

含砂量对黄原胶复合黏性土抗裂和抗冲刷性能的影响

马晓凡,张晨阳,刘瑾,黄兰华,卜凡,戴承江

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:为增强黏性土的抗裂和抗冲刷性能,对掺加不同含量砂土的黄原胶复合黏性土开展了一系列室内蒸发、干缩开裂和抗冲刷试验,通过测算试样含水率和土体抗冲刷系数,结合图形分析软件定量分析了土体表层裂隙的发育情况,以研究复合黏性土体内部水分变化规律及其抗裂和抗冲刷性能。结果表明:随着黏性土中砂土颗粒的掺入,试样的裂隙率、裂隙宽度和受冲刷破坏程度呈现先增大后减小的趋势;当含砂量为 30% 时,素土及黄原胶复合试样的裂隙率、裂隙宽度和受冲刷破坏程度均为各含砂量下的最大值;当含砂量为 50% 左右时,对于黄原胶复合黏性土,黄原胶胶体与砂土颗粒形成具有一定强度的稳定结构,其抗冲刷性能得到显著提高。

关键词:含砂量;黄原胶;黏性土;裂隙发育;抗冲刷试验

中图分类号:TU411.91 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0059-08

Effect of sand content on anti-crack and anti-scour property of xanthan gum composite silty clay//MA Xiaofan, ZHANG Chenyang, LIU Jin, HUANG Lanhua, BU Fan, DAI Chengjiang(*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: In order to enhance the anti-crack and anti-scour property of cohesive clay, a series of evaporation, dry shrinkage cracking and anti-scour tests were carried out on xanthan gum composite cohesive clay mixed with sand of different contents. By measuring the moisture content of the sample and anti-scour coefficient of the soil, and quantitatively analyzing the development of surface crack of the soil with graphic analysis software, the internal water change law, anti-crack and anti-scour performance of the composite cohesive soil were studied. The results show that, with the addition of sand particles, the crack rate, crack width and scour damage degree of cohesive clay samples increase first and then decrease. When the sand content is 30%, the crack rate, crack width and scour damage degree of cohesive clay samples with or without xanthan gum are higher than those of other sand contents. When the sand content is about 50%, the xanthan gum colloid forms a stable structure with a certain strength with sand particles for xanthan gum composite silty clay, and its anti-scour performance is significantly improved.

Key words: sand content; xanthan gum; cohesive clay; fracture development; anti-scour test

黏性土作为载体被广泛应用于以客土喷播为主的岩质边坡生态防护技术中。在干旱气候条件下,黏性土体干缩失水达到一定程度后,其表面和内部就会发育大量纵横交错的干缩裂隙^[1]。由于黏性土存在开裂的现象,其在边坡生态防护中的效果常常不能达到预期。黏性土开裂之后形成水流通道的,降雨期间雨水入渗,坡面更易出现冲刷失稳,进而诱发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害^[2]。面对频繁出现的极端气候事件,对边坡客土开裂失稳和降雨条件下水土流失的研究愈发受到重视。

对于边坡土体干燥开裂的研究,国内外学者通

过试验研究对比不同影响因素下试样开裂发育的情况。Zeng 等^[3]对土壤颗粒的运动进行了动态跟踪,探讨了基底摩擦和层厚两个因素对土体顶部裂隙和底部裂隙产生和扩展的影响。罗茂泉等^[4]对比分析了不同表面张力下土壤裂隙的发展演化过程,并对其机理进行了探讨。李正辉等^[5]定量分析了含砂率对黏土蒸发、开裂含水率和土样表面裂隙几何形态的影响。Vo 等^[6]通过模型准确地模拟了黏土干燥过程中与收缩和裂隙形成有关的水力-机械耦合现象。Tran 等^[7]研究了干燥开裂对土壤导水率的影响、土壤水分运移机制以及与大气的交换;Zhu

基金项目:国家自然科学基金项目(41877212)
作者简介:马晓凡(1989—),男,实验师,硕士,主要从事地质工程试验技术研究。E-mail:maxiaofan_11@hhu.edu.cn
通信作者:刘瑾(1983—),女,教授,博士,主要从事地质体加固技术研究。E-mail:jlinliu920@163.com

等^[8]采用现场试验模拟了天然裂隙网络的动态发展规律和现场观测到的干燥收缩和裂隙发展的一般趋势。刘昌黎等^[9]通过室内试验发现界面粗糙度对龟裂发育过程有重要影响。

国内外学者对黏性土体被冲刷的过程机理和治理措施进行了大量研究,并取得了一定成果。尹学博^[10]系统深入地研究了边坡冲刷的成因、冲刷特性和影响参数,进一步确定了边坡防护工程施工的技术路线。李志刚等^[11]通过研究边坡土水力冲刷过程的能量转化,发现坡面主要的冲刷影响因素(如降雨、路基高、路面与坡面的粗糙系数等)与冲刷临界坡度存在函数关系。钟昆志等^[12]研究发现,增加水泥剂量可有效提高抗冲刷性能,失水率和干缩系数均随时间增大。张强等^[13]研究了人工填筑黏性土的起动冲刷特性,提出了量纲和谐的起动切应力和冲刷率的公式,并分析比较了人工填筑黏性土和黏性泥沙的起动和冲刷特性。木质素作为一种可再生资源,成本较低,被应用于客土基材中。李映等^[14]研究发现,木质素的掺入可以通过增加基材黏聚力提高其抗剪强度,有利于提高基材的稳定性和抗冲刷能力。李绍才等^[15]选择聚丙烯酰胺(PAM)作为客土基材的组分,研究表明PAM的掺入提高了客土基材的抗冲刷性,同时对基材的板结和龟裂起到一定的抑制作用。刘威等^[16]对秸秆用于客土基材进行了试验,试验结果表明,秸秆纤维的掺入大大提高了基材的抗剪强度,减小了基材失水收缩产生的裂隙宽度,增加了基材整体的稳定性。刘泽等^[17]基于极限平衡理论建立了降雨条件下边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析模型,通过实例分析探讨了边坡倾角、降水强度、防护结构层厚度、锚钉间距、锚钉锚固长度对防护结构稳定性的影响。Mirzababaei等^[18]对比研究了聚乙烯醇丁烷四羧酸协同加固黏性土强度和水稳定性的效果。Chang等^[19]研究了黄原胶加固土壤的效果,认为其加固效果与土壤类型、水化程度(如含水率)、黄原胶掺量和拌合方法有关。Chen等^[20]将木质素磺酸盐作为传统固化剂的替代品用于路基土处理,研究了木质素磺酸盐对加固土剪切性能的影响。Anagnostopoulos等^[21]研究了双组分水溶性环氧树脂改良砂土的物理和力学性能。Ni等^[22]发现土体的最佳初始含水率随掺砂率的增加而减小,并总结了不同黏性土类型混合物中最佳的黄原胶含量。

本文通过改变黄原胶复合黏性土中的含砂量,进行室内蒸发、开裂和抗冲刷试验,结合数字图像处理技术对土体表层裂隙网络进行定量分析,探究复合土体的含水率变化、裂隙发育及抗冲刷性能,并对

复合土体的效果进行分析与评价,以期为客土喷播生态防护技术提供新的参考方向。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验选用的黏性土样为南京江宁地区下蜀土,自然状态下呈黄褐色(图1(a)),比重 $G_s=2.71$,塑液限分别为22%和36.6%,塑性指数 $I_p=14.6$ 。试验选用的砂土取自南京江宁地区(图1(b)),最大干密度及最小干密度分别为 1.66 g/cm^3 和 1.34 g/cm^3 ,最大及最小孔隙率分别为0.97和0.59,比重 $G_s=2.64$,曲率系数 $C_u=1.13$,不均匀系数 $C_c=2.27$,属于级配不良好砂土。采用的黄原胶呈白色粉末状,如图1(c)所示。黄原胶具有高黏度和高分子量,易溶于水,相比其他水溶性多糖或多聚糖具有更强的水解能力。

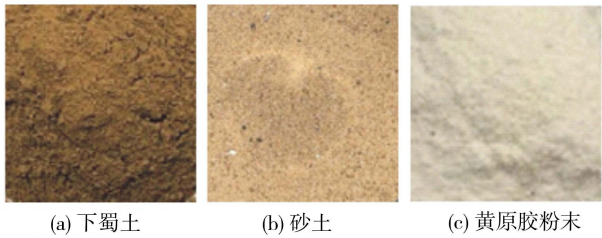


图1 试验材料

1.2 试样制备

为尽可能模拟试样在自然条件下干缩开裂时受到的摩擦力,制样容器底部粘有60目砂纸。由于砂土颗粒比黏性土的吸水率小,故本次试验在制样时仅考虑黏性土的含水率。试样盒规格为 $16\text{ cm}\times 16\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 。设定每组试样质量为800 g,试样初始含水率 ω_0 为50%。

黄原胶含量 H 与含砂量 S 的计算方法分别为

$$H = \frac{m_H}{m_t} \times 100\% \quad (1)$$

$$S = \frac{m_s}{m_z} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_H 为试样中黄原胶的质量; m_t 为黏性土的质量; m_s 为试样中砂土替换黏性土的质量; m_z 为黏性土及砂土的总质量。

制备试样时,先将现场取回土样烘干、碾碎,过2 mm筛后备用,然后根据试验设计的黄原胶含量 H 与含砂量 S ,称取定量烘干黏性土质量、黄原胶及烘干砂土质量,搅拌均匀后再与蒸馏水混合,再次充分搅拌形成均匀的饱和泥浆;将饱和泥浆分多次、缓慢地倒入试样盒中,控制沉积稳定后的试样厚度为3 cm。将试样置于振动台上,振动3 min,将搅拌过程中泥浆内部产生的密闭气泡排除。最后用配套盒盖对试样进行密封,室温(26°C)下静置24 h,使试样盒中

的饱和泥浆沉积稳定。各试样参数如表 1 所示。

表 1 试样参数					
试样编号	黄原胶含量/%	含砂量/%	试样编号	黄原胶含量/%	含砂量/%
1	0	0	10	0.05	70
2	0	15	11	0.10	0
3	0	30	12	0.15	0
4	0	50	13	0.15	15
5	0	70	14	0.15	30
6	0.05	0	15	0.15	50
7	0.05	15	16	0.15	70
8	0.05	30	17	0.25	0
9	0.05	50			

1.3 试验方案

1.3.1 蒸发开裂试验

当试样静置完毕后取下盒盖,抽取表层多余清液,使试样表面暴露于空气中,进行自然失水干燥。规定每隔 1 h 进行拍照、称重,当每两次称重的读数之差小于 1 g 时,标志为试样干燥完全。

使用图像处理软件对开裂情况进行定量分析对比。测量参数主要包括:裂隙率、裂隙平均宽度、裂隙最大宽度等,通过分析上述参数来评估裂隙发育的程度。

1.3.2 抗冲刷试验

试样经过蒸发开裂试验后,含水率均接近 0,视为统一含水率。模拟降水强度为 0.3 L/min,降雨持续时间为 20 min,坡度设置为 30°。试验过程中每间隔 1 min 记录水流量及接取物质量。待冲刷结束后将收集器中的混合物过滤、烘干,土体质量即为冲刷量。试验模型如图 2 所示。

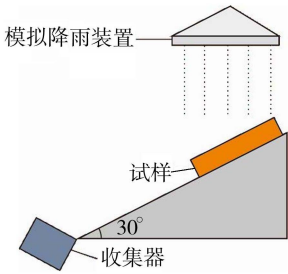


图 2 抗冲刷试验模型

试样受冲刷破坏程度与冲刷率呈正相关关系。试样的冲刷率 E 和抗冲刷系数 E_r 的计算公式分别为

$$E = \frac{\Delta m}{m_1 - m_0} \times 100\% \tag{3}$$

$$E_r = \frac{E_0}{E_p} \tag{4}$$

式中: Δm 为烘干后土体质量; m_1 为试样及容器总质量; m_0 为容器质量; E_r 为抗冲刷系数; E_0 为纯黏性土参照样的冲刷率; E_p 为复合试样的冲刷率。 E_r 大于 1 时,表明改性土试样的抗冲刷能力得到提高。

E_r 越大,表明试样的抗冲刷能力越强。

2 结果与分析

2.1 复合黏性土蒸发开裂特性

2.1.1 黄原胶含量对黏性土裂隙发育的影响

图 3 为试样失水开裂裂隙图。为分析不同黄原胶含量对试样失水开裂的影响,利用图像处理与定量分析系统^[23-25]对裂隙参数进行定量分析和统计。图 4 为试样含水率变化,表 2 为试样裂隙宽度和裂隙率。随着黄原胶含量的增大,试样含水率的降低趋势减缓,且在蒸发稳定时土体内部保留了更多的水分。同时,随着黄原胶含量的增大,土体所产生的裂隙数量以及裂隙发育的宽度、深度也随之减小。当黄原胶含量达到 0.25% 时,土体表面未出现明显的开裂现象,且随着黄原胶含量的增大,试样裂隙率及裂隙宽度均呈大幅下降趋势。

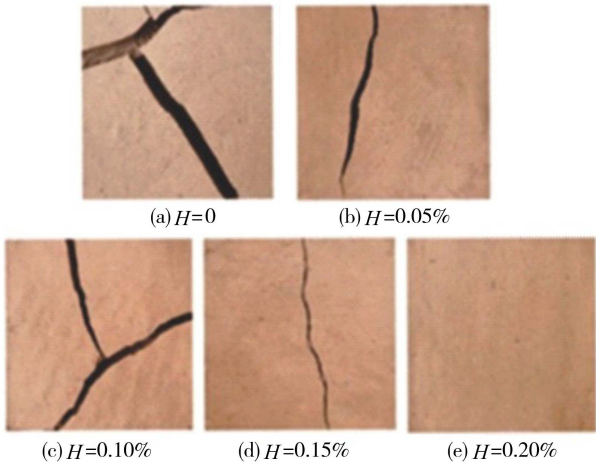


图 3 不同黄原胶含量的试样失水开裂裂隙

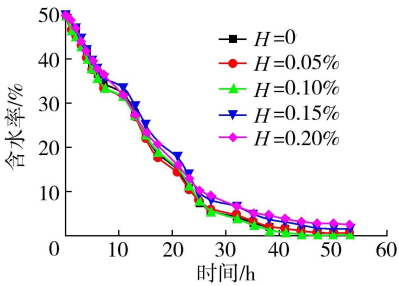


图 4 黄原胶含量对试样含水率的影响

表 2 试样裂隙宽度和裂隙率

黄原胶含量/%	裂隙平均宽度/像素	裂隙最大宽度/像素	裂隙率/%
0	85	173	0.116
0.05	43	43	0.023
0.10	70	81	0.058
0.15	13	19	0.011
0.25	0	0	0

由于黄原胶与黏性土颗粒胶结产生弹性黏膜,水分的蒸发路径发生改变,蒸发时间延长。此外,部

分水分被储存于弹性黏膜内部,增大了试样的残余含水率;同时未反应的黄原胶会吸附水分,形成高度黏滞的悬浮液,填补土壤颗粒之间的空隙,进而减少失水对试样产生的张拉应力,降低裂隙发育的程度,提升土体的完整性。

2.1.2 含砂量对不同黄原胶含量黏性土裂隙发育的影响

图5和图6分别为复合试样的裂隙发育图及含水率变化曲线。由图6可知,随着含砂量的增大,不同黄原胶含量的复合土样的含水率下降速率均显著增加,达到稳定状态时的含水量相差较小,裂隙发育程度明显减小。在素土试样中,含砂量较低(0~

30%)时,试样裂隙率无明显变化;随着含砂量增大,土体裂隙率和裂隙平均宽度呈递减趋势(表3)。当黄原胶含量为0.05%时,随着含砂量增大,土体裂隙率和裂隙最大宽度均呈先增大后减小的变化趋势,且当含砂量为30%,试样各裂隙参数达到峰值。当黄原胶含量达到0.15%时,掺加砂土试样均未发生开裂。综上所述,少量砂土掺入后提升了土体内部的不均匀程度,导致土体表面出现较多的不均匀沉降,进而出现多处应力集中现象,所以裂隙率增大;随着含砂量的增大,由于砂粒本身不具有收缩性,因此降低了黏性土颗粒之间的收缩距离,导致试样所受张拉应力减小,遏制了裂隙张大和延伸,所以

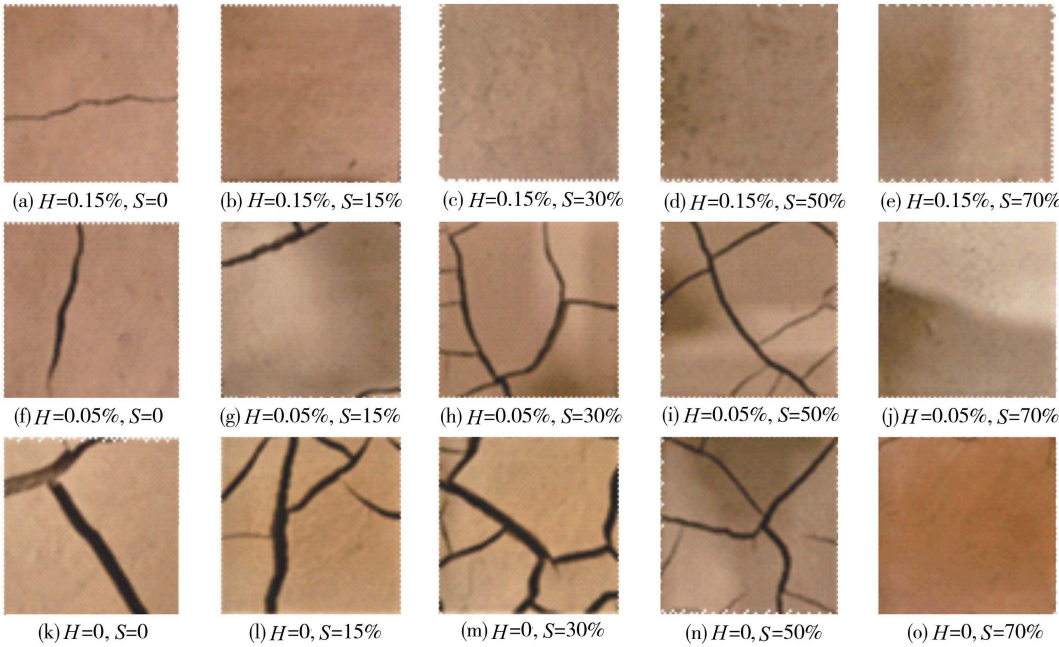


图5 复合试样裂隙发育

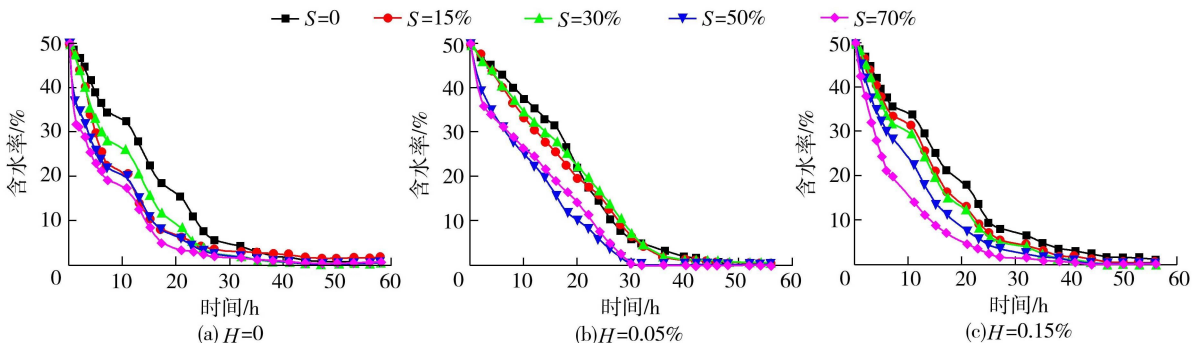


图6 复合试样含水率变化

表3 不同黄原胶含量的复合试样的裂隙参数

含砂量/%	裂隙平均宽度/像素			裂隙最大宽度/像素			裂隙率/%		
	H=0	H=0.05%	H=0.15%	H=0	H=0.05%	H=0.15%	H=0	H=0.05%	H=0.15%
0	85	43	13	173	43	19	0.116	0.023	0.011
15	67	35	0	138	75	0	0.107	0.026	0
30	69	37	0	132	96	0	0.135	0.064	0
50	33	31	0	86	57	0	0.069	0.055	0
70	3	3	0	13	5	0	0.014	0.025	0

裂隙率及裂隙宽度减小。

2.2 开裂复合黏性土抗冲刷特性

2.2.1 黄原胶含量对开裂黏性土抗冲刷能力的影响

根据试验方案搭建室内冲刷模型,选取各组的特征图像如图 7 所示,其中冲刷时间为 0 min 时的图像为冲刷试样的初始状态。复合试样各时间段的冲刷量如图 8 所示。当黄原胶含量为 0、0.05%、0.10%、0.15%、0.25% 时,复合试样的抗冲刷系数分别为 1、1.82、1.252、12.47 和 35.63。分析可知,坡面破坏程度与黄原胶含量及土体开裂程度密切相关,且黄原胶含量与土体抗冲刷系数呈正相关关系。通过分析素土试样可知,进行抗冲刷试验 1 min 后试样表面便产生破坏,5 min 时冲刷量达到峰值 27.2 g,随后呈波动状逐渐减少,至冲刷 10 min 时,水流沿原生宽大裂隙冲刷土体,其表面产生较为严重的破坏。当冲刷进行至 20 min 时,试样彻底崩坏瓦解。由于黄原胶含量为 0.05% 与 0.10% 的复合试样表

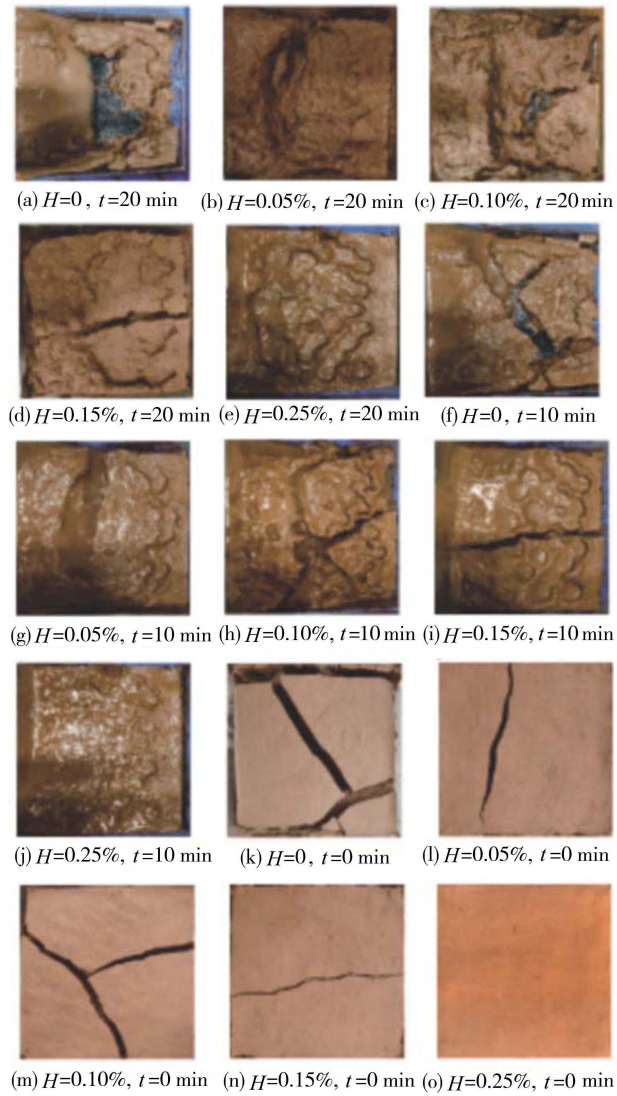


图 7 不同黄原胶含量的开裂试样受冲刷破坏程度

面裂隙发育程度较大,且抗冲刷系数变化不大,其破坏程度与素土试样相似,分别在 7 min 与 2 min 时达到冲刷量的峰值,且在 18 min 左右,3 组试样破坏均趋于稳定。而当继续提高黄原胶含量时,试样抗冲刷系数大幅提高,土体裂隙发育程度逐渐减小,土体表面产生的裂隙形态多为窄、小,或裂隙不发育,因此遭受降雨所产生的侵蚀破坏程度降低,仅出现少许冲刷量,单位时间冲刷量分别在 2 g 和 1 g 左右,与其他 3 组相比明显减少,且坡面始终保持较为稳定的状态。

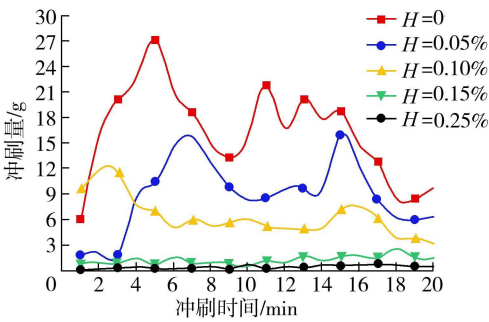


图 8 不同黄原胶含量的开裂试样冲刷量

2.2.2 含砂量对不同黄原胶含量的开裂黏性土抗冲刷能力的影响

综合分析不同含砂量下的黄原胶复合试样冲刷量及抗冲刷系数(图 9 和表 4)可知,对于素土试样,随着含砂量的增大,试样抗冲刷系数呈下降趋势,冲刷量呈上升趋势;对于掺加黄原胶的试样,当含砂量低于 30% 时,随着含砂量的增大,试样抗冲刷系数降低,冲刷量增大。当含砂量达到 30% 时,试样抗冲刷系数达到最低,冲刷破坏时间提前,累计冲刷量达到最大。当含砂量高于 30% 时,随着含砂量的提高,试样抗冲刷系数提高,累计冲刷量减少。其中,黄原胶含量为 0.15%、含砂量为 70% 的复合试样抗冲刷系数远大于其他试样,近似于无限大。考虑经济成本方面因素,含砂量大于 50% 后,试样的抗冲刷性能提升有限,故选取含砂量 50% 左右为最佳含量。

综上所述,未添加黄原胶时,砂土的存在加速了试样的冲刷破坏,而随着黄原胶的掺入,含砂量较高(大于 50%)的土体的抗冲刷能力得到了明显提升,含砂量成为影响土体抗冲刷性能的主要因素。其中,含砂量为 30% 的复合试样的破坏程度均为同组中最大,由此可知,含砂量为 30% 时试样稳定程度最差。

由于砂土颗粒较大且不具有内聚力,掺加砂土试样的粒间空隙扩大,内聚力变小,土体颗粒之间的联结能力减弱,因此,随着素土中含砂量的增大,斜坡坡面受到的冲刷破坏越来越强烈。而黄原胶对砂

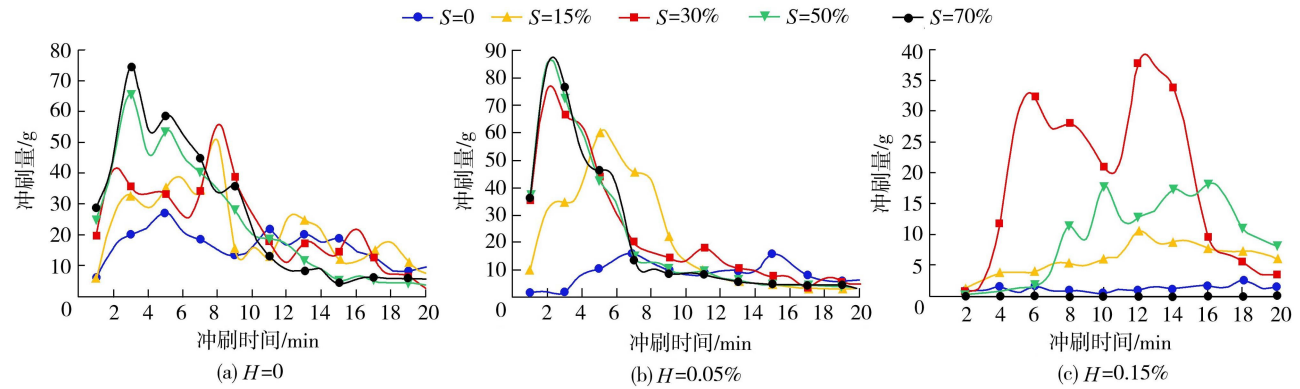


图9 不同含砂量下的黄原胶复合试样冲刷量

表4 不同黄原胶含量与含砂量的复合试样累计冲刷量和抗冲刷系数

黄原胶 含量/%	累计冲刷量/g					抗冲刷系数				
	S=0	S=15%	S=30%	S=50%	S=70%	S=0	S=15%	S=30%	S=50%	S=70%
0	326	446	490	512	545	1.0000	0.7312	0.6655	0.6381	0.5992
0.05	179	416	470	433	431	1.8201	0.7840	0.6944	0.7537	0.7569
0.15	26.2	122	365	194	0	12.4722	2.6769	0.8952	1.816	∞

土同样具有加固作用,表现为黄原胶复合砂土在较长时间的静置养护中胶结。因此,对于掺加了黄原胶的试样,在含砂量较高的条件下,经过较长时间的干燥放置后发生固结,土体受冲刷破坏程度降低,甚至不发生破坏。

3 机理分析

试验制样采用的黏性土经粉碎研磨后过 2 mm 筛,因此素土试样可视为均质土体,粒间孔隙分布较均匀,水分自下而上运移的路径较短且规律。土体开裂的机理示意图如图 10 所示,黄原胶遇水形成高黏性的凝胶,包裹在土颗粒表面增强黏性,联结相互接触的颗粒,或在非接触的土颗粒间起到桥接作用,加强颗粒间的相互连接。由于黏性土颗粒表面存在着阳离子吸附,黄原胶分子链上的羟基(—OH)和羧

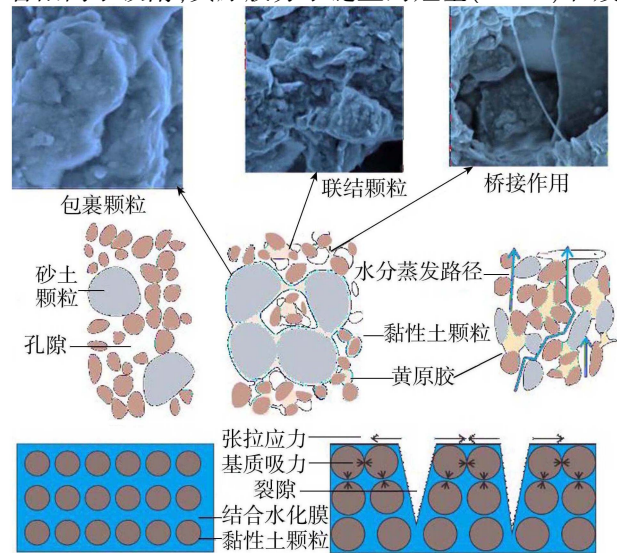


图10 土体开裂机理示意图

基(—COOH)可以与之形成离子键桥联,颗粒表面胶结土颗粒的吸附效果更强。掺入土体的黄原胶与细小颗粒形成基质,胶结加固土体并填充粒间孔隙,阻塞了土体下层水分向上运移补偿表层蒸发的通道,减少并延长了水分迁移路径。

由于黏性土颗粒表面附着了一层结合水化膜,使颗粒间无法直接进行接触,同时在土体失水收缩时提供空间。因此在干燥失水时,黏性土表面的自由水蒸发,土体下层的水分在毛细作用下运移至表层并产生基质吸力,孔隙半径减小,进而形成张拉应力场。当土体内部某处的张拉应力超过抗拉强度时,产生拉裂破坏,形成 V 形裂隙^[26]。由于砂土颗粒的粒径远大于黏性土颗粒,且相较于黏性土,其收缩性较小,掺入土体后加速了刚性颗粒在干燥过程中的相互接触,导致区块收缩范围减小。根据非饱和和土力学理论,土体毛细水效应产生的基质吸力与孔径成反比,因此随着含砂量的增大,土颗粒间空隙增大,基质吸力减小,进而使得土体表面颗粒所受的张拉应力降低,减缓了裂纹扩展^[27-28]。砂土颗粒不具有内聚力,因此,对于无黄原胶土样,随着含砂量的增大,土体内聚力降低,同时砂土颗粒在黏性土中形成大孔隙,土体颗粒间的联结能力减弱,土体的抗冲刷能力减弱。对于黄原胶复合土样,黄原胶基质及胶体可以减缓水分蒸发,减小土体表面的张拉应力,同时增强土颗粒间的联结,降低黏性土的孔隙度,增强土体的完整性,提高土体的抗拉性能。随着黄原胶含量的增大,黄原胶与黏性土颗粒的联结更加紧密,土体结构更加稳定,土体抗裂性能增强。

此外,黄原胶对黏性土颗粒间联结作用的加强提高了土体结构的稳定性。较高含量的黄原胶提高

了土体表面的完整性,且黄原胶基质阻碍了水流下渗,因此提升了抵抗水流侵蚀的能力。如图8~9所示,开裂试样在受冲刷过程中,素土及黄原胶含量较低的土体颗粒间联结较弱,土颗粒易被水流冲散,失稳破坏严重;而黄原胶含量较高的土体受黄原胶胶结加固的作用较为明显,土颗粒间联结稳固,坡面整体始终较为稳定,只有较少的冲刷量产生。

对于不同含砂量下砂土颗粒与土颗粒间的关系,当含砂量小于30%时,砂土颗粒被黏性土颗粒包围,相互之间难以接触,混合土体的基本特性主要由黏性土控制,砂土对土体干缩开裂的抑制作用不明显;当含砂量为30%时,砂土颗粒间存在的黏性土颗粒对砂土颗粒的控制能力大大降低,砂土颗粒更容易滑动,容易发生破坏;含砂量大于50%后,砂土颗粒间相互靠近,易在土体间形成大孔隙,砂土颗粒滑动后容易达到稳定状态,显著阻碍了裂隙的进一步发展。结合断裂力学理论,土体产生龟裂后,裂纹尖端出现应力集中和应力无穷大的奇异现象,而随着蒸发的持续进行,基质吸力逐步增强,土体表面张拉应力增大,裂纹的应力强度因子达到其断裂韧度,随即发生失稳扩展。通过对黏性土-砂土混合试样断裂韧度的测定,可以发现其随着含砂量的增大呈现先升高后降低的趋势,约在含砂量30%时达到峰值。因此,砂土的掺入增大了颗粒间的摩擦力,提高了土体的抗断裂能力。

将黄原胶掺入混合土体后,当含砂量不超过30%时,其加固机理与纯黏性土类似,黄原胶聚合物与黏性土颗粒直接相互作用形成稳定结构加固土体,减少了裂隙的产生。当含砂量为30%时,黄原胶对黏性土颗粒的加固大大减弱,同时砂土颗粒间接触较少,黄原胶加固效果不明显,加固效果大大降低;含砂量超过50%后,砂土颗粒之间接触增多,黄原胶聚集覆盖在砂土颗粒表面,增大了粒间接触面积,也在离散的砂土颗粒之间建立了连接桥梁,如图10所示。与表面带电的黏性土颗粒不同,砂土颗粒表面呈电中性,黄原胶胶体紧密地包裹并缠绕在砂土颗粒之间,两者间没有显著的相互作用。随着蒸发的持续进行,黄原胶胶体中的水分不断挥发,形成网状膜,将松散的砂土颗粒连接成一个较为稳定的结构。在此基础上,黄原胶与含量较少的黏性土颗粒相互作用形成基质,填补粒间空隙,降低了土体的毛细作用及渗透性能,增强了粒间联结能力,提高了土体的完整性,增大了其表面强度,显著阻碍了裂隙发育。同时,黄原胶网状膜缠绕包裹砂土颗粒形成较稳定的结构,使土体具备抵抗较大水流冲刷的能力,抗冲刷系数有所回升。随着黄原胶含量增大,黄原胶胶体对砂土颗粒的缠绕越来越紧密,土体稳

定性提高;而随着含砂量的增大,黄原胶与之形成整体结构的作用越来越明显,土体完整性得到提升。因此在黄原胶含量较大且砂土的质量分数占优时,试样胶结固化为一个整体,大大提高了土体强度,增强了斜坡的抗冲刷性能。

4 结 论

- a. 少量砂土颗粒的掺入改变黏性土的不均匀程度,出现应力集中现象,导致裂隙率呈现上升趋势。
- b. 随着含砂量的提升,由于砂粒本身不具备收缩性,黏性土颗粒之间的收缩距离降低,遏制了裂隙张大和延伸,所以裂隙率及裂隙宽度呈下降趋势。
- c. 当含砂量为30%时,无论试样是否掺加黄原胶,黏性土颗粒均难以较好地维持整体稳定性,砂土颗粒更加容易滑动,使得该组试样在相同条件下比其他组试样更容易产生开裂,遭受冲刷破坏。
- d. 含砂量在50%左右时,黄原胶胶体与砂土颗粒形成具有一定强度的稳定结构,降低土体渗透性,提高土体完整性和稳定性,其抗冲刷性能得到了显著提升。

参考文献:

[1] 唐朝生,施斌,崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报,2018,40(8):1415-1423. (TANG Chaosheng, SHI Bin, CUI Yujun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1415-1423. (in Chinese))

[2] 戚赏,刘磊,牡丹,等. 河南丹江口库区滑坡危害性评价及防治对策[J]. 矿产勘查,2020,11(3):624-629. (QI Shang, LIU Lei, DU Dan, et al. Landslide hazard evaluation and prevention measures in Danjiangkou Reservoir, Henan Province[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(3): 624-629. (in Chinese))

[3] ZENG Hao, TANG Chaosheng, CHENG Qing, et al. Drought-induced soil desiccation cracking behavior with consideration of basal friction and layer thickness[J]. Water Resources Research, 2020, 56(7): e2019WR026948.

[4] 罗茂泉,杨松,马泽慧,等. 干湿循环下气-液界面张力对黏土收缩开裂的影响[J]. 土壤学报,2018,55(2):369-379. (LUO Maoquan, YANG Song, MA Zehui, et al. Effect of gas-liquid interfacial tension on shrinkage cracking of clay as affected by wetting-drying alternation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 369-379. (in Chinese))

[5] 李正辉,王世梅,金来福. 粗颗粒对黏性土干缩开裂影响的试验研究[J]. 长江科学院院报,2019,36(6):99-105. (LI Zhenghui, WANG Shimei, JIN Laifu. Experimental study on the effects of coarse particles on

- cracking behavior of clay [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36 (6): 99-105. (in Chinese))
- [6] VO T D, POUYA A, HEMMATI S, et al. Numerical modelling of desiccation cracking of clayey soil using a cohesive fracture method[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 85:15-27.
- [7] TRAN D K, RALAIZAFISOLOARIVONY N, CHARLIER R, et al. Studying the effect of desiccation cracking on the evaporation process of a Luvisol: from a small-scale experimental and numerical approach[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 193:142-152.
- [8] ZHU Lei, SHEN Tongqing, MA Rong, et al. Development of cracks in soil: an improved physical model [J]. Geoderma, 2020, 366:114258.
- [9] 刘昌黎,唐朝生,李昊达,等. 界面粗糙度对土体龟裂影响的试验研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25 (5): 1314-1321. (LIU Changli, TANG Chaosheng, LI Haoda, et al. Experimental study on effect of interfacial roughness on desiccation cracking behavior of soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25 (5): 1314-1321. (in Chinese))
- [10] 尹学博. 高速公路边坡冲刷机理分析及室内模拟试验研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2017, 13 (1): 83-85. (YIN Xuebo. Study on scour mechanism of expressway slope and laboratory simulation test [J]. Science and Technology of Highway Traffic (Applied Technology Edition), 2017, 13 (1): 83-85. (in Chinese))
- [11] 李志刚,邓学钧,陈云鹤. 基于能量法的高等级公路路堤边坡冲刷临界坡度研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2003, 33 (3): 340-342. (LI Zhigang, DENG Xuejun, CHEN Yunhe. Research on critical gradient for erosion of expressway embank slope based on energy method [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33 (3): 340-342. (in Chinese))
- [12] 钟昆志,许兵,方正,等. 破碎砾石水泥稳定基层收缩性能 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2020, 50 (4): 630-636. (ZHONG Kunzhi, XU Bing, FANG Zheng, et al. Shrinkage characteristic of crushed gravel cement stabilized base [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50 (4): 630-636. (in Chinese))
- [13] 张强,王寅,陈春柏. 人工填筑黏性土起动冲刷特性试验 [J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (6): 75-78. (ZHANG Qiang, WANG Yin, CHEN Chunbai. Experiment on incipient motion and scour features of artificial filling clay [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32 (6): 75-78. (in Chinese))
- [14] 李映,陈金宏,左双英,等. 木质素含量对客土喷播层抗剪强度影响的试验研究 [J]. 土工基础, 2014, 28 (2): 121-123. (LI Ying, CHEN Jinhong, ZUO Shuangying, et al. Effect of lignin content on the direct shear strength of sprayed soil base layer in slope restorations [J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28 (2): 121-123. (in Chinese))
- [15] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 秸秆纤维、聚丙烯酰胺及高吸水树脂在岩石边坡植被护坡中的效应 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (2): 257-267. (LI Shaocai, SUN Hailong, YANG Zhirong, et al. Effect of straw fiber, polyacrylamide and super absorbent polymer eco-engineering on rock slope protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (2): 257-267. (in Chinese))
- [16] 刘威,孙海龙,李绍才,等. 加筋纤维类型及用量对薄层土壤抗剪强度的影响 [J]. 中国水土保持, 2011 (10): 58-60. (LIU Wei, SUN Hailong, LI Shaocai, et al. Effect of type and dosage of reinforced fiber on shear strength of thin layer soil [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011 (10): 58-60. (in Chinese))
- [17] 刘泽,陈丽,何矾,等. 边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (4): 65-70. (LIU Ze, CHEN Li, HE Fan, et al. Stability analysis of flexible protection structure for slope reinforced anchor 3D-geomat [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (4): 65-70. (in Chinese))
- [18] MIRZABABAEI M, ARULRAJAH A, HORPIBULSUK S, et al. Stabilization of soft clay using short fibers and poly vinyl alcohol [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46 (5): 646-655.
- [19] CHANG I, IM J, PRASIDHI A K, et al. Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening [J]. Construction and Building Materials, 2015, 74:65-72.
- [20] CHEN Qingsheng, INDARATNA B. Shear behaviour of sandy silt treated with lignosulfonate [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52 (8): 1180-1185.
- [21] ANAGNOSTOPOULOS C A, KANDILIOTIS P, LOLA M, et al. Effect of epoxy resin mixtures on the physical and mechanical properties of sand [J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014, 7 (17): 3478-3490.
- [22] NI Jing, HAO Ganglai, CHEN Jiaqi, et al. The optimisation analysis of sand-clay mixtures stabilised with xanthan gum biopolymers [J]. Sustainability, 2021, 13 (7): 3732.
- [23] ZENG Hao, TANG Chaosheng, CHENG Qing, et al. Coupling effects of interfacial friction and layer thickness on soil desiccation cracking behavior [J]. Engineering Geology, 2019, 260:105220.
- [24] TANG Chaosheng, ZHU Cheng, LENG Ting, et al. Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography [J]. Engineering Geology, 2019, 255:1-10.

(下转第 78 页)

- (4):664-674. (YI Xinxin, CAI Zhijing, QIN Zhijie, et al. Analysis of interannual variations for the fish community structure in Shanghai Qingcaosha Reservoir [J]. Journal of Shanghai Ocean University,2021,30(4): 664-674. (in Chinese))
- [9] 朱宜平,李小飞,梁霞. 上海青草沙水库表层沉积物重金属含量水平及其生态风险评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2021(2):54-62. (ZHU Yiping, LI Xiaofei, LIANG Xia. Content and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Qingcaosha Reservoir in Shanghai [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science),2021(2): 54-62. (in Chinese))
- [10] 陈伟伦,王伟. 青草沙水库工程对河床冲淤演变的影响[J]. 水利水电科技进展,2018,38(4):44-50. (CHEN Weilun, WANG Wei. Influence of Qingcaosha Reservoir Project on riverbed erosion and deposition[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(4):44-50. (in Chinese)).
- [11] 盛皓,戴志军,梅雪菲,等. 长江口青草沙水库前沿河床演变与失稳风险研究[J]. 海洋工程,2017,35(2):105-114. (SHENG Hao, DAI Zhijun, MEI Xuefei, et al. Research on evolution and instability risk of the frontal river bed along the Qingcaosha Reservoir, Changjiang Estuary[J]. The Ocean Engineering,2017,35(2):105-114. (in Chinese))
- [12] 李文正. 新形势下长江口南北港分汊口河段河势变化及治理策略[J]. 水运工程,2013(11):115-118. (LI Wenzheng. Riverbed evolution characteristics and regulation strategy of inlet river of south channel and North Channel, Yangtze estuary [J]. Port & Waterway Engineering,2013(11):115-118. (in Chinese))
- [13] 徐骏,刘羽婷,唐敏炯,等. 长江口滩涂变化及其原因分析[J]. 人民长江,2019,50(12):1-6. (XU Jun, LIU Yuting, TANG Minjong, et al. Tidal flat variation in Yangtze River Estuary and cause analysis [J]. Yangtze River,2019,50(12):1-6. (in Chinese))
- [14] 华凯,程和琴,颜阁,等. 近期长江口南支扁担沙洲演变特性[J]. 泥沙研究,2020,45(6):33-39. (HUA Kai, CHENG Heqin, YAN Ge, et al. Recent processes of Biandan sand shoal in the South Branch of the Yangtze Estuary[J]. Journal of Sediment Research,2020,45(6): 33-39. (in Chinese))
- [15] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京:海洋出版社,2004.
- [16] 吴焱. 长江口南北港分流口河段近期河势变化及对区域重大整治工程的影响[J]. 水运工程,2017(7):136-140 (WU Yan. Evolution of ditributary reach of South and North channels in the Yangtze Estuary and influence on surrounding regulation projects [J]. Port & Waterway Engineering,2017(7):136-140. (in Chinese))
- [17] 何钰滢,戴志军,楼亚颖,等. 长江口扁担沙动力地貌变化过程研究[J]. 海洋学报,2020,42(5):104-116. (HE Yuying, DAI Zhijun, LOU Yaying, et al. Morphodynamic evolution of the Biandan Shoal in the Changjiang River estuary[J]. Haiyang Xuebao,2020,42(5):104-116. (in Chinese)).
- [18] 窦希萍,缴健,储麐,等. 长江口水沙变化与趋势预测[J]. 海洋工程,2020,38(4):2-10. (DOU Xiping, JIAO Jian, CHU Ao, et al. Review of hydro-sediment change and tendency in Yangtze estuary [J]. The Ocean Engineering,2020,38(4):2-10. (in Chinese))

(收稿日期:2022-07-07 编辑:俞云利)

(上接第 66 页)

- [25] WANG Linlin, TANG Chaosheng, SHI Bin, et al. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks[J]. Engineering Geology,2018,238:27-35.
- [26] 吴珺华,袁俊平,杨松,等. 膨胀土湿胀干缩特性试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):28-31. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrink performance of expansive soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012,32(3):28-31. (in Chinese))
- [27] 陈杰,朱学英,付梁,等. 水泥稳定土干缩性能及其尺寸效应[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):114-118. (CHEN Jie, ZHU Xueying, FU Liang, et al. Dry shrinkage performance and size effect of cement stabilized soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(2):114-118. (in Chinese))
- [28] 张勇敢,刘斯宏,鲁洋,等. 袋装膨胀土强度变形特性及其碾压质量控制与检测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):118-123. (ZHANG Yonggan, LIU Sihong, LU Yang, et al. Strength and deformation characteristics, compaction quality control and inspection of soilbags filled with expansive soil [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):118-123. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-30 编辑:俞云利)