

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.103



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



建筑垃圾再生路基填料的剪切强度研究综述

梁禄钜¹, 童金珊¹, 徐长节², 范晓真¹

(1. 浙大城市学院 工程学院; 浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室, 杭州 310015;
2. 华东交通大学 土木建筑学院; 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌 330013)

摘要:近年来,以再生混凝土、再生砖、再生砂浆等为主的建筑垃圾已广泛应用于交通工程路基填筑中。路基的承载力与稳定性主要取决于路基填料的剪切强度,而建筑垃圾填料颗粒具有级配范围广、强度低、成分复杂等特点,其在服役期荷载作用下的剪切特性与传统砂石填料存在显著差异。从建筑垃圾再生填料剪切强度、建筑垃圾-细粒土混合填料剪切强度、建筑垃圾再生填料-土工材料界面剪切强度3个方面系统梳理了现有研究成果。综合分析表明:不同建筑垃圾的颗粒形态与分布特征决定其颗粒破碎的类型和模式,剪切过程中颗粒破碎显著影响剪切强度;在满足路基填料强度要求的基础上,需进一步探究不同建筑垃圾颗粒破碎规律对剪切强度的影响机制。此外,建筑垃圾掺入不同细粒土后虽能提升剪切强度,但关于混合土体的最佳掺量、相互作用机制等方面的研究仍显不足。建筑垃圾-土工材料界面剪切强度研究目前主要针对混凝土、砌块等再生填料,由于建筑垃圾在组分、性质等方面存在显著差异,因此有必要深入研究不同建筑垃圾填料的界面剪切机理,从而为发展绿色低碳交通提供重要的理论依据和技术支撑。

关键词:建筑垃圾;再生填料;路基工程;剪切强度;颗粒破碎;细粒土

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)03-0154-17

Review on shear strength of construction waste reclamation subgrade fillers

LIANG Lujū¹, TONG Jinshan¹, XU Changjie², FAN Xiaozhen¹

(1. School of Engineering; Zhejiang Key Laboratory of Safe Construction and Intelligent Maintenance of Urban Shield Tunnel, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture; State Key Laboratory of Rail Transit Infrastructure Performance Monitoring and Support, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: In recent years, construction waste including recycled concrete, bricks and mortar has been widely used in subgrade construction. The bearing capacity and stability of the subgrade mainly depend on the shear strength of the subgrade filler. Construction waste filler particles are characterized by a wide grading range, low

收稿日期:2024-07-20

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3009400);浙江省自然科学基金(LQ22E080009);国家自然科学基金(52408397, 52278418)

作者简介:梁禄钜(1994-),男,博士,副研究员,主要从事建筑垃圾填料力学特性研究, E-mail: lianglj@hzc.edu.cn.

Received: 2024-07-20

Foundation items: National Key Research and Development Program (No. 2023YFC3009400); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LQ22E080009); National Natural Science Foundation of China (Nos. 52408397, 52278418)

Author brief: LIANG Lujū (1994-), PhD, associate researcher, main research interest: mechanical properties of construction waste fillers, E-mail: lianglj@hzc.edu.cn.

strength, complex composition, etc., and their shear characteristics under service load are significantly different from those of traditional sand and gravel fillers. The existing research results are reviewed from three aspects: shear characteristics of recycled construction waste fillers, shear characteristics of construction waste - fine grained soil mixed fillers, and interface shear characteristics between recycled construction waste fillers and geomaterials. Based on existing research, it is found that changes in particle morphology and distribution of different types of construction waste determine the type and mode of particle breakage, and particle breakage significantly affects the shear strength during the shear process. On the premise of meeting subgrade filling strength requirements, it is necessary to further explore the influence mechanism of particle breakage laws of different construction wastes on shear strength. In addition, although the shear strength of construction waste can be improved when mixed with different fine-grained soils, the research on the optimal mixing ratio and interaction mechanism of mixed soils is still insufficient. Research on the interfacial shear strength between construction waste and geotechnical materials mainly focuses on recycled fillers such as concrete and blocks. Due to the differences in material composition and properties of construction waste, it is necessary to conduct in-depth research on the interfacial shear mechanism of different construction waste fillers, so as to provide important theoretical support and technical reserves for the development of green and low-carbon transportation.

Keywords: construction waste; recycling filler; subgrade engineering; shear strength; particle breakage; fine-grained soil

随着城镇化与工业化进程的不断推进,当前中国建筑垃圾已占城市垃圾总量的40%以上,年产生量超过30亿t,预计2025年将达到40亿^[1](图1)。然而,目前中国建筑垃圾资源化利用率不足10%,远低于发达国家90%以上的水平。建筑垃圾堆积引发的环境污染、土地占用等问题日益突出,垃圾“围城”现象依然严峻。基于“十四五”时期“无废城市”建设背景,中国已重点布局建筑垃圾资源化产业,以提升废弃物资源化利用率,推动城市绿色低碳发展。

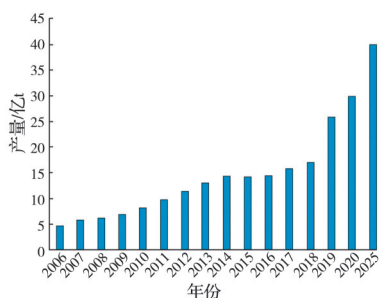


图1 2006—2025年中国城市建筑垃圾产生量及预测^[1]

Fig. 1 Generation and prediction of urban construction waste in China from 2006 to 2025^[1]

近年来,公路、铁路等交通工程基础设施建设对砂石等材料的需求居高不下,而长期过度开采导致资源日趋枯竭,使得交通运输行业可持续发展与碎石、砂砾等地材短缺间的矛盾日益凸显。如何为传统路基砂石填料寻找替代材料,已成为新时代绿色交通发展的重要方向^[2]。建筑垃圾通常由砖、砂、

混凝土等惰性材料组成,物理力学性能与土-石混合料类似,具有抗压强度高、耐水性强、压实性能好等特性^[3],能基本满足路基填料的力学性能要求。根据已有研究,建筑垃圾具有离散性高、水敏性低、颗粒级配分布不均等特点,但经过适当处理后的建筑垃圾再生填料应用于路基填筑,仍具有明显优势。

《中华人民共和国循环经济促进法》以及《建筑垃圾处理技术规范》(CJJ 134—2009)实施以来,以再生混凝土、再生砖、再生砂浆等材料为主的建筑垃圾再生料经加工处理后已广泛应用于北京、陕西、安徽、江苏等地的公路路基填筑^[4-7]。相关部门出台了《公路用建筑垃圾再生材料施工与验收规范》(DB11/T 1731—2020)、《建筑垃圾再生材料路基施工技术规范》(DB61/T 1149—2018)及《建筑废弃物填筑路基施工技术规范》(DB41/T 1193—2016)等技术规范,不仅实现了建筑垃圾的减量化、资源化与无害化,更实现了变“废”为“宝”,有效缓解砂石开采带来的环境问题。

然而,建筑垃圾填料颗粒具有级配范围广、强度低、成分复杂等特点,在服役期荷载作用下极易发生剪切破碎,其剪切特性与传统砂石填料存在较大差异;而路基的承载力和稳定性均主要取决于建筑垃圾再生填料的剪切性能^[8]。笔者从建筑垃圾再生填料剪切特性、建筑垃圾-细粒土混合填料剪切特性、建筑垃圾-土工合成材料界面剪切特性3个方面对现有研究成果进行回顾与梳理,并分析目前该领域存在的问题与不足。

1 建筑垃圾再生填料剪切强度研究

1.1 剪切强度

参考陕西省交通厅2012年编制的《建筑垃圾填筑路基设计施工技术指南(试行)》中的相关内容,将建筑垃圾中粒径小于4.75 mm的颗粒划分为细粒,粒径大于4.75 mm的颗粒划分为粗粒。而目前针对建筑垃圾路基填料的评价指标主要集中于粗

颗粒的强度特性。如表1所示,目前学者们围绕土体组成特征,包括颗粒形态特征(颗粒粒径与级配、轮廓形状、颗粒接触方式)、矿物组分、颗粒含水量等对建筑垃圾剪切特性的影响开展了大量研究。结果表明:建筑垃圾填料在剪切过程中因棱角不规则、表面粗糙易发生颗粒破碎^[9-12],与天然骨料相比,可在一定程度上提高内摩擦角,但与传统土石混合料相比,其剪切特性更为复杂。

表1 对不同影响因素下建筑垃圾强度特性的研究

Table 1 Research on strength characteristics of construction waste by different influencing factors

影响因素	来源	研究内容	研究结果(强度、体变、破碎)
建筑垃圾不同比例及组成	文献 [3,7,23-27]	对比建筑垃圾再生填料(碎混凝土、碎砖、碎石、再生沥青填料)剪切强度、体变情况,确定颗粒分维数	1)粗粒土(混凝土碎块、砖块、碎石)/细粒土的内聚力和內摩擦角满足路基填料强度参数要求,剪切力学性能优于普通填土 2)建筑垃圾粗粒土抗剪强度排序:废混凝土粒料>级碎石>废砖粒料>再生沥青路面填料 3)剪应力-剪切位移曲线表现明显硬化,无明显峰值,受颗粒破碎影响会发生不同程度的跳跃,颗粒分维数2.6 4)在不同竖向荷载下,竖向位移变化趋势相似,均是先剪胀后剪胀
含水率	文献 [28-29]	含水率对建筑垃圾再生填料(再生混凝土骨料)剪切强度的影响	1)含水率对再生细混凝土骨料的內摩擦角影响不明显,土体抗剪强度对水分敏感度较低 2)在最佳含水量(OMC)和最大干密度(MDD)下,压实后的再生混凝土骨料(RCA)有效摩擦角为47°,有效內聚力为48.5 kPa
颗粒级配与粒径、粒度	文献 [26-27,30-32]	不同颗粒粒径、级配、粒度对建筑垃圾再生填料剪切强度的影响	1)骨料粒径范围越大,曲线波动越明显,剪切强度非线性明显,再生骨料的抗剪强度随着粒径范围的增大而增大 2)在中值粒径相同条件下,连续级配的建筑垃圾抗剪强度高于单一级配的抗剪强度。随着颗粒的增大,小颗粒减小,剪切强度先增大后减小;剪缩性越来越小,且对应剪胀性越来越大
剪切速率	文献 [27,30]	剪切速率对不同建筑垃圾再生填料(碎砖、碎混凝土)强度特性的影响	1)随着剪切速率的增大,曲线波动较明显,剪应力-剪切位移呈硬化趋势,整体剪应力均先增大后减小 2)不同建筑垃圾的剪切强度随剪切速率的变化规律存在差异:随着剪切速率的增大,碎砖剪切强度则先增大后趋于稳定,碎混凝土先增大后减小 3)在相同速率下,碎混凝土整体剪切强度大于碎砖
剪切方式	文献 [33]	动静剪切对建筑垃圾再生填料强度特性的影响	对比循环剪切和直接剪切进行实测和数值模拟,相比实际的先剪胀后剪缩,模拟试验下呈明显剪胀趋势。经历循环剪切的土体更能提升其剪切强度

建筑垃圾中主要包含混凝土、砂浆、废砖等,其剪切过程受材料强度及颗粒破碎规律等因素影响显著,与一般土体相比,差异集中体现在剪应力-剪切位移关系、剪胀特性及剪切强度等宏观力学行为上(图2)。建筑垃圾土成分具有多元性,性质与土石混合料相近,不同填料颗粒强度差异决定了材料剪切强度、破碎特性的复杂性与不确定性。结合不同组分再生填料的剪应力-剪切位移曲线特征,主要存在以下差异:

1)曲线形态差异。因成分复杂,建筑垃圾的剪应力-剪切位移曲线离散性强、波动性较大,不同组分的力学性质差异导致剪应力随剪切位移的变化呈不规则性。而粗粒土、土石混合料、堆土料的剪

应力-剪切位移曲线圆滑,随着剪切位移的增大,曲线达到峰值强度后,强度趋于稳定,均表现出先硬化后软化的特征^[13]。

2)在屈服破坏方面,建筑垃圾材料性质不一,在不同剪切位移下出现多个屈服点,破坏模式多样化;而粗粒土主要为单一屈服点剪切破坏,以剪切滑移破坏为主。

3)在剪应力水平方面,相同剪切位移下,建筑垃圾剪应力因成分差异而显著不同,导致曲线在垂直方向较为分散;而粗粒土剪应力水平相对集中,曲线在垂直方向波动较小。

4)强度与线性特征差异。由于不同成分颗粒破碎后力学响应各异,建筑垃圾破碎、转动与翻转

现象显著,其剪应力-剪位移曲线出现明显“跳跃”,剪切波动较大,呈现显著的非线性特征^[7]。粗粒土虽具有一定非线性特征,但成分单一、颗粒强度相近,颗粒破碎较规律,破碎分维数相对较低,剪切特性较为稳定。

5)在体应变方面,当应力较小时,粗粒土^[14-16]、土石混合料^[13,17-18]呈现先剪缩后剪胀的特征,建筑垃圾土表现为小幅剪胀后剪缩的特征;当应力较高时,三者均表现为剪缩。

综上所述,这些差异主要源于建筑垃圾土的多

组分混合特性及不同组分填料的剪切强度不同;因此,在剪切强度研究中需考虑其独特的力学特性。

建筑垃圾粗颗粒在剪切过程中伴随颗粒滑移、破碎、填充与重排等行为;受接触应力集中影响,颗粒破碎显著改变颗粒的强度、变形特征和粒度组成^[19]。研究表明,颗粒破碎受载荷条件、母颗粒强度、颗粒尺寸与颗粒形状等多种因素共同控制^[20-22]。进一步总结已有文献中关于建筑垃圾剪切破碎影响因素与强度特性之间关联的相关研究,如表 2 所示。

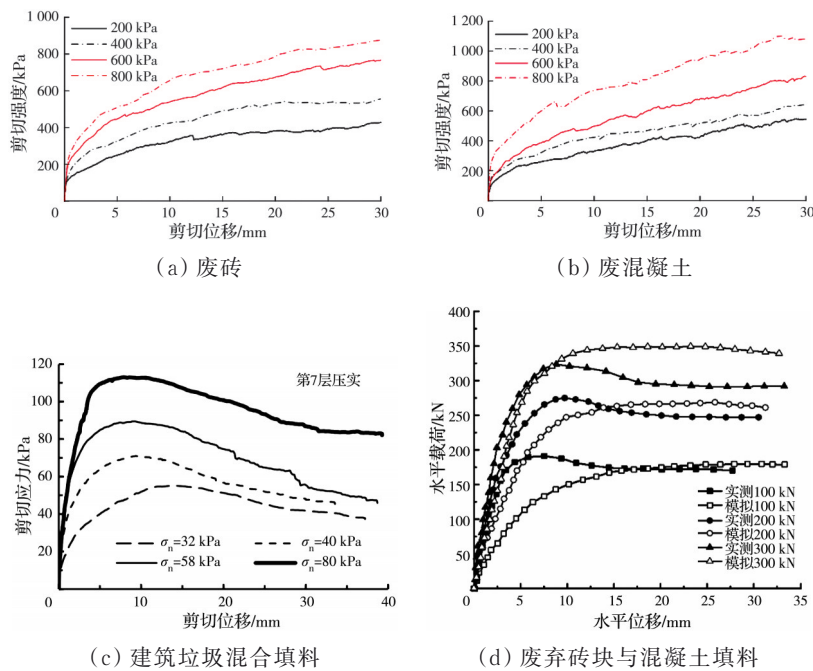


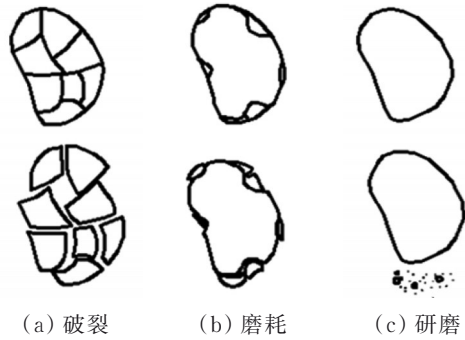
图 2 建筑垃圾土剪应力-剪应变曲线^[7,25-27,33]

Fig. 2 Typical shear stress-shear strain curves of construction waste soil^[7,25-27,33]

表 2 对不同影响因素下剪切破碎规律的研究

Table 2 Studies on shear breakage regularity of different influencing factors

影响因素	来源	研究内容	研究结果
竖向荷载	文献 [27]	建立法向应力与破碎指标的联系	随着法向应力的增大,剪切破碎率也随之升高,说明颗粒破碎主要由法向应力导致
不同建筑垃圾组成	文献 [25-27,30]	对比废混凝土骨料、砖骨料、级配碎石破碎后的形态和强度情况	废混凝土骨料存在砂浆附着及碎石包裹,破碎率较高,破碎类型以破裂、磨损为主,强度受滑动摩擦控制 废砖颗粒成分较单一,破碎波动较小,形状不规则,主要为边角处削弱以及大块体的断裂,破碎后呈椭圆形或圆状,强度以滑动摩擦为主 级配碎石属于中风化,剪切破碎性相对较高
剪切速率	文献 [30]	确定不同剪切速率下建筑垃圾粗粒土的破碎特性	混凝土再生集料的破碎率随着剪切速率的增大先增大后减小,砖再生集料先减少后增大,在 1 mm/min 取极大值,破碎率与剪切速率呈相关性
竖向荷载	文献 [27,34]	确定粗粒土在外荷载作用下的破坏形态	根据外荷载对颗粒破碎破坏影响程度的大小,可划分 3 种形态:破裂、磨损、研磨(图 3) 基于 3 种颗粒形态下的废混凝土块、碎砖的颗粒破碎现象见图 4
颗粒形状	文献 [35]	对比混凝土渣、砖渣颗粒破碎前后的接触方式	砖渣大颗粒破碎成小颗粒,形成面-面接触,混凝土渣角部凸起破碎,大小相当,小颗粒之间形成面-面接触,以颗粒断裂为主 尖角颗粒在破碎过程易打破多角矿渣,发生尖角断裂;咬合颗粒受竖向荷载影响产生相对位移,导致咬合尖角断裂,破碎小颗粒之间为点-面接触,以颗粒之间断裂为主

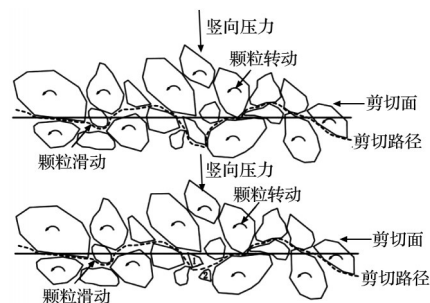
图 3 颗粒破碎类型示意图^[34]Fig. 3 Schematic diagram of particle breakage type^[34]图 4 颗粒破碎现象^[27]Fig. 4 Particle breakage phenomenon^[27]

以上研究表明,颗粒剪切破碎影响填料整体抗剪强度的主要原因在于破碎前后颗粒形态与接触特征的改变。由于建筑垃圾填料组分复杂,不同组分呈现不同的颗粒破碎规律,特定填料的试验结果离散性较大,难以获得具有代表性的规律。因此,需针对不同种类建筑垃圾,分析其颗粒粒径、轮廓形态、棱角特征等剪切破碎规律,揭示颗粒破碎对剪切强度的影响机制,进而建立建筑垃圾填料颗粒破碎与剪切强度间的定量关系。

1.2 颗粒破碎对填料剪切强度的影响机理

针对建筑垃圾这类颗粒散体材料,剪切过程中往往伴随颗粒摩擦、剪胀、破碎及咬合锁定等现象^[36],其剪切强度主要取决于颗粒间形成的土体结构强度及颗粒自身特性^[37-38]。土体结构强度主要受粗细颗粒含量、颗粒破碎及剪胀性等因素控制。外力作用下,当颗粒材料潜在断裂面的最大主应力大于单颗粒强度时,颗粒将发生破裂并形成新颗粒,因此颗粒断裂破碎与单颗粒强度密切相关^[39-41]。颗粒破碎对材料特性的影响主要体现为颗粒形态变化,包括形状、圆度与表面纹理等^[42-44]。

目前,对建筑垃圾填料颗粒剪切破碎机理方面的研究相对较少,考虑颗粒破碎对填料剪切力学特性影响的研究仍主要集中于碎石、粗粒土等传统砂石材料^[17,37,45-47]。一方面,普通粗粒土在剪切破碎下会改变颗粒粒径与级配,当应力较大时,破碎小颗粒填充大颗粒间的孔隙,导致孔隙率和体应变减小。在此过程中,颗粒间有效接触点增多,滑动摩擦也会略微增大,滚动摩擦因剪胀效应减弱而减小,颗粒间的黏聚力(咬合力)增大,从而提升其抗剪强度。胡万雨等^[48]通过粗粒土颗粒破碎直剪试验发现,大颗粒破碎为次一级颗粒可优化颗粒级配,小颗粒填充孔隙使黏聚力增大,且破碎耗能随滚动耗能同步增加,最终提升剪切强度。汪永雄^[49]研究砂土宏微观剪切特性发现,随着细颗粒的增多并填充孔隙,颗粒粒径重新分布,颗粒间更易发生相对滑动,剪切路径缩短,阻力降低;宏观上表现为内摩擦角减小,而黏聚力增大,因此整体剪切强度仍有所提升(图 5)。徐永福^[14]基于颗粒破碎开展粗粒土剪切强度模拟分析,结果表明,颗粒破碎程度越高,剪胀越小,孔隙率随之降低;而内摩擦角的降低幅度远小于颗粒间表观黏聚力的增大幅度,整体表现为剪切强度提升。冯大阔等^[50]认为,在循环剪切作用下,粗粒土颗粒破碎的细观特征表现为大颗粒减少、小颗粒含量增多;定量表现为粒径分布曲线上移、特征粒径减小,并通过细观颗粒破碎行为影响宏观体变特征。雷壮等^[51]对粗粒土剪切前后颗粒分布和形态特征进行分析(图 6):在剪切过程中,A-A'处发生滑动,B-B'处发生翻滚,C-C'处产生摩擦,D-D'处发生颗粒破碎;在竖向荷载作用下,颗粒发生重组,小颗粒间的接触面积增大使得粗粒土结构更为密实,有效应力接触点增多,最终使其抗剪强度显著提高。

图 5 颗粒破碎前后直剪示意图^[49]Fig. 5 Schematic diagram of direct shear before and after particle breakage^[49]

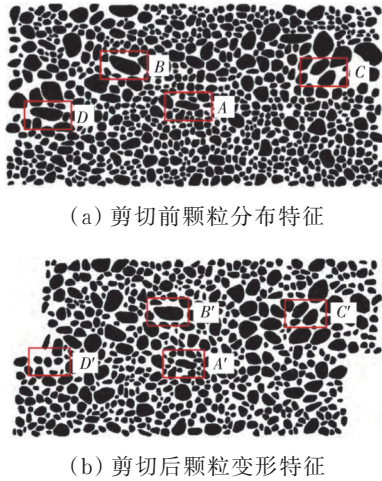


图 6 剪切前后的颗粒分布和变形特征示意图^[51]

Fig. 6 Schematic diagram of particle distribution and deformation characteristics before and after shear^[51]

土体剪切破碎前后的颗粒级配变化会对粗细颗粒含量^[52]产生直接影响。在达到颗粒破碎应力前,随着法向应力的作用,剪切界面内的粗颗粒通过滚动、滑动与翻转方式克服咬合摩擦力;滑动摩擦由材料组分与颗粒表面粗糙度决定,通常保持不变,而滚动摩擦由颗粒在剪切带内滚动所需的外力决定^[53-54]。颗粒通过剪胀效应获取剪应力空间,通过消耗外力施加的剪切力实现做功补偿,不断累积能量使正应力与剪切力增大至极限状态,进而提高颗粒间内摩擦角,实现剪切强度的提升^[39,55]。随着法向压力的增大,土体达到破碎应力,颗粒通过破碎分散应力,使得土体级配发生变化,颗粒间接触应力也随之改变。随着破碎小颗粒增多并填充大颗粒间的孔隙,颗粒嵌锁效应增强,接触力矩减小,从而削弱机械接触效应,导致滚动摩擦降低。而占据主导的咬合摩擦难以通过剪胀做功累积能量使正应力、剪切力达到极限状态,只能维持在某一中间值^[46]。当相对颗粒破碎率小于某一临界值时,颗粒破碎增多并不能引起峰值内摩擦角降低,剪切强度仍呈提升趋势;当颗粒破碎发展到一定程度,颗粒棱角被切断,咬合力降低,剪胀效应减弱,引起内摩擦角显著降低、剪切强度下降。受颗粒破碎前后级配及组成等因素影响,在级配良好的情况下,颗粒破碎后咬合摩擦起决定性作用,随着粒径的增大,摩擦角也增大;但颗粒粒径对抗剪强度的影响是相对的,受粗细颗粒含量的制约,粗细颗粒的不同比例决定了颗粒间的接触与排列方式、强度特征,即只有粗粒土含量一定时,剪切强度才随着颗粒粒径的增大而增大^[41]。因此,鉴于粒径尺寸对内

摩擦角的影响尚未形成共识,在分析粒径大小对抗剪强度的作用时,需综合考虑土体密度、颗粒含量与级配等因素。

另一方面,土体在剪切破碎前后会发生颗粒形状改变,颗粒形状的不规则性则会造成剪切接触路径、接触粗糙度、接触角度等微观参数的变化。当应力较小时,颗粒间嵌锁效应不明显,颗粒间滚动摩擦在外力作用下通过剪胀做功;且破碎后不规则、表面粗糙的颗粒相互接触咬合,接触面积增大,可为滑动摩擦提供更有利条件,表现为摩擦强度提升。郭庆国^[52]、Bjoern等^[56]认为,粗粒土的颗粒形状对破碎程度有较大影响,棱角分明、表面粗糙的颗粒更易破碎。潘远阳^[57]发现,不同形态粗粒土的破碎程度差异明显:在剪切过程中,条状、块状颗粒不易翻转与错动,以点接触为主,可缓冲部分剪应力;而磨圆状颗粒无棱角,破碎程度较低,能较好抵抗剪应力。杨映湖^[27]指出,建筑垃圾再生骨料颗粒破碎后形状不规则,颗粒间以嵌锁接触为主、平面接触为辅;法向应力通过颗粒破碎程度影响颗粒间接触角度与材料摩擦因数,进而影响摩擦强度,最终决定抗剪强度(图 7)。在室内试验基础上,潘远阳^[57]、程世涛^[58]采用离散元法研究可破碎粗粒土在剪切过程中的颗粒破碎规律及对土体力学特性的影响机理,结果表明:随着剪应力的持续作用,粗颗粒内部裂纹逐步扩展直至破裂,破碎颗粒间的接触力链集中于剪切带区域,并能很好地响应外部荷载。Li等^[53]发现,在轴向应力作用下,碎石材料因特征强度较低更易破碎,破碎区域从对角线和剪切面上扩至整个试样,这是粗粒土在剪切过程中颗粒破碎规律的重要体现。

土体剪切破碎前后的形态变化会对颗粒接触

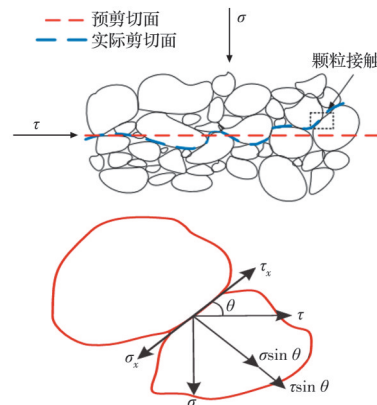


图 7 骨料堆积体剪切面示意图^[27]

Fig. 7 Shear surface diagram of aggregate accumulation body^[27]

状态产生极为复杂的影响,而颗粒断裂形态与其表面特征密切相关,可通过球度(形状)、角度和粗糙度等形态参数加以表征^[43,59-60]。由于颗粒散体材料具有形状不规则、接触状态复杂的特点,颗粒破碎后的剪切强度主要源于咬合(嵌锁)作用和摩擦作用(包括滚动和滑动)两种机制。因此,颗粒形态参数、颗粒断裂与颗粒间摩擦强度之间存在内在关联。摩擦作用与颗粒表面摩擦性质相关,颗粒在转动、翻滚过程中易发生棱角剪切或断裂,与咬合摩擦相比,摩擦作用的影响范围更广。咬合作用与颗粒接触角度相关:平均应力较低时,颗粒间咬合作用较弱,表面破碎不明显;应力水平较高时,咬合效应显著增强,颗粒断裂率显著上升,说明颗粒断裂可反映颗粒间咬合作用的强弱。颗粒的接触角度和接触面是剪切断裂的主要部位。与球形颗粒相比,不规则颗粒可形成更多强作用力链,需要更多配位数与接触力链维持结构稳定,并能在剪切过程中限制颗粒转动,进而表现出更高的剪切强度^[44]。因此,在较高压力作用下,不规则颗粒的抗剪强度显著高于球形颗粒。对于轮廓形状相同的颗粒,表面粗糙度越大,颗粒接触角度越明显,与相邻颗粒的嵌锁效应越强;且随着外部压力的增加,颗粒间咬合摩擦不断增强,提升了低应力下的剪胀效应,最终提高剪切强度。

总的来说,研究不同尺寸建筑垃圾在界面剪切前后的颗粒粒径分布规律对于揭示建筑垃圾剪切特性具有重要意义,需重点关注组分、密度及粗细颗粒比例。颗粒间的复杂接触状态显著影响土体的力学特性^[61],其微观结构的复杂性决定了宏观力学性能的不确定性。颗粒形态构建了混合料的骨架结构与颗粒互锁效应,通过对比不同建筑垃圾的表观特征,可阐明其剪切强度的差异机理。剪切破碎后的建筑垃圾颗粒以无序状态组合,形成多种接触形式^[62],伴随颗粒破碎、转动及填充等行为,颗粒间的互锁、镶嵌与悬浮效应不断变化,相应结构可分为悬浮-密实结构、颗粒填充结构及颗粒孔隙结构^[35]。因此,系统分析建筑垃圾再生填料在颗粒破碎后的级配、形态及粗细含量变化对咬合作用与摩擦作用的影响,是揭示其对剪切强度影响机理的关键。

1.3 建筑垃圾剪切强度理论模型

目前建筑垃圾粗粒土最常用的剪切强度模型为摩尔-库伦模型。例如,在未充分考虑颗粒破碎影

响的条件下,李腾^[63]采用线性准则表征其剪切强度。在考虑建筑垃圾剪切破碎后,徐永福^[64]、白柯楠等^[30]假定粗粒填料剪切强度来源于颗粒接触面摩擦力,结合单颗粒破碎强度尺寸效应(图8)与分形模型,建立了粗颗粒土强度函数式。

$$\tau = a\sigma_n^b \quad (1)$$

式中: τ 为剪切强度; σ_n 为法向应力; a 为强度系数,与单颗粒破碎强度相关; b 为强度非线性指数,与分形维数 D 相关,满足关系式 $b=2(2D-3)/(3D-3)$,介于 $2/3\sim 1$ 。

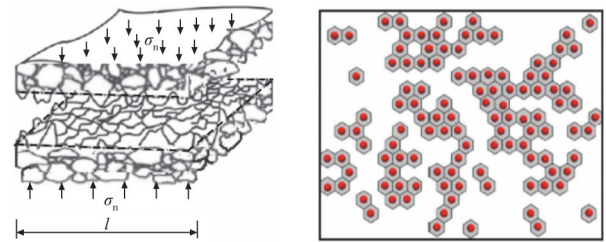


图8 粗颗粒填料颗粒接触特性^[64]

Fig. 8 Particle contact characteristics of coarse particle packing^[64]

考虑到建筑垃圾颗粒破碎后其抗剪强度与法向应力的非线性关系,其内摩擦角无法用常数表示,杨映湖^[27]引入了表征摩擦角的概念^[65],对建筑垃圾再生骨料及级配碎石进行描述。

对比摩尔-库伦模型的计算数据后发现,两种非线性理论的计算结果具有一致性。然而,考虑到剪切过程中随着法向应力的增大,建筑垃圾粗颗粒颗粒破碎现象越显著,应力-应变曲线出现明显的波动跳跃,其抗剪强度亦呈现显著的非线性特征。但目前的非线性理论模型仍无法充分解释颗粒破碎对建筑垃圾剪切强度的影响机制,且未针对建筑垃圾填料的颗粒破碎特点建立相应的剪切强度理论公式。

实际上,剪切过程中颗粒破碎对剪切强度的影响机理极为复杂,需根据颗粒级配、颗粒形态变化,结合粗细颗粒不同比例,判断颗粒间的面-面、点-面、点-点接触形式。颗粒破碎虽可能增大接触面积和嵌合角度,增强咬合作用,但也会磨圆摩擦棱角,减弱剪胀效应和摩擦效应。建筑垃圾等颗粒散体材料的剪切强度主要来源于摩擦作用和咬合作用,内摩擦角(摩擦因数)主要用于描述土体颗粒的滑动摩擦临界状态,而颗粒嵌锁接触角度决定了其咬合强度的大小,这部分强度无法由内摩擦角表征。因此,只有综合考虑法向应力、颗粒接触角度、颗粒

面接触内摩擦角(摩擦因数)及颗粒接触面积,并建立四者间的关联,才能得到适用于描述颗粒破碎影

响的剪切强度理论(图 9),从而精准描述建筑垃圾再生填料的剪切行为。

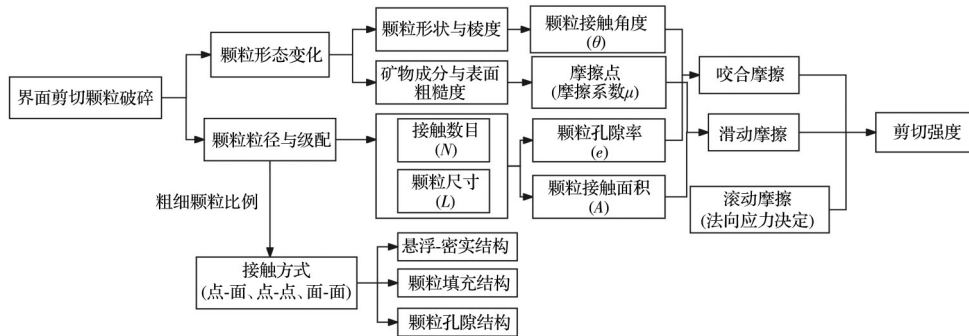


图 9 颗粒破碎对剪切强度的影响机理

Fig. 9 Influence mechanism of particle breakage on shear strength

2 建筑垃圾混合填料剪切强度研究

建筑垃圾主要为再生粗粒土,当颗粒尺寸较大时,细颗粒含量较少,不足以填充粗颗粒间孔隙,颗粒间多呈点接触。随着土体所受外力增大,颗粒接触点局部压力较高,易产生应力集中,进而引发颗粒破碎,最终导致土体剪切强度降低^[39,66]。因此,在使用建筑垃圾再生料作为路基填料时,研究人员将其与细粒土混合或掺入其他骨料,以有效提升填料整体剪切强度。

2.1 混合土体剪切强度

Xue 等^[67]指出,碎砖等建筑垃圾可与其他耐用骨料混合,改善其在路面基层中的应用性能。杨德生等^[68]对掺与不掺建筑垃圾的粉质黏土开展剪切特性研究,结果表明,掺建筑垃圾的混合土体黏聚力和摩擦角显著提高,剪切性能显著提升。李丽华等^[69]发现,建筑垃圾-砂土混合料的界面峰值剪切强度显著高于纯砂土,当建筑垃圾掺量为 40%~60% 时,能有效提高砂土抗剪强度,最大值可达纯砂的 1.5 倍。翟聚云等^[70]将不同级配的建筑垃圾与膨胀土混合,研究了建筑垃圾-膨胀土地基回填料的剪切特性,结果表明,随着建筑垃圾掺量的增加,混合料剪切性能得到有效改善。

对于建筑垃圾-细颗粒混合填料,建筑垃圾中的大颗粒在土中起到骨架咬合作用。在竖向压力与剪切力作用下,松散的碎石、碎砖、碎混凝土块与细颗粒之间相互挤压密实,大颗粒之间形成较高的咬合骨架,具有相对较高的承载力,使土体剪切面无法平直穿越土体(图 10),从而提高了土体的抗剪强度^[68-69]。毛赞庆等^[71]、赵鹏等^[72]分别发现,掺入建筑垃圾后细颗粒(粉土)、碎石的摩擦强度主要包括大

颗粒与大颗粒间、大颗粒与小颗粒间的滑动摩擦和咬合摩擦;由于掺入的建筑垃圾粗颗粒多为棱角状,其咬合摩擦力显著增大,有利于提升建筑垃圾混合填料的剪切特性。

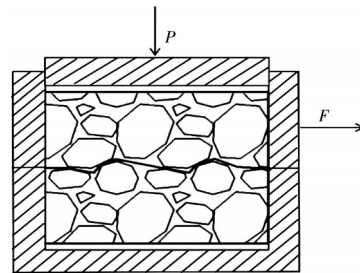


图 10 含建筑垃圾土的剪切面^[68]

Fig. 10 Shear surface of soil containing construction waste^[68]

总的来说,建筑垃圾作为破碎性较强的粗粒土,与碎砖或碎石、粉质黏土、纯砂、膨胀土、粉土等细颗粒土体混合时,可作为颗粒骨架。在剪切过程中,细颗粒能持续填充大颗粒间的孔隙,增加颗粒间接触点数量,提高土体密实度;在轴向压力作用下,建筑垃圾破碎度降低,能有效弥补其高破碎性缺陷。相比单一建筑垃圾或细粒土,混合填料的剪切性能显著提升。

2.2 混合土体最优比例

将建筑垃圾填料与细粒土混合,能在一定程度上改善混合土体的剪切性能,但建筑垃圾填料掺量过多或过少均会削弱整体剪切性能。因此,需确定建筑垃圾与不同细粒土的最优配比,以实现剪切强度的有效提升。

如图 11 所示,将不同粒径的建筑垃圾与不同细粒土按最优配比混合后,相较单一纯细粒土,其剪切强度随着竖向荷载的增加而显著提高。混合土体中的建筑垃圾主要由废弃混凝土、砖块按不同比

例和级配组成。当建筑垃圾——混凝土与砖块按质量比 1:1 掺入黄土时,混合土体性能最优;原因在于黄土具有良好的黏结性与可塑性,其物理性质与建筑垃圾近似,二者能够形成良好结合,进而提升混合土体整体强度与稳定性。当建筑垃圾——混凝土与砖块按质量比 7:3 掺入砂土时,混合土体性能相对较好;砂土为松散颗粒土,其颗粒间摩擦力较小,掺入建筑垃圾后能填补孔隙并发挥建筑垃圾的骨架支撑作用,从而提高混合土体的抗剪强度。当建筑垃圾——混凝土与砖块按质量比 6:4 掺入黏土时,混合土体性能表现最差,可能是因为黏土具有较高的黏性和塑性,与建筑垃圾混合后可与可溶性物质发生化学反应并形成不均匀混合物,进而导致土体强度和稳定性降低。结合不同细粒土的结构性质差异,以往研究表明,粗集料-细颗粒二元混合物的性质主要由粗集料的含量和性质决定^[73],细颗粒则通过填充和润滑作用影响混合土体的密实度和稳定性。众多研究者通过三轴试验、直剪试验等手段探究粗集料对二元混合料力学性能的影响规律。建筑垃圾作为粗集料,其组分、含量、粒径分布等特性与不同细粒土(如黄土、砂土、黏土等)混合时,产生不同的相互作用和效果。混合料性能不仅取决于建筑垃圾自身特性,同时也受细粒土物理化学性质的显著影响。后续研究需综合考虑建筑垃圾与细粒土的特性,选择有利于发挥混合填料剪切强度的配比及组分。

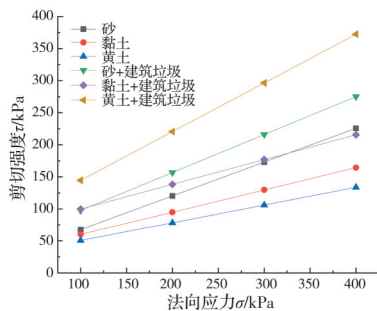


图 11 混合土体最优比例下的剪切强度曲线^[74-76]

Fig. 11 Shear strength curves of mixed soil under optimal proportion^[74-76]

总的来说,由于不同细粒土自身性质存在差异,当其与建筑垃圾混合时,为使混合土体达到最佳剪切强度,二者的最佳掺量也存在明显差异。如与砂土、膨胀土、黄土等混合时,建筑垃圾的最佳掺量为 40%~70%,而对于黏土,其最优掺量为 20%。这说明不同混合填料利于剪切强度发挥的最优配比各不相同。同时,不同混合填料在最优配比下的剪切强度也存在差异(如表 3 所示)。

表 3 混合土体最优比例下的剪切强度

Table 3 Shear strength of mixed soil under optimal proportion

混合种类	最优混合比例 (细粒土:建筑垃圾)	内摩擦 角/(°)	内黏聚 力/kPa	剪切强 度/kPa
纯砂 ^[74]	10:0	27.81	14.86	225.85
黏土 ^[75]	10:0	19.19	25.25	164.47
黄土 ^[76]	10:0	15.51	22.82	133.83
砂+	4:6	30.61	38.60	275.25
建筑垃圾 ^[74]	(13.2~26.5 mm)			
黏土+	8:2	21.10	61.30	215.65
建筑垃圾 ^[75]	(4.75~9.5 mm)			
黄土+	5.5:4.5	37.20	68.80	372.42
建筑垃圾 ^[76]	(5~10 mm)			

2.3 混合土体剪切强度的宏微观机理

目前,已有学者开展将不同比例建筑垃圾掺入细砂、粉土、黄土、膨胀土、黏土等细粒土的剪切特性研究(表 4)。在宏观强度方面,Prajapati 等^[80]通过三轴不固结不排水试验发现,将建筑垃圾掺入土壤中后,与原始土壤相比,其黏聚力降低 30.35%,内摩擦角增加 85.44%。Kianimehr 等^[81]利用再生混凝土骨料(RCA)提高黏土的剪切强度,结果表明,随着 RCA 含量的增加,混合料剪胀与咬合作用增强,表现为黏聚力与峰值摩擦角均有所提高。在此基础上,部分学者采用离散单元法分析建筑垃圾-细颗粒混合土体剪切过程中的宏微观参数变化规律。黄时强^[82]采用离散单元法考虑颗粒形状效应建立不同 RCA 含量下 RCA-砂混合物的剪切模型,研究 RCA 含量对微观行为的影响,分析混合物配位数、PDF 和接触力的变化特征等微观特性,并与宏观结果进行关联。Wang 等^[79]针对石灰石废渣-RCA 剪切界面开展一系列研究,从宏观角度分析了不同垂直应力与表面粗糙度对剪切力学性能的影响。

然而,在不同细粒土中掺入建筑垃圾时,通常存在一个最优掺量,使混合料的抗剪强度达到最大值。但目前有关建筑垃圾混合填料的剪切力学机理研究大多仅针对单一细颗粒土展开,缺乏对不同细粒土掺入建筑垃圾后性能提升差异的统一对比与系统分析,难以揭示不同混合料最优掺量存在差异的微观机理。为全面阐述不同细粒土掺入建筑垃圾后存在最优抗剪强度掺量的内在机理,后续研究需重点关注不同性能提升条件下混合土体的最优掺量微观机理、相互作用机制及性能提升差异根源,进而对比何种细粒土与建筑垃圾混合可实现最优剪切性能。

表4 建筑垃圾与不同细粒土混合的剪切强度提升机理

Table 4 Shear strength enhancement mechanisms of mixing construction waste with different fine-grained soils

建筑垃圾+细粒土	来源	最优混合比例	提升机理
建筑垃圾+砂	文献[32]	当建筑垃圾掺量为40%~60%时,内摩擦角和黏聚力最大	当建筑垃圾掺量为40%或者60%时,掺入的建筑垃圾经过压实足以形成咬合密实的骨架,能够有效提升剪切强度
建筑垃圾+砂	文献[74]	在建筑垃圾中掺入40%或60%的纯砂能有效提高剪切强度,最高可达纯砂的1.5倍	
建筑垃圾+砂	文献[77]	当河沙与建筑垃圾比例达到4:6时,剪切强度达到最佳	
建筑垃圾+膨胀土	文献[70]	综合胀缩变形、固结及抗剪强度特性分析,建筑垃圾含量40%~50%时为最优配比	根据不同建筑垃圾含量的变形特征分析其剪切强度机理,当建筑垃圾含量在40%时,随着含水量增加,促使颗粒之间滑移,使土体进一步挤密,表现出良好的颗粒级配特征
建筑垃圾+黄土	文献[76]	当黄土掺入量为30%~70%时,混合料的剪切强度变大,当建筑垃圾与黄土掺量比例为5.5:4.5时,剪切强度最大	当建筑垃圾填料含量较低时(<30%),建筑垃圾之间的孔隙绝大部分由黄土填充;在30%~70%时,颗粒间的接触面积增加,粗细颗粒相互填充、胶结,粗颗粒间的摩擦力增大,剪切强度明显提高;超过70%时,建筑垃圾形成骨架,细颗粒难以填充骨架之间的孔隙,使颗粒间的稳定性降低,咬合力减小,剪切强度增幅较小
建筑垃圾+黏土	文献[75]	当建筑垃圾掺量为20%时,剪切强度最大	当建筑垃圾掺量大于20%时,土体中细颗粒含量越来越少,黏聚力变小,后期因细颗粒比例减少导致的黏聚力下降大于因建筑垃圾掺入导致的黏聚力增长幅值,引起剪切强度提升增幅下降
建筑垃圾+石灰等	文献[78-79]	当建筑垃圾掺量为40%时,混合料的剪切强度最大	在石灰等耐用性材料加入建筑垃圾填料后,混合料内的建筑垃圾骨料形成镶嵌结构,增加了抗剪切强度。当建筑垃圾和石灰等材料的掺入比例为4:6时,随着建筑垃圾骨料的增加,结构由镶嵌结构转变为接触结构,形成弱接触面,导致剪切强度降低

3 建筑垃圾-土工合成材料界面剪切强度

目前,学者们对建筑垃圾加筋土应用于路基工程方面的研究较多。由于建筑垃圾填料存在孔隙多、强度低、破碎程度高、变异性大等缺陷,为了减少其缺陷,需在建筑垃圾中掺入适量的土工材料,通过土体与土工材料相互摩擦产生的“潜锁效应”,起到相互传递拉应力、共同承担剪应力和压应力的作用,从而提高建筑垃圾的强度和稳定性。建筑垃圾与土工合成材料的界面剪切性能直接影响建筑垃圾作为填料在加筋结构中的应用^[83]。

3.1 界面强度特性

一方面,在建筑垃圾中铺设土工材料可使土体成为加筋土,具有较高的抗拉强度,Arulrajah等^[84]、Vieira等^[85-86]评估了建筑垃圾再生填料作为土工加筋填充材料的可行性,认为其路用性较好;另一方面,土工材料的约束作用能有效提高剪切强度,在满足路基填料剪切强度指标的前提下,其内摩擦角和黏聚力可应用于土工合成材料加固结构中。一些学者以混凝土碎块^[87,90]、废砌块^[87]、碎砾石^[88]、废弃混凝土-黏土砖^[89]等为建筑垃圾再生填料,通过直剪试验将土工格栅、土工格室、车轮胎等加入再生填料后发现,因粗颗粒填料与土工材料的互锁效应,可有效增强界面剪切强度。然而,建筑垃圾的掺入

量和含水率对界面剪切强度具有显著影响。李丽华等^[69,91]认为,当建筑垃圾掺入量为60%时,混合土骨架最密实,与土工材料进行复合加筋时剪切性能最优。周芬等^[92]、Vieira等^[93]发现,建筑垃圾再生填料含水量增加会降低界面剪切强度。建筑垃圾再生填料以粗颗粒为主,其剪切强度主要取决于颗粒间的接触摩擦;当没有细颗粒作为胶结剂混合时,水的渗透对颗粒间接触摩擦产生消极影响,降低剪切强度,进而导致加筋路基过早破坏。

总的来说,建筑垃圾加筋土具有较好的剪切强度,但在实际应用中需注意其掺入量、土工材料类型等影响因素,并通过添加细颗粒等方式进一步优化其剪切性能。

3.2 界面剪切机理

在建筑垃圾再生填料中加入土工格栅、土工格室、废弃轮胎均能提高其服役性能。研究不同土工材料下的土-筋剪切界面时发现,土工格栅因具有强度高、延伸率低、可与土体形成嵌合体等特点^[94],作为平面加筋材料,主要通过肋条提供摩擦力以抵抗剪应力。在不同剪切位移条件下,其三向格栅与双向格栅的界面剪切强度存在差异。土工格室作为立体加筋结构,主要通过侧向约束力与摩擦力提高土体剪切强度。相较土工格栅、土工格室,废弃轮胎材料是更为优异的三维加筋材料,其侧壁约束力

与摩阻力可增强颗粒间咬合作用,提高土体剪切强度,尤其当建筑垃圾再生粗颗粒发生破碎时,轮胎加筋可限制颗粒裂缝在横向和竖向的发展,提升土体整体性与连续性^[87]。

在建筑垃圾砌块与建筑垃圾混凝土填料中分别掺入轮胎片,由于轮胎片自身具有弧度和纹路,可增大填料与轮胎片之间的摩擦力;在外荷载作用下,轮胎片产生的包裹力使颗粒产生破碎、滚动、翻转与填充,整体处于较密实状态,可有效抵抗剪应力。混凝土颗粒形态不规则、表面粗糙有棱角,受外荷载作用时,轮胎片与颗粒填料相互作用,因混凝土颗粒刚度大于轮胎片而刺入其中,轮胎片则对颗粒产生反向作用力,提高试样内部黏聚力与摩擦力,进而提高界面剪切强度^[87,95]。

根据常规的加筋土试验,研究学者采用的填料多数为砂土、碎石、黏土等^[96-98]。这类填料成分单一、组分稳定,且具有支撑体系强、颗粒破碎率低、适应性强等特点,在剪切过程中破碎现象相对较少,剪切行为较为规律且易于预测,因此这类土体的界面剪切特性研究已较为透彻。而建筑垃圾成分复杂,包括混凝土块、砖块、砌块等,作为填土材料时易受颗粒粒径级配、形状、表面粗糙度及吸水率等因素影响;在剪切过程中,不同组分的建筑垃圾填料颗粒破碎性高,剪切界面并不稳定。目前,不同组分引发的颗粒破碎对界面剪切性能的作用机制尚不清晰,无法为加筋土工程的设计和施工提供更为精确且可靠的理论依据。

3.3 建筑垃圾加筋土体剪切理论模型

在建筑垃圾土-筋界面剪切模型和数值理论研究中,李丽华等^[69]引入界面摩擦系数,以描述界面剪切特性;阎凤翔等^[89]基于界面摩阻力与法向应力、筋材类型等的关系建立了界面摩阻特性关系式,用以分析界面剪切变形;周芬等^[92]提出相互作用系数概念,用以表征建筑垃圾与土工合成材料的界面剪切特性,并将其与天然土体-土工合成材料的相互作用系数对比,发现建筑垃圾体系的作用系数更高;吴建奇等^[99]建立由3种关系式构成的模型,描述不同土工合成材料与RCA的加筋界面剪切特性,并考虑界面剪切的剪胀特性,建立描述剪胀规律的多项式表达式曲线模型;曹文哲等^[33]联立剪切刚度(K)与阻尼比(D)建立表达式,用以评价土-筋界面的循环剪切特性。

学者们通过开展建筑垃圾土-不同土工合成材料界面剪切试验,并基于试验结果建立了一系列界面参数与理论模型;但目前所建立的模型参数无法有效针对性描述建筑垃圾加筋土界面剪切及破碎

现象。同时,大量直剪和三轴试验结果表明:废混凝土骨料、碎砖、碎石等材料在剪切过程中呈现明显应变软化行为,即在最大膨胀比出现峰值剪切强度后,剪应力逐渐减小,最终趋于残余强度;沥青、回收玻璃等材料在低应力下表现为临界状态的体积应变与轴向应变膨胀,而在较高应力作用下则发生体缩现象,呈现应变硬化特征^[100]。此外,不同填料加筋土的界面剪切强度亦存在差异;因具有较高材料强度和咬合力,混凝土界面剪切强度显著高于碎砖;而沥青骨料具有较低摩擦系数和润滑效应,界面强度表现为最低^[101]。因此,在现有研究中建立的单一本构模型缺乏适用性与准确性,难以准确描述不同建筑垃圾加筋土界面的剪切强度及体变规律。未来需深入研究不同工况下的土-筋界面参数,通过增设其他模型进行对比验证,以建立更加准确且适用的理论模型。

4 存在的问题及展望

1)建筑垃圾填料剪切强度。建筑垃圾在剪切过程中的颗粒破碎对其剪切强度影响很大,在强度特性上,再生填料基本满足路基填料剪切强度要求,其应力-应变曲线均呈现强应变硬化、弱应变软化和小幅度先剪胀后剪缩的特征。然而,再生混凝土颗粒、再生砖颗粒、再生碎石颗粒等不同种类的建筑垃圾剪切破碎前后颗粒形态与分布的变化规律决定着颗粒破碎的类型和模式;在剪切过程中,再生混凝土骨料以大颗粒、尖角凸起破碎及砂浆磨耗为主,破碎后小颗粒接触方式为面-面接触;再生砖骨料则表现为多种形式的边角削弱及大块体断裂,破碎后颗粒接触方式为面-面接触;在颗粒磨耗过程中,再生砂浆骨料颗粒表面可能变得相对光滑。因此,后续需进一步研究建筑垃圾颗粒破碎影响剪切强度的细观机理,并建立相关理论模型,以解释颗粒破碎对建筑垃圾剪切强度的影响。

2)混合土体剪切强度。掺入不同细粒土后,建筑垃圾可有效提高土体剪切强度,如砂土、膨胀土、黏土、黄土、粉土等。然而,目前针对不同细粒土掺入建筑垃圾后性能提升差异的统对比和深入分析尚显不足;特别是不同性能提升条件下混合土体的最优掺量、微观机理、相互作用机制及性能提升差异等的成因,缺乏系统而深入的研究。因此,开展关于不同细粒土与建筑垃圾混合后的剪切特性系统研究,对于提出建筑垃圾最优混合土体的方法和思路至关重要。

3)土-筋界面剪切强度。目前,针对建筑垃圾不同组分及土体颗粒特征差异对界面剪切强度的影

响研究尚不充分,相关研究主要集中在混凝土碎块、砌块这两类填料的界面剪切原理上。相比其他类型加筋填料,建筑垃圾在剪切过程中存在成分复杂、破碎性高等特征。为全面理解建筑垃圾与土工材料的界面作用机制,需深入分析其他填料与不同组分建筑垃圾的剪切界面特征,通过宏微观参数的变化揭示其作用机理,该研究将有助于提升建筑垃圾在路基工程中的稳定性与可靠性。

5 结语

近年来,建筑垃圾再生填料在路基工程中的剪切性能受到越来越多的关注。建筑垃圾作为松散性粗粒土在剪切过程中的强度和破碎特性受多种因素影响,其中颗粒破碎对填料剪切强度影响显著,主要通过改变颗粒级配、形状和排列方式实现强度调控。随着施工标准的革新和施工技术的发展,人们对路基填料的性能要求也越来越高;而建筑垃圾通过掺入适量细粒土可实现剪切强度的显著提升,既能弥补建筑垃圾再生粗颗粒的高破碎率缺陷,又能满足路基填料的剪切强度指标要求。其作为加筋结构的土工合成材料能显著增强建筑垃圾土路基的抗拉和剪切强度,而土-筋界面剪切特性的研究是保障建筑垃圾土路基稳定性和耐久性的基本要求。

参考文献

- [1] 张益. 40亿吨建筑垃圾资源化处置! 机遇与对策[EB/OL]. (2023-11-05)[2023-12-30]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Z84yzroUc-VGPOdyIDRQMg>.
Zhang Y. Recycling disposal of 40 billion tons of construction waste! Opportunities and countermeasures [EB/OL]. (2023-11-05)[2023-12-30]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Z84yzroUc-VGPOdyIDRQMg>. (in Chinese)
- [2] 胡魁. 建筑垃圾高效分选关键技术及在公路工程中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
Hu K. Key technology research of efficient separation of construction & demolition waste in pavement engineering [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [3] 赵纪飞. 建筑垃圾再生材料作为路基填料的适用性研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
Zhao J F. The applicability of the construction waste recycled materials as subgrade filling[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [4] Zhang J H, Ding L, Li F, et al. Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255: 120223.
- [5] Liu L L, Li Z, Cai G J, et al. Humidity field characteristics in road embankment constructed with recycled construction wastes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120977.
- [6] 夏慧慧, 王坚, 李巍. 建筑垃圾在路基处理中的应用[J]. *城市道桥与防洪*, 2009(7): 50-52, 253.
Xia H H, Wang J, Li W. Application of building garbage in treatment of roadbed[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2009(7): 50-52, 253. (in Chinese)
- [7] Xu Y F. In-situ shear strength of compacted demolition waste[J]. *Powder Technology*, 2019, 352: 72-78.
- [8] Mymrin V A, Alekseev K P, Catai R E, et al. Construction material from construction and demolition debris and lime production wastes[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 79: 207-213.
- [9] de Juan M S, Gutiérrez P A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 872-877.
- [10] Soleimanbeigi A, Edil T B. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(5): 04015011.
- [11] Soleimanbeigi A, Tanyu B F, Aydilek A H, et al. Evaluation of recycled concrete aggregate backfill for geosynthetic-reinforced MSE walls[J]. *Geosynthetics International*, 2019, 26(4): 396-412.
- [12] Bai G L, Zhu C, Liu C, et al. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 240: 117978.
- [13] 刘新荣, 涂义亮, 王鹏, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(8): 1425-1434.
Liu X R, Tu Y L, Wang P, et al. Particle breakage of soil-rock aggregate based on large-scale direct shear tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(8): 1425-1434. (in Chinese)
- [14] 徐永福. 基于颗粒破碎的粗粒土剪切强度的模拟分析[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1409-1414.
Xu Y F. PFC^{2D} simulation of rockfill shear strength based on particle fragmentation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1409-1414. (in Chinese)
- [15] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎的粗粒土剪胀性统一本构模型[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1381-1388.
Jia Y F, Chi S C, Lin G. Dilatancy unified constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1381-1388. (in Chinese)

- [16] 奚悦. 考虑颗粒破碎的粗粒土直剪试验离散元模拟[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(32): 191-195.
Xi Y. Simulation of direct shear test on coarse-grained soil considering particle crushing by discrete element analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(32): 191-195. (in Chinese)
- [17] 蔡正银, 李小梅, 关云飞, 等. 堆石料的颗粒破碎规律研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 923-929.
Cai Z Y, Li X M, Guan Y F, et al. Particle breakage rules of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 923-929. (in Chinese)
- [18] 蔡新合, 陈子玉, 李国英. 考虑颗粒破碎能耗的堆石料剪胀方程及其应用[J]. 水利水运工程学报, 2024(3): 127-135.
Cai X H, Chen Z Y, Li G Y. Shear dilatancy equation of rockfill considering particle breakage energy consumption and its application[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(3): 127-135. (in Chinese)
- [19] Indraratna B, Sun Q D, Nimbalkar S. Observed and predicted behaviour of rail ballast under monotonic loading capturing particle breakage[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(1): 73-86.
- [20] Indraratna B, Salim W, Rujikiatkamjorn C. Advanced rail geotechnology-ballasted track[M]. London: CRC Press, 2011.
- [21] Nakata Y, Hyde A F L, Hyodo H, et al. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test[J]. Géotechnique, 1999, 49(5): 567-583.
- [22] Lobo-Guerrero S, Vallejo L E. Analysis of crushing of granular material under isotropic and biaxial stress conditions[J]. Soils and Foundations, 2005, 45(4): 79-87.
- [23] Arulrajah A, Ali M M Y, Piratheepan J, et al. Geotechnical properties of waste excavation rock in pavement subbase applications[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(7): 924-932.
- [24] 徐宁, 徐永福. 建筑垃圾在高速公路路基填筑中的现场直剪试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(18): 263-268.
Xu N, Xu Y F. In-situ direct shear test investigation of construction waste in subgrade filling of expressway[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(18): 263-268. (in Chinese)
- [25] 杨映湖, 高德彬, 严耿升, 等. 建筑垃圾再生粗粒料抗剪强度试验研究[J]. 路基工程, 2021(2): 59-63.
Yang Y H, Gao D B, Yan G S, et al. Experimental study on shear strength of coarse-grained material recycled from construction waste[J]. Subgrade Engineering, 2021(2): 59-63. (in Chinese)
- [26] 柯善伟. 不同级配下建筑垃圾静动剪切试验特性研究[D]. 温州: 温州大学, 2020.
Ke S W. Study on static and dynamic shear test characteristics of construction waste under different levels[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020. (in Chinese)
- [27] 杨映湖. 建筑垃圾再生骨料物理力学特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
Yang Y H. Experimental study on physical and mechanical properties of recycled construction waste aggregate[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [28] 杨帆, 董晓强, 苗晨曦, 等. 废旧混凝土再生细骨料抗剪强度的水敏性研究[J]. 混凝土, 2022(3): 57-59, 68.
Yang F, Dong X Q, Miao C X, et al. Study on water sensitivity of shear strength of recycled fine aggregate of waste concrete[J]. Concrete, 2022(3): 57-59, 68. (in Chinese)
- [29] Bennert T, Papp Jr W J, Maher A, et al. Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications[J]. Transportation Research Record, 2000, 1714(1): 33-39.
- [30] 白柯楠, 高德彬, 马学通, 等. 考虑颗粒破碎的建筑垃圾再生粗粒料大型剪切试验[J]. 路基工程, 2021(1): 46-50.
Bai K N, Gao D B, Ma X T, et al. Large-scale shear test on coarse-grained material recycled from construction waste considering grain breakage[J]. Subgrade Engineering, 2021(1): 46-50. (in Chinese)
- [31] 毛赞庆, 佟涛, 刘强, 等. 颗粒粒度与级配对饱和建筑垃圾剪切强度的影响[J]. 人民长江, 2021, 52(11): 190-195.
Mao Z Q, Tong T, Liu Q, et al. Effect of particle size and gradation on shear strength of saturated construction waste[J]. Yangtze River, 2021, 52(11): 190-195. (in Chinese)
- [32] 秦浪灵. 建筑垃圾加筋土力学性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
Qin L L. Study on mechanical properties of reinforced construction and demolition of materials[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [33] 曹文哲, 方亚男, 刘帅帅. 建筑垃圾土循环剪切有限元数值模拟[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(27): 35-37.
Cao W Z, Fang Y N, Liu S S. Finite element numerical simulation of cyclic shear of construction waste soil[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2021, 38(27): 35-37. (in Chinese)
- [34] Hentschel M, Page N. Selection of descriptors for particle shape characterization[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2003, 20(1): 25-38.
- [35] Li Z, Liu L L, Yan S H, et al. Properties of microscopic particle morphology and particle contact of renewable

- construction waste mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 207: 190-205.
- [36] Lee K L, Seed H B. Drained strength characteristics of sands[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1967, 93(6): 117-141.
- [37] Shen J H, Wang X, Cui J, et al. Shear characteristics of calcareous gravelly sand considering particle breakage[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(3): 130.
- [38] 王冠, 陈坚. 路基粗粒土抗剪强度影响因素分析[J]. *路基工程*, 2015(3): 154-157.
Wang G, Chen J. Analysis on factors affecting shear strength of coarse-grained soil of subgrade[J]. *Subgrade Engineering*, 2015(3): 154-157. (in Chinese)
- [39] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3649-3654.
Wang G J, Yang C H, Zhang C, et al. Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3649-3654. (in Chinese)
- [40] 曹志翔, 宋新伟, 赵素华, 等. 颗粒粒径对粗粒土抗剪强度影响的试验研究[J]. *高原农业*, 2019, 3(3): 315-322.
Cao Z X, Song X W, Zhao S H, et al. Experimental study on influence of particle size on shear strength of coarse-grained soil[J]. *Journal of Plateau Agriculture*, 2019, 3(3): 315-322. (in Chinese)
- [41] 傅华, 凌华, 蔡正银. 粗颗粒土颗粒破碎影响因素试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(1): 75-79.
Fu H, Ling H, Cai Z Y. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(1): 75-79. (in Chinese)
- [42] 陆建明. 粗颗粒土抗剪强度影响因数分析[J]. *山西建筑*, 2011, 37(17): 79-80.
Lu J M. Impact factors on shear strength of coarse grained soil[J]. *Shanxi Architecture*, 2011, 37(17): 79-80. (in Chinese)
- [43] Shahnazari H, Rezvani R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: an experimental study[J]. *Engineering Geology*, 2013, 159: 98-105.
- [44] Sun Y F, Zheng C J. Breakage and shape analysis of ballast aggregates with different size distributions[J]. *Particuology*, 2017, 35: 84-92.
- [45] Wang Y X, Shao S J, Wang Z. Effect of particle breakage and shape on the mechanical behaviors of granular materials[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019(1): 7248427.
- [46] 张家铭, 蒋国盛, 汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(7): 2043-2048.
Zhang J M, Jiang G S, Wang R. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 2043-2048. (in Chinese)
- [47] 赵光思, 周国庆, 朱锋盼, 等. 颗粒破碎影响砂直剪强度的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(3): 291-294.
Zhao G S, Zhou G Q, Zhu F P, et al. Experimental research on the influence of particle crushing on direct shear strength of sand[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(3): 291-294. (in Chinese)
- [48] 胡万雨, 覃燕林, 刘恩龙, 等. 粗粒土颗粒破碎大型直剪试验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(2): 31-33, 98.
Hu W Y, Qin Y L, Liu E L, et al. Large-scale direct shear experimental study on particle breakage of coarse-grained soils[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(2): 31-33, 98. (in Chinese)
- [49] 汪永雄. 砂土颗粒破碎机理及力学特性的宏-微观研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
Wang Y X. Macro and micro study on the mechanism of particle breakage and mechanical response of sand[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [50] 冯大阔, 张建民. 循环直剪条件下粗粒土与结构接触面颗粒破碎研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 767-773.
Feng D K, Zhang J M. Particle breakage of gravel-structure interface under cyclic shear[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 767-773. (in Chinese)
- [51] 雷壮, 魏玉峰, 李远征, 等. 粗粒土直剪试验剪切速率对抗剪强度的影响研究[J]. *中外公路*, 2020, 40(6): 291-296.
Lei Z, Wei Y F, Li Y Z, et al. Study on influence of shear rate on shear strength in direct cut test of coarse grain soil[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(6): 291-296. (in Chinese)
- [52] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
Guo Q G. Engineering characteristics and application of coarse-grained soil[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1998. (in Chinese)
- [53] Li X, Liu Y Y, Qian G P, et al. Numerical investigation into particle crushing effects on the shear behavior of gravel[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2023, 35(2): 209-219.
- [54] Fang C F, Gong J, Nie Z H, et al. DEM study on the

- microscale and macroscale shear behaviours of granular materials with breakable and irregularly shaped particles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 137: 104271.
- [55] Vesic A S, Clough G W. Behavior of granular materials under high stresses[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(3): 661-688.
- [56] Bjoern K, Aane S. Compressibility of some coarse-grained materials[J]. *Materials Science*, 1972: 245-251.
- [57] 潘远阳. 颗粒形态对粗粒土剪切破碎力学特性的影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
Pan Y Y. Study on the influence of particle morphology on shear fracture mechanical properties of coarse grained soils[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [58] 程世涛. 粗粒土颗粒剪切破碎特性及其对强度影响的三轴细观数值试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
Cheng S T. Meso-numerical study of triaxial tests on the particle breakage properties of coarse-grained soil under shearing and its influence on strength[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [59] Barrett P J. The shape of rock particles, a critical review [J]. *Sedimentology*, 1980, 27(3): 291-303.
- [60] Blott S J, Pye K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification[J]. *Sedimentology*, 2008, 55(1): 31-63.
- [61] Liu Z, Yu X, Wan L. Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, 11(1): 21-35.
- [62] 刘星志, 刘小文, 陈铭, 等. 基于 3 个不等粒径颗粒接触模型的土-水特征曲线[J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 651-656.
Liu X Z, Liu X W, Chen M, et al. Soil-water characteristic curve based on particle contact model using three unequal particle sizes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 651-656. (in Chinese)
- [63] 李腾. 建筑垃圾杂填土强度特性的试验研究和数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Li T. Experimental studies and numerical analyses of the strength characteristics of construction miscellaneous fills [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [64] 徐永福. 颗粒破碎对粗颗粒填料剪切强度的影响[J]. *固体力学学报*, 2018, 39(5): 513-521.
Xu Y F. Effect of particle breakage on shear strength of coarse granular materials[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2018, 39(5): 513-521. (in Chinese)
- [65] Indraratna B, Wijewardena L S S, Balasubramaniam A S. Large-scale triaxial testing of grey wacke rockfill[J]. *Géotechnique*, 1993, 43(1): 37-51.
- [66] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. *水利学报*, 1987, 18(5): 59-65.
Guo Q G. Experimental study on shear strength characteristics of coarse-grained soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1987, 18(5): 59-65. (in Chinese)
- [67] Xue Y X, Arulrajah A, Narsilio G A, et al. Washed recycled sand derived from construction and demolition wastes as engineering fill materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 358: 129433.
- [68] 杨德生, 张孟喜, 崔振清, 等. 含建筑垃圾土的物理力学特性[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2011, 17(6): 792-798.
Yang D S, Zhang M X, Cui Z Q, et al. Physical and mechanical behavior of soil with construction waste[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2011, 17(6): 792-798. (in Chinese)
- [69] 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)
- [70] 翟聚云, 樊姝芳, 言志信, 等. 建筑垃圾膨胀土回填地基工程特性及应用研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(3): 321-327.
Zhai J Y, Fan S F, Yan Z X, et al. Study on the engineering characteristics and application of construction waste expansive soil backfill foundation[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 52(3): 321-327. (in Chinese)
- [71] 毛赞庆, 王善涛, 刘强, 等. 添加碎石对红砖碎料剪切强度的影响[C]//中冶建筑研究总院有限公司. 2021年工业建筑学术交流会议论文集(下册). 2021: 592-595.
Mao Z Q, Wang S T, Liu Q, et al. Effect of adding crushed stone on shear strength of construction waste [C]//China Metallurgical Construction Research Institute Co., Ltd. Proceedings of the 2021 Industrial Architecture Academic Exchange Conference (Volume II). 2021: 592-595. (in Chinese)
- [72] 赵鹏, 侯振国, 罗浩, 等. 建筑垃圾改良黄河冲积粉土的力学特性试验研究[J]. *河南科学*, 2022, 40(10): 1611-1618.
Zhao P, Hou Z G, Luo H, et al. Experimental study on mechanical properties of the Yellow River alluvial silt modified by construction waste[J]. *Henan Science*, 2022, 40(10): 1611-1618. (in Chinese)
- [73] Zhao H F, Zhang L M. Effect of coarse content on shear behavior of unsaturated coarse granular soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(12): 1371-1383.

- [74] 李炯. 河砂与建筑垃圾混合料回填路基工程特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
Li J. Study on characteristics of the mixture of riversand and construction waste in backfill subgrade[D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [75] 潘云峰. 砖混类建筑垃圾改良高液限红黏土力学性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
Pan Y F. Study on the mechanical properties of improved high-liquid-limit red clay by brick-concrete construction waste[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022. (in Chinese)
- [76] 蔡乔. 建筑垃圾再生骨料改良黄土的抗剪强度特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
Cai Q. Study on shear strength characteristics of improved loess with recycled aggregate of construction waste[D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [77] Xu D S, Tang Z Y, Zhang L. Interpretation of coarse effect in simple shear behavior of binary sand-gravel mixture by DEM with authentic particle shape[J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 292-304.
- [78] Wang Q B, Zhang J, Liu K, et al. Study on performance tests and the application of construction waste as subgrade backfill[J]. Materials, 2021, 14(9): 2381.
- [79] Wang X, Jia Y, Ding Y, et al. Study on macroscopic and microscopic shear mechanical properties of the interface between limestone waste slag and concrete[J]. Computational Particle Mechanics, 2024, 11(2): 599-614.
- [80] Prajapati A, Rangwala H. Utilization of recycled construction and demolition waste in backfill soil[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2022, 8(5): 67.
- [81] Kianimehr M, Shourijeh P T, Binesh S M, et al. Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116792.
- [82] 黄时强. 基于离散单元法建筑垃圾宏观特性模拟试验研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
Huang S Q. Numerical study on macro and micro characteristics of construction waste based on discrete element method[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [83] 李丽华, 文贝, 裴尧尧, 等. 建筑垃圾加筋土性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(11): 971-979.
Li L H, Wen B, Pei Y Y, et al. Properties of reinforced soil filled with construction waste[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(11): 971-979. (in Chinese)
- [84] Arulrajah A, Piratheepan J, Disfani M M, et al. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement sub-base applications[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(8): 1077-1088.
- [85] Vieira C S, Pereira P M, de Lurdes Lopes M. Recycled construction and demolition wastes as filling material for geosynthetic reinforced structures. Interface properties [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 124: 299-311.
- [86] Vieira C S, Pereira P M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 103: 192-204.
- [87] 郑贞艺. 轮胎片加筋建筑垃圾的力学特性及工作机理分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.
Zheng Z Y. Mechanical properties and working mechanism of tire shreds reinforced building wastes[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [88] Tavakoli Mehrjardi G, Motarjemi F. Interfacial properties of geocell-reinforced granular soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4): 384-395.
- [89] 阎凤翔, 白晓红, 董晓强. 土工格栅-建筑渣土界面摩擦特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3939-3946.
Yan F X, Bai X H, Dong X Q. Experimental study of the frictional resistance characteristics of geogrids and construction residue interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3939-3946. (in Chinese)
- [90] Saberian M, Li J, Perera S T A M, et al. An experimental study on the shear behaviour of recycled concrete aggregate incorporating recycled tyre waste[J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120266.
- [91] 李丽华, 秦浪灵, 肖衡林, 等. 加筋建筑垃圾土大型动三轴试验及加筋机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1682-1695.
Li L H, Qin L L, Xiao H L, et al. Large dynamic triaxial test study on reinforcement mechanisms of reinforced construction waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1682-1695. (in Chinese)
- [92] 周芬, 朱恒, 杜运兴. 建筑垃圾与土工合成材料界面性能试验研究[J]. 公路工程, 2020, 45(4): 96-101, 157.
Zhou F, Zhu H, Du Y X. Experimental study on interface properties of constructions and demolition waste and geosynthetics[J]. Highway Engineering, 2020, 45(4): 96-101, 157. (in Chinese)
- [93] Vieira C S, Pereira P M. Use of mixed construction and demolition recycled materials in geosynthetic reinforced embankments[J]. Indian Geotechnical Journal, 2018, 48(2): 279-292.

- [94] 杨庆刚, 黄晓明, 柴建峰. 土工格栅路堤加筋效果的影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 131-137.
Yang Q G, Huang X M, Chai J F. Analysis of influence factors controlling effects of embankment reinforcement by geogrids[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(1): 131-137. (in Chinese)
- [95] Ma Q, Deng Q, Mou J, et al. Large-scale direct shear test on scrap tire strip reinforced brick powder[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 6046037.
- [96] 罗滔, 陈鹏, 邱焕峰, 等. 土工格栅与填料相互作用研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(增刊 1): 111-115.
Luo T, Chen P, Qiu H F, et al. Research progress on interaction between geogrid and filler[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(Sup 1): 111-115. (in Chinese)
- [97] Indraratna B, Ngo N T, Rujikiatkamjorn C. Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(3): 313-322.
- [98] 杜振江. 废旧轮胎加筋土研究进展综述[J]. 土工基础, 2019, 33(3): 326-330.
Du Z J. Review of the applications of shredded tire chips for the soil reinforcements[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019, 33(3): 326-330. (in Chinese)
- [99] 吴建奇, 李磊, 王军. 不同土工合成材料与再生混凝土骨料界面动剪切特性研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(1): 279-287.
Wu J Q, Li L, Wang J. Dynamic shear characteristics of interface between different geosynthetics and recycled concrete aggregate[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(1): 279-287. (in Chinese)
- [100] Arulrajah A, Disfani M M, Horpibulsuk S, et al. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications[J]. Construction and Building Materials, 2014, 58: 245-257.
- [101] Arulrajah A, Rahman M A, Piratheepan J, et al. Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large-scale direct shear testing apparatus[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(5): 974-982.

(编辑 朱备)