

干湿循环效应固化黄土宏-微观演化特征函数

焦远帆, 晏长根, 常洲, 贾卓龙, 章一博, 梁哲瑞, 张家辉

(长安大学公路学院, 西安 710064)

摘要: [目的]为探讨生态护坡材料的长期服役耐久性。[方法]通过干湿循环条件下的力学试验和渗透试验, 研究固化黄土宏观性能的演化规律, 利用扫描电镜和图像处理技术, 分析干湿循环对微结构形态的损伤规律, 探讨生物胶改善黄土宏观性能干湿循环耐久性的微观机理, 并基于宏观性能指标和微结构参数建立宏-微观演化特征函数, 描述干湿循环条件下宏观性能与微观结构间的数值响应关系。[结果]生物胶抑制固化黄土力学性质劣化, 抑制效果与生物胶掺量呈正相关, 生物胶增大固化黄土的渗透性能变化, 变化幅度与掺量呈负相关; 干湿循环造成黄土胶结作用失效, 颗粒损伤, 孔隙增大, 生物胶增强黄土胶结作用, 减缓颗粒损伤, 改变孔隙发育模式; 演化特征函数预测效果良好, 超过 95% 的预测点落在均方误差线以内。生物胶的加入有利于改善黄土宏观性能的干湿循环耐久性; 特征函数的敏感性分析表明, 孔隙率对力学性能影响最大, 孔径 $> 32 \mu\text{m}$ 的大孔隙率对渗透性能影响最大。[结论]研究结果可为生物胶固化土护坡技术的工程应用及后续改良提供理论依据。

关键词: 固化黄土; 干湿循环; 抗剪强度; 渗透性; 微观结构; 预测模型

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0303-13

Macro-micro Evolution Characteristic Function of Solidified Loess under the Effects of Dry-wet Cycles

JIAO Yuanfan, YAN Changgen, CHANG Zhou, JIA Zhuolong,

ZHANG Yibo, LIANG Zherui, ZHANG Jiahui

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: [Objective] To reveal the durability of solidified loess slope protection in long-term service. [Methods] Under the condition of dry-wet cycles, direct shear, permeability mechanical tests of solidified loess were carried out to study the evolution law of the macro-properties of stabilized loess, and the damage law of dry-wet cycles on the morphology of the microstructure was analyzed by using scanning electron microscopy and image processing technology. The micro-mechanism of improvement of the dry-wet cycle durability of the macro-properties of loess by biological glue was discussed, and the macro-micro-evolution feature function was established based on the macro-performance index and the micro-structure view parameters to describe the numerical response relationship between the macro-properties and the micro-structure under the dry-wet cycle conditions. [Results] The biological glue inhibited the deterioration of mechanical properties of solidified loess, and the inhibitive effect was positively correlated with the content of biological glue; the change of permeability of solidified loess was increased by biological glue, and the change amplitude was negatively correlated with the content of biological glue. The dry-wet cycles resulted in the failure of loess cementation, particle damage and pore increase. The biological glue enhanced the loess cementation, slowed down the particle damage and changed the pore development pattern. More than 95% of the predicted points fell within the mean square error line. The addition of biological glue could improve the durability of the macroscopic properties of loess

under dry-wet cycles. The sensitivity analysis of the characteristic function showed that the porosity had the greatest influence on the mechanical properties, and the large porosity with pore size $> 32 \mu\text{m}$ had the greatest influence on the permeability. [Conclusion] The research findings can provide a theoretical basis for the engineering application of biological glue for the technology of soil solidification and slope protection and subsequent improvement of the technology.

Keywords: stabilized-loess; dry-wet cycle; shear strength; permeability; microstructure; prediction model

Received: 2024-09-09

Revised: 2024-10-03

Accepted: 2024-11-01

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

随着“一带一路”和“黄河流域生态保护和高质量发展”战略的不断推进,西部黄土地区工程建设规模日益扩大,人工填挖方裸露边坡不断产生。然而,黄土地区生态环境脆弱,边坡的裸露状态增加其受外界因素的影响^[1],在降雨季节,可能造成冲蚀、剥落、表层滑塌等浅层破坏,引发水土流失等生态问题。尤其陕西、山西等地近年暴雨灾害频发,加剧上述问题的威胁。因此,开展坡面防护研究对黄土地区工程建设的安全性和生态保护的可持续性具有重要意义。

近年来,基于浅表层土固化以提高边坡抗侵蚀性能的固化土护坡技术在坡面防护领域受到广泛关注^[2]。同时,随着环保理念兴起,生物聚合物逐渐取代化学固化材料,目前,常用的生物聚合物如蛋白质基生物聚合物、高分子类生物聚合物、多糖类生物聚合物等^[3-5]。半乳糖甘露(生物胶)是多糖类生物聚合物,自然条件中已知的最高分子水溶性多糖^[6],关于其固化黄土的工程特性的研究,已累计丰富成果。杨万里等^[7]研究发现,生物胶固化有效提高黄土抗剪强度,降低渗透率,且固化效果受生物胶掺量和养护龄期影响;王天亮等^[8]对比不同生物聚合物固化土的工程性能发现,生物胶在对土体的改良效果最优,并指出最佳胶土比为 1.0%;JIA 等^[9]通过模型试验验证生物胶固化土的坡面防护性能表明,固化土坡面的累计侵蚀量减少 47.5%,植被覆盖率增加 67.6%;BAO 等^[10]借助激光雷达测试生物胶固化黄土的原位防护边坡的侵蚀状况表明,边坡防护效果良好,但存在一定的劣化现象,同时,指出防护层的劣化现象是由于周期性的干湿交替所导致的。因此,需要深入了解生物胶固化黄土在干湿循环条件下宏观性质的演化特征,为增强生物胶固化黄土防护效果的长效性提供理论基础。

黄土微结构信息对于了解干湿循环条件下其宏观性质具有重要意义。扫描电镜、核磁共振技术可用于分析黄土的颗粒形态、粒间接触关系、孔隙骨架结构特征和土体结构,探讨微观结构对黄土力学强度和

渗透性的控制机理^[11-13];随着图像处理技术逐渐成熟,为量化土体微观结构中颗粒和孔隙的形态特征参数、排列特征参数、分布状态参数提供便利^[14-16];袁志辉^[17]、MA 等^[18]通过室内试验和微观试验分析干湿循环条件下微观结构参数的变化规律,为宏观性能和微结构在干湿循环下的劣化认知提供参考;樊培培等^[19]、刘禹阳等^[20]建立干湿循环条件下宏观性能和微观结构参数的劣化特征函数,通过对比 2 种特征函数的变化规律,实现黄土宏观性能和微结构联系的定量分析。因此,可从宏观性质变化和微观结构劣化特征等方面对干湿循环条件下的生物胶固化黄土进行研究,并建立生物胶固化黄土的宏观性能-微结构演化特征函数,对生物胶固化黄土防护层的劣化过程进行量化描述,提供信息解释。

生态材料在干湿循环条件下的宏观性能耐久性是其评价其防护效果的重要标准,微结构研究是揭示黄土宏观性能演化的重要方法。因此,探究其微-宏观参数数值响应关系对进一步提升生态材料的防护耐久性具有重要意义。本研究针对干湿循环条件下生物胶固化黄土进行直接剪切和饱和渗透试验,分析循环效应下宏观性能的变化特征。采用扫描电镜技术和 PCAS 软件对固化黄土的微观结构演化进行定量分析,探究固化黄土微结构的劣化规律。采用 MATLAB 软件建立宏观性质和微观参数的演化特征函数,以为生物胶固化黄土护坡技术的长效性优化提供微观层面建议。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验黄土是从陕西延安地区某黄土路堑边坡取样的马兰黄土,取样深度为 1.5~3.0 m。参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[13]获得烘干黄土的基本物理指标,最佳含水率为 17%,最大干密度 1.7 g/cm^3 ,液限 25.5%,塑限 16.4%。利用 Bettersize 2000 型激光粒度分布仪测得黄土颗粒组成成分,见图 1。研究中使用的生物胶是常用于食品增稠剂、稳定剂、乳化剂的多糖,pH 呈中性。生物胶粉末为白色,无污染,无

其他异味,在冷水中水化成半透明的稠液,其水溶液为假塑性流体。

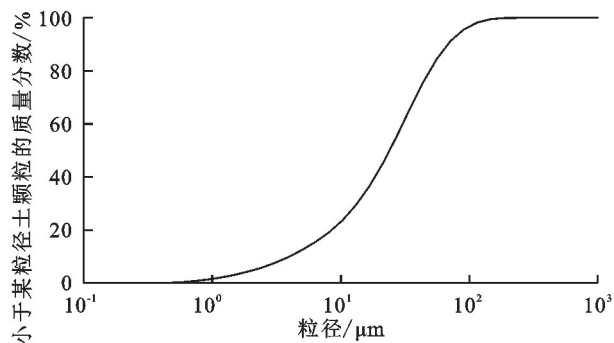


图 1 黄土颗粒组成成分

Fig.1 Composition of the loess particles

1.2 试样制备

首先,称取足量黄土和生物胶粉末充分混合,加水至最佳含水率 17% 并拌匀,置于保温缸,闷料 24 h;其次,依据试验黄土最大干密度 17 g/cm³ 制环刀样,规格为 Φ61.8 mm×20 mm(直接剪切试验)和 Φ61.8 mm×40 mm(饱和渗透试验);最后,使用保鲜膜包裹试样,置于恒温箱进行养护。在前期研究^[7]中,采用与本研究相

同的黄土,并在相同的含水率、干密度、拌合方法等试验条件下,开展不同生物胶掺量和养护龄期的直接剪切试验和饱和渗透试验,养护龄期为 7 d,掺量 1.0% 固化黄土的综合性能最佳(表 1)。因此,本研究中试验养护龄期设计为 7 d,为提升宏-微观干湿循环演化特征函数的可靠性,生物胶掺量设计为 1.0%、0.5% 和 0。

通过现场实测发现,黄土公路边坡浅表层土体的天然含水率为 3%~27%,试验为保证试样充分劣化,干湿循环幅度控制在 5%~25%,最大干湿循环次数设定为 8 次。干湿循环首先为增湿过程,采用预湿法,使用吸耳球将蒸馏水缓慢、均匀地滴入试样表面;试样增湿后使用保鲜膜包裹,放入保温缸静置 24 h,确保水分均匀分布;干燥采用烘箱处理,参考自然环境中黄土地区地表温度^[21],干燥温度设置为 45 ℃;通过监测试样在增湿和干燥过程中的质量变化,控制试样达到目标含水率,当干燥后试样的质量与其增湿前质量误差在 0.1% 以内时,视为干燥过程结束;单次干湿循环过程中包括 1 次增湿和 1 次干燥过程,其中 0 次干湿循环为不湿润只干燥。

表 1 不同掺量和养护期龄固化黄土的黏聚力、内摩擦角和饱和渗透系数^[7]

Table 1 Cohesion, internal friction angle, and saturated permeability coefficient of solidified loess with different content of biological glue and curing time

掺量/%	黏聚力/kPa			内摩擦角/(°)			饱和渗透系数/(10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹)		
	3	7	28	3	7	28	3	7	28
0.25	66.17	76.62	79.78	27.5	28.1	28.4	7.46	7.12	6.92
0.5	69.65	79.78	81.95	28.1	28.3	28.8	5.17	4.67	4.32
1.0	76.77	101.56	105.64	27.9	28.5	28.9	2.58	1.86	1.63
1.5	75.18	80.82	83.87	27.1	27.3	28.6	1.03	0.89	0.78

1.3 试验方案

1.3.1 室内试验 分别在第 0、2、4、6、8 次循环后进行直接剪切试验和渗透试验。直剪试验采用 ZJ 型四联动应变控制直剪仪,试验操作步骤及注意事项严格遵守《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]。采用直剪-快剪模式,在 50、100、150、100 kPa 垂直压力下,以 0.8 mm/min 的剪切速率、0.05 mm/次的数据采集频率对试样进行测试;饱和渗透试验采用 TST-55 型渗透仪,试验操作步骤及注意事项严格遵守《公路土工试验规程》(JTB 3430—2020)^[13],将试样浸入水中,在真空条件下完全饱和后,进行变水头渗透试验并依据公式(1)计算饱和渗透系数(K),为减少试验误差,每次直剪试验和渗透试验选取 2 个条件相同的试样进行试验,取抗剪强度参数和饱和渗透系数的平均值。依据公式(2)计算劣化率和变化率:

$$K = 2.3 \frac{aL}{A(t_1 - t_2)} \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} D_c = \frac{c_0 - c_N}{c_0} \times 100\% \\ D_\varphi = \frac{\varphi_0 - \varphi_N}{\varphi_0} \times 100\% \\ \Delta K = \frac{K_N - K_0}{K_0} \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 为变水头管断面积,cm²; A 为试样入渗面积,cm²; L 为试样高度,cm; t_1 为测读水头的起始时间,s; t_2 为测读水头的终止时间,s; H_1 、 H_2 分别为起始、终止水头。 c_0 、 c_N 、 φ_0 、 φ_N 、 K_0 、 K_N 分别为试样经历 0 和 N 次干湿循环的黏聚力、内摩擦角、饱和渗透系数。

1.3.2 微观试验 Scanning electron microscope (SEM)试验采用 Quanta 600 场致发射扫描电镜,试样由环刀样削切获得,其规格为长宽高均<5 mm,并采用

真空喷金处理,分别获取放大倍速为 500×、1 000×、2 000×的微观图像。借助 Particles (Pores) and Cracks Analysis System(PCAS)软件对微观结构进行量化处理,处理过程主要包括图像黑白二值化、微观结

构数据提取和统计。为全面表征干湿循环过程中微观结构的变化特征,基于微观结构数据计算微观结构定量参数,本研究使用的微观结构参数的计算方法和意义见表 2。

表 2 微观结构定量参数
Table 2 Quantitative parameters of the microstructure

微观参数	意义	公式	内容
取向频率 [F(α)]	F(α)为颗粒角度落入各区间的频率,表示颗粒在某一方向的分布	$F_i(\alpha)=\frac{n(\alpha)}{n}\times 100\%$	α 为颗粒取向角度 n(α)为取向角度落入[θ _i ,θ _{i+1}]的颗粒数,区间 Δθ=10°,i 为区间数
概率熵 (H _m)	H _m 反映颗粒排列特征,较小的 H _m 表示较高的分布有序性	$H_m=-\sum_{i=z}^x F_i(\alpha)\log_x F_i(\alpha)$	n 为视域中颗粒总数
颗粒丰度 (C)	C 反映颗粒的几何形态,较小的 C 表示颗粒越趋于圆形	$C=\frac{L}{B}$	L 为颗粒长轴长度 B 为颗粒短轴长度
孔隙率 (n _m)	n _m 反映孔隙占比,较小的 n _m 表示较密集的土壤结构	$n_m=\frac{S_p}{S}$	S _p 为视域中孔隙面积 S 为视域总面积

2 结果与分析

2.1 干湿循环条件下力学性能演化

由图 2 和图 3 可知,显示试样的抗剪强度参数随干湿循环次数的变化关系。在未经干湿循环时,G1.0%、G0.5%、G0 试样的黏聚力分别为 91.56、85.78、72.62 kPa,内摩擦角分别为 28.5°、28.1°、27.0°,随着循环次数增加,黏聚力和内摩擦角持续劣化,在 8 次干湿循环后,G1.0%、G0.5%、G0 试样的黏聚力分别为 52.74、38.36、

20.39 kPa,内摩擦角分别为 25.64°、24.35°、23.11°,3 种试样的黏聚力劣化率分别为 42.40%、55.28%、71.92%,内摩擦角劣化率分别为 10.04%、13.42%、14.41%。在相同干湿循环次数下,不同生物胶掺量试样黏聚力、内摩擦角劣化率的差距逐渐扩大,表明在干湿循环过程中,黏聚力和内摩擦角的劣化幅度随生物胶掺量的增加而逐渐降低,生物胶掺量的增加有效抑制黄土黏聚力和内摩擦角的劣化。

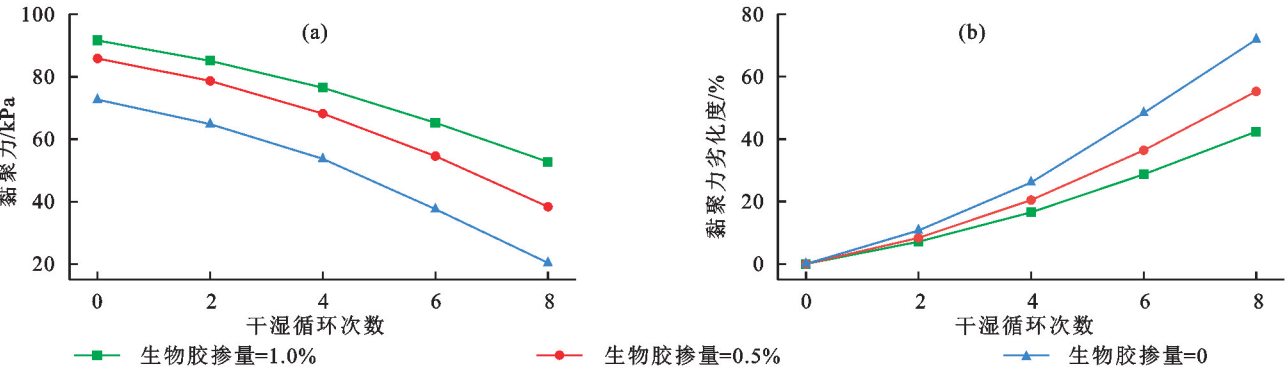


图 2 黏聚力变化及劣化率

Fig.2 Cohesion and its deterioration rate

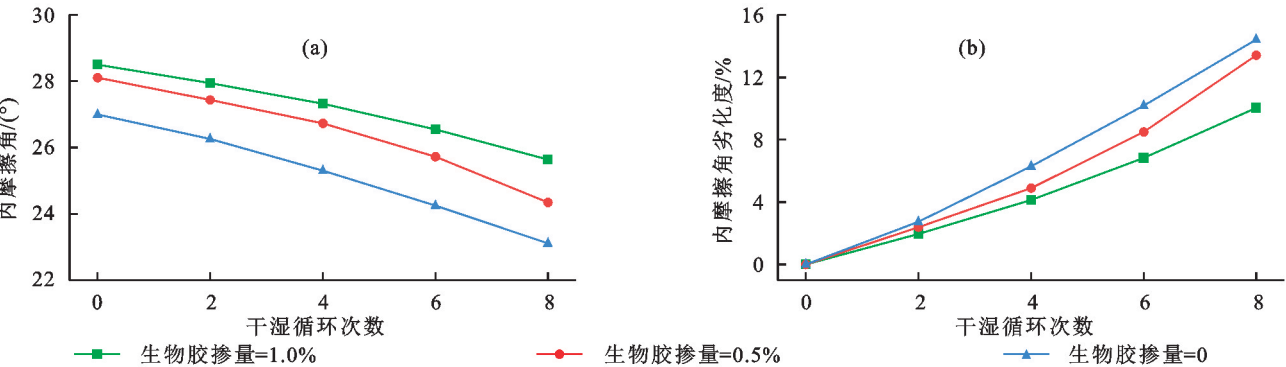


图 3 内摩擦角变化及劣化率

Fig.3 Internal friction angle and its deterioration rate

2.2 干湿循环条件下渗透性能演化

图4为试样的饱和渗透系数随干湿循环次数的变化关系。未经干湿循环时,G1.0%、G0.5%、G0试样的饱和渗透系数依次为 1.74×10^{-5} 、 1.90×10^{-5} 、 2.65×10^{-5} cm/s,随干湿循环次数增加,3种掺量试样的饱和渗透系数均呈持续增大趋势,在8次干湿循环后,G1.0%、G0.5%、G0试样的饱和渗透系数分别为 7.30×10^{-5} 、 6.89×10^{-5} 、 6.24×10^{-5} cm/s,饱和渗透系数变化率分别为 318.69%、264.25%、137.00%。表明随着

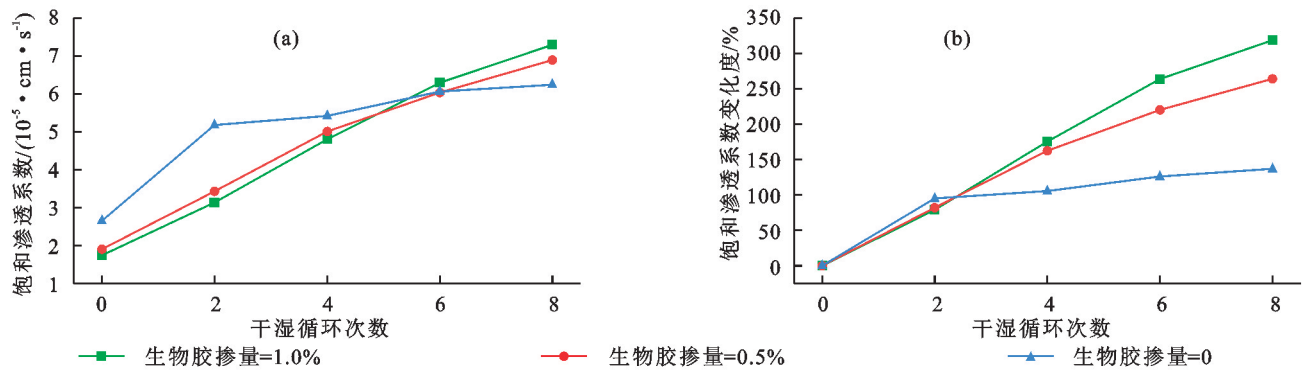


图4 饱和渗透系数及变化率

Fig.4 Saturated permeability coefficient and its change rate

2.3 干湿循环条件下微观结构演化

由于不同微观结构信息对最佳观测倍数的要求具有差异性^[22],选取放大倍数 1 000×的 SEM 图进行颗粒分析,选取放大倍数为 500×的 SEM 图像进行孔隙分析,由图 5、图 6 可知,未经干湿循环时,对于固化黄土,胶体形成的网络黏结大量颗粒形成团聚体结构,颗粒边缘模糊,颗粒接触区域能够观察到胶体,孔隙以圆点状和细缝状为主,G1.0%和 G0.5%试样的差异主要以孔隙形态为主,G1.0%的细缝状孔隙短且窄,孔隙数量相对较少;对于 G0 试样,可观察到颗粒轮廓,棱角分明,颗粒接触区域赋存大量孔隙。干湿循环 4 次后,G1.0%试样团聚体间观察到圆点状孔隙逐渐发育,形成尺寸较大的洞状孔隙;G0.5%试样的团聚体结构逐渐失效,颗粒间孔隙开始发育,形态以缝状孔隙为主,整体结构逐渐松散;对于 G0 试样,颗粒边缘逐渐圆润,碎屑小颗粒大量发育,孔隙发育逐渐不规则,整体结构较为松散。干湿循环 8 次后,G1.0%试样胶体的连接依然可被观察到,颗粒间孔隙逐渐发育;G0.5%试样仅存在少量的团聚体结构,颗粒轮廓逐渐清晰,部分颗粒边缘圆润;可观察到 G0 试样以散碎颗粒为主,呈堆积状,细小颗粒的粒间孔隙大量发育。

上述微观结构发生的变化可通过图像处理技术进行量化描述,为微观结构的演化过程提供信息解释,成为建立起固化黄土微观结构与宏观性能关系的纽带。图 7 为试样的取向频率 $F(\alpha)$ 随干湿循环次数的

干湿循环次数增加,试样透水性逐渐增强。对比相同干湿循环次数下不同掺量试样的饱和渗透系数,在未经干湿循环时,试样的饱和渗透系数表现为生物胶掺量 $1.0\% < 0.5\% < 0.0\%$,经历 8 次干湿循环后,饱和渗透系数出现掺量 $1.0\% > 0.5\% > 0.0\%$ 的现象,不同掺量试样饱和渗透系数变化率差距逐渐扩大。说明随着生物胶掺量增加,饱和渗透系数的变化趋势更加显著,干湿循环对高生物胶掺量试样渗透性的影响效果更显著。

变化关系曲线,取向频率用于描述颗粒在一定方向上的分布特征。表明未经干湿循环时,颗粒分布方向在各取向角度内分布较为均匀,随着干湿循环次数的增加,分布方向在某一取向角度附近的区域范围内逐渐收敛,颗粒取向频率分布呈现各向异性特征,在 8 次干湿循环后,大量颗粒集中分布于某一取向角度,取向频率的各向异性特征也愈发显著。为进一步量化取向频率的变化特征,采用离散系数(V)描述取向频率在不同方向上分布的离散性,计算公式为:

$$V = \frac{\delta}{\mu} \quad (3)$$

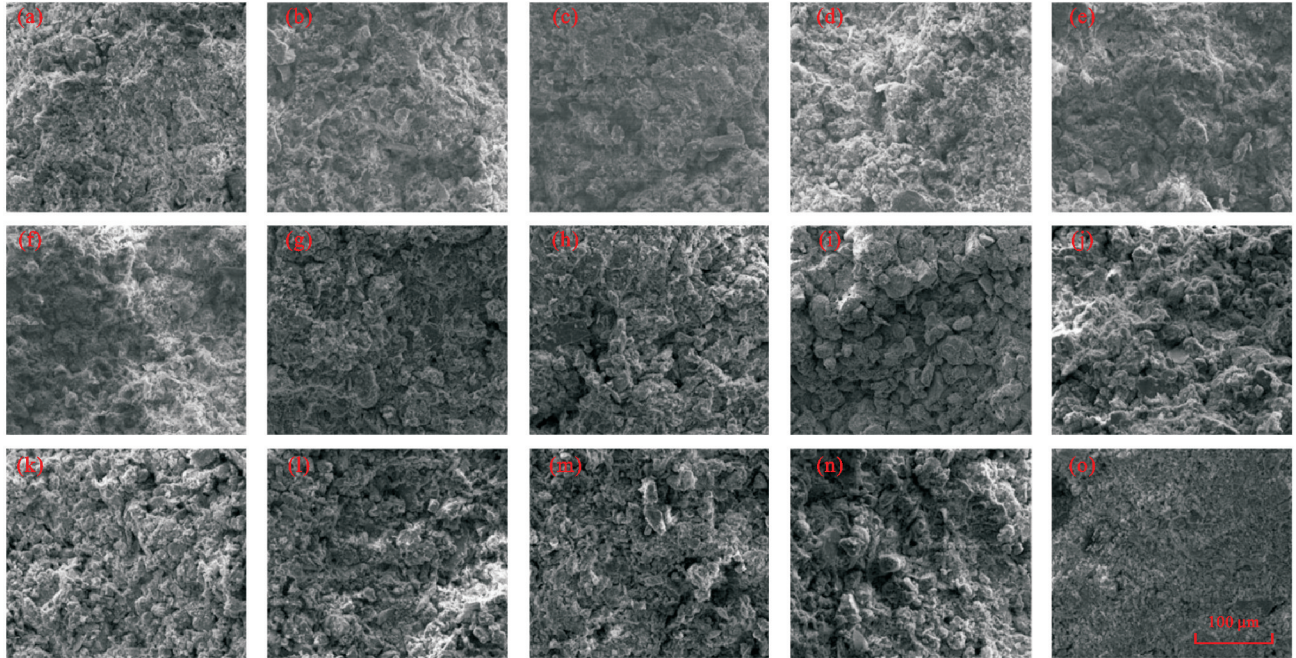
式中: δ 为取向频率标准差; μ 为取向频率平均数。

G1.0%、G0.5%、G0 试样取向频率的离散系数随干湿循环次数变化曲线分别见图 7d。在未经干湿循环时,G1.0%、G0.5%、G0 试样的离散系数分别为 0.332、0.337、0.340,随着干湿循环次数增加,3 种试样的离散系数均呈持续减小趋势,此趋势随着生物胶的减少而更加强烈,在 8 次干湿循环后,G1.0%、G0.5%、G0 试样的离散系数变为 0.276、0.234、0.208。表明随着生物胶掺量增加,颗粒取向频率的各向异性特征逐渐降低,干湿循环对颗粒取向频率离散性的影响逐渐减少。

图 8 为试样的颗粒丰度(C)和概率熵(H_m)随干湿循环次数的变化关系曲线,颗粒丰度用于描述颗粒的形态特征,概率熵用于描述颗粒排列的有序性。由图 8a 可知,未经干湿循环时,G1.0%、G0.5%、G0 试

样的颗粒丰度依次为 1.982、1.924、1.856,随着干湿循环次数增加,3 种掺量试样的颗粒丰度呈线性下降趋势,在 8 次干湿循环后,3 种掺量试样的颗粒丰度分别为 1.787、1.686、1.580,颗粒的形态特征由长条

形、扁圆形逐渐向圆形过渡。对比相同干湿循环次数的 G1.0%和 G0 试样,在经历 8 次干湿循环后,二者的颗粒丰度差值由 0.126 扩大为 0.207,干湿循环对颗粒丰度影响的显著程度与生物胶掺量呈负相关。



注:(a)~(e)分别为 G1.0%试样干湿循环 0、2、4、6、8 次结构;(f)~(j)分别为 G0.5%试样干湿循环 0、2、4、6、8 次就结构;(k)~(o)分别为 G0 试样干湿循环 0、2、4、6、8 次结构。下同。

图 5 1 000×微观结构

Fig.5 Images of the microstructure (1 000×)

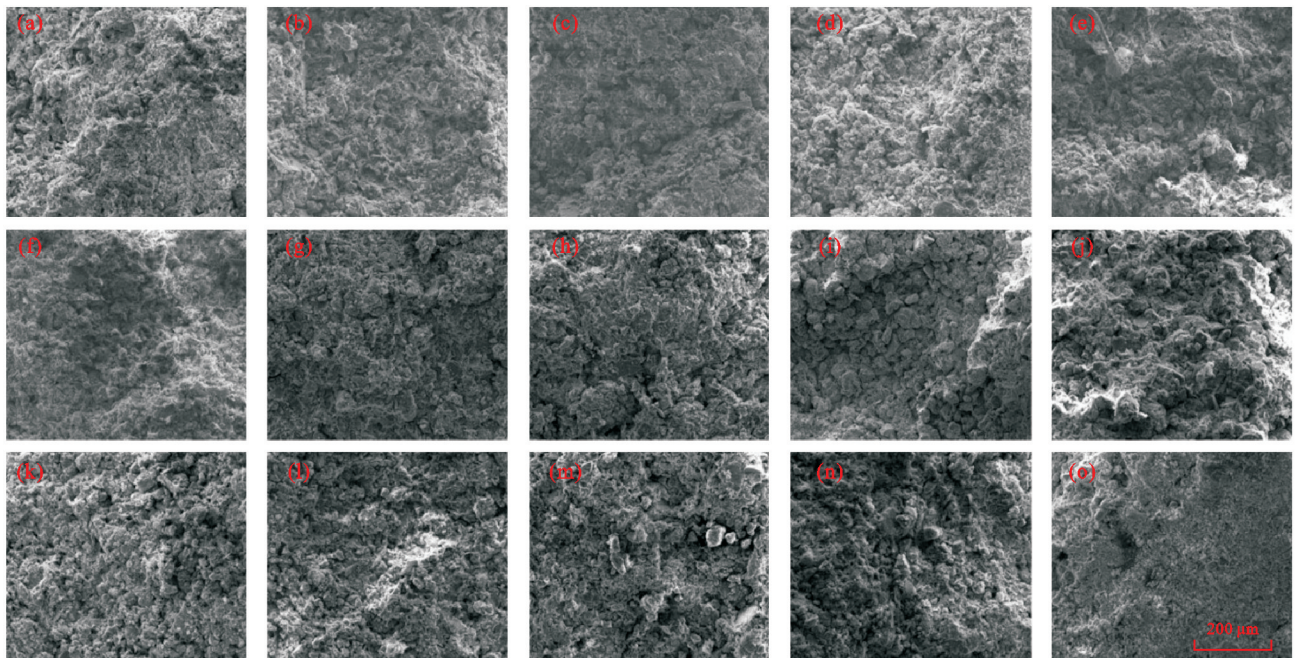


图 6 500×微观结构

Fig.6 Images of the microstructure (500×)

由图 8b 可知,未经干湿循环时,G1.0%、G0.5%、G0 试样的颗粒丰度依次为 0.983、0.980、0.982,随着干湿循环次数增加,3 种掺量试样的概率熵呈线性增长趋势,在 8 次干湿循环后,3 种掺量试样的概

率熵分别为 0.988、0.991、0.993,颗粒在空间中的排列逐渐由均匀、有序趋于混乱、无序的状态。对比相同干湿循环次数下不同掺量试样的概率熵,在未经干湿循环时,G0 试样的概率熵小于 G1.0%试样,

而在4次干湿循环后,则出现G1.0%试样的概率熵小于G0试样的现象,在4~8次干湿循环过程中,二者概率熵的差值逐渐扩大。说明随着生物胶掺量增加,概率熵的变化趋势更加显著,干湿循环对素黄土

试样颗粒排列状态的影响效果更加显著。值得注意的是,G0.5%试样的概率熵存在一定误差,其变化情况的规律性较差,可能是由土体结构损伤的不确定性所导致^[23]。

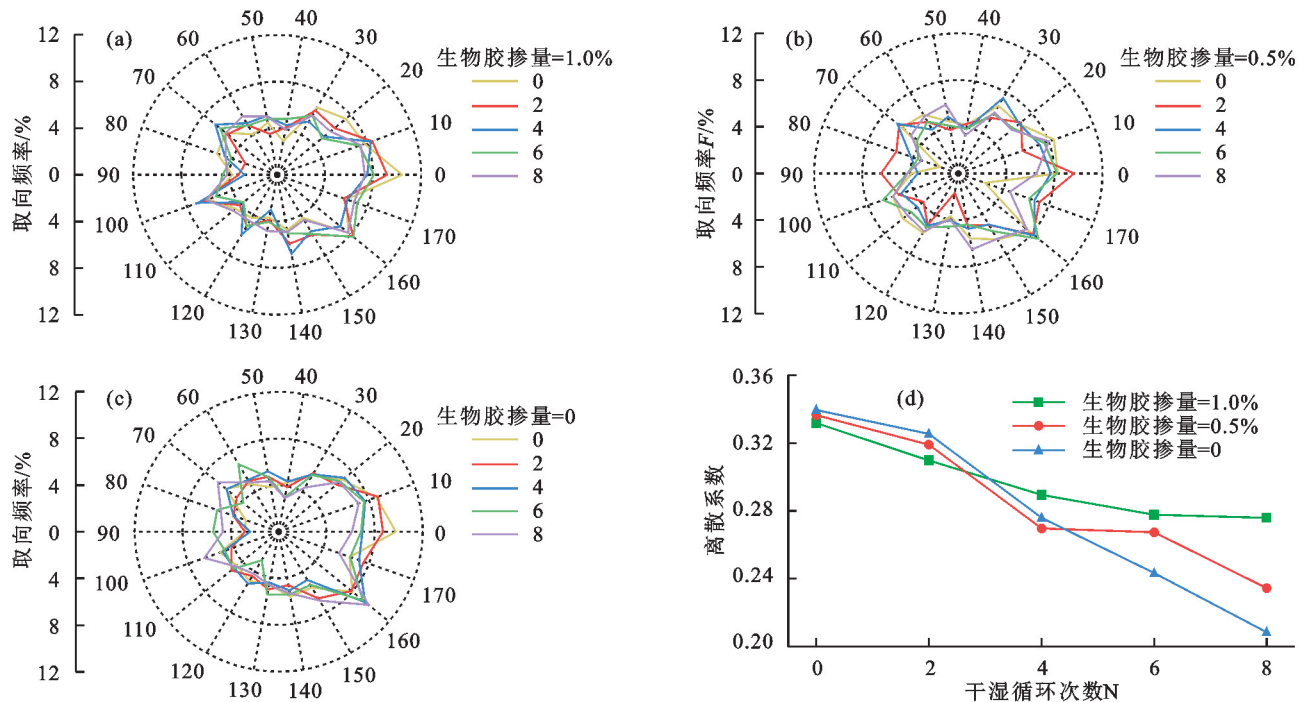


图7 取向频率玫瑰图及离散系数变化

Fig.7 Orientation frequency rose chart

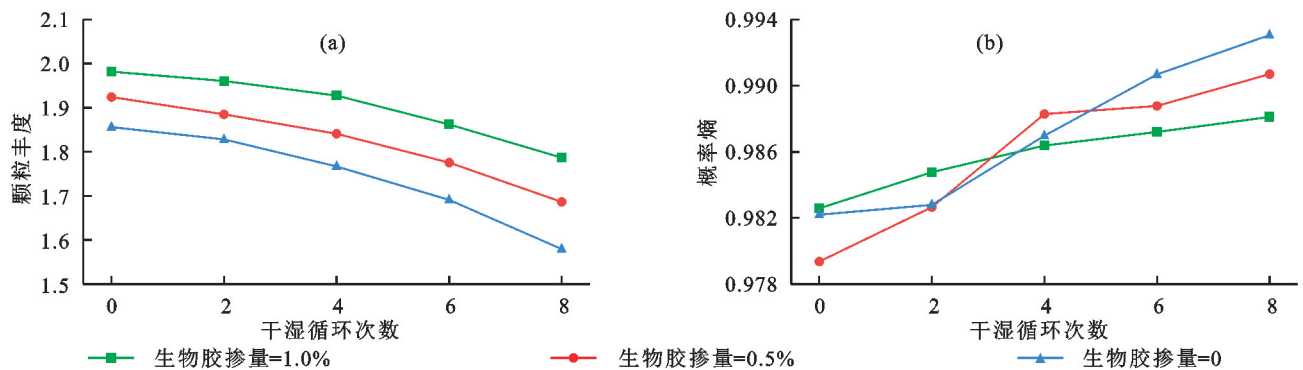


图8 颗粒丰度、概率熵变化

Fig.8 Particle abundance and probability entropy

图9为总孔隙率 n_m 及不同尺寸孔隙的孔隙率随循环次数的变化情况。孔隙率反映微观结构的致密程度,本研究中孔隙尺寸的分类参考雷祥义^[11]研究成果,即微孔直径 $>2\mu\text{m}$,小孔直径为 $2\sim8\mu\text{m}$,中孔直径为 $8\sim32\mu\text{m}$,大孔直径 $>32\mu\text{m}$ 。随着干湿循环次数增加,总孔隙的变化呈先增长后稳定趋势,在2次干湿循环后总孔隙率趋于稳定范围,G1.0%、G0.5%、G0试样在经历8次循环后,总孔隙率分别增加8.54%、6.78%、5.63%。对于不同尺寸孔隙的孔隙率变化情况,在经历8次干湿循环后,G1.0%试样的微、小、中、大孔隙率 $n_{1\sim4}$ 分别增加0.95%、2.35%、2.05%、3.18%, n_4 增长最明显;G0.5%试样的 $n_{1\sim4}$ 分别增加0.90%、

2.39%、2.37%、1.13%,其 $n_{1\sim3}$ 的增长情况与G1.0%试样较为接近,但 n_4 未出现较明显的增长;G0试样的 $n_{1\sim3}$ 分别增加4.48%、1.79%、1.03%,而 n_4 降低1.68%, n_1 增长最明显, n_4 出现减少现象。具体来说,总孔隙率在达到稳定范围后,孔隙率的变化主要以不同尺寸孔隙的变化为主,且不同掺量试样的大、中、小、微孔隙率变化趋势也存在较大差异。

3 讨论

3.1 微观结构对宏观指标的控制机理

在经历干湿循环后,黄土的力学性能和渗透性能均发生改变,其内在机制是干湿循环诱导的土体微观结构损伤的结果。总结微观结构对黏聚力、内摩擦

角、饱和渗透系数的控制机理为:1)对于生物胶固化黄土,黏聚力提升的微观本质是胶体产生的胶结作用,胶体的包裹和丝状连接具有黏附黄土颗粒和填充孔隙的作用^[9],颗粒骨架结构转变为团聚结构,土体呈愈发致密的结构^[24];土颗粒的定向特征也影响黏聚力^[18],在剪切过程中,颗粒方向分布单一的土颗粒易于形成较厚的剪切带,剪切带的膨胀过程即是试样应变软化到硬化的过程,而峰值后的软化阶段反映更大的黏聚力损失^[25]。2)内摩擦角主要受到颗粒间咬合力、摩擦力和颗粒排列状态影响^[17]。扁平状的颗

粒更容易嵌入骨架颗粒间孔隙,颗粒易于形成面-面接触形式,有助于强化颗粒间的机械咬合力和摩擦力^[16,20]。而均匀的颗粒分布状态,能够影响土体剪切过程的滑移摩擦效应,减缓内摩擦角减小^[26]。3)孔隙率是决定渗透性的主导因素,但不同尺寸孔隙对渗透性的影响也是不容忽视的^[14]。在渗流过程中,水优先通过高连通性的大孔隙^[15],渗透性与较大孔隙的占比呈正相关,但对于微、小孔隙,渗流所带动的颗粒迁移堵塞土体中渗流通道,造成有效孔隙的减少是抑制土体渗透的主要原因^[27]。

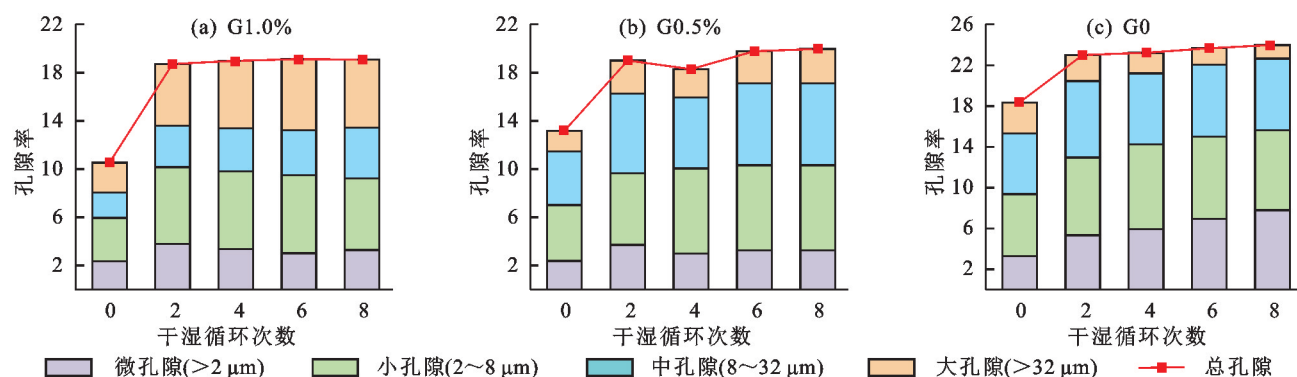


图 9 大、中、小、微孔隙率分布

Fig.9 Distribution of micropores, small pores, mesopores and macropores

微观结构影响土体的宏观性能,可用于揭示黏聚力、内摩擦角和饱和渗透系数演化的原因。由图 2~图 4、图 7~图 9 可知,在干湿循环条件下,不同生物胶掺量试样的宏观性能指标和微观结构参数具有相同的变化趋势,以 G1.0%试样为例,分析其微观结构参数对黏聚力、内摩擦角劣化率和饱和渗透系数变化率的影响。由图 10 可知,不同宏观性能指标与微观结构参数间表现出较为紧密的关联性。黏聚力劣化率(D_c)与取向离散系数(V)呈正相关,与总孔隙率(n_m)呈负相关;内摩擦角劣化率(D_ϕ)与颗粒丰度(C)呈正相关,与概率熵(H_m)和总孔隙率(n_m)呈负相关;在第 0~2 次干湿循环过程中饱和渗透系数变化率(ΔK)与 n_{1-4} 均呈正相关,在第 2~8 次干湿循环过程中与 n_4 、 n_3 呈正相关,与 n_2 、 n_1 呈负相关。

3.2 生物胶固化黄土的微观结构演化机理

干湿循环效应对土体微观结构的影响具有普遍性,包括颗粒形状及排列特征变化、孔隙发育和胶结劣化等现象。然而,本研究中,固化黄土的微观结构对干湿循环影响的反应存在一定差异。因此,本研究通过分析试样的微观结构特征,探讨固化黄土的微观结构演化机理。由图 5 和图 6 可知,生物胶在试样中形成的水凝胶具备较高的黏性和良好的胶凝性能,胶体形成的网络通过黏结作用将大量颗粒聚集在一起形成团聚体结构,在颗粒表面形成凝胶包膜吸附碎屑

颗粒,在颗粒接触区域形成丝状连接,限制颗粒移动,抑制孔隙发育,微观结构由颗粒结构转变为团聚体结构,与 JIA 等^[9]的研究成果相一致。在干湿循环过程中,水凝胶避免干湿循环效应对土颗粒的直接损伤,并持续提供良好的黏结性^[28],因此,减少土颗粒间的相对运动造成的方向偏移(图 7),缓解水分入渗对颗粒的冲刷和研磨(图 8a),抑制碎屑颗粒的发展(图 8b)。但是,水凝胶的存在也改变不同生物胶掺量试样的孔隙发展趋势(图 9),对此,笔者推测原因在于,素黄土微观结构在干湿循环过程中,黄土颗粒被研磨和冲刷,导致骨架颗粒粒径逐渐减小,其所形成的颗粒接触骨架孔隙逐渐减小,且研磨和冲刷产生的碎屑也出现填充孔隙的现象^[29],同时,伴随胶结强度的劣化,部分原始的骨架颗粒排列顺序被打乱而进行重新排列,颗粒排列呈密实的堆积状态,因此,G0 试样孔隙逐渐以微、小孔隙为主(图 9c)。对于固化黄土,团聚体粒径相对较大,所形成的团聚体结构骨架孔隙较大,在干湿循环过程中,胶体的溶解现象是孔隙发育的主要原因^[8],但颗粒间的胶结强度并未完全劣化,骨架结构的排列方式未被破坏,故孔隙尺寸偏大,WANG 等^[24]也出现类似的试验结果。随着胶体增加,固化土团聚体数量和粒径逐渐增大,且胶结作用在干湿循环影响下的残余强度逐渐增大,故 G1.0%试样的大孔隙比例相对较大。

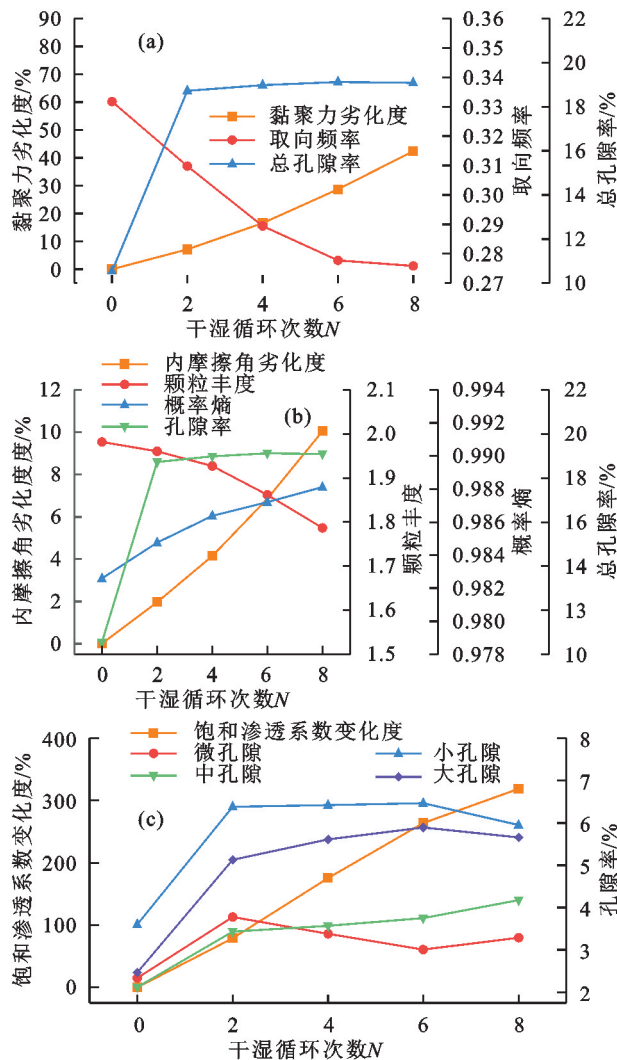


图 10 微观结构参数与宏观性能指标关系

Fig.10 Relationships between microstructure parameters and macro-performance indicators

3.3 宏观性能-微观参数演化特征函数

以黏聚力劣化率($\bar{Dc}$)为例介绍宏观性能-微观参数演化特征函数的建立方法。为消除不同参数的数据类型的影响,按照公式(4)对微观参数进行归一化,分别得到相应的归一化参数($\bar{Dc}$)。根据结果绘制散点图,采用幂函数建立 $\bar{Dc}$ 与干湿循环次数(N)间的演化特征函数(图 11),此关系形式在已有研究^[10,20]中很常见,并且已经证实系数 A 和 B 与微观参数的变化有关。同理,建立内摩擦角劣化率($\bar{D\varphi}$)和饱和渗透系数变化率($\Delta\bar{K}$)的演化特征函数(公式 4)。

$$\begin{cases} \bar{Dc} = Dc_{xy} / Dc_{\max} \\ \bar{D\varphi} = D\varphi_{xy} / D\varphi_{\max} \\ \Delta\bar{K} = \Delta K_{xy} / \Delta K_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \bar{Dc} = A_1 (N/8)^{B_1} \\ \bar{D\varphi} = A_2 (N/8)^{B_2} \\ \Delta\bar{K} = A_3 (N/8)^{B_3} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Dc_{xy} 、 $D\varphi_{xy}$ 、 ΔK_{xy} 分别为生物胶掺量 x 试样经历 y 次干湿循环后的黏聚力、内摩擦角劣化率、饱和渗透系数变化率; $Dc_{\max}$ 、 $D\varphi_{\max}$ 、 $\Delta K_{\max}$ 分别为最大黏聚力、内摩擦角劣化率、饱和渗透系数变化率。

为消除对不同参数类型的影响,按照公式(6)对微观参数进行归一化。在此基础上,以 $\bar{Dc}$ 为优化目标,利用 MATLAB 优化工具箱中的非线性最小二乘函数对微观参数 n_m 和 V 进行耦合分析,利用公式(7)和公式(8)确定黏聚力劣化率演化特征函数的系数 A_1 、 B_1 。因此,黏聚力-微观结构劣化演化特征函数可用公式(9)表示,以计算黏聚力劣化率的预测值 $\bar{Dc}$,见表 3。

$$\begin{cases} \hat{n}_m = n_m / n_{m0} \\ \hat{V} = V / V_0 \\ \hat{C} = C / C_0 \\ \hat{H}_m = \log_{10}(H_m) / \log_{10}(H_{m0}) \end{cases} \quad (6)$$

$$A_1 = 0.55 \left(\frac{2.1}{\hat{n}_m} + \frac{\hat{V}}{318} \right) \quad (7)$$

$$B_1 = \frac{2.1}{\hat{n}_m} + \frac{\hat{V}}{318} \quad (8)$$

$$\bar{Dc} = 0.55 \left(\frac{2.1}{\hat{n}_m} + \frac{\hat{V}}{318} \right) \left(\frac{N}{8} \right)^{\left(\frac{2.1}{\hat{n}_m} + \frac{\hat{V}}{318} \right)} \quad (9)$$

同理,建立内摩擦角劣化率($\bar{D\varphi}$)和饱和渗透系数变化率($\Delta\bar{K}$)的演化特征函数[公式(10)~(11)],以计算内摩擦角劣化率和饱和渗透系数变化率的预测值($\bar{D\varphi}$), $\Delta\bar{K}$,计算结果见表 4、表 5。

通过黏聚力和内摩擦角劣化率、饱和渗透系数变化率的预测值($\bar{Dc}$ 、 $\bar{D\varphi}$ 、 $\Delta\bar{K}$)计算黏聚力、内摩擦角、饱和渗透系数的预测值($\bar{c}$ 、 $\bar{\varphi}$ 、 $\bar{K}$),并与试验值(c 、 φ 、 K)进行对比,见图 12、图 13。决定系数(R^2)分别为 0.99、0.99、0.98,且超过 95%的预测点落在均方误差线以内,证实宏-微观演化特征函数在描述干湿循环条件下宏观性能变化具有良好效果。

$$\bar{D\varphi} = 0.7 \left(\frac{2}{\hat{n}_m} + \frac{1}{20 \hat{H}_m} - \frac{\hat{C}}{4.9} \right) \left(\frac{N}{8} \right)^{\left(\frac{2}{\hat{n}_m} + \frac{1}{20 \hat{H}_m} - \frac{\hat{C}}{4.9} \right)} \quad (10)$$

$$\Delta\bar{K} = 1.2 \left(\frac{1}{8.3 \hat{n}_1} + \frac{1}{6.25 \hat{n}_2} + \frac{\hat{n}_3}{100} + \frac{\hat{n}_4}{3.5} \right) \left(\frac{N}{8} \right)^{\left(\frac{1}{8.3 \hat{n}_1} + \frac{1}{6.25 \hat{n}_2} + \frac{\hat{n}_3}{100} + \frac{\hat{n}_4}{3.5} \right)} \quad (11)$$

3.4 演化特征函数的合理性和局限性

本研究建立的宏观性能-微观结构演化特征函数考虑生物胶固化黄土在干湿循环条件下宏观性能(力学性能、渗透性能)演化过程和微观结构(颗粒、孔隙)损伤过程。因此,演化特征函数在一定程度上评估干湿循环对生物胶固化黄土的影响,描述固化黄土宏

观性能和微观结构的演化过程,建立固化黄土宏观性能和微观结构的定量关系,实现微观结构对宏观性能的变化准确预测,具有一定的合理性。需要指出的是,演化特征函数存在一定的局限性。首先,干湿循环的试验仅仅考虑一种循环路径,且干湿过程中的循环幅度为固定值,忽略了多种循环路径、幅度对固化黄土宏观性能和微观结构的影响;其次,对于

微观结构参数的选择,本文仅考虑相关研究中被证实与宏观性能关联度较高的微观结构参数,但是,其他微结构参数对宏观性能的影响也是不可忽略的。因此,在未来的工作中,我们将整合干湿循环路径、循环幅度对生物胶固化黄土宏观性能和微观结构影响,全面探讨微观结构参数对宏观性能的影响,进一步完善宏-微观演化特征函数。

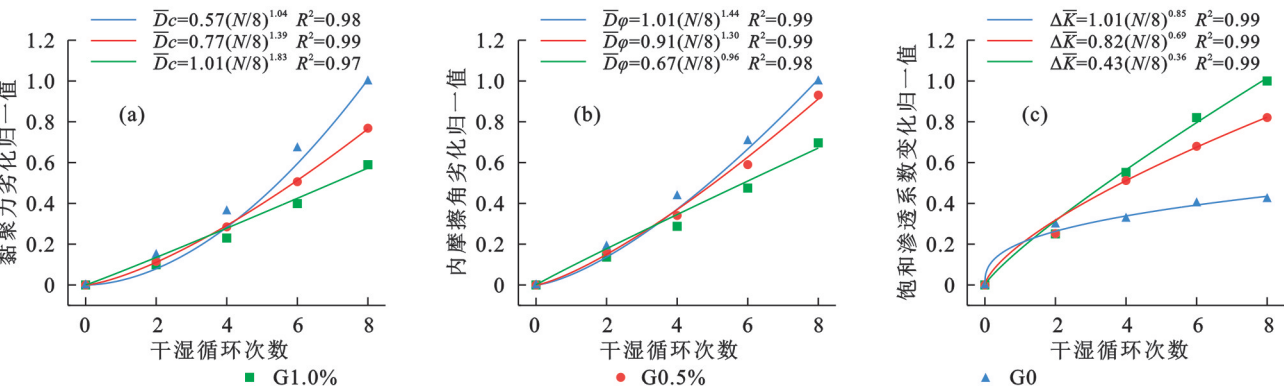


图 11 宏观性能演化曲线

Fig.11 Macro-performance evolution

表 3 黏聚力-微观结构演化特征函数的微观参数、函数系数和函数预测值

Table 3 Cohesion-microstructure evolution characteristic function, functional coefficient and predictive value								
生物胶掺量/%	N/次	$\hat{n}_m$	$\hat{V}$	A_1	B_1	$\overline{Dc}/\%$	$\overline{c}/\text{kPa}$	c/kPa
1.0	2	1.775 8	0.933 8	0.652 0	1.185 5	0.126 0	83.260 1	85.04
	4	1.801 1	0.872 4	0.642 8	1.168 7	0.285 9	72.731 8	76.42
	6	1.814 0	0.837 1	0.638 2	1.160 3	0.457 1	61.462 7	65.29
	8	1.810 3	0.831 4	0.639 5	1.162 7	0.639 5	49.451 4	52.74
0.5	2	1.441 9	0.947 9	0.802 7	1.459 4	0.106 1	79.231 9	78.62
	4	1.387 8	0.801 3	0.833 6	1.515 7	0.291 5	67.793 7	68.22
	6	1.500 8	0.794 5	0.770 9	1.401 7	0.515 1	54.001 8	54.55
	8	1.514 5	0.696 6	0.763 8	1.388 8	0.763 8	38.656 6	38.36
0	2	1.253 7	0.958 4	0.922 9	1.678 1	0.090 1	67.912 7	64.84
	4	1.265 5	0.812 6	0.914 1	1.662 0	0.288 9	57.533 5	53.66
	6	1.289 7	0.716 6	0.896 8	1.630 5	0.561 0	43.319 3	37.52
	8	1.306 8	0.613 6	0.884 9	1.608 9	0.884 9	26.403 6	20.39

表 4 内摩擦角-微观结构演化特征函数的微观参数、函数系数和函数预测值

Table 4 Internal friction angle-microstructure evolution characteristic function, functional coefficient and predictive value									
生物胶掺量/%	N/次	$\hat{n}_m$	$\hat{H}_m$	$\hat{C}$	A_1	B_1	$\overline{D\varphi}/\%$	$\overline{\varphi}/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$
1.0	2	1.775 8	0.874 4	0.989 3	0.687 1	0.981 5	2.539 4	27.776 3	27.94
	4	1.801 1	0.781 0	0.972 6	0.683 2	0.976 0	5.005 0	27.073 6	27.32
	6	1.814 0	0.733 4	0.939 5	0.685 3	0.979 0	7.451 2	26.376 4	26.55
	8	1.810 3	0.681 3	0.901 6	0.695 9	0.994 2	10.028 5	25.641 9	25.64
0.5	2	1.441 9	0.839 3	0.979 6	0.872 7	1.246 8	2.233 2	27.482 3	27.44
	4	1.387 8	0.565 1	0.956 6	0.934 0	1.334 3	5.337 7	26.609 6	26.73
	6	1.500 8	0.541 7	0.922 7	0.865 6	1.236 6	8.739 5	25.653 3	25.72
	8	1.514 5	0.448 5	0.876 4	0.877 2	1.253 2	12.641 1	24.556 6	24.34
0	2	1.253 7	0.965 7	0.985 1	1.012 2	1.446 0	1.964 9	26.469 5	26.26
	4	1.265 5	0.730 4	0.952 1	1.018 2	1.454 6	5.353 4	25.554 6	25.30
	6	1.289 7	0.521 1	0.911 2	1.022 5	1.460 7	9.678 9	24.386 7	24.25
	8	1.306 8	0.387 5	0.851 1	1.040 0	1.485 8	14.987 1	22.953 5	23.11

表 5 饱和渗透系数-微观结构演化特征函数的微观参数、函数系数和函数预测值

Table 5 Saturated permeability coefficient-microstructure evolution characteristic function, functional coefficient and predictive value

生物 胶掺量/%	N/次	$\hat{n}_1$	$\hat{n}_2$	$\hat{n}_3$	$\hat{n}_4$	A_3	B_3	$\Delta\bar{K}/\%$	$\bar{K}/$ ($10^{-5}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	$K/$ ($10^{-5}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
1.0	2	1.612 3	1.771 9	1.617 0	2.072 3	0.927 6	0.773 0	101.235 0	3.500 4	3.130 58
	4	1.444 7	1.783 4	1.683 0	2.265 3	1.004 2	0.836 8	179.172 1	4.856 1	4.803 29
	6	1.284 2	1.796 8	1.766 6	2.380 9	1.056 5	0.880 4	261.356 9	6.285 7	6.298 34
	8	1.405 7	1.653 4	1.968 8	2.285 7	1.025 9	0.854 9	326.928 6	7.426 3	7.296 94
0.5	2	1.569 5	1.277 9	1.483 3	1.604 0	0.809 7	0.674 8	101.262 2	3.828 3	3.431 06
	4	1.269 0	1.513 2	1.322 5	1.380 7	0.729 6	0.608 0	152.555 1	4.804 0	5.013 38
	6	1.378 2	1.513 3	1.531 3	1.557 9	0.783 9	0.653 2	207.010 8	5.839 8	6.033 30
	8	1.379 1	1.513 4	1.532 5	1.658 3	0.818 2	0.681 9	260.760 0	6.862 2	6.890 63
0	2	1.615 2	1.257 0	1.256 2	0.845 6	0.546 9	0.455 7	92.656 5	5.110 8	5.182 42
	4	1.787 5	1.371 1	1.171 5	0.667 0	0.463 3	0.386 1	112.984 2	5.650 1	5.422 54
	6	2.101 1	1.327 1	1.184 5	0.534 3	0.410 6	0.342 2	118.592 7	5.798 9	6.059 77
	8	2.354 9	1.295 7	1.173 6	0.443 2	0.375 4	0.312 8	119.628 9	5.826 4	6.237 22

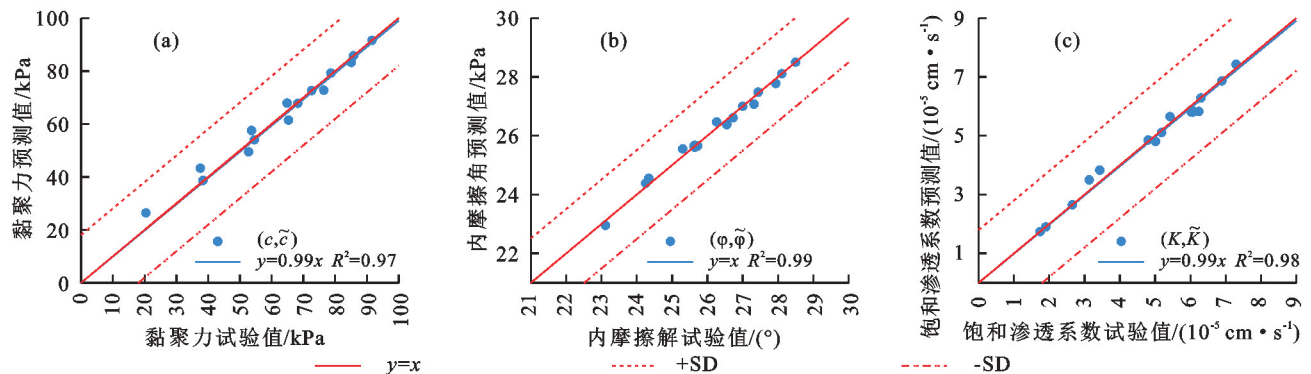


图 12 试验值与特征函数预测值对比结果

Fig.12 Comparison between the experimental and predicted values

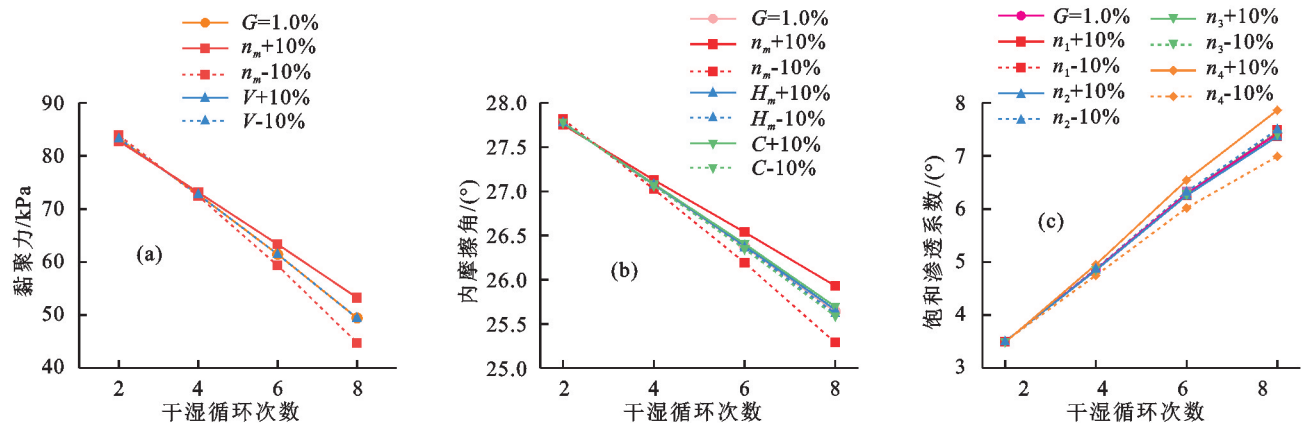


图 13 演化特征函数各参数的敏感性

Fig.13 Functional parameter sensitivity analysis

3.5 关于固化黄土的改进建议

通过对宏-微演化特征函数进行敏感性分析(图 13),为生物胶固化黄土的优化提供建议。以 $G=1.0\%$ 固化黄土的黏聚力-微观结构演化特征函数(公式 9)为例介绍敏感性分析方法。当评估某一参数时,该参数在原始数据基础上浮动 10% ,而其他参数仍保持原始数据,将导致黏聚力预测值 $\bar{c}$ 变动,从而

评估其微结构参数的敏感度。同理,对内摩擦角预测值 $\bar{\varphi}$ 、饱和渗透系数预测值 $\bar{K}$ 进行敏感性分析,表明黏聚力和内摩擦角对于孔隙率的变化最敏感;饱和渗透系数对大孔隙率的变化最为敏感。因此,在相同条件下,优先提高生物胶固化黄土抑制孔隙发育的能力,尤其是孔径 $>32\ \mu\text{m}$ 的大孔隙,以最大限度地改善力学性能的劣化,维持渗透性能的稳定。

4 结 论

1)对试样进行干湿循环条件下的直剪试验和饱和渗透试验,生物胶抑制固化黄土力学性质劣化,抑制效果与生物胶掺量呈正相关,生物胶增大固化黄土的渗透性能变化,变化幅度与掺量呈负相关,在经历 8 次循环后,G1.0%试样的黏聚力、内摩擦角劣化率分别为 42.40%、10.04%,饱和渗透系数变化率为 318.69%;G0 试样黏聚力、内摩擦角劣化率分别为 71.92%、14.41%,饱和渗透系数变化率为 137.00%。

2)对试样进行扫描电镜试验,干湿循环对黄土微观结构造成严重损伤,颗粒的取向角度收敛、圆润程度增加、分布状态趋于混乱,孔隙发育程度增加。生物胶缓解干湿循环对颗粒的损伤,改变不同尺寸孔隙的发育情况,G1.0%、G0.5%试样以大、中孔隙发育为主,G0 试样以微、小孔隙发育为主。

3)对微观结构的损伤过程进行量化,结合力学试验和渗透试验结果,建立宏观性能-微观结构演化特征函数,评估干湿循环对生物胶固化黄土的影响,描述固化黄土宏观性能和微观结构的演化过程,且可通过微观结构对宏观性能的变化进行准确地定量预测。

4)对固化黄土和素黄土的宏观性能-微观结构演化特征函数进行敏感性分析,黏聚力和内摩擦角对孔隙率的变化最敏感,渗透系数对于孔径 $>32\ \mu\text{m}$ 的大孔隙率的变化最敏感,可通过加入抑制孔隙发育材料的方式,进一步提高生物胶固化黄土宏观性能在干湿循环条件下的耐久性。

参考文献:

- [1] AI S H, LIU Z Y, AI X Y, et al. China's road slopes need long-term protection[J]. Science, 2024, 384(6699): e967.
- [2] 晏长根,梁哲瑞,贾卓龙,等.黄土边坡坡面防护技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(4): 1-22.
YAN C G, LIANG Z R, JIA Z L, et al. Review on surface protection technologies of loess slope[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(4): 1-22.
- [3] FATEHI H, ABTAHI S M, HASHEMOLHOSSEINI H, et al. A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening[J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 813-821.
- [4] 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 Z Q, FAN H H, WANG J Q, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 731-739.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 W L, SHI Y L, MU P X, et al. An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2022, 49(4): 117-124.
- [8] 王天亮,王林,刘松松,等.黄原胶和瓜尔胶改良膨胀土力学特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 1-10.
WANG T L, WANG L, LIU S S, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil improved by xanthan gum and guar gum[J]. China Railway Science, 2023, 44(2): 1-10.
- [9] JIA Z L, YAN C G, LI B, et al. Performance test and effect evaluation of guar gum-stabilized loess as a sustainable slope protection material[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 408: e137085.
- [10] BAO H, LIU C Q, LAN H X, et al. Time-dependency deterioration of polypropylene fiber reinforced soil and guar gum mixed soil in loess cut-slope protecting[J]. Engineering Geology, 2022, 311: e106895.
- [11] 雷祥义.中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987(12): 1309-1316.
LEI X Y. Pore types and collapsibility of loess in China[J]. Science of China(B), 1987, 12: 1309-1316.
- [12] 齐吉琳,张建明,朱元林.冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(S2): 2690-2694.
QI J L, ZHANG J M, ZHU Y L. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(S2): 2690-2694.
- [13] 方祥位,申春妮,汪龙,等.Q2 黄土浸水前后微观结构变化研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1319-1324.
FANG X W, SHEN C N, WANG L, et al. Research on microstructure of Q2 loess before and after wetting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1319-1324.
- [14] XU P P, ZHANG Q Y, QIAN H, et al. Microstructure and permeability evolution of remolded loess with different dry densities under saturated seepage[J]. Engineering Geology, 2021, 282: e105875.
- [15] 包含,尹晓晴,兰恒星,等.基于微结构量化的含渐变带天然黄土渗透各向异性研究:以延安新区 Q1 黄土为例

- [J].岩土工程学报,2023,45(4):730-738.
- BAO H, YIN X Q, LAN H X, et al. Permeability anisotropy of natural loess with gradation zone: Case study of Q1 loess in Yan'an New District[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(4):730-738.
- [16] 张凌凯,丁旭升,樊培培.新疆北部重塑性黄土的力学特性规律及微观机制试验研究[J].材料导报,2025,39(3):107-116.
- ZHANG L K, DING X S, FAN P P. Experimental study on mechanical properties and microscopic mechanism of remolded loess in northern Xinjiang [J]. Materials Reports,2025,39(3):107-116.
- [17] 袁志辉.干湿循环下黄土的强度及微结构变化机理研究[D].西安:长安大学,2015.
- YUAN Z H. Study on the strength and microstructure change mechanism of loess under dry-wet cycle [D]. Xi'an: Chang'an University,2015.
- [18] MA Y F, BAO H, YAN C G, et al. Mechanical properties and microstructure evolution of two ecological slope-protection materials under dry-wet cycles[J].Journal of Cleaner Production,2023,416:e137833.
- [19] 樊培培,张凌凯,丁旭升.干湿-冻融循环条件下湿陷性黄土剪切及压缩特性的劣化规律[J].岩土力学,2024,45(7):2050-2060.
- FAN P P, ZHANG L K, DING X S. Deterioration law of shear and compression characteristics of collapsible loess under dry-wet and freeze-thaw cycles[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(7):2050-2060.
- [20] 刘禹阳,安驰,来弘鹏,等.不同干湿循环路径下 Q2 原状黄土强度与微观结构演化试验[J].中国公路学报,2022,35(12):168-180.
- LIU Y Y, AN C, LAI H P, et al. Experimental research on strength and microstructure evolution of Q2 undisturbed loess under different wetting-drying cycle paths[J].China Journal of Highway and Transport,2022,35(12):168-180.
- [21] Restoration and development of the degraded Loess Plateau, China[M].Springer Japan,2014.
- [22] 徐盼盼,张奇莹,钱会,等.基于 SEM 多级化孔隙特征研究:以重塑黄土为例[J].工程地质学报,2023,31(6):1799-1810.
- XU P P, ZHANG Q Y, QIAN H, et al. Sem-based multi-level pore characteristics-a case study of remolded loess[J].Journal of Engineering Geology,2023,31(6):1799-1810.
- [23] 潘振兴,杨更社,叶万军,等.干湿循环作用下原状黄土力学性质及细观损伤研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1186-1192.
- PAN Z X, YANG G S, YE W J, et al. Study on mechanical properties and microscopic damage of undisturbed loess under dry and wet cycles [J]. Journal of Engineering Geology,2020,28(6):1186-1192.
- [24] WANG L, CHENG W C, XUE Z F. Investigating microscale structural characteristics and resultant macroscale mechanical properties of loess exposed to alkaline and saline environments[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2022,81(4):e146.
- [25] MARTIN C D. Seventeenth canadian geotechnical colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J].Canadian Geotechnical Journal,1997,34(5):698-725.
- [26] XU J, WU Z P, CHEN H, et al. Influence of dry-wet cycles on the strength behavior of basalt-fiber reinforced loess[J].Engineering Geology,2022,302:e106645.
- [27] XU P, ZHANG Q, QIAN H, et al. Investigating the mechanism of pH effect on saturated permeability of remolded loess [J]. Engineering Geology, 2021, 284: e105978.
- [28] LEE S, CHANG I, CHUNG M K, et al. Geotechnical shear behavior of Xanthan Gum biopolymer treated sand from direct shear testing[J].Geomechanics and Engineering,2017,12(5):831-847.
- [29] 陈阳,李喜安,黄润秋,等.影响黄土湿陷性因素的微观试验研究[J].工程地质学报,2015,23(4):646-653.
- CHEN Y, LI X A, HUANG R Q, et al. Micro experimental research on influence factors of loess collapsibility[J].Journal of Engineering Geology,2015,23(4):646-653.