

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.117



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土的强度特性 及其微观机理

孟敏强, 王铭泽, 刘亚丽, 章煜阳, 刘光宇, 茹含
(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:工业固废磷石膏能有效提升土体强度,但会增大土体脆性,而纤维加筋能改良土体的塑性,两种材料协同可形成互补。以陕西杨凌黄土为研究对象,通过无侧限抗压强度试验探究磷石膏改良黄土的最优掺量;基于最优掺量开展直剪试验,探究纤维加固磷石膏改良黄土的最优掺比;最后通过扫描电镜试验(SEM)探究磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土的微观机理。结果表明:单掺磷石膏改良加固黄土时,随着磷石膏质量占比的增大,改良后黄土的无侧限抗压强度先增大后减小,磷石膏掺入黄土的最优掺量为12%。基于磷石膏改良黄土的最优掺量掺入聚丙烯纤维发现,随着聚丙烯纤维掺量的增大,试样的峰值强度、黏聚力和残余强度均先增大后减小,内摩擦角持续增大;微观试验表明,磷石膏改良黄土和磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土均能增强土粒间的胶结作用,填充土粒间孔隙;聚丙烯纤维在黄土中会形成纤维团包裹土颗粒,从而为土粒提供拉应力,提升土样塑性。

关键词:黄土;磷石膏;聚丙烯纤维;强度特性;微观机理

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0070-10

Strength characteristics and microscopic mechanisms of loess improvement with phosphogypsum and polypropylene fibers

MENG Minqiang, WANG Mingze, LIU Yali, ZHANG Yuyang, LIU Guangyu, RU Han

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, P. R. China)

Abstract: Phosphogypsum, as one of the industrial solid wastes, can enhance the soil strength but also increase the brittleness while the fiber reinforcement technique can improve the soil plasticity. The synergy between the two materials (phosphogypsum and fiber) can play a complementary role in improving the mechanical properties of soils. The loess from Yangling, Shaanxi Province, was used to explore the optimal mix ratio of phosphogypsum in the loess by unconfined compressive strength (UCS) tests. Then, the optimal mix ratio of fiber in the

收稿日期: 2024-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(52108343);中国博士后科学基金(2021M702689);陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0790)

作者简介: 孟敏强(1991-), 博士, 副教授, 主要从事土体的基本力学特性及加固改良技术研究, E-mail: mengmq@nwfau.edu.cn.

Received: 2024-07-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52108343); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2021M702689); The Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Program (No. 2023-JC-QN-0790)

Author brief: MENG Minqiang (1991-), PhD, associate professor, main research interests: basic mechanical properties of soil and soil reinforcement and improvement technology, E-mail: mengmq@nwfau.edu.cn.

mixture of phosphogypsum and loess was investigated by the direct shear test based on the mixture ratio above. Finally, the microscopic mechanisms of loess improvement with phosphogypsum and polypropylene fibers were examined through scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the loess UCS increases first and then decreases with an increase in the phosphogypsum mass when the phosphogypsum is mixed with the loess for reinforcement, and the optimal mix mass ratio of phosphogypsum in the loess is 12% in this study. The polypropylene fibers were then mixed into the mixture of phosphogypsum and loess based on the optimal mix mass ratio of phosphogypsum in the loess. It can be found that the peak strength, cohesion, and residual strength of the mixture sample increase first and then decrease, while the internal friction angle increases, with an increase in the polypropylene fiber content. The microscopic test results also indicated that the phosphogypsum-improved loess and phosphogypsum-polypropylene fiber-improved loess both significantly enhance the cementation and fill the voids among soil particles. Polypropylene fibers in loess can form fiber clumps to wrap the soil particles, thereby providing tensile stress and improving the plasticity for the soil sample.

Keywords: loess; phosphogypsum; polypropylene fiber; strength properties; microscopic mechanisms

中国西北地区黄土广泛分布,常被用作夯土用土和路基用土^[1-2]。黄土本身具有较高的抗压强度和承载能力,但其塑性较弱、黏聚力较低,因此在工程建设中常用生石灰、水泥、粉煤灰等材料对黄土进行改性处理^[3-4]。然而水泥、石灰等材料的生产会对环境造成危害^[5-6],且其固化机理为水化反应,反应过程中产生大量的水化热,导致土体固化后结构内部存在一定缺陷,同时还造成土体结构内外温度差异;固化后的土体在农业领域的再利用也较为困难。因此,寻找合适的环境友好型固化材料替代传统材料对于工程建设及环境保护具有重大意义。

磷石膏是一种典型的工业固废材料,主要来源为湿法制磷工艺,具有产量大、利用率低的特点^[7-8]。目前磷石膏的应用多集中于建材生产领域,但技术尚不成熟^[9],因此造成大量的堆积浪费,带来严重的环境污染和资源占用问题。聚丙烯纤维本身具有优良的抗拉性能,掺入土体后可改良土体性质,很好地提升土体的塑性及强度^[10]。因此,可采用工业固废磷石膏代替传统固化材料,协同聚丙烯纤维改良黄土。

近年来,学者们对磷石膏固化黄土和聚丙烯纤维加筋黄土开展了大量试验研究。赵之等^[11]用磷石膏作为固化剂固化铅污染土发现,磷石膏能增大铅污染土的无侧限抗压强度(UCS),且强度提升效果随掺量的增加呈上升趋势。王应富等^[12]利用磷石膏、钢渣和矿渣共同固化低液限粉质黏土,黏土的后期强度得到了大幅提升。Ren等^[13]研发了磷石膏矿渣基胶凝材料,该材料固化铅污染土后,土体由酸性变为碱性。Wu等^[14]发现,通过纤维加筋,黄土的水稳定性显著提高。Wang等^[15]发现,采用聚丙烯纤维加筋黄土,能有效增强黄土的无侧限抗压强度

和延展性。Khodabandeh等^[16]研究表明,随着纤维掺量的增加,试样的破坏应变增大,掺入纤维能有效防止试样过早破坏。熊雨等^[10]采用纤维加筋技术发现,加筋后土样抵抗形变的能力明显增强。

综上,目前针对单掺磷石膏或纤维改良黄土力学特性方面的研究已较为丰富,但关于磷石膏作为固化剂以及磷石膏协同纤维改良黄土的相关研究仍有待加强。基于此,笔者采用磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土,以探究改良后黄土强度特性的变化规律,揭示二者协同改良黄土的微观机理。首先选用单掺磷石膏方式改良黄土,通过无侧限抗压强度试验确定磷石膏改良黄土的最优掺量;在此基础上,掺入不同比例的聚丙烯纤维对土样开展进一步改良,借助直剪试验研究磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土的强度特性;最后通过扫描电镜(SEM)试验分析试样的微观结构变化特征,揭示改良黄土的微观机理。

1 试验

1.1 试验材料

图1(a)为试验用黄土,取自陕西省杨凌示范区夏家沟村建筑工地基坑,取土深度约5 m,呈黄褐色,质地细腻,无石块、植物根系等杂质。土样取回后自然风干、磨碎,过2 mm标准筛,密封备用。选用的工业固废材料磷石膏(图1(b))为灰白色粉末,遇水可凝固成坚硬固体,且具有一定吸水性;选用聚丙烯纤维(图1(c)),该纤维以丙烯聚合得到的等规聚丙烯为原料纺制而成,属合成纤维,具有较强抗拉强度。

为获得土样的最大干密度及最优含水率,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对土样

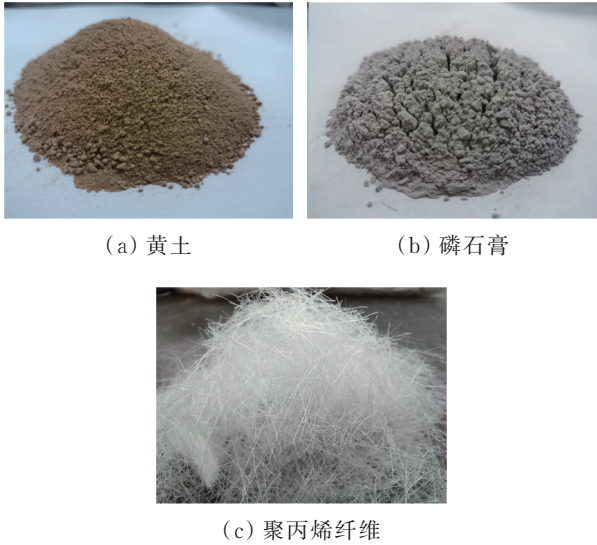
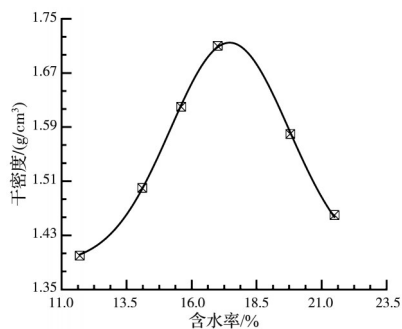


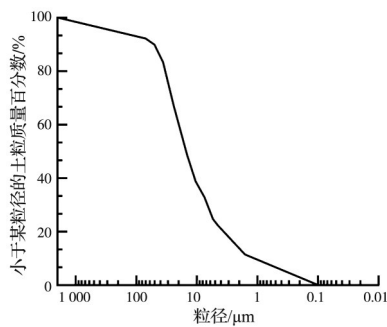
图 1 试验材料

Fig. 1 Test materials

开展击实试验, 击实曲线如图 2(a) 所示; 同时开展土样颗粒分析试验, 试样级配曲线如图 2(b) 所示。土样的基本物理性质见表 1, 磷石膏的主要成分及其含量见表 2, 聚丙烯纤维的基本参数见表 3。



(a) 击实曲线



(b) 颗粒级配曲线

图 2 物理性质指标

Fig 2 Physical property indicators of the sample

1.2 试样制备及试验方案

因操作简单方便、准确度较高等优点, 无侧限抗压强度试验和直剪试验已成为土工试验中分析土体抗剪强度的常用方法。无侧限抗压强度试验主要关注试样的峰值强度, 且可直观观察试样破坏形式, 因此被广泛应用于固化材料最优掺量的确定^[17-20]。后续分析试样的剪切变形及抗剪强度时, 直剪试验的相关指标可使试验结果更加清晰。首先通过无侧限抗压强度试验确定磷石膏改良黄土的最优掺量, 随后开展直剪试验分析磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土的强度特性。具体过程如下:

1) 参照黄土最大干密度与最优含水率制备试样, 制备过程中综合考虑水分挥发及磷石膏的吸水性影响, 将试样干密度控制为土样最大干密度, 含水率控制为高于最优含水率, 试验中该值设为 20%。所有土样过 2 mm 标准筛, 按照试验设计方案, 将不同掺量的磷石膏(质量占比 0%、2%、4%、8%、12%、16%) 与黄土搅拌均匀, 分 3 份分层放入容器中; 向各层均匀喷淋总用水量的 1/3, 随后用保鲜膜密封容器, 在恒温恒湿(20 °C、98%) 养护箱内静置养护 24 h 以上, 确保水分均匀自渗。养护完成后将土样捣碎混匀, 采用静压压实法制成直径 4 cm、高 8 cm 的柱状试样, 压实后静置 5 min, 以保证土样定型与稳定; 待试样稳定后脱模, 包裹保鲜膜并密封于自封袋, 再放入养护箱养护 3 d。完成上述过程后, 开展无侧限抗压强度试验(试验仪器如图 3(a) 所示), 探究混合土样的无侧限抗压强度随磷石膏质量占比的变化规律, 确定磷石膏-黄土的最优配合比。

2) 根据已有试验结果^[15, 21-25], 确定聚丙烯纤维的长度为 15 mm。为研究纤维掺比对磷石膏改良黄土强度特性的影响, 分析其应力-应变关系特征、抗剪强度及强度指标的变化规律, 选用 0%、0.2%、0.4%、0.8%、1.6%(质量比) 的纤维掺比开展直剪试验(试验仪器如图 3(b) 所示), 试验中剪切速率控制为 0.8 mm/min, 法向应力设定为 50、100、200、400 kPa。直剪试验中试样制备步骤同无侧限抗压强度试验一致。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) 的要求, 将试样剪切变形控制为 4 mm; 若试验过程中剪切变形在 4 mm 内未出现峰值读数, 则继续试验, 直至剪切变形达到 6 mm 时为止。

表 1 杨凌黄土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of Yangling loess

颗粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/(g/cm³)	最优含水率/%	颗粒组成/%		
						2 mm > d ≥ 0.075 mm	0.075 mm > d ≥ 0.005 mm	d < 0.005 mm
2.70	31.6	17.3	14.3	1.72	16.8	6	72	22

表 2 磷石膏的主要成分及含量

Table 2 Main components and contents of phosphogypsum %

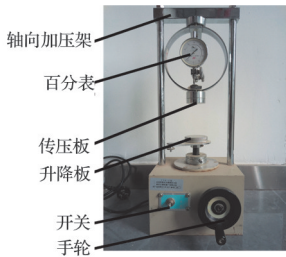
SO ₃	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
43.35	32.16	9.42	1.18	0.43	0.19	0.05

表 3 聚丙烯纤维的基本参数

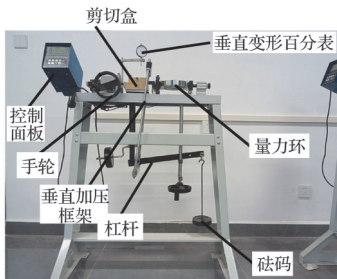
Table 3 Basic parameters of polypropylene fiber

密度/ (g/cm ³)	平均直径/ μm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	极限伸长 率/%
0.91	31	645	7.0	10~28

试验操作中,实时观测试样的剪切位移,试验停止以仪器手轮转数为判断依据,待仪器显示位移达到 4 mm 或者 6 mm 时停止试验;随后根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)表 D. 39 中的相关公式,计算试样实际剪切位移。



(a) 无侧限抗压强度仪



(b) ZJ-2 型应变控制式直剪仪

图 3 试验仪器

Fig. 3 Test instrumentation

2 无侧限抗压强度试验结果分析

2.1 应力-应变关系

图 4 为单掺磷石膏时黄土试样的无侧限抗压强度应力-应变关系曲线以及磷石膏质量占比为 12% 时的试样在试验各阶段的破坏发展过程。由图 4 可知,不同磷石膏掺量条件下,试样应力均呈先增大后减小的变化趋势。在应力达到峰值强度前,试样表面出现小裂缝并不断发展;当应力达到峰值强度后,试样发生破坏,应变继续增大而应力逐渐减小。对比掺入磷石膏的改良试样,未掺入磷石膏的素土破坏应变较大(约 3.8%),且峰值强度不明显,整体

呈塑性破坏特征。掺入磷石膏后,试样的破坏应变减小;当磷石膏掺量为 2% 时,破坏应变约 3.2%;随着掺量由 2% 增至 4%、8%、12%,破坏应变逐渐增至约 3.5%;当掺量继续增大至 16% 时,破坏应变约下降至 3.2%。纵向对比各应力-应变关系曲线可知,尽管峰值强度随磷石膏掺量的增加而变化,但在达到峰值强度前,不同掺量下试样的应力-应变曲线几乎重合。此外,磷石膏改良黄土的曲线斜率均大于素土,且呈脆性破坏特征。

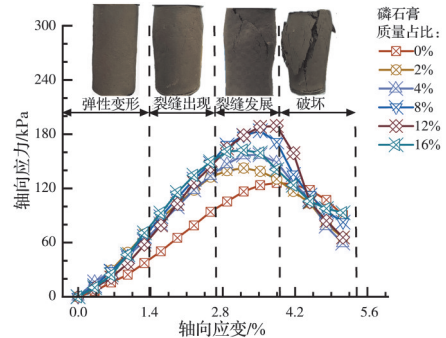


图 4 磷石膏改良黄土的应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of phosphogypsum-improved loess

2.2 无侧限抗压强度

图 5 为试样无侧限抗压强度随磷石膏掺量的变化关系曲线。由图 5 可知,随着磷石膏掺量的增加,试样的无侧限抗压峰值强度呈先增大后减小的变化趋势。当磷石膏掺量由 2% 增至 8% 时,峰值强度随磷石膏掺量的增加几乎呈线性增长,由 126 kPa 增至 184 kPa;当磷石膏掺量超过 8% 后,试样峰值强度的增长速率变缓;当磷石膏掺量为 12% 时,试样峰值强度达到最大值(189 kPa),较未掺入磷石膏的素土提升约 50%;当磷石膏掺量继续增加至 16% 时,试样的峰值强度减小至 162 kPa,但其峰值强度仍较素土试样提升约 28.5%。值得注意的是,12% 磷石膏掺量试样的峰值强度较 8% 磷石膏掺量试样提升 5 kPa,且比 16% 磷石膏掺量试样高 27 kPa,这表明磷石膏掺入过多时会对试样的无侧限抗压强

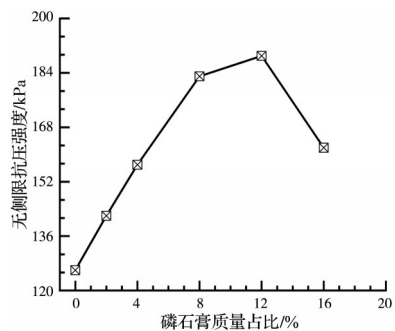


图 5 无侧限抗压峰值强度曲线

Fig. 5 Unconfined compressive peak strength curve

度产生显著的负面影响,导致强度明显下降。基于以上试验结果,确定后续研究中磷石膏的最优掺量为 12%。

3 直剪试验结果分析

3.1 应力-应变关系

图 6 为不同纤维掺比的磷石膏改良黄土试样在不同法向应力作用下剪应力 τ 与剪位移 δ 的关系曲

线。剪应力与剪位移的计算式分别为

$$\tau = \frac{R \times C}{A_0} \times 10 \quad (1)$$

$$\delta = \gamma t - R \quad (2)$$

式中: τ 为剪应力, kPa; R 为测力计读数, 0.01 mm; C 为量力环系数, N/0.01 mm; A_0 为试样初始面积, cm^2 ; δ 为剪位移, 0.01 mm; γ 为剪切速率, mm/min; t 为剪切时间, s。

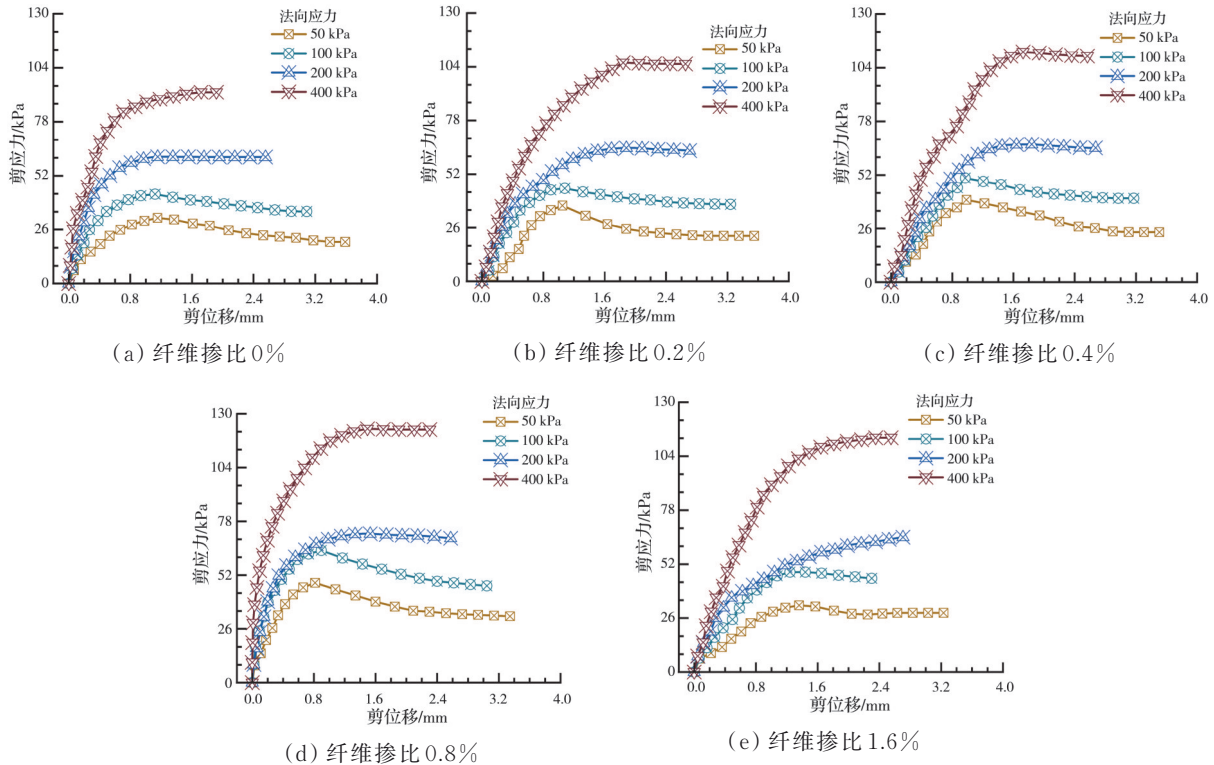


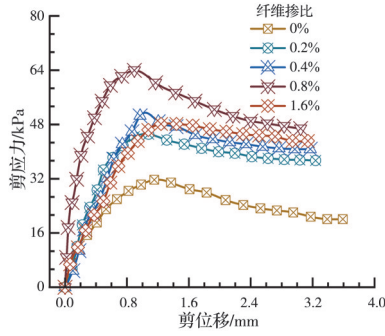
图 6 不同纤维掺比下的 τ - δ 关系曲线

Fig. 6 Relationship between τ and δ under different fiber content ratios

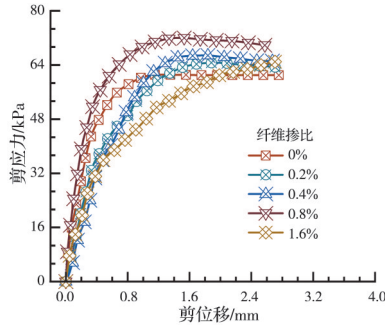
由图 6 可知,在相同纤维掺比、不同法向应力条件下,当法向应力为 50、100 kPa 时,改良黄土的剪应力随剪位移的增大呈先增大后减小的变化趋势。在剪切初始阶段,该法向应力下试样的剪应力随剪位移的增大而增大,且增长速率较快;临近峰值强度时,剪应力的增长速率逐渐减缓;达到峰值强度后,剪位移继续增加而剪应力逐渐减小并趋于稳定,试样呈先硬化后软化的状态,表现出应变软化特征。当法向应力为 200、400 kPa 时,改良黄土的剪应力随剪位移的增大持续增大,直至稳定。该条件下试样的应力-应变规律与 50、100 kPa 法向应力条件下的规律存在共性,即剪切初始阶段剪应力随剪位移的增大而增大,且增长速率较快;不同之处在于,剪应力达到峰值强度后基本不再随剪位移变化,趋于稳定并表现出应变硬化特征。将试样的稳定强度定义为残余强度^[26-28]。

图 7 为不同法向应力、不同纤维掺比下改良黄土的剪应力 τ 与剪位移 δ 关系曲线。由于法向应力为 50 kPa 时试样的应力-应变特征与 100 kPa 时一致,法向应力为 400 kPa 时试样的应力-应变特征与 200 kPa 时一致。因此主要分析法向应力为 100、200 kPa 时改良黄土的应力-应变关系。

由图 7 可知,当法向应力为 100 kPa 时,试样基本均呈应变软化特征;当法向应力为 200 kPa 时,试样基本均呈应变硬化特征。试样的应变软化与应变硬化特征主要与法向应力有关,纤维掺比对其影响较小。纵向对比图 7 可知,当纤维掺比由 0% 增加至 0.8% 时,试样的峰值强度逐渐增大;而当纤维掺比进一步增至 1.6% 时,试样的峰值强度均有所降低。值得注意的是,在整个试验过程中,相同剪位移下,相较于其他掺比组,纤维掺比 0.8% 的试验组对应的剪应力均显著更高。



(a) 法向应力 100 kPa



(b) 法向应力 200 kPa

图 7 不同法向应力下 τ - δ 关系曲线

Fig. 7 Relationship between τ and δ under different normal stresses

3.2 纤维加筋对改良黄土试样强度的影响

3.2.1 峰值强度

图 8 为不同法向应力下改良黄土试样峰值强度与纤维掺比的关系曲线。由图 8 可知,在不同法向应力下,当纤维掺比由 0% 增至 0.2% 时,试样的抗剪强度明显提高;当纤维掺比由 0.2% 增至 0.8% 时,试样的抗剪强度随纤维掺比的增加大致呈线性增长;当纤维掺比由 0.8% 增至 1.6% 时,试样的抗剪强度反而降低。选取法向应力为 100、200 kPa 时的峰值强度进行分析可知:当法向应力为 100 kPa 时,纤维掺比为 0% 的试样抗剪强度为 43.12 kPa,纤维掺比为 0.2% 的试样抗剪强度为 45.39 kPa,约增长了 5%;当纤维掺比由 0.2% 增至 0.8% 时,试样的抗剪强度由 45.39 kPa 增至 63.95 kPa,约增长了 41%;而当纤维掺比由 0.8% 增至 1.6% 时,抗剪强度由 63.95 kPa 降低至 45.90 kPa,约降低了 28%。当法向应力为 200 kPa 时,纤维掺比为 0.2% 的试样抗剪强度为 64.77 kPa,对比纤维掺比为 0% 的试样,抗剪强度约增长了 6%;当纤维掺比由 0.2% 增至 0.8% 时,抗剪强度由 64.77 kPa 增至 73.50 kPa,约增长了 13%;而当纤维掺比由 0.8% 增至 1.6% 时,抗剪强度由 73.50 kPa 降低至 65.97 kPa,约降低了 10%。法向应力为 50、400 kPa 时试样的抗剪强度变化趋势与上述规律相同。

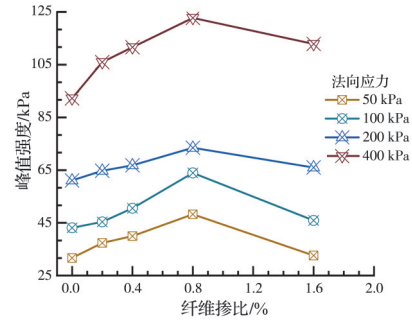


图 8 峰值强度-纤维掺比关系图

Fig. 8 Relationship between peak strength and fiber content ratio

3.2.2 黏聚力和内摩擦角

图 9 为不同掺量纤维加筋试样的直剪试验库伦曲线图,曲线拟合采用一次线性拟合,见式(3)、式(4)。

$$\tau = k\sigma + c \tag{3}$$

$$\varphi = \arctan k \tag{4}$$

式中: c 为黏聚力,kPa; φ 为内摩擦角, $(^\circ)$ 。相关数值如图 9 所示。

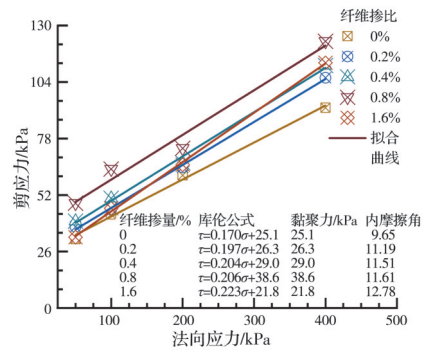


图 9 剪应力与法向应力的关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between shear stress and normal stress

图 10、图 11 分别为不同纤维掺比条件下磷石膏改良黄土试样的黏聚力、内摩擦角变化曲线。由图 10 可知,随着纤维掺比的增大,改良黄土试样的黏聚力先增大后减小,当纤维掺比为 0.8% 时,其黏聚

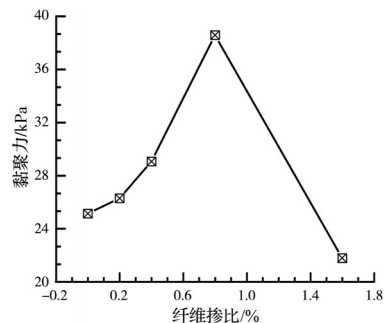


图 10 黏聚力-纤维掺比关系图

Fig. 10 Relationship between cohesion and fiber content ratio

力最大,为 38.6 kPa,较纤维掺比为 0% 的试样提升了 53.8%。当纤维掺比小于 0.8% 时,改良黄土试样的黏聚力均高于纤维掺比为 0% 的试样,其中纤维掺比为 0.2% 时黏聚力提升了 4.8%,纤维掺比为 0.4% 时黏聚力提升了 15.5%;当纤维掺比大于 0.8% 时,试样黏聚力呈下降趋势,当纤维掺比为 1.6% 时,黏聚力下降了 12.7%。由此可见,当纤维掺比过高时,改良黄土试样的黏聚力低于纤维掺比为 0% 的试样。

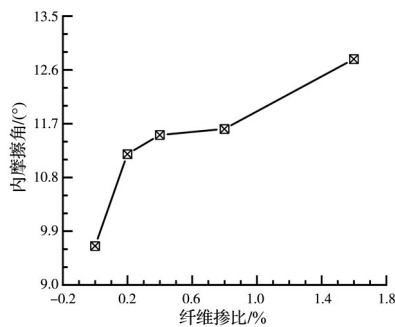


图 11 内摩擦角-纤维掺比关系图

Fig. 11 Relationship between internal friction angle and fiber content ratio

由图 11 可知,随着加筋纤维掺比的增大,磷石膏改良黄土试样的内摩擦角呈持续增长趋势,但其增长速率无明显规律。具体表现为:相较于纤维掺比为 0% 的试样,纤维掺比为 0.2% 时内摩擦角增大 15%,纤维掺比为 0.4% 时内摩擦角增大 19%,纤维掺比为 0.8% 时内摩擦角增大 20%,纤维掺比为 1.6% 时内摩擦角增大 32%。值得注意的是,当纤维掺比由 0.8% 增加至 1.6% 时,内摩擦角提升幅度明显,而其余试验组的内摩擦角虽均显著高于纤维掺比为 0% 的试样,但随着纤维掺比的增大,各试样之间并没有特别明显的提升幅度。出现这一现象的原因在于:试样的内摩擦力主要由颗粒间的摩擦力、颗粒与纤维间的摩擦力以及纤维勾连作用所提供的部分摩擦力构成。当纤维掺比从 0.2% 增加至 0.8% 时,纤维掺比虽有所提高,但占试样总体积的比例仍较低,且纤维的掺入虽使土样颗粒间摩擦力减小,却能通过自身补充部分摩擦力,因此对整体摩擦力未产生较大影响;而当纤维掺比增加至 1.6% 时,试样内部纤维增多,土样成层现象明显,颗粒间摩擦力进一步降低,此时试样的摩擦作用以纤维间相互作用为主。由于纤维的抗拉强度远高于试样的抗剪强度,试样剪切面处的纤维将自身部分抗拉强度转化为试样的抗剪强度,最终导致试样的摩擦角提升明显。

3.2.3 残余强度

土的残余强度指土样受到剪应力后产生沿剪应力方向的位移,破坏面的土粒在摩擦力作用下发生相对位移、重新排列,最终达到理想排列状态时保留的强度^[29]。由于法向应力为 200、400 kPa 时试样均表现为应变硬化特征,峰值强度等于临界状态时的强度,故不再分析其残余强度。图 12 为法向应力为 50、100 kPa 时试样残余强度随纤维掺比的变化曲线。由图 12 可知,当纤维掺比由 0% 增长至 0.8% 时,试样的残余强度与纤维掺比大致呈线性正相关,在纤维掺比为 0.8% 时达到最大值。当法向应力为 50 kPa 时,纤维掺比 0.8% 的改良黄土试样残余强度较纤维掺比为 0% 的试样约增长 55%;当法向应力为 100 kPa 时,纤维掺比为 0.8% 试样的残余强度较纤维掺比为 0% 的试样约增长 30%。当纤维掺比超过 0.8% 时,随着纤维掺比的继续增大,试样的残余强度逐渐降低。但值得注意的是,纤维掺比为 1.6% 的试样在各法向应力作用下峰值强度小于或略大于其他纤维掺比试样的强度,但其残余强度仅低于纤维掺比为 0.8% 的试样,而高于其余试样。这是由于纤维掺比达到 1.6% 时试样黏聚力较小、内摩擦角较大,其抗剪强度主要由纤维抗拉强度提供,而纤维在试验过程中基本未发生破坏,因此试样的残余强度较大。

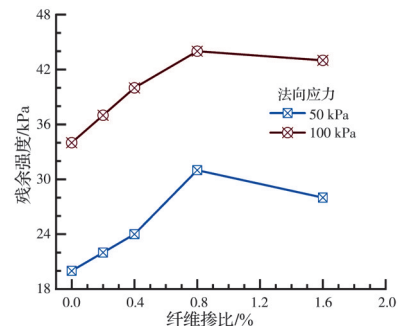


图 12 残余强度与纤维掺比的关系曲线

Fig. 12 Relationship between residual strength and fiber content ratio

4 微观机理分析

图 13 为素土试样、磷石膏改性黄土及磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土的扫描电镜试验结果图。由图 13(a)可知,素土试样成块较少,胶结形成的土块多呈不规则形态,且土块自身以及土块间的连接较为薄弱;土样内部既存在大量孔隙,还存在贯穿裂缝,整体性较差。图 13(b)为磷石膏改良黄土试样,由图可知,该土体已形成致密结构,内部较大孔隙被磷石膏的水化产物钙矾石填充,仅留部分较小孔隙和裂缝。相比于素土试样,图 13(b)中土样的

整体性显著提升。除土粒团聚成土块外,土块表面还存在许多针状钙矾石,这类钙矾石可发挥联结土块作用,进而使试样的无侧限抗压强度增大。但当磷石膏质量占比过大时,会降低黄土的塑性能,导致试样破坏时偏脆性破坏(图4),其无侧限抗压强度也随之降低(图5)。

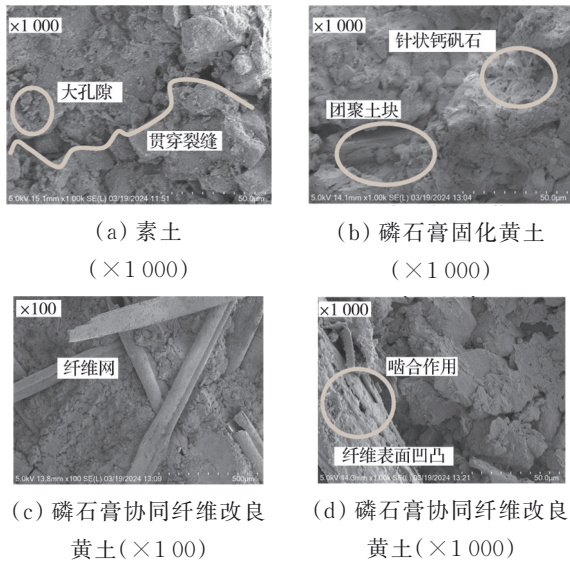


图13 不同类型土的SEM微观特征图

Fig. 13 SEM micrographs of microscopic characteristics for different soil types

图13(c)、(d)为磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土试样的SEM图。由图可知,土样的致密性比单掺磷石膏改良黄土试样更明显,内部大部分孔隙均被填充。这是由于纤维加筋后填充了土样的大孔隙,促使土块受挤压后相互靠拢,部分小孔隙被挤压消失,土样内部结构因此发生较大变化。当试样放大至100倍时,可见纤维在土中相互交错,形成纤维网,可有效限制土块间的相对位移。除此之外,纤维与土粒间通过胶结作用形成纤维土团,将土颗粒包裹其中,进一步提升了土样的整体性。观察放大1000倍的SEM图可清晰看到,纤维表面较为粗糙,掺入黄土后,其与土粒间的相互啮合作用提升了土样的摩擦强度。此外,制样过程中纤维在试样内部分布较为均匀,制样完成后纤维相互交织裹挟,并内嵌于试样之中,进而增强了土体的抗剪强度;当试样受到剪切作用时,土体内部的纤维能有效抵抗外力作用,从而提升试样的黏聚力。图13(d)中土颗粒比图13(b)中略大,原因如下:两者分别为单掺磷石膏改良黄土(图13(b))和磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土(图13(d))的微观结构图,并非同一试样;且SEM微观试验通常只选取试样的局部区域观测,因此会出现颗粒大小存在差异的情况。图14为磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土的机理示意图。

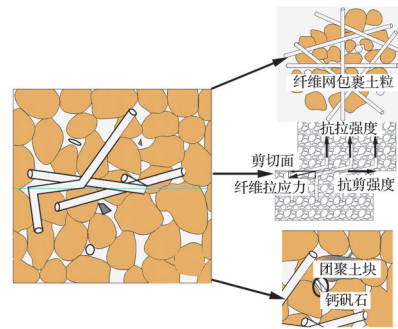


图14 土体内部结构及纤维作用示意图

Fig. 14 Schematic diagram of soil internal structure and fiber reinforcement effect

由图可知,作用平面内的纤维两端分别内嵌入土体中,当土体受到剪应力作用时,纤维和土体间的啮合作用使纤维两端不易与土体发生分离,当纤维发生变形时,中间段部分的纤维可将所受拉力分解至剪切面和剪切面法线方向。

5 结论

采用磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土,研究改良后黄土的强度特性及微观机理。首先通过无侧限抗压强度试验确定磷石膏改良黄土的最优掺量;随后通过直剪试验及SEM试验系统探究磷石膏协同聚丙烯纤维改良黄土的抗剪强度变化规律、强度指标演化特征及微观结构特性。主要结论如下:

1)随着磷石膏掺量的增加,改良黄土试样的无侧限抗压强度呈先增大后减小的趋势,当磷石膏掺量为12%时,试样的无侧限抗压强度最大,因此12%为磷石膏的最优掺量。

2)在磷石膏最优掺量条件下,当聚丙烯纤维掺比一定、法向应力较小(≤ 100 kPa)时,试样表现为应变软化特征;法向应力较大(> 100 kPa)时,试样表现为应变硬化特征。

3)在相同法向应力作用下,随着聚丙烯纤维掺比的增大,改良试样的峰值强度、残余强度及黏聚力均呈先增大后减小的规律,在纤维掺比为0.8%时达到最大值;而试样的内摩擦角随聚丙烯纤维掺比的增大而呈持续增大趋势。

4)磷石膏与聚丙烯纤维对试样的内部孔隙均有填充作用。磷石膏水化产生的钙矾石可起到联结土块的作用;聚丙烯纤维则相互交织裹挟土粒,与土块团聚,限制土样的相对位移,进而增强土样的整体性,提高土体抗剪强度。

参考文献

- [1] 田威,李腾,贾能,等.木钙源EICP溶液固化路基黄土性能研究[J].材料导报,2022,36(15):78-85.

- TIAN W, LI T, JIA N, et al. Properties of subgrade loess solidified by calcium lignosulfonate-EICP solution [J]. *Materials Reports*, 2022, 36(15): 78-85. (in Chinese)
- [2] ZHAO M, CHEN L Y, WANG S Y, et al. Experimental study of the microstructure of loess on its macroscopic geotechnical properties of the Baozhong railway subgrade in Ningxia, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(9): 4829-4840.
- [3] LIU J, TONG D, ZHENG Y X, et al. Carbon and air pollutant emissions from China's cement industry 1990-2015: Trends, evolution of technologies, and drivers [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(3): 1627-1647.
- [4] 薛志佳, 李良辰, 晏长根, 等. 公路工程湿软黄土路基施工能耗和碳排放评估[J]. *大连理工大学学报*, 2021, 61(5): 522-530.
- XUE Z J, LI L C, YAN C G, et al. Evaluation of energy consumption and carbon emissions for construction of wet and soft loess subgrade in highway engineering [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2021, 61(5): 522-530. (in Chinese)
- [5] 薛志佳, 罗江, 晏长根, 等. 矿渣-白泥固化黄土的力学性能与微观机理[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(6): 181-192.
- XUE Z J, LUO J, YAN C G, et al. Mechanical properties and microscopic mechanism of slag-white mud solidified loess [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(6): 181-192. (in Chinese)
- [6] XUE Z J, ZHANG Y, LUO J, et al. Analysis of compressive strength, durability properties, and micromechanisms of solidified loess using industrial solid waste: Slag-white mud-calcium carbide residue [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 84: 108511.
- [7] DONG E L, FU S Y, WU C Q, et al. Value-added utilization of phosphogypsum industrial by-products in producing green ultra-high performance concrete: Detailed reaction kinetics and microstructure evolution mechanism [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 389: 131726.
- [8] MURALI G, AZAB M. Recent research in utilization of phosphogypsum as building materials: Review [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 960-987.
- [9] YANG J, ZENG J Y, HE X Y, et al. Sustainable clinker-free solid waste binder produced from wet-ground granulated blast-furnace slag, phosphogypsum and carbide slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 330: 127218.
- [10] 熊雨, 邓华锋, 彭萌, 等. 四种人工合成纤维加筋黄土的抗剪特性[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(1): 122-126, 133.
- XIONG Y, DENG H F, PENG M, et al. Shear properties of loess reinforced with four synthetic fibers [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(1): 122-126, 133. (in Chinese)
- [11] 赵之, 杨秀娟, 石庆红, 等. 磷石膏/木质素固化铅污染土的无侧限抗压强度[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2025, 47(1): 89-99.
- ZHAO Z, YANG X J, SHI Q H, et al. Unconfined compressive strength of phosphogypsum/lignin solidified lead contaminated soil [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2025, 47(1): 89-99. (in Chinese)
- [12] 王应富, 张树光, 黄啸, 等. 磷石膏-钢渣-矿渣固化低液限粉质黏土力学性能及耐久性研究[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(增刊1): 12-23.
- WANG Y F, ZHANG S G, HUANG X, et al. Mechanical property and durability of low liquid limit silty clay solidified by phosphogypsum-steel slag-ground granulated blast-furnace slag [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(Sup 1): 12-23. (in Chinese)
- [13] REN Z S, WANG L, WANG H, et al. Solidification/stabilization of lead-contaminated soils by phosphogypsum slag-based cementitious materials [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159552.
- [14] WU Z P, XU J, FAN H H, et al. Experimental study on dry-wet durability and water stability properties of fiber-reinforced and geopolymer-stabilized loess [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 418: 135379.
- [15] WANG H M, NI W K, YUAN K Z. Mechanical properties, microstructural evolution, and environmental impacts of recycled polypropylene fiber stabilized loess [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 400: 132850.
- [16] KHODABANDEH M A, NAGY G, TÖRÖK Á. Stabilization of collapsible soils with nanomaterials, fibers, polymers, industrial waste, and microbes: Current trends [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 368: 130463.
- [17] 杨雄杰, 寇轩, 常超, 等. 石灰粉煤灰稳定再生料基层级配设计与力学性能研究[J]. *市政技术*, 2024, 42(5): 40-46.
- YANG X J, KOU X, CHANG C, et al. Study on base gradation design and mechanical properties of lime-fly ash stabilized recycled materials [J]. *Journal of Municipal Technology*, 2024, 42(5): 40-46. (in Chinese)
- [18] 王瑞彩, 吴腾. 改良垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥性能试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 93-100.
- WANG R C, WU T. Experimental study on the performance of solidified dredged sludge by improved municipal solid waste incineration bottom ash [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(1): 93-

100. (in Chinese)
- [19] FENG M W, WANG J, LIU S, et al. Coupling effect of curing temperature and relative humidity on the unconfined compressive strength of xanthan gum-treated sand [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 448: 138224.
- [20] 徐洪钟, 王沐婉, 沐红元, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固剧烈砂化白云岩实验研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(7): 1168-1178.
XU H Z, WANG M W, MU H Y, et al. Experiment study on reinforcement of heavily sandy dolomite by microbially induced carbonate precipitation [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(7): 1168-1178. (in Chinese)
- [21] 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 N, YAN C G, WANG Y C, 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)
- [22] 贾卓龙, 梁哲瑞, 晏长根, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土抗渗性能试验研究[J]. *工程地质学报*, 2025, 33(1): 875-885.
JIA Z L, LIANG Z R, YAN C G, et al. Experimental Study on Impermeability of Polypropylene Fiber Reinforced Loess [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, 33(1): 875-885. (in Chinese)
- [23] 贾卓龙, 晏长根, 包含, 等. 生物胶-纤维固化黄土的三轴剪切特性研究[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(6): 122-131.
JIA Z L, YAN C G, BAO H, et al. Triaxial shear characteristics of biological gum-fiber-reinforced loess [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(6): 122-131. (in Chinese)
- [24] 卢浩, 晏长根, 贾卓龙, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土的抗剪强度和崩解特性[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(2): 82-92.
LU H, YAN C G, JIA Z L, et al. Shear strength and disintegration properties of polypropylene fiber-reinforced loess [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(2): 82-92. (in Chinese)
- [25] ROSHAN K, CHOBBASTI A J, KUTANAEI S S, et al. The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised clayey sand [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 193: 103418.
- [26] 李云鹏, 林一芄, 张晶旭. 基于反复直剪试验的强膨胀土强度特性研究[J]. *河北地质大学学报*, 2024, 47(1): 86-91.
LI Y P, LIN Y P, ZHANG J X. Study on strength characteristics of strong expansive soil based on repeated direct shear test [J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2024, 47(1): 86-91. (in Chinese)
- [27] 刘新荣, 郭雪岩, 周小涵, 等. 库岸危岩剪切带-基岩界面宏细观剪切贯通机制及力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(5): 1096-1109.
LIU X R, GUO X Y, ZHOU X H, et al. Study on macro-meso shear transfixion mechanisms and mechanical properties of shear band-bedrock interfaces of dangerous rock on reservoir bank [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(5): 1096-1109. (in Chinese)
- [28] 吕玺琳, 钟启锋, 颜建春, 等. 不同初始饱和度条件下高液限滑带土环剪试验[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(2): 370-377.
LÜ X L, ZHONG Q F, YAN J C, et al. Ring shear test of high liquid limit sliding zone soil under different initial saturation [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(2): 370-377. (in Chinese)
- [29] 胡再强, 林山, 李宏儒, 等. 洛川 Q₂黄土残余强度影响因素试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(增刊1): 6-11.
HU Z Q, LIN S, LI H R, et al. Factors residual strength of Luochuan loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(Sup1): 6-11. (in Chinese)

(编辑 朱备)