引用格式:杨东澍. 水泥固化黄土剪切强度特性及其影响因素研究[J]. 延安大学学报(自然科学版),2026,45(3):11-16.[YANG D S. Study on shear strength characteristics and influencing factors of cement-stabilized loess[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition),2026,45(3):11-16.] **DOI**:10.13876/J.cnki.ydnse.260058

水泥固化黄土剪切强度特性及其影响因素研究

杨东澍*

(西安稀有金属材料研究院有限公司,陕西 西安 710114)

摘　要:为研究水泥固化黄土的剪切强度特性及其影响因素,选用矿渣硅酸盐水泥制备固化黄土作为研究对象,开展中低压力条件下水泥固化黄土直剪试验,分析水泥掺量、养护龄期、压实密度、初始含水率及浸水条件对水泥固化黄土抗剪强度及其指标的影响规律。结果表明,水泥掺量、养护龄期及压实密度均能显著提升固化黄土的抗剪强度,抗剪强度随水泥掺量和压实密度呈线性增长关系,随养护龄期呈指数增长关系;固化黄土的黏聚力与水泥掺量、养护龄期符合指数函数关系,且水泥掺量和养护龄期对黏聚力的影响占主导地位;土体初始含水率变化动态调整固化黄土抗剪强度及其指标,存在一个临界含水率15%使黄土固化效果最优;浸水对固化黄土抗剪强度及指标的影响随水泥掺量增大而减弱,适当提高水泥掺量可有效抑制浸水带来的不利影响。研究成果可为黄土地区地基加固处理提供科学依据。

关键词:黄土;水泥固化体;抗剪强度;影响因素

中图分类号:TU444　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-602X(2026)03-0011-06

随着中国西部地区基础设施建设的快速发展,大量交通、水利工程在黄土地区修建。然而,黄土具有显著的水敏性、大孔隙性及结构性[1-2],尤其是湿陷性特征,在浸水作用下易发生显著沉降变形,进而引发路基沉陷、路面开裂及边坡失稳等工程灾害[3-4]。如何有效改良黄土的力学特性,提升其抗剪强度并降低湿陷性,保障路基与边坡的长期稳定性,已成为当前亟需解决的关键岩土工程问题。因此,针对黄土改良处理及其力学响应机制开展系统研究,具有重要的工程实践意义。

近年来,学者们围绕黄土的改良开展了大量试验研究,涉及多种固化材料与改性技术。工程中广泛采用的方法包括在黄土中按照一定的配合比直接掺入生石灰[5]、碳酸钙[6-7]、水泥[8]等固化剂,此类方法可有效提高压实黄土的抗剪强度。加筋材料[9]也被用于改善土体整体强度,试验表明当水平加筋筋材轴向应变达到3%~5%时,加筋土抗剪强度提升显著。另有学者尝试采用木质素纤维[10]、玻璃纤维[11]和复合相变材料[12]来改良黄土,发现4%掺量时可有效减弱冻融作用对黄土强度的影响。此外,部分研究提出利用酸性溶液[13]或乙酸钙源EICP溶液[14]改良黄土结构,试验证实酸性溶液对黄土静动强度具有较好的改良效果。在上述研究基础上,扫描电镜[15]和核磁共振[16]技术也逐渐被用于从微观角度解释改良黄土宏观强度的演化机制。

综上所述,现有研究成果极大地促进了黄土改良理论与技术的发展。然而,黄土具有显著的区域性和差异性特点,改良效果受水泥掺量、养护龄期、压实密度、初始含水率等多因素综合影响,尤其是多因素影响下水泥改良黄土的中低压力抗剪强度试验数据尚显匮乏。鉴于此,本文选用矿渣硅酸盐

收稿日期:2026-05-06

作者简介:杨东澍(1991—),男,工程师,主要从事建筑设计与工程管理研究。
*通信作者　E-mail:381843646@qq.com

水泥制备固化黄土作为研究对象,借助直剪试验系统研究中低压力条件下水泥固化黄土的剪切强度特性,对比分析水泥掺量、养护龄期、压实密度、初始含水率和浸水条件对抗剪强度指标的影响规律,以期为黄土地基加固处理提供科学依据。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验用土取自延安市宝塔区某建筑场地,所取土样呈黄色、黄褐色,土体较干燥,土质均匀,现场取样测定其天然密度为1.45 g/cm^3,含水率为12.5%。根据《土工试验方法标准GB/T50123-2019》[17](下文简称《规范》)开展室内土工试验,通过比重瓶法测得黄土的相对密度为2.72;通过数显液塑限联合测定仪(GYS-2型)测得黄土的液限为31.2%,塑限为17.3%;通过轻型击实试验(SJL-1型)确定黄土的最优含水率为15.2%,最大干密度为1.80 g/cm^3。选取P.S A32.5级矿渣硅酸盐水泥作为固化剂,拌合水采用自来水。

采用压样器制备直剪试样,试样直径为61.8 mm,高度为20.0 mm,其制备过程为:将取回的黄土过2 mm孔径的筛,烘干密封备用;采用增湿法配置含水率分别为10%、15%、20%、25%的土样,密封静置72 h以上,保证配置的各试验组土样含水率均匀;根据水泥质量与干土质量占比,配置不同水泥掺量6%、8%、10%的试样;计算目标密度所需土样质量,制备不同密度1.6、1.7、1.8 g/cm^{3}的水泥固化黄土试样。将制备好的试样分组密封和标记,放置到标准养护箱中恒温恒湿养护至不同龄期。

1.2 试验方法

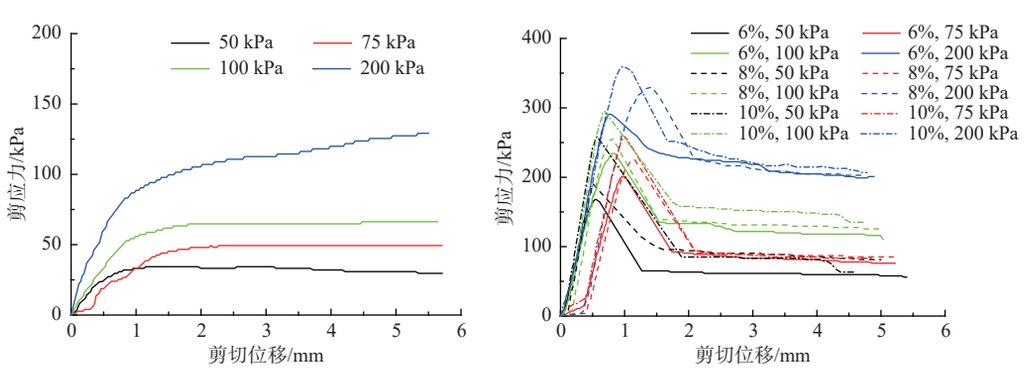
为探究水泥固化黄土的中低压力抗剪强度及其影响因素,本试验设置了5个实验组,分别记为A、B、C、D、E。其中,A组为素土,水泥掺量为0,作为试验对照组;B组为不同水泥掺量m(6%、8%、10%)、养护龄期t(1、3、7 d)固化黄土的直剪试验;C组为不同压实密度ρ(1.6、1.7、1.8 g/cm^3)固化黄土的直剪试验;D组为不同初始含水率w(10%、15%、20%、25%)固化黄土的直剪试验;E组为浸水24 h条件下不同水泥掺量m(6%、8%、10%)固化黄土的直剪试验。

试验借助全自动ZJ型应变控制式直剪仪进行抗剪强度测试,根据《规范》中直剪试验相关规定,试验采用快剪方式,加载速率取0.80 mm/min,分别对直剪盒内的土样施加50、75、100、200 kPa的法向压力进行剪切试验。

2 结果分析

2.1 剪应力-剪切位移关系曲线

图1为水泥固化黄土的剪应力-剪切位移关系曲线。由图可知,在相同剪切位移条件下,不同水泥掺量改良黄土的剪应力随上覆竖向荷载的增大而显著提高。水泥掺入对剪应力-剪切位移关系曲线的形态影响明显。当未掺入水泥时(图1A),试样剪应力-剪切位移关系曲线呈现典型的应变硬化特征,加载初期剪应力随剪切位移快速增长,当剪切位移达到约1.5 mm后,剪应力增幅减缓并最终趋于稳定。相比之下,水泥固化黄土试样的剪应力-剪切位移关系曲线表现为应变软化型(图1B),具有明显的"单峰"特征,剪应力达到峰值后试样被剪坏导致剪应力快速下降,破坏后仍保留一定的残余强度。随着水泥掺量的增加,试样剪应力-剪切位移关系曲线"单峰"特征越明显,剪应力峰值逐渐增大;与素黄土相比,改良黄土试样的"硬度"和"脆性"均增强。

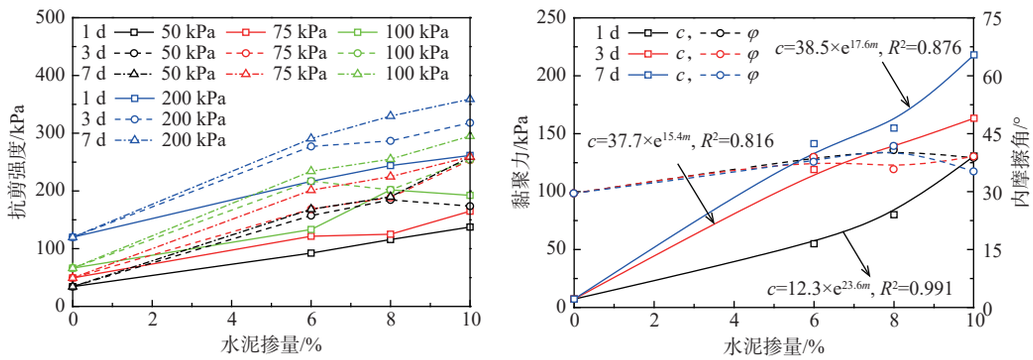


A. 素黄土　　B. 水泥掺量(t=7 d)

图1 不同试验条件下固化黄土剪应力-剪切位移关系曲线

2.2　水泥掺量对固化土抗剪强度的影响

根据直剪试验获取的固化土剪应力-剪切位移关系曲线(图1),取曲线上峰值点[17]作为抗剪强度。图2为水泥掺量对固化黄土抗剪强度及其指标的影响。由图可得,固化黄土的抗剪强度随水泥掺量增加均呈线性增长趋势(图2A);在相同龄期和压力条件下,水泥掺量从6%增至10%时,抗剪强度持续增长,以龄期7 d、法向压力200 kPa为例,6%、8%、10%水泥掺量对应的抗剪强度分别为290.7、329.7和359.0 kPa,为素土(120.0 kPa)的2.4~3.0倍。说明增加水泥掺量能有效增强土体的胶结能力和抗剪性能。



A. 抗剪强度　　B. 强度指标

图2　水泥掺量对固化黄土抗剪强度及其指标的影响

采用库仑强度公式(式(1))分别对不同法向压力状态下试样的抗剪强度进行拟合分析,获得的水泥掺量与黏聚力和内摩擦角之间的关系如图2B所示。

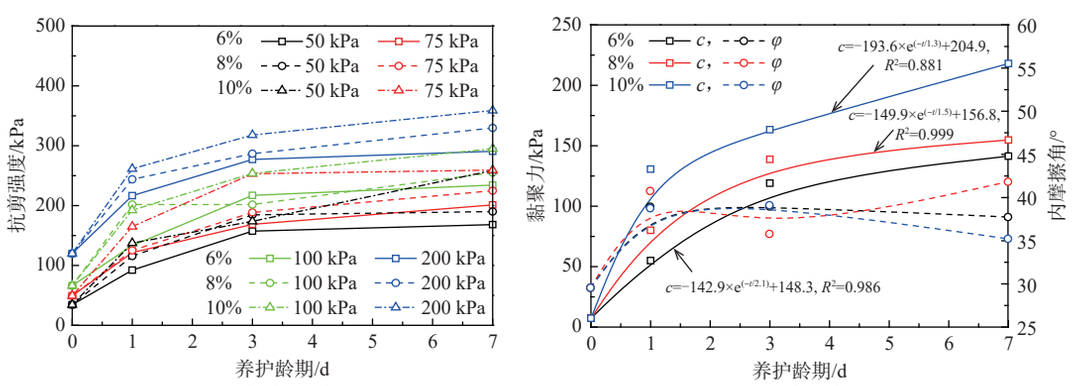
$$\tau_f = c + p\tan\varphi, \tag{1}$$

其中,τ_f为剪应力(kPa),p为法向压力(kPa),c为黏聚力(kPa),φ为内摩擦角(°)。

由图2B可知,试样的黏聚力与水泥掺量之间呈指数函数增长趋势,而内摩擦角则对水泥掺量的变化不敏感,整体波动较小;在相同养护龄期下,水泥掺量从6%增至10%时,黏聚力持续提升,以养护龄期7 d为例,6%、8%、10%水泥掺量对应的黏聚力分别为141.4、154.8和218.0 kPa,为素土(7.2 kPa)的19.6~30.3倍;内摩擦角在各掺量下基本保持在35.2°~41.8°范围内,无明显单调变化趋势,且在相同养护龄期不同掺量下的内摩擦角差异不大,甚至出现高掺量时内摩擦角降低的情况;以龄期7 d为例,6%、8%、10%水泥掺量对应的内摩擦角分别为37.7°、41.8°和35.2°,为素土(29.6°)的1.2~1.4倍。这表明水泥掺量主要增强土体的黏聚性能,对内摩擦角的影响不显著。

2.3　养护龄期对固化土抗剪强度的影响

图3为养护龄期对固化黄土抗剪强度及其指标的影响。由图可得,试样的抗剪强度随养护龄期延长呈指数函数增长趋势,且早期强度发展较为迅速;在相同水泥掺量和法向压力条件下,龄期从1 d增至7 d时,抗剪强度持续提升;以水泥掺量6%、法向压力200 kPa为例,1、3、7 d对应的抗剪强度分别为216.6、277.0和290.7 kPa,为素土(120.0 kPa)的1.8~2.4倍,其中1 d至3 d的增幅(27.9%)大于3 d至7 d的增幅(4.9%),表明早期固化反应活跃,后期强度增长趋于平缓(图3A)。



A. 抗剪强度　　B. 强度指标

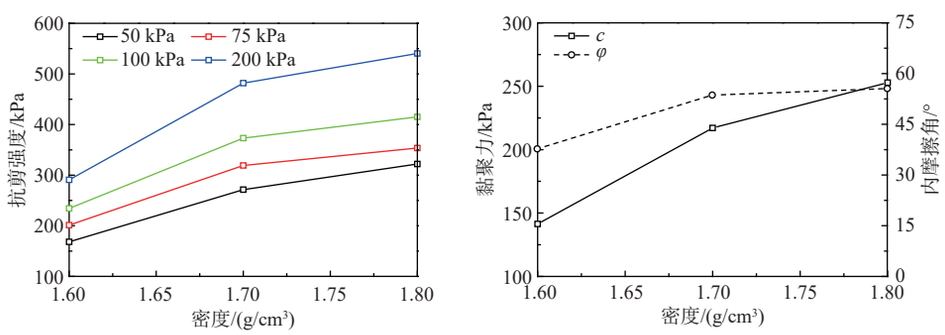
图3　养护龄期对固化黄土抗剪强度及其指标的影响

在相同水泥掺量下,随着龄期从 1 d 增至 7 d,黏聚力持续提升,但增长幅度逐渐减缓;以水泥掺量 6% 为例,1、3、7 d 对应的黏聚力分别为 55.0、119.0 和 141.4 kPa,为素土(7.2 kPa)的 7.6~19.5 倍,内摩擦角分别为 38.9°、39.0°和 37.7°,为素土(29.6°)的 1.27~1.32 倍(图 3B);试样的黏聚力随养护龄期增长符合指数函数增长趋势,而内摩擦角随养护龄期的变化不显著。结合图 2 和图 3 可知,水泥掺量和养护龄期对黏聚力的提升作用远大于内摩擦角。

2.4 压实密度对固化土抗剪强度的影响

如图 4 所示为压实密度对固化黄土抗剪强度及其指标的影响。由图可得,试样的抗剪强度随密度增加呈显著增长趋势,且在试验密度范围内近似符合线性增长关系;在相同水泥掺量、养护龄期和法向压力条件下,密度从 1.6 g/cm³增至 1.8 g/cm³时,抗剪强度持续增长;以法向压力 200 kPa 为例,密度 1.6、1.7、1.8 g/cm³对应的抗剪强度分别为 290.7、481.9 和 540.4 kPa,密度 1.7、1.8 g/cm³较密度 1.6 g/cm³的试样分别增加了 65.8% 和 85.9%。其中,密度从 1.6 g/cm³增至 1.7 g/cm³时强度增幅 65.8%,大于从 1.7 g/cm³增至 1.8 g/cm³时的增幅 12.1%,表明适当提高压实密度能显著改善土体抗剪性能,但超过一定密度后强度增长趋于平缓(图 4A)。

在相同水泥掺量和养护龄期下,随着密度从 1.6 g/cm³增至 1.8 g/cm³,黏聚力和内摩擦角均呈增长趋势,但增长幅度逐渐减缓(图 4B);密度 1.6、1.7、1.8 g/cm³对应的黏聚力分别为 141.4、217.1 和 252.8 kPa,密度 1.7、1.8 g/cm³较密度 1.6 g/cm³的试样分别提升了 53.5% 和 78.8%,内摩擦角分别为 37.7°、53.6°和 55.6°,密度 1.7、1.8 g/cm³较密度 1.6 g/cm³的试样分别提升了 42.2% 和 47.5%。可见,压实密度对黏聚力和内摩擦角均有提升作用,且对黏聚力的影响较内摩擦角更显著。

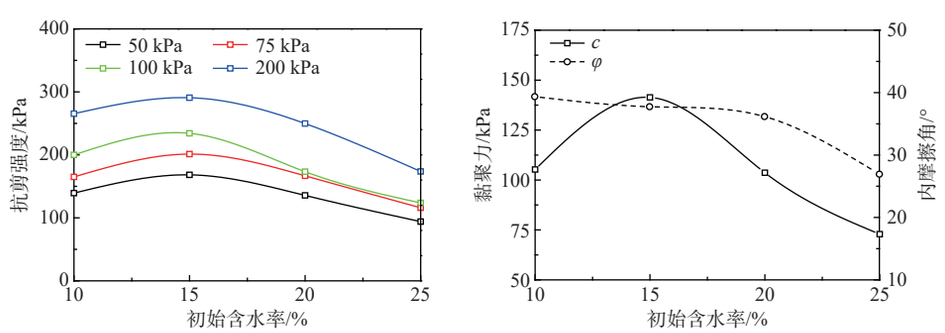


A. 抗剪强度 B. 强度指标

图 4 压实密度对固化黄土抗剪强度及其指标的影响

2.5 土体湿度对固化土抗剪强度的影响

如图 5 所示为土体湿度对改良黄土抗剪强度及其指标的影响。由图可得,在相同法向压力条件下,初始含水率从 10% 增至 25% 时,试样的抗剪强度呈先增加后减小的趋势;以法向压力 200 kPa 为例,初始含水率 10%、15%、20%、25% 对应的抗剪强度分别为 265.3、290.7、249.7 和 173.6 kPa,其中含水率 15% 时的抗剪强度最高,较含水率 10% 的试样提升了 9.6%,而含水率 20% 和 25% 时较峰值分别下降了 14.1% 和 40.3%,表明初始含水率过低或过高均不利于水泥固化黄土抗剪强度的发挥,存在一个临界含水率状态(约 15%)使黄土固化效果最优(图 5A)。



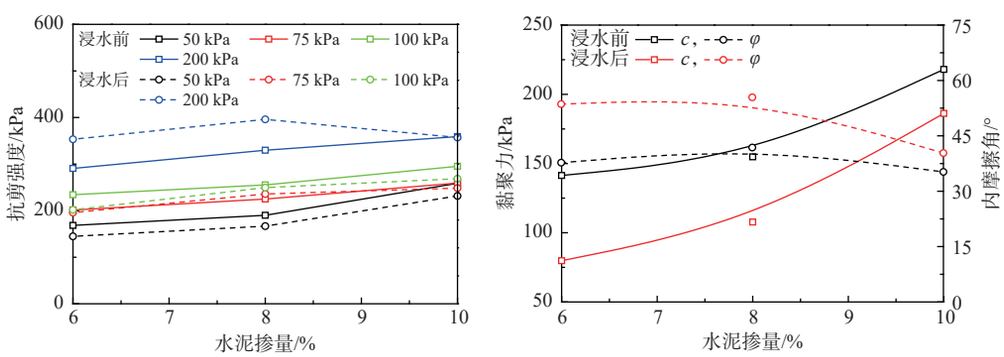
A. 抗剪强度 B. 强度指标

图 5 湿度状态对改良黄土抗剪强度及其指标的影响

随着初始含水率的增加，黏聚力呈先增后减趋势，而内摩擦角则持续下降；初始含水率10%、15%、20%、25%对应的黏聚力分别为105.3、141.4、103.7和72.9 kPa，含水率15%时黏聚力达到“峰值”，较含水率10%提升了34.3%，较含水率20%和25%分别高出36.4%和94.0%；初始含水率10%、15%、20%、25%对应的内摩擦角分别为39.4°、37.7°、36.2°和26.9°，内摩擦角逐渐减小，含水率25%时较含水率10%下降了31.7%。试样的黏聚力随初始含水率变化呈抛物线型分布，在最优含水率（约15%）附近达到峰值，而内摩擦角随含水率增加单调递减（图5B）。可见，初始含水率通过影响水泥水化反应的充分性和土体的密实状态，进而控制固化黄土的剪切性能，建议在实际工程中应结合水泥掺量将含水率控制在合理范围以获得最佳固化效果。

2.6　浸水条件对固化土抗剪强度的影响

如图6所示为浸水条件对固化黄土抗剪强度及强度指标的影响。由图可得，当法向压力为50 kPa时，浸水后抗剪强度降低了10%~14%，而在法向压力为200 kPa下，低水泥掺量（6%、8%）浸水后强度提升约20%，高水泥掺量（10%）浸水前后强度基本持平（图6A）。可见，浸水作用对试样抗剪强度的影响与法向压力大小和水泥掺量密切相关。



A. 抗剪强度　　B. 强度指标

图6　浸水条件对固化黄土抗剪强度及其指标的影响

浸水前6%、8%、10%水泥掺量对应的黏聚力分别为141.4、154.8和218.0 kPa，内摩擦角分别为37.7°、41.8°和35.2°；浸水后6%、8%、10%水泥掺量对应的黏聚力分别为79.8、107.7和186.2 kPa，内摩擦角分别为53.6°、55.4°和40.3°；浸水后试样的黏聚力较浸水前分别减小了43.6%、30.4%和14.6%，而内摩擦角分别增加了42.2%、32.5%和14.5%（图6B）。这表明浸水作用导致黏聚力明显降低、内摩擦角升高，且水泥掺量越低，浸水作用对黏聚力的弱化作用和对内摩擦角的增强作用越明显；随着水泥掺量增加，浸水作用的影响逐渐减弱。综上可知，浸水作用改变了土体的胶结状态和颗粒摩擦特性，使固化黄土的抗剪强度发生动态调整，且适当提高水泥掺量可有效缓解浸水带来的不利影响。

3　结论

1）水泥固化黄土剪应力-剪切位移曲线呈应变软化型；固化黄土抗剪强度随水泥掺量呈线性增长趋势，随养护龄期呈指数函数增长趋势；养护龄期7 d后水泥固化黄土的黏聚力提升至素土的19.6~30.3倍，而内摩擦角提升至素土的1.2~1.4倍；固化黄土的黏聚力与水泥掺量和养护龄期之间符合指数函数关系，水泥掺量和养护龄期对固化黄土黏聚力的提升占主导作用。

2）固化黄土抗剪强度随压实密度增加呈线性增长关系，压实密度对黏聚力和内摩擦角均有提升作用，且对黏聚力的影响更明显；土体初始含水率变化动态调整固化黄土抗剪强度，初始含水率过低或过高均不利于水泥固化黄土抗剪强度的发挥，存在一个临界含水率15%使黄土固化效果最优。

3）浸水作用导致固化黄土的黏聚力明显降低（降幅14.6%~43.6%）、内摩擦角升高（增幅14.5%~42.2%），且水泥掺量越低对其的影响越显著；浸水作用改变了土体胶结状态与摩擦特性，使抗剪强度动态调整，适当提高水泥掺量可有效减弱浸水带来的不利影响。

参考文献：

[1]谢定义，邢义川. 黄土土力学[M]. 北京：高等教育出版社，2016.

[2]邱明明，许丹，孙杰龙，等. 增减湿效应对延安Q_3黄土抗压强度的影响规律[J]. 延安大学学报（自然科学版），

2023,42(3):115-120.
[3]张雄,刘永行,刘庆元.延安地区降雨入渗对黄土抗剪强度影响研究[J].延安大学学报(自然科学版),2017,36(4):81-83+86.
[4]邓友生,李龙,孙雅妮,等.水泥粉煤灰处理湿陷性黄土路基承载性能[J].交通运输工程学报,2023,23(4):92-103.
[5]谢潇,王璐瑶,邓乐娟,等.生石灰改良黄土的微观机制试验研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(6):193-199.
[6]边瑞,刘海松,王海曼,等.不同碳酸钙掺量压实黄土的力学性能试验研究[J].科学技术与工程,2022,22(4):1566-1573.
[7]刘东发,张豫川,高旭龙,等.木质素磺酸钙改良黄土的结构性机理[J].兰州大学学报(自然科学版),2023,59(4):468-475.
[8]葛菲,巨玉文,蒋宗耀,等.水泥硅微粉改良黄土的抗剪强度试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(16):6565-6569
[9]何玉琪,廖红建,董琪,等.加筋材料改良黄土强度特性的试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(S1):181-185.
[10]董超凡,张吾渝,孙翔龙,等.木质素纤维改良黄土抗剪强度的试验研究[J].安全与环境工程,2022,29(2):102-110.
[11]冀慧,张涛,刘保健.干湿循环下复合改良黄土剪切力学特性试验研究[J].长江科学院院报,2021,38(8):120-126+132.
[12]朱怀太,欧尔峰,姜琪,等.冻融作用下复合相变材料改良黄土力学特性研究及机理分析[J].防灾减灾工程学报,2024,44(3):715-724
[13]张耀,胡再强,陈昊,等.酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(4):681-688.
[14]田威,云伟,党可欣,等.不同钙源EICP溶液改良路基黄土动力特性研究[J].材料导报,2024,38(9):1-13.
[15]何玉琪,廖红建,倪诗雨,等.超疏水材料改良黄土的宏微观抗渗机制研究[J].西安交通大学学报,2022,56(11):62-71.
[16]高梦娜,王旭,李建东,等.膨润土石灰改良黄土强度及微观结构试验研究[J].水利水运工程学报,2022(5):86-93.
[17]中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[责任编辑 张 香]

Study on shear strength characteristics and influencing factors of cement-stabilized loess

YANG Dongshu*

(Xi'an Rare Materials Institute Co., Ltd, Xi'an 710114, China)

Abstract: To investigate the shear strength characteristics and influencing factors of cement-stabilized loess, slag Portland cement was used to prepare stabilized loess samples. Direct shear tests were conducted under medium-to-low pressure conditions to analyze the effects of cement content, curing age, compaction density, initial moisture content, and soaking conditions on the shear strength and its parameters. Results indicate that cement content, curing age, and compaction density significantly enhance the shear strength of stabilized loess. Shear strength increases linearly with both cement content and compaction density, and exponentially with curing age. The cohesion of stabilized loess follows an exponential relationship with cement content and curing age, with these two factors being dominant in influencing cohesion. Initial soil moisture content dynamically affects the shear strength and its parameters, with an optimal stabilization effect observed at a critical moisture content of 15%. The impact of soaking on shear strength and parameters diminishes as cement content increases; thus, increasing cement content appropriately can effectively mitigate adverse effects caused by soaking. These findings provide a scientific basis for foundation reinforcement in loess regions.

Key words: loess; cement-stabilized soil; shear strength; influencing factors