway Administration U. S. Department of Transportation, 2009.
- [36] ZHENG Y, LI F, NIU X, et al. Numerical investigation of the interaction of back-to-back MSE walls [J]. *Geosynthetics International*, 2023, 30(4): 382-397.
- [37] ZHENG Y W, FOX P J. Numerical investigation of the geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system under static loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(6): 04017008.
- [38] YANG G Q, LIU H B, ZHOU Y T, et al. Post-construction performance of a two-tiered geogrid reinforced soil wall backfilled with soil-rock mixture [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(2): 91-97.
- [39] ZHAO D M, ZHA J L, WU J. Changes in daily and cumulative volumetric rainfall at various intensity levels due to urban surface expansion over China [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2020, 72(1): 1745532.
- [40] 公路路基施工技术规范: JTGT3610—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Technical specifications for construction of highway subgrades: JTGT3610—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese)
- [41] TATSUOKA F, GOMES CORREIA A. Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction linked to soil structure design [J]. *Transportation Geotechnics*, 2018, 17: 3-23.

(编辑 胡玲)