

# 建筑固体废弃物再生粗集料性能分析

文 / 钟海军 中国铁建港航局集团有限公司第一工程分公司

**摘要：**随着社会经济高速发展，生产技术更新迭代，丰富的物产以及产成品运量增大，高速公路需要提高运力以满足需求，高速公路改扩建项目兴起；根据国家长期以来提倡的绿色发展理念，改扩建项目拆除的大量废弃混凝土再生利用成为一个新的课题。由于混凝土形成过程中的材料配比、施工条件、施工工艺、工人技术熟练程度等均有不同，且混凝土组成成分复杂，简单破碎后的混合物整体分析难度很大，经过再破碎、细料剥离，利用剩余的粗集料代替普通混凝土中的部分或全部粗集料进行配合比设计，通过对集料性能和混凝土性能对比分析，可以得出固体废弃物再生粗集料技术指标范围值，可指导粗集料生产。本文通过对固体废弃物再生粗集料性能进行对比分析，为今后的固体废弃物再生利用研究提供参考。

**关键词：**高速公路改扩建项目；绿色；再生利用；粗集料；对比分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.020

## 引言

基建工程结构物主要以混凝土为主，在改扩建工程兴起的今天，因没有形成完善的供需市场，还是无法对其拆除后直接利用，只能按混凝土破碎后的骨料性能指标再利用或将破碎后的混凝土废渣用作道路填料。

混凝土结构物产成过程中因料源、强度要求、配合比、搅拌时间、搅拌均匀性、浇筑环境条件、浇筑工艺、浇筑质量、养护条件不同，破碎后的再生料质量参差不齐，加上破碎方式的不同，破碎后骨料的各项指标性能也不尽相同。

再生料的研究到应用一直处于初级阶段，在再生混凝土方面只能小范围进行利用，通过对再生料性能的分析、混凝土试配，最终确定再生混凝土的性能指标范围后使用。

## 一、现场实地调研

长春至深圳国家高速公路河源热水至惠州平南段是国家高速公路网第三条南北纵线—长春至深圳高速公路广东境内段的重要组成部分，同时是广东省高速公路网规划“五纵”的一段，是粤东北地区南北向运输的重要通道，也是粤东北地区（河源、梅州）连接港、澳与珠三角的交通大动脉，是联系深莞惠都市圈核心区与河源等地的重要高速通道，同时也是联系珠三角与江西省等东部地区的重要的省际大通道。

长春至深圳国家高速公路河源热水至惠州平南段改扩建 T3 标段北起广东省河源市源城区埔前镇，途径河源市源城区、惠州市博罗县，南至广东省惠州市麻博罗县陂镇，起讫桩号为 K3511+170 ~ K3534+000。

项目合同工期 24 个月，主要工作集中在将原双向 4 车道高速公路扩建为双向 8 车道高速公路。高速公路主线大部分原有桥梁只需更换梁板，个别桥梁需要拆除新建，跨线天桥全部拆除重建，拆除后的梁板无法降低标准继续使用。

## 二、再生料制备工艺

再生混凝土制备所需再生集料须确保性能稳定、指标均匀，因此配备了反击式破碎机，同时在废弃混凝土拆除时提高料源选择的标准。



图 1 桥梁拆除现场图片

### （一）料源控制

旧桥拆除大部分采用破碎锤就地破碎的形式，桥底投影区域铺设石屑垫层保护高速公路路面，因此在梁板等旧混凝土破碎分解过程中容易被石屑污染；梁板为钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土结构，需要将钢筋或预应力筋剥离并清理干净；与周围泥土混杂的破碎混凝土直接用于便道填筑等，避免用于再生混凝土。

### （二）破碎设备配备

经过现场分解的混凝土块通过运输车运至破碎场，堆放至经过处理的场地内，以免发生污染。破碎场内采用挖掘机上料进行破碎，首先采用颚式破碎机破碎，再采用 PF1315 型反击式破碎机，额定功率 200kW，工作效率 100-280T/h，按照混凝土使用部位相应的尺寸确定粗集料粒径，设置对应规格的筛网。



图2 再生骨料破碎现场图片

### (三) 再生料制作

1. 破碎前准备。混凝土碎渣破碎前再次对塑料、钢筋等杂物进行分拣，提高破碎料前期的洁净度，降低后期筛分的工作难度；对存在油污的材料分类堆放另做他用。

2. 破碎工艺。从现场运回的混凝土碎渣堆放于破碎场混凝土地坪上，由挖掘机或装载机装车将材料运至上料斗，料斗将材料输送至上料口。初次破碎首先使用颚式破碎机破碎，将大块物料破碎成较小的颗粒；初次破碎后的物料可能仍含有较大的颗粒，因此需要采用反击式破碎机进行二次破碎分解。

3. 筛分。破碎后的物料需要经过筛分机进行分级，以得到符合要求的再生骨料。筛分机设置辅助装置，将破碎完成的材料进行除杂处理，钢筋、粉尘等分离后单独处理，避免混入筛分完成的破碎料。筛分机可以根据不同的粒径要求，将物料分成不同的等级。

4. 清洗。为了得到更加干净的再生粗集料，需要对筛分后的物料进行清洗。清洗过程中，可以使用洗石机等设备，通过水流的冲刷作用，将物料表面的泥土、粉尘等杂质去除。清洗过程中注意污水的排放，避免因场地污染导致破碎料二次污染。

5. 干燥。清洗后的再生骨料需要进行干燥处理，以达到适当、均匀的水分含量。这一步骤可以使用烘干机等设备，通过加热和通风的方式，将物料中的水分去除。

## 三、再生料与再生混凝土分析研究

### (一) 概况

高速公路改扩建项目由于轴线偏移、道路扩宽、局部路面高程调整等原因，出现原有跨越高速公路的桥梁跨径不匹配、净空高度不足等现象；高速公路主线旧桥由于建成年份久远、早期车流小、标准要求低，无法满足现有交通量对结构安全的要求，部分跨线桥及旧桥需要拆除重建或更换梁板。

桥梁拆除产生的水泥混凝土块，因为无法降解，按照目前的技术水平也很难将混合物完全分解、恢复如初，露天存放对环境的影响比较大。混凝土块拆解越充分，耗费的人工、设备费用越高，耗用的精力也越多，因此新的、更有效的设备出现之前，再生利用只能根据当

前市场现有设备对混凝土块进行粗加工，再根据加工完成材料的特性与其他材料匹配，按照新的配合比在一个适当的、成本可控的范围内进行使用，对于为满足高性能而精加工造成混凝土块拆解费用增加成本超支的范围只限于研究而非投入生产使用。

### (二) 研究目的

1. 确定废弃混凝土块破碎工艺和对应的破碎机械设备。
2. 解决固体废弃物再生粗集料代替普通混凝土粗集料吸水量大问题。
3. 固体废弃物再生粗集料混凝土应用工作性能调整。
4. 确定预防固体废弃物再生粗集料混凝土开裂措施。

### (三) 研究内容

1. 达到混凝土用再生粗集料要求需采用的破碎工艺、破碎机功率、破碎方法。
2. 对不同破碎遍数的再生粗集料性能进行检测，将破碎遍数、性能、吸水率进行对应，研究三者之间的相关性。
3. 利用再生粗集料代替普通混凝土中的粗集料进行配合比试验，配制满足设计力学性能指标和现场工作性能的混凝土。
4. 从原材料、混凝土拌合、混凝土运输、混凝土浇筑振捣、混凝土收面、混凝土养护等各工序、阶段全过程提升混凝土耐久性和抗裂性能。

### (四) 研究方法

通过理论分析、试验对比、数据归类等手段对再生粗集料混凝土从原材料到产成品，再到后续发展情况进行系统性的研究。

### (五) 研究步骤

#### 1. 破碎工艺及方法

查阅再生骨料研究相关的文献资料，按照试验制备的混凝土强度等级分类收集相关信息，从后往前，从混凝土到原材料，再到破碎设备进行梳理，分析并确定需采用的设备型号、功率。

采用颚式破碎机、反击式破碎机进行再生粗集料的生产制备，按照两种破碎机各1次、各2次、颚式破碎机2次、反击式破碎机1次进行破碎，及时检测其物理性能，从颗粒分析、表观密度、堆积密度、空隙率、针片状颗粒含量、压碎指标、坚固性、软弱颗粒含量等方面与普通碎石对比，确定一个比较合理的破碎组合。

通过对比分析的数据总结出选用的破碎机和最优破碎遍数组合，根据破碎工作各工序先后顺序、开展时机、持续时间以及各环节材料检测需达到的技术指标拟定再生粗集料生产的工艺和方法。

#### 2. 破碎遍数、性能、吸水率相关性研究

结合破碎机选用过程，按照相应破碎机和破碎遍数制备再生粗集料，对不同破碎遍数的再生粗集料性能进行检测，将破碎遍数、性能、吸水率进行对应，在满足物理性能的前提下以破碎遍数和吸水率优劣进行排列，

研究三者之间的相关性，确定满足物理性能和吸水率要求的合理破碎遍数。

### 3. 配合比设计

采用满足物理、力学性能的再生粗集料，按照50%、70%、90%、100%的比例替代普通混凝土中的粗集料，进行再生混凝土配合比设计。

配合比设计时，除粗骨料、水泥、外加剂外，其余材料数量与普通混凝土配合比相同，混凝土搅拌时间与普通混凝土相同。

根据混凝土工作性能对配合比进行排序，待标准抗压试件养护28天后进行强度检测，根据强度高低进行排序，最后按照工作性能好和强度高低进行综合排序，优选工作性能好、强度高的配合比。

从成本的角度考虑，对工作性能好、强度高的配合比按照成本高低进行排序，成本较低的配合比作为最终确定的配合比。

### 4. 混凝土耐久性和抗裂性能

从再生粗集料含泥量、含粉量、混凝土拌合时间、混凝土运输过程中防晒保温、混凝土浇筑方式、振捣时间、混凝土收面时间、收面次数、混凝土养护条件、养护时间、养护洒水频率等多工序、多角度采用因素分析法，单个因素改变，其他因素不变，通过试验对比分析各因素对混凝土耐久性和抗裂性能的影响程度，得出在保证最终结果的前提下各工序指标的临界值，为全过程、全方位提升混凝土耐久性和抗裂性能提供参考。

## (六) 研究结果

### 1. 破碎工艺

采用颚式破碎机2遍，反击式破碎机1次时，骨料粒径适中，细颗粒含量15%~18%，表观密度 $2790\text{kg}/\text{m}^3$ ~ $2820\text{kg}/\text{m}^3$ ，堆积密度 $1500\text{kg}/\text{m}^3$ ~ $1560\text{kg}/\text{m}^3$ ，空隙率、针片状颗粒含量、压碎指标及软弱颗粒含量均适中。

随着破碎遍数的增加骨料粒径减小，细颗粒增多，级配变化明显，表观密度略有下降，堆积密度先增后减，空隙率先减后增，针片状颗粒含量增加，压碎指标上升，坚固性下降，软弱颗粒含量增加。

### 2. 吸水率

破碎遍数增加的过程中，附着的旧砂浆脱落更多，再生粗骨料吸水率减少，但骨料表面积增加，吸水率存在增加的趋势。另外，随着破碎遍数的增加，骨料破碎更加充分，骨料内部微裂纹增加，导致吸水率更进一步增加，因此破碎遍数适可而止，不能一味强调吸水率造成骨料强度的明显降低。

### 3. 抗压强度与耐久性

按照50%、70%、90%、100%的比例替代普通混凝土中的粗集料进行再生混凝土配合比设计，由于再生粗骨料表面粘附旧砂浆强度低、吸水率高，机械破碎造成原

生骨料内部微裂纹增加，随着替代比例的增加，达到同等强度等级时需的水泥和外加剂数量随之增加，按照试验结果，选择70%的粗集料替代料较为经济。

一般在初凝前、初凝后各收面一次，洒水覆盖保湿养护，收缩裂纹极少。

## 四、效益分析

(1) 在现有颚式破碎机和反击式破碎机的基础上，经过简单的改造，即完成了再生粗集料设备的配备，利用再生粗集料代替普通混凝土中的粗集料，通过增加破碎次数或增加少量水泥、外加剂的方法达到了普通混凝土抗压强度等技术指标，节约了购买粗集料的费用。

(2) 将固体废弃物经过破碎处理后再利用，减少了堆存场地的使用，节约了租地费用，减少了对土地的污染，降低了对周围环境的影响。

(3) 虽然再生粗集料的使用仍存在较多瓶颈，得到的数据对其他类似项目参考意义有限，但是对固体废弃物再生利用、减少碳排放依然有推动作用。

(4) 通过对再生粗集料的研究，对混凝土有了更深刻的认识，对影响混凝土性能的因素有了更全面的分析，培养了混凝土性能研究方面的人才，积累了混凝土性能调整的经验。

## 结语

在高速公路改扩建项目拆旧建新作业大步迈进的过程中，如何对拆除混凝土结构物进行再生利用一直以来受到环保专家、建筑专家的关注，因废旧混凝土性能差别较大，经破碎后只能对再生料局部应用；将满足强度等技术指标的再生粗集料混凝土与粗集料性能对应，确定粗集料指标范围，指导集料生产。在保证结构质量、安全的前提下，根据不同强度等级的混凝土性能指标选择不同破碎程度的集料进行掺配，减少再生集料破碎遍数，降低再生集料生产费用，从源头上节约能源、避免超耗。

## 参考文献

- [1] 丁龙亭, 王选仓, 何璐, 等. 再生集料的破碎性能及破碎工艺[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(10): 93-97.
- [2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 3-4.
- [3] 纪小平, 曹海利, 刘陵庆. 水泥稳定再生集料的性能及其影响因素研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 342-346.

作者简介: 钟海军(1983-), 男, 本科, 高级工程师, 从事公路、铁路工程、水利工程施工技术管理工作。

基金项目: 本文为“中国铁建港航局集团有限公司2023年度科研计划课题: 高速公路改扩建拆除混凝土等固废材料的多用途再生利用研究(项目编号: 2023-B14)”的研究成果。