

瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究

杨万里, 石玉玲, 穆鹏雪, 贾卓龙, 曹怡菡

Experimental study on engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess

YANG Wanli, SHI Yuling, MU Pengxue, JIA Zhuolong, and CAO Yihan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于孔隙面积比的麦秸秆防腐分析及秸秆对粉土抗剪强度的影响

Wheat straw anticorrosion analysis based on pore area ratio and the effect of straw on the shear strength of silty soil

彭丽云, 李朝成, 刘铭杰, 崔长泽 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 171-180

上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究

A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the Pliocene laterite

杨玉茹, 李文平, 王启庆 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 153-160

生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究

Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme

董辉, 程子华, 刘禹岐, 朱宪明 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 84-94

火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响

Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas

胡卸文, 侯羿腾, 王严, 杨瀛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 106-112

改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究

A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess

贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 周立宏 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 90-96

无胶结粗粒土初始结构强度研究

Research on the critical strength of the initial structure of the uncemented coarse-grained soil

张晨曦, 王洋, 魏玉峰, 梁彭, 贺琮栖 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 54-63



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110027

杨万里, 石玉玲, 穆鹏雪, 等. 瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 117-124.
YANG Wanli, SHI Yuling, MU Pengxue, *et al.* An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 117-124.

瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究

杨万里¹, 石玉玲², 穆鹏雪³, 贾卓龙⁴, 曹怡菡⁴

(1. 甘肃路桥公路投资有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 青岛中科坤泰智能建造研究院, 山东 青岛 266603;
4. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了减少暴雨冲刷条件下黄土边坡侵蚀的发生, 提出采用瓜尔豆胶固化黄土对边坡坡面进行防护。基于直剪试验、渗透试验以及模拟暴雨边坡冲刷试验, 研究了瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀能力, 并对素黄土与固化黄土的微观结构, 探讨了瓜尔豆胶对黄土的加固机制。试验结果表明: 瓜尔豆胶可有效增强黄土的抗剪强度和抗渗透性, 固化黄土的黏聚力和内摩擦角呈现相同的变化趋势, 即随瓜尔豆胶掺量增加而先增加后减小, 随养护龄期增长而增加, 饱和渗透系数随瓜尔豆胶掺量增加和养护龄期增长而减小; 瓜尔豆胶掺量 1.0%, 养护龄期 7 d 的固化黄土相比于素黄土, 黏聚力和内摩擦角提升了 53.7% 和 5.6%, 饱和渗透系数降低了 78.3%; 瓜尔豆胶固化黄土在暴雨冲刷条件下的坡面防护效果明显, 相比于无防护边坡, 坡面的累计冲刷量降低了 64.4%, 平均流速提升了 55.2%; 瓜尔豆胶对黄土的加固机制主要在于其水化反应产生的高黏度水凝胶能够填充孔隙和胶结黄土颗粒。本研究可为瓜尔豆胶固化黄土在边坡坡面防护工程中的应用及推广提供试验支撑。

关键词: 瓜尔豆胶; 固化黄土; 抗剪强度; 抗渗透性; 抗冲蚀能力; 微观结构

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0117-08

An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess

YANG Wanli¹, SHI Yuling², MU Pengxue³, JIA Zhuolong⁴, CAO Yihan⁴

(1. Gansu Luqiao Highway Investment Co. Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China;
2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
3. Qingdao Zhongke Kuntai Intelligent Construction Research Institute, Qingdao, Shandong 266603, China;
4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: To reduce the erosion of the loess slope under the condition of rainstorms, the loess cured by guar gum is used to protect the slope surface. The engineering properties and erosion resistance of the guar gum-reinforced loess are studied by conducting the direct shear test, penetration test, slope scour test in simulated rainstorm, and the curing mechanism of guar gum is studied by contrasting the microstructure characteristics of plain loess and reinforced loess. The results show that the guar gum can effectively enhance the shear strength and the anti-

收稿日期: 2021-10-19; 修订日期: 2021-11-26

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077265); 甘肃省交通运输厅科技项目(2021-19)

第一作者: 杨万里(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高速公路建设管理工作。E-mail: 305283628@qq.com

通讯作者: 石玉玲(1972-), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程及灾害治理研究。E-mail: dcdgx15@chd.edu.cn

permeability of loess. The cohesion and internal friction angle of the reinforced loess show the same trend, and they increase first and then decrease with the increasing guar gum content, and increase with the increasing curing age. The saturated permeability coefficient decreases with the increasing guar gum content and curing age. Compared with plain loess, the cohesion and internal friction angle of 7 d cured loess with 1.0% guar gum content increases by 53.7% and 5.6%, and the saturated permeability coefficient decreases by 78.3%. The slope protection effect of the guar gum-reinforced loess under rainstorm scour condition is obvious. Compared with the slope without protection, the cumulative scour amount of the slope decreases by 64.4%, and the average slope flow rate increases by 55.2%. The strengthening mechanism of guar gum on loess mainly lies in the high viscosity hydrogel produced by its hydration reaction to fill the pores and cement loess particles. This study provides test support for the application and promotion of the guar gum-reinforced loess in slope protection engineering.

Keywords: guar gum; reinforced loess; shear strength; anti-permeability; erosion resistance; microstructure

随着我国西北地区交通基础工程的大力发展,越来越多的高速公路工程建设穿越于黄土高原,大量裸露的黄土工程边坡因高填深挖筑基处理而形成。在降雨引发的雨滴、渗流以及径流等外部侵蚀作用下,这些边坡浅层土体流失严重,冲沟病害出现频繁,若不加以防治,必然会对工程结构的安全产生不利影响^[1]。尤其自2021年10月以来,山西、陕西两省突降暴雨,致使多地内涝灾害肆虐,但许多道路由于黄土边坡浅层滑塌而中断,严重拖延了救援进度。因此,开展暴雨作用下黄土边坡坡面防护研究,有着十分重要的实际工程意义。

现阶段,许多学者从土壤改良的角度出发,通过将加固材料加入土壤而形成具有较高抗侵蚀能力的加固土体,并将其覆盖于土质边坡表面以起到防护作用^[2-6]。伴随“绿水青山”、“碳中和”等环保理念的兴起,生物聚合物作为可持续再生的环境友好型材料,凭借着对土体强化的高效性、对环境的低影响性,以及潜在的成本节约效益等优点^[7-8],受到广泛关注,尤其在提升黄土水稳特性方面,生物聚合物相比石灰、纳米二氧化硅等材料具有显著优势^[9],较为适合用于黄土边坡表面以抵抗降雨的侵蚀作用。关于其固化土工程特性的研究,目前已取得丰富成果。周天宝等^[10]发现黄原胶可以显著增强粉土的无侧限抗压强度。William等^[11]发现少量的壳聚糖或纤维素等在减少土壤侵蚀方面有显著效果。贺智强等^[12]、刘钊钊等^[13]发现木质素可以有效改善黄土的力学及水力特性。Chang等^[14-16]发现黄原胶、热凝胶及葡聚糖均能有效增强土壤机械强度,并降低其渗透系数。Sujatha等^[17]发现经瓜尔豆胶处理后土壤的稳定性得到了显著改善。以上试验均说明生物聚合物能够有效提升土壤的工程特性,但需要指出的是不同生物聚合物类

型对土壤性能的强化效果有所差异。因此,一些学者采用几种价格适中、获取容易的生物聚合物来处理土壤以对比分析其对于土样强化效果的差异。Ayeledeen等^[18-19]、Chen等^[20]研究表明,瓜尔豆胶在增强强度、改善渗透性以及提升保水能力方面相比黄原胶、改性淀粉更有效。这是因为瓜尔豆胶作为自然界中分子量最高的水溶性多糖^[8],极易与水分子发生反应,在土壤基质内颗粒间产生交联,导致其对土样的强化程度显著^[20]。然而,目前关于瓜尔豆胶在土壤固化以及在边坡防护领域方面的研究主要集中于国外,国内相关研究还较为有限,且固化土体多以砂土、粉土以及膨胀土为主,鲜有涉及到黄土。

因此,本文采用瓜尔豆胶对黄土进行固化处理,通过开展直剪试验和渗透试验,探讨了瓜尔豆胶固化黄土的强度以及渗透特性,并基于模拟暴雨边坡冲刷试验,验证了暴雨条件下瓜尔豆胶固化黄土的抗冲刷能力。此外,对比素黄土与固化黄土的微观结构,分析了瓜尔豆胶对黄土的加固机制。研究成果对黄土地区工程建设和边坡坡面防护具有重要参考意义。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验黄土取自陕西延安地区某黄土边坡的马兰黄土。将其风干碾碎,过2 mm筛后备用。参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)获得其基本物理指标:含水率12%,干密度 1.41 g/cm^3 ,液限25.5%,塑限16.4%,最优含水率17%,最大干密度 1.7 g/cm^3 ,其颗粒级配曲线如图1所示。

试验用生物聚合物为瓜尔豆胶,为半乳甘露聚糖最便宜的来源之一,其无毒、无害、无污染,且pH稳定,是一种可持续再生的碳中性材料^[21]。此外,作为

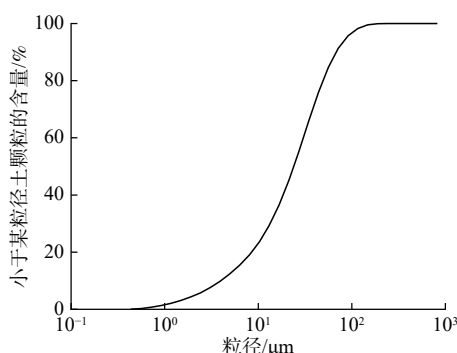


图1 黄土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve of loess particles

自然界目前已知分子量最高的水溶性多糖,其分子量可达 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ g/mol, 直接导致其凝胶在低质量分数下仍呈现出很高的黏度,在冷水中即可分散形成半透明的稠液^[8],其粉末及稠液形态如图2所示。



图2 瓜尔豆胶

Fig. 2 Guar gum

1.2 试验方法

1.2.1 直剪试验

抗剪强度是土样抵抗剪切破坏时的极限强度,是影响土体抵抗雨滴溅蚀的重要参数^[22]。试验步骤依照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的快剪试验进行,试验仪器采用ZJ型应变控制式直剪仪,剪切速率设置为0.08 mm/min,试验中施加的垂直压力为50, 100, 150, 200 kPa。为了得到较为均匀的生物聚合物分布,土样采用干混合法将瓜尔豆胶粉末与黄土混合均匀后加水压样制备^[10,14]。制备过程中控制干密度为 1.7 g/cm^3 , 含水率为17%,规格为 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,瓜尔豆胶掺量为质量比0%、0.25%、0.5%、1.0%、1.5%,室内标准养护条件为温度 $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 95\%$,养护龄期为3, 7, 28 d。

1.2.2 渗透试验

渗透试验中的试样配合比与直剪试验中相同,试样规格为 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。试验仪器采用TST-55型渗透试验仪,试验依照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的变水头渗透试验进行。

1.2.3 模拟暴雨边坡冲刷试验

图3为模拟暴雨边坡冲刷试验示意图,主要包括边坡模型主体和模拟降雨装置2部分。

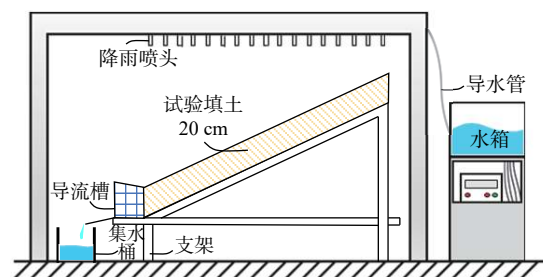


图3 模拟暴雨边坡冲刷试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the slope scour test in simulated rainstorm

边坡模型的试验主体砌筑在木制立方体箱中,具体尺寸为长100 cm、宽30 cm、高30 cm。模型土体分层夯实,需要说明的是上层土体砌筑前应在下层土体表面进行拉毛处理,以增加层间土体的附着力。试验填土厚度为20 cm,干密度为 1.7 g/cm^3 ,含水率为17%,可分为无防护边坡模型和固化土防护边坡模型2种;无防护边坡模型试验填土均为素黄土,固化土防护边坡模型试验填土分为12 cm素黄土基底和8 cm防护层,其中防护层中加入的瓜尔豆胶掺量为质量比1.0%。为了模拟实际工程条件,边坡模型填筑完成后,用塑料薄膜覆盖坡面在室内自然条件下进行养护,养护7 d后进行测试。本次冲刷试验中的黄土边坡模型坡比设置为1:0.75。

降雨装置采用DIK-6000型人工降雨模拟器,包括雨滴生产装置与供水控制装置(图4),技术参数如表1所示。为了模拟暴雨条件,本次冲刷试验中的模拟降雨强度取模拟器降雨强度最大值,为80 mm/h。乔勇虎等^[23]研究表明,当雨强一定时,1 h左右的短阵型降雨侵蚀力较大,更容易诱发土壤侵蚀。因此,降雨历时设计为60 min。

冲刷试验开始后,每隔5 min利用导水槽以及集水桶采集1个冲刷径流水样,后通过烘干法测定其含泥量。同时通过高锰酸钾示踪法来测定坡底断面的实际流速,流速测距为1 m,流速测算3次后平均,以得到坡面最大流速,该最大流速乘以修正系数,即可得到该时段的坡面流速。修正系数与水流的流态密切相关,本试验中修正系数参考文献[24],选取0.75。

1.2.4 扫描电镜试验

为了研究瓜尔豆胶处理对土样微观结构的影响,探讨瓜尔豆胶对于黄土的加固机制,制备了素黄土和



图 4 DIK-6000 型人工降雨模拟器

Fig. 4 DIK-6000 artificial rainfall simulator

表 1 人工降雨模拟器的技术参数

Table 1 Technical parameters of the artificial rainfall simulator

型号	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	有效降雨 面积/m ²	有效降雨 高度/m	雨滴直径/ mm
DIK-6000	10 ~ 80	1.040 4	2	1.7 ~ 3.0

固化黄土的 SEM 样品进行对比分析。采用压样法制备土样, 样品参数为: 干密度 1.7 g/cm³, 含水率 17%, 瓜尔豆胶掺量质量比依次为 0%、1.0%, 养护龄期 7 d。待试样成型后, 捣碎成大小适中的碎块, 真空镀金后, 利用 Quanta 600FEG 场发射扫描电镜进行观测。

2 试验结果与分析

2.1 瓜尔豆胶固化黄土的强度特性

不同试样的直剪试验结果如表 2 所示。整体来看, 瓜尔豆胶固化黄土呈现出较高的抗剪强度, 其黏聚力和内摩擦角均得到提升, 且主要以黏聚力为主。比较发现, 当掺量为 1.0%、龄期为 28 d 时, 瓜尔豆胶固化黄土的抗剪强度达到最大值, 其黏聚力和内摩擦

表 2 不同试样的黏聚力及内摩擦角

Table 2 Cohesion and internal friction angle of different samples

瓜尔豆胶掺量/%	养护龄期/d	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0.00	7	66.08	27.0
	3	66.17	27.5
0.25	7	76.62	28.1
	28	79.78	28.4
0.50	3	69.65	28.1
	7	79.78	28.3
0.50	28	81.95	28.8
1.00	3	76.77	27.9
	7	101.56	28.5
1.00	28	105.64	28.9
1.50	3	75.18	27.1
	7	80.82	27.3
1.50	28	83.87	28.6

角相比素黄土提升了 59.9% 和 7.0%。

不同固化黄土试样对应的黏聚力及内摩擦角变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知:

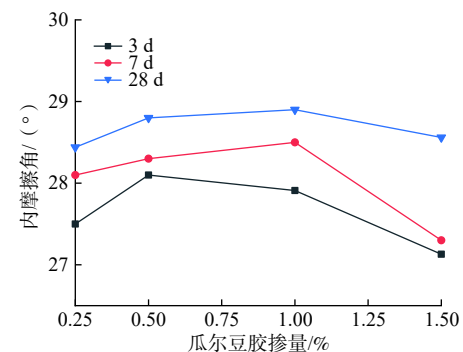
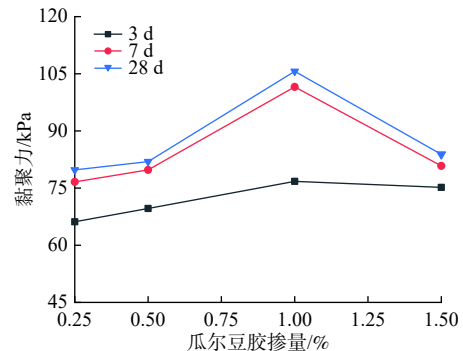


图 5 不同固化黄土试样对应的抗剪强度参数

Fig. 5 Shear strength parameters corresponding to different biopolymers-reinforced loess samples

(1) 当养护龄期一定时, 随瓜尔豆胶掺量增加, 土样的黏聚力和内摩擦角呈现出相同的变化趋势, 即先增加后减小, 尤其在瓜尔豆胶掺量为 1.0% 时, 两者数值均达到最大, 则可称该掺量为考虑瓜尔豆胶固化黄土抗剪强度时的最优掺量。类似的生物聚合物固化土力学强度的最优掺量现象在许多学者的研究中都有出现, 例如 Puppala 等^[3]发现当生物聚合物超过 0.5% 时, 试样的抗剪强度出现减小的情况; 贺智强等^[12]得到最佳生物聚合物掺量为土干重比 1.0%; Chang 等^[14]的研究表明, 对土体无侧限抗压强度增强最有效的生物聚合物掺量区间在 1% ~ 1.5%。分析原因, 主要因为生物聚合物水凝胶对于土样的强化作用不随掺量成正相关关系。当生物聚合物掺量较低时, 水凝胶主要起到填孔作用和胶结作用, 促进颗粒间形成交联, 形成具有一定强度的瓜尔豆胶-黄土基质, 直接增强土样的抗剪强度。但当生物聚合物掺量超过最优掺量时, 除上述的填孔、胶结作用外, 水凝胶自身含量的增加, 也会导致土颗粒间距过大, 相应的土颗粒间吸力减小, 反而会产生“润滑作用”, 使得土样在剪切

过程中更容易发生被剪切破坏^[3,12]。

(2)当瓜尔豆胶掺量一定时,随养护龄期增加,土样的黏聚力和内摩擦角均呈现先增加后稳定的变化趋势,特别是黏聚力的变化幅度较为明显,在固化7 d内得到了明显的增幅,而内摩擦角的增幅始终在1°~2°以内,变化不大。因此,在实际工程应用中,瓜尔豆胶固化黄土应起码养护7 d以上才可使用。此时,对于掺量为1.0%的瓜尔豆胶固化黄土来说,其黏聚力和内摩擦角相比素黄土提升了53.7%和5.6%。分析认为,瓜尔豆胶分子量较大,其上富集的高反应基团(如羟基、羧基和氨基)^[8]容易与水结合形成具有较高黏性的凝胶,从而与土壤颗粒表面结合,而在该界面上起作用的力包括离子/静电或共价键、氢键和范德华力,且上述作用力的形成时间不同。其中,以离子/静电或共价键的键能最强,在一定时间内逐渐形成,而范德华力形成时间较长,但作用力相对较弱^[19]。因此,随着养护龄期的增长,上述反应逐渐完全,土体的抗剪强度得以提升,但强度增长幅度逐渐下降。

2.2 瓜尔豆胶固化黄土的渗透特性

不同试样的渗透试验结果如表3所示,不难看出,经瓜尔豆胶处理后,土样的抗渗透性得到显著改善,尤其当瓜尔豆胶掺量为1.5%、养护龄期为28 d时,土样的饱和渗透系数达到最小值,不足素黄土的1/10。

不同固化黄土试样对应的饱和渗透系数变化曲线如图6所示。由图6可以看出,土样的饱和渗透系数随瓜尔豆胶掺量增加及养护龄期增长而降低。相比较而言,土体的饱和渗透系数受瓜尔豆胶掺量影响显著,整体大幅下降,而受养护龄期影响不大,至养护7 d后,饱和渗透系数的变化趋势基本保持稳定,以瓜尔豆胶掺量为1.0%的固化黄土为例,其数值相比素黄土降低了78.3%。分析其原因,主要由于瓜尔豆胶可以与水发生水化反应形成具有较强黏性以及胶凝性能的水凝胶,该水凝胶有效填充土颗粒间孔隙的同时,也起到了堵塞入渗通道的作用^[19],从而物理阻挡水流量的流动。此外,由于水凝胶中含有大量的高反

表 3 不同试样的饱和渗透系数

Table 3 Saturation permeability coefficient of different samples

瓜尔豆胶掺量/%	养护龄期/d	饱和渗透系数/(10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹)
0.00	7	8.56
	3	7.46
0.25	7	7.12
	28	6.92
0.50	3	5.17
	7	4.67
	28	4.32
1.00	3	2.58
	7	1.86
	28	1.63
1.50	3	1.03
	7	0.89
	28	0.78

应亲水基团,对水分产生一定吸附作用,同样能够减缓水分的渗流,且上述过程均伴随养护龄期的增长而逐渐明显,但总体影响不大。

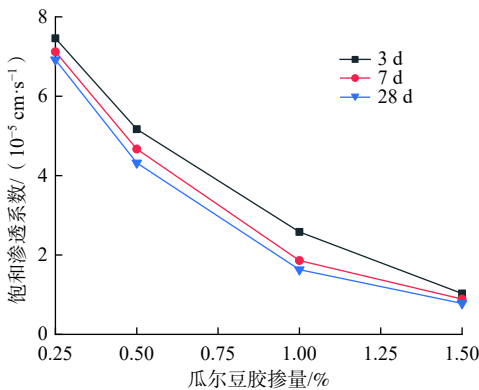


图 6 不同固化黄土试样对应的饱和渗透系数

Fig. 6 Saturation permeability coefficient corresponding to different biopolymers-reinforced loess samples

2.3 模拟暴雨边坡冲刷试验结果分析

表4为模拟暴雨边坡冲刷试验结果。结果显示,固化土防护边坡模型相比于无防护边坡模型出现了坡面含泥量小、流速大的试验现象。由此可见,瓜尔豆胶固化黄土具有良好的抗暴雨冲蚀能力,即能够在

表 4 各时段边坡坡面的含泥量与流速

Table 4 Mud content and velocity of slope in each period

防护类型	参数	时间/min											
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
无防护	含泥量/kg	0.666	0.923	1.030	1.017	1.018	1.071	0.996	1.070	1.055	1.089	1.089	1.241
	流速/(m·s ⁻¹)	0.157	0.147	0.121	0.128	0.125	0.120	0.113	0.117	0.118	0.118	0.121	0.115
固化土防护	含泥量/kg	0.584	0.384	0.431	0.454	0.439	0.420	0.356	0.292	0.306	0.245	0.214	0.239
	流速/(m·s ⁻¹)	0.221	0.249	0.208	0.177	0.167	0.193	0.184	0.198	0.181	0.185	0.172	0.193

暴雨条件下对黄土边坡坡面起到较好的防护作用,从而在一定程度上避免坡面冲蚀向深部发育所导致的边坡滑塌发生。经计算可得,无防护边坡坡面的累计冲刷量为 12.265 kg,平均流速为 0.125 m/s;固化土防护边坡坡面的累计冲刷量为 4.364 kg,平均流速为 0.194 m/s。防护边坡坡面相比于无防护边坡坡面的累计冲刷量降低了 64.4%,平均流速提升了 55.2%。

图 7 为边坡模型坡面的含泥量随降雨历时的变化曲线。结果表明,固化土防护边坡模型的含泥量较低,并且随降雨历时增长而减少,整体变化幅度较小;而无防护边坡模型的含泥量变化与固化土防护边坡模型的变化情况刚好相反,即随降雨历时增长而增加,整体变化幅度较大。分析认为,瓜尔豆胶在填充土体孔隙和削弱颗粒运移空间等方面起到了促进作用,同时作为胶凝材料可以将黄土颗粒紧密胶结,促使坡面表层土体成为一个整体来抵抗雨滴溅蚀、渗流软化以及径流冲刷等作用力的破坏,具体体现为固化土防护边坡的坡面具有较强的抗降雨冲蚀能力。

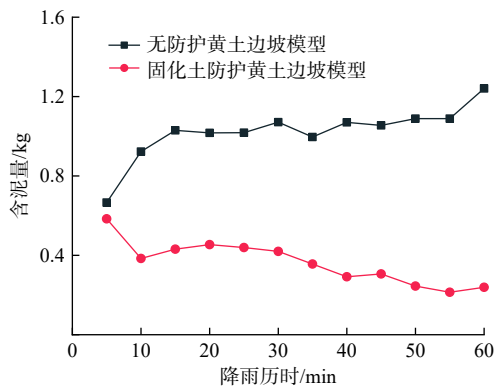


图 7 边坡模型坡面的含泥量随降雨历时的变化曲线

Fig. 7 Variations of sediment content on slope model with rainfall duration

图 8 为边坡模型坡面的流速随降雨历时的变化曲线。可以发现,固化土防护边坡与无防护边坡的流速变化趋势相似,均随降雨历时增长而降低,并逐渐维持在一个稳定的数值。此外,两者变化幅度差异明显,尤其是固化土边坡流速的下降幅度较大,但数值却始终维持在较高水平。这与袁和第等^[25]的高降雨强度作用下坡面流速试验结果较为相似,均可以结合坡面的土壤粗化以及细沟发育来进行分析,区别在于袁试验土体最大粒径可达 10 mm,这使得其在降雨过程中容易出现坡面粗颗粒和砾石富集的情形,导致径流阻力随坡面糙率逐渐增强,坡面流速随之快速降低^[26]。而在本试验中,尽管黄土粒径最大仅为 2 mm,

但由于瓜尔豆胶水凝胶较高的黏度,能够将颗粒牢固地胶结在一起,在固化土防护边坡坡面形成类似粗颗粒形态的团聚体结构,进而发挥相近的减蚀作用,出现相似的试验结论。同时,坡面表层土体的粗糙化也会抑制细沟的发育^[27],保证了边坡坡面的相对完整,导致固化土防护边坡总体呈现较高的坡面流速。

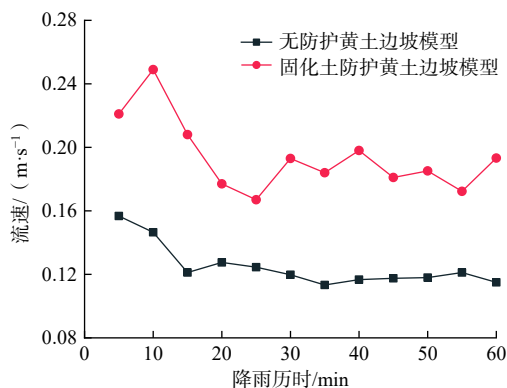


图 8 边坡模型坡面的流速随降雨历时变化曲线

Fig. 8 Variations of velocity on slope model with rainfall duration

3 瓜尔豆胶对黄土的加固机制探讨

图 9 为放大 1 000 倍和 5 000 倍时素黄土与固化黄土的微观结构。由图 9(a)可知,在 1 000 倍镜下时,素黄土中的颗粒轮廓清晰,棱角分明,表面有一定程度的黏土化,碎屑小颗粒富集,多数呈现粒状以及板状;粒间孔隙十分发育,主要呈现出缝隙状及不规则状。在 5 000 倍镜下时,素黄土中的孔隙明显,孔隙类型以镶嵌孔隙与团块间孔隙为主;黏粒胶结处有少许胶结物发育,促使土颗粒黏结在一起。

由图 9(b)可知,在 1 000 倍镜下时,固化黄土中的颗粒边界变得模糊不清,颗粒表面黏附的胶结物质增多,胶结物质不仅吸附许多碎屑颗粒而形成 1 层包裹于土颗粒表面的凝胶薄膜,而且同样分布于 2 个土颗粒间相互接触的区域,加之少许丝状连接作用将若干颗粒黏结成一个整体;原有孔隙被大量胶结物填充,大孔隙相比素黄土大幅减少,连通性较差。在 5 000 倍镜下时,固化黄土中出现团聚体结构,其间孔隙连通性较差,且多以圆点状及细缝状为主,颗粒之间排列相比于素黄土更为紧密,土颗粒之间的黏聚力得到增强,水分入渗通道出现阻挡,验证了前文对于试验结果的分析。

综上所述,瓜尔豆胶固化土结构的产生主要依赖于瓜尔豆胶与水发生水化反应而产生的水凝胶^[10,18]。

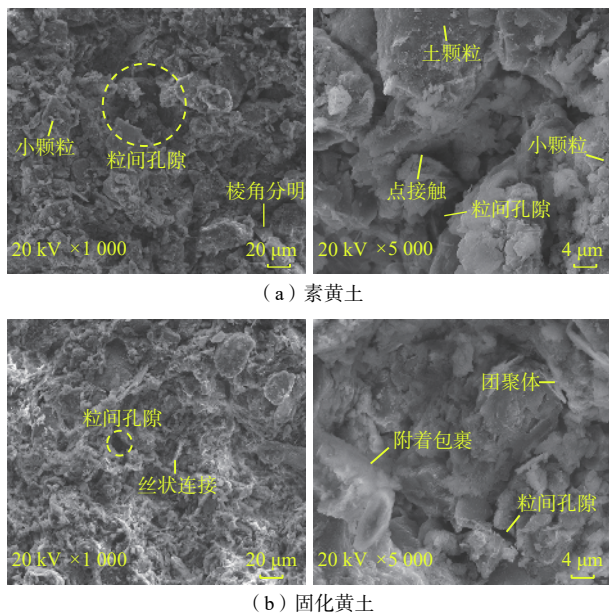


图9 素黄土和固化黄土的 SEM 照片

Fig. 9 SEM images of untreated loess and biopolymers-reinforced loess

结合其微观结构观测结果,水凝胶对于土体的固化作用主要包括:一是有效填充孔隙,其充盈于原有大孔隙中,造成土样密实,水分入渗困难,并形成具有一定强度的瓜尔豆胶-黄土基质,从而增强土体的强度;二是胶结黄土颗粒,限制颗粒的移动,维持土体的整体性,从而更好地抵抗外部荷载的破坏。

4 结论

(1)瓜尔豆胶的处理有效提升了黄土的抗剪强度和抗渗透性。固化黄土的黏聚力和内摩擦角随瓜尔豆胶掺量增加而先增加后减小,随养护龄期增长而增加,而其饱和渗透系数随瓜尔豆胶掺量增加和养护龄期增长而减小。掺量 1.0%、龄期 7 d 的固化黄土相比于素黄土,其黏聚力和内摩擦角提升了 53.7% 和 5.6%,饱和渗透系数降低了 78.3%。

(2)经瓜尔豆胶处理后黄土边坡坡面的抗冲蚀效果明显。随降雨历时增长,固化土防护黄土边坡坡面的含泥量减少、流速快速降低,而无防护黄土边坡坡面的含泥量增加、流速缓慢降低。采用瓜尔豆胶掺量为 1.0%、养护龄期为 7 d 的固化土防护黄土边坡坡面相比于无防护黄土边坡坡面,其累计冲刷量降低了 64.4%,平均流速提升了 55.2%。

(3)瓜尔豆胶对于黄土的加固机制主要在于其水化反应产生的水凝胶填充孔隙和胶结黄土颗粒,从而使土样原有大孔隙减小,水分入渗难度增加,并维持

了土样的整体性。宏观表现为可以有效提升土体的抗侵蚀能力,在黄土边坡坡面防护工程实际应用中具有推广价值。但本文尚未研究瓜尔豆胶固化黄土的长期耐久性问题,后续有必要对此开展针对性研究。

参考文献 (References) :

- [1] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2004,41(4):632-635. [TANG Zejun, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Quantitative determination of the impacts of raindrop splash and crust on soil erosion with ree experimental data[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 632-635. (in Chinese with English abstract)]
- [2] LIU J, CHEN Z H, KANUNGO D P, et al. Topsoil reinforcement of sandy slope for preventing erosion using water-based polyurethane soil stabilizer[J]. Engineering Geology, 2019, 252: 125-135.
- [3] PUPPALA A J, PEDARLA A. Innovative ground improvement techniques for expansive soils[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2(1): 1-15.
- [4] 安宁,晏长根,王亚冲,等.聚丙烯纤维加筋黄土抗侵蚀性能试验研究[J].岩土力学,2021,42(2):501-510. [AN Ning, YAN Changgen, WANG Yachong, et al. Experimental study on anti-erosion performance of polypropylene fiber-reinforced loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 501-510. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 沙琳川,王桂尧,张永杰,等.含水率与加筋率对加筋土抗剪强度的影响规律研究[J].水文地质工程地质,2018,45(2):51-58. [SHA Linchuan, WANG Guiyao, ZHANG Yongjie, et al. A study of influence of water content and reinforcement ratio on the shear strength of reinforced soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 51-58. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 徐岗,裴向军,袁进科,等.改性纳米硅材料加固松散砂土的工程特性研究[J].水文地质工程地质,2019,46(4):142-149. [XU Gang, PEI Xiangjun, YUAN Jinke, et al. A study of the engineering characteristics of reinforced loose sand by modified nano-Si materials[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 142-149. (in Chinese with English abstract)]
- [7] CHANG I, IM J, CHO G C. Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering[J]. Sustainability, 2016, 8(3): 251.
- [8] SHARMA G, SHARMA S, KUMAR A, et al. Guar gum and its composites as potential materials for diverse

- applications: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 199: 534 – 545.
- [9] 祝艳波, 李红飞, 巨之通, 等. 黄土抗剪强度与耐崩解性能综合改良试验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 221 – 233. [ZHU Yanbo, LI Hongfei, JU Zhitong, et al. Improvement of shear strength and anti-disintegration performance of compacted loess[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 221 – 233. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 周天宝, 张福海, 周炳生, 等. 生物聚合物固化粉土室内试验与机理研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(1): 107 – 110. [ZHOU Tianbao, ZHANG Fuhai, ZHOU Bingsheng, et al. Laboratory experiment and mechanism of solidified soil of biopolymer[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(1): 107 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [11] ORTS W J, SOJKA R E, GLENN G M. Biopolymer additives to reduce erosion-induced soil losses during irrigation[J]. *Industrial Crops and Products*, 2000, 11(1): 19 – 29.
- [12] 贺智强, 樊恒辉, 王军强, 等. 木质素加固黄土的工程性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(3): 731 – 739. [HE Zhiqiang, FAN Henghui, WANG Junqiang, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(3): 731 – 739. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘钊钊, 王谦, 钟秀梅, 等. 木质素改良黄土的持水性和水稳性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2582 – 2592. [LIU Zhaozhao, WANG Qian, ZHONG Xiumei, et al. Water holding capacity and water stability of lignin-modified loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2582 – 2592. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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.
- [15] CHANG I, PRASIDHI A K, IM J, et al. Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 77: 430 – 438.
- [16] CHANG I, CHO G C. Strengthening of Korean residual soil with β -1, 3/1, 6-glucan biopolymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 30 – 35.
- [17] SUJATHA E R, SAISREE S. Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(6): 2155 – 2166.
- [18] AYELDEEN M K, NEGM A M, EL SAWWAF M A. Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(5): 1 – 13.
- [19] AYELDEEN M, NEGM A, EL-SAWWAF M, et al. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(2): 329 – 339.
- [20] CHEN R, ZHANG L Y, BUDHU M. Biopolymer stabilization of mine tailings[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(10): 1802 – 1807.
- [21] STUPP S I, BRAUN P V. Molecular manipulation of microstructures: Biomaterials, ceramics, and semiconductors[J]. *Science*, 1997, 277(5330): 1242 – 1248.
- [22] 周春梅, 王宇, 吕雷, 等. 雨滴溅蚀下压实黄土变形破坏规律研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(6): 93 – 98. [ZHOU Chunmei, WANG Yu, LYU Lei, et al. Research on deformation of compacted loess under raindrop splash erosion[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(6): 93 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 乔勇虎, 郭东静, 陈锡云. 泾河南小河流域自然降雨特性[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 133 – 138. [QIAO Yonghu, GUO Dongjing, CHEN Xiyun. Characteristics of natural rainfall of Nanxiahegou Basin in Jinghe River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 133 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 左烽林, 钟守琴, 冉卓灵, 等. 紫色土丘陵区新改土坡面产流产沙及水动力学参数特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 59 – 66. [ZUO Fenglin, ZHONG Shouqin, RAN Zhuoling, et al. Characteristics of sediment and hydrodynamic parameters of new reconstructed slope soil in the hill area with purple soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 59 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 袁和第, 信忠保, 蒋秋玲, 等. 连续降雨作用下褐土坡面侵蚀及其水动力学特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 14 – 20. [YUAN Hedi, XIN Zhongbao, JIANG Qiuling, et al. Slope erosion and its hydrodynamic characteristic of cinnamon soil under continuous rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 14 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [26] ZHANG G H, LIU G B, TANG K M, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the loess plateau of China[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(3): 883 – 890.
- [27] ZHANG X C, ZHANG G H, GARBRECHT J D, et al. Dating sediment in a fast sedimentation reservoir using cesium-137 and lead-210[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 948 – 956.

编辑: 张明霞