加筋废弃钢渣混合土循环剪切性能

李丽华，张永帅，叶治*，康浩然，白玉霞

湖北工业大学土木建筑与环境学院河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室，武汉 430068

第一作者，E-mail：researchmailbox@163.com

* 通信作者，E-mail：yezhi@hbut.edu.cn

2024-06-19 收稿；2024-08-16 修回；2024-08-26 接受

基金项目：湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队项目(T2023006)；国家自然科学基金项目(52278347；52508375)；湖北省基金创新群体项目(2024AFA009)

中图分类号：TU43　　文章编号：2096-8523(2026)01-0002-13　　doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240341

摘　要：为改善黏土工程特性和增加废弃钢渣(SS)利用率，铺设土工格栅加筋，然后对钢渣−黏土混合土、砂−黏土混合土及黏土分别进行了直剪试验、循环剪切试验和循环后直剪试验，研究了不同钢渣掺量、竖向应力、含水率、剪切幅值条件下，混合土筋−土界面强度特征、阻尼比、剪切刚度变化和混合土体位移情况。结果表明：钢渣可以显著提高黏土筋−土界面剪切应力，且改良效果优于常规材料砂改良黏土；钢渣−黏土混合土具有较大阻尼比和剪切刚度，说明其具有较好的减震耗能性。其中，40% 钢渣掺量下的钢渣−黏土混合土剪切应力、阻尼比和剪切刚度较优；相较于循环前直剪，经过循环荷载作用后钢渣−黏土混合土剪切应力有所提升。此外，与竖向应力和剪切幅值相比，含水率对钢渣−黏土混合土的剪切应力、剪切刚度和阻尼比有较大影响。钢渣−黏土混合土在循环剪切荷载作用下，可以呈现更好的减震耗能性，研究成果可为钢渣代替砂改良黏土提供理论依据。

关键词：钢渣−黏土混合土；直接剪切；循环剪切；剪切刚度；阻尼比

自 20 世纪 50 年代末复合材料用于加固土壤结构以来，经过几十年发展，加筋结构已广泛应用于路基、挡墙以及各种工程地质灾害防治中。研究表明，地震等横向作用力对边坡、挡墙等结构稳定性影响显著，动剪模量和阻尼比是确定土体动态响应的重要参数[1]，其中，动剪模量反映土体的承载力，阻尼比反映土体中动荷载的振幅衰减[2]。工程加筋填料通常采用砂石，每年的消耗量超过 500 亿 t，开采砂石资源会对自然环境造成一定影响，如破坏地表植被、引发水土流失等。我国作为钢铁生产大国，钢渣年排放量达到 90 Mt 以上，但利用率仅为 22%，钢渣的堆放不仅占用土地，而且严重污染环境。李丽华等[3-4]对建筑垃圾、轮胎碎片颗粒作为回填材料的可行性进行了研究。废弃钢渣是炼钢副产物，通常具有高硬度、良好耐水性、耐久性，因此废弃钢渣是一种有应用前景的回填材料。

关于废弃钢渣应用于实际工程方面，目前已有学者对其力学性能进行了研究。LI 等[2]研究了钢渣−砂混合料的动剪模量和阻尼比，并与相同条件下水泥−砂混合料进行了对比，试验发现：用 40% 钢渣代替 15% 或更少的水泥掺砂作为地基处理材料是可行的。马鸿发等[5]研究发现提高掺砂率和干密度可以减小膨润土的收缩性。WANG 等[6]将钢渣掺入海相粉土中，利用钢渣质地坚硬、吸水能力强的特点，降低了土体含水率，提高了地基承载力，通过三轴试验仪测得了改性土的剪切应力，并与传统土的剪切应力指标进行了比较，验证了其在工程建设中应用的可行性。MAGHOOL 等[7]对电弧炉炉渣(EAF)和钢包炉炉渣(LFS)2 种炼钢主要副产物进行了加州承载比试验(CBR)、无侧限抗压强度试验(UCS)、直

著录信息：李丽华，张永帅，叶治，等. 加筋废弃钢渣混合土循环剪切性能[J]. 地质科技通报，2026，45(1)：2-14.
LI Lihua，ZHANG Yongshuai，YE Zhi，et al. Cyclic shear performance of reinforced waste steel slag mixed soil[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2026，45(1)：2-14.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

剪试验(DST)、固结排水三轴试验(CD)和重复荷载三轴试验(RLT)，试验结果表明 LFS 和 LFS50%+EAF50% 混合物有较高的剪切应力和刚度，可用作土工材料，且级配良好，CBR 值较高，可应用于道路工程。WANG 等[8] 对细、粗、砾钢渣进行了纯钢渣的恒水头渗透试验和不同钢渣掺量的改性粉土的变水头渗透试验，发现钢渣能明显改善粉土的渗透性，有助于钢渣应用于软土地基处理工程。LIU 等[9] 用钢渣制备了一种新型的夯土材料，对其力学性能、耐久性和热性能进行了研究，发现钢渣的引入大大提高了土工材料的抗压强度和耐久性。WANG 等[10] 通过单向固结压缩试验和直剪试验对比了砂与钢渣的力学性能，分析了不同含水率下钢渣密度、压缩模量、黏聚力和内摩擦角的变化规律，发现钢渣的剪切应力与中砂相似；压缩模量较大，达到中砂水平；随着含水率增加，黏聚力增加，内摩擦角减小。陈爽等[11] 研究了错缝堆叠土工袋在循环剪切次数、竖向应力、剪切幅值等条件下层间剪切应力的变化。刘飞禹等[12] 研究了砾石−格栅界面在循环剪切过程中强度特性、体积变化、剪切刚度和阻尼比等变化。李丽华等[13] 研究了生活垃圾焚烧底渣−黏土−聚丙烯纤维混合土在不同竖向应力、剪切幅值、压实度条件下循环剪切过程中剪切应力的变化。刘飞禹等[14] 研究了不同剪切频率和不同竖向压力下粗粒土−土工格栅界面的循环剪切特性。高海军等[15] 研究了循环荷载作用下加筋土路基的动力响应机制。宋飞等[16] 通过三轴固结排水剪切试验研究了格室和填土的力学性质参数对加筋土应力应变响应的影响。

目前，针对钢渣−黏土混合土在静力条件下剪切特性的研究相对较多。在动剪方面，对钢渣−黏土混合土研究较少。为了分析钢渣−黏土混合土筋−土界面剪切动力学特性，通过一系列大型直剪和循环直剪试验，探究在不同竖向应力、含水率、剪切幅值条件下不同钢渣掺入量对混合土黏聚力、内摩擦角、竖向位移的影响规律。同时通过对比循环前、后混合土直剪试验结果，研究循环荷载对混合土剪切应力参数的影响，分析钢渣改良土工格栅加筋土回填料的优势与可行性。

1　试验方案

1.1　试验设备与试验材料

试验所用仪器为大型循环剪切试验机，如图 1 所示，仪器最大水平推力 200 kN，最大水平行程 40 mm，其主要功能及指标详见文献 [12]。试验土样为黏土，取自武汉市江夏某地区，将取回的土样剔除杂质、风干、碾碎并过 2 mm 筛，依据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)[17] 测试土样基本物理性质，结果如表 1 所示。所用废弃钢渣粒径<5 mm，钢渣、粗砂物理指标见表 1。对选用的钢渣进行 X 射线衍射(XRF)成分分析试验，分析结果见表 2。试验中采用双向土工格栅，参数如表 3，钢渣、砂、黏土的颗粒级配曲线如图 2。

1.2　试样制备与试验方法

剪切盒内径长 300 mm、宽 300 mm、高 300 mm，试样尺寸与之相同，根据击实试验结果，按 95% 压实度计算出不同比例混合填料的质量。按计算值配料并铺上密封布闷 12 h 使水分分布均匀，将配制的混合填料分 6 层(每层厚 50 mm)填入剪切盒中，并按要求控制压实度。在第 3 层填料装填后(150 mm 高度)水平铺置土工格栅，剪切界面位于该高度。

采用小粒径(<5 mm)的废弃钢渣代替传统砂石

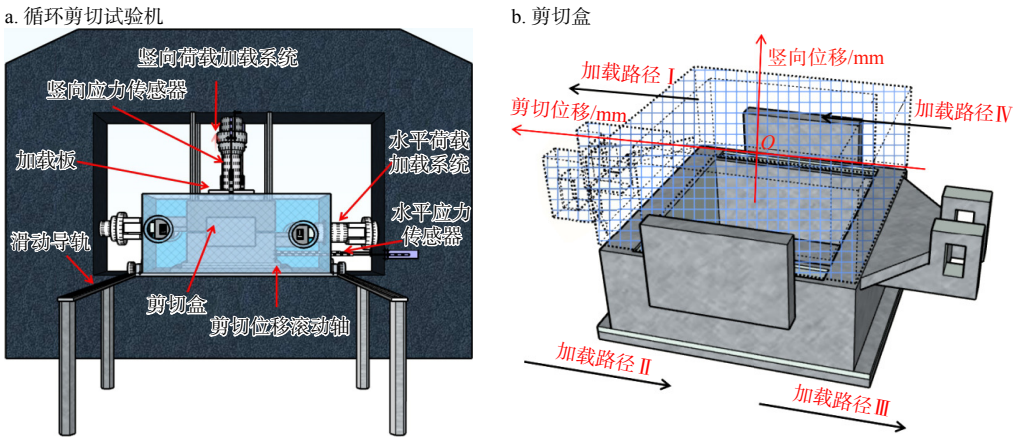


图 1　大型循环剪切试验机

Fig. 1　Large-scale cyclic shear tester

表 1　试验材料基本物理指标

Table 1　Basic physical property index of materials in tests

类型	最大干密度/(g·cm^{-3})	天然含水率/%	曲率系数	不均匀系数	塑限/%	液限/%	塑性指数
黏土	1.79	6.3	2.81	7.59	24.9	50.9	26
砂	1.83	6.5	0.50	2.20	–	–	–
钢渣	2.40	8.1	2.30	11.30	–	–	–

表 2　钢渣化学成分组成

Table 2　Chemical composition of steel slag　w_B/%

成分	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	其他
钢渣(SS)	12.9	8.7	26.5	34.0	12.9	0.6	1.2	3.2

表 3　土工格栅技术指标

Table 3　Technical index of geogrid

材料	厚度/mm	单位面积质量/(g·m^{-2})	网孔尺寸长×宽/(mm×mm)	极限延伸率/%		极限抗拉强度/(kN·m^{-1})	
				横向	纵向	横向	纵向
聚丙烯	2	250	35×25	13.2	15.6	20	20

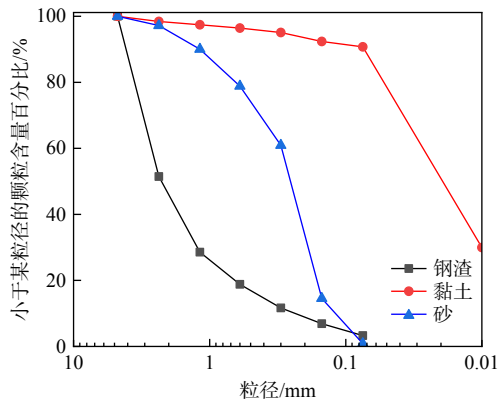


图 2　颗粒级配曲线

Fig. 2　Particle grading curve

料与黏土混合为新回填材料。由于钢渣自重较大，掺入量过高会导致结构产生较大的自重应力[6-7]。因此控制废弃钢渣掺入量小于等于 50%。设置钢渣掺入量分别为 30%, 40% 和 50%, 对不同钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土进行击实试验，结果见图 3, 由 WANG 等[6, 10] 研究表明，不同钢渣含量的试样其干密度变化曲线不同，由击实曲线可知，试样在含水率为 15% 时，干密度最大，在后续的对钢渣−黏土混合土剪切试验强度特性研究中，将最高含水率设定为 15%。如图 4b 所示，钢渣掺入量为 40% 时，在 18% 含水率条件下峰值剪切应力与 12% 含水率条件下对比下降了 67.6%，说明含水率较高的试样塑性较高，因此在后续试验中只考虑 9%, 12% 和 15% 3 个

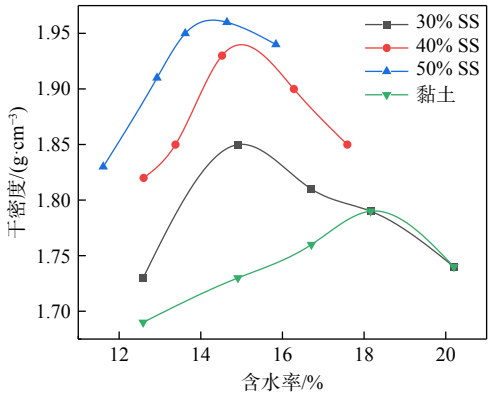


图 3　不同钢渣含量混合土击实曲线（30%SS 代表钢渣质量分数为 30%；下同）

Fig. 3　Compaction curves of mixed soils with different steel slag contents

含水率。基于 HOLTZ 等[18] 的研究，掺入 60% 砂改良黏土后，混合土具有良好的剪切特性。故将黏土和砂按 4∶6 干重混合得到砂−黏土混合土，与钢渣−黏土混合土进行对比分析，探讨 2 种混合土作为土工格栅加筋土回填料的效果。具体试验方案见表 4。

1.3　剪切刚度与阻尼比

土体结构动力设计中需要考虑土体的剪切刚度与阻尼比 2 个重要参数。众多学者[19-22] 对刚度、阻尼比的方法进行了修正并将其用于描述砂土−混凝土界面的动力响应分析中，示意图如图 5 所示。根据滞回圈模型顶点的剪切应力和剪切应变，考虑滞回圈在 2 个剪切方向上的非对称性，剪切刚度(K)按式(1)确定，阻尼比(D)按式(2)确定。

$$K=\frac{K_1+K_2}{2}=\frac{\tau_1+\tau_2}{2A}, \tag{1}$$

$$D=\frac{D_1+D_2}{2}=\frac{1}{2}\left(\frac{S}{4\pi S_1}+\frac{S}{4\pi S_2}\right)=\frac{S}{4\pi A}\left(\frac{1}{\tau_1}+\frac{1}{\tau_2}\right), \tag{2}$$

式中：K_1, K_2, τ_1, τ_2 分别为剪切刚度和剪切应力峰值；A 为剪切位移幅值；D_1, D_2 分别为 2 个剪切方向上的阻尼比；S_1, S_2 分别为图 5 中 2 个阴影部分面积；S 为整个滞回圈面积。

2　试验结果分析

2.1　直剪试验

图 6a 为在 400 kPa 竖向应力条件下，不同钢渣掺入量对混合土剪切应力的影响规律，可知：不同材料混合土筋−土均呈现出剪切应力随剪切位移增大而增大，且在一定值后趋于平缓。与黏土相比，钢渣的掺入可以有效提高土体剪切应力，其中 40% 的钢渣掺入量提高土体剪切应力最显著，约为 143.9 kPa。

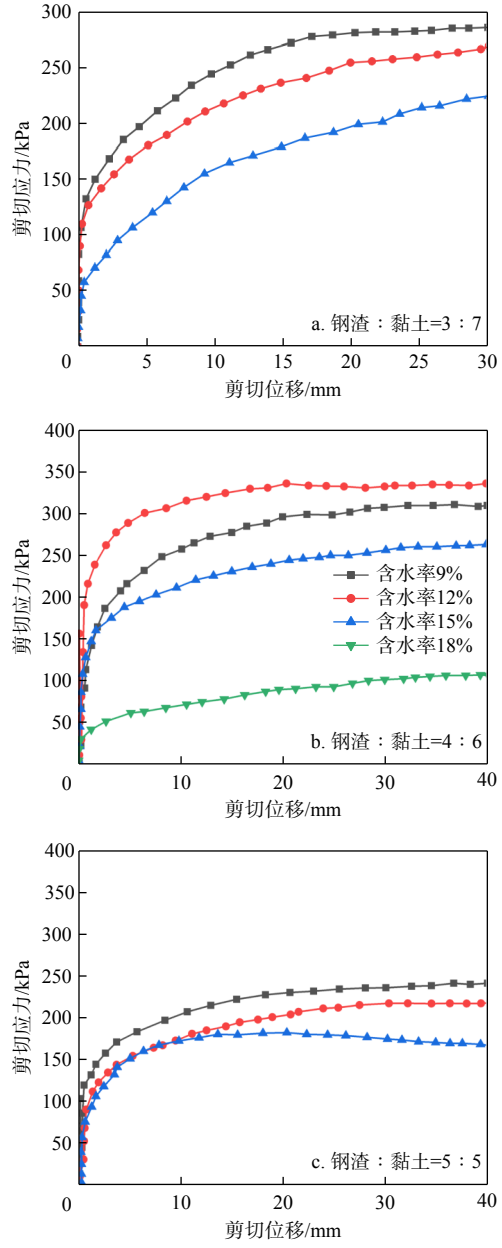


图 4　不同含水率条件下剪切应力–剪切位移关系曲线

Fig. 4　Shear stress-shear displacement relationship curves for different moisture content conditions

当不同材料混合土的界面在剪切位移为 5 ~ 10 mm 时，开始趋向最大剪切应力；为防止试验过程中混合土达到屈服状态，在循环剪切试验中，设置最大剪切幅值为 5 mm。图 6b 为不同竖向应力作用下，不同材料混合土的界面剪切应力–竖向应力关系曲线，可知：在不同竖向应力作用下，不同材料混合土界面的峰值剪切应力与竖向应力呈正相关趋势。

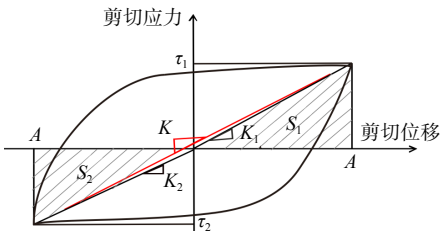
试验规定土样体变以压缩为正，膨胀为负。图 7 为 400 kPa 竖向应力下不同材料掺入下混合土剪切位移–竖向位移关系曲线，可知：随着剪切位移的增加，竖向位移也随之增加；不同材料混合土的体变发

表 4　试验方案

Table 4　Experiment scheme

试验类型	试验编号	试样	竖向应力/kPa	剪切幅值/mm	含水率/%	压实度/%
直剪试验	T-1	30%SS+70%C	20，30，400	-	9，12，15	95
	T-2	40%SS+60%C	20，30，400	-	9，12，15	95
	T-3	50%SS+50%C	20，30，400	-	9，12，15	95
	T-4	60%S+40%C	20，30，400	-	16.5	95
	T-5	C	20，30，400	-	18	95
循环剪切试验	T-6	30%SS+70%C	400	5	9，12，15	95
	T-7	50%SS+50%C	400	5	9，12，15	95
	T-8	40%SS+60%C	20，30，400	3，4，5	9，12，15	95
	T-9	60%S+40%C	400	5	16.5	95
	T-10	C	400	5	18	95
循环后直剪试验	T-11	40%SS+60%C	20，30，400	-	12	95

注：SS. 钢渣；C. 黏土；S. 砂；循环次数均为10次；剪切速率为 1 mm/min



K_1, K_2, τ_1, τ_2 分别为剪切刚度和剪切应力峰值；K 为剪切刚度；A 为剪切位移幅值；S_1, S_2 分别为 2 个阴影部分面积

图 5　剪切刚度和阻尼比计算示意图

Fig. 5　Schematic diagram of shear stiffness and damping ratio calculation

展始终呈现剪缩特性；对比发现 30% 与 50% 钢渣掺入量的土体体变较大，而钢渣掺入量为 40% 时土体体变最小，并在剪切位移 5 mm 时逐步进入平稳阶段，与 60% 砂掺入量时土体体变趋势相似。这是由于钢渣与砂颗粒主要起骨架作用，在剪切过程中，剪切面附近的黏土作为细颗粒不断与钢渣颗粒相互填充，导致土样体积变小，出现明显的剪缩现象。

图 4 为不同含水率下试样剪切应力–剪切位移关系曲线。由图 4a 可知：钢渣掺入量为 30% 时，含水率 9% 下试样抗剪性能最优。由图 4b 可知：钢渣掺入量为 40% 时，含水率 12% 试样下抗剪性能最优。由图 4c 可知：钢渣掺入量为 50% 时，含水率 9% 下试样抗剪性能最优，含水率 15% 下剪切应力随剪切位移先增加后减少，呈现明显的应变软化现象。随着钢渣掺量的增加，钢渣–黏土混合土的密度和颗粒级配会发生变化，混合土的孔隙率可能会增加、吸水

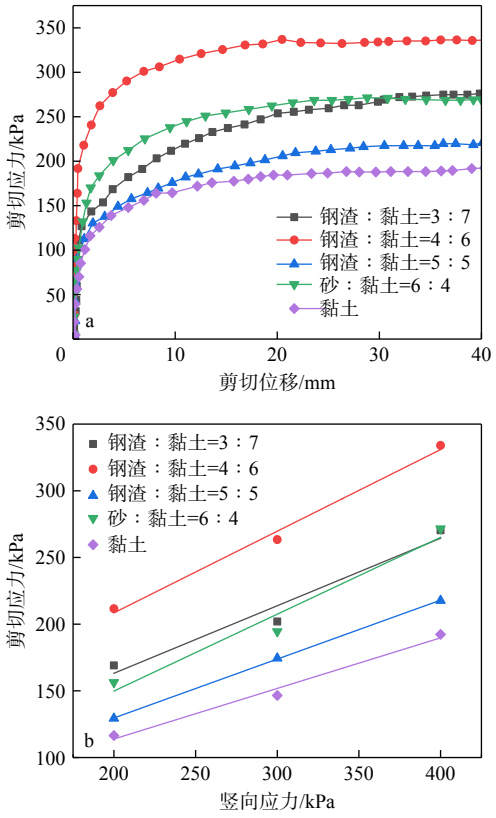


图 6　不同材料掺入下混合土剪切应力变化规律

Fig. 6　Variation of shear stress for mixed soils with different materials incorporation

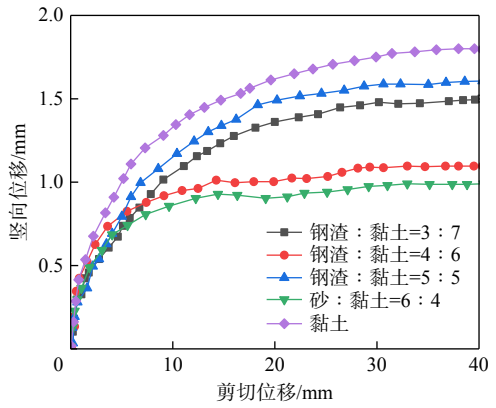


图 7　不同材料掺入下混合土竖向位移–剪切位移关系曲线

Fig. 7　Vertical displacement-shear displacement relationship curves for mixed soils with different material incorporation

性和保水性也会发生变化，在相同的压实条件下，钢渣–黏土混合土的孔隙率减小，密实度提高。同时，钢渣与黏土颗粒之间存在吸附、离子交换界面作用，进而影响最优含水率变化。

由图 8 可知：与黏土相比，钢渣–黏土混合土的黏聚力和内摩擦角均有明显提高。这一现象是由于钢渣的掺入占用了黏土颗粒的黏结空间，进而降低

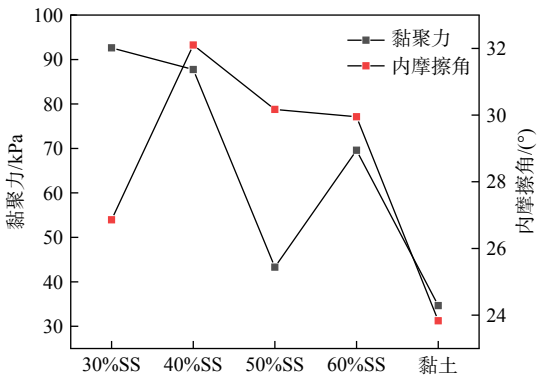


图 8　不同材料掺入下混合土黏聚力与内摩擦角对比

Fig. 8　Comparison of cohesion and internal friction angle for mixed soils with different materials incorporation

了土体的黏结程度和黏聚力。由 MAGHOOL 等[7]的研究可知钢渣颗粒本身具有较高的内摩擦角，所以钢渣的掺入可以有效提高土体内摩擦角。

由表 5 可知：土体黏聚力和内摩擦角随着含水率的升高而下降。当含水率升高 6% 时，钢渣掺入量为 30% 条件下，黏聚力降低 56%；钢渣掺入量为 40% 条件下，黏聚力降低 22%；钢渣掺入量为 50% 条件下，黏聚力降低 41%。导致黏聚力与内摩擦角下降的原因，可能是当含水率较高时，土体中的水主要起润滑作用，由于水膜的作用，颗粒之间会形成大团聚体，导致土颗粒之间的相关性。

表 5　不同条件下土体黏聚力与内摩擦角对比

Table 5　Comparison of cohesion and internal friction angle for soil under different conditions

试样	含水率/%	黏聚力c/kPa	内摩擦角φ/（°）
30%SS+70%C	9	117.8	27.9
	12	92.6	26.9
	15	51.3	24.9
40%SS+60%C	9	108.7	32.1
	12	87.7	27.3
	15	85.2	25.7
50%SS+50%C	9	67.1	30.2
	12	43.3	24.1
	15	39.5	19.6

上述对比分析发现：钢渣掺入可以有效提高黏土的黏聚力与内摩擦角；40% 钢渣掺入量的钢渣–黏土混合土，对比 WANG 等[10]研究得出的优良回填土（砂–黏土混合土），有更大的黏聚力与内摩擦角，说明钢渣可以作为改良材料代替砂。因此，后续循环荷载试验选 40% 钢渣掺入量混合土作为主要研究对象。

2.2 循环剪切试验

为了研究钢渣−黏土混合土在循环剪切作用下筋土界面特性，包括竖向应力、循环次数和剪切幅值对筋土界面剪切刚度和阻尼比的影响，以及对试样剪胀剪缩特性的影响。对钢渣−黏土混合土进行循环剪切试验的条件参数主要包括剪切速率、竖向应力、剪切幅值、循环次数等；长期累积效应和动态特性的公路荷载决定循环剪切试验剪切速率、剪切幅值和循环次数。基于具体的工程背景和试验目的，参照《公路工程土工合成材料试验规程》(JTGE50−2006)[23]，将剪切速率定为 1 mm/min，循环 10 次，不同竖向应力选择 200，300，400 kPa，剪切幅值分别为 3，4，5 mm(不同材料混合土的界面在剪切位移为 5 ~ 10 mm 时，开始趋向最大剪切应力；为防止试验过程中混合土达到屈服状态，在循环剪切试验中，设置最大剪切幅值为 5 mm)。

2.2.1 剪切应力的变化

由于不同材料混合土，在不同竖向应力下滞回圈趋势相似，限于篇幅，仅给出 40% 钢渣−黏土混合土不同竖向应力下滞回曲线。图 9 为不同竖向应力条件下，剪切位移为 5 mm、循环剪切 10 次时，剪切应力−水平位移关系图，可知：在循环剪切荷载作用、不同竖向应力下滞回圈均由内向外扩张，且竖向应力越大应力扩张越明显，由摩尔−库仑强度准则可知，竖向应力越大，材料的剪切应力越大。随着循环次数的增加剪切应力逐渐增大，但增速减小，钢渣−黏土混合土呈明显的应变−硬化现象，这是由于土颗粒在循环过程中重新排列逐渐密实化，竖向应力越高密实化效果越好，所以材料呈现更大的剪切应力。

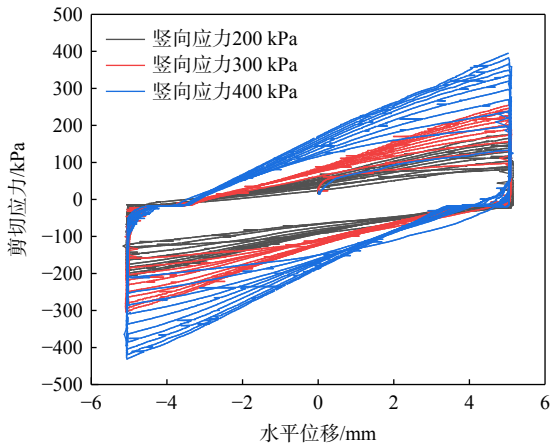


图 9 40% 钢渣−黏土混合土滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curve for 40% steel slag-clay mixed soil

图 10a 为不同含水率下，40% 钢渣掺入量混合土剪切应力峰值随循环次数变化曲线，图 10b 为不同含水率下，硬化系数(见式(3))随循环次数变化曲线。由图 10a 可知：钢渣−黏土混合土的剪切应力峰值随含水率的增加而降低。在同一循环次数下，高含水率与低含水率相比剪切应力峰值有明显下降。含水率由 9% 提高至 12%，钢渣−黏土混合土剪切应力下降 1.4%~8.5%，含水率由 12% 提高至 15%，钢渣−黏土混合土剪切应力下降 47.6%~58.6%。由图 10b 知：在含水率分别为 9%，12% 时，硬化系数随循环次数的增加而增大，且试样呈现应变硬化现象，在含水率为 15% 时，硬化系数随循环次数的增加而减小，试样呈现应变软化现象，这可能是由于在高含水率条件下，一部分水以自由水的形式存在于土体中起到了润滑作用，使土颗粒间的摩擦力减弱。循环剪切试验表现的结果与前文直剪试验结果一致，高含水率条件下，混合土强度偏弱。

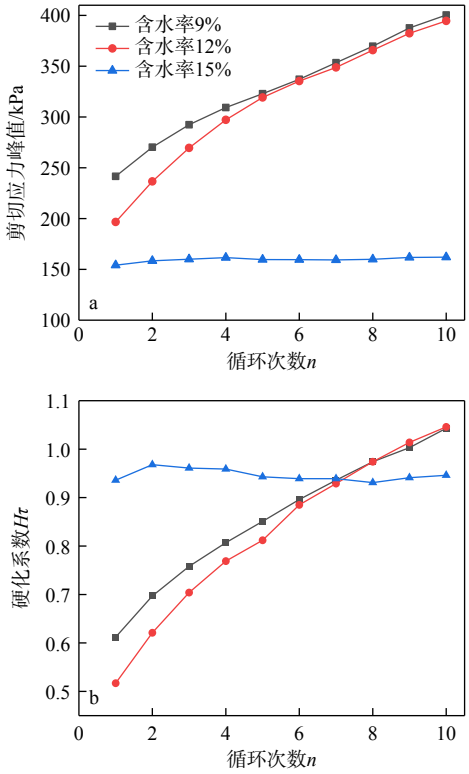


图 10 含水率对剪切应力峰值 (a) 和硬化系数 (b) 影响曲线

Fig. 10 Curves of the effect of moisture content on peak shear stress (a) and hardening factor (b)

$$H_\tau = \frac{\tau_n}{\tau_p}, \tag{3}$$

式中：H_τ 为硬化系数；τ_n 为第 n 个滞回圈中的平均峰值剪应力；τ_p 为界面峰值剪应力。

图 11 为不同材料混合土剪切应力峰值随循环次数变化曲线，可知：钢渣和砂分别掺入黏土后，钢渣−黏土混合土和砂−黏土混合土随着循环次数的增

加剪切应力峰值均有明显提升。与混合土相比，纯黏土的剪切应力峰值较低，且增长速率有明显下降。30%，40%，50% 钢渣−黏土混合土对比黏土，剪切应力分别提高了 8.7%，16%，13.1%，60% 砂−黏土混合土对比黏土剪切应力提高了 7.6%，说明钢渣对黏土剪切应力的提升效果优于砂。

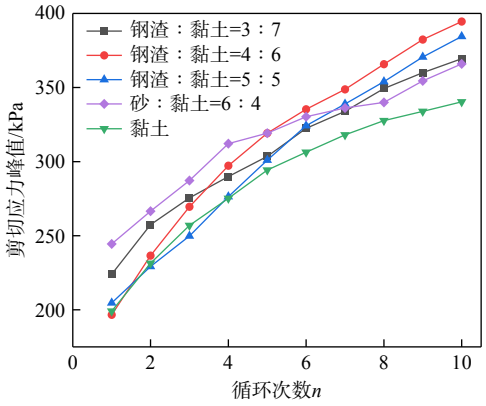


图 11　不同材料掺入下混合土筋−土界面剪切应力峰值与循环次数关系曲线

Fig. 11　Peak shear stress-number of cycles relationship curve for the mixed soil reinforcement-soil interface with different materials incorporation

图 12 为不同剪切幅值(A)条件下，钢渣−黏土混合土剪切应力峰值随循环次数变化曲线，可知随着剪切幅值增大，剪切应力峰值增大，与第 1 次循环相比，循环 10 次后，A=3 mm 时，剪切应力峰值增量为 81.7%；A=4 mm 时，剪切应力峰值增量为 84.9%；A=5 mm 时，剪切应力峰值增量为 100.6%。这是因为剪切幅值越大致使筋土界面土颗粒排列越紧密，从而剪切应力越高。

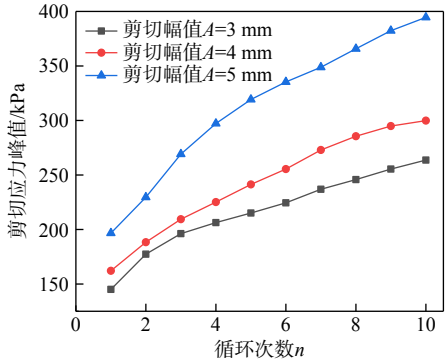


图 12　不同剪切幅值下钢渣−黏土混合土筋−土界面剪切应力峰值与循环次数关系曲线

Fig. 12　Peak shear stress-number of cycles relationship curve for the steel slag-clay mixed soil reinforcement-soil interface with different shear amplitudes

2.2.2　竖向位移的变化

由于剪切过程中剪切面面积保持不变，体积变化可以通过竖向位移表示。图 13 为在 400 kPa 竖向应力作用下，不同材料混合土竖向位移与水平位移变化曲线，其中竖向位移的正值表示体积收缩[24]。图 13 中的体积收缩现象主要归因于颗粒间孔隙的压实。对于不同材料混合土均呈现出竖向位移在第 1 个周期内增幅更显著，并且竖向位移增幅随循环次数的增加呈递减趋势。钢渣掺入量分别为 30%，

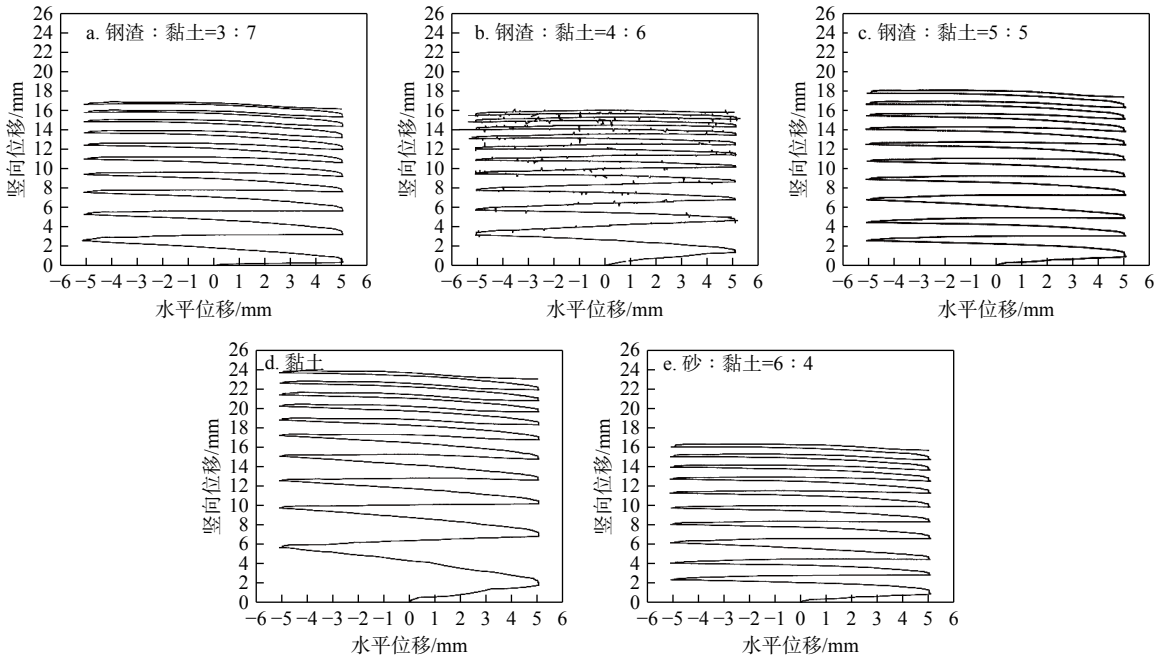


图 13　不同材料掺入下混合土竖向位移−水平位移变化曲线

Fig. 13　Vertical displacement-horizontal displacement variation curves for mixed soils with different materials incorporation

40%, 50% 时, 对应的最终竖向位移分别为 16.1, 15.8, 17.4 mm, 60% 砂掺入对应的最终竖向位移为 15.7 mm, 黏土对应的最终竖向位移为 23.0 mm, 说明在相同的剪切面积下, 钢渣和砂的掺入可以有效减少黏土的体变。

图 14 为钢渣掺入量为 40% 时, 不同含水率的钢渣−黏土混合土竖向位移与水平位移变化曲线, 可知: 随含水率增高, 竖向位移不断增大, 且第 1 个周期的竖向位移变化更显著。含水率 9%, 12%, 15% 对应的最终竖向位移分别为 12.8, 15.8, 18.2 mm, 对应的第 1 个周期的竖向位移增量分别为 3.1, 4.6, 7.6 mm。这是由于含水率较高的土体, 土粒表面的结合水膜增厚, 水的黏滞性减弱, 土中胶结物质被溶解, 黏聚力降低, 导致颗粒间的相互作用减弱[25]。

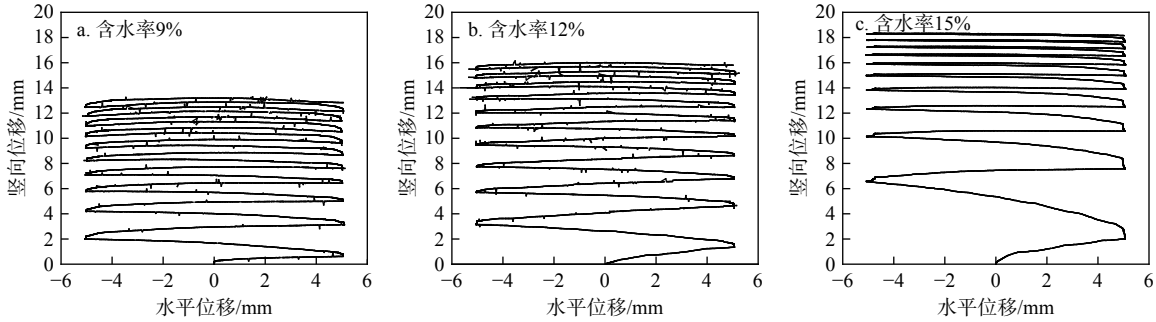


图 14　40% 钢渣−黏土混合土不同含水率下竖向位移−水平位移变化曲线

Fig. 14　Vertical displacement-horizontal displacement variation curves for 40% steel slag-clay mixed soil with different moisture contents

2.2.3　剪切刚度、阻尼比的变化

图 15a 为 400 kPa 竖向应力作用下, 不同材料混合土的剪切刚度随循环次数的变化曲线, 可知: 混合土的剪切刚度均随循环次数的增加而增大, 这是由于初始阶段颗粒与剪切界面接触较少[12], 随循环次数的增加, 处于界面处的颗粒重新排列使接触变大, 导致界面刚度增大。第 1 次循环时, 30%, 40%, 50% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土对应的剪切刚度分别为 46.4, 40.8, 37.7 MPa/m; 60% 砂掺入量的砂−黏土混合土对应的剪切刚度为 43.5 MPa/m; 黏土对应的剪切刚度为 41.4 MPa/m。钢渣的掺入量越多初始阶段剪切刚度越小, 这是由于钢渣颗粒较大, 掺入量增多导致颗粒与界面的接触减少, 所以初始阶段剪切刚度较小。相较于各掺入量初始阶段的剪切刚度, 循环 10 次后, 30%, 40%, 50% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土对应的剪切刚度增幅分别为 62.3%, 102.3%, 111.5%; 60% 砂掺入量的砂−黏土混合土对应的剪切刚度增幅为 75.3%; 黏土对应的剪切刚度增幅为 70.5%。综上, 钢渣的掺入可以有效提高黏土的剪切刚度, 其中 40% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土剪切刚度最大。图 15b 为 400 kPa 竖向应力作用下, 不同材料混合土的阻尼比随循环次数变化曲线, 可知: 阻尼比随钢渣的掺入量增加而增大, 且均随循环次数的增加而减弱后趋于稳定。其中砂−黏土混合土的阻尼比在第 1 次循环后下降明显, 这是因为初始状态下颗粒之间孔隙较多, 但在剪切过程中由于颗粒强度低, 导致其破碎, 所以孔隙减少, 传力路径增多导致阻尼比下降明显[25-26]。

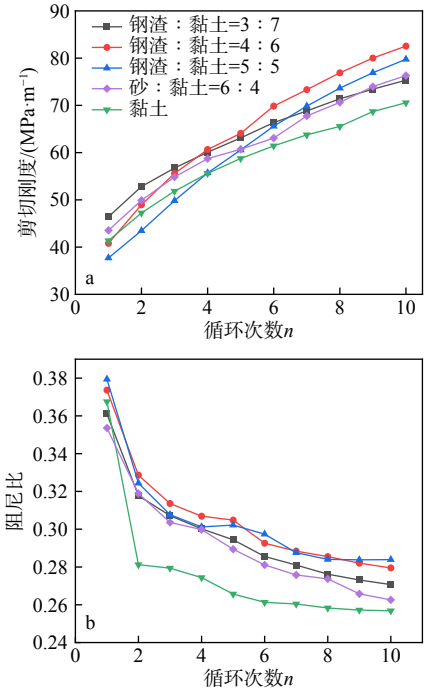


图 15　不同材料掺入下混合土的剪切刚度和阻尼比随循环次数的变化曲线

Fig. 15　Curves of shear stiffness and damping ratio varying with number of cycles for mixed soils with different materials incorporation

图 16a 为 400 kPa 竖向应力作用下时，不同含水率下 40% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土剪切刚度随循环次数变化曲线，可知：钢渣−黏土混合土剪切刚度随含水率的升高而降低，在含水率 9%，12% 下，剪切刚度随循环次数的增加而增大，而在含水率 15% 下，剪切刚度随循环次数的增加基本保持不变。这可能是土体孔隙内存在一些自由水，在循环剪切过程中多余的水分不能及时排出，形成动孔隙水压力，使土体抵抗变形能力减小，所以剪切刚度较小[22]。图 16b 为 400 kPa 竖向应力作用下，不同含水率下 40% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土阻尼比随循环次数变化曲线，可知：混合土阻尼比随含水率升高而增加，且随循环次数的增加而减弱后趋于稳定。这是由于随含水率增大，颗粒间自由孔隙水增多，这些孔隙水在循环剪切过程中随孔隙水压力变化运动而耗散能量。随循环次数的增加，颗粒间接触更紧密，传力途径增加，振动中能量消耗减少，所以阻尼比随循环次数的增加而减小[26]。

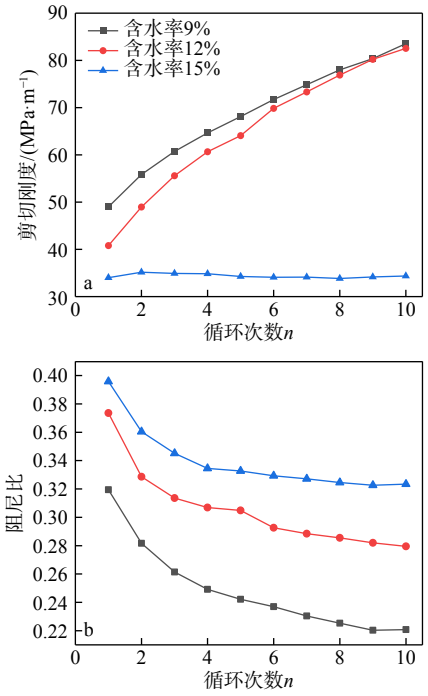


图 16　40% 钢渣−黏土混合土不同含水率下剪切刚度和阻尼比随循环次数的变化曲线

Fig. 16　Curves of shear stiffness and damping ratio varying with number of cycles for 40% steel slag-clay mixed soil with different moisture contents

图 17a 为 400 kPa 竖向应力作用时，不同剪切幅值下 40% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土剪切刚度随循环次数变化曲线，可知：钢渣−黏土混合土剪切刚度随剪切幅值的增大而降低，且随循环次数的增加而升高，但增长速率逐渐下降。图 17b 为 400 kPa 竖向应力作用时，不同剪切幅值下 40% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土阻尼比随循环次数变化曲线，可知：钢渣−黏土混合土阻尼比随剪切幅值的增大而降低，随循环次数的增加而降低，且降低速率逐渐下降。第 1 次循环时，剪切幅值分别为 3，4，5 mm 对应的阻尼比分别为 0.43，0.38，0.37，循环 10 次后阻尼比降低幅度分别为 23.3%，23.7%，24.3%，说明钢渣的掺入使混合土在较小应变时有更好的耗能能力，作为回填材料可在小地震中吸收更大的能量[11, 26]。

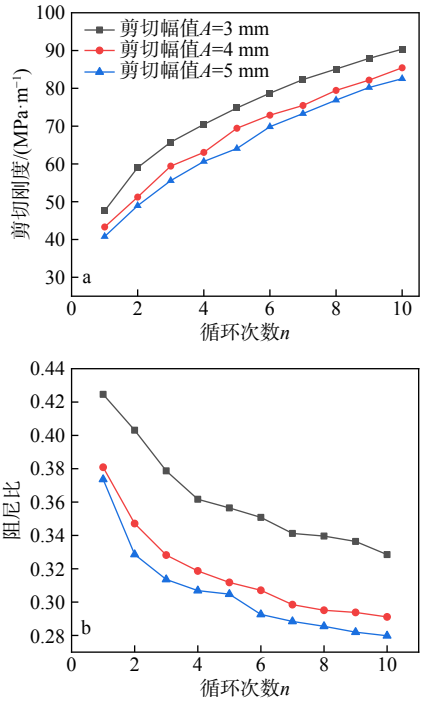


图 17　40% 钢渣−黏土混合土不同剪切幅值下剪切刚度和阻尼比随循环次数的变化曲线

Fig. 17　Curves of shear stiffness and damping ratio varying with number of cycles for 40% steel slag-clay mixed soil with different shear amplitudes

2.2.4　循环后剪切试验

为研究筋−土界面循环后的直剪特性进行了循环后直剪试验，控制剪切幅值为 5 mm，钢渣掺入量为 40%。图 18 为不同竖向应力条件下剪切应力−位移关系曲线。由图 18a 可知：在 200，300，400 kPa 竖向应力条件下，相较于循环前混合土界面剪切应力，循环后钢渣−黏土混合土界面剪切应力均有明显增加，增幅分别为 12.8%，37.4%，56.1%，且界面剪切应力平稳点对应的剪切位移后移。由图 18b 可知：在 9%，12% 含水率下，循环后钢渣−黏土混合土界面剪切应力均有明显增加，增幅分别为 79.0%，56.1%，15% 含水率下混合土界面剪切应力略有降低，降幅

为 11.7%。这是由于水在土体内起到润滑作用，当含水率较大时，降低了颗粒间的黏聚力与摩擦力；同时，土体孔隙内可能存在一些自由水，在循环加载过程中，形成一定的动孔隙水压力，使有效应力降低，因此，在含水率较大时混合土界面剪切应力减弱。

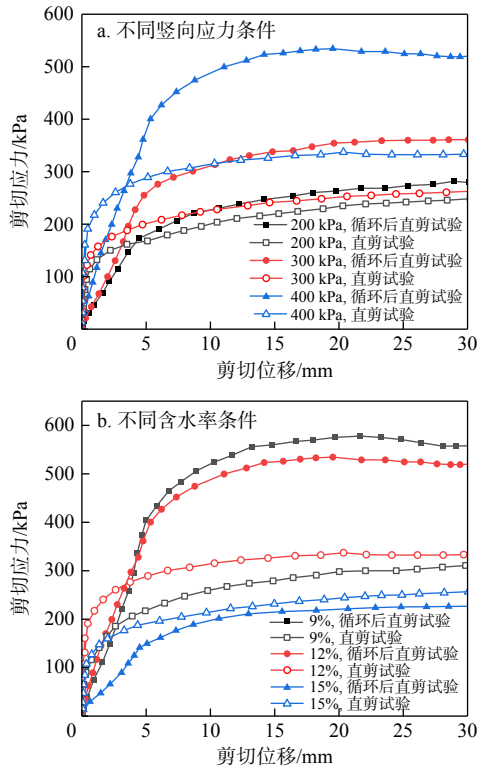


图 18　循环剪切前、后剪切应力−剪切位移关系图

Fig. 18　Shear stress-shear displacement relationship before and after cyclic shear

图 19 为直剪试验和循环后直剪试验钢渣−黏土混合土界面剪切应力包络曲线。通过线性拟合，得到剪切应力参数。直剪试验下黏聚力和内摩擦角分别为 87.7 kPa, 32.1°，循环后直剪试验的黏聚力和内摩擦角分别为 95.4 kPa, 50.3°，可以看出经过循环剪切后钢渣−黏土混合土界面黏聚力和内摩擦角均有增大。

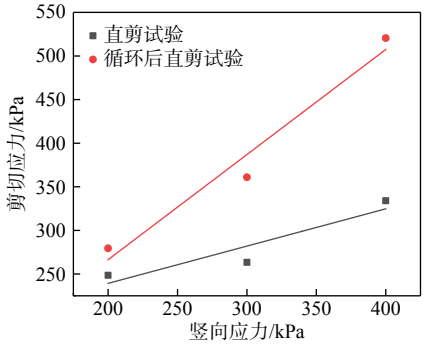


图 19　界面剪切应力包络曲线

Fig. 19　Interface shear stress envelope curves

对比黏土试样，掺入钢渣后的钢渣−黏土混合土试样的抗剪性能、黏聚力和内摩擦角提升较大，钢渣−黏土混合土试样体变小于黏土试样。钢渣的掺入提高了土体界面剪切应力，使混合土体黏聚力和内摩擦角增大，竖向位移减小。钢渣−黏土混合土随着钢渣含量增加黏聚力减小，内摩擦角增大，随含水率的升高土体界面剪切应力减小，剪切应力力学参数均减小。对比 30% 与 50% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土试样，40% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土试样剪切应力提升较大，30% 与 50% 钢渣掺入量的试样体变较大，而钢渣掺入量为 40% 时试样体变最小。不同含量钢渣−黏土混合土体均出现循环剪切硬化和剪缩现象。40% 钢渣掺入量的钢渣−黏土混合土性能较优，在循环剪切荷载作用下，呈现更好的减震耗能性。钢渣自重较大，有更好的减震耗能性以及较弱的地震加速度放大效应；适量的钢渣加入黏土中，可以提高黏土的阻尼比和剪切刚度，降低在循环荷载作用下黏土的体变。良好的渗透性也使钢渣−黏土混合土加筋边坡在降雨作用下位移较小，可以有效提升边坡稳定性。通过 ABAQUS 有限元软件模拟不同回填材料加筋土边坡在地震或降雨作用下动态响应，研究不同地震强度下钢渣−黏土混合土、黏土回填边坡的竖向位移、水平位移、坡体地震加速度放大系数（*PGA*）和不同工况下安全系数；结果表明，钢渣−黏土混合土回填边坡在地震或降雨工况下的表现均优于黏土回填材料。

3　剪切界面分析

非饱和黏性土的抗剪能力主要由颗粒间毛细负孔隙水压力作用形成的类黏聚力和颗粒间的机械咬合作用组成[27-28]。故非饱和黏性土抗剪性能与含水率、颗粒表面不规则程度和颗粒强度有关。黏土颗粒表面较为光滑且强度低，导致试样抗剪性能较差。钢渣颗粒比表面积较大，颗粒间相互咬合力较强使得剪切面无法平直发展，而是沿着颗粒之间的缝隙曲线发展，产生较大的机械咬合力，且钢渣颗粒本身强度较大，加入黏土后能显著提升其抗剪性能。此外，由前人研究成果[29-30]和 2.2 节研究结果可知，钢渣颗粒具有良好的耐久性、防滑性[31-36]，在循环荷载作用下仍具有较好的力学性能。同时钢渣中存在的游离氧化钙和氧化镁与自由水发生水化反应产生的胶凝物质[37-38]不仅能包覆土颗粒，还能使土颗粒相互连接紧密，在混合土体孔隙中形成稳定的“空间骨架”，从而有效提高土体抗剪能力和抗震性能[39-41]。

对于钢渣−黏土混合土，钢渣含量较低时，剪切界面以黏土颗粒相互接触为主；在剪切幅值较大或竖向应力较大时，黏土颗粒强度低以及颗粒原始孔隙结构和颗粒本身被破碎，因此以黏土颗粒接触为主的混合土界面剪切应力低。钢渣含量较高时，剪切界面以钢渣颗粒相互接触为主。钢渣颗粒自身强度较大不易破碎，在土体中形成骨架作用，会提升界面剪切应力，但钢渣掺入过多时，混合土剪切界面孔隙比较大，导致接触面积减小机械咬合作用弱，且在循环荷载作用下，钢渣颗粒会导致土工格栅磨损老化，所以界面剪切应力提升不明显。这表明钢渣对黏土的改良存在最优掺入量，这也解释了 40% 钢渣含量混合土与 30%、50% 钢渣含量混合土相比界面剪切应力更高，竖直位移更小这一现象。

4　结　论

（1）钢渣的掺入提高了土体界面剪切应力，使混合土体黏聚力和内摩擦角增大，竖向位移减小。钢渣−黏土混合土随着钢渣含量增加黏聚力减小，内摩擦角增大，随含水率的升高土体界面剪切应力减小，剪切应力力学参数均减小。

（2）循环剪切试验中，不同竖向应力、剪切幅值、含水率条件下，发现：①砂−黏土混合土与钢渣−黏土混合土均出现剪缩现象。在 15% 含水率条件下，钢渣−黏土混合土体界面剪切应力峰值随循环次数增加基本保持不变。②土体界面剪切刚度与阻尼比随剪切幅值的增大而减小；随循环次数的增加，土体界面剪切刚度增加、阻尼比减小；随含水率的增加，土体界面剪切刚度减小、阻尼比增加。

（3）与直剪试验结果相比，循环后直剪试验钢渣−黏土混合土体剪切应力有显著增大，黏聚力略有增大，内摩擦角显著增大。

（4）40% 钢渣含量的钢渣−黏土混合土抗剪性能较优，在循环剪切荷载作用下，可以呈现更好的减震耗能性，在实际工程应用中选择配比时可作为参考。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] KUMAR J, MADHUSUDHAN B N. Dynamic properties of sand from dry to fully saturated states[J]. Géotechnique, 2012, 62(1): 45-54.

[2] LI W, LANG L, WANG D, et al. Investigation on the dynamic shear modulus and damping ratio of steel slag sand mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 170-180.

[3] 李丽华, 文贝, 胡智, 等. 建筑垃圾填料与土工合成材料加筋剪切性能研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(4): 311-316.
LI L H, WEN B, HU Z, et al. Study on reinforced shear behavior of construction waste filler and geosynthetics[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(4): 311-316. (in Chinese with English abstract)

[4] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎颗粒混合土动力特性参数影响规律试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 359-364.
LI L H, XIAO H L, TANG H M, et al. Dynamic properties variation of tire shred-soil mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 359-364. (in Chinese with English abstract)

[5] 马鸿发, 刘清秉, 李靖. 掺砂率与干密度对膨润土收缩特性影响 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 76-85.
MA H F, LIU Q B, LI J. Effect of shrinkage characteristics of bentonite with different sand mixing rates and dry densities[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 76-85. (in Chinese with English abstract)

[6] WANG L Y, ZHANG B, XIE H M, et al. Study on shear strength characteristics of marine silt modified by steel slag[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 9647977.

[7] MAGHOOL F, ARULRAJAH A, SUKSIRIPATTANAPONG C, et al. Geotechnical properties of steel slag aggregates: Shear strength and stiffness[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(5): 1591-1601.

[8] WANG L Y, YAN J T, WANG Q, et al. Study on permeability of steel slag and steel alag modifying silt soil as new geo-backfill materials[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 5370748.

[9] LIU X W, HU M Y, KE S J, et al. A novel rammed earthen material stabilized with steel slags[J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 1134-1139.

[10] WANG L Y, WANG Q, HUANG X, et al. Experimental investigation on compressive deformation and shear strength characteristics of steel slag in the geotechnical engineering[C]//Anon. Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Ground Improvement and Geosynthetics. Singapore: Springer Singapore, 2018: 194-202.

[11] 陈爽, 贾凡, 刘斯宏, 等. 错缝堆叠土工袋层间界面的循环剪切特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2945-2953.
CHEN S, JIA F, LIU S H, et al. Experiments on the cyclic shear behavior of the interface between staggered stacking soilbags[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2945-2953. (in Chinese with English abstract)

[12] 刘飞禹, 江淮, 王军. 砾石−格栅界面循环剪切软化特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1485-1492.
LIU F Y, JIANG H, WANG J. Experimental study on cyclic shear softening characteristics of gravel-geogrid interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1485-1492. (in Chinese with English abstract)

[13] 李丽华, 臧天宝, 刘永莉, 等. 纤维底渣混合土循环剪切性能研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 196-205.
LI L H, ZANG T B, LIU Y L, et al. Cyclic shear performance of fiber bottom ash mixed soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 196-205. (in Chinese with English abstract)

[14] 刘飞禹, 童艳光, 汪歆, 等. 筋-土界面刚度软化对加筋土挡墙动

力特性的影响 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 75-84.
LIU F Y, TONG Y G, WANG X, et al. Effect of stiffness softening of reinforcement-soil interface on dynamic characteristics of reinforced retaining wall[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 75-84. (in Chinese with English abstract)

[15] 高海军, 董丁明, 赵琪, 等. 循环荷载作用下加筋土路基动力响应研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 208-215.
GAO H J, DONG D M, ZHAO Q, et al. Study on dynamic response of reinforced soil subgrade under cyclic loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 208-215. (in Chinese with English abstract)

[16] 宋飞, 石磊, 樊明尊. 土工格室加筋正常固结粉质黏土应力应变响应 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 184-193.
SONG F, SHI L, FAN M Z. Stress-strain response of geocell-reinforced normally consolidated silty clay[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 184-193. (in Chinese with English abstract)

[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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123-2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)

[18] HOLTZ WESLEY G, GIBBS HAROLD J. Triaxial shear tests on pervious gravelly soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1956, 82(1): 1-9.

[19] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6): 793-815.

[20] NYE C J, FOX P J. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 973-983.

[21] 刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 筋−土界面循环剪切刚度和阻尼比的试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 159-165.
LIU F Y, WANG P, WANG J, et al. Experimental research on reinforcement-soil interface stiffness and damping ratio under cyclic shearing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 159-165. (in Chinese with English abstract)

[22] 刘飞禹, 施静, 王军, 等. 三明治形加筋土筋−土界面动力剪切特性 [J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1991-1998.
LIU F Y, SHI J, WANG J, et al. Dynamic shear behavior of interface for clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 1991-1998. (in Chinese with English abstract)

[23] 中华人民共和国交通部. 公路工程土工合成材料试验规程: JTGE 50−2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of geosynthetics for highway engineering: JTGE 50−2006[S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)

[24] CHANG J Y, FENG S J. Dynamic shear behaviors of textured geomembrane/nonwoven geotextile interface under cyclic loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(2): 388-398.

[25] 陈瑞锋, 闫炜炀, 刘晓凤, 等. 不同含水率下赤泥改良土的动弹模及阻尼比研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2810-2815.
CHEN R F, YAN W Y, LIU X F, et al. Study of dynamic modulus and damping ratio of loess solidified by red mud under different water content[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(8): 2810-2815. (in Chinese with English abstract)

[26] 吴孟桃, 刘方成, 陈巨龙, 等. 含水率对大应变下橡胶砂动剪模量和阻尼比的影响 [J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 803-814.
WU M T, LIU F C, CHEN J L, et al. Influence of water content on dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixture under large strains[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 803-814. (in Chinese with English abstract)

[27] 黄伟, 邱鹏, 赵鲁卿, 等. 钢渣−土混拌基层材料试验研究及微观机理分析 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 44-52.
HUANG W, QIU P, ZHAO L Q, et al. Experimental study and micro-mechanism analysis of steel slag-soil mixed road base material[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 44-52. (in Chinese with English abstract)

[28] 罗文俊, 王海洋, 刘焕强, 等. 不同含水率红粘土的抗剪强度试验研究 [J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(1): 119-126.
LUO W J, WANG H Y, LIU H Q, et al. Experimental study on shear strength of red clay with different moisture content[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(1): 119-126. (in Chinese with English abstract)

[29] MAGHOOL F, ARULRAJAH A, MIRZABABAEI M, et al. Interface shear strength properties of geogrid-reinforced steel slags using a large-scale direct shear testing apparatus[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(5): 625-633.

[30] AGHILI E, HOSSEINPOUR I, JAMSHIDI CHENARI R, et al. Behavior of granular column-improved clay under cyclic shear loading[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31: 100654.

[31] 肖杰, 龙晨杰, 何建刚, 等. 大掺量激活钢渣微粉−水泥稳定碎石性能及微观特性 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 204-215.
XIAO J, LONG C J, HE J G, et al. Performance and micro characteristics of cement stabilized macadam with a large amount of activated steel slag powder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 204-215. (in Chinese with English abstract)

[32] 王丽艳, 李劲松, 陶云翔, 等. 废弃钢渣回填土工格栅加筋挡土墙的抗震性能振动台试验 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 35-46.
WANG L Y, LI J S, TAO Y X, et al. Shaking table tests on seismic behavior of geogrid-reinforced retaining wall with waste steel slag backfill[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 35-46. (in Chinese with English abstract)

[33] SUN X S, LI Y J, WEI X L, et al. High contents of steel slag in the road concrete: Hydration mechanism, mechanical property and durability performance[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132703.

[34] 张冰冰, 刘杰, 阿肯江·托呼提, 等. 土工格室加固风积沙路基不同深度动力响应试验研究 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 308-315.
ZHANG B B, LIU J, AKJ·T H T, et al. Experimental study on the dynamic response of aeolian sand subgrade reinforced by geocells at different depths[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 308-315. (in Chinese with English abstract)

[35] 蒋婷婷, 潘华利, 艾一帆, 等. 冻融循环及含水率对冰碛土力学特性影响 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 238-252.
JIANG T T, PAN H L, AI Y F, et al. Effect of freeze-thaw cycles and water content on the mechanical properties of moraine soil[J].

Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 238-252. (in Chinese with English abstract)

[36] 王泽成, 李栋伟, 张潮潮, 等. 考虑含水率对人工冻结红黏土力学特性的影响 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 287-293.
WANG Z C, LI D W, ZHANG C C, et al. Effect of water content on the mechanical properties of artificially frozen red clay[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 287-293. (in Chinese with English abstract)

[37] 李福栋. 钢渣稳定粉质黏土的小应变动力特性试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
LI F D. Experimental study on small strain dynamic characteristics of steel slag stabilized silty clay[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019. (in Chinese with English abstract)

[38] 南雪丽, 杨旭, 张宇, 等. 钢渣–矿渣基胶凝材料的协同水化机理 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27(4): 366-374.
NAN X L, YANG X, ZHANG Y, et al. Synergistic hydration mechanism of steel slag-slag based cementitious material[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(4): 366-374. (in Chinese with English abstract)

[39] 崔雯雯, 董晓强, 刘晓勇, 等. 赤泥基胶凝材料的水化动力学过程及其水化机制研究 [J]. 岩土力学, 2025, 46(3): 867-880.
CUI W W, DONG X Q, LIU X Y, et al. Hydration kinetics and hydration mechanism of red mud-based cementitious materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(3): 867-880. (in Chinese with English abstract)

[40] 张刘阳, 陈潇, 吕国明, 等. 钢渣特性随粒级分布的规律研究 [J]. 材料导报, 2025, 39(3): 133-140.
ZHANG L Y, CHEN X, LYU G M, et al. Study on the law of steel slag characteristics with particle size distribution[J]. Materials Reports, 2025, 39(3): 133-140. (in Chinese with English abstract)

[41] YIN C S, WANG H L, LIU X M, et al. Monotonic and cyclic mechanical characteristics of reconstituted soil with high liquid limit reinforced by steel slag[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84(3): 149.

Summary for “加筋废弃钢渣混合土循环剪切性能”

Cyclic shear performance of reinforced waste steel slag mixed soil

LI Lihua，ZHANG Yongshuai，YE Zhi*，KANG Haoran，BAI Yuxia

Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lake, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

First author，E-mail：researchmailbox@163.com

* Corresponding author， E-mail：yezhi@hbut.edu.cn

Abstract：[**Objective**] To improve the engineering properties of clay and increase the utilization of waste steel slag (SS), [**Methods**] geogrid reinforcement was employed，followed by direct shear tests，cyclic shear tests，and post-cyclic direct shear tests conducted on steel slag-clay mix，sand-clay mix，and pure clay. The study investigated the strength characteristics，damping ratio，shear stiffness changes，and displacement of the mixed soil reinforcement-soil interface under various conditions，including different steel slag contents，vertical stress，moisture content，and shear amplitudes. [**Results**] The test results indicate that steel slag significantly enhances the shear strength of the clay-reinforcement interface，with improvement being more effective than conventional sand-modified clay. The steel slag-clay mixed soil exhibited higher damping ratio and shear stiffness，suggesting better vibration damping and energy dissipation properties. Among the various mixtures，the steel slag-clay mix with 40% steel slag content demonstrated the best shear strength，damping ratio，and shear stiffness. Additionally，the shear strength of the steel slag-clay mixed soil increased after cyclic loading compared to pre-cyclic direct shear conditions. The results also show that moisture content has a more significant impact on shear strength，shear stiffness，and damping ratio than vertical stress and shear amplitude. [**Conclusion**] The steel slag-clay mixed soil exhibits improved damping and energy dissipation properties under cyclic shear loading. The experimental findings provide a theoretical basis for using steel slag as a substitute for sand to improve clay soils.

Key words: steel slag-clay mixed soil；direct shear；cyclic shear；shear stiffness；damping ratio

Received：2024-06-19；Revised：2024-08-16；Accepted：2024-08-26

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240341