

聚乙烯醇水凝胶改良红黏土强度特性研究

陶国钲¹,刘之葵^{1*},韦海霞¹,黄能胜¹,蒋仕清²,姜大伟²

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室,广西 桂林 541004;

2. 建材桂林地质工程勘察院有限公司,广西 桂林 541002)

摘要:以红黏土为研究对象,聚乙烯醇(PVA)为改良材料,通过直剪和无侧向抗压强度试验,研究了不同PVA浓度和养护龄期对红黏土强度的影响,并利用扫描电镜观察了改良土的微观结构。结果表明:在各养护龄期相同的条件下,红黏土的黏聚力和无侧限抗压强度均随着PVA浓度增加呈先增大后减小的趋势,内摩擦角随着PVA浓度的增加未呈现出明显的变化规律,但均大于红黏土的内摩擦角。取浓度为3%PVA改良红黏土抗剪强度和无侧限抗压强度的效果比较理想。微观测试表明:PVA与土颗粒反应,形成高弹性、高强度的立体丝网状结构,搭接于孔隙间。低浓度的PVA所形成的网状结构不完整,黏结力弱,随着浓度的提升,网状结构逐渐完整,更能有效限制土颗粒的移动,从而提高土体的抗剪和抗压强度。然而,较高浓度的PVA导致水凝胶黏度增大,影响其与红黏土的均匀混合,不利于PVA与土颗粒接触,减弱了网状结构与土颗粒的连接,反而降低黏聚力和无侧限抗压强度。

关键词:聚乙烯醇;红黏土;抗剪强度;抗压强度;扫描电镜

中图分类号:TU41

文献标识码:A

Study on Strength Characteristics of Red Clay Modified by Polyvinyl Alcohol Hydrogel

TAO Guozheng¹, LIU Zhikui^{1*}, WEI Haixia¹, HUANG Nengsheng¹, JIANG Shiqing², JIANG Dawei²

(1. Guangxi Key Laboratory Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology,

Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Building Materials Guilin Geological Engineering Investigation Institute

Co., Ltd., Guilin, Guangxi 541002, China)

Abstract: Taking red clay as the research object and polyvinyl alcohol as the improved material, the effects of different polyvinyl alcohol (PVA) concentrations and curing ages on the strength of red clay were studied by direct shear and non-lateral compressive strength tests, and the microstructure of the improved soil was observed by scanning electron microscopy. The results show that under the same conditions of each curing age, the cohesion and unconfined compressive strength of red clay increase first and then decrease with the increase of PVA concentration. The internal friction angle does not show obvious variation with the increase of PVA concentration, but it is greater than the internal friction angle of red clay. The effect of improving the shear strength and unconfined compressive strength of red clay with 3% PVA is ideal. Microscopic tests show that PVA reacts with soil particles to form a three-dimensional mesh structure with high elasticity and high strength, which is lapped between pores. The network structure formed by low concentration of PVA is incomplete and the cohesive force is weak. With the increase of concentration, the network structure is gradually complete, which can effectively limit the movement of soil particles, so as to improve the shear and compressive strength of soil. However, the

收稿日期:2024-08-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41867039);广西岩土力学与工程重点实验室项目(桂科能20-Y-XT-03)

第一作者:陶国钲(1999—),男,广西横州人,硕士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。

*通信作者:刘之葵(1968—),男,江西兴国人,博士,教授,从事岩土工程专业的教学与科研工作。

higher concentration of PVA leads to the increase of the viscosity of the hydrogel, which affects its uniform mixing with red clay, which is not conducive to the contact between PVA and soil particles, weakens the connection between the network structure and soil particles, and reduces the cohesion and unconfined compressive strength.

Key words: polyvinyl alcohol; red clay; shear strength; compressive strength; scanning electron microscopy

红黏土作为一类特殊土,广泛分布在云南、贵州、广西等地,表面一般呈褐红色、棕红色和褐色,具有高孔隙比、高液限、低压实度、失水易收缩等不良工程特性^[1]。南方地区天气炎热、降雨频繁,而红黏土对温度和湿度十分敏感^[2],遇水时强度易降低,失水后则易干缩开裂^[3-4]。红黏土的不良工程特性会引发地面塌陷、边坡失稳等工程问题^[5-6],因此,不宜直接作为地基、土基材料,需进行改良加固处理。

针对红黏土的改良已有不少学者进行了研究,物理、化学方法是土体性质改良的主要方法。化学改良通常采用石灰^[7]、水泥^[8]等,物理改良则采用土工合成材料或短纤维对土体进行加筋处理,如纤维^[9]、橡胶粉^[10]、稻壳灰^[11]等。然而,一些传统改良材料在生产使用过程中可能带来环境污染或长期耐久性不足的问题。因此,开发一种环保、高效、耐久的新型土壤改良材料具有重要的工程意义。聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)是一种高分子聚合物,黏结性强^[12],能提高土体强度,且具有无污染、可持续的特点,在土壤改良方面有着巨大的应用潜力。

基于此类高分子聚合物的结构特性及其与土体作用机理,不少学者进行了深入研究。郭浩天等^[13]研究了PVA-木质素纤维复合改良粉质黏土的力学性能,发现单独使用PVA或木质素纤维的改良土呈现应变软化特性,而使用复合改良时,则转为应变硬化,3%PVA掺量与1%木质素纤维掺量的配比能显著提升改良土的黏聚力和弹性模量,但对内摩擦角影响较小。Zhuang等^[14]通过三轴试验研究PVA对膨胀土强度和韧性的影响规律,试验结果表明,当围压相同且PVA含量增加时,土颗粒与PVA结合形成胶结物质,填充土样内部孔隙,增强土颗粒之间的内聚力,提高土体的承载力。Li等^[15]采用PVA和活性氧化镁对砂土进行改良,研究了改性剂的用量和固化年龄对固化砂土力学性能的影响,结果表明,改良土样的抗压强度随着固化时间的增加而增大,且复合材料对砂砾的固化效果优于单独

使用PVA。文武等^[16]利用聚乙烯醇强黏结性改良膨胀土,研究不同PVA掺量对膨胀土性质的影响,结果表明,PVA改良土对内摩擦角的影响大于对黏聚力的影响,可以大幅度提高抗剪强度,同时降低膨胀性。李中尧等^[17]研究PVA对藏东南地区高原黏土力学性能的影响规律及微观机理,结果表明,PVA与土体中矿物发生反应形成的胶结物,可以有效改善土颗粒之间的黏结强度、提高土体黏聚力,进而提高黏土的无侧限抗压强度。陈志昊等^[18]采用高分子固化剂和聚丙烯纤维对砂土进行复合加固,通过对不同聚丙烯纤维含量、固化剂含量和干密度的重塑试样进行抗拉试验,结果表明,高分子固化剂和聚丙烯纤维的复合加固能够显著提高砂土的抗拉强度。Cherdsak等^[19]使用PVA和高钙粉煤灰地基聚合物改良软质曼谷黏土,通过无侧限抗压强度和扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)试验研究了聚合物稳定软质曼谷黏土的强度和微观结构,研究表明,PVA可以黏结土颗粒,随着PVA浓度、含量的增加,无侧限抗压强度逐渐增大。力乙鹏等^[20]分析了无机类、离子类、有机类和生物酶4种不同类别土壤固化剂的固化原理,认为将高分子固化剂应用在建筑工程中,能够有效节约社会资源,且绿色节能,具有良好的应用前景。高分子固化剂与土壤结合后,聚合物有效填充了土颗粒间的孔隙,形成弹性立体丝网,从而提高土体强度。

综上,PVA因其独特的黏结性和保水性,已被证实可有效改善土体的力学性能。现有文献中关于高分子聚合物改良土的研究取得了一定的成果,但红黏土是一种具有独特结构和成分的特殊土,将PVA用于改良红黏土的研究鲜有报道,改良红黏土的效果和作用机理尚不明确。本文以红黏土为研究对象,通过直剪试验、无侧限抗压强度试验及微观测试,研究PVA水凝胶浓度、养护龄期对红黏土力学性能及微观结构的影响机理,为PVA应用于红黏土性质改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土样材料

试验所用的红黏土取自桂林理工大学雁山校区某工地,取土深度为地表以下 2~4 m,经风干、粉碎、过筛后,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测得红黏土基本物理性质,见表 1。

1.1.2 改良材料

(1)聚乙烯醇:本试验选用中国石化集团重庆川维化工有限公司生产的 PVA,化学式为 $[C_2H_4O]_n$,外观呈白色粉末状,其基本性能如表 2 所示。

(2)硼酸:硼酸是一种无味的白色粉末,化学式为 H_3BO_3 ,由于 PVA 对硼化合物十分敏感,两者反应交联生成的聚合物可改善 PVA 的力学性质,主要表现为可提升水凝胶溶液的黏度与弹性模量^[21],因此试验时加入定量硼酸。本试验选用河南省郑州市千诚化工有限公司生产的硼酸,其化学成分如表 3 所示。

1.2 试验方法

1.2.1 PVA 水凝胶的制备

PVA 水凝胶溶液制备过程如下:

(1)用 5 个烧杯分别称量一定量的蒸馏水,放置于双头磁力搅拌器上进行加热;

(2)当水温达到 60 °C 时,将 PVA 粉末按蒸馏水质量的 1%、2%、3%、4% 的梯度分别添加进蒸馏水中,制备成质量浓度分别为 0%、1%、2%、3%、4% 的 PVA 水凝胶溶液,并将溶液持续加热至 65 °C;

(3)待 PVA 粉末完全溶解于蒸馏水后,向每种浓度的 PVA 溶液中加入硼酸,其量为溶液中

PVA 质量的 15%;

(4)硼酸完全溶化后,用保鲜膜将溶液密封贮存,冷却至室温,倒入收纳瓶中备用。

1.2.2 试样制备

土样的制备、直剪试验和无侧限抗压强度试验按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中的规定进行。现场取回的红黏土经碎土机粉碎后放入烘箱中,在 105 °C 条件下干燥 8 h,根据试验需要,将烘干的红黏土冷却后过 2 mm 细筛,并剔除其中杂质,放入收纳桶中贮存备用。本研究采用“湿混法”制备土样,将制备好的 PVA 水凝胶溶液倒入红黏土中,控制含水率为 28%,将配制好的土样放入密封袋,在保湿缸中静置 24 h,以确保土样中的水分充分平衡。

1.2.3 直剪试验

控制土样的干密度为 1.45 g/cm³,制备直径为 61.8 mm、高为 20 mm 的环刀试样,每种 PVA 浓度制备 4 组试样,共计 20 组。考虑单因素影响,每组进行 3 次平行试验。制备完成的试样用保鲜膜包裹并密封,恒温、恒湿养护,养护龄期为 1、7、14、28 d。试样达到养护龄期后进行直剪试验,设置 1 组对照组进行对比。试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式四联直剪仪(图 1),试验时分别施加 100、200、300、400 kPa 垂直压力,剪切速率为 0.8 mm/min,测量各组土样的黏聚力和内摩擦角。

1.2.4 无侧限抗压强度试验

控制土样的干密度为 1.45 g/cm³,制备直径为 39.1 mm、高为 80 mm 的试样,分 4 层击实,每种 PVA 浓度制备 4 组试样,共计 20 组,每组设置 3 个平行样;将试样用保鲜膜密封后放入保湿缸中养护,养护时间为 1、7、14、28 d。达到养护龄期后

表 1 红黏土基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of red clay

天然含水率/ %	密度/ (g · cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性 指数	最大干密度/ (g · cm ⁻³)	最优含水率/ %	比重
26.7	1.71	60.39	37.07	23.32	1.45	28.36	2.74

表 2 PVA 的基本参数

Tab. 2 Basic parameters of PVA

型号	黏度/(MPa · s)	醇解度/%	挥发分含量/%	灰分含量/%	C ₂ H ₃ NaO ₂ 含量/%	pH 值
17-88	21.0~24.5	86.5~88.5	≤5.0	≤0.4	0.90	5~7

表 3 硼酸化学组成

Tab. 3 Chemical constituents of boric acid

(单位:%)							
H ₃ BO ₃	Pb ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Fe ³⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
≥99.8	≤0.000 5	≤0.000 5	≤0.002	≤0.000 1	≤0.000 3	≤0.000 5	≤0.000 5

进行无侧限抗压强度试验,设置 1 组对照组。试验采用的是 TYE-2000C 型万能试验机(图 2),升降速率为 2.4 mm/min,测量各组土样的无侧限抗压强度。

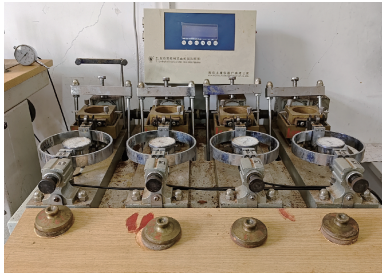


图 1 ZJ 型应变控制式四联直剪仪

Fig. 1 ZJ strain-controlled quadruple direct shear apparatus



图 2 万能试验机

Fig. 2 Universal testing machine

1. 2. 5 微观测试

试验采用 ZEISS Gemini300 场发射扫描电镜观测红黏土及改良土的微观结构,试验所用土样为 PVA 浓度 3%、4%,养护 28 d 的直剪残余土样,试验前将土样放在 40 °C 烘箱中低温烘干。

2 结果与分析

2. 1 直剪试验结果与分析

2. 1. 1 黏聚力变化分析

根据直剪试验所得数据,绘制出不同 PVA 浓度和养护龄期下红黏土的黏聚力的变化曲线,如图 3 所示。从图 3 可知,在养护龄期相同的条件下,红黏土的黏聚力随着 PVA 浓度的增加,呈先增大后减小的趋势。当 PVA 浓度达到 3% 时,黏聚力出现峰值,该浓度下不同龄期(1、7、14、28 d)的黏聚力分别为 62. 05、80. 05、85. 25、101. 75 kPa,是未改良土的 1. 60、2. 01、1. 92、2. 08 倍。在相同浓度条件下,黏聚力随养护龄期的延长而增大,且改良土的黏聚力明显大于未改良红黏土。

2. 1. 2 内摩擦角变化分析

根据试验数据绘制出不同 PVA 浓度和养护龄

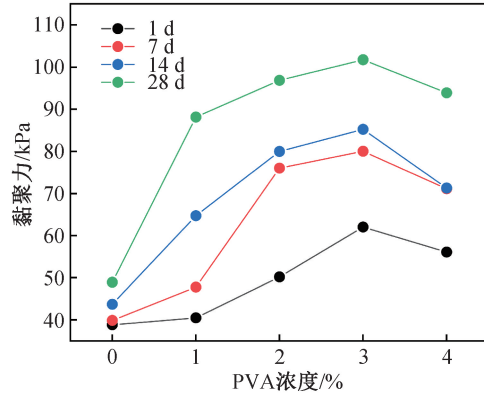


图 3 黏聚力-PVA 浓度关系曲线

Fig. 3 Cohesive force versus PVA concentration relationship curve

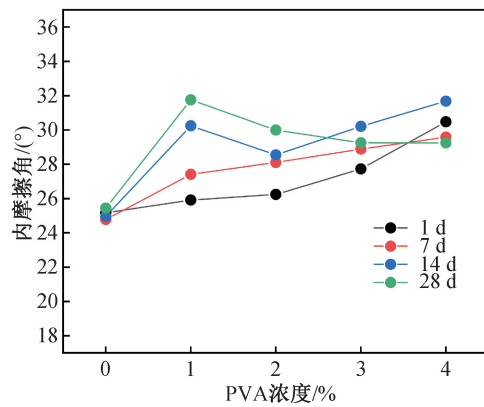


图 4 内摩擦角-PVA 浓度关系曲线

Fig. 4 Internal friction angle versus PVA concentration relationship curve

期下红黏土内摩擦角的变化曲线,如图 4 所示。

从图 4 可知,在养护龄期相同的条件下,不同 PVA 浓度改良土的内摩擦角均大于未改良红黏土。养护龄期在 1~7 d 期间,内摩擦角随 PVA 浓度的增加而增大;养护龄期在 14~28 d 期间,改良土的内摩擦角基本稳定在 28. 5°~32. 0°之间;未改良土的内摩擦角在整个养护期间无明显变化。

综合分析来看,浓度为 3% 的 PVA 改良红黏土黏聚力、内摩擦角的效果比较理想。

2. 1. 3 抗剪强度分析

不同 PVA 浓度和养护龄期条件下红黏土抗剪强度与垂直压力关系曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在各垂直压力下改良土的抗剪强度均大于未改良红黏土,且养护龄期越高,不同浓度 PVA 改良土与未改良红黏土抗剪强度的差距越大。

结合上述分析,改良土黏聚力、内摩擦角有明显提升的原因在于 PVA 以凝胶的状态存在于土颗

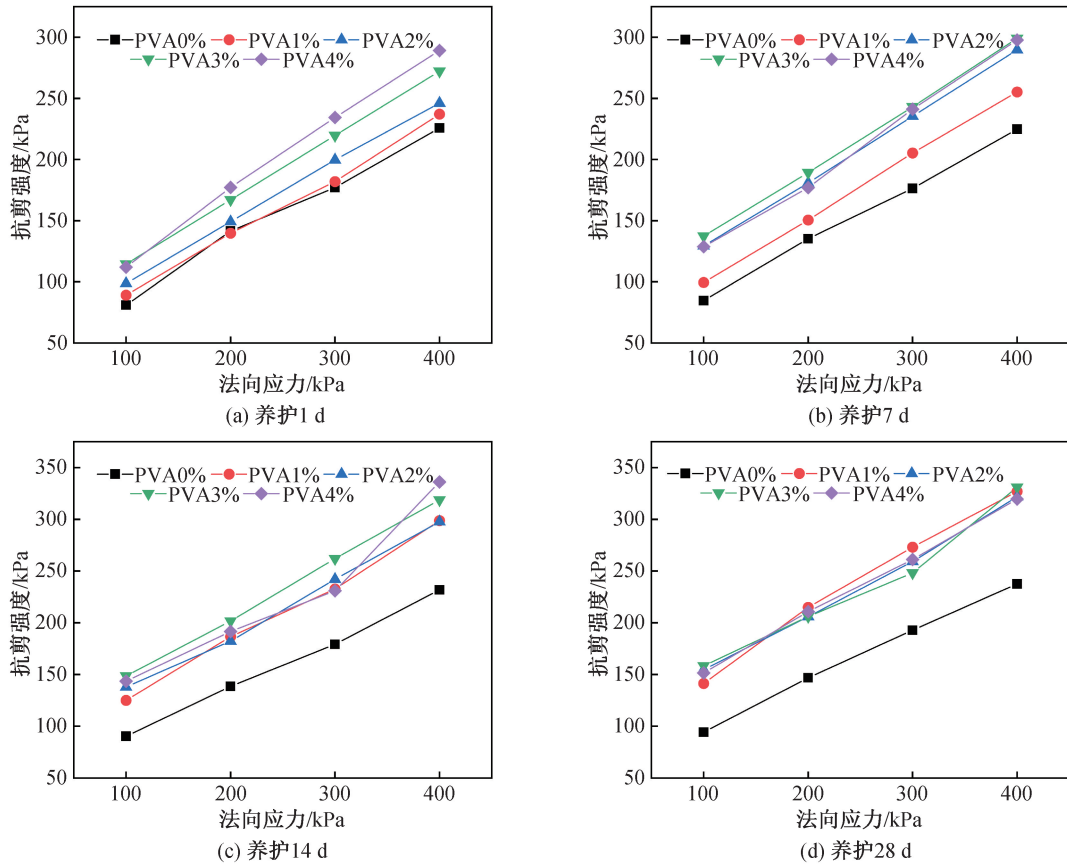


图5 不同PVA浓度下红黏土抗剪强度-法向应力关系曲线

Fig. 5 Shear strength versus normal stress relationship curve of red clay under different PVA concentration

粒中,与土颗粒形成胶结物质,胶结物质包裹小颗粒并填充于大颗粒孔隙之间,提高了土体的黏聚力,在一定程度上改变了土颗粒之间接触方式,增大土颗粒之间的摩擦,抗剪强度得到提升。

然而,较高的PVA浓度(4%)会降低土体的黏聚力,究其原因,浓度过高会导致凝胶溶液过于黏稠,使PVA与红黏土不能均匀混合,从而导致黏聚力下降。

2.2 无侧限抗压强度指标影响

2.2.1 应力-应变曲线

图6为不同养护龄期下无侧限抗压强度应力-应变关系曲线,曲线主要分为3个阶段。第1阶段是初始屈服阶段,其特点是曲线的切线斜率较大,主要由土体不断被压实所致;第2阶段是应力强化阶段,该阶段轴向应力随轴向应变的增加而增大,但曲线的切线斜率逐渐减小,直到出现峰值应力,即无侧限抗压强度,之后进入第3阶段——破坏阶段,轴向应力随轴向应变的增加不断降低,土体发生破坏。

相较于未改良的红黏土,改良土的曲线斜率

更大,且从峰值应力对应的应变来看,改良土的初始屈服阶段持续时间更长。未改良的红黏土发生破坏时,应变在3%~4%之间。改良土破坏时,应变在4%~6%之间,均大于未改良红黏土。以养护1d的改良土为例,随着PVA浓度的增加,无侧限抗压强度对应的应变从3.78%增加到4.26%、4.43%、5.34%、5.05%,这说明改良土具有更好的塑性和稳定性。

2.2.2 无侧限抗压强度变化分析

图7为不同PVA浓度和养护龄期下红黏土无侧限抗压强度关系曲线。从图7可以看出,在相同PVA浓度条件下,红黏土的无侧限抗压强度随养护龄期的增加而逐渐增大,但增长趋势较为平缓,说明其受到养护龄期的影响较小,改变PVA浓度对于改良土的无侧限抗压强度的影响更为显著。

在相同养护龄期条件下,红黏土的无侧限抗压强度随着PVA浓度的增加,呈先增大后减小的趋势。当PVA浓度达到3%时,无侧限抗压强度出现最大值,该浓度下在不同龄期(1、7、14、28d)的无侧限抗压强度分别为577.73、587.67、593.07、643.26kPa,是未改良土的1.83、1.75、1.65、1.74倍。

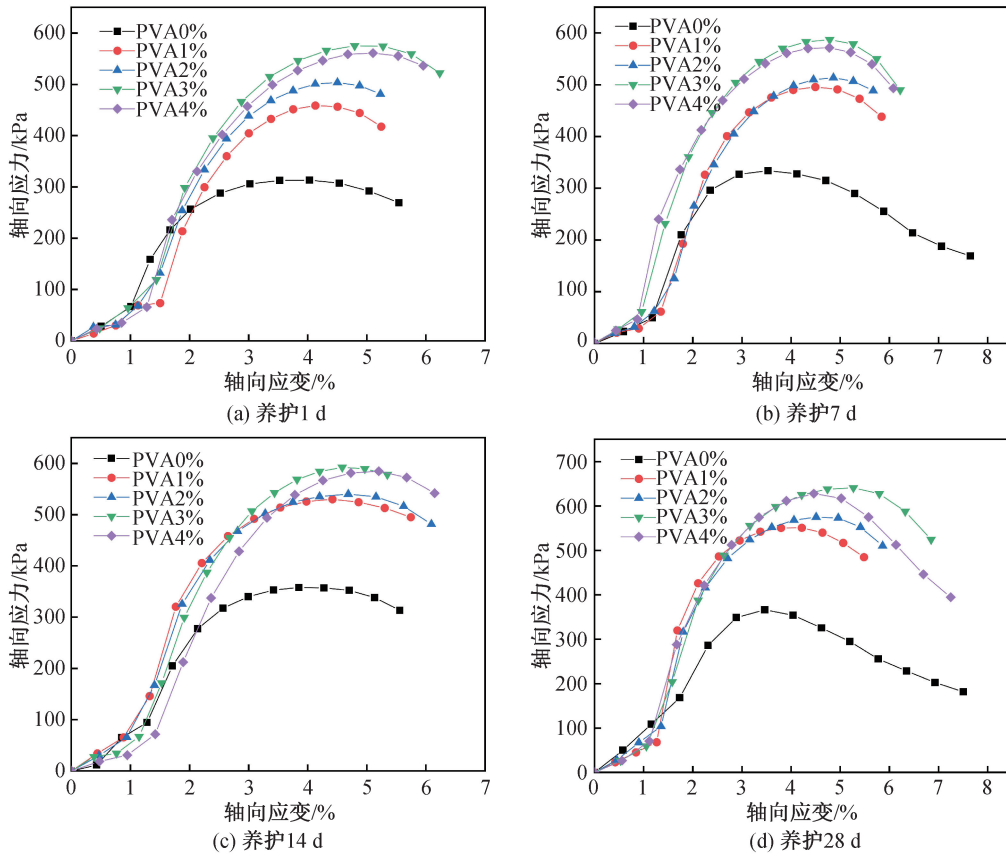


图 6 不同养护龄期下无侧限抗压强度应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of unconfined compressive strength under different curing ages

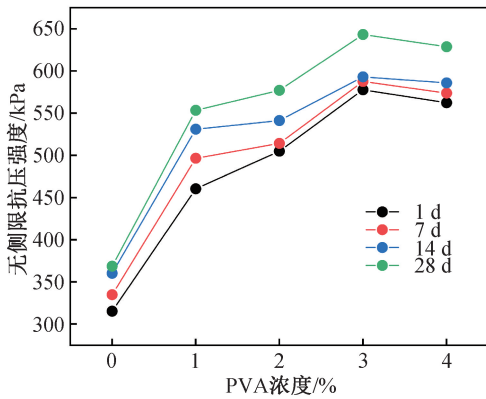


图 7 不同 PVA 浓度和养护龄期下红黏土抗压强度关系曲线

Fig. 7 The relationship curve of compressive strength of red clay under different PVA concentration and curing ages

由此可知,浓度为 3% 的 PVA 对红黏土无侧限抗压强度的改良效果更为理想。

结合上述分析,红黏土孔隙比较大,PVA 与土中矿物反应形成胶结物质,填充于土孔隙间,且 PVA 的浓度增加会促使形成更多的胶结物质,增强土颗粒间的胶结作用,从而改善土体结构稳定性。虽然提高 PVA 浓度可增加胶结物质含量,但无侧限抗压强度在 3% 浓度时达到峰值,在 4% 浓

度时反而下降。

PVA 的加入在短时间内可使改良土的无侧限抗压强度提升,随着养护时间的增加,PVA 在土体中的反应持续进行,PVA 与土体中颗粒胶结更充分,改良土的无侧限抗压强度随时间增加而增大。

2.3 微观测试分析

图 8(a) 为未改良红黏土放大 5 000 倍的 SEM 图像,可以看出,红黏土颗粒主要为大小不一、以面-面的方式接触的片状单元体,部分单元以点-面接触,形成堆叠结构的堆聚体。具有胶结作用的氧化物附着在土颗粒表面或填充于土颗粒之间,使得土颗粒形成连续的片状堆叠结构,颗粒之间排序无规律,接触程度较差,孔隙率较高。

图 8(b) 为 3% 浓度 PVA 改良土放大 5 000 倍的 SEM 图像,从图中可以清楚地看出,PVA 加入后,与土颗粒发生胶结作用,胶结物质填充于孔隙之间,并将土颗粒连接在一起。PVA 与土颗粒发生反应后产生凝聚现象,形成立体丝网状物质桥接在孔隙之间,立体丝网状物质具有很高的弹性和抗拉强度,与颗粒紧密地吸附在一起,有效地改

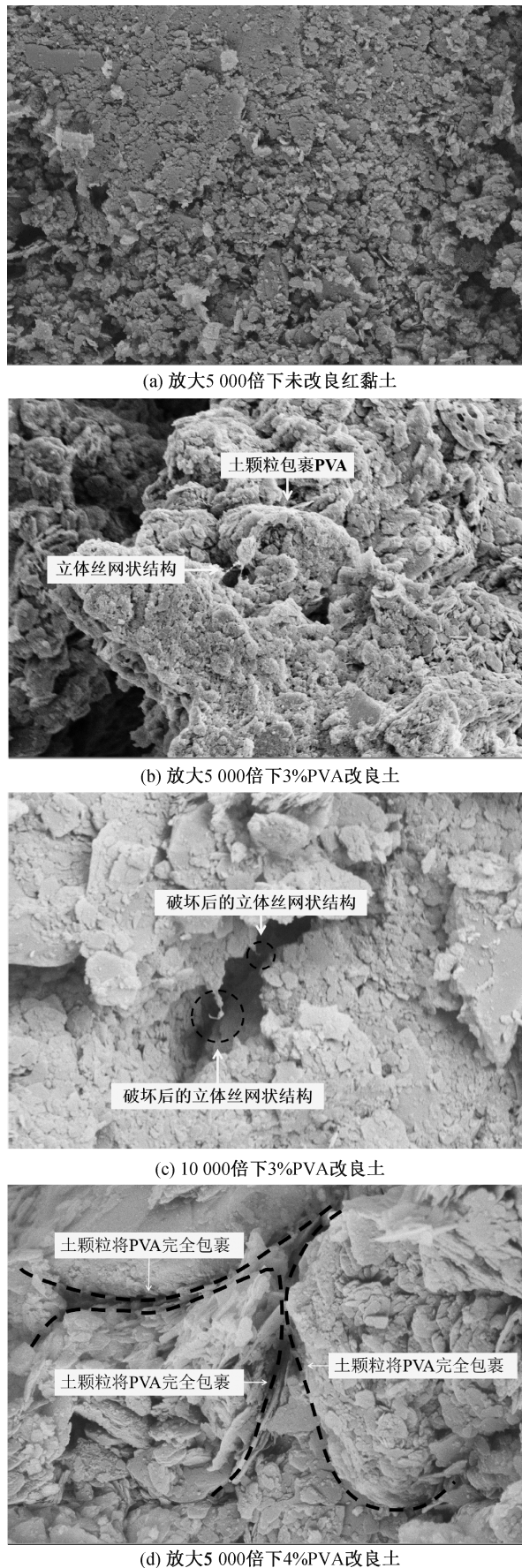


图8 扫描电镜图像

Fig. 8 Scanning electron microscope image

善了土颗粒之间的黏结强度,提高了面-面接触程度。当PVA浓度在0%~3%范围时,改良土的黏聚力和抗压强度随PVA浓度的增加逐渐增大。原因在于,低浓度改良土中形成的立体丝网状物质并不完整,当浓度提升至3%时,PVA在土体中形成的立体丝网状结构逐渐完整。

进一步放大倍数观察改良土微观结构,图8(c)为3%浓度PVA改良土放大10 000倍的SEM图像,从图中可以更直观地观察到立体丝网状物质桥接在孔隙之间,当土体发生破坏时,可观察到丝网状物质的桥接断裂现象。这表明在外力作用下,原本通过丝网状物质相互黏结的土颗粒间的连接遭到破坏。

图8(d)为4%浓度PVA改良土放大5 000倍的SEM图像,从图中可以看出,当PVA浓度为4%时,改良土形成的水凝胶黏度较大,土颗粒将PVA完全包裹住,不利于PVA与土颗粒接触,导致土颗粒之间的引力或连接力减小,从而抑制立体丝网状结构与土颗粒相互连接,无法充分发挥出网状结构应产生的强度。因此,黏聚力和无侧限抗压强度反而降低。

3 结论

通过室内土工试验和SEM试验分析不同养护龄期及不同浓度PVA水凝胶掺入比条件下红黏土抗剪强度、无侧限抗压强度特性及微观机理,得出以下结论:

1) PVA改良土的抗剪强度指标在各浓度和龄期下均优于红黏土。在养护龄期相同的条件下,红黏土黏聚力随PVA浓度的增加先增后减,当PVA浓度为3%时达到峰值。养护期间改良土的内摩擦角均大于未改良红黏土,在1~7 d期间,内摩擦角随着PVA浓度的增加而增大;在14~28 d期间,改良土的内摩擦角基本稳定在 28.5° ~ 32.0° 之间,而未改良土内摩擦角无显著变化。

2) 在相同PVA浓度条件下,红黏土的无侧限抗压强度随养护龄期的增加而逐渐增大,但增幅较小。在相同养护龄期条件下,红黏土的无侧限抗压强度随着PVA浓度的增加,呈先增大后减小的趋势,当PVA浓度为3%时达到峰值。从峰值出现对应的应变来看,改良土破坏应变大于红黏土,改良土的塑性更好,稳定性更高。综合来看,浓度为3%的PVA改良红黏土的抗压强度效果最佳。

3) PVA 水凝胶通过填充孔隙、胶结土颗粒形成立体丝网状结构,从而增强红黏土的抗剪和抗压强度。当 PVA 浓度较低时,立体丝网状结构不完整,对强度提升有限;当 PVA 浓度为 3% 时,结构最优,黏结效果最佳。但当 PVA 浓度大于 3% 时,导致 PVA 包裹土颗粒,混合不均,削弱胶结作用,反而降低土颗粒之间的黏结强度。

参考文献:

- [1] 陈开圣, 骆弟普, 胡兴. 高掺量磷石膏稳定红黏土胀缩特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(2): 150-159.
CHEN K S, LUO D P, HU X. Swelling and shrinkage characteristics of high content phosphogypsum stabilized red clay[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 150-159.
- [2] 曹硕鹏, 付宏渊, 高乾丰, 等. 降雨作用下裂隙红黏土边坡渗流特征与冲刷模式[J]. 中国公路学报, 2022, 35(5): 33-43.
CAO S P, FU H Y, GAO Q F, et al. Seepage characteristics and scouring modes of a cracked red clay slope under rainfall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5): 33-43.
- [3] 陈开圣. 干湿循环下红黏土边坡裂隙演变规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(5): 52-61.
CHEN K S. Evolution law of fissures of red clay slope under wet-dry cycles[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(5): 52-61.
- [4] FU H Y, YU G T, GAO Q F, et al. Crack resistance and strength properties of red clay modified with lignocellulose and guar gum[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(10): 4152-4162.
- [5] 李健. 红黏土在公路路基中的路用性能研究[J]. 交通世界, 2021, 5(34): 135-136.
LI J. Study on road performance of red clay in highway subgrade[J]. Transpoworld, 2021, 5(34): 135-136.
- [6] 赵秀绍, 付智涛, 耿大新, 等. 千枚岩土掺入红黏土微观结构与压缩特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8732-8738.
ZHAO X S, FU Z T, GENG D X, et al. Experimental research on microstructures and compression characteristics of phyllite weatherized soil blended with red clay[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(21): 8732-8738.
- [7] 刘武. 高速公路石灰改良高液限红黏土试验研究[J]. 西部交通科技, 2022(5): 90-91.
LIU W. Experimental study on lime improved high liquid limit red clay for expressway[J]. Western China Commu-
- nications Science & Technology, 2022(5): 90-91.
- [8] 龙宁波, 屈俊童, 杨擎宇, 等. 水泥-纤维改良昆明地区红黏土动力特性试验[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6560-6572.
LONG N B, QU J T, YANG Q Y, et al. Experiment on dynamic properties of cement-fiber improve red clay in Kunming area[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6560-6572.
- [9] 吴鹏, 刘瑾, 车文越, 等. 刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土力学性质及数值试验研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版), 1-11 [2025-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250206.0910.002.html>.
WU P, LIU J, CHE W Y, et al. Reinforcement of red clay with locust bean gum composite and sisal fiber: mechanical properties and numerical testing[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1-11 [2025-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250206.0910.002.html>.
- [10] CHEN K, WANG Q, LUO D, et al. Study on dynamic characteristics of rubber-red clay mixtures[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 1-11.
- [11] 刘艾君, 肖桂元, 张祥宇, 等. 稻壳灰固化红黏土的路用性能及微观机理[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(3): 16-22.
LIU W J, XIAO G Y, ZHANG X Y, et al. Road performance and micro mechanism of rice husk ash modified red clay[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(3): 16-22.
- [12] JESSWEIN I, HIRTH T, SCHIESTEL T. Continuous dip coating of PVDF hollow fiber membranes with PVA for humidification[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 541: 281-290.
- [13] 郭浩天, 李亚培, 苑成旺, 等. 聚乙烯醇-木质素纤维改良粉质黏土力学特性试验研究[J/OL]. 交通科学与工程, 1-9 [2025-06-05]. <https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20241101002>.
GUO H T, LI Y P, YUAN C W, et al. Experimental study on mechanical properties of silty clay improved with polyvinyl alcohol-lignin fibers[J/OL]. Journal of Transport Science and Engineering, 1-9 [2025-06-05]. <https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20241101002>.
- [14] ZHUANG X, ZHANG B, LI X, et al. Experimental study of the dynamic characteristics of PVA-amended expansive soils[J]. Applied Sciences, 2023, 14(1): 292.

(下转第 70 页)

neering Journal, 2015, 48(9):76-84.

- [18] 王剑, 文国华. 基于 DM-LEFM 理论的混凝土桥梁受力主筋疲劳全寿命分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10):2597-2602.

WANG J, WEN G H. Life-cycle fatigue analysis of main reinforcements of the concrete bridge based on the DM-LEFM theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(10): 2597-2602.

(上接第 53 页)

- [15] LI Z, ZHAO Z, SHI H, et al. Experimental study on PVA-MgO composite improvement of sandy soil [J]. Materials, 2022, 15(16): 5609.

- [16] 文武, 庄心善, 赵奕杨, 等. PVA(聚乙烯醇)改良膨胀土强度性能试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2023, 38(1): 90-93.

WEN W, ZHUANG X S, ZHAO Y Y, et al. Experimental research on strength performance of PVA (polyvinyl alcohol) improved expansive soil[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2023, 38(1): 90-93.

- [17] 李中尧, 李文伟, 史海平, 等. 聚乙烯醇改良高原黏土水稳定性实验研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1205-1211.

LI Z Y, LI W W, SHI H P, et al. Experimental study on water stability of plateau clay improved by polyvinyl alcohol [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1205-1211.

- [18] 陈志昊, 刘瑾, 钱卫, 等. 高分子固化剂/纤维改良砂土的抗拉强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 350-359.

- [19] 白伦华, 朱劲松. 基于损伤-断裂综合法的钢筋混凝土桥梁疲劳寿命分析方法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(1):50-54.

BAI L H, ZHU J S. Fatigue life prediction method of reinforced concrete bridge based on damage and fracture integration method[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(1): 50-54.

(责任编辑 张爱丽)

CHEN Z H, LIU J, QIAN W, et al. Experimental study on tensile strength of polymer curing agent/fiber modified sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 350-359.

- [19] CHERDSAK S, SUKSUN H, CHAKKRID Y, et al. Evaluation of polyvinyl alcohol and high calcium fly ash based geopolymer for the improvement of soft Bangkok clay[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 27: 100476.

- [20] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1273-1277+1298.

LI Y P, LI T. Stability mechanism and research progress of soil stabilizer[J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 1273-1277+1298.

- [21] 孟立山, 詹秀环, 姚新建. 聚乙烯醇水凝胶的制备及其溶胀性能[J]. 化工技术与开发, 2010, 39(8): 13-14.

MENG L S, ZHAN X H, YAO X J, et al. Preparation of polyethylene(PVA) hydrogel and its properties [J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2010, 39(8): 13-14.

(责任编辑 张爱丽)