

路基填料建筑固废混凝土的力学特性及 颗粒破碎研究

于楠¹, 宋杨^{1,2,3*}, 秘贝¹, 李雪健¹, 齐子怡²

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北水利电力学院 交通工程系, 河北 沧州 061001;
3. 河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室, 河北 沧州 061001)

摘要: 建筑固废常用作路基填充材料, 其力学性质受含水率及压实度的影响较大。为了探究含水率和压实度对建筑固废的力学特性及颗粒破碎性能等参数的影响规律, 利用室内大型直剪试验和颗粒筛分试验, 在最大干密度一定的情况下, 以不同含水率、不同压实度的试样为研究对象, 在 50 kPa、100 kPa、150 kPa 3 种不同的法向应力条件下开展大型直剪试验研究, 并分析建筑固废剪切前后的颗粒破碎特性。结果表明: 建筑固废剪切前后断面的颗粒破碎形态较为明显, 可划分为破裂、磨损、研磨 3 种类型, 在剪应力-剪切位移曲线上出现“跳跃”现象, 建筑固废的黏聚力随含水率降低或压实度的增加而增大, 内摩擦角随含水率的减小或压实度的增加而增大, 建筑固废整体上的筛分统计表现为颗粒级配曲线上移, 建筑固废颗粒的相对破碎率随着含水率的减小或压实度的增大而增大。

关键词: 建筑固废; 路基填料; 力学特性; 颗粒破碎
中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A

Research on Mechanical Properties and Particle Crushing of Construction Solid Waste Concrete as Subgrade Filler

YU Nan¹, SONG Yang^{1,2,3*}, BEI Bei¹, LI Xuejian¹, QI Ziyi²

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Department of Traffic Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, Hebei 061001, China; 3. Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control, Cangzhou, Hebei 061001, China)

Abstract: Construction solid waste is often used as subgrade filler, and its mechanical properties are greatly affected by moisture content and compaction degree. To explore the influence of these factors on the mechanical and particle crushing performance of construction solid waste, laboratory large-scale direct shear tests and particle screening tests were conducted. This study analyzed samples with varying moisture content and compaction degrees under a certain maximum dry density. The large-scale shear tests were carried out under three normal stress conditions: 50 kPa, 100 kPa, and 150 kPa, and the particle crushing characteristics of construction solid waste before and after shearing were analyzed. The results reveal notable changes in particle crushing form of the section before and after shearing of construction solid waste, which can be categorized into three types: rupture, abrasion, and grinding. The shear stress-shear displacement curve shows a “jumping” phenomenon. The cohesion of construction solid waste increases with the decrease in moisture content or the increase in compaction degree. Similarly, the internal friction angle rises with decreased moisture content or a higher degree of compaction. The overall screening statistics of construction solid waste show that the particle gradation curve moves upward, and the relative crushing rate of particles increases as moisture content decreases, or compaction degree increases.

Keywords: construction solid waste; subgrade filler; mechanical property; particle crushing

收稿日期: 2024-07-24 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 51978237); 河北省高等学校科研重点项目 (编号: ZD2021068); 河北水利电力学院基本科研业务费重点培育项目 (编号: SYKY2302); 河北省大学生科技创新能力培育专项

作者简介: 于楠, 女, 硕士研究生. E-mail: 2819896389@qq.com

*通信作者: 宋杨, 男, 博士, 教授. E-mail: songyang@hbwe.edu.cn

0 引言

近年来,随着中国经济持续发展和城市规模不断扩大,建筑业得到蓬勃发展。然而,这个过程也伴随着建筑废弃物的数量不断增加的问题^[1-2]。目前,在建筑行业中,减少碳排放是实现“碳达峰碳中和”目标的核心,如何处理建筑废料成为行业和城市生态文明建设首要解决的问题^[3-5]。因此,探索高效利用建筑废弃物的途径尤为重要,建筑固废的资源化利用和再生利用也势在必行。

建筑固废主要含有钢筋、塑料、木材、泡沫、生活垃圾、破碎混凝土块与砖块等其他材料等杂质。混凝土骨料作为建筑固废筛分后的破碎物,有着广阔的应用前景,新建、改建和拆除了大量的建筑,特别是棚户区改造和老城区整修,产生了大量的建筑固废,而处理这些建筑固废的传统方法是物理填埋,这不但会造成环境污染,还会浪费资源。有学者^[6-7]对建筑废弃物可持续发展回收利用进行了一系列研究,发现建筑固废具有明显的抗剪强度,这些建筑固废可以被压碎成粒径不同的骨料,并挑选归类应用于各种岩土工程,如道路铺设、地面改善、道路回填、路基填筑等^[8-11],为社会与经济领域带来显著益处,包括对建筑固废资源化利用技术的探讨、对资源化的利用、环境保护和经济效益方面的作用分析,以及对未来发展趋势和利益化模式的展望^[12]。寻求建筑固废再生处理技术,提高建筑固废再利用变得尤为重要。

当前学者们对于建筑固废的研究主要集中于建筑固废资源化利用以及将其用于路基填料两方面,利用建筑固废材料作为路基填料进行回填,可以有效处理大量的废弃物,建筑固废粗粒料被破碎后应用于公路、铁路、市政道路、地基处理、填筑场地和建筑再生制品等^[13-17],以减少对天然材料的消耗。众多研究者^[18-19]对建筑固废用作路基填筑材料进行了大量的试验和分析,为建筑固废再利用提供了理论依据,并产生了显著的社会环境效益及经济效益。这些研究成果为今后的建筑固废在路基施工中的应用提供了参考和借鉴。

目前,鲜见关于将建筑固废应用于道路路基后其颗粒破碎的情况,以及破碎后建筑固废材料的整体抗剪强度变化的研究。基于此,为了更深入研究建筑固废的力学特性和颗粒破碎性能,本文以建筑固废中的混凝土为材料,进行室内大型直剪试验,分

析建筑固废在3种不同含水率和3种不同压实度下力学性能变化规律,并通过室内颗粒筛分试验,对建筑固废进行细观颗粒的定量分析和颗粒破碎的特征分析,解释不同含水率和不同压实度因素对建筑固废力学性能的影响。

1 试验概况

1.1 试验仪器设备

室内大型直剪试验采用河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室和成都东华卓越科技有限公司联合研制的动态界面剪切试验仪 DWZJ-3,如图1所示。室内筛分试验采用绍兴市公路仪器设备有限公司的标准振筛机,如图2所示。



图1 动态界面剪切试验仪 DWZJ-3

Figure 1 Dynamic interface shear tester DWZJ-3



图2 标准振筛机

Figure 2 Standard vibrating screen machine

大型直剪试验仪器主要由刚性框架、上下剪切盒、横向剪切装置、纵向加载装置、数据采集设备和其他装置组成。本次使用的大型直剪试验仪器剪切盒的内部直径为300 mm,高度为240 mm,由此得到的剪切面积为 $0.070\ 65\text{ m}^2$ 。开展大型直剪试验时,调整好仪器,并在预接触完成后,在垂直方向施加至预定的法向应力,随后固定上部剪切盒,对下部剪切盒

施加水平向左的荷载,确保该试样内部颗粒承受均匀的剪切力。

1.2 试验材料

先将样本中的其他杂质剔除,如玻璃、铁丝、瓷砖和塑料等多余成分,土与石分别按照6:4的配比制作建筑固废混合料,本文选择5 mm作为土石阈值^[20],室内试验以含石量40%的粗粒土颗粒级配曲线为基础,颗粒级配曲线见图3,试验材料见图4。

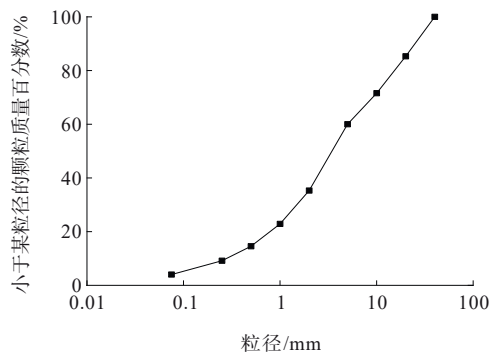


图3 建筑固废颗粒级配曲线

Figure 3 Particle gradation curve of construction solid waste

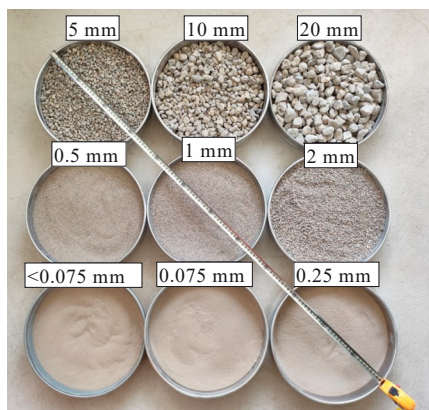


图4 试验材料

Figure 4 Test materials

试样尺寸为300 mm(直径)×240 mm(高),通过击实试验测得该建筑固废试样的最大干密度为1.85 g/cm³,最优含水率为10.6%。在大型直剪试验中,将直径大于40 mm的块石剔除,剪切缝尺寸控制为(1/3~1/4) d_{max} ^[21]。相应的颗粒级配曲线如图3所示,计算所得土样的平均粒径 $d_{50}=3.79$ mm,不均匀系数 $C_u=17.29$,曲率系数 $C_c=1.71$ 。当土的 $C_u \geq 5$,且 $C_c=1\sim 3$ 时,可认为该土样具备良好的级配特性。

1.3 试验方法

为研究试样在不同含水率和压实度下对抗剪强度的影响,所有试样均采用相同的最大干密度(1.85

g/cm³)进行制样,分别设计了3种含水率(6.6%、8.6%、10.6%)和压实度(95%、96%、97%)的大型直剪试验。由于该试样是用于路基填筑的^[22],因此本试验将法向恒定应力分别设定为50 kPa、100 kPa、150 kPa。试验方案设计见表1。

表1 试验方案设计

Table 1 Design of test scheme

编号	含水率/%	压实度/%	法向应力/kPa
A1	6.6	95	50、100、150
A2	8.6	95	50、100、150
A3	10.6	95	50、100、150
A4	10.6	96	50、100、150
A5	10.6	97	50、100、150

试验具体步骤如下:

(1) 根据表1中试验方案的含水率、压实度和图3的级配曲线,称取每组试样相应所需要的各个粒组颗粒质量的粗粒土和细粒土,加入一定水搅拌均匀后,用防水箱包裹密封18 h以上,使水分均匀分布。

(2) 按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23],将初始级配制定好的建筑固废拌和料分为3层,均匀地装入剪切盒,并对各级界面进行凿毛处理后结束装样。

(3) 放置好剪切盖后使用吊车将剪切盒吊起至滚珠盘上,将位移计和传感器安装在剪切盒上,并确保其正常运作。

(4) 对剪切装置进行系统的预接触,包括垂直和水平的预接触加载。

(5) 开展大型直接剪切试验,向试件施加预定的法向压力,随后进行水平方向的剪切,并记录相关数据。设定的剪切速率为1.0 mm/min,在水平剪切位移到达50 mm时,终止水平剪切活动并记录数据。

(6) 从试验盒中取出试样,进行干燥烘干处理。

(7) 通过颗粒筛分试验分析建筑固废试样在剪切力作用下的颗粒破碎情况,并称取记录各个粒组的质量情况。

2 试验结果及分析

2.1 应力-应变曲线分析

2.1.1 含水率对建筑固废剪应力-剪切位移的影响分析

由不同含水率下建筑固废材料的室内大型直剪试验结果可知,建筑废弃物在相同的法向应力状态

下,随着含水率的下降,界面上的剪切应力最大值呈现出不同程度的上升趋势。图5展示了在不同含水

率和不同法向压力条件下,建筑固废的界面剪应力与剪切位移的关系曲线。

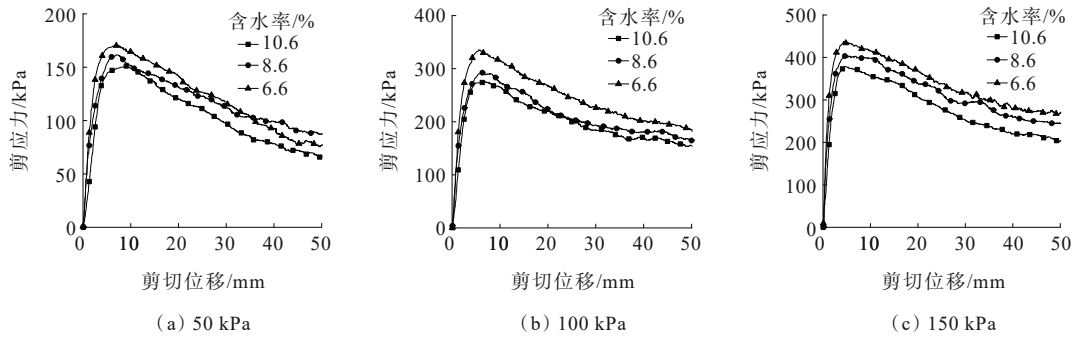


图5 不同含水率下建筑固废剪应力-剪切位移关系曲线

Figure 5 Shear stress-shear displacement curve of construction solid waste under different moisture contents

当建筑固废粗粒含量一定时,建筑固废在不同含水率状态下,剪应力-剪切位移曲线整体呈应变软化现象,同一含水率在不同应力状态下的剪应力差距逐渐增大。

当含水率较高时,随着剪切位移的增大,剪应力达到峰值强度后逐渐降低;随着含水率的降低,剪应力的峰值增大。这是因为在高含水率的状态下颗粒之间存在水膜,水对颗粒之间有软化作用,随着含水率的减少,使得粗颗粒的翻转、滑移减小,增加了粗颗粒间的咬合作用,使得剪应力明显上升。当含水率较低时,同一应力状态下,剪应力峰值达到最大,而随着含水率增加,剪应力逐渐减小;当含水率中等时,建筑固废试样在剪切过程中部分颗粒破碎后被填充到上下剪切盒之间的缝隙之中,造成曲线有明显波动现象,尤其在法向压力为150 kPa的作用下效果更为明显。

从图5可以看出:不同的含水率条件下,有显著的跳跃现象。这种现象可以归因于建筑废弃物中粗颗粒不规则导致颗粒间的非平面接触,使得颗粒间的摩擦不仅有表面滑动摩擦,还有内在的摩擦。在剪切过程中,颗粒在法向应力作用下发生破碎,在剪应力作用下发生翻滚现象。两种力的联合作用可以引发颗粒级配的重组,从而改变建筑固废骨料的结构组成。在剪切带形成过程中,伴随着颗粒滑移、翻滚、破碎、填充及重排列等一系列复杂过程,因此导致剪应力-剪切位移曲线出现跳跃波动现象,这与现有研究成果一致^[24]。

2.1.2 压实度对建筑固废剪应力-剪切位移的影响分析

应力-应变关系曲线能够展现建筑固废的变形与强度特性。图6为3种不同压实度下的试样剪应力与剪切位移关系曲线。

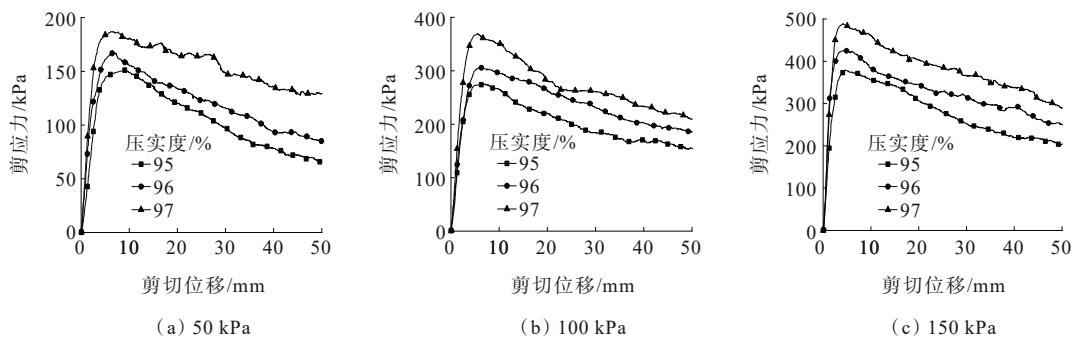


图6 不同压实度下建筑固废剪应力-剪切位移关系曲线

Figure 6 Shear stress-displacement curve of construction solid waste under different compaction degrees

由图6可知:①不同试样的压实度在相同的法向压力下,其剪应力与剪切位移的关系曲线均表现为脆性破坏。压实度较高时,土颗粒间的孔隙相对较小,颗粒之间的咬合作用更为明显,故在剪切过程

中产生的剪应力峰值较大;②在相同法向应力的不同压实度土体中发现,剪应力与剪切位移关系曲线均表现为应变软化;③随着压实度的增加,相应的剪切应力也呈上升趋势。在后期的剪切过程中,材料

压实度增加,应变软化现象逐渐显著。其主要原因为:随着压实度的增加,颗粒间的间隙减小,导致颗粒间的嵌固咬合与摩擦力增强,在剪切力的影响下,颗粒物质在剪切缝中发生迁移或滚动。当迁移或滚动过程完成后,咬合力量迅速减少,甚至逐渐不再存在,这是因为建筑固废骨料在外部应力作用下,强度降低,应变软化。

建筑固废骨料在受到不同压实度的外部应力作用下,随着形变程度的增加,其强度逐渐降低。试样在受到相同外部法向应力作用下,其内部颗粒结构也会发生变化,原子间的相互作用力受到扰动,从而引起错位的移动和滑移。随着剪切位移的增加,导致了该试样整体强度的下降。此外,在剪切带附近,滑移和变形机制的转变会导致应变软化现象的发生,随着应变的增加,试样内部的晶粒边界开始移动和重组,从最初的错位滑移转变为晶粒的旋转和重排列,这使得建筑固废容易变形,强度也相应降低。同时,局部应变集中和应力集中也会加剧建筑固废的应变软化现象。

从剪应力与剪切位移关系曲线可以看出:随着剪切位移的增加,曲线整体表现出一定的波动性,根据现有研究成果,可以推断出这种波动的部分原因与颗粒的破碎有关,同时,在试验过程中,可以明显听到颗粒破碎的声音,此时剪切应力与剪切位移曲线的同步下降现象也会出现,进而出现“阶梯形”波动现象。

2.2 抗剪强度分析

根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23]的规定要求,选择剪应力-剪切位移关系曲线的最高点或稳定值作为材料的抗剪强度。若未观察到明显最高点,则使用剪切位移增至试样直径10%时的剪应力值作为抗剪强度,结果如表2所示。

表2 不同含水率建筑固废的抗剪强度

Table 2 Shear strength of construction solid waste under different moisture contents

含水率/ %	不同法向应力(kPa)时的抗剪强度/kPa		
	50	100	150
6.6	170.95	335.72	437.48
8.6	161.60	292.75	405.91
10.6	151.30	275.49	379.32

2.2.1 含水率对抗剪强度影响分析

含水率是影响建筑固废抗剪强度的重要因素之一。由表2可知:在含水率相同时,随着法向压力增

加,材料的抗剪强度也相应增强。通过对3种不同含水率的峰值剪应力分别采用线性方程进行数据拟合,得到的相关系数 R^2 普遍高于0.98(表3),这表明模型匹配度较高。

表3 不同含水率线性函数拟合的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of linear function fitting for different moisture contents

含水率/%	线性拟合方程	相关系数 R^2
6.6	$y=2.665x+48.187$	0.98
8.6	$y=2.443x+42.443$	0.99
10.6	$y=2.280x+40.683$	0.99

由表3可知:摩尔-库仑强度准则与建筑固废的力学特性相吻合。在保持法向应力一致的前提下,随着含水率的持续上升,其对应的峰值剪应力逐渐变小,这说明水对建筑固废骨料的抗剪强度具有软化作用。

2.2.2 压实度对抗剪强度影响分析

根据摩尔-库仑准则,获得了压实度与抗剪强度之间的关系,结果见表4。

表4 不同压实度建筑固废的抗剪强度

Table 4 Shear strength of construction solid waste under different compaction degrees

压实度/ %	不同法向应力(kPa)时的抗剪强度/kPa		
	50	100	150
95	151.30	275.49	379.32
96	167.91	306.08	426.26
97	187.02	369.63	489.23

从表4可以看出:压实度和抗剪强度之间存在着正相关的关系。对3种不同压实度的峰值剪应力分别采用线性方程进行数据拟合,结果见表5。

表5 不同压实度线性函数拟合的相关系数

Table 5 Correlation coefficient of linear function fitting for different compaction degrees

压实度/%	线性拟合方程	相关系数 R^2
95	$y=2.280x+40.683$	0.99
96	$y=2.584x+41.733$	0.99
97	$y=3.022x+46.417$	0.98

由表5可知:3种不同压实度的峰值剪应力的相关系数 R^2 普遍高于0.98,这表明模型匹配度较高。也就是说,一般情况下,随着土体的压实度增加,其抗剪强度也会增加。这是因为在土体压实过程中,土体颗粒之间的接触增加,内部结构更加紧密,从而

增加了土体的抗剪强度。压实度对土体的抗剪强度有直接影响。一般来说,这是因为:① 当土体的压实度增加时,土体颗粒之间的接触程度增加,颗粒间的间隙减少,土体的密度增加,土体的抗剪强度增加;② 密实的土体在受到外部剪切力作用时,由于颗粒之间的紧密联系,可以更好地抵抗外部的应力,这与现有的研究成果一致^[25]。因此,压实度越高的土体颗粒,具有较高的抗剪强度。

2.3 抗剪强度指标参数分析

库仑-莫尔强度理论在土体抗剪强度分析中广泛采用,该理论主要通过黏聚力和内摩擦角来衡量土体的抗剪强度。黏聚力体现了土体粒子间诸如库仑作用力、范德华力以及黏合力的物理化学相互作用,主要受粒子间相互作用间距和结合物质的黏结力影响。颗粒间相互作用的重要属性之一为内摩擦角,摩擦力的两种表现形式为滑动摩擦与咬合摩擦作用。为了深入研究含水量与压实度对建筑固废力学特性的影响,本节分析各因素作用下的抗剪强度结果如图7所示。

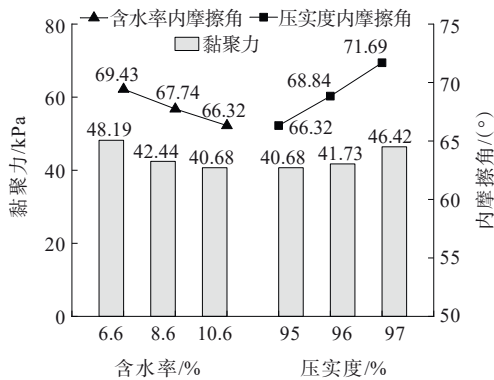


图7 不同因素下黏聚力与内摩擦角的关系

Figure 7 Relationship between cohesion and internal friction angle under different factors

2.3.1 含水率与抗剪强度指标的关系

由图7可知:在建筑固废中,粗颗粒含量对黏聚力的形成具有显著影响,这主要归因于土体颗粒间的内聚力以及结合水膜的黏结力的共同作用^[26]。在含水率较低的情况下,土体粒子间的联结主要是由紧密结合的水所提供,这强化了粒子间的吸引力和水膜的联结力,进而提升了整体的黏聚力。在高含水率条件下,土体颗粒之间的水分主要为外部结合水,导致颗粒间的吸引力和结合水膜的联结力显著减少,从而使黏聚力大幅度降低。

颗粒间的相互作用主要体现在相互咬合及滑移过程中的摩擦力^[26]。随着含水率的增加,颗粒间相互作用力减弱,导致咬合力降低,内摩擦角减小。此外,水能够减少颗粒间的相互摩擦,进而减小内摩擦角。

2.3.2 压实度与抗剪强度指标的关系

由图7可知:黏聚力随着压实度的增加而增大,随着土体压实度的增加,颗粒间的相互作用使彼此之间紧密排列,缩小了间隙;接触面的水膜联结、颗粒吸引、化学键结合、胶结效应等颗粒间相互作用逐渐增强,黏聚力随之逐渐增大。土体压实度的提升会使颗粒间的接触更紧密,从而增加了接触点处的颗粒表面积。

在剪切过程中,局部区域会出现应力集中的现象,颗粒在剪切面附近会发生破碎和错动,尖锐的颗粒逐渐被剪断,颗粒间的排列和分组经过重新调整,这个过程涉及外部能量的投入,进而导致试样的内摩擦角增大。压实度越高,粗颗粒之间嵌固咬合力越明显,黏聚力和内摩擦角越大。这是因为随着土体压实度的提升,粗颗粒间的相互锁定作用逐步加强,这导致在剪切作用下多数粗颗粒表现为滚动,同时伴随着一定程度的平移与转动。

3 颗粒破碎分析

3.1 剪切面颗粒破碎形态分析

图8展示了含水率为8.6%的试样,在100 kPa的正应力影响下发生剪切破坏面的情况。

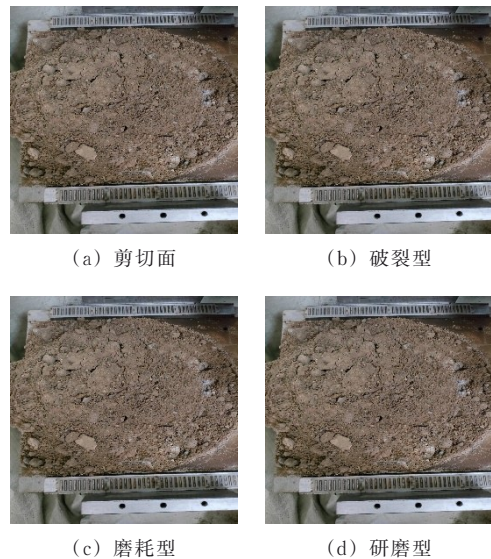


图8 颗粒破碎形态

Figure 8 Particle crushing morphology

从图8可以看出:剪切面的表面并不光滑,存在许多起伏不平的地方,这一现象与建筑固废中粗颗粒的含量密切相关。经观察发现,上下剪切面之间的一些较粗颗粒出现了断裂现象,可以将这种现象概括为3大类:破裂、磨耗、研磨。从图8(b)~(d)可以看出:这与现有研究成果一致^[27]。

3.2 级配分析

为了精确揭示建筑固废材料颗粒破碎程度随着法向压力、含水率及压实度的变化规律,对颗粒的破碎程度进行详尽的量化分析是十分重要的。颗粒级配曲线的改变是颗粒破碎最突出的表现,Hardin^[28]根据剪切前后颗粒级配曲线发生的变化情况,提出了计算相对破碎率 B_r 的方法。Hardin认为细颗粒(粒径小于0.074 mm)在颗粒破碎过程中的作用相对较小,从而将剪切前和剪切后的颗粒级配曲线与建筑固废颗粒的粒径为0.074 mm竖线所围成的封闭区域面积,分别定义为初始破碎势 B_{pi} 和最终破碎势 B_{pf} 。并将 B_{pi} 与 B_{pf} 的面积差值定义为破碎量 B_i ,即:

$$B_i = B_{pi} - B_{pf} \quad (1)$$

颗粒破碎势与它们的原始粒径级配密切相关,为了消除初始粒径级配的影响,Hardin定义相对破碎率 B_r 为破碎量 B_i 与初始破碎势 B_{pi} 的比值,如式(2)所示。相对破碎率 B_r 在剪切试验过程中,考虑了粒径分布的全部变化过程,能够准确且全面地描述不同粒径颗粒的破碎状况,同时能够有效地消除原始级配的影响,因此本文选用 B_r 作为该试样的颗粒破碎指标。

$$B_r = \frac{B_i}{B_{pi}} \quad (2)$$

为了更直接表述颗粒破碎的变化规律,本节以含水率为6.6%为例,采用大型直剪试验,并且在每次试验后都对试样再次进行颗粒筛分试验,并统计记录各个粒径的质量,大型直剪试验剪切前后建筑固废试样的颗粒级配曲线如图9所示。

从图9可以看出:随着法向应力的增大,级配曲线在剪切后都有不同程度的上移趋势,这是因为颗粒的破碎过程会引起级配曲线呈现上升趋势,且该趋势随着破碎程度的增加而加大。上移的幅度与法向压力、含水率和压实度存在密切联系。因此,剪切过程中颗粒的破碎程度受到法向压力和含水率的影响。细颗粒在试验后的占比也逐渐增大,这表明有更多的粗颗粒剪切破碎为细颗粒。

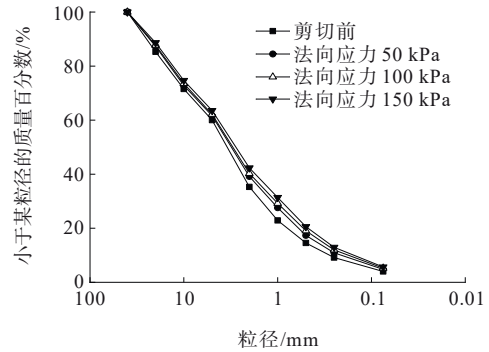


图9 剪切前后的颗粒级配曲线

Figure 9 Particle gradation curves before and after shearing

3.3 颗粒破碎量化分析

3.3.1 含水率对颗粒破碎率的影响

含水率为颗粒中水分含量,对颗粒破碎过程具有重要影响。图10描述了不同法向应力状态下含水率随着粗粒含量的变化情况。

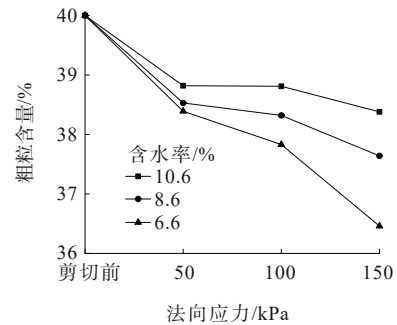


图10 法向应力与粗粒含量的关系

Figure 10 Relationship between normal stress and coarse grain content

由图10可知:随着含水率增大,粗粒含量越大,说明产生的破碎越小;反之亦然。这是因为:①含水率的增加会降低颗粒的强度和硬度,当颗粒受到外力作用时,水分会填充颗粒内部的孔隙和缺陷部分,减弱颗粒之间的相互作用力,从而使颗粒变得更为松散,也容易破碎。水分在颗粒内部还会形成支撑作用,降低颗粒之间的黏聚力,使得颗粒易于破碎;②含水率的变化会影响颗粒的韧性和延展性。当含水率较高时,颗粒具有较高的韧性和延展性,能够抵抗外力作用下的破碎。但是,随着含水率的降低,颗粒内部的水分子会减小颗粒间的摩擦力,使颗粒内部发生滑动和扭转等行为,导致颗粒间的韧性和延展性降低,进而增加试样颗粒破碎的发生。

此外,在含水率较低时,颗粒内部的水分蒸发一部分,使得颗粒表面生成一层干燥的硬壳。而当含

水率较高时,颗粒表面会被水分包裹,形成一层湿润的薄膜,这种薄膜的存在会减少颗粒之间的摩擦力,造成颗粒的破碎,因此,含水率对颗粒破碎有显著影响。含水率的降低能够增加颗粒间的黏聚力和内摩擦角,提高颗粒的抗破碎能力;而较高的含水率则会降低颗粒的强度和硬度,使颗粒不易于破碎。因此,在工程设计和颗粒处理过程中,需要根据具体情况严格控制含水率,以达到预期的颗粒处理效果。

图 11 为不同含水率下相对破碎率的变化情况。

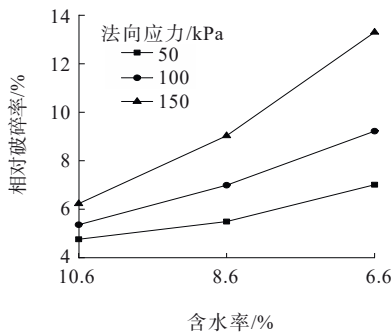


图 11 相对破碎率与含水率的关系

Figure 11 Relationship between relative crushing rate and moisture content

由图 11 可知:随着法向压力的升高,在含水率相同的条件下,颗粒的相对破碎率 B_r 也随之增长。颗粒间的相互作用导致的应力集中是颗粒破碎的根本原因,随着颗粒之间接触力的增加,颗粒的内部结构承受的压力也会增加,从而增加了颗粒破碎的可能性。因此,当颗粒间的接触力增大时,颗粒破碎的倾向性也随之增加。更具体地说,随着法向压力的增大,颗粒间的接触力增加,导致颗粒之间的压缩效应增强。在这种情况下,颗粒内部承受的应力集中在接触点附近,这会导致颗粒的局部破坏和破碎。尤其是在剪切加载条件下,颗粒间的相互作用增强会导致它们在外力作用下更易破碎。

通常情况下,含水率相对较高的颗粒具有较好的韧性,相对不易破碎,而含水率较低的颗粒则相对脆弱,易于破碎。因此,在不同含水率、相同法向压力下,颗粒的破碎程度可能会有所不同。总体来说,随着法向压力的增加,颗粒的破碎程度会逐渐增加。在工程实践中,对颗粒破碎的研究具有重要的意义。通过了解颗粒破碎的规律,可以更好地预测和控制颗粒在土体中的行为,从而指导工程设计和施工实践。同时,深入研究颗粒破碎的机理也有助于优化工程材料的选择和设计,提高工程的安全性和可靠

性。因此,对颗粒破碎行为的深入理解对该领域具有重要的理论和实践价值。

3.3.2 压实度对颗粒破碎率的影响

压实度对颗粒破碎率有重要影响,特别是在建筑固废领域中是一个重要的研究方向。图 12 表明了压实度对颗粒破碎率的影响。

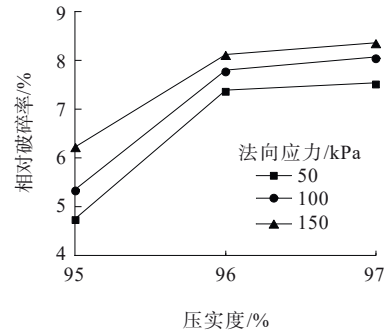


图 12 相对破碎率与压实度的关系

Figure 12 Relationship between relative crushing rate and compaction degree

由图 12 可知:随着压实度的增加,往往会导致颗粒之间的应力增加,当颗粒受到较高的应力时,较大粒径的颗粒会发生破碎,从而增加颗粒破碎率。这种破碎率的增加会导致建筑固废的力学性质发生变化。随着压实度的增加,颗粒之间的接触点增多,应力集中会导致颗粒之间局部的应力过高,应力也会更加集中在这些接触点上。当压实度增大到 97% 时,破碎的斜率较小,在压实度不断提高的情况下,颗粒破碎并非呈现出迅速而明显的增长,其增长速率相对缓慢,进而呈现出渐进、渐缓趋势,从而引发颗粒的破碎和磨损。

压实度的增加会导致颗粒之间的应力增大。在压实度较低时,颗粒之间的应力相对较小;随着压实度的增加,应力逐渐增大。这会导致颗粒之间的间隙变小,增加了颗粒之间的碰撞和摩擦,进而增加颗粒破碎的可能性。颗粒在不同的压实度下会经历不同程度的变形和断裂。随着压实度的增加,颗粒之间的挤压作用增加,导致颗粒内部发生变形和断裂的情况增多,这种情况在高压实度下尤为显著。随着压实度的增加,颗粒破碎会使粗颗粒变得更加细小,细颗粒数量增多。由于压实度的增加,会加大颗粒之间的接触面积,因为颗粒破碎会产生新的颗粒表面,进一步增加了颗粒之间的接触面积。

总的来说,压实度的增加通常会导致颗粒破碎率的上升,然而,具体影响取决于颗粒的性质、颗粒

之间的相互作用以及所采用的压实方法等因素。因此,在工程实践中,需要对具体的材料和条件进行适当的试验和分析,以准确评估压实度对颗粒破碎率的具体影响。

4 结论

(1) 建筑固废的颗粒破碎形态主要包括破裂、磨损、研磨3种。这3种颗粒破碎形态可在不同程度上调整土石混合物中各个粒级的含量比例,粗颗粒、中等颗粒以及细颗粒的变化不仅影响建筑固废的结构,还影响其整体性能。

(2) 在初始阶段,剪应力与剪切位移的关系曲线始终保持上升趋势,随后,该曲线呈现出不同幅度的“跳跃”特征。“V”形跳跃表现为应力先下降后上升,而“阶梯”形跳跃则是应力趋于平稳后迅速下降,反映了颗粒间锁定更紧密或重新排列后的稳定性增强。

(3) 建筑固废的抗剪强度随着含水率的增高而降低。这是因为水分的增加会在土粒间形成润滑作用,减小了粒子间的摩擦力。随着压实度的提高,建筑固废的抗剪强度也会相应增强。这主要是因为压实过程中土粒间的紧密度增加,从而增强了颗粒间的相互作用力。

(4) 水分含量的增加会导致黏聚力和内摩擦角下降。在含水率相对较高的情况下,水分子与颗粒表面形成了润滑层,减少了颗粒之间的黏着力,从而降低了黏聚力。同时,水分的存在还会改变颗粒间的接触形态,进而降低了颗粒之间的内摩擦角。相反,随着压实度的提高,材料的黏聚力和内摩擦角也相应增加。

(5) 颗粒破碎会导致建筑固废试样中的粒度分布特征发生变化,其中粗颗粒比例降低,细颗粒比例上升,中等颗粒含量表现出不确定性,整体分布曲线呈现向上偏移的趋势,从而使得颗粒更易发生破碎。在较高的法向压力作用下,当土体含水率降低或土体压实度提高时,导致应力集中,相对破碎率 B_r 也随之增大。

参考文献:

References:

[1] 范晓玲,孔文艺,李锋.建筑垃圾资源化利用的实践与展望[J].住宅产业,2023(12):65-68.
FAN Xiaoling, KONG Wenyi, LI Feng. Practice and prospect of resource utilization of construction waste[J].

Housing Industry,2023(12):65-68.
[2] 盛三湘,李城.再生集料用于水泥稳定碎石基层中的抗疲劳性能研究[J].中外公路,2021,41(4):350-356.
SHENG Sanxiang, LI Cheng. Study on fatigue performance of recycled aggregate in cement stabilized macadam bases[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(4):350-356.
[3] 张雅鑫.我国建筑垃圾资源化处理产业发展现状[J].再生资源与循环经济,2023,16(4):22-24.
ZHANG Yaxin. Development situation of construction waste treatment industry[J]. Recyclable Resources and Circular Economy,2023,16(4):22-24.
[4] 李涛,邓博凡,何茂林,等.竹纤维再生骨料生态混凝土力学与植生性能研究[J/OL].中外公路,1-13[2024-05-31].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240531.1048.002.html>.
LI Tao, DENG Bofan, HE Maolin, et al. Study on the performance of bamboo fiber reinforced eco-concrete with recycled aggregate[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-13[2024-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240531.1048.002.html>.
[5] 杜倩卉,付伟,张军辉,等.固体废弃物路基填筑材料的重金属污染特性研究进展[J].中外公路,2024,44(3):1-18.
DU Qianhui, FU Wei, ZHANG Junhui, et al. Pollution characteristics of heavy metals in solid waste subgrade filling materials[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024,44(3):1-18.
[6] ARULRAJAH A, PIRATHEEPAN J, DISFANI M M, et al. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2013,25(8):1077-1088.
[7] SIVAKUMAR V, MCKINLEY J D, FERGUSON D. Reuse of construction waste: performance under repeated loading [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering,2004,157(2):91-96.
[8] 《中国轮胎资源综合利用》编辑部.2021年固体废物处理利用行业综述与2022年发展展望[J].中国轮胎资源综合利用,2022(4):10-18.
Editorial Department of China Tire Resources Recycling. Overview of solid waste treatment and utilization industry in 2021 and development prospect in 2022[J]. China Tire Resources Recycling,2022(4):10-18.
[9] XIAO J Z, SHEN J Y, BAI M Y, et al. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities[J]. Journal of Cleaner Production,2021,290:125742.
[10] AL-MOSAWI H, ALBAYATI A, WANG Y, et al. An experimental study of granular material using recycled concrete waste for pavement roadbed construction[J]. Buildings,2022,12(11):1926.
[11] HERRADOR R, PÉREZ P, GARACH L, et al. Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing[J]. Journal of Transportation Engineering,2012,138(2):182-190.
[12] 曹元辉,王胜杰,王勇,等.我国建筑垃圾综合利用现状及未来发展趋势[J].中国建材,2021,70(9):118-121.

- CAO Yuanhui, WANG Shengjie, WANG Yong, et al. Present situation and future development trend of comprehensive utilization of construction waste in China[J]. *China Building Materials*, 2021, 70(9):118-121.
- [13] 樊兴华, 唐娟. 建筑垃圾填筑高速公路路基施工技术[J]. *工业建筑*, 2014, 44(4):111-114.
FAN Xinghua, TANG Xian. Construction technology of building rubbish in highway subgrade[J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(4):111-114.
- [14] XIAO Y J, KONG K F, AMINU U F, et al. Characterizing and predicting the resilient modulus of recycled aggregates from building demolition waste with breakage-induced gradation variation[J]. *Materials*, 2022, 15(7):2670.
- [15] LI Y Y, ZHOU H, SU L J, et al. Investigation into the application of construction and demolition waste in urban roads[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017:9510212.
- [16] 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.
- [17] HUBERT J, ZHAO Z F, MICHEL F, et al. Effect of crushing method on the properties of produced recycled concrete aggregates[J]. *Buildings*, 2023, 13(9):2217.
- [18] 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 Kenan, GAO Debin, MA Xuotong, et al. Large-scale shear test on coarse-grained material recycled from construction waste considering grain breakage[J]. *Subgrade Engineering*, 2021(1):46-50.
- [19] 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 Ning, XU Yongfu. In-situ direct shear test investigation of construction waste in subgrade filling of expressway[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(18):263-268.
- [20] 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 Xinrong, TU Yiliang, WANG Peng, 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.
- [21] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究所. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
HWR General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design (GIWP), China, Nanjing Hydraulic Research Institute. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [22] DING L, ZHANG J H, ZHOU C, et al. Particle breakage investigation of construction waste recycled aggregates in subgrade application scenario[J]. *Powder Technology*, 2022, 404:117448.
- [23] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [24] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊2):4065-4072.
DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Research on failure characteristics and determination method for shear strength of earth-rock aggregate in direct shear tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(sup 2):4065-4072.
- [25] 杨忠平, 李万坤, 胡元鑫, 等. 压实系数对粗粒土剪切特性的影响[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(2):348-356.
YANG Zhongping, LI Wankun, HU Yuanxin, et al. Effect of compaction coefficient on shear characteristics of coarse grained soil[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(2):348-356.
- [26] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Guangxin. *Advanced soil mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [27] HENTSCHEL M, PAGE N. Selection of descriptors for particle shape characterization[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2003, 20(1):25-38.
- [28] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, 1985, 111(10):1177-1192.