

DOI: 10.11779/CJGE202204006

干湿循环对不同粒径组崩解性砂岩改良膨胀土的影响

李国维^{1, 2}, 王佳奕^{1, 2}, 陈伟^{1, 3}, 吴建涛^{*1, 2}, 曹雪山^{1, 2}, 吴少甫⁴

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210024;

3. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 4. 中铁二十局集团有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 基于引江济淮工程研究利用河道开挖弃料崩解性砂岩改良膨胀土的长期效果。试验结果表明: ①崩解性砂岩改善膨胀土的压实性和强度特性, 岩屑粒径小于 2 mm 时改良土的压实性最优, 砂岩物理改良土的直剪指标与岩屑粒径正相关, 砂岩水泥复合改良土的直剪指标主要受水泥改良作用控制, 岩屑粒径的影响不明显; ②崩解性砂岩对改良土干湿循环过程中的开裂具有抑制作用, 砂岩物理改良土中岩屑粒径大于 10 mm 时其周围土中会出现裂隙集中现象, 砂岩水泥复合改良土的裂隙率明显小于纯水泥改良土, 与岩屑尺寸无显著相关性; ③崩解性砂岩具有延缓改良土在干湿循环过程中凝聚力衰减的作用, 延缓作用受岩屑尺寸影响, 岩屑粒径在砂岩物理改良土中应不大于 10 mm, 在砂岩水泥复合改良土中应不大于 5 mm; ④崩解性砂岩微观上的演化特征影响改良土宏观上的裂隙发育和强度衰减规律。

关键词: 膨胀土; 崩解性砂岩; 粒径; 干湿循环; 微观机理

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)04-0643-09

作者简介: 李国维(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事软基路堤变形和高边坡稳定性等方面的教学与科研工作。

E-mail: lgwnj@163.com。

Influences of wetting-drying cycles on expansive soils improved with disintegrated sandstone with different particle size groups

LI Guo-wei^{1, 2}, WANG Jia-yi^{1, 2}, CHEN Wei^{1, 3}, WU Jian-tao^{1, 2}, CAO Xue-shan^{1, 2}, WU Shao-fu⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Highway and Railway Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai

University, Nanjing 210024, China; 4. China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: Based on the project of diverting water from Yangtze River to Huaihe River, the long-term effect of the improved expansive soils with disintegrated sandstone waste from river excavation is studied. The results show that: (1) The disintegrated sandstone improves the compactness and strength characteristics of the expansive soils. The improved expansive soils have the best compactness when the particle size of the disintegrated sandstone is less than 2 mm. The direct shear index of the physically improved soils is positively correlated with the particle size of the sandstone. The direct shear index of the compositely improved soils is mainly controlled by the improvement of cement, and the influences of particle size of the sandstone is not obvious. (2) The disintegrated sandstone can inhibit the cracking of the improved expansive soils during wetting-drying cycles. When the particle size of the sandstone is larger than 10 mm, there will be crack concentration in the surrounding soils. The crack rate of the compositely improved soils is significantly lower than that of the cement-improved soils, and has no significant correlation with the particle size of the sandstone. (3) The disintegrated sandstone has the effect of delaying the cohesion attenuation of the improved soils in the process of wetting-drying cycles, and the effect is affected by the particle size of the sandstone. The particle size of sandstone shall not be greater than 10 mm in the physically improved soils and 5 mm in the compositely improved soils. (4) The microscopic evolution characteristics of the disintegrated sandstone affect the macroscopic crack development and strength attenuation of the improved soils.

Key words: expansive soil; disintegrated sandstone; particle size; wetting-drying cycle; microscopic mechanism

0 引言

膨胀土具有很大的工程危害性^[1], 采用非膨胀土封闭是工程中常用的膨胀土边坡防护方法之一。引江

济淮工程引江济巢段、江淮沟通段沿线广泛分布膨胀

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41472240)

收稿日期: 2021-01-25

*通信作者 (E-mail: jiantao.wu@hhu.edu.cn)

土地层，非膨胀土资源奇缺，原位膨胀土改良利用是必须的工程措施。物理改良法和复合改良法是常用的手段^[2-3]，由于引江济淮工程兼具输水、航运和改善水生态三大功能，生活用水的硬度标准限制了掺拌生石灰改良膨胀土方法的使用，物理改良法及加水泥的复合改良法等成为可选方案。

引江济淮工程江淮沟通段下伏崩解性砂岩地层，河道开挖依次产生的砂岩弃料处于堆场顶层，由于其不生长植被从而增加环境负担。有效利用崩解性砂岩生产非膨胀土，可减少膨胀土用量从而减少其风干破碎工艺产生的工程量，同时提高水泥掺拌的均匀性，达到保障膨胀土复合改良效果和减排环保的目的。

研究显示，单粒结构结晶砂可作为物理改良膨胀土的材料^[4-5]。掺砂可有效抑制干湿（冻融）循环作用导致的改良土强度衰减与裂隙的发育^[6-7]。引江济淮工程的弃料砂为崩解性砂岩遇水崩解的产物，非单粒结构，颗粒间胶结物含蒙脱石等强亲水性黏土矿物。崩解岩遇水崩解，崩解程度与吸收水分、环境温度（外部因素）和胶结物类别、黏土矿物含量、初始裂纹（内部因素）等有关^[8-10]。现有崩解性砂岩的应用研究主要关注其作为工程填筑材料的属性特征，作为膨胀土改良的辅助材料还是全新的应用^[11]。崩解性砂岩的崩解特性对改良土性状的长期影响，砂岩改良膨胀土的长期效果和改良机理还须深入研究。

不同粒径组的岩屑混合料，是砂岩在工程应用中的实际状态。本研究基于引江济淮工程，分别将不同粒径组（<2 mm、2~5 mm、5~10 mm、10~20 mm）崩解性砂岩岩屑掺入膨胀土进行单一改良，并在此基础上加入 4%水泥进行对比，通过物理力学试验，和微观电镜扫描（SEM）等手段，研究岩屑粒径尺寸对改良膨胀土力学性状稳定性的影响规律，为引江济淮河道工程膨胀土边坡防护问题的合理解决和运行期工程管理提供技术支持。

1 试验材料

本试验所用膨胀土取自引江济淮工程菜巢线小合分线段，为黑褐色黏土；崩解性砂岩取自引江济淮工程江淮沟通试验工程段，岩体呈暗红色，表面砂感强，遇水软化崩解，岩石二次循环耐崩解性指数 I_{d2} 为 0，为强崩解性砂岩。水泥采用普通硅酸盐水泥（P.O 42.5）。膨胀土自由膨胀率为 62%，掺入 30%（质量比）砂岩岩屑后自由膨胀率降低至 47%，在此基础上掺入 4%（质量比）水泥自由膨胀率降低至 31%。膨胀土与崩解性砂岩基本物理性质参数见表 1，X 射线衍射试验统计结果见表 2。

表 1 膨胀土与崩解性砂岩基本物理性质指标
Table 1 Basic physical property indexes of expansive soils and disintegrated sandstone

土样	自由膨胀率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	颗粒组成/%		
					砂粒	粉粒	黏粒
膨胀土	62	52	24	28	1.1	87.7	13.2
崩解性砂岩	24	36	19	17	54.1	35.2	7.7

表 2 膨胀土与崩解性砂岩 X 射线衍射试验结果（质量分数）
Table 2 Results of X-ray diffraction experiment of expansive soils and disintegrated sandstone (mass fraction)

土样	蒙脱石/%	蛭石/%	水云母/%	高岭石/%	绿泥石/%	石英/%	长石/%	方解石/%
膨胀土	27	4	11	4	2	14	8	30
崩解性砂岩	12	6	6	5	4	45	22	—

2 试验方案

2.1 基本物理性质试验

崩解性砂岩破碎过筛，分别得到粒径<2 mm，2~5 mm，5~10 mm 及 10~20 mm 的岩屑，各以 30%（质量比）^[12]的掺量加入膨胀土中实现物理改良，称为物理改良土。同时，在此基础上，添加 4%（质量比）水泥对膨胀土实施复合改良，称为复合改良土。对物理改良土与复合改良土进行室内物理力学性质试验。

根据《土工试验规程》（SL 237—1999）^[13]对改良土进行轻型击实试验，得到最优含水率与最大干密度。

按最优含水率制备土+岩混合料、土+岩+水泥混合料，以 95%压实度击入 300 mm×300 mm×120 mm 的木模中，以 ϕ 61.8 mm×20 mm 环刀在木模中取样，放入真空吸水仪中抽真空 1 h 以上，再缓缓注入清水直到水面高于试样 2 cm 以上，静置 12 h 使试样充分饱和，对饱和后的试样进行直接快剪试验。掺加水泥的试样需在养护箱内养护至 28 d 龄期，再取出进行上述室内物理试验，养护箱维持在温度 20℃、湿度 95% 的恒定状态。

2.2 干湿循环试验

对素土及改良土进行干湿循环试验，采用先干后湿的顺序。对所有土样进行饱和，定义饱和土样为初始状态，将饱和后的土样放入温度 45℃、湿度 50% 的恒温恒湿箱中干燥 12 h，再放入真空吸水仪中进行真空饱和 12 h（试样达到饱和含水率），此为一次干湿循环。

每次干燥后，对试样表面进行拍照，记录其表面裂隙发展情况，并对循环次数为 0，1，3，5 次的试样进行饱和状态下的直接快剪试验。

2.3 扫描电镜微观试验

对未经历干湿循环和干湿循环 5 次后的土样进行饱和，将饱和后的土样切成小块，放入冻干机中进行冷冻干燥。将冷冻干燥后的试样掰开露出新鲜面，将

试样置于金属圆盘上, 新鲜面朝上, 底部尽量平整, 放入真空镀膜仪内喷金, 取出后在试样侧面涂抹导电胶, 使试样上侧喷金部分与圆盘以导电胶相连。采用 SU3500 日立扫描电子显微镜 (SEM) 对试样表面微观形貌进行观察并拍摄图像。

根据 SEM 图像进行定性分析和定量分析, 观察干湿循环对改良土微观结构的影响情况, 探索孔隙变化规律, 从微观角度解释改良土改性机理与性状稳定性, 并与宏观试验结果比对。

3 改良土的物理力学性质

3.1 击实特性

图 1 为击实试验结果, 相关数据列入表 3, 表中变化率为膨胀土经改良后击实参数的变化程度, 素土变化率定义为 0。

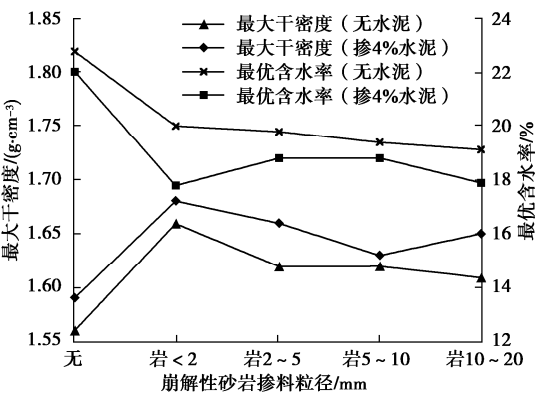


图 1 素土及改良土击实结果

Fig. 1 Compaction results of plain and improved soils

表 3 素土及改良土最优含水率与最大干密度值汇总

Table 3 Optimum moisture contents and maximum dry densities of plain and improved soils

击实材料	砂岩 粒径组 /mm	水泥 含量 /%	最优含水率		最大干密度	
			数值 /%	变化率 /%	数值 /(g·cm ⁻³)	变化率 /%
素土	无	0	22.8	0	1.56	0
	<2	0	20.0	-12.28	1.66	6.41
	2~5	0	19.8	-13.16	1.62	3.85
	5~10	0	19.4	-14.91	1.62	3.85
	10~20	0	19.1	-16.23	1.61	3.21
素土+水泥	无	4	22.0	-3.51	1.59	1.92
	<2	4	17.8	-21.93	1.68	7.69
	2~5	4	18.8	-17.54	1.66	6.41
	5~10	4	18.8	-17.54	1.63	4.49
	10~20	4	17.9	-21.49	1.65	5.77

图 1 显示, 与素土相比, 物理改良土和复合改良土的最优含水率下降, 最大干密度增大。砂岩岩屑的掺入改善膨胀土的击实特性, 加入水泥后, 复合改良土击实特性得到进一步改善。

物理改良土的最优含水率与岩屑粒径负相关。物理改良时掺入的岩屑粒径增大, 使改良土整体比表面积降低, 导致吸水性能降低, 最优含水率降低。

掺入的岩屑粒径小于 2 mm 时, 改良土最大干密度最大。岩屑粒径小于 2 mm 时, 土岩混合均匀性相对最好, 故压实性改善最大。

3.2 抗剪强度特性

图 2 为直接快剪试验结果, 相关数据列入表 4, 表中变化率为膨胀土经改良后直剪指标的变化程度, 素土变化率定义为 0。

图 2 显示, 与素土相比, 物理改良土的凝聚力和内摩擦角均增大, 且与岩屑粒径正相关; 复合改良土凝聚力和内摩擦角进一步显著增大, 与岩屑粒径无显著相关性。

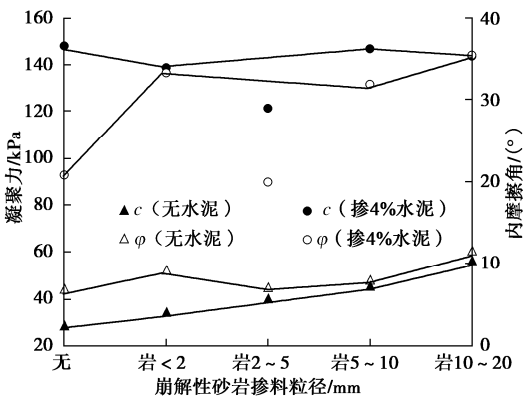


图 2 素土及改良土凝聚力 c 、内摩擦角 φ 值

Fig. 2 Cohesions and internal friction angles of plain and improved soils

表 4 素土及改良土凝聚力 c 、内摩擦角 φ 值

Table 4 Cohesions and internal friction angles of plain and improved soils

试样 材料	砂岩 粒径组 /mm	水泥 含量 /%	凝聚力 c		内摩擦角 φ	
			数值 /kPa	变化率 /%	数值 /(°)	变化率 /%
素土	无	0	28.75	0	6.97	0
	<2	0	34.40	19.65	9.39	34.72
	2~5	0	40.46	40.73	7.11	2.01
砂岩+ 膨胀土	5~10	0	45.50	58.26	8.07	15.78
	10~20	0	56.64	97.01	11.65	67.14
素土+ 水泥	无	4	147.90	414.43	20.90	199.86
	<2	4	138.40	381.39	33.38	378.91
	2~5	4	121.25	321.74	19.83	184.51
砂岩+ 膨胀土 +水泥	5~10	4	146.75	410.43	31.77	355.81
	10~20	4	143.63	399.58	35.53	409.76

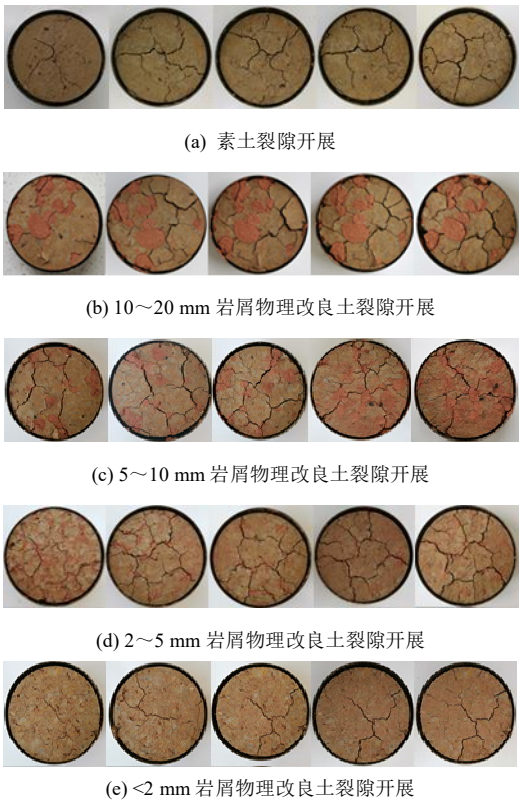
由此, 物理改良的效果为, 岩屑粒径增大, 导致剪切时克服颗粒间错位或翻滚时的摩擦阻力增大, 即抗剪强度增大, 具体表现为内摩擦角和凝聚力增大^[14]。

复合改良的效果为,水泥水化作用产物显著增强了土颗粒的胶结强度,一定程度上掩盖了砂岩岩屑的改良作用影响,具体表现为复合改良土的凝聚力和内摩擦角与水泥的改良作用密切相关,与岩屑粒径无显著相关性。

4 改良土性状稳定性与岩屑粒径的关系

4.1 裂隙开展规律

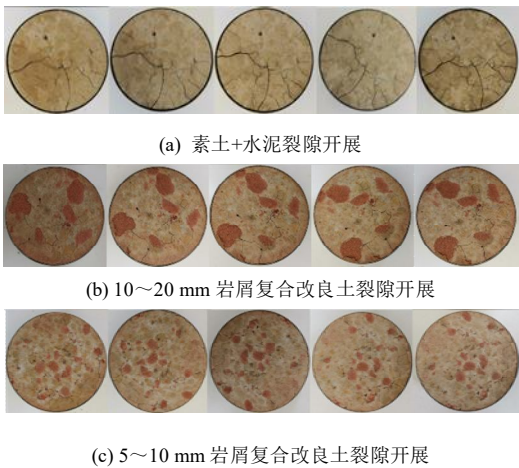
图 3,4 分别为干湿循环作用下物理改良土与复合改良土试样表面裂隙的发展过程与分布情况。图中照片拍摄时保持相同视距、视角和环境条件。



注: 从左往右分别为干湿循环 1, 2, 3, 4, 5 次裂隙图像

图 3 物理改良土在干湿循环作用下的裂隙开展情况

Fig. 3 Crack development of physically improved soils under wetting-drying cycles



(d) 2~5 mm 岩屑复合改良土裂隙开展

(e) <2 mm 岩屑复合改良土裂隙开展

注: 从左往右分别为干湿循环 1, 2, 3, 4, 5 次裂隙图像

图 4 复合改良土在干湿循环作用下的裂隙开展情况

Fig. 4 Crack development of compositely improved soils under wetting-drying cycles

①素土试样。如图 3(a) 所示, 试样在首次干湿循环后仅产生 1~2 条裂隙, 逐步加宽延长发展为主裂隙, 并衍生出多条微小裂隙, 分布不均, 试样整体收缩明显。②10~20, 5~10, 2~5 mm 岩屑物理改良土试样。如图 3(b)~(d) 所示, 裂隙主要存在于土岩界面, 微小裂隙少, 岩屑粒径越大试样整体收缩越不明显。其中 10~20 mm 岩屑所在试样, 无岩屑分布位置裂隙开展明显。③<2 mm 岩屑物理改良土试样。如图 3(e) 所示, 试样仅有一条主裂隙, 几乎无小裂隙生成, 整体收缩较明显。④复合改良土试样。由图 4 可知, 复合改良土试样表面无明显裂隙发生, 纯水泥改良土试样表面有明显裂隙发生和发展。

使用 Matlab 软件对裂隙图像进行二值化处理, 并提取裂隙率数据, 将裂隙率结果绘于图 5, 6。

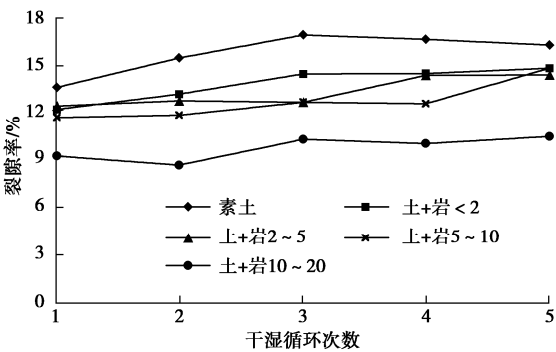


图 5 物理改良土在干湿循环作用下的裂隙率变化

Fig. 5 Change of crack rate of physically improved soils under wetting-drying cycles

图 5 为物理改良土裂隙率随干湿循环的变化情况。图 5 显示, 首次干湿循环后, 素土的裂隙率最大, 10~20 mm 岩屑改良土裂隙率最小, 其他粒径组岩屑改良土介于两者之间。由此可知, 砂岩岩屑对膨胀土裂隙开展具有抑制作用, 因为砂岩膨胀性较低, 受干湿循环影响较膨胀土小, 物理改良土中膨胀土占比下降, 故减弱了干湿循环导致的裂隙开展, 同时岩屑颗粒增大了改良土的内摩擦角, 对膨胀土的膨胀收缩也

起到抑制作用。岩屑粒径越大, 膨胀土胀缩时所克服颗粒间摩擦阻力越大, 本文试验结果中岩屑粒径为 10~20 mm 时就有明显体现。5 次干湿循环过程中, 各试样裂隙率总体上呈略微增长趋势。

图 6 为复合改良土裂隙率随干湿循环的变化情况。图 6 显示, 复合改良土裂隙率远小于物理改良土。首次干湿循环后, 纯水泥改良土试样裂隙率最大, 其他含砂岩岩屑试样的裂隙率近似相同。5 次干湿循环过程中, 各试样的裂隙率总体上无明显变化。

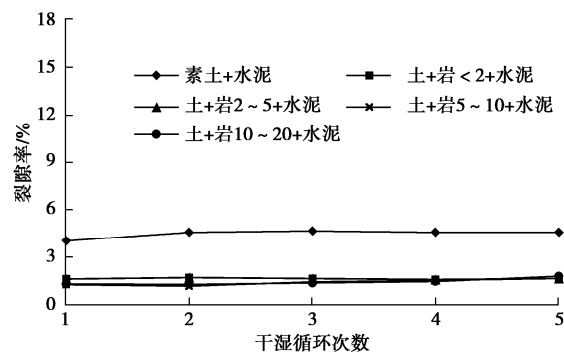


图 6 复合改良土在干湿循环作用下的裂隙率变化

Fig. 6 Change of crack rate of compositely improved soils under wetting-drying cycles

将裂隙率相关数据列入表 5, 6, 表中首末裂隙率比为第 1 次与第 5 次干湿循环后裂隙率的比值。

表 5 物理改良土在干湿循环作用下的裂隙率

Table 5 Crack rate of physically improved soils under wetting-drying cycles						
不同粒径组砂岩 +膨胀土	干湿循环后试样裂隙率/%					首末裂隙 率比/%
	1	2	3	4	5	
素土	13.72	15.53	16.95	16.70	16.32	84.07
岩屑粒径 <2 mm	12.24	13.26	14.53	14.49	14.87	82.31
岩屑粒径 2~5 mm	12.48	12.79	12.68	14.44	14.44	86.43
岩屑粒径 5~10 mm	11.68	11.89	12.68	12.62	14.87	78.55
岩屑粒径 10~20 mm	9.27	8.70	10.36	10.03	10.53	88.03

表 6 复合改良土在干湿循环作用下的裂隙率

Table 6 Crack rate of compositely improved soils under wetting-drying cycles						
不同粒径组砂岩 +膨胀土+4%水泥	干湿循环后试样裂隙率/%					首末裂隙率 比/%
	1	2	3	4	5	
素土+水泥	4.07	4.59	4.65	4.58	4.64	87.72
岩屑粒径 <2 mm	1.62	1.66	1.66	1.61	1.63	99.39
岩屑粒径 2~5 mm	1.78	1.78	1.81	1.68	1.83	97.27
岩屑粒径 5~10 mm	1.22	1.17	1.68	1.60	1.65	73.94
岩屑粒径 10~20 mm	1.34	1.29	1.41	1.50	1.85	72.43

表 5, 6 数据显示, 物理改良土首末裂隙率比为 78.6%~88.0%, 复合改良土首末裂隙率比为 72.4%~

99.4%。由此, 第一次干湿循环促使试样裂隙开展已达到很高的程度, 相对于后继过程, 是对试样损伤最大的一次。

综上, 物理改良土在干湿循环过程中, 首循环产生的损伤影响最大, 导致试样裂隙率增量最大, 后继循环中裂隙率略有增长。物理改良时砂岩岩屑对膨胀土开裂具有抑制作用, 岩屑粒径大于 10 mm 时, 岩屑尺寸对抑制效果有明显影响。物理改良土中岩屑颗粒较大时, 岩屑分布均匀性差, 含砂量较大的部位表现出整体裂隙率低和收缩量小的特征。因此, 实际工程中, 掺加大粒径砂岩岩屑将导致改良土失水后裂隙分布不均匀, 含砂量小的部位裂隙率大, 局部裂隙多。

复合改良土在干湿循环过程中, 首循环产生的裂隙率远小于物理改良土, 后继循环中裂隙率无明显变化。复合改良土的裂隙率明显小于纯水泥改良土, 砂岩岩屑在复合改良中作用明显, 但土体裂隙率和岩屑粒径相关性不显著。

4.2 强度蜕化规律

对干湿循环后的试样进行直接快剪试验。图 7 为物理改良土的凝聚力变化趋势, 相关数据列入表 7。

图 7 显示, 物理改良土的凝聚力随干湿循环次数增加逐次衰减。无循环时物理改良土的凝聚力大于素土, 说明砂岩岩屑的自身胶结强度大于膨胀土颗粒间的凝聚力。

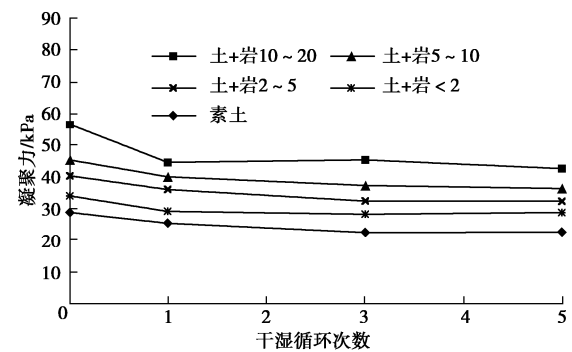


图 7 干湿循环条件下物理改良土的凝聚力

Fig. 7 Cohesions of physically improved soils under wetting-drying cycles

表 7 数据显示, 首循环的凝聚力衰减率, 物理改良土大于素土, 说明岩屑在干湿循环过程发生了崩解, 削弱了改良土的凝聚力。末循环的衰减率, 素土小于 10~20 mm 岩屑改良土, 但大于其他粒径组岩屑改良土, 说明 10 mm 以上粒径组岩屑的后继崩解加大了改良土的凝聚力衰减, 10 mm 以下粒径组岩屑则具有减缓膨胀土凝聚力衰减的作用。由此, 岩屑粒径在物理改良土中应不大于 10 mm。表 7 数据显示, 素土的末首衰减率之比最大, 说明继首循环之后素土的凝聚力衰减最快, 显示出砂岩岩屑减缓长期衰减的作用。

表 7 干湿循环条件下物理改良土的凝聚力

Table 7 Cohesions of physically improved soil under wetting-drying cycles

不同粒径组砂岩 +膨胀土	干湿循环后试样凝聚力/kPa				首次 变化 率/%	末次 变化 率/%	末首 变化 率比
	0	1	3	5			
素土	28.75	25.75	22.52	22.60	-10.43	-21.39	2.05
岩屑粒径 <2 mm	34.40	29.20	28.35	29.03	-15.12	-15.61	1.03
岩屑粒径 2~5 mm	40.46	35.99	32.55	32.65	-11.05	-19.30	1.75
岩屑粒径 5~10 mm	45.50	40.25	37.47	36.67	-11.54	-19.41	1.68
岩屑粒径 10~20 mm	56.64	44.76	45.23	42.70	-20.97	-24.61	1.17

图 8 为复合改良土的凝聚力变化趋势，相关数据列入表 8。

图 8 显示，复合改良土首循环的凝聚力衰减程度显著大于物理改良土。

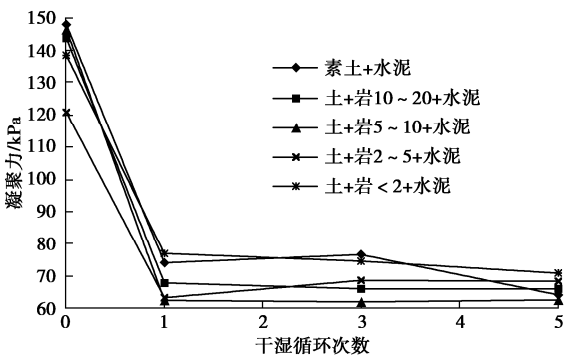


图 8 干湿循环条件下复合改良土的凝聚力

Fig. 8 Cohesions of compositely improved soil under wetting-drying cycles

表 8 数据显示，首次干湿循环后，纯水泥改良土的衰减率小于 5~10，10~20 mm 岩屑改良土，而大于其他粒径组岩屑改良土，末次循环也呈近似规律，说明岩屑粒径在复合改良土中应不大于 5 mm。由表 8 可知，纯水泥改良土的末首衰减率之比最大，说明砂岩岩屑也具有减缓复合改良土长期衰减的作用。

表 8 干湿循环条件下复合改良土的凝聚力

Table 8 Cohesions of compositely improved soils under wetting-drying cycles

不同粒径组砂岩 +膨胀土+4%水泥	干湿循环后试样凝聚力/kPa				首次 变化 率/%	末次 变化 率/%	末首 变化 率比
	0	1	3	5			
素土+水泥	147.90	74.20	76.80	64.10	-49.83	-56.66	1.14
岩屑粒径<2 mm	138.40	77.46	74.55	70.87	-44.03	-48.79	1.11
岩屑粒径 2~5 mm	121.25	63.40	68.80	68.53	-47.71	-43.48	0.91
岩屑粒径 5~10 mm	146.75	62.60	62.10	62.35	-57.34	-57.51	1.00
岩屑粒径 10~20 mm	143.63	67.90	66.30	66.10	-52.73	-53.98	1.02

图 9 为改良土内摩擦角变化趋势。由图 9 可知，复合改良土的内摩擦角总体上大于物理改良土，与岩屑粒径无明显相关性。改良土的内摩擦角在干湿循环过程中有增有减，无一致的规律性。改良土首次干湿循环时凝聚力显著下降，说明颗粒间的胶结强度受到较大破坏，颗粒间的摩擦属性得以显现，宏观表现为内摩擦角对强度的影响略有增长。岩屑在干湿循环中

产生后继崩解，会导致内摩擦角降低。两种影响因素组合作用，导致内摩擦角的变化表现为随机性。

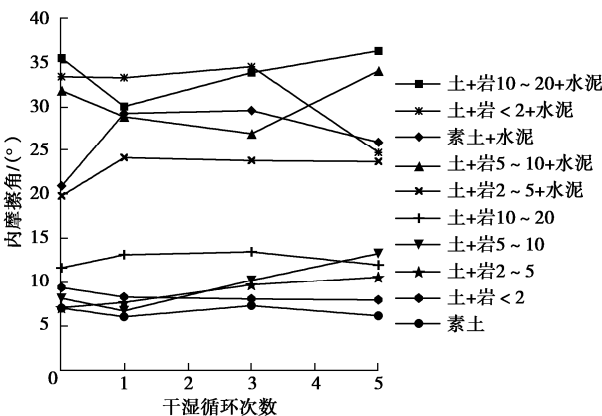


图 9 干湿循环条件下素土及改良土内摩擦角

Fig. 9 Internal friction angles of plain and improved soils under wetting-drying cycles

图 10 为干湿循环条件下部分改良土抗剪强度与竖向压力的关系曲线。对比图 10 (a)，(b) 可知，干湿循环后物理改良土强度衰减不显著，复合改良土强度衰减明显。这一现象与凝聚力的衰减特征相同，说明改良土的强度损伤主要是凝聚力损伤，对内摩擦角的影响较小。由此也说明，物理改良土的强度性状稳定性优于复合改良土。

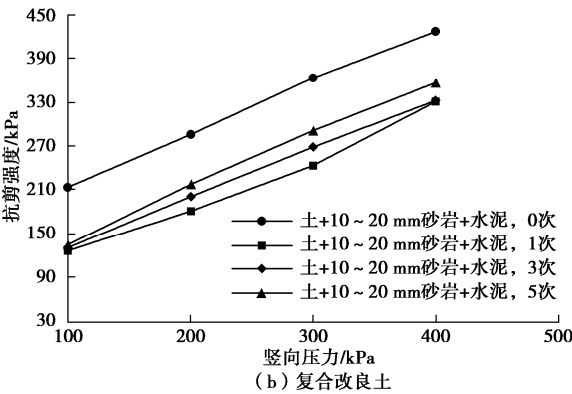
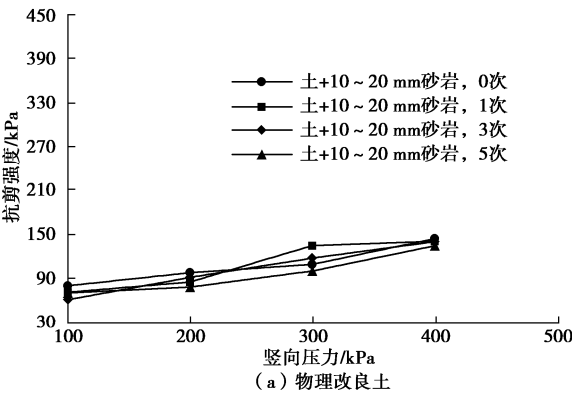


图 10 干湿循环条件下改良土抗剪强度与竖向压力关系曲线
Fig. 10 Curves of shear strength and vertical pressure of improved soils under wetting-drying cycles

图 11 为 3 次干湿循环后改良土抗剪强度与竖向压

力的关系曲线。图 11 显示, 干湿循环后, 物理改良土的抗剪强度与岩屑粒径正相关, 复合改良土的抗剪强度与岩屑粒径无显著关系, 改良土强度大于素土, 与图 2 土体未经干湿循环时的强度规律相一致。

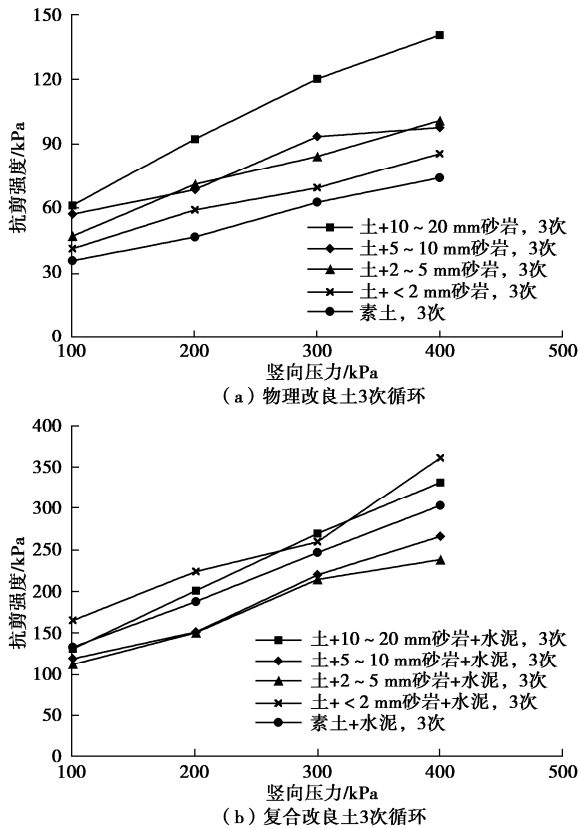


图 11 干湿循环 3 次后改良土抗剪强度与竖向压力关系曲线
Fig. 11 Curves of shear strength and vertical pressure of improved soil after 3 times of wetting-drying cycles

综上, 干湿循环导致改良土凝聚力衰减, 砂岩岩屑具有延缓凝聚力衰减的作用。岩屑尺寸影响其在土体中经历干湿循环时的软化崩解程度, 从而影响改良土的性状稳定性, 岩屑粒径在物理改良土中应不大于 10 mm, 在复合改良土中应不大于 5 mm。改良土强度损伤主要是凝聚力损伤, 对内摩擦角的影响较小。

4.3 改良土微观结构演化特征

图 12 为物理改良土干湿循环 0, 5 次后砂岩岩屑部分的 SEM 图像。图 12 显示, 0.632 mm×0.443 mm 范围内包含多个长轴尺寸小于 0.2 mm 单粒, 说明岩屑部分为细砂单粒聚集体。干湿循环前砂粒呈紧密状排列, 颗粒表面有覆层, 颗粒间充填片状物。干湿循环后, 孔隙增多, 孔隙尺寸增大, 颗粒表面变光滑, 颗粒间片状物减少明显。

物理改良土在干湿循环作用下, 宏观表现为裂隙增多强度衰减, 微观上其中的砂岩单粒间及表面胶结物质流失。由此, 宏观表现和微观状态具有对应关系。

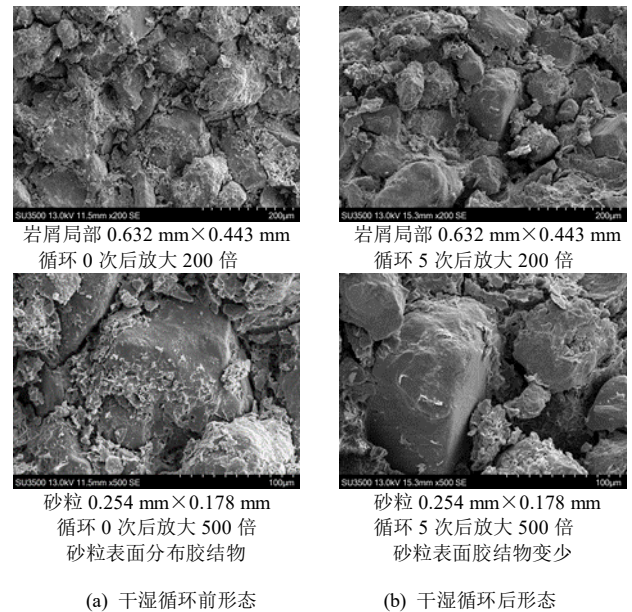


图 12 物理改良土干湿循环 0, 5 次砂岩岩屑部分 SEM 图像
Fig. 12 SEM images of disintegrated sandstone of physically improved soils after 0 and 5 times of wetting-drying cycles

图 13 为复合改良土干湿循环 0, 5 次后砂岩岩屑部分的 SEM 图像。图 13 (A) 显示, 砂岩单粒轮廓不明显, 颗粒呈聚集状排列, 未呈明显的充填关系。图 13 (B) 显示, 图像尺寸相当于一个细砂单粒 (0.25 mm), 无砂粒表面特征, 表面覆层包裹严实。干湿循环后, 砂岩单粒间几乎无充填物, 孔隙发育, 结构疏松, 颗粒表面光滑。

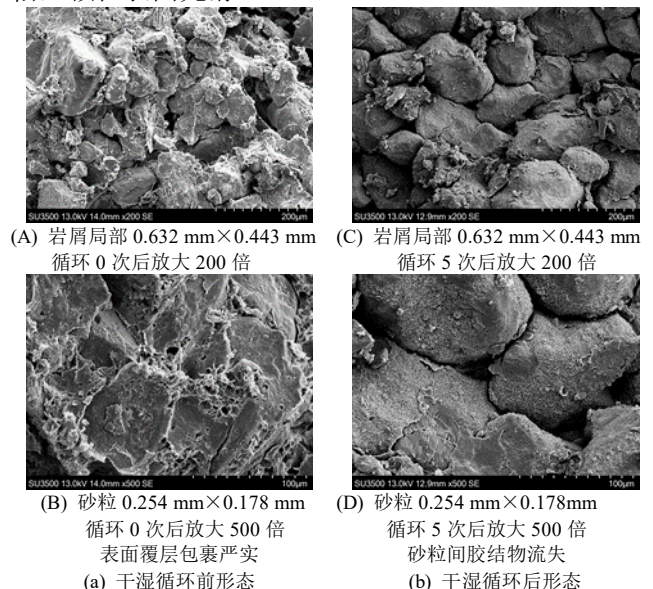


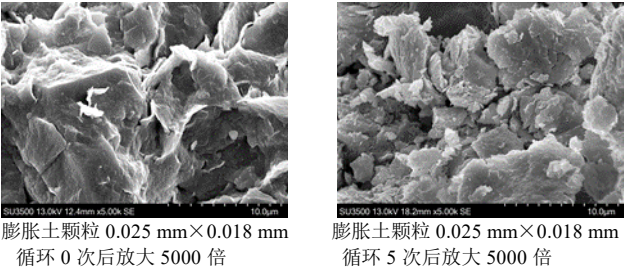
图 13 复合改良土干湿循环 0, 5 次砂岩岩屑部分 SEM 图像
Fig. 13 SEM images of disintegrated sandstone of compositely improved soils after 0 and 5 times of wetting-drying cycles

相对于物理改良土, 复合改良土干湿循环前的状

态差异，在于水泥水化物生成后改变了颗粒的排列状态和表面覆层物质的性质。经过干湿循环作用，水泥水化作用加剧，砂粒间的胶结物被进一步析出，砂粒表面覆层物质脱落，砂粒聚集体结构蜕化明显。

复合改良土在干湿循环作用下，宏观表现为凝聚力衰减率远大于物理改良土，微观上其中的砂粒聚集体结构蜕化程度比物理改良土更大。由此，干湿循环导致的宏观上的性状差异和微观上的结构蜕化情况具有对应关系。

图 14 为物理改良土干湿循环 0，5 次后膨胀土部分的 SEM 图像。图 14 显示，干湿循环作用后，膨胀土颗粒受到破坏，尺寸减小，部分剥落形成小颗粒，微孔隙数量增加。干湿循环过程中，在宏观上表现为土体凝聚力降低，裂隙率提高，和微观结构特征具有一致性。



(a) 干湿循环前形态 (b) 干湿循环后形态

图 14 物理改良土干湿循环 0，5 次膨胀土部分 SEM 图像

Fig. 14 SEM images of expansive soils of physically improved soils after 0 and 5 times of wetting-drying cycles

使用图像处理软件 Image Pro Plus6.0 可对图像进行处理分析，得到干湿循环前后改良土中岩屑的孔隙等效直径与微观孔隙率。等效直径是为描述孔隙形状的不规则性而引入的，是与孔隙面积相等的圆的直径。表 9 为干湿循环 0，5 次后改良土中砂岩岩屑微观孔隙特征。

表 9 数据显示，干湿循环 5 次后，物理改良土与复合改良土中岩屑孔隙率增量分别为 2.79%，5.29%，由此，复合改良土中的岩屑受干湿循环影响蜕化更严重。干湿循环 5 次后，物理改良土与复合改良土中岩屑内大于 40 μm 孔隙的占比分别由 0%变为 0.16%，0.11%，由此，经干湿循环作用后部分较小孔隙转变为大孔隙。干湿循环 5 次后，复合改良土中岩屑内 0~1，1~2 μm 孔隙占比共提升了 8.21%，由此，岩屑裂解蜕化生成了小孔隙，砂粒表面覆层物质剥落阻塞孔隙，使较大孔隙（2~5，5~10，10~40 μm）转化为小孔隙，导致小孔隙比例增加。

综上，崩解性砂岩作为膨胀土改良材料，微观上以细砂粒胶结体形式存在，在干湿循环过程中砂粒间的胶结状态受到削弱，溶蚀作用下胶结物中水云母等

黏土矿物发生了性质改变和状态变化^[15]，导致改良土试样中砂粒或胶结物部分流失，复合改良土中水泥的水化作用使得砂粒聚集体结构蜕化程度大于物理改良土。膨胀土的结构在干湿循环作用下发生裂解蜕化，整体性减弱。砂岩岩屑与膨胀土微观上的演化特征影响改良土宏观上的裂隙发育和强度衰减特征。

表 9 干湿循环 0，5 次改良土中砂岩岩屑微观孔隙特征

Table 9 Microscopic information of disintegrated sandstone of improved soils after 0 and 5 times of wetting-drying cycles

改良土类型 及干湿循环次数	孔隙 率/%	孔隙等效直径分布占比/%					
		0~1 μm	1~2 μm	2~5 μm	5~10 μm	10~40 μm	>40 μm
物理改良土	0 次	5.09	19.15	53.04	21.96	4.73	1.12
	5 次	7.88	19.04	55.25	19.88	4.06	1.61
复合改良土	0 次	5.37	22.16	52.85	19.10	3.72	2.16
	5 次	10.66	26.58	56.64	12.60	2.54	1.53

5 结 论

(1) 崩解性砂岩改善膨胀土的压实性。砂岩岩屑的掺入改善膨胀土的压实性，加入水泥后，复合改良土压实性得到进一步改善。物理改良土的最优含水率与岩屑粒径负相关。岩屑粒径小于 2 mm 时，压实性改善效果最好。

(2) 崩解性砂岩改善膨胀土的强度特征。物理改良土的直剪指标与岩屑粒径正相关。复合改良土的直剪指标主要受水泥的改良作用控制，与岩屑粒径无显著相关性。

(3) 崩解性砂岩对改良土干湿循环过程中的开裂具有抑制作用。物理改良土中岩屑粒径大于 10 mm 时其周围土中会出现裂隙集中现象。复合改良土的裂隙率明显小于纯水泥改良土，与岩屑尺寸无显著相关性。

(4) 崩解性砂岩改善膨胀土的强度性状稳定性。砂岩岩屑具有延缓改良土在干湿循环过程中凝聚力衰减的作用，延缓作用受岩屑尺寸影响，岩屑粒径在物理改良土中应不大于 10 mm，在复合改良土中应不大于 5 mm。改良土的强度损伤主要是凝聚力损伤，对内摩擦角的影响较小。

(5) 崩解性砂岩的组成和结构影响改良土的性状稳定性。砂岩岩屑微观上以细砂粒胶结体形式存在，溶蚀作用导致砂粒间的胶结状态受到削弱。复合改良土中水泥的水化作用使得砂粒聚集体结构蜕化程度大于物理改良土。砂岩岩屑微观上的演化特征影响改良土宏观上的裂隙发育和强度衰减程度。

参考文献：

[1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京：中国铁道出版社，

1984. (LIAO Shi-wen. Expansive Soil and Railway Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [2] 胡 斌, 王新刚, 连宝琴. 纤维类材料改善膨胀土工程性能的适用性探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 615 - 618. (HU Bin, WANG Xin-gang, LIAN Bao-qin. Applicability exploration of improving engineering properties of expansive soil with fiber materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 615 - 618. (in Chinese))
- [3] 庄心善, 王子翔, 杨文博. 粉煤灰-天然砂改良膨胀土强度特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(8): 86 - 89, 96. (ZHUANG Xin-shan, WANG Zi-xiang, YANG Wen-bo. Strength characteristics of modified expansive soil with fly ash and weathered sand[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(8): 86 - 89, 96. (in Chinese))
- [4] YONG R N, BOONSINSUK P, WONG G. Formulation of backfill material for a nuclear fuel waste disposal vault[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, **23**(2): 216 - 228.
- [5] 杨 俊, 黎新春, 张国栋, 等. 风化砂改良膨胀土膨胀特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, **30**(4): 67 - 72. (YANG Jun, LI Xin-chun, ZHANG Guo-dong, et al. Expansive properties of expansive soil improved by mixing weathered sand[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, **30**(4): 67 - 72. (in Chinese))
- [6] 杨 俊, 童 磊, 许 威, 等. 冻融循环影响风化砂改良膨胀土抗剪强度室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(1): 65 - 71. (YANG Jun, TONG Lei, XU Wei, et al. Laboratory research on effect of freeze-thaw cycles to shear strength of weathered sand improved with expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(1): 65 - 71. (in Chinese))
- [7] 杨 俊, 袁 凯, 张国栋, 等. 干湿循环对风化砂改良膨胀土回弹模量影响研究[J]. 长江科学院院报, 2015, **32**(11): 40 - 44, 51. (YANG Jun, YUAN Kai, ZHANG Guo-dong, et al. Effect of wetting-drying cycle on resilient modulus of expansive soil improved by weathered sand[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, **32**(11): 40 - 44, 51. (in Chinese))
- [8] YAMAGUCHI H, YOSHIDA K, KUROSHIMA I, et al. Slaking and shear properties of mudstone[J]. Rock Mechanics and Power Plants, 1988, **24**(3): 133 - 144.
- [9] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 4173 - 4179. (WU Dao-xiang, LIU Hong-jie, WANG Guo-qiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 4173 - 4179. (in Chinese))
- [10] 张 磊, 刘 镇, 周翠英. 红层软岩浸水裂纹扩展试验与破裂机制分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, **51**(6): 35 - 40. (ZHANG Lei, LIU Zhen, ZHOU Cui-ying. Experiment of crack propagation of red-bed soft rock in water and micromechanical mechanism of crack propagation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012, **51**(6): 35 - 40. (in Chinese))
- [11] 赵明华, 刘晓明, 苏永华. 含崩解软岩红层材料路用工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(6): 667 - 671. (ZHAO Ming-hua, LIU Xiao-ming, SU Yong-hua. Experimental studies on engineering properties of red bed material containing slaking rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(6): 667 - 671. (in Chinese))
- [12] 李国维, 巩齐齐, 李 涛, 等. 崩解性砂岩改良弱膨胀土性状实验研究[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(1): 34 - 43. (LI Guo-wei, GONG Qi-qi, LI Tao, et al. Experimental study on properties of weak expansive soil improved by disintegrated sandstone[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **29**(1): 34 - 43. (in Chinese))
- [13] 土工试验规程: SL 237—1999[S]. 1999. (Specification of Soil Test: SL 237—1999[S]. 1999. (in Chinese))
- [14] 杨 俊, 黎新春, 张国栋, 等. 不同粒径风化砂改良膨胀土的特性试验[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, **42**(1): 26 - 33. (YANG Jun, LI Xin-chun, ZHANG Guo-dong, et al. Experimental study on characteristics of improved expansive soil by mixing different sizes of weathered sands[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, **42**(1): 26 - 33. (in Chinese))
- [15] 谢小帅, 陈华松, 肖欣宏, 等. 水岩耦合下的红层软岩微观结构特征与软化机制研究[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(5): 966 - 972. (XIE Xiao-shuai, CHEN Hua-song, XIAO Xin-hong, et al. Micro-structural characteristics and softening mechanism of red-bed soft rock under water-rock interaction condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(5): 966 - 972. (in Chinese))