

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.135



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



中国西北地区生态型土质覆盖层厚度设计 简化方法

李光耀^{1,2,3}, 詹良通³, 焦卫国⁴, 冯嵩⁵, 陈云敏³

(1. 北京工业大学重庆研究院, 重庆 401151; 2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 3. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058; 4. 贵州理工学院土木工程学院, 贵阳 550003; 5. 福州大学土木工程学院, 福州 350108)

摘要:中国现行规范借鉴北美非湿润地区生态型土质覆盖层厚度设计方法,采用6个经验公式对西北地区生态型土质覆盖层的厚度进行设计,但该方法涉及的参数较多、计算过程繁琐,最重要的是忽略了中国西北地区季风气候与北美非湿润地区湿冷气候对覆盖层厚度的不同要求。为了解决该问题,基于中国西北地区典型的雨-热-植生同期、植被非生长期降水量不超过全年总降水量20%的气候特征,并考虑黄土、粉土田间持水量与植被枯萎点之比 $K \geq 1.44$ 的持水特点,提出适用于中国西北地区填埋场生态型土质覆盖层的厚度设计简化方法。利用 Vadose/W 数值程序分析了采用简化方法设计的单一黄土覆盖层和黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层在最大降水量年的水力响应规律。结果表明:毛细阻滞效应阻碍了水分由黄土层向碎石层的大量运移,致使毛细阻滞型覆盖层的防渗表现优于单一型覆盖层;两种覆盖层的防渗表现均随黄土 K 值的增加而提高,当 $K \geq 1.35$ 时,两种覆盖层均能满足当地的防渗要求,从而验证了所提简化方法的可靠性。

关键词:垃圾填埋场;生态型土质覆盖层;厚度设计;西北地区;季风气候

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2026)01-0024-12

Simplified method for thickness design of ecological soil covers in northwest China

LI Guangyao^{1,2,3}, ZHAN Liangtong³, JIAO Weiguo⁴, FENG Song⁵, CHEN Yunmin³

(1. Chongqing Research Institute, Beijing University of Technology, Chongqing 401151, P. R. China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China; 3. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058 P. R. China; 4. School of Civil Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, P. R. China; 5. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China)

Abstract: Currently, the thickness design method for ecological soil covers used in northwest China is based on

收稿日期:2023-08-02

基金项目:国家自然科学基金(42107186);重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-MSX0279)

作者简介:李光耀(1991-),男,博士,主要从事环境岩土工程研究,E-mail:geoguangyao@bjut.edu.cn.

詹良通(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zhanlt@zju.edu.cn.

Received: 2023-08-02

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 42107186); Natural Science Foundation of Chongqing (No. CSTB2023NSCQ-MSX0279)

Author brief: LI Guangyao (1991-), PhD, main research interest: geoenvironmental engineering, E-mail: geoguangyao@bjut.edu.cn.

ZHAN Liangtong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhanlt@zju.edu.cn.

the practice of non-humid regions in north America, which is complicated, involves various parameters, and fails to consider the different meteorological conditions between northwest China and north America. To solve this issue, on the basis of the monsoon climate of northwest China, the feature that the precipitation during the non-growing period of vegetation should not exceed 20% of the total annual precipitation, as well as the water retention characteristics of ideal cover soils that the ratio of the field capacity to the wilting point $K \geq 1.44$, the thickness design method for ecological soil covers used in northwest China is simplified. The numerical program Vadose/W is utilized to analyze the hydraulic responses of the loess monolithic cover and the loess-gravel capillary barrier cover designed with the proposed simplified method in the year of maximum precipitation. The results indicate that the capillary barrier effect significantly prevents the migration of water from the loess layer to the gravel layer, resulting in the capillary barrier cover having better anti-seepage performance than the monolithic cover. The anti-seepage performance of the two covers decreases with the decrease in the ratio of the field capacity to the wilting point of the loess (i.e., K). When $K \geq 1.35$, the two covers can meet the local anti-seepage requirements, thus preliminarily verifying the reliability of the proposed simplified method.

Keywords: landfill; ecological soil covers; thickness design; northwest China; monsoon climate

随着原生生活垃圾“零填埋”措施和垃圾焚烧技术的推广应用,越来越多的生活垃圾填埋场面临关停,封场覆盖需求紧迫。生态型土质覆盖层一般采用纯土料构建而成,基于水分在土料内“存储-释放”的动态循环过程实现防渗,利用土料的高饱和度实现闭气和促进植被生长。生态型土质覆盖层最常见的结构形式包括单一型覆盖层和毛细阻滞型覆盖层(图1)。与单一型覆盖层相比,毛细阻滞型覆盖层利用细-粗粒土层间的毛细阻滞效应将更多的水分存储于细粒土中,可显著提升覆盖层的防渗、闭气与植生功能。此外,学者们还提出在毛细阻滞型覆盖层中增设侧向导排层、低渗透层等功能层提高其服役性能^[1-2]。

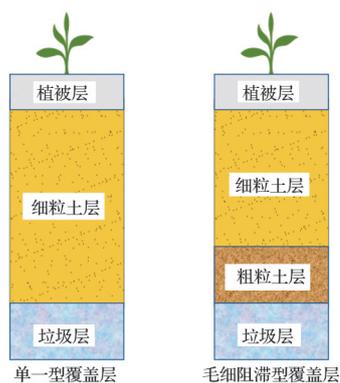


图 1 生态型土质覆盖层的常见结构形式

Fig. 1 Two representative configurations of ecological soil covers

生态型土质覆盖层已经在北美的非湿润地区取得了良好的防渗表现^[3-4]。近年来,生态型土质覆盖层在中国的应用表现及前景得到了广泛关注^[1-2,5-11]。张文杰^[9]分析了单一型覆盖层内部水分运移规律及其影响因素;李晓康等^[10]测试了毛细阻滞型覆盖层

储水能力并提出了击穿时间模型。相关研究成果为生态型土质覆盖层的应用提供了理论支撑与参考。根据课题组前期大量研究成果,詹良通等^[11]提出,图1所示的两种生态型土质覆盖层在中国西北地区填埋场封场治理中具有天然的适用性:一方面,中国西北地区位于干旱、半干旱地区,年均降雨量不超过 800 mm,并且具有雨-热-植生同期的气候特征,非常有利于覆盖层内水分的排出,降低了覆盖层在雨季发生渗漏的风险;另一方面,中国生活垃圾的产气速率在进行封场前(一般在 2 a 内)发生大幅衰减,有利于采用纯土质材料(不使用土工膜)实现封场闭气的目标。

细粒土层的厚度设计是保证生态型土质覆盖层服役性能的重要环节,而粗粒土层主要起到提供毛细阻滞效应的作用,厚度一般取 30 cm 即可满足要求^[12]。其他国家非湿润地区使用的生态型土质覆盖层厚度设计方法(即细粒土层厚度设计方法)基于覆盖层在北美气象条件下的水量平衡数据所提出。其中,Chen^[13]基于一系列数值模拟结果,提出了单一型覆盖层厚度设计经验公式。Benson^[14]根据覆盖层的有效储水能力能够容纳植被非生长期的全部降水量原则,提出了毛细阻滞型覆盖层的厚度设计公式。Albright 等^[15]基于覆盖层的有效储水能力等于当地一年内覆盖层的理论净存储水量原则,提出了同时适用于单一型覆盖层和毛细阻滞型覆盖层的厚度设计方法。由于这些方法的有效性在北美非湿润地区得到了广泛验证,因此常常被北美地区以外的国家所采纳。例如,Albright 等^[15]提出的方法被澳大利亚新南威尔士州的覆盖层设计规范所采纳^[16]。中国的研究人员则采用 Chen^[13]的经验公式进行西北地区生态型土质覆盖层厚度的研究

和设计^[17-18],但中国西北地区的季风气候(雨-热-植生同期)与北美非湿润地区的湿冷气候(雨-热-植生不同期)不同。因此,现行设计方法在中国西北地区的使用有待调整和优化。

笔者介绍了美国非湿润地区和中国西北地区常用的生态型土质覆盖层厚度设计方法,基于中国西北地区气候特征并结合理想覆盖土料的持水特点对相关方法进行简化。最后,使用 Vadose/W 数值程序对该简化方法的可靠性进行了分析。

1 生态型土质覆盖层水分存储模型

Benson^[14]和 Khire 等^[12]分别提出了单一型覆盖层和毛细阻滞型覆盖层的水分存储模型,用于指导生态型土质覆盖层的厚度设计。在上述模型中,覆盖层的储水能力包括总储水能力和有效储水能力两个概念。当覆盖层底部即将发生渗漏时,土体内存储的全部水量称为总储水能力 S_t ,其中能够被植被吸收的水量称为有效储水能力 S_a 。

对于单一型覆盖层,一般认为当土体的体积含水量超过田间持水量 θ_c 时(基质吸力约为 33 kPa 时的体积含水量),土中的水分可以在重力作用下发生自由下渗。因此,单一型覆盖层的总储水能力(图 2)可以通过对含水量沿土层厚度 L 方向进行积分得到,即

$$S_t = \int_0^L \theta_c dz = \theta_c L \quad (1)$$

式中: z 为细粒土层底面以上的高度。当土体的体积含水量低于植被枯萎点 θ_m (基质吸力约为 1 500 kPa 时的体积含水量)时,植被的根系无法从土中吸收水分。因此,覆盖层的有效储水能力可以表达为

$$S_a = \int_0^L (\theta_c - \theta_m) dz = (\theta_c - \theta_m)L \quad (2)$$

对于毛细阻滞型覆盖层,当细-粗粒土层界面处的基质吸力达到粗粒土的进水值时,水分可以突破细-粗粒土层界面,进而引发渗漏,通常认为此时细粒土层满足静态水力平衡状态,即

$$\varphi = \varphi_b + \gamma_w z \quad (3)$$

式中: φ 为细粒土的基质吸力; φ_b 为粗粒土的进水值,即土水特征曲线在高吸力段拐点处对应的基质吸力; γ_w 为水的重度。类似地,毛细阻滞型覆盖层的总储水能力和有效储水能力(图 2)可由式(4)、式(5)计算得到。

$$S_t = \int_0^L \theta \Big|_{\varphi=\gamma_w z + \varphi_b} dz \approx \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} L \quad (4)$$

$$S_a = \int_0^L \theta \Big|_{\varphi=\gamma_w z + \varphi_b} dz - \theta_m L \approx \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - \theta_m \right) L \quad (5)$$

式中: θ_1 和 θ_2 分别为细粒土层表面和底面的体积含水量; $\theta_1 = \theta(\varphi = \varphi_b + \gamma_w L)$, $\theta_2 = \theta(\varphi = \varphi_b)$ 。

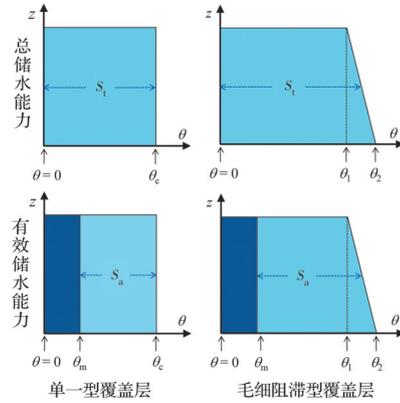


图 2 生态型土质覆盖层水分存储模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram water storage model for ecological soil covers

2 生态型土质覆盖层厚度设计方法

2.1 北美非湿润地区

Chen^[13]的方法适用于单一型覆盖层,首先需要找出覆盖层所在地区的历史记录中两个关键的年份——最大降水量年(即降雨量和降雪量之和)和最大降雪量年。然后,提取这两个年份的年降水总量 P_w 、 P_s 以及这两个年份植被非生长期的降水量 P_{wo} 、 P_{so} 。利用式(6)和式(7)所示 6 个经验公式计算出 6 个厚度值,取其中的最大值作为覆盖层设计厚度,见式(8)。

$$L_{w1} = F_{wt} \frac{P_w}{2S_t/L} \quad (6a)$$

$$L_{w2} = F_{wa} \frac{P_w}{2S_a/L} \quad (6b)$$

$$L_{w3} = F_{woa} \frac{P_{wo}}{2S_a/L} \quad (6c)$$

$$L_{s1} = F_{st} \frac{P_s}{2S_t/L} \quad (7a)$$

$$L_{s2} = F_{sa} \frac{P_s}{2S_a/L} \quad (7b)$$

$$L_{s3} = F_{soa} \frac{P_{so}}{2S_a/L} \quad (7c)$$

$$L_{\text{设计}} = \max[L_{w1}, L_{w2}, L_{w3}, L_{s1}, L_{s2}, L_{s3}] \quad (8)$$

式中: F_{wt} 、 F_{wa} 、 F_{woa} 、 F_{st} 、 F_{sa} 和 F_{soa} 的统一表达式如式(9)所示,其中, P_0 为目标年均渗漏量,当干湿指数不超过 0.5 时, $P_0 = 10$ mm; 当干湿指数超过 0.5 时, $P_0 = 30$ mm。 α 和 κ 为拟合参数(见表 1)。在使用式

(6)~式(9)进行计算时, F 、 α 和 κ 为无量纲参数,其他变量具有长度量纲,单位应保持一致,建议统一取为mm。

$$F = \frac{\alpha - \lg P_0}{\kappa} \quad (9)$$

表 1 α 和 κ 的取值^[14]

Table 1 Values of α and κ ^[14]

公式	α	κ
6a、7a	10.0	8.0
6b、7b	2.0	2.9
6c、7c	3.3	3.2

表 2 西安地区生态型土质覆盖层的设计厚度

Table 2 Designed thicknesses of ecological soil covers in Xi'an city

覆盖层类型	$L_{设计}/m$	L_{w1}/m	L_{w2}/m	L_{w3}/m	L_{s1}/m	L_{s2}/m	L_{s3}/m	来源
单一黄土覆盖层	1.45	1.45	0.38	0.21	<1.45	<0.38	<0.21	詹良通等 ^[17]
黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层	1.22	1.22	0.25	0.13	<1.22	<0.25	<0.13	焦卫国等 ^[18]

3 生态型土质覆盖层厚度设计简化方法

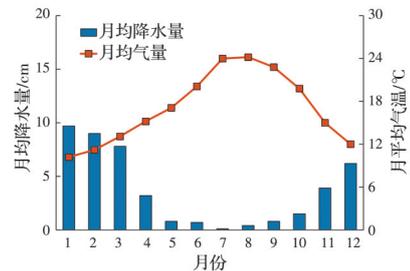
3.1 简化思路与过程

Chen^[13]的设计方法涉及的经验公式和参数较多、计算过程比较繁琐,特别是在计算毛细阻滞型覆盖层的设计厚度时,6个公式均需进行反复迭代计算,给设计人员造成极大不便。此外,中国学者在使用该方法时并没有考虑中国西北地区与北美非湿润地区在气候特征上的差异。北美非湿润地区降水量时空分布不均,大部分地区呈现出低温期降水量大的湿冷气候特征。图 3(a)展示了北美典型湿冷气候城市波莫纳在 1948—1998 年间月均降水量和月均气温的发展规律^[1]。可以看出,该地区呈现出明显的雨-热-植生不同期特征,在植被非生长期(11月至次年3月),降水量可占全年总降水量的 85% 以上。在植被非生长期期间,覆盖层的储水量容易超过其储水能力,因此,在设计北美非湿润地区覆盖层厚度时,除了考虑全年总降水量的影响(即式(6a)、(6b)、(7a)、(7b))外,还需将植被非生长期降水量作为决定性因素之一(即式(6c)、(7c))。相比之下,中国西北地区受季风影响呈现出典型雨-热-植生同期的特点,如图 3(b)所示中国陕西省渭南市 1981—2010 年间月均降水量和月均气温的发展规律(数据来自国家气象科学中心网站: <http://data.cma.cn/>)。詹良通等^[17]通过总结中国西北地区 1950—2000 年的气象数据发现,其植被非生长期的降水量不会超过全年降水总量的 20%,远低于北美非湿润地区。据此可以推测,植被非生长期的降水量不是中国西北地区覆盖层厚度设计的决定性因素。因此,在中国西北地区使用 Chen^[13]的经验公

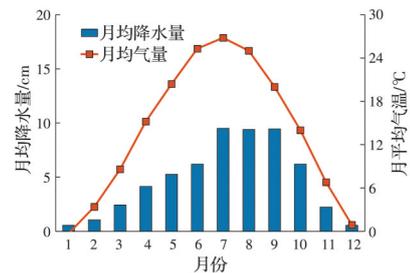
2.2 中国西北地区

詹良通等^[17]采用 Chen^[13]的经验公式计算得到了中国西北地区 3 个代表城市银川、兰州和西安单一黄土覆盖层的设计厚度(表 2 所示为西安地区的计算结果)。通过把式(6)、式(7)中单一型覆盖层的总储水能力和有效储水能力替换为毛细阻滞型覆盖层的总储水能力和有效储水能力,焦卫国等^[18]将 Chen^[13]的经验公式拓展到毛细阻滞型覆盖层的厚度设计,并计算得到了西安地区黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层的设计厚度(见表 2)。

式时,式(6c)和(7c)(计算的厚度均由植被非生长期的降水量决定)不予以考虑,从而使设计过程得到简化。此推测与表 2 所示的厚度计算结果亦相符(即表中 L_{w3} 和 L_{s3} 不是最大厚度)。



(a) 美国波莫纳市(雨热不同期)



(b) 中国渭南市(雨热同期)

图 3 美国非湿润地区和中国西北地区典型城市气候特征对比

Fig. 3 Comparison of climatic characteristics of typical cities in non-humid regions of the United States and northwest China

为了检验上述推测的正确性,根据式(6)绘制了 3 个厚度(L_{w1} , L_{w2} , L_{w3})随年降水量 P_w 的变化关系,如图 4 所示。其中假定植被非生长期的降水量占年降水量的 20%(即 $P_{w0}=0.2P_w$),并假定该地区

的目标年均渗漏量 $P_0=10$ mm。可以看出,3个厚度均随着 P_w 的增加而线性增加,3条直线的斜率分别为 $0.56/\theta_p$ 、 $0.17/(\theta_p-\theta_m)$ 和 $0.07/(\theta_p-\theta_m)$ 。其中, θ_p 是覆盖层底部发生渗漏时细粒土层的平均含水量;对于单一型覆盖层, $\theta_p=\theta_c$;对于毛细阻滞型覆盖层, $\theta_p=(\theta_1+\theta_2)/2$ 。根据斜率可知,同一地区的 L_{w3} 始终小于 L_{w2} 。类似地,绘制了目标年均渗漏量 $P_0=30$ mm 的地区3个厚度随年降水量的变化关系,如图 4(b)所示。结果表明,该条件下的 L_{w3} 仍然始终小于 L_{w2} ,因此, L_{w3} 不会成为最终的设计厚度。

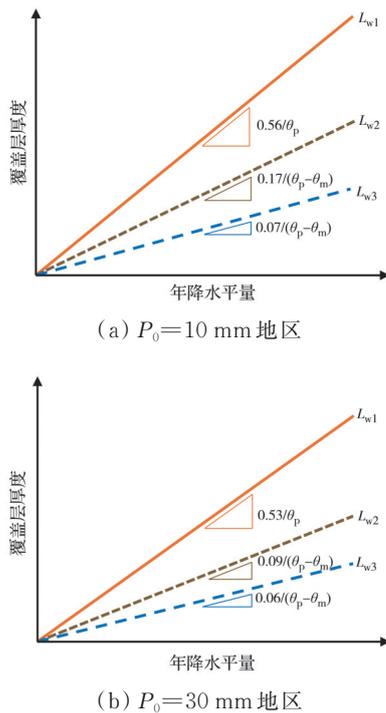


图 4 式(6)中覆盖层厚度随年降水量的变化关系
Fig. 4 Variation of cover thickness with annual precipitation obtained by formulas (6)

通过对比 L_{w1} 和 L_{w2} 的斜率可知,对于 $P_0=10$ mm 的地区,当 $0.56/\theta_p \geq 0.17/(\theta_p - \theta_m)$, 即 $\theta_p \geq 1.44\theta_m$ 时, $L_{w1} \geq L_{w2}$, 否则 $L_{w1} < L_{w2}$ 。类似地,对于 $P_0=30$ mm 的地区,当 $\theta_p \geq 1.20\theta_m$ 时, L_{w1} 最大, 否则 L_{w2} 最大。可以看出,对于式(8)中的最大厚度值由哪个厚度提供,除了与气候特征有关之外,还与覆盖层细粒土的持水特点有关。为此,深入了解中国西北地区覆盖层细粒土的持水特点将有望实现对 Chen^[13] 经验公式的进一步简化。式(7)中3个厚度随年降水量的变化关系(斜率)与式(6)相同,在此不再赘述。

为了保证生态型土质覆盖层的防渗闭气性能,要求细粒土料具有良好的储水性和较低的渗透性,理想的土料是粉土^[11]。此外,由于中国西北地区广泛分布着大量黄土,因此,采用黄土构建生态型土质覆盖层具有很好的应用前景,相关研究已经初步

验证了中国西北地区黄土用作覆盖层细粒土料的可行性^[19-23]。图5总结了文献中中国粉土和黄土的植被枯萎点和田间持水量的大小关系^[19,24-51]。可以看出,中国粉土和黄土的田间持水量均大于植被枯萎点的1.44倍。当使用这些土料构建单一型覆盖层和毛细阻滞型覆盖层时,均满足 $\theta_p \geq 1.44\theta_m$ 的条件,更加满足 $\theta_p \geq 1.20\theta_m$ 的条件。综上可知,在中国西北地区气候特征和理想土料下,利用 Chen^[13] 的6个经验公式计算得到的厚度最大值产生在式(6a)或式(7a)对应的厚度之中(L_{w1} 或 L_{s1})。考虑到式(6a)和式(7a)中除了降水量不同,其他参数均相同,因此,中国非湿润地区生态型土质覆盖层的厚度可以统一用式(10)进行简化设计,该公式同时适用于单一型覆盖层和毛细阻滞型覆盖层。

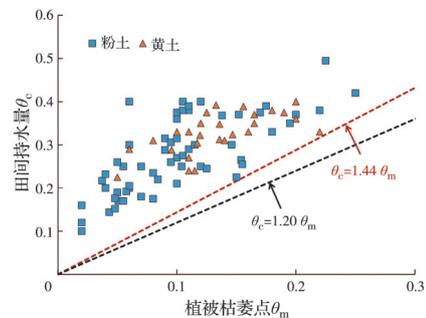


图 5 中国粉土和黄土的植被枯萎点和田间持水量汇总^[19,24-51]
Fig. 5 Collection of wilting point and field capacity of silt and loess in China^[19,24-51]

$$L = F \frac{P_{\max}}{2S_t/L} \quad (10)$$

式中: P_{\max} 为所在地区历史纪录的最大年降水量; F 对应式(6a)中的 F_{wt} 或式(7a)中的 F_{st} ($F_{wt}=F_{st}$); S_t 为覆盖层的总储水能力。将 F 、 S_t 的表达式代入式(10),可分别得到单一型覆盖层和毛细阻滞型覆盖层设计厚度计算式,即

$$L_{\text{单一}} = \frac{10 - \lg P_0}{8} \cdot \frac{P_{\max}}{2\theta_c} \quad (11)$$

$$L_{\text{毛细}} = \frac{10 - \lg P_0}{8} \cdot \frac{P_{\max}}{\theta_1 + \theta_2} \quad (12)$$

式(11)、式(12)中的 θ_c 、 θ_1 和 θ_2 为无量纲变量。式(12)中的 θ_1 与细粒土层的厚度有关,因此需进行迭代求解。

3.2 简化方法的使用流程

图6展示了提出的生态型土质覆盖层厚度设计简化方法的使用流程。首先,根据当地的干湿指数确定防渗标准。然后,获取当地历史纪录的最湿润年的总降水量。接下来,选择所采用的覆盖层类型及土料,并测试得到土料的特征含水量。对于单一型覆盖层,需获得细粒土的田间持水量 θ_c ;对于毛细

阻滞型覆盖层,需获得细粒土的 θ_1 和 θ_2 。最后,根据覆盖层的类型,基于前面所获得的数据,选择对应的简化公式进行厚度设计。

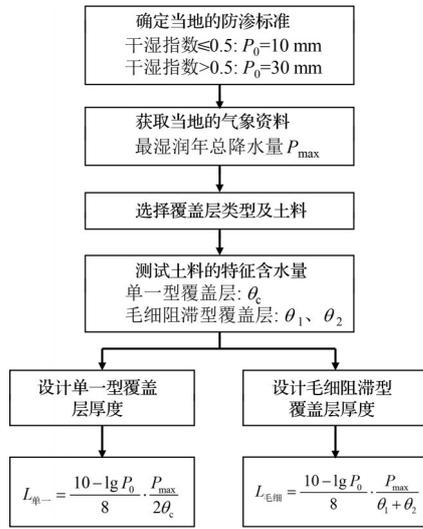


图 6 提出的简化方法的使用流程

Fig. 6 Application procedure of the proposed simplified method

4 简化方法的应用算例及可靠性分析

4.1 简化方法的应用算例

采用提出的简化方法,对西安地区填埋场进行单一黄土覆盖层和黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层的厚度设计。当地的干湿指数大于 0.5,因此,允许的年均渗漏量 $P_0=30\text{ mm}$ 。根据当地历史纪录的气象数据,确定最湿润年为 1983 年,该年的总降水量为 903 mm。采用当地的黏性黄土,根据前人的实测数据,利用经典的 vG 模型对其土水特征曲线和渗透系数曲线进行拟合^[19],如图 7 所示。实际拟合得到的残余含水量 $\theta_r=0.1$,图 7 中其他 θ_r 值的土水特征曲线为后续数值分析需要。由图 7 可知, $\varphi_b=0.50\text{ kPa}$ 、 $\theta_c=0.32$ 、 $\theta_2=\theta|_{\varphi=\varphi_b}=0.38$ 。

根据式(11)计算得到单一黄土覆盖层的设计厚度为

$$L_{\text{单一}} = \frac{10 - \lg 30}{8} \cdot \frac{903}{2 \times 0.32} \approx 1500\text{ mm}$$

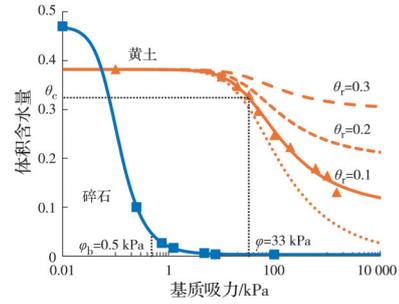
对于黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层,黄土层设计厚度的计算过程为

1) 假设 $\theta_1=\theta_2$,按照式(12),第 1 次计算黄土层的厚度。

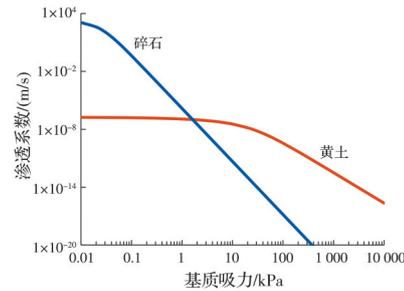
$$L_{\text{毛细}} = \frac{10 - \lg 30}{8} \times \frac{903}{0.38 + 0.38} \approx 1266\text{ mm}$$

2) 利用上一步得到的 $L_{\text{毛细}}$ 值,按照 $\theta_1=\theta|_{\varphi=\varphi_b+L_{\text{毛细}}/100}$ 重新计算 θ_1 ,即

$$\theta_1 = \theta|_{\varphi=0.50+1266/100} = \theta|_{\varphi=13\text{ kPa}} = 0.36$$



(a) 土水特征曲线



(b) 渗透系数曲线

图 7 黄土、碎石的持水、导水特性

Fig. 7 Water retention and conduction characteristics of loess and gravel

3) 利用上一步得到的 θ_1 ,再次按照式(12)计算黄土层的厚度。

$$L_{\text{毛细}} = \frac{10 - \lg 30}{8} \times \frac{903}{0.36 + 0.38} \approx 1300\text{ mm}$$

4) 重复第 2)~3)步,直至计算得到的 $L_{\text{毛细}}$ 值不再明显提高,此时的 $L_{\text{毛细}}$ 值便作为黄土层的设计厚度。最终经过计算可得 $L_{\text{毛细}}=1.30\text{ m}$ 。

4.2 简化方法的可靠性分析

对于按照简化方法设计的单一黄土覆盖层(1.50 m 厚)和黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层(1.30 m 厚黄土+0.30 m 厚碎石),分别利用非饱和渗流分析程序 Vadose/W 建立一维数值模型,探究两种覆盖层在最大降水量年的防渗表现,并分析黄土的持水特点对覆盖层防渗表现的影响。

模型上边界为考虑气候与植被耦合作用的气象边界,气候数据包括降水量(图 8)、温度、风速和相对湿度,植被参数包括根系深度、叶面积指数和吸水限制函数,详细数据参照 Zhan 等^[20]。下边界为自由出流边界。模型网格间距为 0.001 m。分别设置黄土的残余含水量 $\theta_r=0, 0.1, 0.2$ 和 0.3 四种工况(图 7),以调查不同工况下覆盖层的防渗表现。尽管这样的残余含水量并不一定存在于真实黄土中,但这种参数设置可以使黄土具有不同的持水特点,从而为定量分析黄土持水特点与覆盖层防渗性的内在联系提供可能。对于具有不同黄土 θ_r 值的工况,黄土、碎石的其他持水、导水参数保持不变。

覆盖层的初始条件为均一基质吸力剖面,基质吸力大小设为土体的植被枯萎点,即 1 500 kPa。

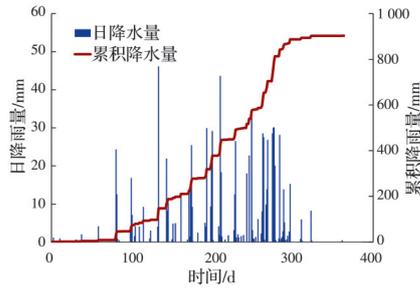
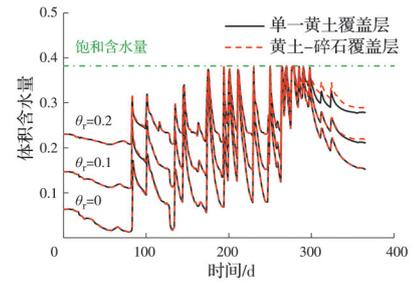


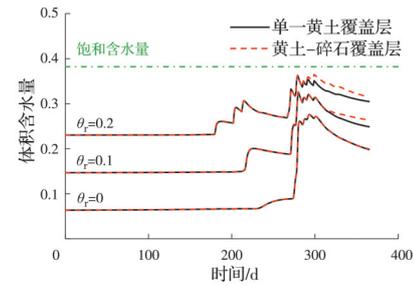
图 8 最大降水量年(1983年)的日降水量和累积降水量
Fig. 8 Daily precipitation and cumulative precipitation in the wettest year (1983)

图 9 为利用不同黄土 θ_r 计算得到单一黄土覆盖层和黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层在 0.10、0.65、1.30、1.50 m 深度处的体积含水量随时间的变化情况。对于单一黄土覆盖层,其表层含水量随着气象条件的改变而剧烈变化。以 $\theta_r=0$ 为例,0.1 m 深度处的含水量在 0~0.38(即饱和含水量)之间波动。随着深度的增加,含水量对气象条件的响应变得越来越不敏感。对于 $\theta_r=0$ 的情况,当深度增加至 0.65 m 时,含水量在 0.06~0.28 之间波动,而当深度增加至 1.50 m 时,含水量随时间基本保持不变。另一方面,随着 θ_r 的增加,覆盖层同一深度处含水量对气象条件的响应更加迅速,如图 9(b)~(d) 所示。说明相同降雨条件下水分的入渗深度随着 θ_r 的增加而提高,这是由于拥有较大 θ_r 的黄土初始含水量较高,所以其对应的渗透系数更大,更易引发覆盖层深部含水量的大幅提高。如图 9(d) 所示,在第 300 天时, $\theta_r=0$ 的单一黄土覆盖层底部含水量维持在 0.07 左右,而 $\theta_r=0.2$ 的单一黄土覆盖层底部(即 1.50 m 深度)含水量提高至 0.34。此外,由于相同基质吸力下较大 θ_r 的黄土含水量较高(图 7(a)),其对应覆盖层的有效储水能力则较小,意味着其能够容纳的雨水更少,因此不利于覆盖层防渗。

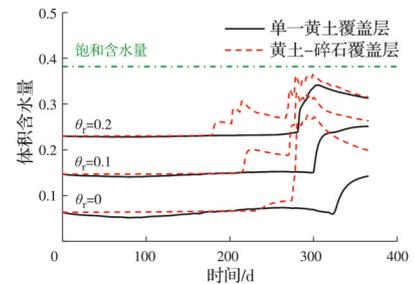
对于黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层,当水分入渗到黄土层底部前(约第 200 天前,如图 9(c) 所示),其黄土层的水力响应规律与单一黄土覆盖层无明显差异。当水分入渗到黄土层底部时,由于毛细阻滞效应提供的阻滞作用导致了水力响应规律的改变。图 9(c) 表明毛细阻滞效应导致 1.30 m 深度处(黄土层底部)的含水量相比单一黄土覆盖层显著提高。随着深度的减小,含水量受毛细阻滞效应的影响也逐渐降低,因此,黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层和单一黄土覆盖层含水量之间的差别也逐渐减小,如图



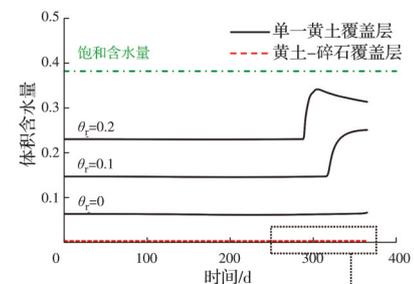
(a) 深度为 0.10 m



(b) 深度为 0.65 m



(c) 深度为 1.30 m



(d) 深度为 1.50 m

图 9 生态型土质覆盖层不同深度含水量随时间的变化
Fig. 9 Variations of volumetric water content at different depths with time for ecological soil covers

9(a)、(b) 所示。尽管黄土层底部含水量出现明显提升,但碎石层含水量却始终维持在非常低的水平(0.003 0~0.003 1),如图 9(d) 所示。说明水分没有向碎石层中发生大量运移。图 10 为两个覆盖层 1.50 m 深度处的渗透系数随时间的变化情况。可以看出,碎石层的低含水量导致其渗透系数不会发

生明显提高,对覆盖层的底部防渗起到有利作用。相比而言,单一黄土覆盖层相同深度处的渗透系数则可能出现大幅提高(如 $\theta_r=0.2$ 时),继而提高底部发生渗漏的可能性。上述结果解释了在防渗方面黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层比单一黄土覆盖层更具优势的内在原因。除此之外, θ_r 的改变对黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层的影响与单一黄土覆盖层类似: θ_r 的提高一方面提高了水分的入渗深度,另一方面降低了覆盖层的有效储水能力。

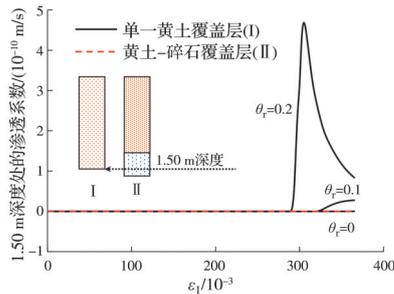
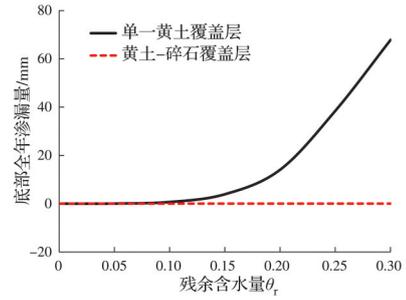


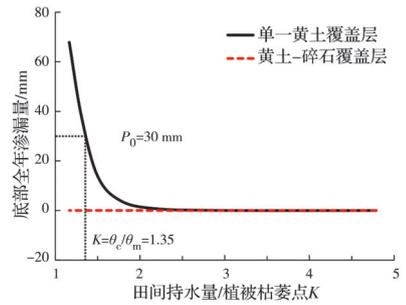
图 10 生态型土层覆盖 1.50 m 深度处渗透系数随时间的变化

Fig. 10 Variations of hydraulic conductivity at 1.50 m depth with time for ecological soil covers

图 11(a)为单一黄土覆盖层和黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层底部全年累积渗漏量随黄土残余含水量 θ_r 的变化情况。对于单一黄土覆盖层,底部渗漏量随着 θ_r 的增加呈逐渐增加的趋势。当采用黄土的实际参数($\theta_r=0.10$)计算时,全年累积渗漏量仅为 0.68 mm,远低于当地的防渗目标(30 mm)。对于黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层,在调查的 θ_r 范围内均未出现明显的底部渗漏,与前面得到的含水量与渗透系数变化规律相符。同时,该结果也直观说明了毛细阻滞型覆盖层的防渗表现优于单一型覆盖层。针对拥有不同 θ_r 的黄土,根据其土水特征曲线可以得到相应田间持水量与植被枯萎点的比值 $K(K=\theta_c/\theta_m)$,结果表明, θ_r 越小则 K 越大。综上可知,较大 K 值更有利于覆盖层防渗,与图 11(b)中所示单一黄土覆盖层底部渗漏量随着 K 的增加而降低的规律一致。由图 11(b)可知,当 $K \geq 1.35$ 时,单一黄土覆盖层和黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层均可满足当地的防渗目标。考虑到中国粉土、黄土的持水特性满足 $K \geq 1.44$ 的条件,在西安地区使用中国粉土、黄土进行建造并按照简化方法设计的单一型覆盖层和毛细阻滞型覆盖层均可满足防渗要求,且留有一定的安全储备余量。上述结果初步验证了提出的简化方法的可靠性,后续可靠性研究应进一步考虑不同地区、不同土料等条件。



(a) 底部渗漏量随 θ_r 的变化情况



(b) 底部渗漏量随 θ_c/θ_m 的变化情况

图 11 细粒土持水参数对生态型土质覆盖层底部全年渗漏量的影响

Fig. 11 Effect of water retention parameters of fine-grained soil on annual deep percolation at the bottom of ecological soil covers

5 结论

1) 中国西北地区植被非生长期的降水量一般不会超过全年降水总量的 20%, 远低于北美非湿润地区(可高达 85% 以上)。因此, 植被非生长期的降水量不是中国西北地区覆盖层厚度设计的决定性因素。

2) 基于中国气候特征并结合中国粉土、黄土的持水特点(田间持水量与植被枯萎点之比 $K \geq 1.44$), 提出将 Chen^[13]方法中的 6 个经验公式简化为 1 个, 用于中国西北地区生态型土质覆盖层的厚度设计。

3) 采用提出的简化方法计算得到中国西安地区单一黏性黄土覆盖层的设计厚度为 1.50 m, 黏性黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层中黄土层的设计厚度为 1.30 m。

4) 毛细阻滞效应阻碍了水分由黄土层向碎石层的大量运移, 使得毛细阻滞型覆盖层的防渗表现优于单一型覆盖层。

5) 黄土残余含水量 θ_r 的增加(或田间持水量与植被枯萎点之比 K 的减小)会降低覆盖层的防渗表现。当 $K \geq 1.35$ 时, 采用该方法计算得到的单一黄土覆盖层和黄土-碎石毛细阻滞型覆盖层均可满足西安地区的防渗目标。

参考文献

- [1] ALBRIGHT W H, GEE G W, WILSON G V, et al. Alternative cover assessment project phase I report: DRI-41183 [R]. Desert Research Institute, Reno, NV, 2002.
- [2] 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): 04014101.
- [3] NG C W W, CHEN R, COO J L, et al. A novel vegetated three-layer landfill cover system using recycled construction wastes without geomembrane [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(12): 1863-1875.
- [4] 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 L H, ZHAN L T, CHEN Y M, et al. Model tests on capillary-barrier cover with unsaturated drainage layer [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(1): 75-80. (in Chinese)
- [5] CHEN R, HUANG J W, LEUNG A K, et al. Experimental investigation on water release and gas emission of evapotranspirative capillary barrier landfill covers [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(2): 311-323.
- [6] 焦卫国, 虞斌, 张松, 等. 西北非湿润区毛细阻滞覆盖层防渗性能验证与长期服役高危易渗气象段分析[J]. *岩土力学*, 2023, 44(增刊1): 539-547.
- JIAO W G, TUO B, ZHANG S, et al. Anti-seepage performance verification and analysis of high-risk permeable meteorological period of capillary barrier cover in Northwest non humid area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(Sup 1): 539-547. (in Chinese)
- [7] 闵明, 蒲河夫, 田明阳, 等. 固废再利用的填埋场土质覆盖系统防渗与隔氧性能[J]. *土木工程与管理学报*, 2023, 40(2): 99-107.
- MIN M, PU H F, TIAN M Y, et al. The anti-seepage and oxygen barrier performance of a landfill soil cover system using recycled waste [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2023, 40(2): 99-107. (in Chinese)
- [8] 李明玉, 孙文静. 生物炭改性填埋场覆盖层土的渗气特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(增刊2): 3543-3550.
- LI M Y, SUN W J. Study on gas permeability characteristics of overburden soil in biochar modified landfill site [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(Sup 2): 3543-3550. (in Chinese)
- [9] 张文杰. 填埋场腾发封顶系统中的水分运移分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增刊2): 3367-3373.
- ZHANG W J. Analysis of moisture transport in an evapotranspiration cover [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Sup 2): 3367-3373. (in Chinese)
- [10] 李晓康, 李旭, 王菲, 等. 毛细阻滞覆盖层储水能力和击穿时间试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(7): 1501-1511.
- LI X K, LI X, WANG F, et al. Experimental study on water storage capacity and breakthrough time of capillary barrier cover [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1501-1511. (in Chinese)
- [11] 詹良通, 冯嵩, 李光耀, 等. 生态型土质覆盖层工作原理及其在垃圾填埋场封场治理中的应用[J]. *环境卫生工程*, 2022, 30(4): 1-20.
- ZHAN L T, FENG S, LI G Y, et al. Working principle of ecological soil covers and its application in landfill sealing treatment [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2022, 30(4): 1-20. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] CHEN C. Meteorological conditions for design of monolithic alternative earthen covers (AEFCs) [D]. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA, 1999.
- [14] BENSON C H. Final covers for waste containment systems: A north American perspective [C]//Proc. XVII Conference of Geotechnics of Torino, Control and Management of Subsoil Pollutants, Italian Geotechnical Society, Torino, Italy, 1999: 1-32.
- [15] ALBRIGHT W H, BENSON C H, WAUGH W J. Water Balance Covers for Waste Containment [M]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [16] NSW EPA. Drafts Environmental Guidelines-Solid Waste Landfills [S]. NSW EPA, 2015.
- [17] 詹良通, 焦卫国, 孔令刚, 等. 黄土作为西北地区填埋场覆盖层的可行性及设计厚度分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3361-3369.
- ZHAN L T, JIAO W G, KONG L G, et al. Feasibility analysis of using loess as soil cover material for landfills in Northwest China and its analysis of design thickness [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3361-3369. (in Chinese)
- [18] 焦卫国, 詹良通, 兰吉武, 等. 黄土-碎石覆盖层毛细阻滞效应及设计厚度分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(11): 2128-2134.
- JIAO W G, ZHAN L T, LAN J W, et al. Analysis of

- capillary barrier effect and design thickness with loess-gravel cover [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2016, 50(11): 2128-2134. (in Chinese)
- [19] 焦卫国. 西北黄土/碎石覆盖层水分存储—释放机理及防渗设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- JIAO W G. Moisture storage-release mechanism and seepage control design method of loess/gravel overburden in northwest China [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [20] ZHAN L T, LI G Y, JIAO W G, et al. Performance of a compacted loess/gravel cover as a capillary barrier and landfill gas emissions controller in Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137195.
- [21] 邱清文. 黄土/碎石覆盖层水气耦合运移规律及填埋气减排性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- QIU Q W. Water-gas coupling migration law and landfill gas emission reduction performance of loess/gravel overburden [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [22] 吴涛. 毛细阻滞型覆盖层水气热耦合运移机理及甲烷减排性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- WU T. Water-gas-heat coupling transport mechanism and methane emission reduction performance of capillary blocking overburden [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [23] 李光耀. 毛细阻滞型覆盖层微观-宏观水气传导特性及服役性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- LI G Y. Micro-macro water vapor conductivity and service performance of capillary retardation coating [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [24] ZHAN L T, LI G Y, JIAO W G, et al. Field measurements of water storage capacity in a loess-gravel capillary barrier cover using rainfall simulation tests [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(11): 1523-1536.
- [25] NG C W W, ZHOU C. Cyclic behaviour of an unsaturated silt at various suctions and temperatures [J]. *Géotechnique*, 2014, 64(9): 709-720.
- [26] 张自军, 冯绍元, 唐泽军, 等. 北京顺义地区典型农田土壤水分特征曲线测定与分析[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1): 1-4, 26.
- ZHANG Z J, FENG S Y, TANG Z J, et al. Discussion on the soil water characteristic curve of the agricultural soil in Shunyi, Beijing [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1): 1-4, 26. (in Chinese)
- [27] 丁庆忠, 许模, 段永祥, 等. 成都平原粉土和粉砂土的土水特征曲线研究[J]. *人民珠江*, 2016, 37(3): 29-31.
- DING Q Z, XU M, DUAN Y X, et al. Characteristics research on SWCC of silt and silty sand in the Chengdu plain [J]. *Pearl River*, 2016, 37(3): 29-31. (in Chinese)
- [28] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 非饱和土体变试验研究及其在地面沉降中的应用[J]. *防灾减灾工程学报*, 2007, 27(3): 307-311.
- WANG D L, LUAN M T, YANG Q. Experimental study on volume change of unsaturated soils and its application to estimation of subsidence [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(3): 307-311. (in Chinese)
- [29] 陈嘉伟, 李泽, 韩哲, 等. 初始孔隙比对高吸力下非饱和土土水特性的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 47-54.
- CHEN J W, LI Z, HAN Z, et al. Effect of initial void ratio on the soil water characteristics of unsaturated soil at high suctions [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 47-54. (in Chinese)
- [30] 王成文, 薛忠歧, 李英, 等. 非饱和扰动粉砂质黏土的土水特征曲线特征研究[J]. *能源环境保护*, 2020, 34(6): 35-39.
- WANG C W, XUE Z Q, LI Y, et al. Study on characteristics of soil-water characteristic curve of unsaturated disturbed silty clay [J]. *Energy Environmental Protection*, 2020, 34(6): 35-39. (in Chinese)
- [31] 张杰, 刘忠玉, 张俊然. 非饱和豫东粉土水力~力学特性试验研究[J]. *公路*, 2021, 66(1): 292-296.
- ZHANG J, LIU Z Y, ZHANG J R. Experimental study on hydraulic-mechanical characteristics of unsaturated silt in eastern Henan Province [J]. *Highway*, 2021, 66(1): 292-296. (in Chinese)
- [32] 谈云志, 胡新江, 喻波, 等. 粉土持水性能的温度效应研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊1): 121-126, 140.
- TAN Y Z, HU X J, YU B, et al. The water holding capacity of silt under temperature effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup 1): 121-126, 140. (in Chinese)
- [33] 王桂尧, 李斌, 罗军, 等. 粉土基质吸力的新型量测装置与土水特征研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3678-3682.
- WANG G Y, LI B, LUO J, et al. Study of soil-water characteristics and matric suction measurement device for unsaturated silty soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3678-3682. (in Chinese)
- [34] 李云丽, 卜书文, 李婕, 等. 干密度对非饱和压实黄土状粉土土水特征曲线的影响[J]. *科技通报*, 2021, 37(4): 94-98.
- LI Y L, BU S W, LI J, et al. Effect of dry density on water characteristic curve of unsaturated compacted loess

- silt [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2021, 37(4): 94-98. (in Chinese)
- [35] 伊盼盼, 牛圣宽, 韦昌富, 等. 基于动态多步流动法的非饱和土水力特性测试研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1797-1801.
YI P P, NIU S K, WEI C F, et al. Dynamic multi-step outflow method for tests on hydraulic properties of unsaturated soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1797-1801. (in Chinese)
- [36] 刘浚基, 温树杰. 干密度和粒径对非饱和尾矿砂土水特征曲线的影响[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(5): 1437-1443.
LIU J J, WEN S J. Effect of dry density and particle size on soil-water characteristic curve of unsaturated tailing sand [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(5): 1437-1443. (in Chinese)
- [37] 何国顺, 刘飞, 程阳, 等. 降雨条件下不同细粒含量粉砂土边坡稳定性研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2020, 18(3): 36-41.
HE G S, LIU F, CHENG Y, et al. Study on stability of silty sand slope with different fine grain content under rainfall condition [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2020, 18(3): 36-41. (in Chinese)
- [38] 周洪文, 仇在林. 考虑干密度与含水率的压实粉土持水性能研究[J]. *路基工程*, 2016(1): 92-95.
ZHOU H W, QIU Z L. Research on water holding capacity of compacted silt with dry density and water content [J]. *Subgrade Engineering*, 2016(1): 92-95. (in Chinese)
- [39] 曾立峰, 邵龙潭, 牛庚, 等. 考虑孔隙水微观赋存形态的非饱和粉土有效应力方程及其验证[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 37-46.
ZENG L F, SHAO L T, NIU G, et al. An effective stress equation for unsaturated silt considering the microstructure of pore water and its verification [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 37-46. (in Chinese)
- [40] 张玉伟, 宋战平, 谢永利. 孔隙变化条件下黄土土水特征曲线预测模型[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(11): 2017-2025.
ZHANG Y W, SONG Z P, XIE Y L. Prediction model of loess soil-water characteristic curve under pore change [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(11): 2017-2025. (in Chinese)
- [41] 李燕, 李同录, 李萍, 等. 全吸力范围非饱和持水函数和渗透性函数的预测模型[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(1): 285-294.
LI Y, LI T L, LI P, et al. Prediction model for unsaturated water retention and permeability function in the full suction range [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(1): 285-294. (in Chinese)
- [42] 马田田, 韦昌富, 魏厚振, 等. 不同水力路径下非饱和粉质土的破坏与变形特性[J]. *山地学报*, 2013, 31(1): 108-113.
MA T T, WEI C F, WEI H Z, et al. Characteristics of failure and deformation of an unsaturated silty soil experiencing various hydraulic histories [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(1): 108-113. (in Chinese)
- [43] 李幻, 谭晔, 梁文鹏, 等. 粉土土水特征曲线影响因素试验及模型验证[J]. *人民长江*, 2018, 49(14): 110-114.
LI H, TAN Y, LIANG W P, et al. Analysis on influential factors of soil-water characteristic curve of silt and model verification [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(14): 110-114. (in Chinese)
- [44] 郑支武. 非饱和黄土土水特征曲线理论预测与试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
ZHENG Z W. Theoretical prediction and experimental study on soil-water characteristic curve of unsaturated loess [D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese)
- [45] 郑显春, 吴宝, 孙思忠. 张家口地区非饱和土土水特性曲线的影响因素研究[J]. *河北建筑工程学院学报*, 2015, 33(4): 5-9.
ZHENG X C, WU B, SUN S Z. Research on the influence factors of unsaturated soil soil-water characteristic curve in Zhangjiakou area [J]. *Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering*, 2015, 33(4): 5-9. (in Chinese)
- [46] 纪翔鹏, 侯晓坤. Q_3 黄土结构密实度对土水特征曲线的影响分析[J]. *甘肃科学学报*, 2021, 33(3): 136-141.
JI X P, HOU X K. The effect of degree of density on the soil water characteristic curve of Q_3 loess [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2021, 33(3): 136-141. (in Chinese)
- [47] 蔡国庆, 韩博文, 杨雨, 等. 砂质黄土土水特征曲线的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊1): 11-15.
CAI G Q, HAN B W, YANG Y, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve of sandy loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(Sup 1): 11-15. (in Chinese)
- [48] 潘登丽, 倪万魁, 苑康泽, 等. 洛川原状黄土的孔隙结构对土水特征曲线的影响[J]. *甘肃科学学报*, 2020, 32(2): 110-116.
PAN D L, NI W K, YUAN K Z, et al. Effect of pore structure of original loess in Luochuan on soil-water characteristic curve [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2020, 32(2): 110-116. (in Chinese)

- [49] 郭鸿, 陈茜, 陈栋梁, 等. 原状黄土土水特征曲线拟合方法研究[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 92-95.
GUO H, CHEN X, CHEN D L, et al. Study on soil-water characteristics curve fitting for undisturbed loess soil [J]. Yangtze River, 2016, 47(19): 92-95. (in Chinese)
- [50] 侯晓坤, 李同录, 谢萧, 等. 甘肃 Q_3 原状黄土的微观结构对其土水特征曲线的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1307-1314.
HOU X K, LI T L, XIE X, et al. Effect of undisturbed Q_3 loess's microstructure on its SWCC [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1307-1314. (in Chinese)
- [51] 宋陈雨, 霍继炜, 高宇甲, 等. 三门峡黄土结构性对土水特征曲线的影响[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 245-248.
SONG C Y, HUO J W, GAO Y J, et al. Influence of loess structure in Sanmenxia on soil-water characteristic curve [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5): 245-248. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)