

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.022

气温变化对 CCBE 防护层输水距离的影响

龚震¹, 黄月华¹, 周成^{1,2}, 王林³, 谭昌明⁴

- (1. 四川大学 水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
2. 南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024;
3. 上海浦东新区投资咨询公司, 上海 200125;
4. 四川省交通运输厅 公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 具有毛细阻滞效果的 CCBE(Covers with Capillary Barrier Effects, CCBE)防护层构建了一种简易的蓄排水系统, 有利于植物护坡。人们定义 CCBE 层中粗粒土内的输水距离 L_d 来描述 CCBE 防护系统的蓄排水能力。影响坡面 CCBE 防护结构的蓄排水能力的因素有很多, 主要探究气温及其变化对它的影响。数值计算结果发现, 日均气温越高, 对 CCBE 防护结构的蓄排水能力的影响就越大, 输水距离也越大; 日均温差对 CCBE 防护结构输水距离的影响较复杂, 大概在 4℃ 日均温差时, CCBE 防护结构的输水距离达到最大。研究成果可以为防坡土开裂的 CCBE 防护系统的设计提供参考依据。

关键词: 输水距离; CCBE 坡面防护; 蓄排水能力; 气温变化; 地表净辐射量; 数值计算

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0125-06

Influence of Temperature Change on the Diversion of CCBE Layer

GONG Zhen¹, HUANG Yuehua¹, ZHOU Cheng^{1,2}, WANG Lin³, TAN Changming⁴

- (1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;
2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. Shanghai Pudong New Area Investment Consulting Company, Shanghai 200125, China;
4. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Cover with capillary barrier effects (CCBE) layer composes a simple system of rainfall discharge and storage, which is helpful for vegetated soil slope. The rainfall diversion length L_d along the coarse soil layer was usually defined to account the rainfall discharge and storage capacity of CCBE system, and it is affected by many factors. The influence of temperature and its change on the rainfall discharge and storage capacity of CCBE system by means of the rainfall diversion length L_d . The numerical simulation results show that the higher the daily mean temperature is, the larger the diversion length L_d is; but the effect of the daily temperature change is complicated, and around 4℃ the diversion length L_d is largest. Conclusions from this research can be useful for design and construction of other CCBE system on soil slope.

Keywords: the rainfall diversion length; soil fissure of slope soil; slope protection by CCBE system; capacity of discharge and storage of rainfall; temperature change; surface net radiation; numerical analysis

CCBE 防护系统是由饱和含水率较大、渗透系数较小的表层细粒土和饱和含水率较小、饱和渗透系数较大的下覆粗粒土组成^[1-2]。该系统具有毛细阻滞效果, 能防止雨水的进一步入渗; 如果蒸发量大, 粗粒土的蓄水又会通过毛细作用反馈细粒土, 从而可以有效防止坡土开裂并对植被进行养护。同时, 强降雨作用下植物防护的坡土表层细粒土还可

作为一层输水层^[3-4]。因此, 与采用单一的渗透系数较低的防护结构相比, 在防止雨水入渗方面 CCBE 防护系统往往是个不错的选择^[5-6], 同时其细粒土表层往往可种植植被, 并进一步疏导和含蓄雨水^[7]。

正由于其出色的储水和输水能力, CCBE 防护系统已被广泛应用于干旱、半干旱地区的垃圾填埋场坡面封顶系统^[1-6]、尾矿坝坡的雨水入渗防护系

收稿日期: 2018-09-23

修稿日期: 2018-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579167); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(YK915003)

作者简介: 龚震(1995—), 男(苗族), 重庆黔江人, 硕士研究生, 研究方向为环境岩土工程。E-mail: 1479317850@qq.com

通讯作者: 周成(1970—), 男, 江苏赣榆人, 教授, 主要从事环境岩土工程研究工作。E-mail: czhou@scu.edu.cn

统^[4]、膨胀土和残积土边坡的防护中^[8-13]。但是当雨强较大或是雨强相对较小但时间较长时,雨水将大量进入下覆粗粒土,CCBE 防护结构被击穿从而失去毛细阻滞效果^[1-2]。而且在重力作用下细粒土层中储存的水分会沿着细粒土层向下运移,使得细粒土层中的含水率分布不均,越接近坡脚往往就具有更高的含水率,更易被击穿^[3,5,14]。因此为了定量分析与描述 CCBE 防护系统的蓄排水能力,人们提出了输水距离的概念,作为评价 CCBE 防护系统的蓄排水能力的指标。

吸湿过程中在粗粒土表层的基质吸力没有达到进水压力值时,坡面上细粒土中的水分将会沿着细粒土层流动;当细粒土层与粗粒土层交界面某处的吸力值达到粗粒土的进水压力值时,雨水大量渗入粗粒土中。而该点就被称为 DDL(Down Dip Limit)。该点沿着坡面到坡顶的距离就称为 CCBE 防护结构的输水距离,即 L_d (Diversion Length),如图 1 所示。

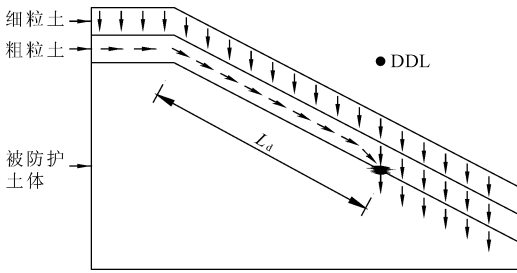


图 1 降雨入渗土坡 CCBE 防护层的输水距离 L_d

影响土坡上 CCBE 防护系统输水距离 L_d 的因素有很多,大致可以分为三方面:第一方面是当地真实气候条件,比如降雨^[4-5]、蒸发^[15]等;第二则是该防护结构本身的材料特性,比如各材料的吸湿曲线特征^[10]、材料的各向异性、吸湿曲线的滞回效应等;第三方面则是防护结构本身的结构形式^[14]、结构中是否具有 UDL(Unsaturated Drained Layer, UDL)^[3,14]、粗粒土下部是否具有渗透系数相对较小的相对不透水层^[5,16]等。

保持坡土排蓄水平衡,是防止坡土开裂的有效手段。地表温度的变化必然会导致坡土近地表面蒸发量的变化,进而对 CCBE 的输水距离的大小和防止坡土开裂的效果造成影响。CCBE 防护结构在干旱甚至湿润地区的边坡防护系统中得到研究应用^[11-13],许多学者也因此提出了坡面 CCBE 防护系统输水距离的解析解^[15,17-18],但这些解析解都假定坡土稳定渗流、下覆粗粒土无限厚,而这与实际情况不符。同时由于不同因素的影响,导致 DDL 在两层土体交界面的位置不断变化^[4-5,14-15,17],使得求解

CCBE 防护结构中的非饱和渗流问题变得非常复杂,这导致这些解析解很难应用于真实大气状况条件下输水距离的分析。而数值分析能够对复杂条件下的非饱和渗流问题给出合理的解答^[4-5,15,17],进而便于计算分析大气温度变化下土坡 CCBE 防护系统的输水距离。

气温变化对 CCBE 防护系统的蓄排水能力及输水距离的研究还非常少见。因此,本文利用 VADOSE/W 软件,对土坡上 CCBE 防护系统在气温变化下的输水距离进行计算分析。

1 坡土水热耦合及净辐射量的计算方法

1.1 非饱和坡土的水热耦合方程

气温变化会引起土体表面热通量发生变化,使得土体表面的蒸发量发生变化,这涉及到非饱和土中的水热耦合分析。VADOSE/W 采用水热耦合方程计算气温变化对土体内部水分流动造成的影响^[19]。二维条件下的水热耦合方程见式(1)一式(3),其中,二维条件下的非饱和渗流方程为:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \left(\frac{P}{\rho g} + y \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \left(\frac{P}{\rho g} + y \right)}{\partial y} \right) + Q = \lambda \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

式中: P 为孔隙水压力; P_v 为土壤中的蒸汽压; λ 为土体土水特征曲线斜率; k_x 为土体中的沿 x 方向的水力传导系数; k_y 为土体中沿 y 方向上的水力传导系数; Q 为边界流量; D_v 为蒸汽扩散系数; y 为位置水头; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; t 为时间。

二维条件下的热量传导方程为:

$$L_v \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) + L_v \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{tx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{ty} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_t = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: L_v 为水的蒸发潜热; T 为绝对温度; k_t 为土体的热传导系数; Q_t 为边界热量; λ_t 为土的体积比热容。

式(1)和式(2)中的孔隙水压力 P 、绝对温度 T 、和蒸汽压力 P_v 之间的关系构成了第三个方程。

$$P_v = P_{vs} \left(e^{\frac{-P_w}{\rho RT}} \right) = P_{vs} h_{\text{rair}} \quad (3)$$

式中: P_{vs} 为纯水的饱和蒸汽压; w 为水蒸气的分子质量; R 为通用气体常数; ρ 为水的密度; h_{rair} 为空气

相对湿度。

由于地表温度变化使得近地表的蒸发量也不断发生变化,因此需要给出地表处的实际蒸发量的计算方法,见式(4)。

$$A_{ae} = \frac{\Gamma R_n + \vartheta E_a}{\vartheta A + \Gamma}$$

(4)

式中: A_{ae} 为实际蒸发量; Γ 为饱和蒸汽压随温度变化曲线在平均温度时的斜率; R_n 为土体表面的净辐射量大小,其单位为 mm/d,可以通过蒸发皿等仪器进行测量得到,亦可通过相应的经验公式得到。 ϑ 为湿度计算常数; $E_a = f(u)P_a(B - A)$, $f(u) = 0.35(1 + 0.15U_a)$, U_a 为风速, P_a 为蒸发表面以上空气中的蒸汽压力, B 为空气相对湿度的倒数, A 为土体表面相对湿度的倒数。

在进行土体的水热耦合分析时,需要对土体中的温度场进行计算,温度边界条件的预估方程为:

$$T_s = T_a + \frac{1}{\vartheta f(u)}(R_n - E)$$

(5)

式中: T_s 为土体表面的温度; T_a 为土体表面以上空气中的温度; R_n 为土表面所接受的净辐射量大小; E 为实际蒸发量。

1.2 坡土净辐射量的预估方法

在 VADOSE/W 中提供了三种输入土体表面净辐射量的方式:一种是以 mm/d 为单位的日蒸发量值,一种是以 MJ/(m² · d) 为单位的日蒸发量值,最后一种是该软件用本身带有的日蒸发量预估公式所预估的值。

本文采用 Irmak 等在 2003 年提出的方程^[20]对土体表面净辐射量大小 R_n 进行预估。该方程具体见式(6):

$$R_n = -0.09T_{\max} + 0.203T_{\min} - 0.101RH_{\text{mean}} + 0.687R_{s,\text{predicted}} + 3.97$$

(6)

式中: R_n 为净辐射量大小,单位 MJ/(m² · d); $T_{\max}$ 为当天空气中的最高温度,单位 ℃; $T_{\min}$ 为当天空气的最低温度,单位 ℃; $R_{s,\text{predicted}}$ 为预估的太阳净辐射量,单位 MJ/(m² · d); RH_{mean} 为空气相对湿度的平均值。 $R_{s,\text{predicted}}$ 的预估经验公式为 $R_{s,\text{predicted}} = K_t R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$ 。式中,经验参数 $K_t =$

$0.00185(T_{\max} - T_{\min})^2 - 0.0433(T_{\max} - T_{\min}) + 0.4023$, R_a 为地外辐射大小,单位为 MJ/(m² · d), $R_a = \frac{1440}{\pi}G_{sc}d_r(\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s)$,其中, G_{sc} 为日辐射常数,0.082 MJ/(m² · d); φ 为所在地的纬度值,单位为 rad; d_r 为地球与太阳相对距离的倒数值, $d_r = 1 + 0.033\cos(\frac{2\pi}{365}D_j)$, D_j 为一年当中具体的某一天; ω_s 为日落时的相位角,单位为 rad, $\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$, δ 为太阳赤纬角,单位为 rad, $\delta = 0.409\sin(\frac{2\pi}{365}D_j - 1.39)$ 。

可以发现,只要预知某地的纬度值、日最大最小温度值和平均相对湿度,就可以预估出当地的土体表面的净辐射量大小。

2 计算模型及计算参数

2.1 计算模型及计算参数

选作分析的苏州市某人工土坡尺寸具体见图 2,坡面粉土层和砾石层构成了 CCBE 防护系统。坡比为 1:1.5;左侧不透水边界的地下水位为 3 m,右侧不透水边界的地下水位为 2 m,底部为不透水边界。图 2 中标记为 1 的点位于粉土层与砾石层的交界面处,用来观测土体水热耦合过程中该点处孔隙水压力的变化。

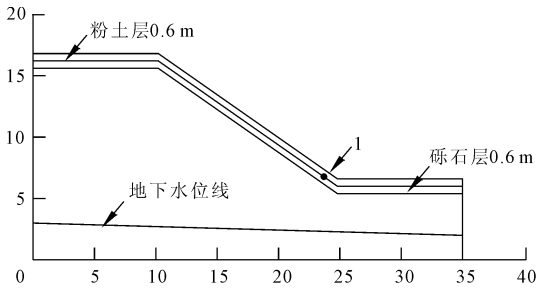


图 2 计算的土坡模型(单位:m)

本文选用的 CCBE 防护层土体和下覆坡土的吸湿曲线及渗透系数随基质吸力的变化曲线,均采用 VG (Van Genuchten)模型进行预估。具体的预估参数和饱和渗透系数见表 1,各类土的热传导系数和体积比热容的经验取值也列于表 1。

表 1 坡土增湿过程中的 V - G 模型拟合参数和饱和渗透系数

土料	α	n	θ_r	θ_s	$K_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$K_t/(\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1})$	$\lambda_v/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{℃}^{-1})$
粉土	0.003	2.02	0.07	0.38	3.0×10^{-6}	104.54	0.71
坡土	0.013	2.40	0.05	0.35	2.4×10^{-4}	350.00	0.61
砾石	0.280	2.50	0.03	0.33	1.3×10^{-2}	150.00	0.67

在 VADOSE/W 软件计算中需要输入的各土体的 SWCC 曲线和渗透系数随基质吸力的变化曲线分别见图 3、图 4。各类土的热传导系数和比热容随含水率的变化曲线均可利用其各自的 SWCC 曲线和相应的经验公式加以预估^[19-20]。各土体的热传导系数及体积比热容随含水率的变化曲线分别见图 5、图 6。

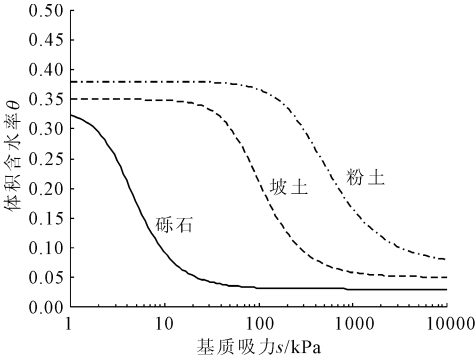


图 3 各土体的 SWCC 吸湿曲线

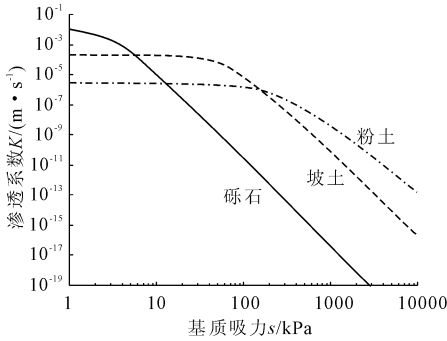


图 4 土体的渗透系数随基质吸力的变化曲线

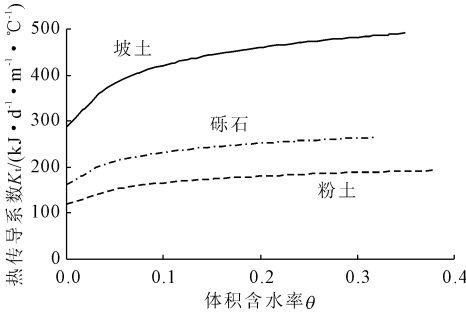


图 5 土体的热传导系数随体积含水率的变化曲线

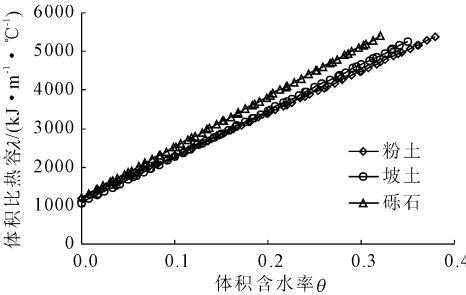


图 6 土体的比热容随体积含水率的变化曲线

在计算初始时,假定粉土层的初始含水率为 0.27,砾石层的含水率为 0.032,坡土含水率为沿空间分布的函数。通过三种土的 SWCC 曲线可以反算出各土的初始孔隙水压力。粉土层的初始孔隙水压力为 -500 kPa,砾石层的初始孔隙水压力为 -100 kPa。

2.2 计算选用的降雨和气温资料

本文选用苏州市 1987 年的气象资料^[21]作为计算模型的气象边界条件,分析大气的温度变化对 CCBE 防护结构输水距离的影响。苏州市 1987 年的日降雨量和平均气温见图 7。其日最大降雨量为 95.6 mm,在该年的 179 天到 192 天之间,降雨量达到了 235.3 mm。

计算分析时,先对 CCBE 防护系统在全年气候条件的输水距离进行一个概括性的计算分析和评价,然后在此基础上着重计算分析 CCBE 防护系统在短时间强降雨被击穿的情况下,温度变化对其输水距离的影响。

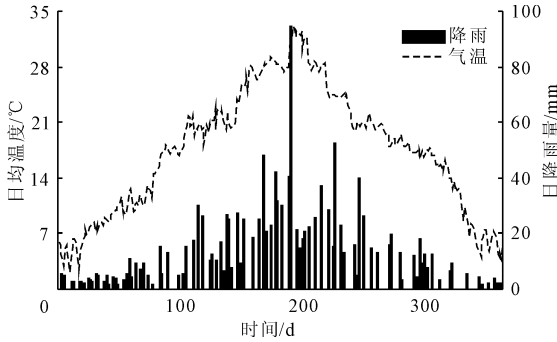


图 7 苏州市 1987 年的日均气温和降雨量^[21]

3 计算结果分析

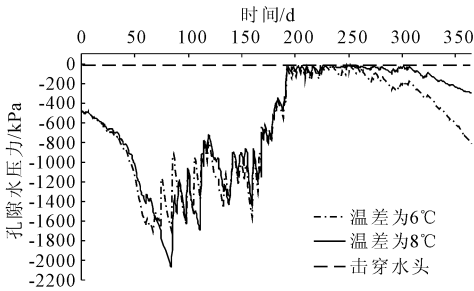
3.1 全年气候条件下土坡 CCBE 防护结构的地表净辐射量及孔压分析

在探究真实大气状况下温度变化对输水距离的影响时,选用的苏州市 1987 年的日均气温和日降雨量资料,先考虑每天的最大温差分别为 6℃和 8℃时对 CCBE 防护系统的地表净辐射量的影响。其中坡土的原始温度为 16℃。降雨类型选择为均布型,历时为 1 d;有降雨时的平均空气湿度为 100%,没有降雨时空气最大相对湿度为 100%,最小为 80%,亦即设定没有降雨时平均空气湿度为 90%。

日均温差不同时,计算所得的地表净辐射量大小变化曲线见图 8。可以看出日均温差不同时,每日的地表净辐射量大小亦不同,地表的净辐射量越大,蒸发量将越大。

在不同平均温差情况下,计算的测点 1 处在一

年内和在 190 d~250 d 时间段的孔隙水压力分别见图 9(a)、图 9(b)。通过对粗粒土残余含水率附近的进气压力值^[22-23]对 CCBE 防护系统的击穿水头进行确定,本文选定的击穿水头为 20 kPa。分析发现,在假定日最大温差为 6℃和 8℃,该 CCBE 防护结构都会在 192 d、217 d、228 d 和 248 d 降雨结束后被击穿。而该 4 天的降雨强度分别为 95.6 mm/d、37.35 mm/d、52.70 mm/d 和 40 mm/d。从图 9 还可以看出,在日均温差分别为 6℃和 8℃时,测点 1 的孔隙水压力变化趋势是一致的,但是由于地表净辐射量不同,进而导致地表的蒸发量有所差异,从而影响坡土中的水热耦合过程,对 CCBE 防护结构的排蓄水能力和输水距离造成影响。



(a) 测点1在一年内的孔隙水压力值

为进一步分析日均温差大小和日均温度大小对 CCBE 防护系统输水距离的影响,下面本文选取 248 d 的气象资料加以具体分析。

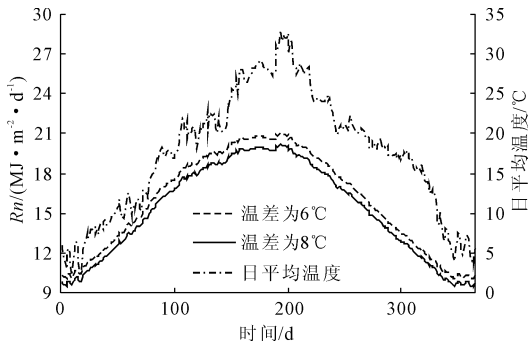
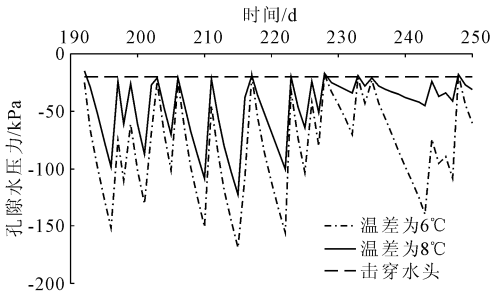


图 8 全年不同温差时的地表净辐射量曲线



(b) 测点1在190 d~250 d 的孔隙水压力值

图 9 不同平均温差时测点 1 处的孔隙水压力值

3.2 日均温差变化对 CCBE 防护结构输水距离的影响

计算的全年气温中某天的地表净辐射量随日均温差的变化曲线见图 10。从图 10 中可以看出地表净辐射量先随着日均温差的增大而迅速增大,然后缓慢减小并趋于稳定,日均温差大致在 4℃时,该天的日净辐射量达到最大。

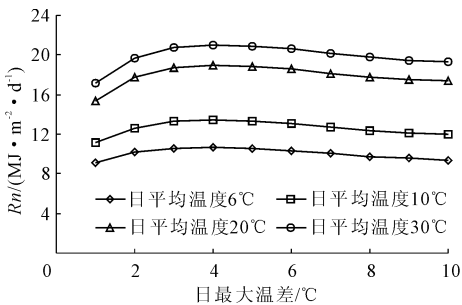


图 10 地表净辐射量随日均温差的变化曲线

为进一步分析日均温差对 CCBE 输水距离的影响,本文选择在 248 d 时,日均温度为 35℃,日均温差为 2℃、4℃、6℃和 8℃时对 CCBE 输水距离的影响。当日均温差为 8℃时,不同降雨历时下细粒土和粗粒土交界面处的孔隙水压力随输水距离的变化

曲线见图 11。从图 11 中可以发现,随着降雨历时的不断进行,CCBE 防护系统逐渐从坡脚至坡顶被击穿。

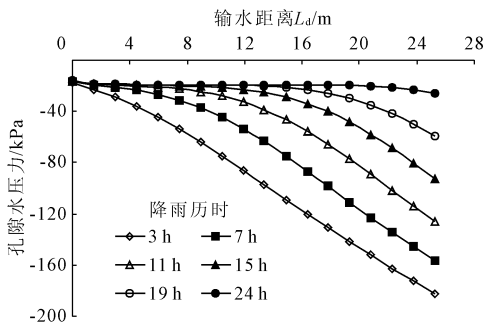


图 11 不同降雨历时下细粒土和粗粒土交界面处的孔隙水压力随输水距离 L_d 的变化曲线

将每一时刻的粗粒土与细粒土交界面处的孔隙水压力在各时刻与击穿水头进行比较,就可以做出 CCBE 防护系统的输水距离随降雨历时的变化曲线。当日均温差不同时,输水距离随降雨历时的变化过程曲线见图 12。从图 12 中可以看出在降雨的过程中,日均温差为 4℃时的输水距离最大。结合图 12 和图 10 可以发现,日均温差对输水距离的影响主要是通过影响地表净辐射量的大小,进而影响降雨时雨水对 CCBE 防护系统的净入渗量和输水距

离的大小。因此可以得知,日均温差对 CCBE 防护结构的输水距离的影响是先增大后减小。

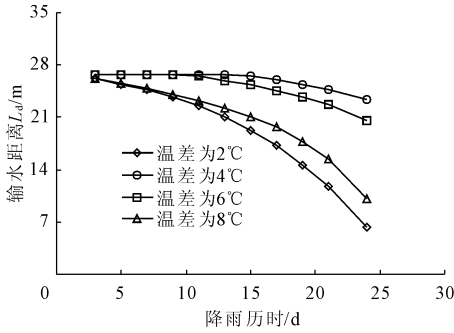


图 12 不同温差时输水距离 L_d 随降雨的变化曲线

3.3 短时强降雨下日均温度对 CCBE 防护结构输水距离的影响

假定在所计算的某天的降雨强度为 40.09 mm/d,该日大气的平均温度分别假定为 5℃、15℃、24.45℃和 35℃,此时的 分别算得为 15.12 MJ/(m²·d)、16.24 MJ/(m²·d)、16.75 MJ/(m²·d)和 18.50 MJ/(m²·d)。

当日均温度不同时,计算的输水距离随降雨历时的变化曲线见图 13。从图 13 中可以看出随着日均温度的升高,CCBE 防护系统在相同雨强的情况下,其输水距离是逐渐增加的。

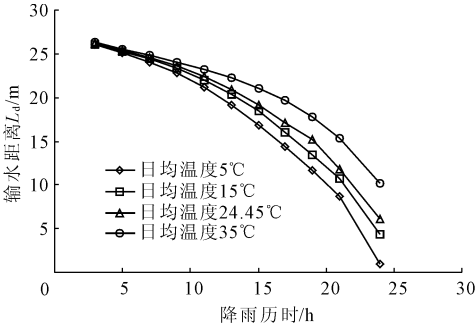


图 13 短时强降雨下不同日均温度时输水距离 L_d 随降雨历时的变化曲线

4 结 语

(1) 本文利用 VADOSE/W 软件,对土坡上保持坡土排蓄水平衡、防止坡土深度开裂的 CCBE 防护系统在大气温度变化下的输水距离进行分析,成果可以为 CCBE 防护结构的设计提供参考依据。

(2) 全年气候条件下,日均温差不同时,每日的地表净辐射量大小亦不同,地表的净辐射量越大,蒸发量将越大,从而影响坡土中的水热耦合过程,对 CCBE 防护结构的输水距离造成影响。

(3) 日均温差对输水距离的影响主要是通过影响地表净辐射量的大小,进而影响降雨时 CCBE 防护系统的雨水净入渗量和输水距离的大小。当日均温差不同时,CCBE 防护结构的输水距离是先增大后减少。在温差将近为 4℃,CCBE 防护结构的输水距离达到最大。

(4) 短时强降雨下,日均温度越高,CCBE 防护结构的输水距离越大,因此对于湿润地区的 CCBE 防护结构,在相同雨强情况下,其夏季的工作性能较冬季而言会更加安全,因此越能防护其下覆坡土免受干湿循环而开裂的影响。

参考文献:

[1] Stormont J C, Anderson C E. Capillary barrier effect from underlying coarser soil layer[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999,125(8):641-648.

[2] Khire M V, Benson C H, Bosscher P J. Capillary barriers: Design variables and water balance[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000,126(8):695-708.

[3] Stormont J C. The effectiveness of two capillary barriers on a 10% slope [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 1996,14(4):243-267.

[4] Li J H, Du L, Chen R, et al. Numerical investigation of the performance of covers with capillary barrier effects in South China[J]. Computers & Geotechnics, 2013,48(48):304-315.

[5] Aubertin M, Cifuentes E, Martin V, et al. An investigation of factors that influence the water diversion capacity of inclined covers with capillary barrier effects[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils / Unsaturated Soils 2006, 147. Geotechnical Special Publication ,2006:613-624.

[6] Tami D, Rahardjo H, Leong E C, et al. Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011,41(5):814-830.

[7] 黄月华,周 成,李红梅.降雨中有植被覆盖土坡大孔隙结构对边坡稳定性的影响[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):132-137.

[8] 吴庆华,张家发,崔皓东,等.细/粗粒二元结构边坡的排水防渗效果试验研究[J].岩土力学,2017,38(2):392-399.

[9] 黄月华,周 成,李红梅.膨胀土边坡中 CBS 防护系统的计算模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):82-87.

[10] Rahardjo H, Santoso V A, Leong E C, et al. Performance of an instrumented slope covered by a capillary barrier system[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011,138(4):481-490.