

文章编号:1673-9469(2024)02-0043-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.007

刺槐豆胶改良黏土强度抗压抗拉力学特性试验研究

齐梦瑶¹, 胡梦园¹, 刘瑾^{1*}, 车文越¹, 兰小威², 马柯¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 广西北投环保水务集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 为了研究刺槐豆胶改良黏土强度的效果, 对不同养护龄期、刺槐豆胶掺量的改良黏土分别进行无侧限抗压强度试验以及抗拉试验研究。结果表明: 刺槐豆胶的掺入可以显著改善黏土的抗压和抗拉性能。当养护龄期一定时, 随着刺槐豆胶掺量的增加, 改良黏土的抗压和抗拉强度均呈增长趋势, 通过对比可知, 刺槐豆胶的最优掺量为2%, 试样的抗压和抗拉强度的最大值分别提升至425.74及234.61 kPa, 与素土相比均提高约1.8倍; 当刺槐豆胶掺量一定时, 养护龄期对改良黏土的抗压、抗拉强度也有一定的影响。在刺槐豆胶掺量相同的条件下, 养护龄期为7 d时, 试样抗压、抗拉强度提升量最大, 最大提升量分别为68.12和34.39 kPa。刺槐豆胶在土体表层形成一层胶质薄膜, 并利用自身延展性填充土颗粒间孔隙, 改善了土体的粒间结构, 增强土体的稳定性, 从而提升黏土的强度特性。随着养护龄期的增加, 胶质薄膜逐渐收缩, 使土体颗粒排列更加紧密, 进而提高改良黏土体的无侧限抗压强度及抗拉强度。

关键词: 黏土; 刺槐豆胶; 无侧限抗压强度; 抗拉强度

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

Experimental Study on Compressive and Tensile Properties of Locust Bean Gum Modified Clay Soil Strength

QI Mengyao¹, HU Mengyuan¹, LIU Jin^{1*}, CHE Wenyue¹, LAN Xiaowei²,
MA Ke¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. Guangxi Beitou Environmental Water Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530029, China)

Abstract: In order to study the effect of locust bean gum to improve the strength of clay, unconfined compressive strength tests and tensile tests were conducted on improved clay with different curing ages and locust bean gum contents. The results indicate that the addition of locust bean gum can significantly improve the compressive and tensile properties of clay. When the curing age is fixed, with the increase of the locust bean gum content, the compressive and tensile strengths of the improved clay show an increasing trend. Through comparison, it can be seen that the optimal content of locust bean gum is 2%, and the maximum compressive and tensile strengths of the sample are increased to 425.74 and 234.61 kPa, respectively, which are about 1.8 times higher than those of the plain soil; When the dosage of locust bean gum is constant, the curing age also has a certain impact on the compressive and tensile strengths of the improved clay. Under the same dosage of locust bean gum, when the curing age is 7 days, the specimen compressive and tensile strength enhancement is the largest, the maximum enhancement is 68.12 and 34.39 kPa, respectively. Robinia pseudoacacia bean gum forms a layer of gum film on the surface of soil, and uses its own ductility to fill the pores between soil

收稿日期: 2023-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0207900)

作者简介: 齐梦瑶(1999-), 女, 河南开封人, 硕士研究生, 从事环境地质工程方面的研究。

* 通信作者: 刘瑾(1983-), 女, 福建漳州人, 工学博士, 教授, 从事工程地质领域的研究。

particles, improving the particle structure of the soil and its stability, and thus the strength characteristics of clay. As the curing age increases, the gum film gradually shrinks, making the arrangement of soil particles more compact, thereby improving the unconfined compressive strength and tensile strength of the improved cohesive soil.

Key words: clay; locust bean gum; unconfined compressive strength; tensile strength

自21世纪以来,国内经济不断发展,人民的生活水平得到了很好地提高。但人类的工程活动破坏了地表原有的结构,使得自然环境遭到破坏,近年来我国因边坡失稳造成的地质灾害屡见不鲜,人们的生活和财产安全都遭到了一定的威胁^[1-3]。对于软弱岩土层等不能满足人类工程需要的土体,需要采取一定的手段使其土体强度得到加强,改良其工程特性,以解决边坡失稳、路基塌陷等问题^[4-5]。

土壤固化技术是在工程性质不佳的土壤中加入固化材料,利用固化材料与土颗粒间的相互作用,增强其力学强度从而形成更稳定的整体^[6]。传统的固化措施是在软弱土层中加入水泥、石灰、粉煤灰等。随着工程可持续发展的需要,急需一种性能优异、环保无污染的工程加固材料^[7]。Latifi等^[8]探究了黄原胶加固膨胀性黏土的机理,并确定提升高岭石黏土力学特性的黄原胶最佳掺量为1.5%。刘瑾等^[9]自主研制了一种高分子稳定剂,对土质边坡坡面进行护坡修复,综合评价其抗冲刷性、坡面破坏程度、植被生长情况等,验证了高分子稳定剂的生态护坡效果。Jia等^[10]采用瓜尔胶固化纤维加固黄土,试验证明瓜尔胶固化处理可以促进纤维加长、填充孔隙并粘结黄土颗粒,从而加强黄土的力学性质和水理特性。吕家栋等^[11]探究了不同掺量黄原胶对黏土抗弯强度及断裂性能的影响,结果表明这些性能的提高与黄原胶掺量呈正相关。

本文选用刺槐豆胶(Locust Bean Gum, LBG)作为土壤固化剂,对阳朔地区河道岸坡黏土层改良加固,进行室内试验。目前大多数学者对于刺槐豆胶的研究仅限于将其应用于食品加工上,而对其改良土壤的性能研究相对不足。Schorsch等^[12]将黄原胶分别与瓜尔胶和刺槐豆胶混合,研究其不同分子量对其协同作用效果的影响。Casas等^[13]对黄原胶与刺槐豆胶的混合物展开研究,探究该溶液在不同温度、不同多糖浓度下的流变性能。本文通过无侧限抗压强度试验和抗拉试验,设置刺槐豆胶掺量以及养护龄期两种变

量,根据试验结果分析讨论刺槐豆胶对改良黏土强度和破坏形态的影响,并结合扫描电镜结果分析其加固机理,为刺槐豆胶改良黏土力学特性提供借鉴。

1 试验方案

1.1 试验材料与仪器

本试验采用的黏土取自广西省桂林市阳朔县新城区河道岸坡的松散层,将黏土置于110℃烘箱中干燥8h,烘干磨碎后过2mm(10目)筛备用,过筛后的土见图1(a),其物理性质见表1,黏土颗粒粒径分布曲线如图1(b)。试验采用的刺槐豆胶(LBG)为白色或微黄色粉末,见图1(c),无臭或稍带臭味,是一种半乳糖甘露聚糖,其半乳糖与甘露糖的比例约为1:4.4^[14]。图1(d)为刺槐豆胶的分子结构式,可以呈现无半乳糖连接的自由基区(称为“光滑区”)或具有大量半乳糖阳离子的区(毛状区)^[13,15]。

无侧限抗压强度试验采用的仪器为YYW-2型应变控制式无侧限压力仪,见图2(a);抗拉试验采用的是课题组自主设计的抗拉仪器,见图2(b),主要由试样放置盒、数据记录器、手轮、导杆和拉力传感器组成^[16]。

1.2 设计方案

为了探究刺槐豆胶掺量与养护龄期对改良广西黏土力学性质的影响,采用无侧限抗压试验和抗拉试验,对试验结果进行对比分析。本次试验设置的变量为刺槐豆胶掺量以及黏土试样的养护龄期。其中,土体含水率取23%;刺槐豆胶的掺量分别取0%、0.5%、1%、1.5%、2%;黏土的养护龄期分别设置为1、2、4、7d(表2)。

采用干拌和法将刺槐豆胶与处理后黏土混合均匀,随后向混合土体中缓慢加入蒸馏水,用刮土刀将土体与蒸馏水搅拌均匀以备。在制作试样之前,均需先取少许凡士林涂抹于模具壁上,便于后续土样的脱模处理。按照试验方案配比不同掺量的刺槐豆胶,其掺量 C 的计算如公式(1)所示,

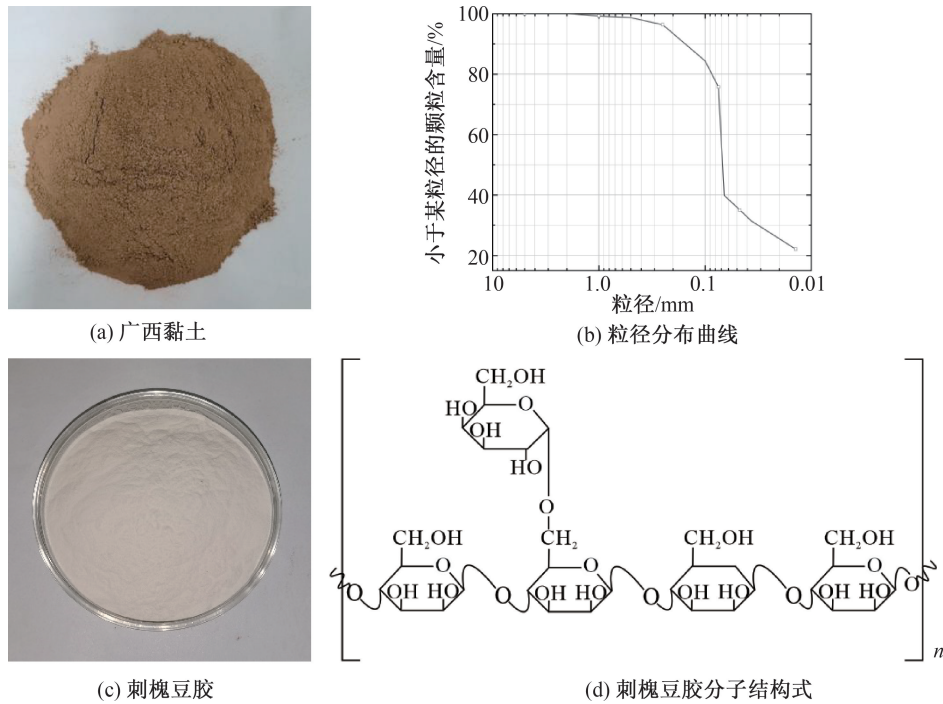


图 1 试验材料

Fig. 1 Test materials

表 1 试验用黏土的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of the tested clays

天然含水率 $\omega/\%$	最大干密度 ρ $/(g \cdot cm^{-3})$	中值粒径 $d_{50}/$ mm	液限 ω_l $\%$	塑限 ω_p $\%$	塑性指数 I_p
23	1.71	0.069	45.5	24.1	21.4



(a) YYW-2型应变控制式
无侧限压力仪

(b) 抗拉仪器

图 2 试验使用的仪器

Fig. 2 Instruments used in the experiment

表 2 无侧限单轴抗压强度试验及抗拉强度试验设计方案

Tab. 2 Design scheme for unconfined uniaxial compressive strength test and tensile strength test

编号	刺槐豆 胶掺量/ $\%$	养护 龄期/d	编号	刺槐豆 胶掺量/ $\%$	养护 龄期/d
1-1	0	1	3-3	1	4
1-2	0	2	3-4	1	7
1-3	0	4	4-1	1.5	1
1-4	0	7	4-2	1.5	2
2-1	0.5	1	4-3	1.5	4
2-2	0.5	2	4-4	1.5	7
2-3	0.5	4	5-1	2	1
2-4	0.5	7	5-2	2	2
3-1	1	1	5-3	2	4
3-2	1	2	5-4	2	7

试验流程及所用仪器如图 3 所示。

$$C = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C —刺槐豆胶掺量, $\%$; m —单个试样中掺入刺槐豆胶的质量, g ; M —单个试样中土体的质量, g 。

依据规范《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[17]制作抗压试样,在模具中制得直径 3.91 cm、高 8 cm 的圆柱形标准抗压试样,养护相应的龄期后进行试验。无侧限抗压强度试验中,在位移和应力百分表的指针均调零后,打开开关使得下加压板以 2.4 mm/min 的速率匀速上升,记录土样破

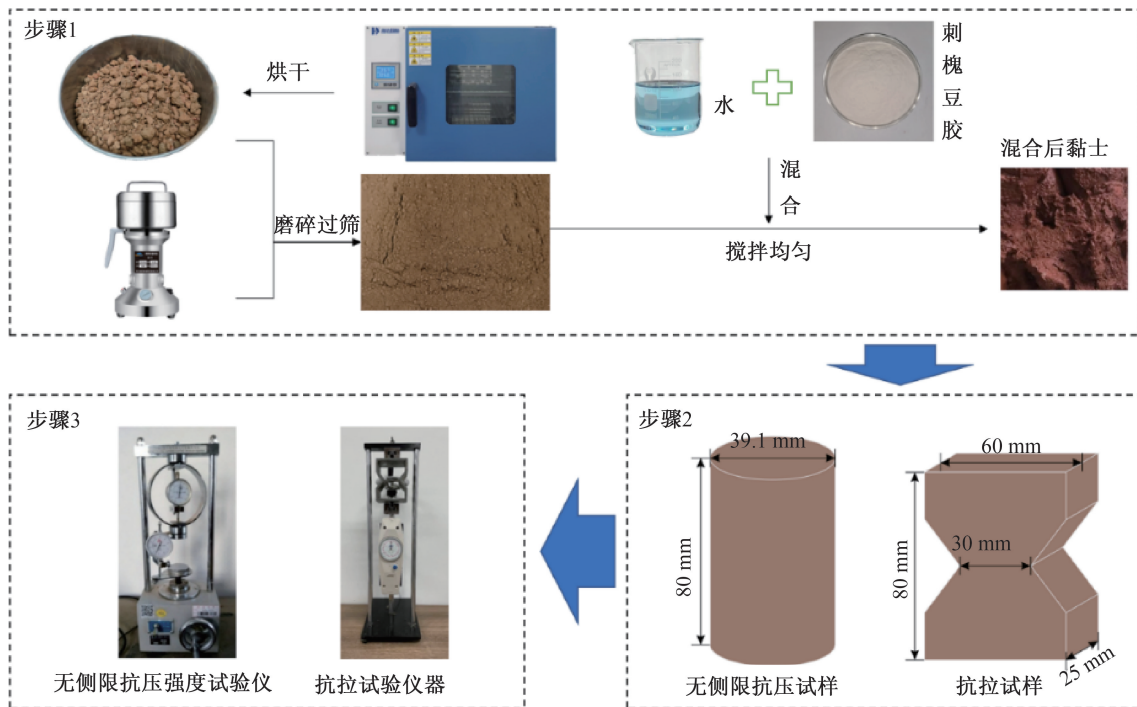


图3 试验流程图

Fig. 3 Flow chart of the test

坏的过程并记录数据,当应变百分比达 20%时停止试验。依据公式(2)计算试样的轴向应力 σ ,并取其最大轴向应力作为无侧限抗压强度。

$$\sigma = \frac{\alpha R}{A} \times 10 \quad (2)$$

式中: σ —轴向应力, kPa; α —测力计率定系数, N/0.01 mm; R —测力计系数, 0.01 mm; A —试样剪切时的面积, cm^2 。

使用抗拉试验模具制得长度 8 cm, 两端和中心宽度分别为 6、3 cm, 中间凹角为 106° , 高度 2.5 cm 的“8”字形抗拉试样。在抗拉试验进行时匀速转动手柄, 使试样均匀受力, 应变位移每变化 2 mm 时记录下测力计读数, 同时拍摄下试样的形态, 记录其变化过程, 直至试样被拉断。依据公式(3)计算试样达到破坏极限时的抗拉强度 σ_b 。

$$\sigma_b = \frac{2F + (m_1 + m_2)g}{2S} \quad (3)$$

式中: σ_b —抗拉强度, kPa; F —试验过程中试样的峰值拉力; m_1 —试样质量, g; m_2 —试样盒质量, g; g —重力加速度, m/s^2 ; S —破坏面面积, cm^2 。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

对改良黏土进行无侧限抗压强度试验, 设置

不同刺槐豆胶掺量和不同养护龄期两个变量, 分别制作三组平行样, 取其均值进行分析, 由结果可知, 刺槐豆胶掺量与养护龄期均对改良黏土的无侧限抗压强度特性有一定影响。

无侧限抗压强度试验的轴向应力-轴向应变曲线如图 4 所示。分析曲线可知, 素土和改良黏土的轴向应力-轴向应变曲线变化规律较为一致: 在低应变阶段, 轴向应力基本上呈线性增加, 试样在此阶段均为弹性变形; 当应变逐渐增加时, 轴向应力的增长速率减小, 直至轴向应力达到峰值, 该阶段为塑性变形; 随后试样开始发生破坏, 轴向应力逐渐减小。

对比图 4(a)~(d), 可见随着刺槐豆胶掺量的增加, 改良黏土试样的抗压强度逐渐增大, 曲线特征表现为从应变硬化向应变软化方向发展。在相同养护龄期下, 刺槐豆胶掺量越小, 应力-应变曲线越平缓, 掺量越大, 曲线的峰形越明显。素土及改良黏土刺槐豆胶掺量为 0.5%、1% 的曲线相似, 为平缓状, 起伏变化不明显; 高掺量改良黏土, 掺量 $C = 1.5\%$ 、 2% 时, 其峰值随着掺量的增加而增加, 两条曲线起伏形态相似, 变化特征无太大差别。说明当刺槐豆胶掺量较低, 小于 1% 时, 刺槐豆胶对黏土的抗压强度的改良较差, 当掺量 $C \geq 1\%$ 时刺槐豆胶对黏土的抗压强度的提高有显著影响。

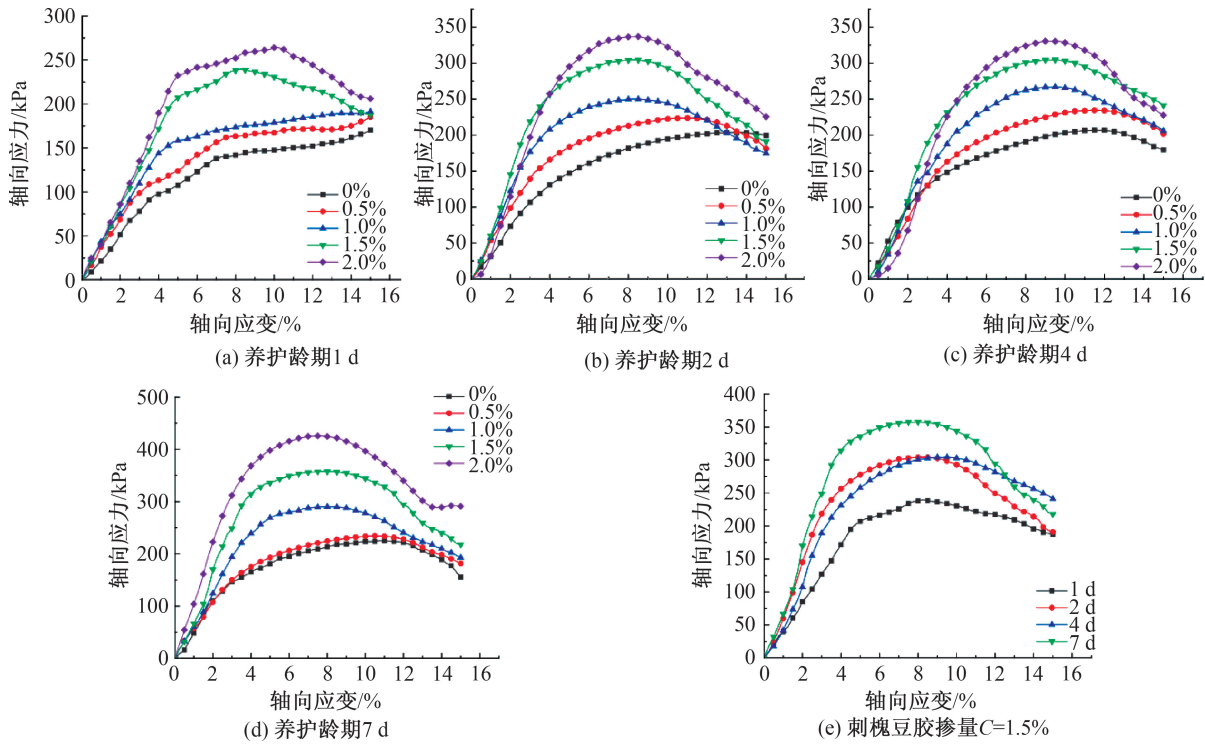


图 4 无侧限抗压强度轴向应力-轴向应变曲线

Fig. 4 Unconfined compressive strength axial stress versus axial strain curve

图 4(e) 为刺槐豆胶掺量 $C=1.5\%$ 时, 不同养护龄期的改良黏土应力应变曲线。由图可知, 在刺槐豆胶掺量相同的情况下, 养护龄期对改良黏土抗压强度的提升有一定的影响。在不同养护龄期下, 其应力-应变曲线形态大致相同, 随着养护龄期的增加, 改良黏土的抗压强度有所提升。养护龄期为 2 d 和 4 d 时, 试样峰值强度相同, 均为 304.5 kPa, 且分别在轴向应变为 8% 及 9.5% 处达到峰值强度, 说明在此阶段养护龄期的变化对改良黏土试样抗压强度的提升没有显著影响。在养护 7 d 时, 试样的峰值强度为 357.62 kPa, 为养护 1 d 试样抗压强度的 1.49 倍, 试样抗压强度得到

较大幅度提升。

图 5 为改良黏土无侧限抗压强度随掺量及养护龄期的关系图。由图可知, 刺槐豆胶掺量及养护龄期均对黏土抗压强度的提升具有积极影响。

从图 5(a) 可以看出, 在不同刺槐豆胶掺量下, 改良黏土的无侧限抗压强度增加, 且当刺槐豆胶掺量大于 1% 后, 改良黏土抗压强度得到大幅提升, 掺量从 1% 增加至 2%, 其抗压强度在养护龄期为 1、2、4 和 7 d 时分别增长了 72.71、86.67、63.69、135.51 kPa。

从图 5(b) 可以看出, 素土的养护龄期对无侧限

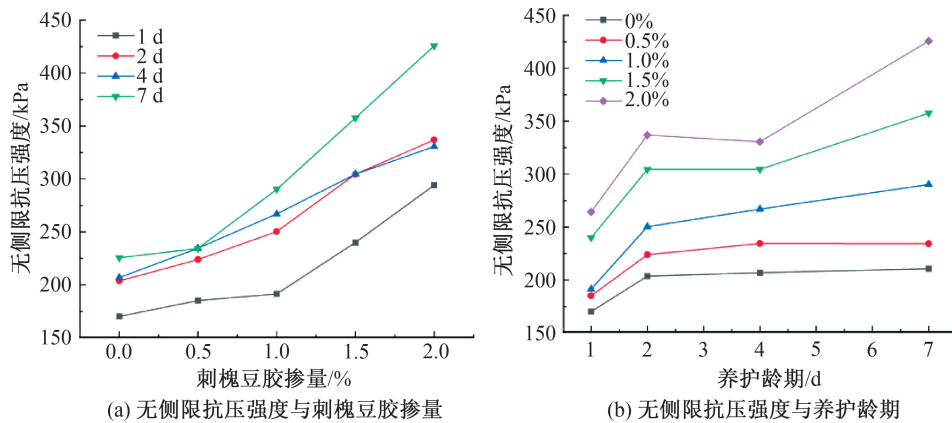


图 5 改良黏土无侧限抗压强度随掺量与养护龄期的关系

Fig. 5 Relationship between the unconfined compressive strength of improved clay with dosage and curing age

抗压强度的影响最小,随着养护龄期的增加,无侧限抗压强度从 170.18 kPa 增至 264.14 kPa。对于改良黏土而言,养护龄期对其抗压强度具有一定影响:当龄期小于 2 d 时,无侧限抗压强度增长速度较快;当龄期为 2 至 4 d 时,其无侧限抗压强度的增长速率减慢,增长幅度最大的是掺量为 1% 时,提高了 16.7 kPa;当龄期超过 4 d 后,刺槐豆胶的掺入量越高,试样的抗压强度增加幅度越明显。表明在养护初期,土体失水使得抗压强度上升;在 2 至 4 d 时,刺槐豆胶还未完全反应,所以在段时间抗压强度增长不明显,提高的强度有限;当龄期达到 7 d 时,由于土体均用保鲜膜包裹,水分含量变化较小,刺槐豆胶起到决定性作用,因而土体的无侧限抗压强度又有了一定幅度的增长。

2.2 抗拉强度

通过抗拉试验,取三组平行试样的平均值作为试验结果,对比不同刺槐豆胶掺量和不同养护龄期对改良黏土抗拉强度的影响,其结果分别如图 5、图 6 所示。分析结果可知,养护龄期变化对改良砂土抗拉强度有显著的积极影响。

改良黏土抗拉强度与刺槐豆胶掺量的关系如图 6 所示。由图可知,对于养护龄期相同的改良黏土试验,其抗拉强度随刺槐豆胶掺量的增加逐渐增强。对于养护 7 d 的改良黏土试样,刺槐豆胶掺量从 0.5% 增加到 2%,其抗拉强度从 162.11 kPa 增加到 234.61 kPa,增加约 1.45 倍。这表明刺槐豆胶的掺入填充了土颗粒之间的孔隙,改变了微观条件下试样的物理结构,使得改良黏土试样的抗拉强度增大,说明刺槐豆胶掺量的变化对改良黏土抗拉强度具有积极影响。

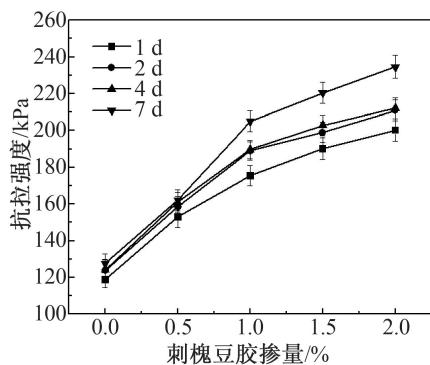


图 6 抗拉强度与刺槐豆胶掺量的关系

Fig. 6 Relationship between tensile strength and locust bean gum content

改良黏土的抗拉强度与养护龄期的关系如图 7 所示。由图可知,当刺槐豆胶掺量为 0%~0.5% 时,不同养护龄期的试样其抗拉强度的变化规律具有相似性,养护龄期对改良黏土的抗拉强度影响不明显,抗拉强度提升较小,对于 $C=0.5\%$ 的改良黏土试样,养护龄期从 1 d 增加至 7 d,其抗拉强度从 153.03 kPa 增至 162.11 kPa,仅提高 1.06 倍。而当刺槐豆胶掺量为 0.5%~2% 时,不同养护龄期的试样其抗拉强度的变化规律也具有相似性,在养护初期,抗拉强度有一定的增长,当养护龄期为 2 至 4 d 时,其抗拉强度无明显增长,当养护龄期大于 4 d 时,试样的抗拉强度大幅增加,对于 $C=2\%$ 的改良黏土试样,养护龄期从 1 d 增加至 7 d,其抗拉强度从 220.5 kPa 增至 234.61 kPa,提高约 1.17 倍。说明高掺量的改良黏土试样在养护初期,由于掺入了刺槐豆胶,填充了土颗粒间的孔隙,因此使得试样抗拉强度增强,在养护 2 至 4 d 这段时间内刺槐豆胶未胶结完全,还未能形成完整胶质薄膜,而在养护 4 d 后,胶质薄膜完整包裹土体颗粒,改良黏土试样的抗拉强度得到大幅提升。

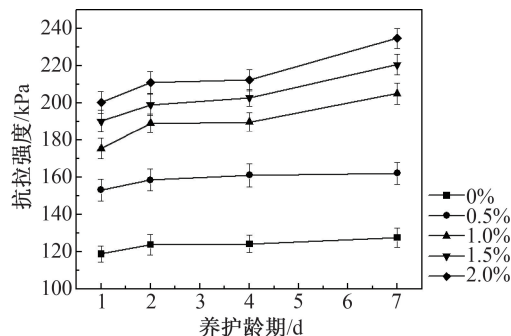


图 7 抗拉强度与养护龄期的关系

Fig. 7 Relationship between tensile strength and curing age

2.3 破坏模式分析

2.3.1 无侧限抗压强度试验

以养护龄期为 7 d 的改良黏土为例,分析刺槐豆胶掺量对土体破坏程度的影响。不同刺槐豆胶掺量下的改良黏土试样的破坏状态如图 8 所示,图 8(a)~(e) 中土样的刺槐豆胶掺量逐渐增加。由图可知养护 7 d 时,破坏面主要集中在中下部位,裂缝呈倾斜状贯穿土体,被压缩出来的部分呈花瓣状散开。在制样过程中,由于素土土颗粒间孔隙较大,经过重锤击实后,底端密度大于顶端,底部土颗粒间孔隙缩小,无侧限抗压强度试验产生的裂缝呈“\”样,从顶端破裂延伸至距底部四分之一处,见图 8(a)~(b)。加入刺槐豆胶的改良黏

土试样,其破裂形态也为“/”“\”及“y”形,从顶部斜向下延伸至底部,中间部分土体呈块状掉落,见图8(c)—(d),高掺量刺槐豆胶中部呈花瓣状散开,见图8(e),这是因为刺槐豆胶形成一层薄膜包裹土颗粒,形成团聚体,在无侧限轴向受压条件下,刺槐豆胶薄膜包裹土颗粒向外扩散,从而形成裂缝。通过对比可知,试样在单轴受压后均发生了不同程度的破坏,基于以上分析,刺槐豆胶掺量为2%的试样掉落的土块较少,且没有贯穿整体的裂缝,因此刺槐豆胶掺量为2%的无侧限抗压效果最好。

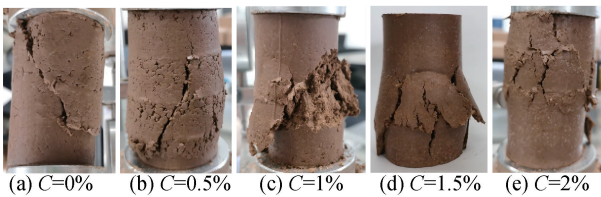


图8 改良黏土抗压破坏形态

Fig. 8 Compressive damage pattern of modified clay

2.3.2 抗拉试验

改良黏土试样在抗拉强度试验中发生拉伸破坏,当产生裂缝时其抗拉强度达到最大,随后发生脆性断裂,将完整试样拉断为上下两个部分,断裂位置位于试样腰部,其腰部拉伸破坏形态如图9所示。由图可知,素土试样的断裂面呈平坦整齐的,随着刺槐豆胶掺量的增加,断裂面逐渐变得粗糙,锯齿状的裂缝增多,多呈凹陷和凸起状。这是由于随着刺槐豆胶的掺入,刺槐豆胶膜包裹土颗粒,使得试样的黏聚力增加,受到拉伸作用时土体抵抗外部拉力的作用变强,抗拉强度增大。在同掺量条件下,养护龄期的增加对改良黏土试样的拉

伸破坏形态没有太大的影响,这是由于随着养护龄期的增加,土体中水分流失,试样含水率降低,在抗拉试验中土颗粒间结合形态未发生改变,因而试样受拉发生断裂时,其拉伸破坏形态也未出现较大差别。

3 加固机理分析

由试验结果可知,刺槐豆胶掺量的变化以及养护龄期的改变都会对黏土的强度特性产生较大的影响。刺槐豆胶是一种中性多糖聚合物,其表面水分与阳离子共价键之间的氢键相互作用,从而吸附水分子形成黏性水凝胶^[18],同时导致其凝胶化效果更为突出,增加土颗粒之间的相互吸引力,使土颗粒紧密结合,提高土体的整体强度。

对试验土样进行扫描电镜试验(SEM),图10分别为素土和改良土体的微观结构示意图。通过对比图10(a)和图10(b)的SEM图像,可以看出,刺槐豆胶对改良黏土体的微观结构具有一定的影响。在图10(a)素土SEM图中,黏土颗粒间具有一定孔隙,土颗粒间无紧密连接,错综复杂地堆落在一起。在图10(b)改良黏土SEM图中可以看出,刺槐豆胶中的多糖分子与表面水分子结合,在土体表面形成一层透明状的胶质薄膜,覆盖于土壤颗粒上,防止土体颗粒的流失以及风化,并利用自身延展性填充土体间孔隙,增强土体黏聚力,使得土体微观结构更加紧密。随着养护龄期的增加,胶质薄膜逐渐收缩,使土体颗粒排列更加紧密,进而增强土体的抗压及抗拉强度(图11)。

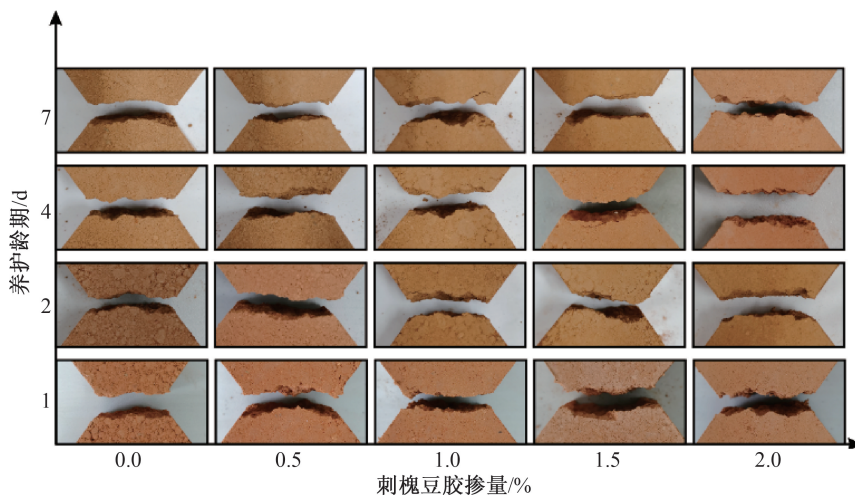


图9 改良黏土拉伸破坏形态

Fig. 9 Tensile damage pattern of modified clay

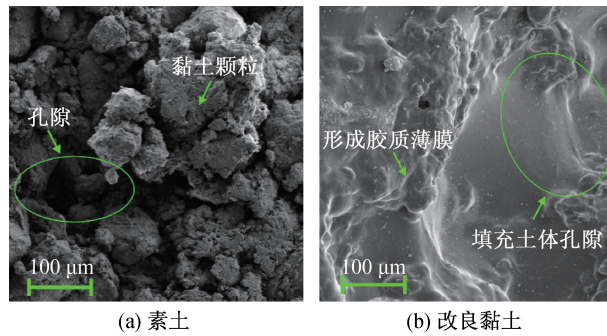


图 10 素土及改良黏土在 100 倍下的 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of plain soil and modified clay at 100x magnification

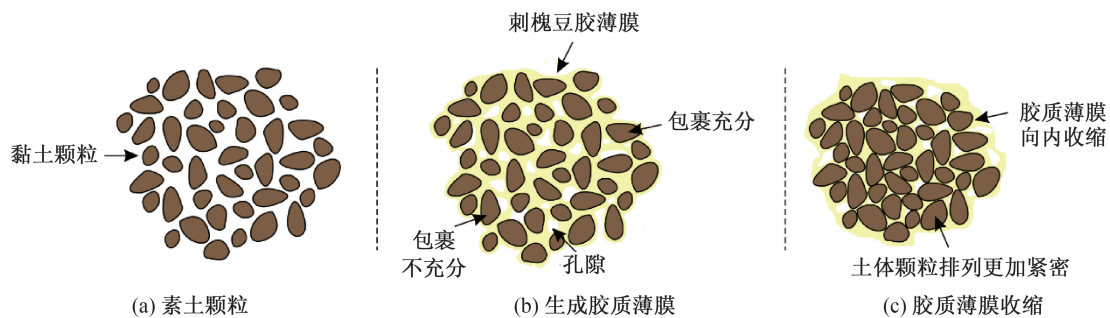


图 11 刺槐豆胶改良黏土的微观机理图

Fig. 11 Micro-mechanism diagram of locust bean gum for clay improvement

4 结论

选用一种新型高分子生物聚合胶——刺槐豆胶,对黏土的力学特性进行室内试验研究。通过无侧限抗压强度试验及抗拉强度试验,研究在不同刺槐豆胶掺量及养护龄期下,改良黏土力学特性的变化规律,并结合微观机理分析刺槐豆胶加固黏土体的加固机理。得出结论如下:

1) 刺槐豆胶可以显著提升黏土的力学性能。在养护龄期相同的条件下,刺槐豆胶掺量 C 为 2% 时,改良黏土的抗压及抗拉强度提升最大,最大提升量分别为 200.19 和 107 kPa,是素土试样抗压强度的 1.89 倍和 1.84 倍。

2) 养护龄期对改良黏土的抗压、抗拉强度也有一定的影响。在刺槐豆胶掺量相同的条件下,养护龄期为 7 d 时,试样抗压、抗拉强度提升量最大,最大提升量分别为 68.12 和 34.39 kPa。

3) 刺槐豆胶的掺入对黏土的破坏形态有明显影响。随着刺槐豆胶掺量的增加,改良黏土抗压破坏形态呈现“/”“\”形,土块呈花瓣状散开;在抗拉试验中,其拉伸破坏形态随刺槐豆胶掺量增加呈现平缓状向锯齿状过渡,高掺量改良黏土的黏聚力增加,锯齿数量增多。

4) 刺槐豆胶能很好地改善黏土的力学性能,其多糖分子与土体表面水分子结合,在黏土颗粒上形成一层完整的网状胶质薄膜,刺槐豆胶利用自身延展性填充土壤孔隙,从而增强土体黏聚力,使土体力学性能提高。随着养护龄期的增加,胶质薄膜逐渐收缩,使土体颗粒排列更加紧密,进而提高改良黏土体的无侧限抗压强度及抗拉强度。

参考文献:

- [1] 张超,魏松涛,刘彬,等.山区高速公路灰岩质高陡边坡失稳与加固措施分析[J].公路,2023(07):264-269.
- [2] 赵旭.挟沙水流作用下河道岸坡失稳理论研究[D].南昌:南昌大学,2022.
- [3] 邓彩云,李凌云,朱勇辉.河岸稳定性评估指标体系初探[J].长江科学院院报,2019(10):127-130.
- [4] 张禹.福州地区山区公路土质边坡失稳破坏与防治策略研究[D].福州:福建农林大学,2019.
- [5] 赵建国.公路路基边坡失稳分析及其防治措施[J].建材世界,2023,44(03):125-127.
- [6] 刘瑾,白玉霞,宋泽卓,等.OPS型固化剂改良砂土工程特性试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(03):495-501.

(下转第 104 页)

比,逸出坡降减少了 87.7%。然而,在降雨发生时,方案二的逸出坡降未能达到管涌允许的要求。

参考文献:

- [1] 王小茹,何怀东,游凌云. 堤坝管涌发生的预测方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(2): 169-172.
- [2] WANG G, ZHAO B, ZHAO K, et al. Piping-seepage mechanism of tailings with different fine particle contents [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(11): 04023201.
- [3] CHEN C, WANG Y, ZHANG J, et al. A preliminary study of landslide dam failures induced by the combined influence of piping and overtopping [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 129984.
- [4] 沙金焯. 预测堤防背侧管涌的一种方法[J]. 水利水电工程学报, 2003(4): 57-59.
- [5] ZHANG S, YE F, LIU Y, et al. Critical hydraulic gradient of piping erosion under free flow and seepage flow coupling model [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2023, 60(5): 419-427.
- [6] 张我华,余功栓,蔡袁强. 堤与坝管涌发生的机理及人工智能预测与评定[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004(7): 109-115.
- [7] LI R, WANG Z, SUN H, et al. Automatic identification of earth rock embankment piping hazards in small and medium rivers based on UAV thermal infrared and visible images [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(18): 4492.
- [8] GAO J, DANG J, HAN X, et al. A study on the generation mechanism and development process of piping based on the theory of muddy water seepage [J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 6987524.
- [9] 王霜,陈建生,钟启明. 多层堤基结构管涌动态发展的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 39-45.
- [10] 雷声,孙东亚,万国勇,等. 鄱阳湖圩堤风险评估与应急抢险技术[J]. 江西水利科技, 2021, 47(2): 122-129.
- [11] 邬爱清,吴庆华. 堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1310-1328.
- [12] WANG R, CHEN G, LIU Y. Internal piping erosion evaluation of embankment dam considering the spatial variability of soil properties [J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2024, 10(2): 04024006.
- [13] 黄旭,范尧,蔡家宏,等. 双层堤基渗流变形特征分析及管涌防治[J]. 浙江水利水电学院学报, 2018, 30(3): 35-38.
- [13] CASAS J A, GARCÍA-OCHOA F. Viscosity of solutions of xanthan/locust bean gum mixtures [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1999, 79(1): 25-31.
- [14] OAKENFULL D, NADEN J, PATERSON J. Solvent structure and the influence of anions on the gelation of κ -carrageenan and its synergistic interaction with locust bean gum [J]. *Gums and Stabilisers for the Food Industry*, 2000, 251: 221-228.
- [15] PRAJAPATI V D, JANI G K, MORADIYA N G, et al. Locust bean gum: A versatile biopolymer [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 94(2): 814-821.
- [16] LIU J, CHEN Z, SONG Z, et al. Tensile behavior of polyurethane organic polymer and polypropylene fiber-reinforced sand [J]. *Polymers*, 2018, 10(5): 499.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准 GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [18] CHENG Z, GENG X. Soil consistency and interparticle characteristics of various biopolymer types stabilization of clay [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2021, 27(2): 103-113.

(责任编辑 周雪梅)

(责任编辑 王利君)

(上接第 50 页)

- [7] WILES C C. A review of solidification/stabilization technology [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1987, 14(1): 5-21.
- [8] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Improvement of problematic soils with biopolymer—An environmentally friendly soil stabilizer [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 29(2): 04016204.
- [9] 刘瑾,张达,汪勇,等. 高分子稳定剂生态护坡机理及其应用[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(03): 420-426.
- [10] JIA Z L, YAN C G, BO L, et al. Experimental study on erosion resistance and ecological slope protection of guar gum treated fiber-reinforcement loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44: 1881-1889.
- [11] 吕家栋,赵立财. 黄原胶改善黏土断裂性能研究[J]. 人民长江, 2023, 54(04): 205-210+217.
- [12] SCHORSCH C, GARNIER C, DOUBLIER J. Viscoelastic properties of xanthan/galactomannan mixtures; Comparison of guar gum with locust bean gum [J]. *Carbohydrate Polymers*. 1997, 34(3): 165-175.