

UDL水力参数对覆盖层处治边坡 防渗性能影响研究

肖杰¹, 闫冬青¹, 陈冠一^{1*}, 胡林杰¹, 常锦²

(1.长沙理工大学交通学院,湖南长沙 410114;2.长沙学院土木工程学院,湖南长沙 410022)

摘要:为探究导排层水力参数对毛细阻滞覆盖层抗渗性能的影响,该文基于非饱和渗流原理,采用VG模型拟合土体的土水特征曲线与渗透性函数,运用Geo Studio有限元软件建立了含导排层(UDL)的“细-导排层-粗”型毛细阻滞覆盖层(CBC)简化模型。通过开展大雨条件下覆盖层处治膨胀土边坡的渗流数值模拟,系统分析了不同导排层水力参数对毛细阻滞覆盖层防渗效果的影响规律,并确定了导排层合理的水力参数值。结果表明:导排层水力参数 n 、饱和渗透系数 k_s 和进气值 a 的优选数值分别为3.5、 5.79×10^{-4} m/s和9 kPa。对于导排层,增大 n 、 k_s 、 a ,均能有效延长长期降雨条件下导排层的有效导排长度,减少由砂层突破至碎石层的水量,并显著降低膨胀土饱和区的范围。因此,在实际工程应用中采用“UDL CBC”型覆盖层时,应综合协调导排层各水力参数,以提升其毛细阻滞覆盖层的防渗性能。该研究结果可为毛细阻滞覆盖层在膨胀土处治工程设计中的材料选取提供参考依据。

关键词:毛细阻滞覆盖层;导排层;防渗性能;水力参数;非饱和渗流;膨胀土边坡

中图分类号:U416.14

文献标志码:A

Study on Influence of UDL Hydraulic Parameters on Anti-Seepage Performance of Slope Treated with Cover Layer

XIAO Jie¹, YAN Dongqing¹, CHEN Guanyi^{1*}, HU Linjie¹, CHANG Jin²

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

2. School of Civil Engineering, Changsha University, Changsha, Hunan 410022, China)

Abstract: To explore the influence of hydraulic parameters of the drainage layer (UDL) on the anti-seepage performance of the capillary barrier cover (CBC) layer, the VG model was adopted to fit the soil-water characteristic curve and permeability function of soil based on the principle of unsaturated seepage in this paper. A simplified model of “fine-UDL-coarse”-type CBC layer containing a UDL was established using Geo Studio finite element software. By carrying out the numerical simulation of seepage of expansive soil slope treated with the cover layer under heavy rain conditions, the influence rules of different hydraulic parameters of the UDL on the anti-seepage performance of the CBC layer were systematically analyzed, and the reasonable hydraulic parameter values of the UDL were determined. The results show that the optimal values of hydraulic parameter n , saturated permeability coefficient k_s , and air-entry value a of the UDL are 3.5, 5.79×10^{-4} m/s, and 9 kPa, respectively. For the UDL, increasing n , k_s , and a can all effectively extend the effective drainage length of the UDL under long-term rainfall conditions, reduce the volume of water breaking through from the sand layer to the gravel layer, and significantly reduce the range of the saturated zone of expansive soil. Therefore, when the “UDL CBC”-type cover layer is adopted in practical engineering applications, various hydraulic parameters of the UDL should be comprehensively coordinated to improve the anti-seepage performance of its CBC layer. The research results can provide a reference basis for material selection in the design of expansive soil treatment engineering using the CBC layer.

Keywords: capillary barrier cover layer; drainage layer; anti-seepage performance; hydraulic parameter; unsaturated seepage; expansive soil slope

收稿日期:2025-03-02 修回日期:2026-03-02

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2019YFC1509800);国家自然科学基金资助项目(编号:52278433,42477143);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2023JJ30041,2025JJ0035)

作者简介:肖杰,男,博士,教授.E-mail:xiaojie324@csust.edu.cn

*通信作者:陈冠一,男,博士研究生.E-mail:597270317@qq.com

0 引言

膨胀土具有显著的胀缩、多裂隙等特性,常给工程建设带来严重灾害,在其上修筑的路基若未经有效处治,往往“逢堑必滑,有堤必坍”。边坡浅层膨胀土经大气反复干湿循环作用,裂隙发育明显,浅层土体力学性质衰减急剧,为雨水入渗提供了便捷通道,进而诱发边坡发生浅层破坏^[1-3]。毛细阻滞覆盖层(Capillary Barrier Cover, CBC)常被用于处治垃圾填埋场, CBC中不同粒径非饱和土层界面存在毛细阻滞作用,能有效阻止雨水渗入垃圾填埋场内部^[4-6],从而减少渗滤液的生成和对周围环境的污染。

基于此理念,有学者开始将CBC应用到边坡防护工程领域^[7-9],并取得了一定的应用效果。传统CBC是由粗粒土上覆盖一层细粒土组成,在干旱-半干旱地区具有优良的服役性能,但在湿润多雨地区尚难满足防渗要求。Stormont等^[10]提出在CBC中增设非饱和导排层(Unsaturated Drainage Layer, UDL)以提高湿润气候区CBC防渗性能;邓林恒等^[11]通过模型试验研究了强降雨条件下UDL CBC的服役性能,发现UDL的存在能有效减少覆盖层的渗漏量,使其在湿润气候区的应用成为可能;Zhan等^[12]发现UDL CBC的防渗性能主要取决于顶部细粒土层的饱和渗透系数,并进一步验证了其在长期湿润地区服役的有效性;焦卫国等^[13]采用模型试验验证了UDL的侧向排水作用,并结合数值模拟研究了细粒土、UDL的厚度和渗透性等因素对覆盖层侧向导排长度的影响;李晓康等^[14]通过土柱试验发现新增UDL的抽吸作用可延缓覆盖层的击穿时间,且UDL与细粒层的渗透系数之比越大,抽吸效果越好;陈冠一等^[15]开展了持续大雨作用下不同毛细阻滞结构处治膨胀土边坡的渗流研究,发现“细-导排层-粗”型毛细阻滞覆盖层防渗能力最佳。综上可知,现有研究主要集中在是否设置UDL、UDL的厚度、渗透性等因素对UDL导排长度及其在湿润气候区的服役性能方面。然而,因UDL导排层性能受材料类型、级配等影响显著,其参数变化对UDL CBC在连续极端降雨条件下的防渗性能研究还较少,同时UDL CBC在边坡防护工程中应用范围还很有限,特别是在膨胀土边坡防护工程中的应用更少。

综合前人研究成果,笔者基于非饱和渗流理论,运用Geo Studio有限元软件开展了持续大雨条件下UDL CBC处治膨胀土边坡的渗流分析,重点分析了

UDL水力参数对UDL CBC内部及膨胀土体的含水率和孔隙水压力变化规律的影响,为中国南方湿热带多雨地区UDL CBC处治膨胀土边坡的设计与选材提供理论支撑。

1 毛细阻滞效应原理

传统CBC中细、粗粒土层孔隙大小差异大,在界面处会形成毛细阻滞效应,阻碍覆盖层细粒土中的水渗入粗粒土层中。对于UDL CBC,本文选择砂层作为导排层,细粒土和砂、砂和碎石层界面均存在毛细阻滞作用。如图1所示,以细粒土和砂层界面为例,当细粒土层与砂层界面处的基质吸力降至砂土的进水值(B 点)时,雨水才开始突破至砂层中,此时细粒土体积含水率处于较大值(A 点),具有较好的保水作用。即使砂层基质吸力达到 B 点,但其渗透系数仍然小于细粒土(如图2中 B 点),因此,水渗入砂层的速度缓慢。当吸力值下降至两个渗透函数曲线交点(如图2中 C 点)时,细粒土的渗透系数才小于砂,此时界面处以细粒土的导水系数为主,可以有效地延缓水分渗入下层土体。

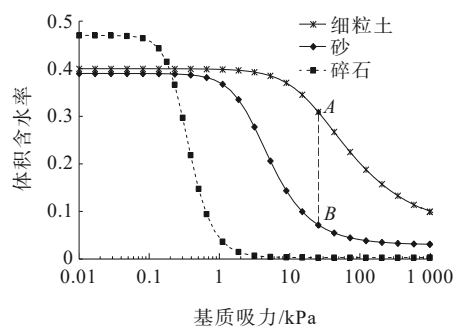


图1 VG模型拟合土体的土水特征曲线

Figure 1 Soil-water characteristic curves of soil fitted by VG model

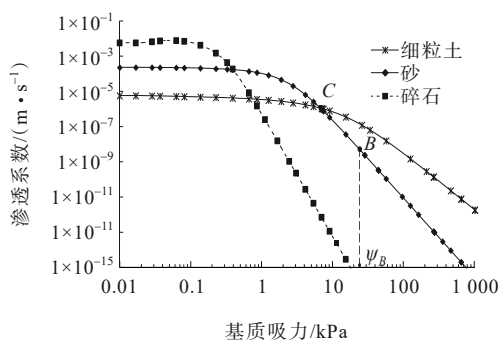


图2 土体渗透性曲线

Figure 2 Permeability curves of soil

2 UDL CBC处治膨胀土边坡的数值模拟

2.1 基本模型

数值计算模型与网格划分分别如图3、图4所示,膨胀土坡高8 m,坡比为1:1.5。考虑膨胀土边坡已经大气反复干湿循环的作用,浅层土体裂隙发育,且抗剪强度已衰减至最不利条件,将浅层膨胀土边坡土体由上至下划分为强风化膨胀土厚1.0 m、中风化膨胀土厚1.5 m、其余为未风化膨胀土。浅层开挖膨胀土边坡0.6 m后覆盖UDL CBC。UDL CBC覆盖层分为3层,总厚度为0.6 m,每层厚度均设为0.2 m,其中顶部为细粒土,因受大气环境影响显著,不宜采用易产生裂隙的黏性土;中间层设砂层作为导排层;下部采用碎石作为粗粒土层。因降雨易通过覆盖层向坡脚汇集,因此在坡脚设宽0.5 m,沟底深1.5 m的盲沟,可以有效地将渗流至坡脚的积水沿纵向盲沟排走。

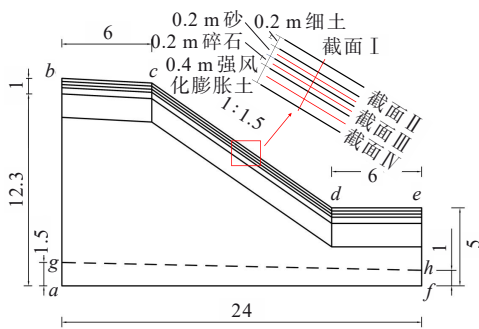


图3 膨胀土边坡计算模型示意图(单位:m)

Figure 3 Schematic diagram of calculation model for expansive soil slope(unit: m)

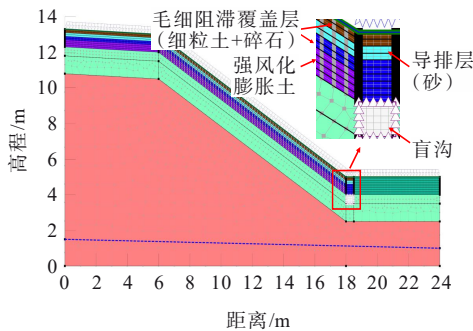


图4 计算模型网格剖面图

Figure 4 Mesh profile of calculation model

2.2 边界条件

如图3所示,模型边界条件如下:① bc 、 cd 、 de 为降雨流量边界,大雨的降雨强度为50 mm/d,降雨总

历时为10 d。SEEP/W模块假定坡面不积水,降雨边界适时进行潜在渗水面检验,当降雨强度大于细粒土饱和渗透系数时则形成径流,流量边界为细粒土饱和渗透系数对应的降雨强度,小于时则为实际降雨强度;② ga 、 hf 为定水头边界,总水头分别等于 g 点和 h 点处的高程,分别为1.5 m和1 m;③ af 、 bg 、 he 为不透水边界;④ 细粒土、砂、碎石的初始孔隙水压力分别为-35 kPa、-50 kPa和-50 kPa,膨胀土层初始孔隙水压力为-35 kPa;⑤ 盲沟处为排水边界,定义为总流量0,并进行潜在渗水面检验。

为便于对比分析,在覆盖层、膨胀土层设置了4个特征截面,其中特征截面 I 位于坡中 $X=12$ m处且垂直于坡面,特征截面 II、III、IV 分别位于砂层中部、碎石层中部以及强风化膨胀土层顶部,自坡面垂直向下深度分别为0.3 m、0.5 m和0.7 m,截面均平行于坡面,如图3所示。

2.3 计算参数

2.3.1 材料参数

依据南宁膨胀土非线性慢剪强度参数^[16-17]确定强风化层、中风化层以及未风化层膨胀土的黏聚力和内摩擦角分别为3.1 kPa、 30.5° 、5.7 kPa、 27.7° 和30.4 kPa、 28.5° 。膨胀土的饱和渗透系数会随风化程度的不同而发生变化,强风化膨胀土的渗透系数通常比未风化的大2~4个数量级,依据文献[18],分别设强、中、未风化层膨胀土的饱和渗透系数为 2.3×10^{-6} m/s、 2.3×10^{-7} m/s、 2.3×10^{-8} m/s。参考文献[17,19-21]、岩土勘察手册^[22],确定碎石、砂和细粒土的相关水力参数,见表1。

2.3.2 变UDL水力参数方案

为研究导排层水力参数变化对UDL CBC防渗性能的影响,根据相关文献^[19-26],确定砂层水力参数 a 、 n 、 k_s 的取值变化范围见表2(表2中 α 约等于进气值 a 的倒数)。其中,A模型为 a 、 k_s 不变, n 值变化;B模型为 a 、 n 不变, k_s 值变化;C模型为 n 、 k_s 不变, a 值变化。

3 UDL水力参数影响结果与分析

3.1 参数 n 的影响

大雨持续条件下,随 n 值减小(A1~A5)截面 I 处孔隙水压力随深度变化情况如图5所示。未降雨时,各土层初始孔隙水压力一致;降雨0.5 d,细粒土层和砂层(0~0.4 m)孔隙水压力均增大,且增幅随 n 值增加而增大,这表明在短时降雨条件下, n 越大,雨

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	饱和渗透系数 $k_s/(m \cdot s^{-1})$	饱和体积含水量 θ_s	残余体积含水量 θ_r	土壤有效粒径 D_{10}/mm	土壤常数 $X_D/$ ($mm \cdot ms^{-1} \cdot kPa^{1.5}$)	进气值 $a/$ kPa	模型拟合参数 n	模型拟合参数 m	天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	有效内摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$	有效黏聚力 c'/kPa
细粒土	5.79×10^{-6}	0.400	0.050	—	—	20.0	1.5	0.333	17.6	10.0	17.00
砂	—	0.390	0.030	0.072 2	5.18×10^{-9}	—	—	—	14.5	25.0	0.10
碎石	5.79×10^{-3}	0.470	0.003	0.131 7	6.42×10^{-10}	0.3	3.0	0.667	15.5	38.0	0.01
强风化膨胀土	2.30×10^{-6}	0.419	0.062	—	—	40.0	1.5	0.333	18.5	30.5	3.10
中风化膨胀土	2.30×10^{-7}	0.419	0.062	—	—	40.0	1.5	0.333	18.5	27.7	5.70
未风化膨胀土	2.30×10^{-8}	0.419	0.062	—	—	40.0	1.5	0.333	18.5	28.5	30.40

表 2 变砂层水力参数方案

Table 2 Hydraulic parameter schemes for variable sand layer

材料	θ_s	θ_r	模型	α	进气值 a/kPa	n	$k_s/$ ($m \cdot s^{-1}$)
砂	0.39	0.030	A1	0.33	3	3.5	2.31×10^{-4}
			A2	0.33	3	3.0	2.31×10^{-4}
			A3	0.33	3	2.5	2.31×10^{-4}
			A4	0.33	3	2.0	2.31×10^{-4}
			A5	0.33	3	1.5	2.31×10^{-4}
	0.39	0.030	B1	0.33	3	2.0	1.16×10^{-4}
			B2	0.33	3	2.0	2.31×10^{-4}
			B3	0.33	3	2.0	3.47×10^{-4}
			B4	0.33	3	2.0	4.63×10^{-4}
			B5	0.33	3	2.0	5.79×10^{-4}
	0.39	0.030	C1	0.11	9	2.0	2.31×10^{-4}
			C2	0.14	7	2.0	2.31×10^{-4}
			C3	0.20	5	2.0	2.31×10^{-4}
			C4	0.33	3	2.0	2.31×10^{-4}
			C5	1.00	1	2.0	2.31×10^{-4}
细粒土	0.40	0.050	—	0.05	20	1.5	5.79×10^{-6}
碎石	0.47	0.003	—	3.33	0.3	3.0	5.79×10^{-3}

水越容易突破至砂层并汇集。这是因为, n 越小孔隙粒径分布越广, n 越大, 砂层孔径分布越均匀^[26], 雨水的入渗速率也越快。持续降雨 3 d, 砂、碎石层交界面处的基质吸力逐渐减小至碎石层的进水值, 雨水已突破至碎石层中, 此时, n 最小值为 1.5, 0.4 m 碎石层孔隙水压力增幅最大, 由 -50 kPa 增大为 -46.9 kPa。降雨 5 d, 碎石层孔隙水压力增幅随 n 值增大而减小, 但当 $n > 2.5$ 后影响较小, 即 $A5(n=1.5) > A4(n=2.0) > A3(n=2.5) = A2(n=3.0) = A1(n=3.5)$ 。持续降雨 10 d, A1、A2 模型 n 处于较大值, 碎石层孔隙

水压力仍几乎无变化, 可见 n 值越大对延缓水分由砂层渗入碎石层的作用越显著。

为准确研究雨水在模型 UDL CBC 中的迁移规律以及在砂层中的导排长度^[13](指水分子穿透导排层进入粗粒土层的位置至坡顶的水平距离), 根据砂层突破时间、碎石层和膨胀土层体积含水率随时间增长的情况, 进一步确定 n 值对 UDL CBC 防渗性能的影响, 分别选取 II、III、IV 截面体积含水率进行分析。

图 6、图 7 分别为大雨持续条件下, 随 n 值减小 (A1~A5) 截面 II、截面 III 体积含水率变化情况。

根据土水特征曲线可知, n 的取值影响拟合土水特征曲线的弯曲程度, n 越小拟合的土水特征曲线越平缓^[27]。UDL CBC 中设置初始孔隙水压力一致, 因此, 不同 n 值对应的初始体积含水率随 n 增大而减小, 见图 6(降雨 0 d)。降雨 0.5 d, 不同 n 值对应的砂层全截面体积含水率均增长, 且 n 较小时, 体积含水率仍处于较大值。降雨 1 d, 全截面体积含水率持续增长, 并且雨水向坡脚导排汇集, 坡脚处体积含水率大幅增长。随着降雨的持续进行, 降雨 2 d 砂层全截面体积含水率增长到最大值, 且各模型坡脚处体积含水率均开始下降, 这是由于雨水汇集至坡脚使砂层和碎石层交界面基质吸力减小至碎石层进水值, 雨水突破至碎石层。这正对应了图 7 中降雨时长 2 d 时不同参数 n 截面 III 处体积含水率随 X 坐标变化情况。其中, 碎石层坡脚处含水率显著增长, 且随 n 值减小, 体积含水率增长范围沿坡面增加, 最大体积含水率也随 n 值减小而增加。

持续降雨 10 d, 雨水由砂层突破至碎石层的位置逐渐由坡脚向坡中和坡顶延伸, 砂层的导排长度逐渐减小。在同一降雨时长下, n 值越大砂层导排长度越长, 随 n 值增大, UDL 导排能力增强, 减少突破至碎石层水分的同时延缓突破至碎石层的时间。

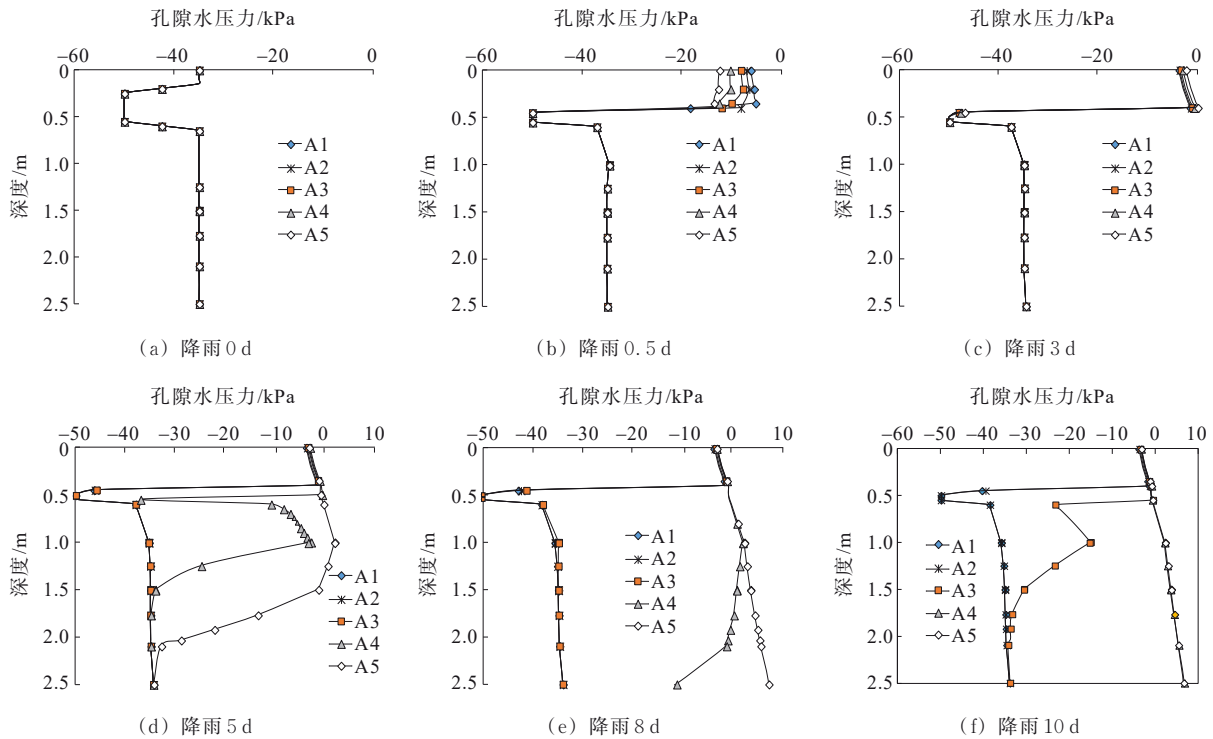


图 5 随 n 值减小(A1~A5)截面 I 孔隙水压力随深度变化图

Figure 5 Variation of pore water pressure in Section I with depth as n value decreases (A1-A5)

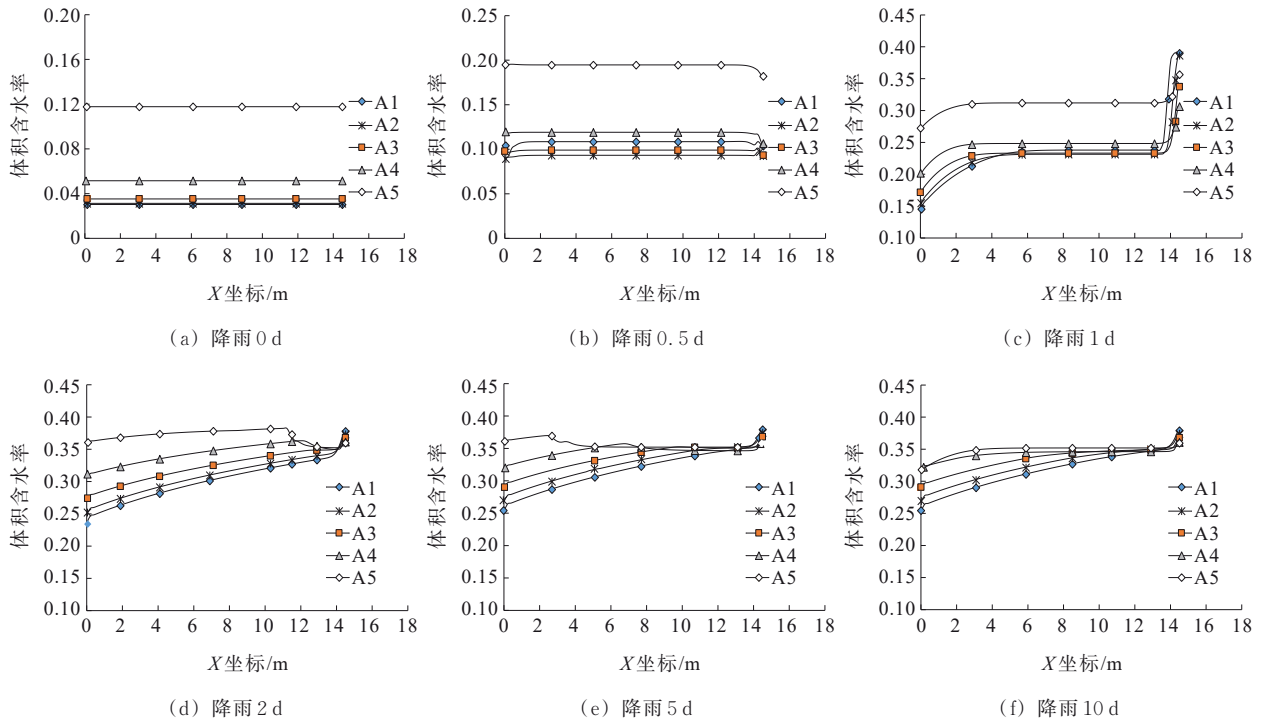


图 6 随 n 值减小(A1~A5)截面 II 体积含水率随 X 坐标变化图

Figure 6 Variation of volumetric water content in Section II with X-coordinate as n value decreases (A1-A5)

大雨持续条件下,随 n 值减小(A1~A5),0.7 m 深度处截面IV膨胀土层体积含水率变化情况如图 8 所示。降雨 2 d,不同 n 值对应的覆盖层均已在坡脚

处发生渗漏,致使坡脚处膨胀土体积含水率增加并达到饱和状态。随降雨时间持续增长,膨胀土层饱和区上移的距离逐渐增加,且随 n 值减小,膨胀土饱

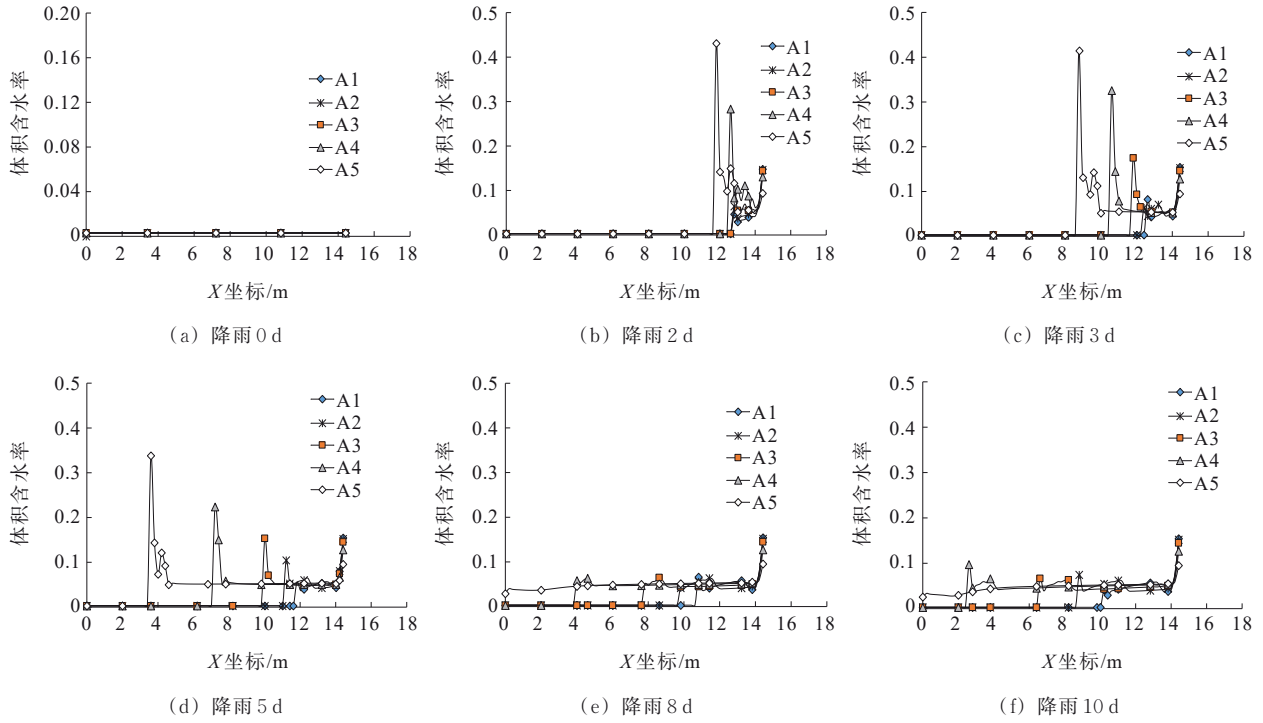


图7 随n值减小(A1~A5)截面Ⅲ体积含水率随X坐标变化图

Figure 7 Variation of volumetric water content in Section III with X-coordinate as n value decreases (A1-A5)

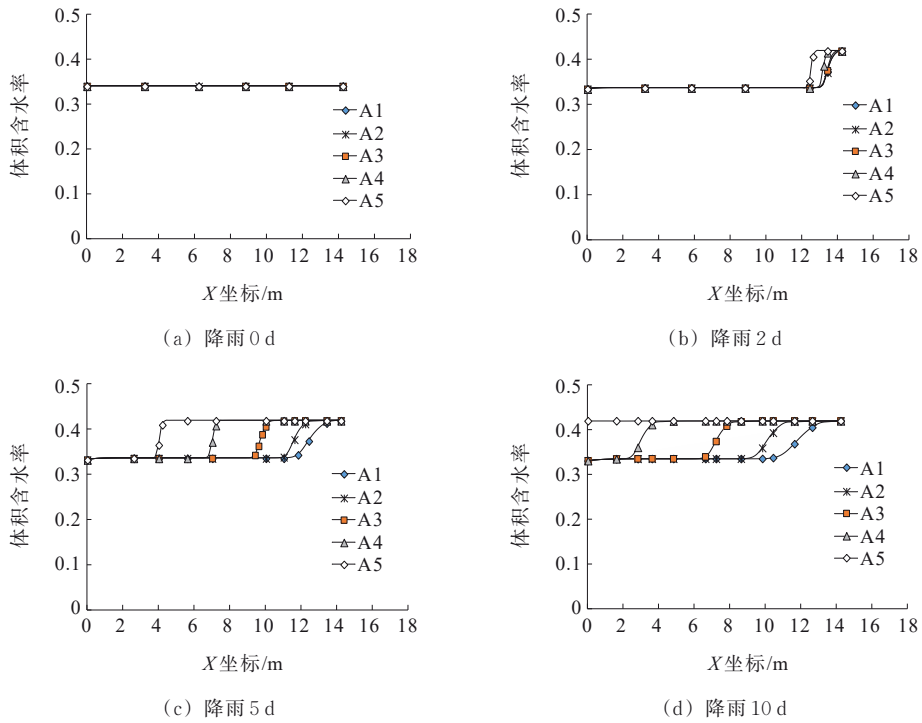


图8 随n值减小(A1~A5)截面Ⅳ体积含水率随X坐标变化图

Figure 8 Variation of volumetric water content in Section IV with X-coordinate as n value decreases (A1-A5)

和范围越大。降雨10 d, n 为最小值1.5时,膨胀土全截面达到饱和状态, n 为最大值3.5时,膨胀土仍仅在坡脚处达到饱和状态。因此,增加UDL的 n 值有利

于增强覆盖层的防渗性能。

3.2 饱和渗透系数 k_s 的影响

大雨持续条件下,随饱和渗透系数增加

(B1~B5)截面Ⅰ孔隙水压力随深度变化情况如图9所示。降雨1 d,细粒土层和砂层孔隙水压力不断增加,增加幅度受砂层饱和渗透系数影响较小。降雨4 d时,B1模型中砂和碎石层界面处孔隙水压力增幅明显,说明水分已经突破至碎石层, k_s 较大的B2、B3、B4、B5模型孔隙水压力无变化。大雨持续10 d,B2、

B3砂和碎石界面先后发生突破,B4、B5碎石层界面孔隙水压力仍未发生变化,说明UDL的饱和渗透系数对碎石层和膨胀土层孔隙水压力变化影响显著。

为准确研究UDL饱和渗透系数对砂层导排长度和覆盖层防渗性能的影响,分别选取截面Ⅱ、截面Ⅲ、截面Ⅳ进行体积含水率分析。

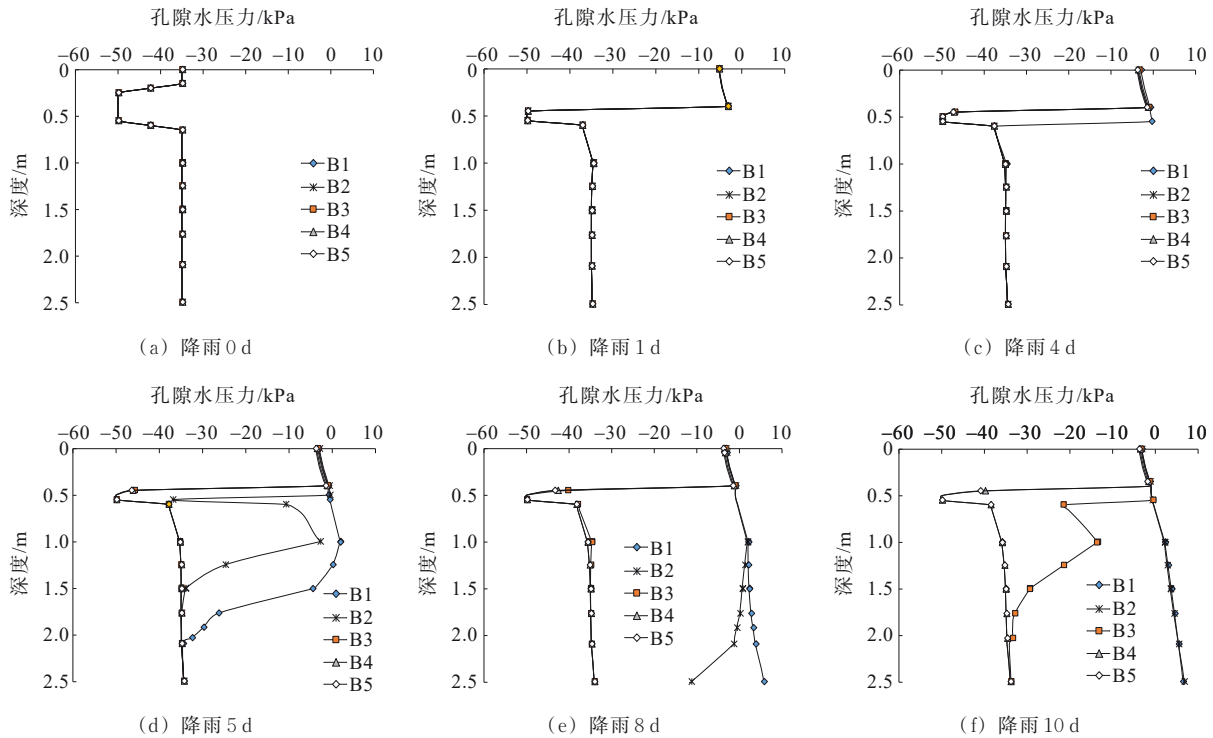


图9 随 k_s 增加(B1~B5)截面Ⅰ孔隙水压力随深度变化图

Figure 9 Variation of pore water pressure in Section I with depth as k_s increases (B1-B5)

大雨持续条件下,随饱和渗透系数增加(B1~B5),截面Ⅱ、截面Ⅲ处体积含水率随X坐标变化情况如图10、图11所示。降雨1 d,截面Ⅱ处全截面体积含水率显著增加,且随渗透系数增加,坡脚处体积含水率增幅更大(B5>B4>B3>B2>B1),这是因为UDL饱和渗透系数越大时,渗透性能相对更好,适当的渗透性有助于土壤中水分的运输,雨水更快地向砂层内部入渗的同时更快地向坡脚导排^[27]。大雨持续2 d,B1饱和渗透系数最小时,全截面体积含水率最高,且B1、B2坡脚处体积含水率降低。由图11(降雨2 d)可知:坡脚处体积含水率达到碎石层进水值发生突破,水分大量渗入碎石层。此时,持续降雨2 d不同饱和渗透系数对砂层的导排长度影响较小,但 k_s 越小,突破后截面Ⅱ碎石层的最大体积含水率越大,对覆盖层的防渗性能不利。持续降雨10 d,截面Ⅱ体积含水率增长量随渗透系数增大而减小(B1>B2>B3>B4>B5),截面Ⅲ体积含水率增长范围,随渗透系数

增大而减小(B1>B2>B3>B4>B5),说明 k_s 对UDL导排长度的影响显著, k_s 越大,导排长度越长的同时可以降低水分的渗入量。

大雨持续条件下,随饱和渗透系数增加(B1~B5)截面Ⅳ处体积含水率变化情况如图12所示。降雨2 d,强风化膨胀土坡脚处体积含水率突增,说明碎石层和强风化膨胀土界面发生突破,毛细阻滞覆盖层失效,且坡脚处膨胀土达到饱和状态。相同降雨条件下,不同 k_s 对覆盖层发生突破时间的影响较小。随降雨时间持续增长,膨胀土饱和区沿坡面上移距离不断增加,相同时间节点,膨胀土饱和区范围随饱和渗透系数增大而减小,说明砂层饱和渗透系数对覆盖层渗漏量影响显著,砂层饱和渗透系数越大,覆盖层渗漏量越小,膨胀土层受降雨影响范围也越小。因此,持续长时间降雨情况下,UDL水力参数 k_s 在合理范围内应取较大值,B5中砂层 $k_s=5.79 \times 10^{-4}$ m/s时,毛细阻滞覆盖层防渗效果最佳。

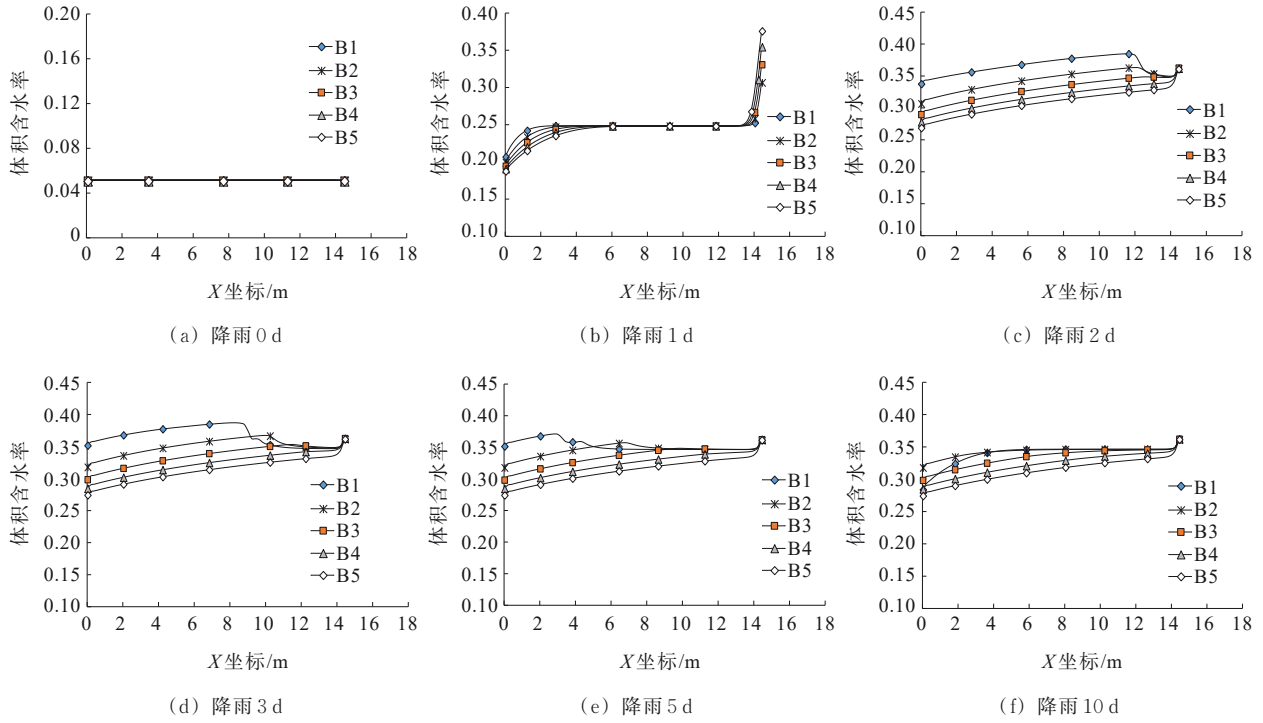


图 10 随 k_s 增加(B1~B5)截面 II 体积含水率随 X 坐标变化图

Figure 10 Variation of volumetric water content in Section II with X-coordinate as k_s increases (B1~B5)

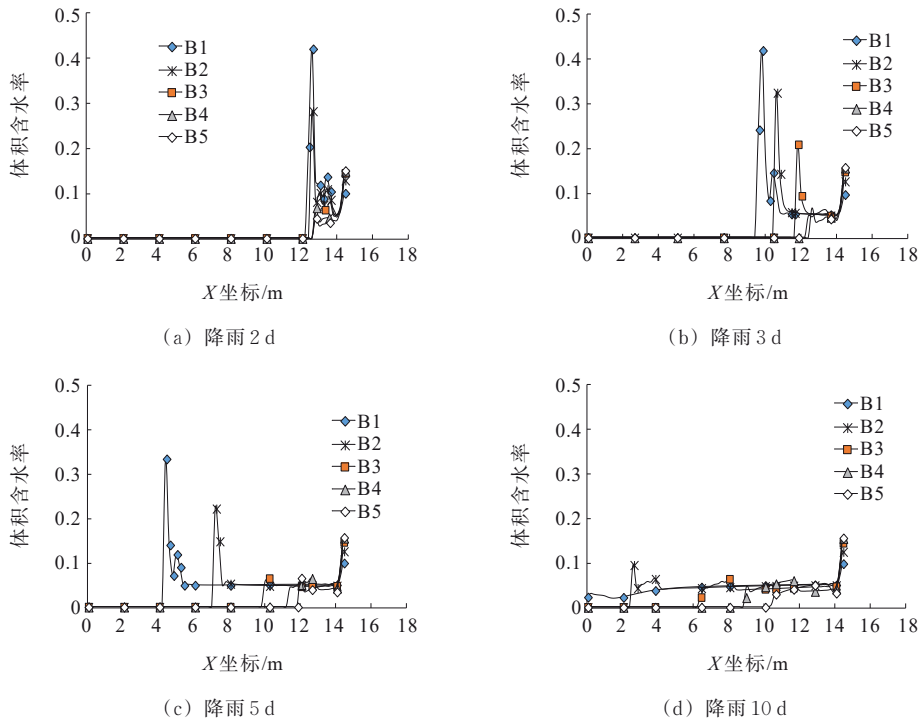


图 11 随 k_s 增加(B1~B5)截面 III 体积含水率随 X 坐标变化图

Figure 11 Variation of volumetric water content in Section III with X-coordinate as k_s increases (B1~B5)

3.3 进气值 a 的影响

图 13 为大雨持续条件下, 随进气值 a 减小 (C1~C5) 截面 I 孔隙水压力随深度变化情况。降雨 1 d, 细粒土层和砂层孔隙水压力增加幅度随进气值

减小而增大, 说明当进气值 a 越小时, 雨水入渗量越大, 导致 0~0.4 m 孔隙水压增幅大。降雨 5 d, 进气值 a 较小的 C5 和 C4 模型碎石层和膨胀土层孔隙水压力显著增加, 且 $C5 > C4$ 。持续降雨 10 d, a 值较大

时,C1、C2、C3膨胀土层孔隙水压力仍未发生变化。因此,为进一步研究UDL进气值 a 对雨水突破至碎石层的时间、砂层导排长度和覆盖层防渗性能的影响,

选取截面II、截面III、截面IV进行体积含水率分析。

图14、图15为大雨持续条件下,随进气值 a 减小(C1~C5)截面II、截面III处体积含水率变化情况。

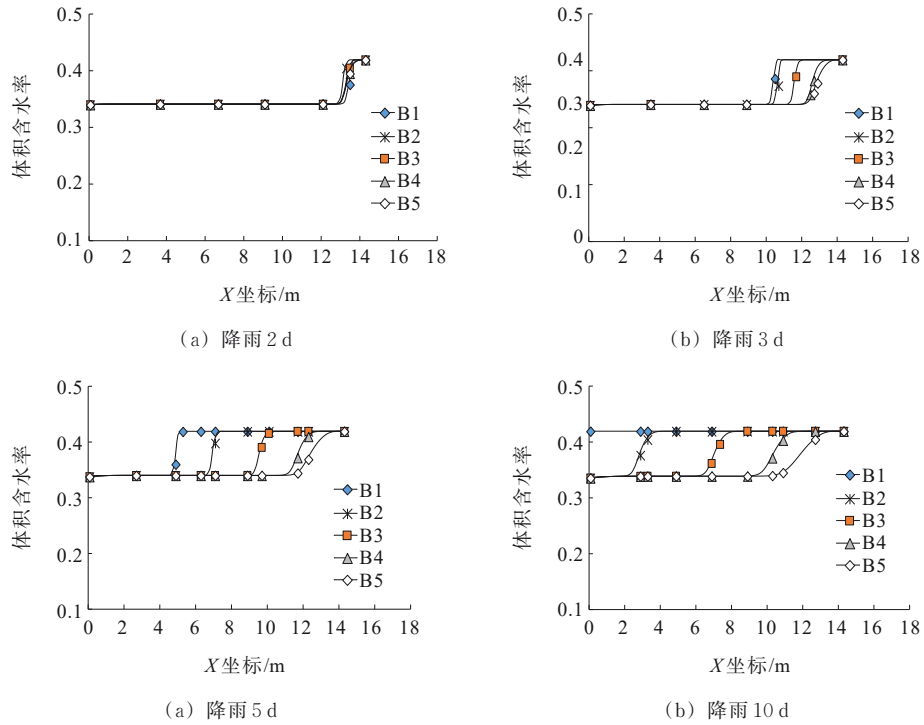


图12 随 k_s 增加(B1~B5)截面IV体积含水率随X坐标变化图

Figure 12 Variation of volumetric water content in Section IV with X-coordinate as k_s increases (B1-B5)

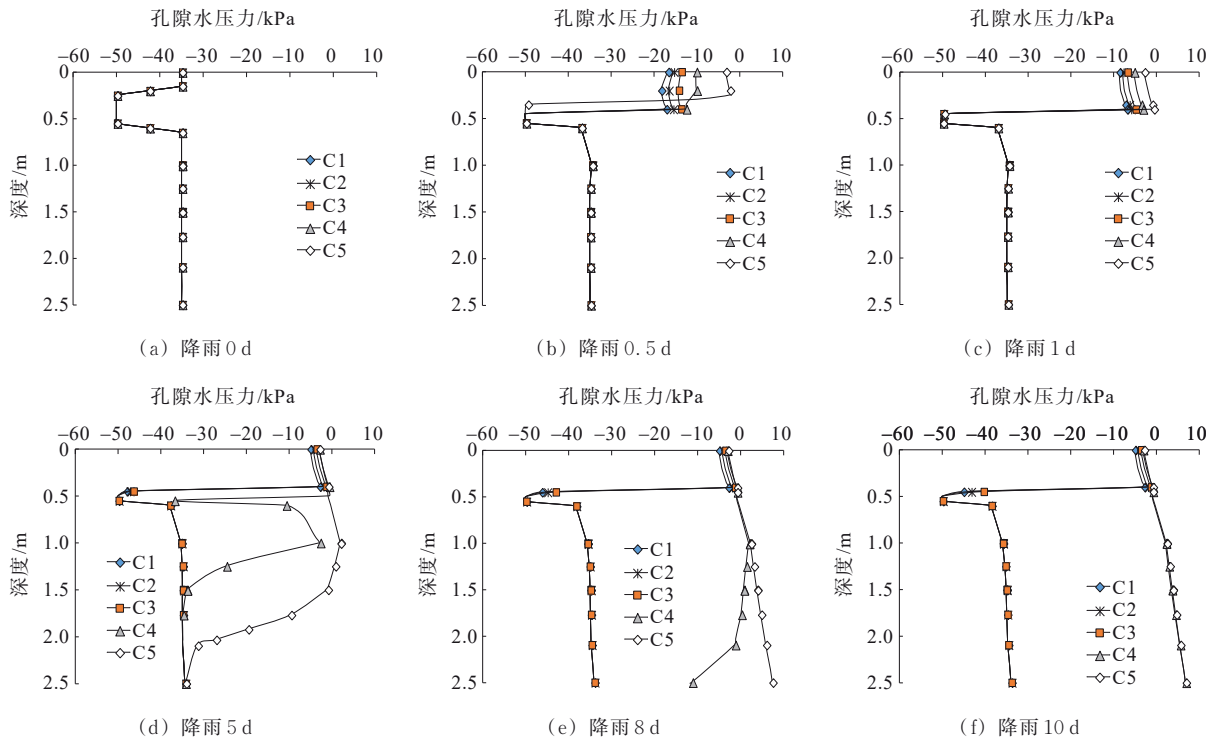


图13 随 a 减小(C1~C5)截面I孔隙水压力随深度变化图

Figure 13 Variation of pore water pressure in Section I with depth as a decreases (C1-C5)

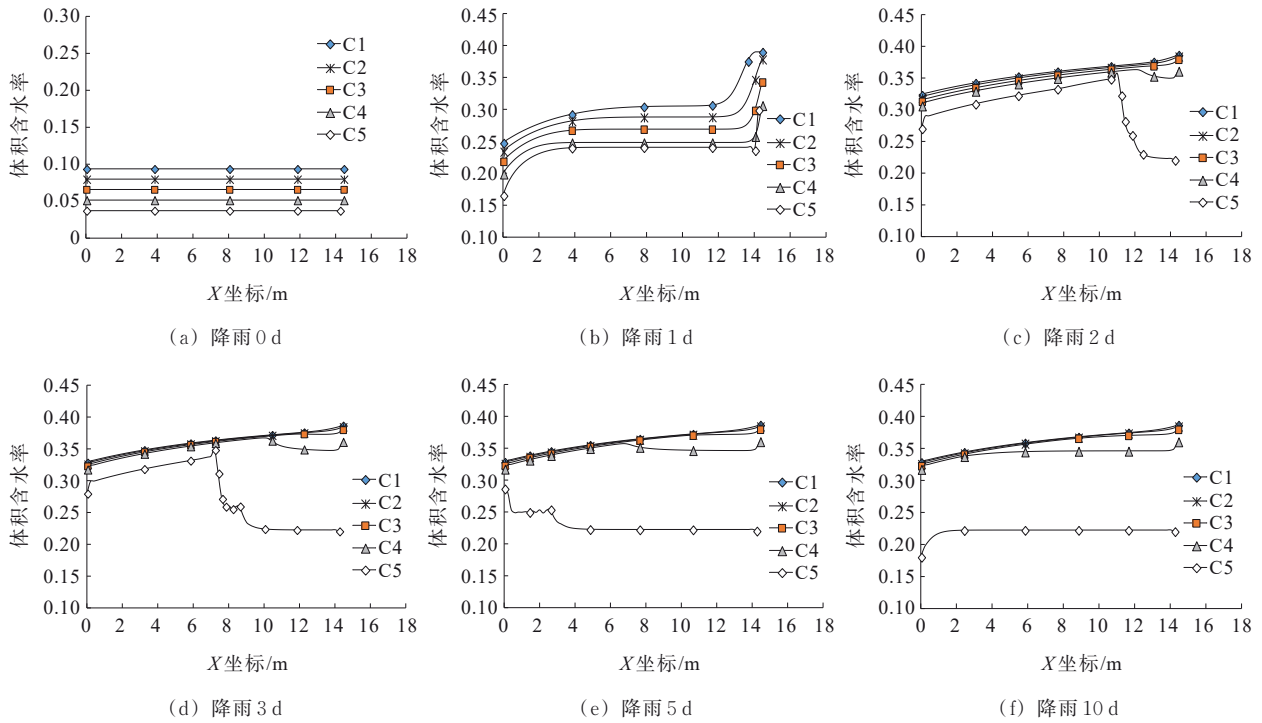


图 14 随 a 减小(C1~C5)截面 II 体积含水率随 X 坐标变化图

Figure 14 Variation of volumetric water content in Section II with X -coordinate as a decreases (C1-C5)

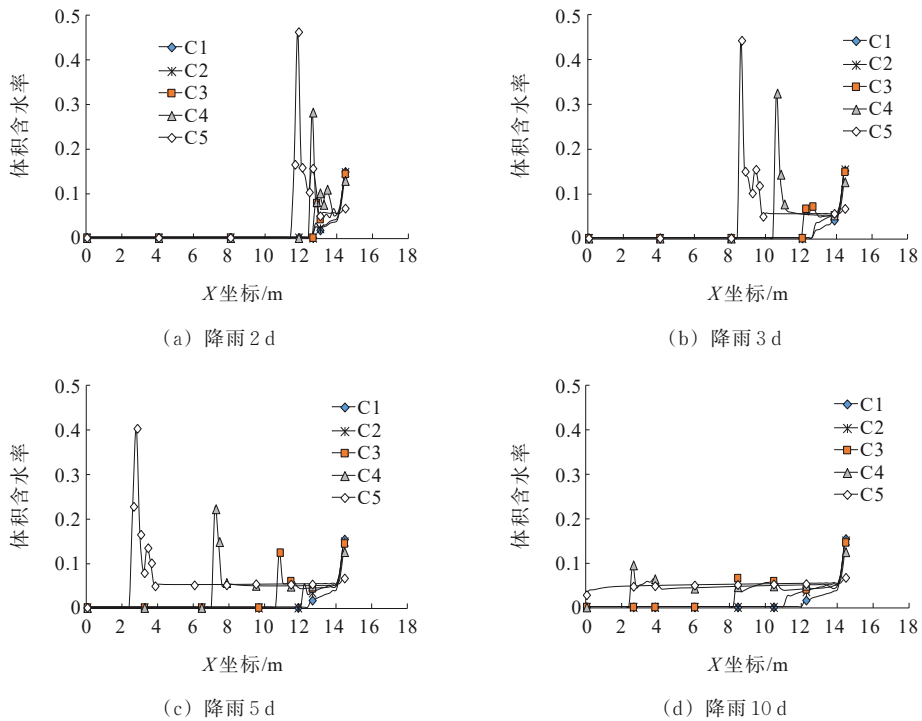


图 15 随 a 减小(C1~C5)截面 III 体积含水率随 X 坐标变化图

Figure 15 Variation of volumetric water content in Section III with X -coordinate as a decreases (C1-C5)

Van Genuchten 模型中参数 α 与进气值 a 之间的关系较为复杂, 也受其他模型参数的影响。当介质较粗时, $1/\alpha$ 与进气值 a 近似相等。当其他参数不变时, a 值越大, 土水特征曲线中间平缓部分越高, 即相同负

压所对应的体积含水率越大^[27]。

降雨 1 d, 取不同 a 值时, 砂层全截面体积含水率都有明显增长并将雨水向坡脚导排。降雨 2 d, C1~C5 各模型截面 III 坡脚处体积含水率均增加, 砂层和碎

石层界面在坡脚处发生突破,此时突破后截面Ⅲ最大体积含水率随 a 值减小而增大,因为砂层达到某一体积含水率后,进气值 a 越小,持水能力越弱^[28]。持续降雨10 d,体积含水率增加的范围不断从坡脚延伸至坡中甚至坡顶,各时间节点降雨沿坡面蔓延的长度始终随 a 的减小而增大($C1 < C2 < C3 < C4 < C5$)。因此,砂层进气值 a 越大,雨水会更少更慢地渗入碎石层,能有效地增大导排长度。

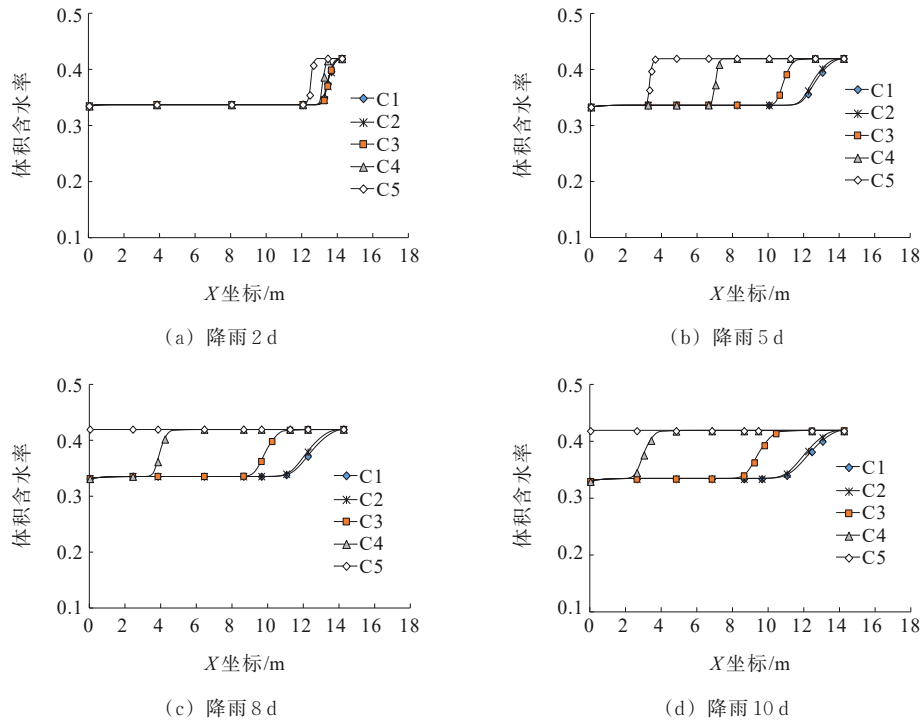


图16 随 a 减小(C1~C5)截面Ⅳ体积含水率随 X 坐标变化图

Figure 16 Variation of volumetric water content in Section IV with X -coordinate as a decreases (C1-C5)

4 结论

通过对不同导排层(UDL)水力参数取值下的“细-导排层-粗”型毛细阻滞覆盖层处治膨胀土边坡模型开展GeoStudio渗流模拟,分析持续大雨条件下覆盖层及膨胀土层中不同特征截面处孔隙水压力和体积含水率随降雨时长的变化规律,探究UDL水力参数对覆盖层防渗性能的影响,得到以下结论:

(1) UDL参数 n 值越大,细粒土层中的雨水越早入渗至下部砂层;在持续降雨条件下,增大 n 值可使UDL孔径分布更均匀,雨水入渗速率加快,导排长度相应增加,有助于减少进入碎石层的水量,同时抑制膨胀土饱和区向上扩展,从而提升覆盖层的整体防渗性能。

(2) 在短时强降雨条件下,UDL饱和渗透系数

大雨持续条件下,随进气值 a 减小(C1~C5)截面Ⅳ体积含水率随 X 坐标的变化情况如图16所示。膨胀土层在持续大雨条件下,体积含水率不断增加,坡脚处先达到饱和。随降雨时间增长,膨胀土饱和区范围逐渐增大, a 值越大,膨胀土饱和区范围越小,因此,进气值 a 在合适范围内应取较大值,C1模型中 $a=9$ 毛细阻滞覆盖层防渗效果最佳。

k_s 越小,砂层中发生水分突破时渗入碎石层的水量越大,不利于覆盖层防渗;而在持续降雨条件下, k_s 对导排长度的影响更为显著, k_s 越大,雨水向坡脚方向的导排速率越快;提高 k_s 可有效增加导排长度,减少覆盖层的总渗漏量,增强覆盖层的防渗效果。

(3) 当UDL达到一定体积含水率后,进气值 a 越小,其持水能力越弱。因此,增大 a 值能够延缓并减少雨水向碎石层的入渗,有效增加导排长度,缩小膨胀土层饱和区范围,从而提升覆盖层的防渗性能。

参考文献:

References:

- [1] 谭波,郑健龙,余文成.降雨条件下膨胀土路堑边坡渗流

- 分析[J]. 中外公路, 2009, 29(2): 28-32.
- TAN Bo, ZHENG Jianlong, YU Wencheng. Seepage analysis of expansive soil cutting slope under rainfall condition[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(2): 28-32.
- [2] 徐永福, 程岩, 肖杰, 等. 膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1281-1294.
- XU Yongfu, CHENG Yan, XIAO Jie, et al. New prevention and control technology for expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1281-1294.
- [3] 侯超群, 张荣健, 李永鑫. 控制吸力下低应力条件的合肥膨胀土抗剪强度试验[J]. 中外公路, 2024, 44(1): 48-54.
- HOU Chaoqun, ZHANG Rongjian, LI Yongxin. Shear strength test of Hefei expansive soil under low stress conditions with controlled suction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 48-54.
- [4] 詹良通, 贾官伟, 邓林恒, 等. 湿润气候区固废堆场封场土质覆盖层性状研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1812-1818.
- ZHAN Liangtong, JIA Guanwei, DENG Linheng, et al. Performance of earthen final covers of landfills in humid areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1812-1818.
- [5] 王雨威, 胡艳丽, 张锐. 高速公路改扩建膨胀土路堤处置方法研究[J]. 中外公路, 2024, 44(1): 1-8.
- WANG Yuwei, HU Yanli, ZHANG Rui. Study on treatment method of expansive soil embankment in expressway reconstruction and extension[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 1-8.
- [6] 焦卫国, 林长松, 庾斌, 等. 半湿润地区毛细阻滞覆盖层长期防渗性能评价与渗漏气象机制分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(10): 118-126.
- JIAO Weiguo, LIN Changsong, TU Bin, et al. Evaluation of long-term anti-seepage performance of capillary barrier cover in semi humid area and analysis on meteorological mechanism of percolation[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 118-126.
- [7] RAHARDJO H, SANTOSO V A, LEONG E C, et al. Use of recycled crushed concrete and secudrain in capillary barriers for slope stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(6): 662-673.
- [8] LI X K, LI X, WU Y, et al. A novel unsaturated drainage layer in capillary barrier cover for slope protection[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(4): 108.
- [9] 鲍桂勇, 许杨少君, 蒋植洁, 等. 干湿循环下水泥改性膨胀土裂隙及渗透特性研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 198-204.
- BAO Guiyong, XU-YANG Shaojun, JIANG Zhijie, et al. Research on crack and permeability characteristics of cement-modified expansive soil under dry-wet cycles[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 198-204.
- [10] STORMONT J C, MORRIS C E. Unsaturated drainage layers for diversion of infiltrating water[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(5): 364-366.
- [11] 邓林恒, 詹良通, 陈云敏, 等. 含非饱和导排层的毛细阻滞型覆盖层性能模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 75-80.
- DENG Linheng, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin, et al. Model tests on capillary-barrier cover with unsaturated drainage layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 75-80.
- [12] ZHAN T L T, LI H, JIA G W, et al. Physical and numerical study of lateral diversion by three-layer inclined capillary barrier covers under humid climatic conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(12): 1438-1448.
- [13] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 非饱和导排层水分侧向导排作用模型试验验证与影响因素分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 92-98.
- JIAO Weiguo, ZHAN Liangtong, JI Yongxin, et al. Model test and numerical analysis on lateral drainage in capillary-barrier cover with unsaturated drainage layer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(5): 92-98.
- [14] 李晓康, 李旭, 吴羊, 等. 含非饱和导排层毛细阻滞覆盖层服役性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊1): 189-194.
- LI Xiaokang, LI Xu, WU Yang, et al. Experimental study on service performance of capillary block coating with unsaturated drainage layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(sup 1): 189-194.
- [15] 陈冠一, 肖杰, 陈强, 等. 不同毛细阻滞覆盖层处治膨胀土边坡的渗流及稳定性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 199-213.
- CHEN Guanyi, XIAO Jie, CHEN Qiang, et al. Study on seepage and stability of expansive soil slope treated by different capillary barrier cover layers[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 199-213.
- [16] 肖杰, 杨和平. 膨胀土堑坡格栅加筋柔性支护的数值模拟[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 1-8, 14.
- XIAO Jie, YANG Heping. Numerical stimulation of geogrid reinforced flexible support for treating expansive soil cut slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(6): 1-8, 14.
- [17] 肖杰, 谭越峰, 童超, 等. 基于三场耦合的膨胀土边坡浅层坍塌数值分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(7): 128-136, 118.
- XIAO Jie, TAN Yuefeng, TONG Chao, et al. Numerical analysis for shallow landslides of expansive soil slopes based on three fields coupling[J]. Industrial Construction, 2022, 52(7): 128-136, 118.
- [18] YANG K H, THUO J N, HUYNH V D A, et al. Numerical evaluation of reinforced slopes with various backfill-reinforcement-drainage systems subject to rainfall

- infiltration[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 96: 25-39.
- [19] SCARFONE R, WHEELER S J, LLORET-CABOT M. Conceptual hydraulic conductivity model for unsaturated soils at low degree of saturation and its application to the study of capillary barrier systems[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, 146(10):1090-0241
- [20] STORMONT J C. The effectiveness of two capillary barriers on a 10% slope[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 1996, 14(4): 243-267.
- [21] 张大为,牟超,崔广炎,等.高寒区上覆岩石层膨胀土边坡开挖稳定性分析[J].*中外公路*,2026,46(1):37-44.
ZHANG Dawei,MOU Chao,CUI Guangyan,et al.Stability analysis of expansive soil slope excavation in overlying rock layers in alpine regions[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2026,46(1):37-44.
- [22] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996.
QIAN Jiahuan, YIN Zongze. *Geotechnical principle and calculation*[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996.
- [23] APIWANTRAGOON P, BENSON C H, ALBRIGHT W H. Field hydrology of water balance covers for waste containment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(2):1.
- [24] KHIRE M V, BENSON C H, BOSSCHER P J. Field data from a capillary barrier and model predictions with UNSAT-H[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(6): 518-527.
- [25] BOATENG S. Probabilistic unsaturated flow along the textural interface in three capillary barrier models[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, 133(11): 1024-1031.
- [26] LENHARD R J, PARKER J C, MISHRA S. On the correspondence between brooks-corey and van genuchten models[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1989, 115(4): 744-751.
- [27] 陈卫金,程东会,陶伟.van Genuchten模型参数的物理意义[J].*水文地质工程地质*,2017,44(6):147-153.
CHEN Weijin, CHENG Donghui, TAO Wei. Physical significance of the parameters in the van Genuchten model [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 147-153.
- [28] 薛海斌,党发宁,尹小涛,等.土水特征曲线形状对降雨条件下土质边坡稳定性的影响研究[J].*西安理工大学学报*,2014,30(3):253-260,250.
XUE Haibin, DANG Faning, YIN Xiaotao, et al. Research on the effect of shape of soil-water characteristic curve on soil slope stability under rainfall condition[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2014, 30(3): 253-260, 250.