

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210929001

文章编号: 1674-599X(2023)03-0038-08

引用格式: 韦秉旭, 易垒, 李金明, 等. 降雨入渗-膨胀土-刚柔复合挡墙数值模拟[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 38-45.

Citation: WEI Bingxu, YI Lei, LI Jinming, et al. Numerical simulation of rainfall infiltration - expansive soil - rigid flexible composite retaining wall [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(3): 38-45.

降雨入渗-膨胀土-刚柔复合挡墙数值模拟

韦秉旭¹, 易垒¹, 李金明², 谢唐新¹, 杨超²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广西路建工程集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘 要: 为研究不同降雨条件下膨胀土地区墙背侧向压力的变化情况, 以及 EPS 垫层模量对刚柔复合挡墙应力应变的影响, 采用 GeoStudio 及 FLAC^{3D} 软件, 通过多场耦合的膨胀土本构模型, 对降雨条件下膨胀土填坡刚柔复合挡墙结构进行了数值模拟。研究表明: ① 随着降雨的入渗, 墙背侧向压力显著增大; 在停雨期, 更深处土层的墙背侧向压力更大, 而面层的则呈减小趋势。② 与刚性挡墙相比, 刚柔复合挡墙的墙背侧向土压力和挡墙的水平位移明显减小, 且随着 EPS 垫层模量的减小, 其压缩量增大, EPS 垫层的减压效果显著提升。③ 要根据实际工程对 EPS 垫层模量进行合理取值。

关键词: 刚柔复合挡墙; 膨胀土; 降雨入渗; EPS 垫层

中图分类号: U414

文献标志码: A

Numerical simulation of rainfall infiltration - expansive soil - rigid flexible composite retaining wall

WEI Bingxu¹, YI Lei¹, LI Jinming², XIE Tangxin¹, YANG Chao²

(1. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Guangxi Road Construction Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: To investigate the variation of lateral pressure on the backside of retaining walls in different rainfall conditions and the influence of expanded polystyrene (EPS) layer modulus on stress-strain behavior of rigid-flexible composite walls, this study employed GeoStudio and FLAC^{3D} software to numerically simulate the behavior of embankments with expansive soil subjected to rainfall. The results indicate the following: ① With rainfall infiltration, the lateral pressure on the backside of the wall significantly increases; during the rain cessation period, the lateral pressure increases for deeper soil layers, while it decreases for the surface layer. ② Compared to rigid walls, the rigid-flexible composite walls exhibit significantly reduced lateral soil pressure and horizontal displacement; as the modulus of the EPS cushion decreases, the compression of the cushion increases, leading to a significant improvement in pressure reduction. ③ The modulus of the EPS layer should be selected based on the specific engineering requirements.

Key words: rigid-flexible composite retaining wall; expansive soil; rainfall infiltration; EPS layer

膨胀土边坡素有“逢堑必滑, 无堤不塌”的说法^[1]。在降雨条件下, 膨胀土边坡吸水膨胀, 产生膨胀变形, 严重影响了边坡的稳定性。

工程中, 膨胀土边坡常用的治理方法大致分为

两类: 刚性支护和柔性支护。刚性支护通过结构自重维持边坡的稳定, 但是对于膨胀土吸水膨胀这一特殊的工程性质, 刚性支护效果并不好。王年香等^[2]通过大型模型试验发现, 膨胀土遇水后发生膨

收稿日期: 2021-09-29

作者简介: 韦秉旭(1970—), 男, 长沙理工大学教授, 硕士生导师。

胀变形,刚性挡土墙的侧向膨胀压力显著增加。杨和平等^[3]在治理南宁外环的膨胀土时发现,仅靠刚性支挡难以保证开挖边坡的稳定。南昆铁路某路段的浆砌片石挡墙因膨胀土胀缩而挤裂、垮塌,严重影响了线路的安全和稳定^[4]。魏耀华等^[5]针对膨胀土的特殊性质,对重力式挡土墙的设计展开了研究。柔性支护允许膨胀土发生一定的膨胀变形,释放绝大部分的膨胀力,维持边坡的稳定性。谭波等^[6]通过有限元软件分析指出,柔性支护能有效减小墙背水平位移,具有良好的支挡效果。杨和平等^[3]通过数值模拟提出,膨胀土堑坡采用加筋土柔性挡墙支护能保持堑坡的相对稳定。苏丕辉等^[7]指出,虽然柔性支护在一定程度上能控制膨胀土边坡的变形,但是其不能为边坡提供足够的抗滑力,边坡仍有失稳破坏的风险。

孔令伟等^[8]对膨胀土的研究现状进行了综述,建议在工程实际中加强刚性支护和柔性支护的综合使用。郑俊杰等^[9-10]提出了一种刚柔复合桩基挡墙的结构。通过数值模拟,发现在刚性桩基挡墙结构后面设置柔性材料,可有效地减小刚性挡墙结构的侧向膨胀压力。但这些研究均是借鉴温度应力场理论来实现膨胀土干缩湿胀特性的^[10-11]。虽然该类模型在一定程度上体现了含水量与膨胀变形的关系,但是温度扩散方程与渗流连续方程相似,仅在饱和渗流情况下发生该现象^[12-13]。膨胀土是典型的非饱和土,基于热固耦合模块开发的膨胀土模型,不具有土水特征曲线,其不仅无法体现土体的持水特性,真实地描述膨胀土内部水分迁移的特性,也无法模拟降雨、停雨等天气情况。因而,其难以模拟在降雨条件下膨胀土堑坡刚柔复合挡墙结构的应力应变。

因此,本研究针对膨胀土堑坡降雨入渗和膨胀变形,综合考虑膨胀土堑坡的渗流-膨胀-应力效应,编写膨胀土堑坡刚柔复合挡墙降雨入渗分析程序。采用更适用于膨胀土堑坡的刚柔复合挡墙结构(即在刚性挡土墙和墙背膨胀土之间设置聚苯乙烯泡沫(expanded polystyrene board, EPS)柔性垫层),其具体结构如图1所示。以广西壮族自治区宁明北江-板烂公路的某膨胀土堑坡为研究对象,分析在不同降雨条件下挡墙的受力特性,选取某一不利工况,探讨EPS垫层模量对刚性挡墙结构受力变形的影响,为研究膨胀土堑坡的支挡防护提供参考。

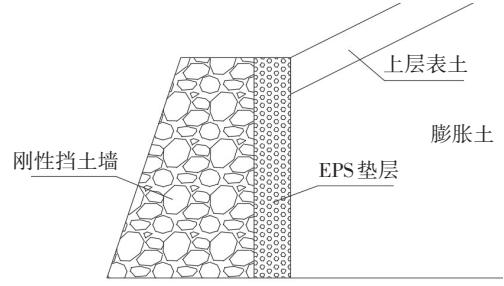


图1 刚柔复合挡墙结构

Fig. 1 Rigid-flexible composite retaining wall structure

1 理论基础

1.1 膨胀本构模型

张良以等^[14-15]提出了多场耦合数值计算方法,将膨胀土的膨胀应变引入到非饱和土的计算模型中,建立了一种考虑膨胀应变的非饱和膨胀土的多场耦合数值计算方法。

由于土体受到内部和外部的约束作用,膨胀土在吸水和失水过程中,膨胀应变不能自由发生。根据弹性增量理论,将膨胀应变作为弹性体附加应变带入应变分量,其表达式为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \varepsilon_{ij}^w \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + \varepsilon_{ij}^w \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \varepsilon_{ij}^w \\ \gamma_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{2E} (1 + 2\nu) \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)更新为总应力分量,其表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_x + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1-2\nu} \varepsilon_{ij}^w \\ \sigma_y = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_y + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_z) + \frac{E}{1-2\nu} \varepsilon_{ij}^w \\ \sigma_z = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_z + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{E}{1-2\nu} \varepsilon_{ij}^w \\ \tau_{ij} = \frac{2E\gamma_{ij}}{1+2\nu} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E 和 ν 是随含水率和体积应力变化的参数,通过GDS三轴试验获得; ε_{ij}^w 为膨胀应变张量,膨胀应变由室内试验确定,其值与含水率增量有关; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为3个方向的应变张量; τ_{ij} 、 γ_{ij} 分别为切应变、切应力。主应力分量 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 的最后一项可以看作是膨胀变形作用产生的膨胀应力 P ,其表达式为:

$$P = \frac{E}{1 - 2\nu} \varepsilon_{ij}^w = 3K\varepsilon_{ij}^w \quad (3)$$

式中: P 为膨胀应力附加项; K 为体积模量。

式(1)为引入膨胀应变后的应力应变本构方程;膨胀土弹性阶段的总应力关系通过式(2)表示,屈服准则和流动法参照Mohr-Coulumb模型。

1.2 渗流-膨胀-应力分析方法

为考虑膨胀土堑坡的降雨入渗和遇水膨胀等问题,提出一种综合考虑膨胀土堑坡渗流-膨胀-应力效应的分析方法,其实现过程如下:

- 1) 采用有限元软件GeoStudio的SEEP模块,对膨胀土堑坡进行降雨条件下的渗流计算。
- 2) 通过编制接口程序,将计算得来的不同时刻边坡孔隙水压力和重度导入有限差分软件FLAC^{3D}。
- 3) 在有限差分软件FLAC^{3D}中,采用膨胀本构模型,实现降雨条件下膨胀土堑坡刚柔复合挡墙的数值模拟。

其计算流程如图2所示。

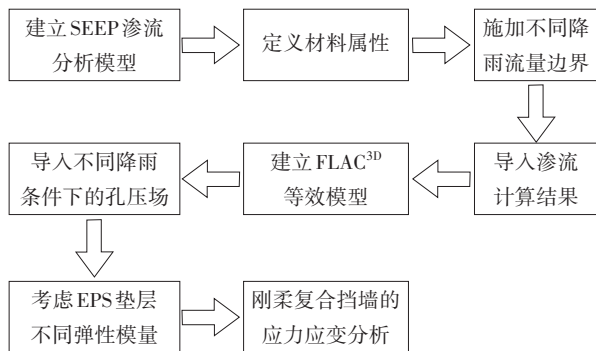


图2 计算流程图

Fig. 2 Calculation flow chart

2 数值模型与计算方案

2.1 数值模型





广西壮族自治区境内S213宁明北江-板烂公路K8+240处膨胀土堑坡高10 m,坡比为1:2。气象资料显示,该路线经过区域的气候温暖潮湿,雨量充

沛。经现场开挖发现,边坡上层大约1 m是已风化,灰白夹黑色的梗植土,具有弱膨胀性;下底层以灰白色膨胀土为主,具有较强的膨胀性。

由于现场的地形和地质情况较复杂,难以准确地对其模拟。因此,为保证数值模拟分析有效、可靠,根据膨胀土堑坡地质情况进行了以下假定:

- 1) 根据膨胀土的膨胀性,将土层划分为上、下土层;
- 2) 上、下土层的物理参数视为均一常数,并在现场取各代表层土样试验,得到数值模拟基本参数;
- 3) 假定初始状态下膨胀土堑坡不存在膨胀力和膨胀变形;
- 4) 各土层接触条件为完全连续接触,墙背EPS垫层与挡墙、土体均接触良好,忽略泄水孔排水,仅考虑坡面排水。

结合实际工程和基本假定,采用FLAC^{3D}软件,建立膨胀土堑坡刚柔复合挡墙结构数值分析模型。选取单位长度(1.0 m)的挡土墙进行分析,A为刚性挡墙,高6.0 m,顶宽2.0 m,底宽4.0 m;在刚性挡墙与路堑边坡间设置EPS垫层B,垫层与挡墙齐高,宽1.0 m;膨胀土堑坡分为C、D两层,表层厚1.0 m,坡比为1:2,坡顶距墙底10.0 m;模型尺寸示意如图3所示。在数值模型中,网格划分采用边长为0.1 m的六面体。

-  A: 刚性挡墙
-  B: EPS垫层
-  C: 膨胀土堑坡上层
-  D: 膨胀土堑坡下层

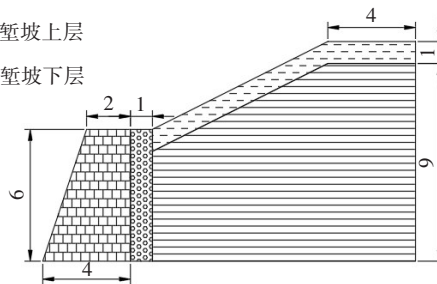


图3 模型尺寸示意(单位:m)

Fig. 3 Model size illustration(unit:m)

挡土墙计算参数见表1。

表1 挡墙物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of retaining wall

材料	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)
挡土墙	21	0.2	24.5

经土工试验获取各土层的物理力学参数,见表2。

表2 膨胀土物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of expansive soil

土层	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松 比	杨氏模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	膨胀 系数
上土层	18	0.33	12	24	18.0	0.01
下土层	22	0.30	32	65	24.8	0.03

2.2 本构模型与边界条件

在FLAC^{3D}模型中,挡土墙、EPS垫层材料均采用弹性本构模型;膨胀土均在本构模型中实现膨胀变形、膨胀力的施加。模型底部为水平及竖向的速度边界,前、后、左、右侧边界为法向约束的速度边界,膨胀土表面和左侧挡墙结构为自由边界,模型底部和四周设置为不透水边界。

2.3 降雨方案及孔压场

1) 采用GeoStudio软件的SEEP模块,建立一个与FLAC^{3D}中的本构模型尺寸大小相同的模型。但需要注意的是:该模型网格属性要采用4节点矩形网格,且其单元大小与FLAC^{3D}模型中的保持一致。

2) 给定上、下土层的物理力学参数。通过现场取土,经压力板试验,通过Fredlund-Xing模型,拟合得出各土层的土-水特征曲线,如图4所示。

3) 设定边界条件。根据广西壮族自治区崇左市宁明县的气象观测资料,确定降雨工况,拟定降雨历时3 d,停雨历时6 d,降雨强度 2.4×10^{-7} m/s。在停雨期间,土体表面须设置出渗边界条件。为更加真实地模拟在停雨期间表层土体的蒸发,出渗强度设为 1.4×10^{-8} m/s。

4) 利用SEEP板块对降雨条件下膨胀土堑坡进行渗流计算,得到不同降雨时刻膨胀土堑坡内部孔隙水压力和重度在空间上的分布情况。

5) 从SEEP中导出渗流计算结果,并进行整理,通过 zone GRIDPOINT initialize 和 zone initialize 命令,把SEEP计算的某时刻的孔压和重度赋给FLAC^{3D}中的模型单元,通过 call 命令调用文本。

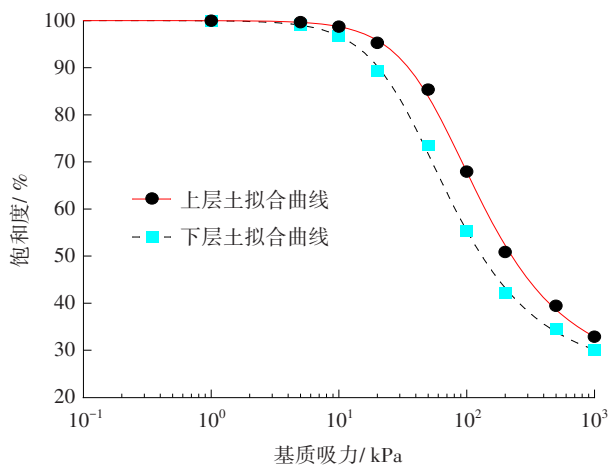


图4 土水特征曲线

Fig. 4 Soil-water characteristic curve

2.4 数值模型验证

选取停雨6 d、不设置EPS垫层时的工况,将墙背侧向压力数值模拟结果与理论值进行对比,如图5所示。膨胀期的墙背土压力根据广义库仑主动土压力理论^[16]计算得到。膨胀力增量由文献^[17]中给出的计算公式 $\Delta P_s=3K\Delta T\alpha$ 得到,其中, ΔP_s 为膨胀力增量, K 为土的体积模量, ΔT 为温度变化量, α 为膨胀系数。从图5可以看出,数值模拟结果与理论值较为接近,且两者的变化规律基本一致,较好地验证了数值模型的合理性。在此基础上,进一步对刚柔复合挡墙结构的数值模型展开研究。

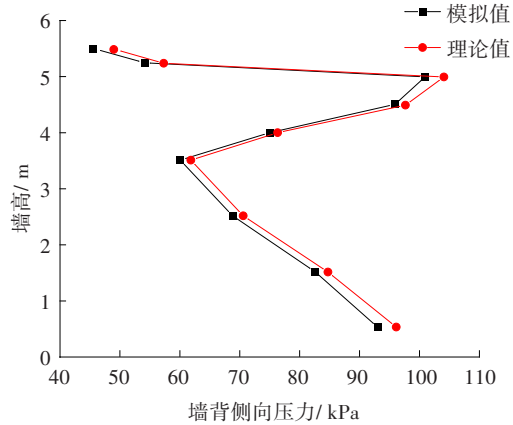


图5 数值模拟与理论值对比

Fig. 5 Comparison between numerical simulation and theoretical value

3 降雨条件下墙背侧向压力分析

3.1 降雨3 d 墙背侧向压力

图6是不同降雨历时下刚性挡墙墙背侧向压力点线图。从图6中可以看出,随着降雨历时的增加,

雨水逐渐入渗,在降雨3 d后,其达到200 cm的最大入渗深度。随着雨水入渗,膨胀土吸水膨胀,墙背侧向膨胀压力显著增大。降雨1 d,地表以下50 cm处的侧向土压力增大了15.15 kPa,75 cm处的侧向土压力增大了3.40 kPa,该变化与含水率沿深度分布变化一致,但100 cm处的侧向土压力却减小了2.2 kPa,这一现象与浦敏艳等^[18]做的模型试验实测情况一致。这是由于第一天的降雨入渗未至该深度,而其上层土体与挡墙接触力显著增大,导致了100 cm深度处的挡土墙和墙背土体间出现极小的架空,使侧向土压力减小。从图6还可以看出,降雨3 d,地表以下100 cm处上、下土层的膨胀力的增量与含水率沿深度分布不一致。这是上、下土层的膨胀性差异所导致的。因为下土层膨胀性较强,所以在该点位处墙背侧向压力发生突变。

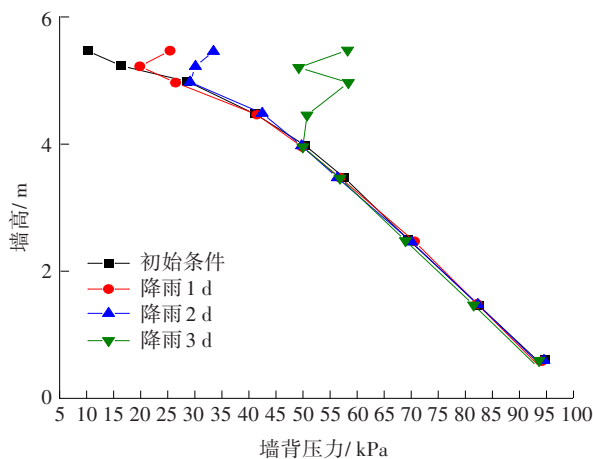


图6 墙背压力

Fig. 6 Wall back pressure

3.2 停雨6 d墙背侧向压力

图7为停雨期的墙背侧向压力点线图。从图7可以看出,虽然雨停了,但是土体内部的雨水进一步入渗,历时6 d,入渗深度为250 cm。随着停雨历时的增加,地表以下约75 cm范围内的墙背侧向压力是呈减小趋势的。这与表层土体的水分蒸发和入渗深度2个因素相关,它们导致面层土层内含水率降低,墙背侧向膨胀压力的减小。在地表以下100~250 cm的土体,墙背的侧向土压力逐渐增大,这与土体内部雨水入渗深度有关,导致墙背侧向膨胀压力的增大。同样观察到停雨2 d,地表以下250 cm处的墙背侧向压力小于初始墙背侧向压力,这与降雨时出现的极小架空现象一致,停雨4、6 d均存在此现象。

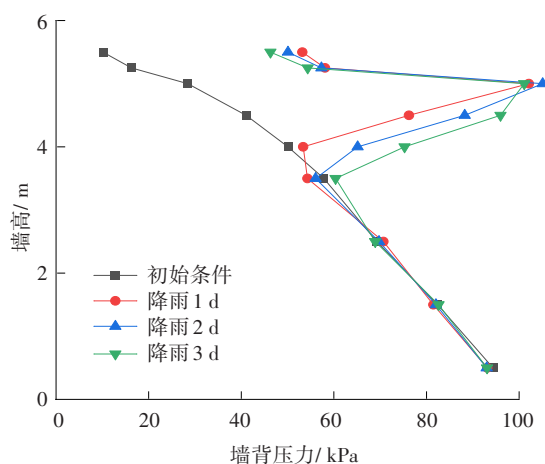


图7 墙背压力

Fig. 7 Wall back pressure

4 刚柔复合挡墙应力应变结果分析

由降雨3、6 d的墙背侧向压力可知,膨胀土壅坡在降雨条件下,会对刚性挡土墙产生巨大的侧向膨胀压力。其主要原因是膨胀土遇水膨胀变形,刚性挡墙限制了其变形,产生了巨大的侧向膨胀压力。本研究采用刚柔复合挡墙结构,在刚性挡墙墙背设置柔性EPS垫层,通过EPS垫层的变形,释放大大部分膨胀土膨胀变形产生的压力。

为研究刚柔复合挡墙结构用于膨胀土壅坡的受力变形特性,选取停雨6 d后的孔压场,选定的EPS垫层厚度为1 m,结合文献^[19]中采用的EPS材料参数,拟定了6种不同工况进行分析,各工况EPS垫层物理力学计算参数见表3。

表3 EPS垫层物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of EPS layer

工况	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
1	—	—	—
2	24	8.0	0.1
3	20	5.5	0.1
4	16	4.0	0.1
5	12	2.0	0.1
6	10	0.8	0.1

4.1 墙背侧向压力

图8为不同工况下挡墙墙背侧向土压力对比点线图。以未设置EPS垫层的工况1作为对比工况。从图8中可以看出,设置了EPS垫层的挡墙,墙背侧

向压力整体上呈减小趋势,并且随着EPS垫层模量减小,墙背侧向土压力减小幅度增加,EPS垫层减压效果越好。这是由于EPS垫层模量越小,越容易被压缩,在同样的墙背侧向压力下,产生更大的侧向变形,从而减小了侧向膨胀压力和主动土压力。特别是从工况4到工况5~6,墙背侧向压力大幅度降低。因此,EPS垫层能有效减小墙背侧向压力,在设计刚柔复合挡墙结构时,应合理选择EPS垫层的模量,充分发挥其减压性能。

从图8中还可以看出,工况2~3在地表以下50、250 cm处的墙背侧向压力大于未设置EPS垫层的,出现了未减小、反增大的现象。这是因为EPS垫层是一种有一定刚度的弹性材料,具有整体性。虽然该处的侧向压力比较小,但墙背整体侧向压力比较大,EPS垫层会给250 cm处产生一个附加应力,导致地表以下50、250 cm处的墙背侧向土压力增大。但是这种现象相较于挡墙整体上的减压而言,可以不考虑。在实际工程中,墙背EPS垫层可以分块设置,不必是一个连接的整体,故这种现象会比数值模拟结果更加微小,可以忽略不计。

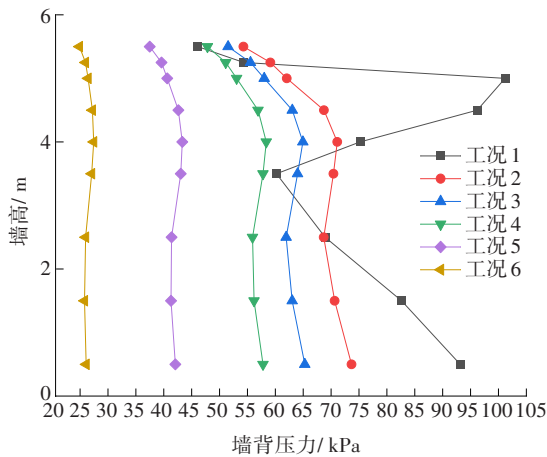


图8 墙背压力

Fig. 8 Wall back pressure

4.2 挡墙水平位移

图9为不同工况下挡墙水平位移点线图。在不同工况下,挡墙的水平位移都随着挡墙的增高而增大。从图9可以看到,随着EPS垫层模量的减小,墙背的侧向压力减小,挡墙的水平位移也减小,这一现象符合客观规律。在工程允许范围内,可以选择合适的EPS垫层模量,减小挡墙的水平位移。

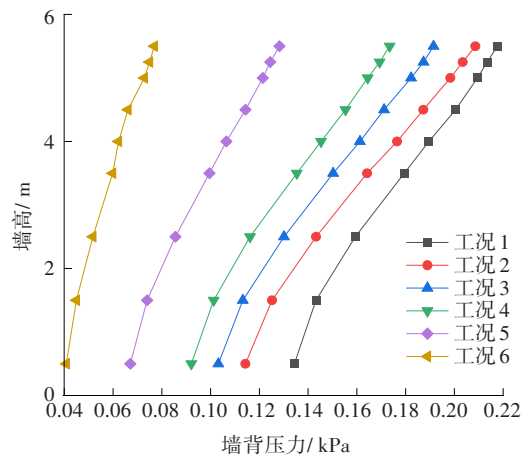


图9 挡墙水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of retaining wall

4.3 EPS垫层的压缩量

图10为不同工况下EPS垫层压缩量点线图。同一工况下,EPS垫层的压缩量与墙背侧向土压力的分布规律一致。从图10中可以看出,在地表以下150 cm处,EPS垫层压缩量最大。这是因为该点附近的墙背侧向压力最大,特别是在该点膨胀土遇水膨胀产生的侧向膨胀压力最大,通过EPS垫层的压缩变形释放了绝大部分的侧向膨胀压力。

此外,EPS垫层模量越小,其压缩量越大,这意味着EPS垫层的减压效果越好。但这也说明墙后土体会发生更大的侧向变形。墙后土体位移过大,会导致路堑边坡开裂、垮塌。因此,EPS垫层的压缩量并不是越大越好,应控制其在合理范围内。EPS垫层适当的压缩变形,可释放墙背部分的侧向膨胀压力,从而达到保持挡墙结构安全、稳定的效果。

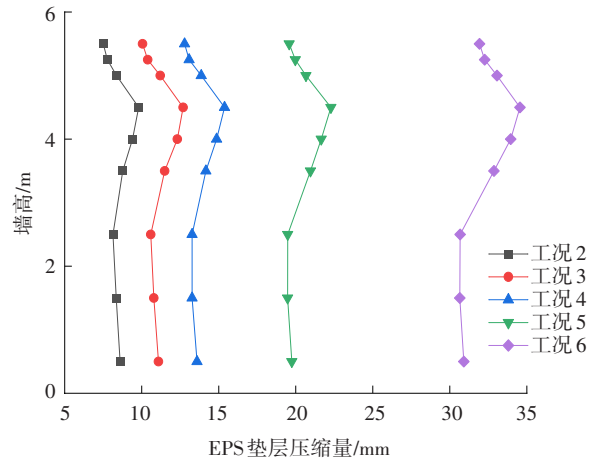


图10 EPS垫层压缩量

Fig. 10 EPS layer compressive deformation

5 结论

通过数值模拟分析,研究了在降雨条件下膨胀土堑坡的渗流规律和挡墙墙背侧向压力的分布规律,考虑EPS垫层模量的影响,进一步分析了刚柔复合挡墙结构的应力应变特性,得到结论:

1) 在降雨条件下,膨胀土堑坡墙背侧向压力显著增大。随着降雨历时的增加,墙背侧向压力呈增大的趋势。在停雨期间,随着雨水进一步入渗,地层的墙背侧向压力进一步增大。由于雨水向上蒸发和向下入渗,面层含水率会降低,墙背侧向压力也开始减小。

2) 与刚性挡墙结构相比,设置了EPS垫层的刚柔复合挡墙的墙背侧向压力和挡墙水平位移会明显减小。并且,随着EPS垫层模量的减小,其压缩量增大,进一步提高了EPS垫层的减压效果。

3) EPS垫层模量要根据实际工程合理取值。EPS垫层压缩量过大,会导致墙背土体位移变形过大,导致开裂,甚至破坏。但需考虑更多的指标约束EPS垫层模量的取值,确保边坡、挡墙结构的稳定。

参考文献(References):

- [1] 杨和平,章高峰,郑健龙,等. 膨胀土填筑公路路堤的物理处治技术[J]. 岩土工程学报,2009,31(4):491-500.
YANG Heping, ZHANG Gaofeng, ZHENG Jianlong, et al. Physical treatment technology of expansive soil filling highway embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 491-500.
- [2] 王年香,章为民,顾行文,等. 膨胀土挡墙侧向膨胀压力研究[J]. 水利学报,2008,39(5):580-587.
WANG Nianxiang, ZHANG Weimin, GU Xingwen, et al. Lateral swelling pressure of expansive soil acting on retaining wall due to inundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 580-587.
- [3] 杨和平,王静,湛文涛,等. 南宁外环膨胀土路基处治技术及设计方案研究[J]. 岩土力学,2011,32(S2):359-365.
YANG Heping, WANG Jing, ZHAN Wentao, et al. Study of treatment technology and design scheme of expansive soil subgrade for Nanning outer ring expressway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 359-365.
- [4] 章为民,王年香. 公路膨胀土地基与基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
ZHANG Weimin, WANG Nianxiang. Expansive soil foundations of highway [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [5] 魏耀华,赵旭,雷军伟,等. 膨胀土重力式挡土墙设计计算方法研究[J]. 交通科学与工程,2019,35(4):15-21.
WEI Yaohua, ZHAO Xu, LEI Junwei, et al. Study on the design and calculation method of the gravity-retaining wall in the expansive soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 15-21.
- [6] 谭波,杨和平,罗奕. 土工格栅柔性支护在处治膨胀土路堑滑坡中的应用[J]. 桂林工学院学报,2006(2):200-204.
TAN Bo, YANG Heping, LUO Yi. Application of geogrid flexible support in dealing with expansive soil cutting landslide [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2006(2): 200-204.
- [7] 苏丕辉,陈仕阔,赵晓彦,等. 南昆铁路钢管格栅膨胀土挡墙边坡加固机理模型试验研究[J]. 工程地质学报,2020,28(3):658-666.
SU Pihui, CHEN Shikuo, ZHAO Xiaoyan, et al. Model test on reenforcement mechanism of geogrid-steel tube expansive soil retaining wall for slope stability of Nankun railway [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 658-666.
- [8] 孔令伟,陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(5):141-161.
KONG Lingwei, CHEN Zhenghan. Summary of development of special soil and slope technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 141-161.
- [9] 郑俊杰,吕思祺,曹文昭. 刚柔复合抗滑桩受力与变形特性数值模拟分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(4):39-44.
ZHENG Junjie, LYU Siqi, CAO Wenzhao. Numerical analysis of mechanical and deformation characteristics of composite rigid-flexible anti-slide pile [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2017, 45(4): 39-44.
- [10] 郑俊杰,吕思祺,曹文昭,等. 高填方膨胀土作用下刚柔复合桩基挡墙结构数值模拟[J]. 岩土力学,2019,40(1):395-402.
ZHENG Junjie, LYU Siqi, CAO Wenzhao, et al. Numerical simulation of composite rigid-flexible pile-supported retaining wall under the action of high-filled expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 395-402.

- [11] 曾仲毅,徐帮树,胡世权,等. 增湿条件下膨胀土隧道衬砌破坏数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 871-880.
ZENG Zhongyi, XU Bangshu, HU Shiquan, et al. Numerical analysis of tunnel liner failure mechanism in expansive soil considering water-increased state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 871-880.
- [12] 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.
DING Jinhua, CHEN Renpeng, TONG Jun, et al. Research on failure mechanism of shallow instability of expansive soil slope based on multifield coupling numerical analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 159-168.
- [13] 张良以. 基于多场耦合非饱和膨胀土边坡渐进破坏研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHANG Liangyi. Study on progressive failure of unsaturated expansive soil slope based on multi-field coupling [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 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.
ZHANG Liangyi, CHEN Tielin, ZHANG Dingli. Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 70-77.
- [15] 陈亮胜,韦秉旭,廖欢,等. 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 132-140.
CHEN Liangsheng, WEI Bingxu, LIAO Huan, et al. A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(4): 132-140.
- [16] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005.
GU Weici. Handbook of earth pressure calculation of retaining wall [M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2005.
- [17] 曾仲毅,徐帮树,胡世权,等. 增湿条件下膨胀土隧道衬砌破坏数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 871-880.
ZENG Zhongyi, XU Bangshu, HU Shiquan, et al. Numerical analysis of tunnel liner failure mechanism in expansive soil considering water-increased state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 871-880.
- [18] 浦敏艳,朱克生,王柳江. 降雨入渗作用下膨胀土挡土墙侧向土压力研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(11): 125-128.
PU Minyan, ZHU Kesheng, WANG Liujiang. Research on lateral earth pressure from expansive soil acting on retaining wall under rain infiltration [J]. Yellow River, 2015, 37(11): 125-128.
- [19] ZARNANI S, BATHURST R J. Numerical modeling of EPS seismic buffer shaking table tests [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(5): 371-383.

(责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:李岳林)

(上接第17页)

- 的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45.
- [18] 殷素红,管海宇,胡捷,等. 碱激发粉煤灰-矿渣灌浆材料的流变性与流动性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 120-128, 135.
YIN Suhong, GUAN Haiyu, HU Jie, et al. Rheological properties and fluidity of alkali-activated fly ash-slag grouting material [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 120-128, 135.
- [19] 彭玉清,郭荣鑫,林志伟,等. 粉煤灰地聚物力学性能影响因素研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 858-866.
PENG Yuqing, GUO Rongxin, LIN Zhiwei, et al. Review on influencing factors of mechanical properties of fly ash geopolymer [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 858-866.
- [20] 杜天玲,刘英,于咏妍,等. 水玻璃对粉煤灰矿渣地聚物强度的影响及激发机理[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 41-49.
DU Tianling, LIU Ying, YU Yongyan, et al. Influence of sodium silicate on fly ash slag geopolymer strength and stimulating mechanism [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(1): 41-49.
- [21] 张光勇,刘建均,王海朋. 非开挖修补沥青路面半刚性基层地聚物材料研究[J]. 湖南交通科技, 2022, 48(2): 21-26, 49.
ZHANG Guangyong, LIU Jianjun, WANG Haipeng. Study on geopolymer material for semi-rigid base of asphalt pavement repaired by trenchless method [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2022, 48(2): 21-26, 49.

(责任编辑:刘国奇;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)