

# 振动压实作用下建筑垃圾颗粒破碎规律研究

冯延钊, 王晨, 瞿文佳

山东高速工程建设集团有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2024年8月4日; 录用日期: 2024年8月25日; 发布日期: 2024年9月9日

## 摘要

为了验证振动压实作用下,不同建筑垃圾颗粒(废旧混凝土块和废旧砖块)的破碎规律,采用5种配比方案,对振动压实前后的级配及颗粒破碎规律进行分析。结果表明:当建筑垃圾中混凝土粗粒占主导地位(废旧混凝土含量 > 70%),振动压实前后级配变化较小,不易破碎,破碎颗粒中,主要由40~60 mm粒组破碎为20~40 mm和5~10 mm粒组;建筑垃圾中砖块占主导地位(废旧混凝土含量 < 30%),振动压实前后级配变化较大,强度较低,易破碎成细颗粒,破碎颗粒中,主要由40~60 mm粒组破碎为5~10 mm粒组;当30% < 废旧混凝土含量 < 70%时,混合料骨架是由粗粒和细粒共同作用,在振动压实的过程中,粗颗粒和细颗粒相互嵌挤,可减少颗粒的破碎。

## 关键词

建筑垃圾, 振动压实, 颗粒破碎, 级配变化

# Study on the Fragmentation Law of Construction Waste Particles under Vibration Compaction

Yanzhao Feng, Chen Wang, Wenjia Qu

Shandong Hi-Speed Engineering Construction Group Company Limited, Jinan Shandong

Received: Aug. 4<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 25<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 9<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to verify the fragmentation patterns of different construction waste particles (waste concrete and waste bricks) under vibration compaction, five proportioning schemes were used to analyze the gradation and particle fragmentation patterns before and after vibration compaction. The results showed that when the coarse concrete particles dominated the construction waste (waste concrete content > 70%), the gradation change before and after vibration compaction was small

and not easy to crush. Among the fragmented particles, the 40~60 mm particle group was mainly broken into 20~40 mm and 5~10 mm particle groups; bricks dominate in construction waste (waste concrete content < 30%), with significant changes in grading before and after vibration compaction, low strength, and easy breakage into fine particles. Among the broken particles, the 40~60 mm particle group is mainly broken into the 5~10 mm particle group; when the content of waste concrete is between 30% and 70%, the mixture skeleton is formed by the combined action of coarse and fine particles. During the vibration compaction process, the coarse and fine particles are interlocked, which can reduce particle breakage.

## Keywords

Construction Waste, Vibration Compaction, Particle Fragmentation, Grading Variation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

国家十四五规划中, 大力推广固废综合利用, 提高资源再利用和循环利用水平, 鼓励建筑垃圾再生骨料及制品在建筑工程和道路工程中的应用。

建筑垃圾路基填料的压实分为排列、填充、分离以及夯实四个过程, 是颗粒破碎后发生定向排列, 孔隙体积减小, 整体被压缩后提高密实度的过程[1]-[3]。振动压实法主要通过振动冲击的方式使颗粒重新排列并充分嵌挤, 这与振动压路机的碾压方式相似, 所以一般作为粗粒材料的击实试验方式, 但是对于不同类型建筑垃圾, 其组成成分不同, 动荷载作用下粒料重构 - 组合的力学演变规律也不同[4]-[6]。

刘晓婷[7]揭示了室内振动压实试验和振动压路机的压实机理, 并基于压实有效率提出压实功率计算方法; 孔坤锋[8]利用振动压实仪对填石沉降量进行研究, 发现填石沉降量会随着振动压实作用时间的延长而逐渐升高, 达到较稳定值, 继续振动压实, 沉降量将持续增加。刘喜等[9]通过试验发现, 振动压实作用下, 振动沿深度方向有明显的衰减作用, 导致深处的粗粒料密实程度较差, 且存在着最佳的压实频率。刘艳强[10]基于岩土材料特性及压路机滚轮运行方式, 建立三维有限元模型, 模拟压路机在压实岩土材料上的压实效果发现: 材料颗粒化程度越高, 材料粘结力越强, 振动压实的影响深度越小。肖建庄[11]对比振动压实和静态压实, 发现振动压实对材料的最大干密度和最佳含水率的影响较小。徐宝龙等[12]研究发现振动压实的碾压效果优于静态压实, 并建立了粗粒土的振动压实离散元模型。冯瑞玲[13]通过对表面振动压实参数调整研究对粗粒土的压实特性研究, 结果表明: 振动频率和激振力是影响粗粒土的级配特性的重要因素。

建筑垃圾路基填料主要由废旧混凝土和废旧砖块组成, 在压实过程中, 颗粒会发生破碎现象, 为了探明振动压实作用对不同类型建筑垃圾颗粒破碎规律的影响作用, 本文通过室内表面振动压实试验对振动前后的级配变化进行分析, 研究其颗粒破碎规律。

## 2. 试验方法与方案

### 2.1. 试验方法

本试验采用表面振动压实仪(如图 1 所示), 其中试筒的高度为 250 mm, 内径为 280 mm, 振动器的振动频率为 40 Hz, 激振力为 80 kN。试验通过表面振动压实仪对试样上表面施加 40 Hz, 140 KPa 的振动荷载, 振动时间为 6 min。



Figure 1. Surface vibration compactor

图 1. 表面振动压实仪

## 2.2. 试验方案

本文主要研究建筑垃圾中的废旧混凝土块和废旧砖块，选择以下 5 种建筑垃圾再生粒料配比方案，对振动压实前后的级配特性进行分析，具体试验方案如表 1 所示。

Table 1. Test scheme

表 1. 试验方案

试验方案	废旧混凝土:废旧砖块
A-1	100:0
A-2	70:30
A-3	50:50
A-4	30:70
A-5	0:100

## 3. 试验分析

对各试验方案振动压实前后的级配数据进行汇总，颗粒级配数据如表 2 所示。

Table 2. Particle size distribution before and after vibration compaction for each scheme

表 2. 各方案的振动压实前后颗粒级配

颗粒粒径 /mm	小于某粒径的质量百分比/%									
	A-1		A-2		A-3		A-4		A-5	
	振动压实 前	振动压实 后	振动压实 前	振动压实 后	振动压实 前	振动压实 后	振动压实 前	振动压实 后	振动压实 前	振动压实 后
60	92.2	86.6	100	100	100	100	100	100	100	100
40	73.6	66.7	94.5	88.8	96.6	91.2	100	92.4	100	100
20	46.8	42.6	73.9	68.8	87.6	83.3	94.4	86	100	100
10	26.6	22.8	54.7	49.85	68.1	63.4	82.3	74.3	100	96.3
5	22.3	19.6	42.8	39	54.9	50.1	60.3	52.8	90.7	84.6
2	17.1	15.2	25.3	22.2	30.1	27.2	43.8	38.8	74.3	69.6
1	11.9	10.4	17.9	15.4	21.7	19.7	35.1	31.9	51.1	48
0.5	9.2	8.2	14.7	12.6	18.6	17.2	26.6	24.2	36.4	33.6
0.25	5.4	4.9	11	9.6	12.6	12	14.5	12.8	19.6	17.5
0.075	2.4	2.1	5.3	4.6	7.3	7.1	10.1	9.2	12.4	11.6

如图 2 所示, 对于方案 A-1 (砂: 砖比 = 100:0) 而言, 建筑垃圾再生粒料中全部为废旧混凝土, 破碎颗粒中大于 40 mm 的粒组含量是降低的, 其中大于 60 mm 的粒组含量下降最多, 为 5.6%; 小于 40 mm 的粒组含量是升高的, 其中 20~40 mm 和 5~10 mm 的粒组含量升高较多, 分别为 2.7% 和 1.1%, 说明振动压实后, 粗粒组破碎较多, 并多破碎成 20~40 mm 和 5~10 mm 粒组。这是因为混合料中混凝土粗粒占主导地位, 大颗粒含量多的试样在压实过程中形成的土体颗粒结构强度较高, 不易被压碎, 粗粒含量越高颗粒破碎越不显著, 这种规律随着废旧混凝土含量的减少更加明显。振动压实作用下级配中粗粒含量的变化较大, 破碎颗粒中, 40 mm~60 mm 粒组含量的降低最大; 20 mm~40 mm 和 5 mm~10 mm 粒组含量的增加较大。

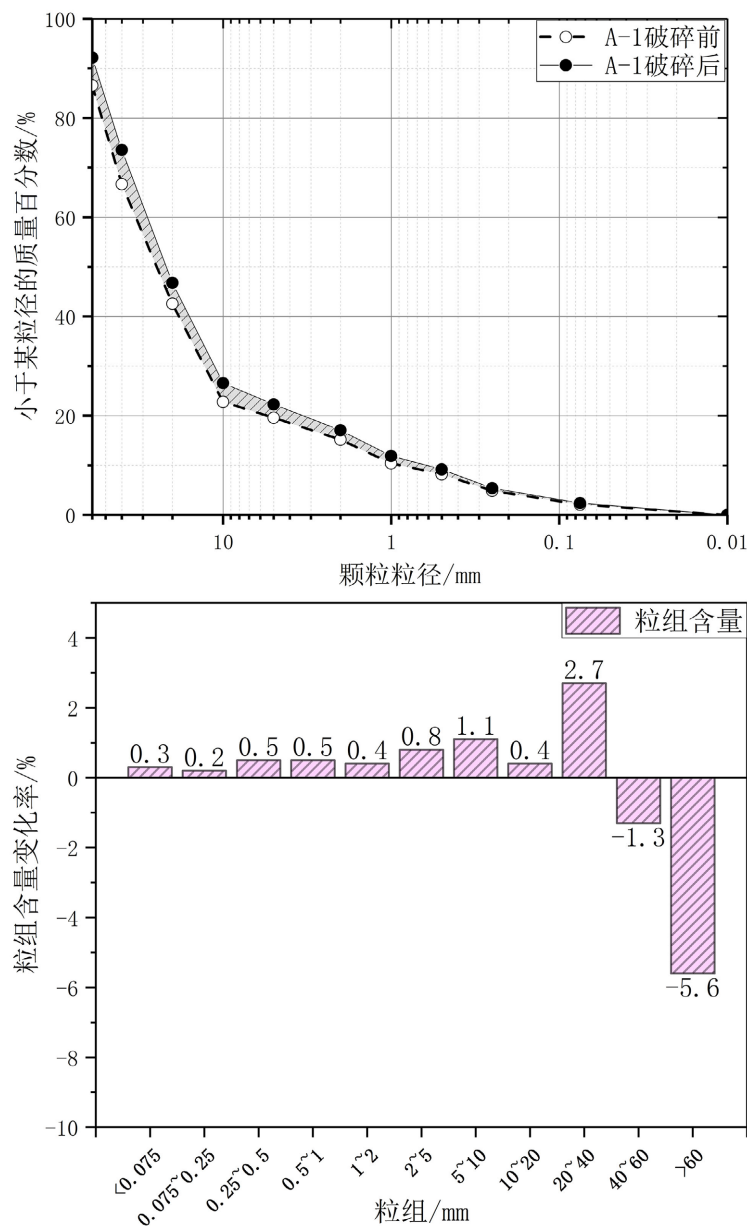
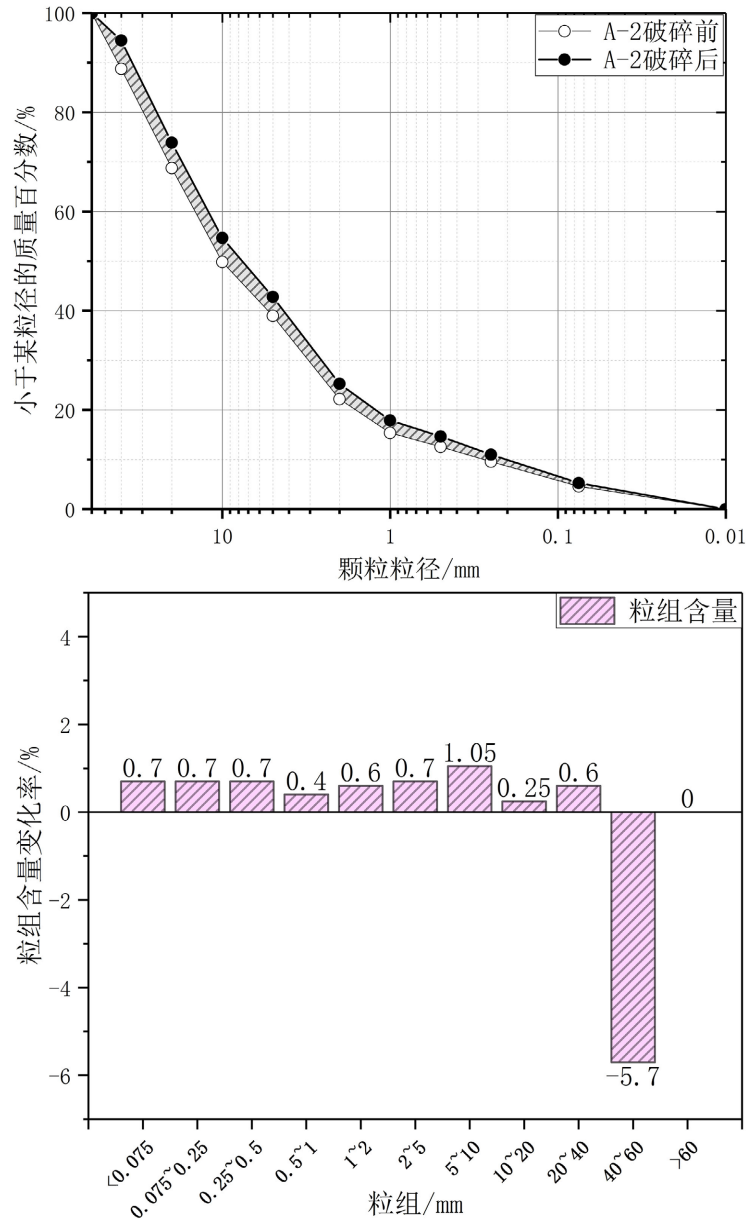


Figure 2. Comparison of grading before and after vibration compaction of construction waste in Scheme A-1

图 2. A-1 建筑垃圾振动压实前后级配对比

如图 3 所示, 对于方案 A-2 (砼:砖比 = 70:30)而言, 建筑垃圾再生粒料由废旧混凝土和废砖块组成, 破碎颗粒中大于 40 mm 的粒组含量是降低的, 其中 40~60 mm 的粒组含量下降最多, 为 5.7%; 小于 40 mm 的粒组含量是升高的, 且各粒组含量增加的幅度较平均, 其中 5~10 mm 的粒组含量升高较多, 1.5%, 说明振动压实后, 粗粒组破碎较多, 但破碎后的粒组含量增长较平均, 且破碎为更小的粒组。



**Figure 3.** Comparison of grading before and after vibration compaction of construction waste in Scheme A-2

**图 3.** A-2 建筑垃圾振动压实前后级配对比

如图 4 所示, 对于方案 A-3 (砼:砖比 = 50:50)而言, 建筑垃圾再生粒料由废旧混凝土和废砖块组成, 且两者含量相当。破碎颗粒中大于 40 mm 的粒组、10~20 mm 的粒组和 5~10 mm 的粒组含量是降低的, 其中 40~60 mm 的粒组含量下降最多, 为 5.4%, 10~20 mm 的粒组和 5~10 mm 的粒组含量降低是因为建

建筑垃圾再生粒料中废砖块含量增加，砖块强度较小，更容易破碎为小粒径组分，导致 10~20 mm 的粒组和 5~10 mm 的粒组含量降低；20~40 mm 的粒组含量和小于 5 mm 的粒组含量是升高的，且各粒组含量增加的幅度较平均，其中 2~5 mm 的粒组含量升高较多，1.9%，说明振动压实后，粗粒组破碎较多，但破碎后的粒组含量增长较平均，且破碎为更小的粒组。

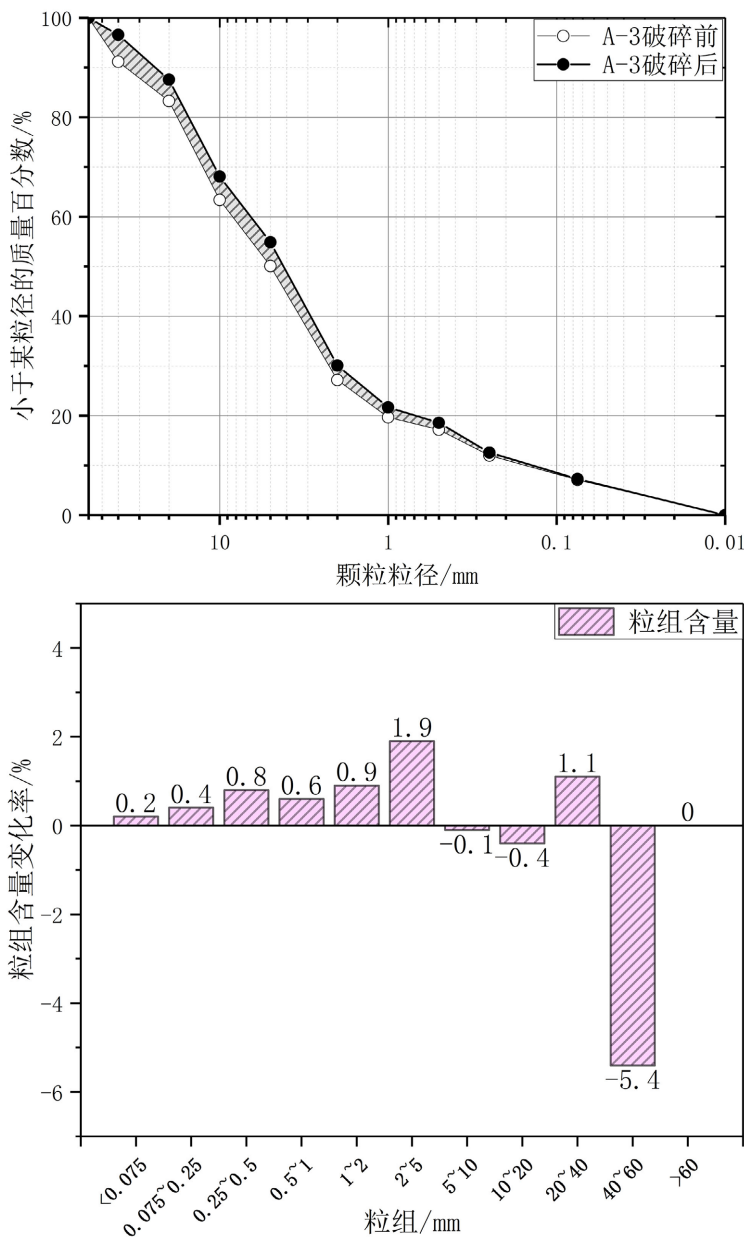


Figure 4. Comparison of grading before and after vibration compaction of construction waste in Scheme A-3

图 4. A-3 建筑垃圾振动压实前后级配对比

如图 5 所示，对于方案 A-4 (砼:砖比 = 30:70)而言，建筑垃圾再生粒料由废旧混凝土和废砖块组成，且废砖块开始占主导地位。破碎颗粒中大于 20 mm 的粒组含量是降低的，其中 40~60 mm 的粒组含量下降最多，为 7.6%；小于 20 mm 的粒组含量是升高的，且各粒组含量增加的幅度较平均，其中 2~5 mm 的



粒组含量升高较多, 2.5%, 说明振动压实后, 粗粒组破碎较多, 但破碎后的粒组含量增长较平均, 且破碎为更小的粒组。

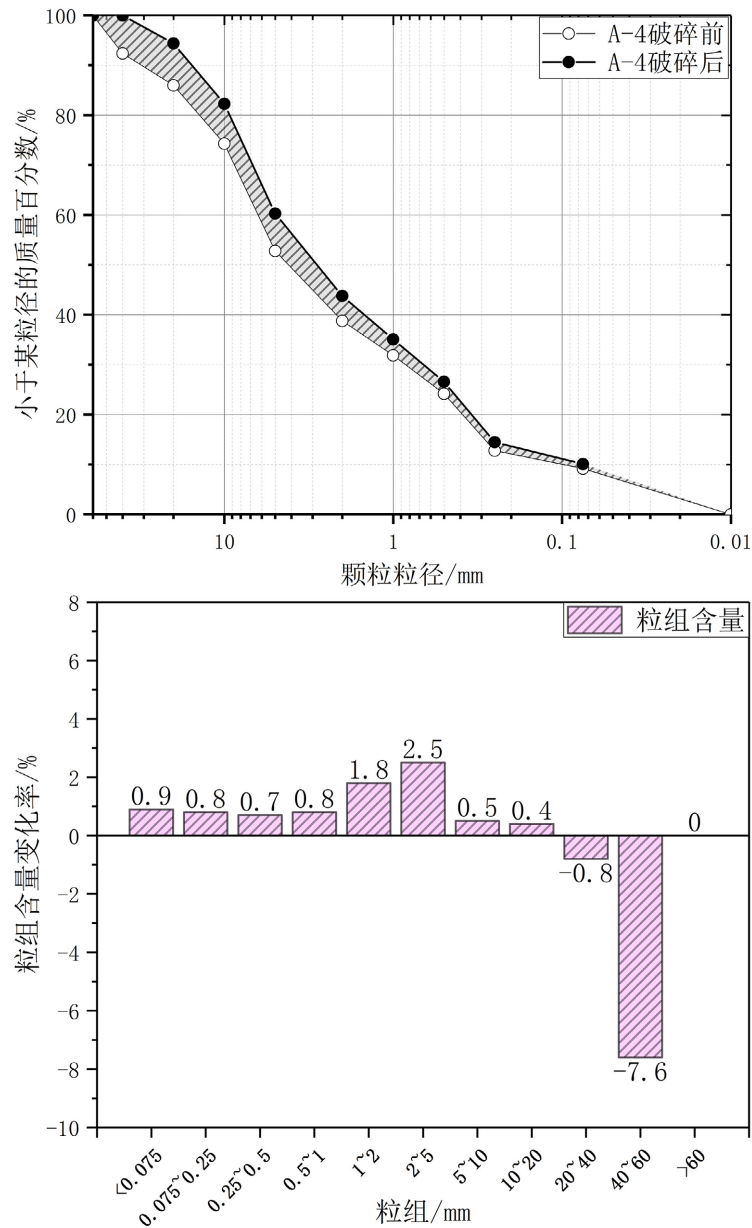


Figure 5. Comparison of grading before and after vibration compaction of construction waste in Scheme A-4

图 5. A-4 建筑垃圾振动压实前后级配对比

当  $30\% < \text{废旧混凝土含量} < 70\%$  时, 混合料骨架是由粗粒和细粒共同作用, 在振动压实的过程中, 粗颗粒和细颗粒相互嵌挤, 细颗粒有效地填充到粗颗粒的空隙中, 减少了粗颗粒之间的碰撞, 从而减少了颗粒之间的破碎; 随着混凝土含量减少, 振动压实后最大粒径由 60 mm, 减小到 40 mm; 破碎颗粒中, 40 mm~60 mm 粒组含量的降低最大; 20 mm~40 mm 和 2 mm~5 mm 粒组含量的增加较大; 随着混凝土含量减少, 小于 2 mm 粒组含量的增加越大, 说明砖块已破碎成更小的粒组。

如图 6 所示, 对于方案 A-5 (砂: 砖比 = 0:100) 而言, 建筑垃圾再生粒料全部由废砖块组成。破碎颗粒中大于 5 mm 的粒组含量是降低的, 其中 10~20 mm 的粒组含量下降最多, 为 3.7%; 小于 5 mm 的粒组含量是升高的, 且各粒组含量增加的幅度较平均, 其中 1~2 mm 的粒组含量升高较多, 1.6%, 说明振动压实后, 粗粒组破碎较多, 但破碎后的粒组含量增长较平均, 且破碎为更小的粒组。

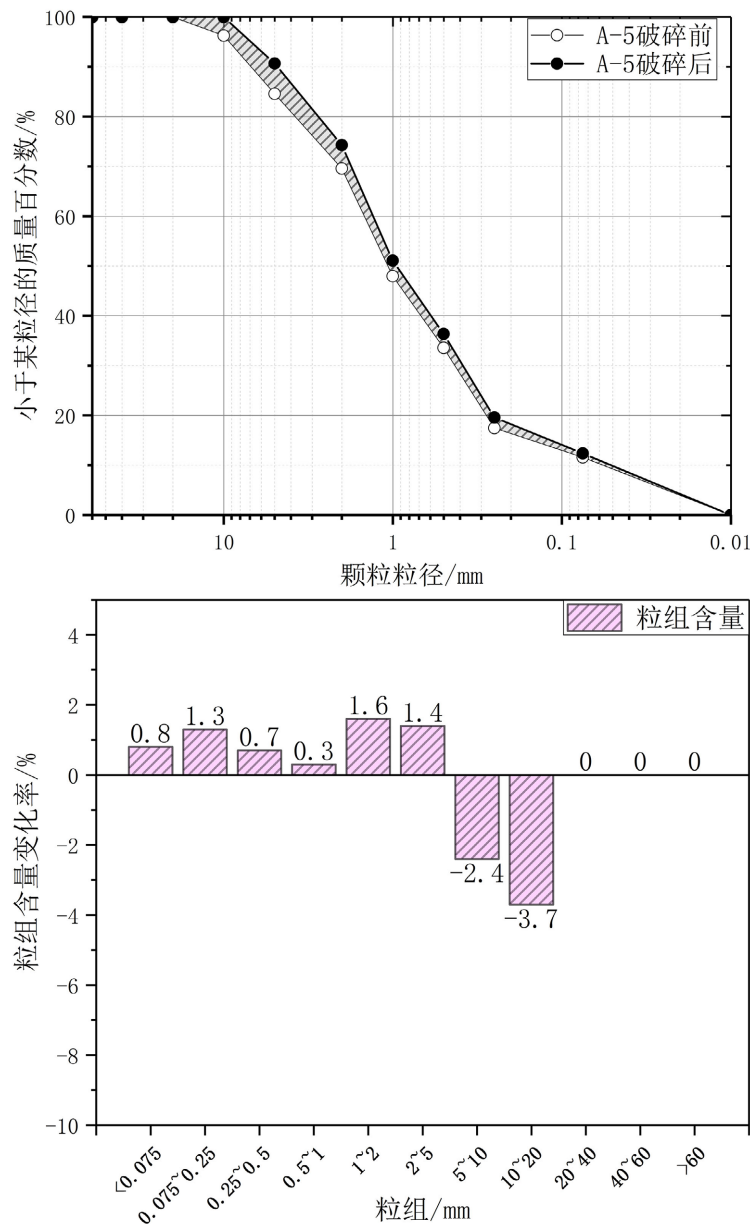


Figure 6. Comparison of grading before and after vibration compaction of construction waste in Scheme A-5

图 6. A-5 建筑垃圾振动压实前后级配对比

这是因为混合料中的骨架主要有废旧砖块的细颗粒组成, 粗颗粒含量较少, 且强度较低, 所以在振动压实过程中, 颗粒的破碎明显。破碎颗粒中, 10 mm 及以上粒组含量的均呈现减少趋势; 其余细粒粒组均呈现增加趋势, 2 mm~5 mm 粒组含量的增加最大; 粘性建筑垃圾振动压实后, 最大粒径基本由 40



mm 变为 20 mm；粘性建筑垃圾振动压实前后级配变化较大，建筑垃圾中砖块占主导地位，强度较低，易破碎成细颗粒。

#### 4. 结论

本章对建筑垃圾振动压实性能进行研究，得到了以下结论：

1) 建筑垃圾中混凝土粗粒占主导地位，振动压实前后级配变化较小，不易破碎，破碎颗粒中，主要由 40~60 mm 粒组破碎为 20~40 mm 和 5~10 mm 粒组；

2) 建筑垃圾中砖块占主导地位，振动压实前后级配变化较大，强度较低，易破碎成细颗粒，破碎颗粒中，主要由 40~60 mm 粒组破碎为 5~10 mm 粒组；

3) 当 30% < 废旧混凝土含量 < 70% 时，混合料骨架是由粗粒和细粒共同作用，在振动压实的过程中，粗颗粒和细颗粒相互嵌挤，细颗粒有效地填充到粗颗粒的空隙中，减少了粗颗粒之间的碰撞，从而减少了颗粒之间的破碎。

#### 参考文献

- [1] 何莹莹. 建筑垃圾的再生利用之路[J]. 科技创新与应用, 2020(33): 55-56.
- [2] 邢妍, 邓西录, 曲梦可, 等. 建筑垃圾再利用存在的问题及措施探究[J]. 河北科技师范学院学报(社会科学版), 2019, 18(1): 125-128.
- [3] 付玉辉. 城市拆迁建筑垃圾再利用的研究[J]. 绿色环保建材, 2019(10): 20-21.
- [4] 张军辉, 丁乐, 张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 135-154.
- [5] 李行, 吴超凡, 万暑, 等. 建筑垃圾在路基回填料中的使用性能研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 253-256.
- [6] 裴永. 冲击荷载作用下的再生混合集料相互作用与破碎机制探讨[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2020.
- [7] 刘晓婷. 仿冲击振动压实机理的试验研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2005.
- [8] 孔坤锋. 建筑拆除固废再生粒料填料强度和变形特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [9] 刘喜. 建筑垃圾在公路路基中的再生应用研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 208-212.
- [10] 刘艳强, 张杰, 段丹军. 不同工况下骨料压碎值变化规律研究[J]. 公路与汽运, 2015(4): 100-102.
- [11] 肖建庄, 孙振平, 李佳彬, 等. 废弃混凝土破碎及再生工艺研究[J]. 建筑技术, 2005, 36(2): 141-144.
- [12] 徐宝龙. 建筑垃圾土性能及其作为路基填料的施工[J]. 中国市政工程, 2011(2): 67-69.
- [13] 冯瑞玲, 王园, 谢永利. 粗粒土振动压实特性试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 19-23.