

中国工程建设标准化协会标准

《公路路面基层应用废旧水泥混凝土再生集料技术规程》

调研报告

调研报告

编写单位：广西桂海高速公路有限公司

北京新桥技术发展有限公司

2019 年 10 月

目 录

1 标准	3
1.1 编制的背景、必要性和目的	3
1.1.1 编制的背景	3
1.1.2 编制的必要性和目的	4
1.2 本规程中主要名词	5
2 调研资料整理	6
2.1 调研范围	6
2.2 调研内容	14
3 试验数据及相关资料	21
3.1 再生集料试验检测	21
3.2 规范试验数据	23
3.3 依托工程试验数据	26
4 抗冻性试验数据	28

1 标准

1.1 编制的背景、必要性和目的

1.1.1 编制的背景

随着我国高速公路飞速发展，高速公路改扩建项目增多，公路废旧混凝土的大量产生，据统计，我国因公路新建和改造产生的废弃混凝土占建筑垃圾的 50%~60%。例如一条宽 9m，混凝土面板厚 24mm 的二级公路，每公里产生的废弃混凝土量达 2160m³。

公路废旧水泥混凝土强度高，刚度大，且耐久性好，不会自然分解，将未经处理的废弃混凝土以露天堆放或以填埋的形式进行处理，将会造成永久性污染，破坏生态。此外，将数量巨大的废弃混凝土露天堆放，一方面占用大量耕地，我国土地资源短缺，人均占有面积少，堆放大量废弃混凝土，会造成土地资源浪费。另一方面会造成资源的浪费，我国是一个资源短缺，粗放型经营消费大国，将废弃混凝土露天堆放或回填处理，也会造成砂石资源的浪费，且新建道路需重新开采砂石，导致大量山体被挖，大面积植被破坏。不仅如此，废弃混凝土清理及运输也会产生巨额费用。

当前，随着环境保护与可持续发展战略的深入，对于将废弃混凝土进行合理及有效的处理越来越值得人们做深入的研究。将废弃混凝土循环再利用，能够有效的解决废弃混凝土问题。将废弃混凝土破碎加工形成的再生粗、细集料，部分或全部代替天然集料用于新道路或建筑材料中，可以实现对废弃混凝土的高效回收。利用其原有性能，形成新的建材产品，从而不但使有限的资源得以再生利用，而且解决了部分环保问题，符合国家构建节约型社会的需要，对于实现建筑资源环境可持续发展具有重要意义。

目前废弃混凝土的处理方式主要有两种：一是作为回填材料简单使用；二是运往郊外简单堆放。前者从一定程度上说尚未对这些资源进行合理利用，后者则不但占用了大量农田，甚至会造成新的环境污染。当前，随着环境保护与可持续发展战略的深入，人们迫切要求对这些废弃混凝土进行有效、合理的处理。对大量废弃混凝土进行循环再生利用，是解决废弃混凝土问题最有效的措施。将废弃混凝土破碎加工形成的

再生粗、细集料，部分或全部代替天然集料配制新的混凝土或者用于生产新型材料，可以实现对废弃混凝土的高效回收，利用其部分原有性能，形成新的建材产品，从而不但使有限的资源得以再生利用，而且解决了部分环保问题，符合国家构建节约型社会的需要，对于实现建筑资源环境可持续发展具有重要意义。

因此，若能将废弃的水泥混凝土再生利用于新建道路中，将会减少道路翻修、重建对环境带来的污染。不仅可以解决废弃混凝土的堆放问题，减少对土地资源的占用，不仅可以减少了对天然砂石材料的需求，不需大面积开山裂石，进而对植被进行保护，而且对废弃水泥混凝土中砂石的再利用也可以减少天然石料的浪费，达到变废为宝的目的。再生集料在工程中的应用势必将大大降低投资成本，对公司生产运营大有裨益。

1.1.2 编制的必要性和目的

废旧混凝土的再生利用我国在该领域起步较晚，但伴随建筑废弃物再生集料相关系列技术标准的出台，将切实有利于解决我国因建筑废弃物引发的一系列关系环境、资源与社会的矛盾难题。

目前关于再生集料的规范主要集中在建筑领域，比如颁布实施的《再生骨料应用技术规程》（JGJ/T 240-2011）、《混凝土用再生粗骨料》（GB/T 25177-2010）、《混凝土和砂浆用再生细骨料》（GB/T 25176-2010），交通部发布行业推荐标准《公路水泥混凝土路面再生利用技术细则》（JTG/TF31-2014）。同时，各地方也在积极探索废弃物再生利用，并制定了相关标准，例如《石灰粉煤灰稳定掺配建筑垃圾再生混合料基层施工技术规范》、《水泥稳定掺配建筑垃圾再生混合料基层施工技术规范》、《城镇道路建筑垃圾再生集料路面基层施工技术规范》（DBJ41/T166-2016）、《再生骨料混凝土应用技术规程》（DBJ/T13-276-2017）、《道路工程建筑废弃物再生产品应用技术规程》（SJG 48-2018）。

虽然我国目前在废弃混凝土再生领域编制并颁布了一些列的标准规程，但对于公路路面基层利用再生集料还是存在不足之处，主要表现在以下几点：

（1）国标、行标主要集中在规定水泥混凝土中如何利用废弃混凝土再生骨料，而在路面基层中的应用不涉及；

(2) 交通部发布的行业推荐标准《公路水泥混凝土路面再生利用技术细则》(JTG/TF31-2014) 主要是集中在水泥混凝土路面就地再生利用, 通过多锤头碎石化等设备将混凝土路面破碎成类似于级配碎石结构的柔性基层, 此项技术对路基的要求较高, 对软基等承载能力不足的路段则不适用;

(3) 部分省市颁布了地方标准, 以规范再生骨料在路面基层中的应用, 参照执行存在局限性;

(4) 在现状的相关规范标准中, 对再生骨料的要求性能要求较高, 这将限制大量消纳废弃混凝土的能力。

因此, 通过本规程的制定, 实现以下几点目标:

(1) 制定全国性的公路路面基层应用废弃混凝土再生骨料的团体标准, 以规范、指导再生骨料在路面基层中的使用;

(2) 通过制定本规程, 实现再生骨料性能指标和路面基层技术要求两者之间的平衡, 在满足我国路面结构层设计要求的情况下, 一方面尽量扩大应用范围, 提高消纳能力, 另一方面实现性价比的最优化;

(3) 通过制定本规程, 提供废弃混凝土的再生利用途径及依据, 加大废弃水泥混凝土再生规模, 促进资源循环利用, 保护自然环境。

1.2 本规程中主要名词

废旧水泥混凝土 waste concrete

指由公路工程中的路面、桥隧结构物、附属构造物等在建造施工、拆除、翻修等过程中产生的废旧水泥混凝土块。

再生集料 recycled aggregate of cement concrete

将旧水泥混凝土经过破碎、筛分后可用于水泥混凝土、水泥稳定碎石、二灰土等结构中的集料, 包含再生粗集料、再生细集料和再生粉料。

强化处理 recycled aggregate strengthen

利用物理方法、化学方法或者物理化学相结合的方法，对再生集料进行整形、填充空隙处理，以改善再生集料工程特性的过程。

2 调研资料整理

2.1 调研范围

(1) 国外建筑垃圾公路应用相关标准规范指南与工程应用状况

发达国家已经把建筑垃圾的处理和利用作为环境保护和社会发展的首要任务，许多国家相继出台建筑垃圾再生利用方面的政策法规，选择德国、英国、美国、日本、新加坡、韩国进行政策法规调研：

表 2-1 欧洲国家关于建筑垃圾再生利用的相关法规

序号	国家	法规名称	颁布时间	主要内容
1	德国	《废物处理法》 《废物清除和循环经济法》 《垃圾法》 《持续推动生态税改革法》	1978 1994 1999 2002	垃圾的产生者有对垃圾回收利用的义务；建筑垃圾重新利用的必要性； 建筑垃圾分类保存和处理
2	英国	《建筑业可持续发展战略》 《工地废弃物管理计划》 《废弃物战略》	1982 1991 1994	资源再生、再生示范、科技发展、循环标准、经济刺激等关于固体废物循环利用

表 2-2 美国和日本等国家关于建筑垃圾再生利用的相关法规

序号	国家	法规名称	颁布时间	主要内容
----	----	------	------	------

1	美国	《固体废弃物处理法》 《环境政策法》 《资源保护回收法》 《超级基金法》 《综合垃圾管理法令》 《污染预防法》	1965 1969 1976 1980 1989 1990	固体废弃物回收利用各环节相关规定；要求产生工业垃圾的企业必须从源头上削减建筑垃圾
2	日本	《废弃物处理法》 《再生骨料和再生混凝土使用规范》 《资源重新利用促进法》 《再循环法》 《建设再循环法》 《绿色采购法》 《推进形成循环型社会基本法》 《资源有效利用促进法》 《建筑再利用法》 《促进废弃物处理指定设施配备的有关法律》	1970 1977 1991 1997 2000 2000 2000 2000 2000 2000	明确建筑垃圾分类处理和资源化利用过程中各个主体的责任和义务；规定各类建筑垃圾进行再生利用的处置方法
3	新加坡	《绿色宏图 2012 废物减量行动计划》	2012	将建筑垃圾回收利用情况纳入工程竣工验收指标体系和绿色建筑标志认证工作中；确定合理科学的拆除建筑物顺序
4	韩国	《建筑废弃物再生促进法》	2003	明确了建筑垃圾处理过程中各责任主体的义务以及对建筑垃圾处理企业各方面的基本要求

(2) 国内建筑垃圾相关政策法规

目前我国颁布的建筑垃圾方面的法律法规如下：

表 2-3 国家及部委颁布的建筑垃圾政策法规

序号	法规名称	颁布时间
1	《城市市容和环境卫生管理条例》	1992 年
2	《城市固体废物处理法》	1995 年
3	《城市生活垃圾分类及其评价标准》	2000 年
4	《城市生活垃圾分类标志》	2000 年
5	《清洁生产促进法》	2002 年
6	《关于实行城市生活垃圾处理收费制度，促进垃圾处理产业化的通知》	2002 年
7	《城市建筑垃圾和工程渣土管理规定修订稿》	2003 年

8	《城市固体垃圾处理法》	2004 年
9	《市政公用事业特许经营管理办法》	2004 年
10	《中国城乡环境卫生体系建设》	2006 年
11	《全国城镇环境卫生“十一五”规划》	2007 年
12	《中华人民共和国循环经济促进法》	2008 年
13	《“十二五”循环经济发展规划》	2012 年
14	《“十二五”绿色建筑和绿色生态城区发展规划》	2013 年
15	《2015 年循环经济推进计划》	2015 年
16	《国家重点支持的高新技术领域（2016）年》	2016 年
17	《“十三五”国家科技创新规划》	2016 年
18	《关于开展建筑垃圾治理试点工作的通知》	2018 年

表 2-4 省市颁布的建筑垃圾政策法规

序号	法规名称	颁布时间
1	《西安市建筑垃圾管理暂行办法》	1992 年
2	《城市垃圾产生源分类及垃圾排放》	2000 年
3	《排污费征收使用管理条例》	2002 年
4	《西安市建筑垃圾管理办法》	2003 年
5	《固体废弃物污染环境防治法》	2004 年
6	《城市建筑垃圾管理规定》	2005 年
7	《西安市建筑垃圾管理办法实施细则》	2006 年
8	《节能减排综合性工作方案》	2007 年
9	《城市生活垃圾管理办法》	2007 年
10	《循环经济促进法》	2008 年
11	《建筑垃圾处理技术规范》	2009 年
12	《深圳市建筑废弃物减排与利用条例》	2009 年
13	《建筑垃圾管理办法》（上海）	2009 年
14	《关于进一步加强城市生活垃圾处理工作的意见》	2011 年
15	《昆明市建筑垃圾保运及处置管理实施细则》	2011 年
16	《邯郸市建筑垃圾管理条例》	2011 年
17	《洛阳市城市建筑垃圾管理若干规定》	2012 年
18	《成都市建筑垃圾处置管理条例》	2013 年

19	《南昌市城市建筑垃圾管理条例》	2017 年
20	《深圳市建筑垃圾处置和综合利用管理办法》	2017 年
21	《上海市建筑垃圾处理管理规定》	2017 年
22	《济南市城市建筑垃圾管理条例》	2018 年
23	《银川市建筑垃圾管理条例》	2018 年

(3) 国内建筑垃圾再生材料相关标准规范

对与建筑垃圾再生材料有关的国家标准、行业标准、地方标准及征求意见

稿进行调研：

表 2-5 国家及相关行业建筑垃圾再生材料相关标准

序号	类型	标准名称	颁布部门	年份	范围
1	国家标准	混凝土用再生粗骨料 GB/T25177-2010	住房和城乡建设部	2010	配置混凝土和砂浆再生细骨料
2	国家标准	混凝土和砂浆用再生细骨料 GB/T25176-2010	住房和城乡建设部	2010	配置混凝土的再生粗骨料
3	行业标准	建筑垃圾处理技术规范 CJJ 134-2009	住房和城乡建设部	2009	建筑垃圾的收集、运输、转运、利用、回填、填埋的规划、设计和管理
4	行业标准	再生骨料应用技术规程 JGJ/T 240-2011	住房和城乡建设部	2011	再生骨料在建筑工程中的应用
5	行业标准	道路用建筑垃圾再生骨料无机混合料 JC/T 2281-2014	工业和信息化部	2014	城镇道路路面基层及底基层用建筑垃圾再生骨料无机混合料
6	行业标准	建筑垃圾再生骨料实心砖 JG/T 505-2016	住房和城乡建设部	2016	建筑垃圾再生骨料为主要原料、水泥等为凝胶材料制成的非烧结实心砖

表 3-6 建筑垃圾再生材料地方标准

序号	标准名称	颁布省市	年份	范围
1	建筑垃圾再生骨料能源消耗限额 DB11/T 1386-2017	北京	2017	建筑垃圾资源化处置进行能耗的计算、考核，以及对新建项目的能耗控制
2	城市道路建筑垃圾再生路面基层施工与质量验收规范 DB11/T 999-2013	北京	2013	新建、改建城镇道路路面的底基层及主干路、次干路、支路、快速路辅路和非机动车道路面基层

3	建筑垃圾混凝土砌块 DB62/T 2783-2017	甘肃	2017	建筑垃圾混凝土砌块
4	城镇道路建筑垃圾再生集料路面基层施工技术规范 DBJ41/T 166-2016	河南	2016	新建、改扩建城镇道路半刚性水泥稳定基层及底基层的设计、施工和验收
5	道路用建筑垃圾再生细集料技术规范 DB61/T 1147-2018	陕西	2018	道路用建筑垃圾细集料的术语定义、技术要求、实验检验方法以及运输及储存要求
6	道路用建筑垃圾再生粗集料技术规范 DB61/T 1148-2018	陕西	2018	道路用建筑垃圾细集料的术语定义、技术要求、实验检验方法以及运输及储存要求
7	建筑垃圾再生材料路基施工技术规范 DB61/T 1149-2018	陕西	2018	建筑垃圾再生材料填筑路基工程的材料、施工及质量管理与验收的要求
8	水泥稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范 DB61/T 1150-2018	陕西	2018	水泥稳定掺配建筑垃圾再生材料基层材料要求、配合比设计、施工、质量管理和验收
9	石灰粉煤灰稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范 DB61/T 1151-2018	陕西	2018	石灰粉煤灰稳定掺配建筑垃圾再生材料基层材料要求、配合比设计、施工、质量管理和验收
10	建筑垃圾再生材料挤密桩施工技术规范 DB61/T 1159-2018	陕西	2018	建筑垃圾再生材料挤密桩处理特殊地基的施工材料、施工及施工质量管理与验收要求
11	道路用建筑垃圾再生材料加工技术规范 DB61/T 1160-2018	陕西	2018	建筑垃圾再生材料加工场地设计、原材料堆放、加工设备选型、加工技术及质量控制等要求
12	建筑垃圾再生材料处理公路软弱地基技术规范 DB61/T 1174-2018	陕西	2018	建筑垃圾再生材料处理公路软弱地基的材料、设计、施工、质量检验及验收标准
13	建筑垃圾再生材料公路应用设计规范 DB61/T 1175-2018	陕西	2018	建筑垃圾再生材料用于公路工程中的地基处理、路基填筑及路面基层、底基层和再生集料混凝土的设计要求
14	公路工程利用建筑垃圾再生材料预算定额和机械台班费用定额 DB61/T 1182-2018	陕西	2018	公路工程利用建筑垃圾再生材料预算定额、机械台班费用定额
15	建筑垃圾再生骨料非承重小型预制构件生产规程（征求意见稿）	陕西	2018	再生骨料混凝土生产非承重小型预制构件的原材料、技术要求、再生骨料混凝土的配合比、生产和质量检验
16	建筑垃圾处置与回收利用技术标准（征求意见稿）	重庆	2018	建筑物施工、装修和拆除过程中形成的建筑垃圾的收集、运输、回填、受纳、资源化利用等活动的管理、规划和建设
17	建筑垃圾在半刚性道路基层中应用技术规程（征求意见稿）	上海	2018	城市道路中采用建筑垃圾材料的半刚性基层设计、施工及验收

(4) 建筑垃圾公路应用项目及效果

针对建筑垃圾生产加工、路基、路面基层、混凝土构件应用及效果评价等方面对深圳、北京、上海、河北、甘肃、陕西等省市的建筑垃圾应用典型工程项目，按照时间、应用情况、成果、专利、效果验证，具体调研信息如下：

表 2-6 深圳市建筑垃圾再生材料应用情况

项目名称	建筑废弃物再生骨料关键技术及其规模化应用 (国家发明二等奖)	南科大校园建设(二期)项目	南山建工村保障房(二期)华泰小区
项目时间	2017 年	2018 年一至今	2017 年 7 月开建
完成单位	深圳大学、香港理工大学、深圳市华威环保建材有限公司		
完成人	邢锋, 寇世聪, 潘智生, 杨正松, 李文龙, 关宇		
应用情况	该项目关键技术形成的系列产品已在我国华南、华北、华东及香港地区百余项工程中应用, 如深圳平安金融中心、机场 T3 航站楼、地铁工程和吉林公主岭市棚户区改造工程等。	粗骨料用于地面铺设基础材料, 100 多万吨建筑废弃物实现就地消化处理利用, 建筑废弃物资源化再生利用率达到 90% 以上。	再生骨料直接用于后期建设及周边建设工程的基坑回填、路基水稳层填筑等, 或用于生产再生骨料混凝土和预拌砂浆, 或用来生产再生建材产品, 实现了资源再生, 资源化利用率超过 95%。
研究方向	提升建筑废弃物再生骨料品质技术	建筑废弃物就地绿色消化、再生利用	房屋拆除与建筑废弃物综合利用一体化
成果	1. 解决了再生粗骨料在结构混凝土中利用率低的难题; 解决了再生细骨料在建筑砂浆中大掺量使用的问题; 解决了环保砖市场竞争力低的难题。 2. 该项目技术制造的结构混凝土中再生骨料利用率超过 50%, 混凝土抗折强度比天然骨料高 10%, 干混砂浆无裂缝, 高效光催化铺路砖 NO _x 的减低率提高 30% 以上。 3. 实现了建筑废弃物再生骨料规模化应用及建筑废弃物“零排放”	采用现场处理的方法, 节约土地约 100 亩, 减少天然砂石原料消耗 60 万立方米, 节省建筑废弃物外运及填埋处置费用 4000 多万元, 实现产值 6000 多万元, 为深圳乃至全国的建筑废弃物综合利用开创了全新的“零排放”模式。	每综合利用约 5 万吨建筑废弃物, 可节约天然砂石 2.25 万方, 节约填埋用地约 5 亩, 同时还可减少填埋处理所带来的土壤及地下水体污染, 并节省了政府投资建设废弃物填埋场的征地、拆迁、管理等费用。
专利	1. 提升再生粗骨料品质的新技术; 2. 利用再生砂制备无裂缝干混砂浆的新技术; 3. 化学法提升再生粗骨料品质技术; 4. “二元增效”法制造可净化空气的混凝土铺路砖技术。		

后续验证情况	该项目已获授权发明专利 10 项，在本领域顶级期刊上发表 SCI 论文 93 篇，主要成果获得 2014 年度广东省科学技术奖一等奖和 2008 年第六届国际发明博览会金奖。广东省科技厅组织技术鉴定，项目技术成果达到国际领先水平。		该项目实行房屋拆除、建筑废弃物综合利用一体化模式，形成拆除、运输与综合利用产业等产业链相关环节整合，是首个“房屋拆除与建筑废弃物综合利用一体化施工”试点项目。
--------	---	--	---

表 2-7 北京市建筑垃圾再生材料应用情况

项目名称	长安街西延工程第二标段	北京市轨道交通新机场线一期工程
项目时间	2016 年	2018 年
研究方向	绿色再生无机混合料	预制梁场路面
成果	建筑垃圾再生产品被授予“绿色建筑节能推荐产品证书”。	
后续验证情况	已市场化销售绿色再生产品 6 万余吨。	施工过程中未发现裂缝、起皮等施工缺陷，目前 03 标段预制梁场施工可通行重型混凝土运输车、钢筋车辆。

表 2-8 上海市建筑垃圾再生材料应用情况

项同名称	世博园道路工程
项目时间	2007 年
建筑垃圾应用情况	世博园区 HEC 固结渣土的应用部位主要集中在新建道路路基加固处理，部分新建道路下基层和部分临时施工通道基层。
成果	编制了《HEC 固结渣土用于中国 2010 上海世博园区道路施工及验收导则》

表 2-9 河北省建筑垃圾再生材料应用情况

项同名称	建筑垃圾制砖项目
项目时间	2004 年
建筑垃圾应用情况	在河北邯郸广泛应用，引起全国的关注，被国务院发展研究中心评价为建筑垃圾建材化的新举措，形成了“邯砖”经验。
研究方向	建筑垃圾制砖的研究方向是实现建筑垃圾减量化、无害化、资源化。
成果	建筑垃圾制砖项目生产出不同型号的多孖砖、标准砖、异型砖、空心砌块砖、环保装饰砖、荷兰砖以及轻体墙板等。
后续验证	制砖产品先后通过了国家建筑材料工业墙体屋面材料质量监督检验测试中心

情况	的质量认定。项目成果经河北省科学技术信息研究所鉴定为“在全国文献中未见相同的报道”。并已通过企业标准的认定。
----	--

按照建筑垃圾再生材料应用层位：地基和路基、路面基层，全国建筑垃圾再生材料应用项目汇总如下：

表 2-10 建筑垃圾再生材料路基及地基应用项目

序号	地区	项目	层位	应用技术
1	江苏	南京市政道路	路基	现场直剪试验研究
2	安徽	蚌埠市试验段	路基	路床应用 试验研究
3	河南	商登高速公路郑州境段	路基	控制上路床填料、质量
4	河南	G线河南许昌至鄢陵段改建工程	路基	施工技术
5	天津	蓟汕高速公路与港城大道联络线	路基	力学性能试验 力学分析
6	天津	津港高速	路基	施工方案和 效益分析
7	上海	世博园道路工程	路基	HEC 固结渣土
8	山东	济南市市中区南北康片区市政道路	路基	将含有大量建筑垃圾的复杂 填土至路床顶
9	北京	京新高速公路北京段	路基	重型碾压和冲击碾压
10	西安	西安至宝鸡高速公路改扩建工程	路基	路基填筑施工技术
11	咸阳	咸阳市城西快速干道	路基	软基处理和路基填筑 路面铣刨料再生利用
12	西安	西安市三环路	路基	施工技术
13	西安	西禹高速公路 阎良至禹门口段	路基	路基填筑
14	广西	柳南高速公路改扩建工程	路基	路基填筑、软弱土路段换填
15	河南	郑州市京港澳高速辅道工程	软土路基	建筑垃圾散体材料桩施工工艺及检测
16	河北	省道京赞公路	软土路基	软土路基换填、施工技术
17	天津	“新城开发”BT项目市政基础设施工程一期西区道路	软土路基 地基	软土路基换填 力学特性
18	广东	广州科学城某建设场区	地基	软弱地基处理
19	山东	东昌府区湖上乐园宾馆	地基	地基加固 (挤密桩)
20	西安	西咸北环线	特殊路基	特殊地基处理

表 2-11 建筑垃圾再生材料基层应用项目

序号	地区	项目	层位	技术
1	河北	沧州市千童大道	基层	破碎工艺与室内试

		黄骅市神华大街		验
2	北京	北京某公司厂区道路基层	基层	建筑垃圾再生无机混合料基层应用
3	北京	房山区顾八路大修工程	基层	全断面再生结构
4	上海	国道 318 线沪青平公路大中修	基层	共振和多锤头碎石化技术
5	河南	开封地区在开兰路改建工程	基层	无机结合料稳定再生材料
6	西安	西咸北环线	基层	建筑垃圾重金属污染质检测
7	西安	四禹高速公路阎良至禹门口段	基层	基层应用
8	西安	西安市南北中轴线工程部分施工段	基层	施工技术
9	浙江	宁波市惊驾路	基层	采用水泥炉渣稳定层作为道路基层半刚性材料
10	吉林	长平高速	沥青再生、稳定基层	再生方案
11	天津	蓟汕高速公路与港城大道联络线	底基层	力学性能试验 力学分析
12	河北	沧州市吉林大道	底基层	破碎工艺与室内试验

2.2 调研内容

(1) 国外建筑垃圾公路应用相关标准规范指南

德国是世界上首次大量利用建筑垃圾的国家。上世纪 70 年代就推出了“蓝色天使”计划、制定了《废弃物处理法》，后修改为《废弃物限制处理法》，1994 年颁布的《循环经济和废物清除法》在世界上产生了广泛影响。德国制订了 DIN 4226-100：2002-02《砂浆和混凝土用骨料第 100 部分：再生骨料》，按照来源形式将再生骨料分为废混凝土块、拆除物块体、废砖石、废瓦砾四类，同时对这四类骨料的组成、密度、酸溶氯盐含量、抗干缩性等相关性能进行了全面详尽的规定。德国政府在《废弃物法增补草案》中，对各种建筑废物的利用率比例做了规定，并对未处理利用的建筑弃物征收存放费。

美国在建筑垃圾处理方面历时一个世纪的实践后，制定的政策法规经历了三代的发展、补充，截至目前，该法律法规政策方面已经相当完善。第一代是基于政府主导的命令与控制的方法，通过行政手段实现污染控制，第二代是基于市场的经济刺激手段，强调了企业在建筑垃圾产生方面的源头削减作用，第三代是在进一步完善政策和企业的基础上实现政府的倡导和企业自律，着力提高广大公众的参与意识和参与能力。

美国还建立了建筑垃圾运输准入制度、《建筑垃圾填埋场设计规范》、处理建筑垃圾行政许可制度等一系列制度和规范。

1977 年，日本政府制定了《再生骨料和再生混凝土使用规范》，规范中定义了部分重要术语，包括：原混凝土、再生骨料和再生骨料混凝土，规定了再生骨料的物理性能要求与分类，并对采用再生骨料制备混凝土的水灰比和水泥用量有所限制。1990 年日本制纸联合会为防止二噁英类物质的污染制定了《纸浆制造业自主限制方针》，1991 年日本政府又制定了《资源重新利用促进法》，规定建筑施工过程中产生的渣土、混凝土块、沥青混凝土块、木材、金属等建筑垃圾，必须送往“再资源化设施进行处理”。1995 年，制定了《关于促进容器包装分类收集及再商品化法律》即《容器包装再循环法》（1997 年实施）。1998 年制定了《特定家庭用电器再商品化法》即《家用电器再循环法》（2001 年实施）。2000 年制定了《推动建设资源再循环型社会基本法》、《建筑工程材料再循环法》、《食品循环资源再生利用促进法》等。2003 年制定的《建筑垃圾再生促进法》中规定工程建设中需使用的再生建材的种类、范围、数量等，要求公共建筑必须使用再生建材，对未履行义务的企业进行行政处罚。2012 年的《废弃物处理法》（修订）中规定建筑废弃物由排放者负责，未按规定处理的企业或个人预缴纳罚金，情节严重者受刑事处罚。

新加坡 2002 年 8 月开始实施“绿色宏图 2012 废物减量行动计划”。制定的《环境污染控制法案》、《公共环境卫生法案》等涉及了关于建筑垃圾立法的内容。规定将建筑废弃物资源化综合利用情况列入了绿色建筑标志认证的考核体系。

韩国政府 2003 年制定了《建设废弃物再生促进法》，2005 年、2006 年又先后进行了两次修订，明确了政府排放者和建筑垃圾处理商的义务。规定了建设工程义务使用建筑垃圾再生产品的范围和数量，明确了未按规定使用建筑垃圾再生产品将受到哪些处罚。

上述发达国家主要从建筑垃圾的材料分类及性能、环保和应用要求方面做出规定，缺乏对建筑垃圾公路应用的成套技术规范，在借鉴发达国家建筑垃圾再生材料方面成功经验的同时，需要结合国内工程应用的成功经验，编制符合国情的《公路工程利用建筑垃圾技术规范》，促进建筑垃圾在公路工程中持续综合化利用。

（2）国内建筑垃圾相关政策法规

1990 年以来，我国相继出台了各类建筑垃圾方面的法律法规，现阶段建筑垃圾资源化政策已初成体系，1995 年，我国通过《城市固体垃圾处理法》，要求产生垃圾的部门必须交纳垃圾处理费，目的是从源头减少建筑垃圾的产生量。

2002 年 6 月，国家计委、财政部、建设部、国家环保总局联合发布《关于实行城市生活垃圾处理收费制度，促进垃圾处理产业化的通知》，全面推行生活垃圾处理收费制度，通过公开招投标的方式，择优选择有资质的企业承担城市生活垃圾处理工作，并要求“城市建设环境卫生行政主管部门要建立市场准入制度”，为垃圾处理产业化奠定了基础。

2005 年和 2009 年分别出台了《城市建筑垃圾管理规定》、《中华人民共和国循环经济促进法》，同时各个省份也出台了有关建筑垃圾的管理规定。

2007 年 4 月，建设部修订并重新颁布了《城市生活垃圾管理办法》（建设部令第 157 号），其中对从事城市生活垃圾经营性清扫、收集、运输服务的企业，从事城市生活垃圾经营性处置的企业提出了明确要求。同年 6 月建设部发布了“城市生活垃圾经营性清扫、收集、运输服务许可证”，和“城市生活垃圾经营性处置服务许可证”样式。

我国在建筑资源垃圾处理问题上，于 2012 年 12 月 12 日发布《“十二五”循环经济发展规划》，该计划的核心在于把握资源产出率，以此促进资源利用效率，有效降低资源消耗，从而实现可持续发展目标。这些法规或规定无论是对建筑垃圾产生主体单位的规定，还是对建筑垃圾资源化企业的扶持政策，乃至再生产品的推广均有较为完善的法律、法规、政策体系。

为促进更多的建筑垃圾资源化利用项目落地，2015 年，国家发展改革委颁布《2015 年循环经济推进计划》，明确提出鼓励各地探索多种形式对建筑垃圾资源化利用进行市场化运作。

2016 年，国务院发布《国家重点支持的高新技术领域（2016 年）》和《“十三五”国家科技创新规划》，提出要大力发展建筑垃圾的分类与再生料处理技术、建筑废弃物资源化再生关键技术等。

（3）国内建筑垃圾再生材料相关标准规范

针对建筑垃圾再生材料，住房和城乡建设部先后颁布了 2 部国家标准，3 部行业标

准，工业和信息化部颁布了 1 部行业标准。

现行两部国家标准主要针对再生骨料的技术性能方面提出了规范性要求；4 部行业标准涉及到了建筑垃圾再生材料的收集、运输、转运、利用、回填、填埋的规划、设计和管理等方面的内容。

北京、河南、甘肃、陕西、上海、重庆先后颁布建筑垃圾再生材料地方标准 17 部。

全国的地方标准对建筑垃圾材料路用方面做了更为细化的规范，包括建筑垃圾再生材料在新建、改建城镇道路路面的底基层及主干路、次干路、支路、快速路辅路和非机动车道路面基层的性能要求。陕西省的 11 部地方标准对建筑垃圾再生材料提出了原材料、生产加工、设计与施工等方面的成套的技术要求和标准。

现行建筑垃圾相关标准主要针对再生建材生产加工技术性能方面提出规范性要求，仍缺乏对建筑垃圾再生材料的原材料、生产加工、设计与施工等方面的成套技术标准。编制《公路工程利用建筑垃圾技术规范》有利于推动建筑垃圾在公路工程领域的应用。

(4) 建筑垃圾公路应用项目及效果

1) 国内代表省市典型项目

目前编写组收集了深圳、北京、上海、河北等省市应用建筑垃圾再生材料典型项目。深圳大学、香港理工大学和深圳市华威环保建材有限公司等单位共同完成了“建筑废弃物再生骨料关键技术及其规模化应用”项目，并获得了 2017 年度国家技术发明二等奖。实现了大掺量再生骨料混凝土的高性能化、大掺量再生砂干混砂浆无裂缝及高性能化，并实现了铺路砖的环保功能。

南方科技大学校园建设中进行了首个建筑废弃物就地绿色消化、再生利用试点工作，南山建工村保障房（二期）华泰小区建设中推行房屋拆除与建筑废弃物综合利用一体化模式，将建筑垃圾就地处理、就地使用，尽量减少建筑垃圾的排放，将再生骨料直接用于后期及周边建设工程的建设，或供给混凝土搅拌站和预拌砂浆生产企业用于生产再生骨料混凝土和预拌砂浆，或用来生产再生建材产品，实现了资源再生，资源化利用率超过 90%。

2) 各典型项目应用层位

全国各省市公路利用建筑垃圾再生材料的工程主要是将建筑垃圾再生材料应用于公路的路基和基层，有关的技术包括路基和基层施工、力学性能试验、破碎工艺与质

量控制等。

①建筑垃圾再生材料路基应用项目

郑州市京港澳高速辅道工程研究了建筑垃圾以散体材料桩的形式在软土路基中的应用。结果表明，建筑垃圾散体材料压缩模量小于天然碎石，但是仍满足散体桩骨料的要求。现场静载试验结果表明，建筑垃圾散体材料复合地基较原软土地基承载力特征值提高了 1.9 倍。这一过程中桩长和散体材料模量对结果影响不明显，主要影响因素是桩径。

天津市武清区“新城开发”BT 项目市政基础设施工程一期四区道路路基换填处理项目将建筑砖渣土作为换填材料用于饱和软土地基处理中。通过分析建筑垃圾土的压实特性和强度特性，认为建筑垃圾土碾压形成的地基层符合硬壳层的概念，通过分析硬壳层的工作机理和在地基承载过程中起到的作用，提出了换填后地基承载力以及满足一定荷级的建筑垃圾土临界厚度计算方法。

蓟汕高速公路与港城大道联络线项目工程研究了破碎后的建筑垃圾掺入土中作为路基填料时，不同对比对最大干密度、最佳含水率、承载比的影响规律；通过研究建筑垃圾再生骨料掺入水泥稳定土、石灰稳定土和石灰粉煤灰稳定土中用作底基层材料时，得到了不同配比下混合料的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度以及回弹模量性能。并通过有限元模拟分析，验证建筑垃圾用作路基填料和底基层材料的可行性。试验和模拟的结果表明各配比混合料的 CBR 值、无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度以及回弹模量均能满足现行规范的要求，可以在道路工程中使用。

蚌埠市在实体工程中对建筑垃圾填料试验段进行了室内试验，提出了含超尺寸粒径填料的最大干密度和最佳含水率计算方法。承载比试验结果表明建筑垃圾填料的承载比均远高于规范关于路基填料的要求。

海门市某高速公路建筑垃圾分层填筑路基试验段，进行现场直剪试验，相比于普通填土，建筑垃圾的剪切强度更大。

河南省机西高速公路二期工程研究建筑垃圾再生料应用于上路床的技术性能。建筑废弃物上路床填料的粒径、颗粒级配、不均匀系数、界限含水率、承载比、有机质含量、易溶盐含量、杂物含量、沉降差、孔隙率均满足规范要求，弯沉试验结果满足设计要求。

津港高速垃圾场路段研究了路基换填关键技术，主要技术为浅层换填加强夯压实以及抛石挤淤加强夯压实的方法，并分析了该处理方案的经济效益和环境效益。

世博园建设拆迁过程中产生的建筑垃圾与原状土混合形成建筑垃圾渣土，使用高强耐水土体固结剂对渣土进行固结，应用于世博园区道路路基加固处理和半刚性基层的设计和施工技术。

京赞公路采用建筑垃圾换填方法处理软土地基的施工技术，并分析该方案的效益。与石灰土换填技术相比，该方案大大缩短了工期，同时节省了大量资金。

国道 311 线河南许昌至鄢陵段改建工程将路基宽度扩至 32m，路面宽度 24m，并由原来的双向四车道改为双向六车道。扩建工程决定采用分层碾压填筑砖渣的路基施工方法，为了验证其作为路基填料的可行性和碾压密实性，选择了改建工程的半幅路基加宽段 K25+000~K25+400 路段作为试验段进行试验。最终采用沉降量观测法进行分层压实检测，结果表明符合施工要求。

西安至宝鸡高速公路改扩建工程将废弃混凝土加工成适宜于路面基层使用的再生材料，即水泥稳定建筑垃圾粒料基层施工法，研究了建筑垃圾在高速公路路基中分类、选用、施工工艺、施工方法及检测标准。

咸阳市城西快速干道工程对建筑垃圾处理施工工艺进行了总结，并对再生利用的经济效益进行了比较，从而为今后类似工程提供了一定的经验。

西禹高速公路试验段从建筑垃圾加工与堆放、基底处理、运输、布料与整平、碾压进行研究，得到采用压实沉降差和孔隙率这两个指标作为控制压实质量的评价指标。得出建筑垃圾在高速公路路基工程应用中切实可行，不但可以减少开采石料对生态环境造成的负面影响。还有显著的社会和经济效益，为今后建筑垃圾在路基施工中应用提供参考和借鉴。

西咸北环线高速公路项目针对建筑垃圾再生材料在公路工程特殊地基处理中的应用开展了深入、系统的研究，归纳总结了建筑垃圾再生材料应用于湿陷性地基和湿软性地基处理的形式及作用机理，并通过工程检测验证了其在地基处理中的实用性和适用性，为合理有效推广建筑垃圾再生材料在公路特殊路基处理的应用提供了理论基础。

柳南高速公路(广西柳州至南宁)改扩建工程项目在施工中对废弃及旧水泥混凝土、施工废粉等固体废弃物进行材料化再生，重新用于项目的施工便道填筑、改路路基填筑、软弱土路段换填、改渠工程及填石路基填筑等方面，对原路面加铺工程（约 30 万

方)及改扩建施工过程中产生废弃混凝土(约5万方)进行再利用,减少开山采石,节约资源,降低能源消耗。

通过以上应用研究可以看出建筑垃圾多用于软土地基处理。处理方案分为建筑垃圾散体材料桩挤密处理和换填强夯处理形成“硬壳层”。建筑垃圾也可用于路基填料,大量的试验研究表明,建筑垃圾填料的室内和现场试验性能均满足规范关于路基填料的要求,并且路基填料强度特性优于一般路基土。建筑垃圾的有效应用,能够带来显著的经济效益和环境效益,同时也为工期缩短和质量控制带来了诸多便利。

②再生材料路面基层和底基层应用项目

由调查可知,部分省市通过理论研究和试验路验证,结果表明经过科学的处理,建筑垃圾再生材料能较好地应用于路面基层和底基层中。

河北省沧州市市政工程公司先后在沧州市千童大道、黄骅市神华大街、沧州市吉林大道等多项道路工程中应用了建筑垃圾再生材料,工程应用效果良好。该公司进行了大量试验研究,确定了混合料的最佳配合比以及无机结合料的最佳掺量:认为以7:13:80外加1%水泥配合比较经济合理;水泥稳定再生砖石材料以5.0%水泥剂量较经济合理,水泥粉煤灰稳定再生砖石材料以3:6:91配比较佳。

北京首钢总公司通过室内试验研究了建筑垃圾再生材料基层混合料配比,确定石灰:粉煤灰:再生骨料比例为8:17:75。通过试验路铺筑后的压实度、无侧限抗压强度检测,与设计值进行对比,各项技术指标达到了道路设计和行业施工规范要求,后期观测也表明试验路应用效果良好。

蓟汕高速公路与港城大道联络线项目工程对所用的建筑垃圾进行分类和加工处理,通过系统的室内试验,研究建筑垃圾再生骨料的基本性能。试验结果表明,将建筑垃圾骨料用于路基填料和底基层中,各配比混合料的CBR值、无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度以及回弹模量均能满足现行规范的要求,可以在道路工程中使用。

国道318线沪青平公路大中修工程路面为“白改黑”方案,既有旧水泥混凝土板块采用共振和多锤头碎石化技术破碎后直接作为新路基层。

西咸北环线工程对西安市最主要的建筑垃圾分类加工厂进行调查取样,检测其所含有的重金属污染质,甄别潜在的污染来源。结果表明:尽管混凝土、砖块、瓷片中个别样品Cd、As、Cr、Zn的含量超出国家土壤三级标准,但实际使用中可能只有少量

溶解态滤出，因此并不会对环挠造成较大危害，将其大规模应用于公路工程中可行。

西禹高速公路阎良至禹门口段结合道路工程材料的特点，将回收的建筑垃圾经过分拣、粉碎成一定粒径，通过试验研究了建筑垃圾骨料的吸水率、密度、压碎值等基本性质，分析了建筑垃圾混合料与水拌和、碾压过程的物理、化学作用机理；按不同的掺合比例进行试验，研究不同级配建筑垃圾作为路面基层的路用性能变化；并提出了建筑垃圾混合料作为道路底基层或基层使用的工艺流程。

西安市南北中轴线工程部分施工路段以水泥为结合料拌和旧混凝土路面形成水泥稳定层，研究了该类基层的原材料性质、混合料配合比设计及施工技术。结果表明：采用水泥稳定的建筑垃圾粒料基层，具有强度高、刚度大、耐久性好、干缩小、易于施工等优点，且具有良好的经济、社会效益。

3 试验数据及相关资料

3.1 再生集料试验检测

参照现有的规范，本项目拟采用的建筑废弃物再生粗集料和再生细集料的技术指标应分别满足表 3-1 和表 3-2 的规定。其中再生粗集料指粒径大于 4.75 mm 的粒料，再生细集料指粒径小于 4.75 mm 的粒料。

表 3-1 再生粗集料技术要求

测试指标	高速公路和一级公路、城市快速路和主干道			检测方法
	基层	底基层	垫层	
表观密度(g/cm ³)	>2.50	>2.50	>2.50	T0304-2005
压碎值(%)	≤30	≤30	≤30	T0316-2005
吸水率(%)	≤6.0	≤7.0	≤7.0	T0304-2005

<0.075 含量 (%)	≤1.5	≤1.5	≤1.5	T0310-2005
针片状 (%)	<18	<20	<20	T0312-2005
轻物质 (%)	≤1.0	≤1.0	≤1.0	

表 3-2 再生细集料技术要求

测试指标	高速公路和一级公路、城市快速路和主干道			检测方法
	基层	底基层	垫层	
表观密度 (g/cm ³)	>2.4	>2.4	>2.4	T3028-2005
饱和面干吸水率 (%)	≤10.0	≤10.0	≤10.0	T0330-2005
<0.075 含量 (%)	≤3.0	≤3.0	≤3.0	T0335-2005
轻物质 (%)	≤1.0	≤1.0	≤1.0	
有机质含量 (%)	<2	<2	<2	T0151-1993
硫酸盐含量 (%)	<0.25	<0.25	<0.25	T0159-1993
液限 (%)	<28	<40	<28	T0118-2007
塑性指数	<9	<17	<6	

按粒径划分, 本项目拟采用的建筑废弃物再生集料共分 3 种规格, 分别为 16-31.5 mm 集料、10-16 mm 集料和 0-10 mm 集料, 各档集料的技术指标如表 3-3 和表 3-4 所示。

表 3-3 建筑废弃物再生粗集料技术指标检测结果

项目	单位	技术指标	检测结果	
			10-16 mm	16-31.5 mm
表观密度	g/cm ³	>2.4	2.673	2.652
压碎值	%	≤30	23.3	27.6
吸水率	%	<8	6.35	5.84
<0.075 含量	%	≤3.0	1.8	1.3

针片状颗粒总含量	%	<18	0.7	1.4
轻物质	%	≤1.0	0.7	0.5

表 3-4 建筑废弃物再生细集料技术指标检测结果

项目	单位	技术指标	检测结果
表观密度	g/cm ³	>2.4	2.575
饱和面干吸水率	%	≤10	8.4
<0.075 含量	%	≤3.0	2.5
轻物质	%	<1.0	0.6
有机质含量	%	<2	1.3

由表 3-3 和表 3-4 可知，拟采用的建筑废弃物再生集料的技术指标满足相关规范的要求。与新集料相比，再生集料具有压碎值较高、吸水率较大的特点。

3.2 规范试验数据

我国现行《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20-2015[i]中仅对粗集料的针片状颗粒含量有规定外，其余物理性能均无具体要求。所以本研究中采用《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20-2015 中表 3.6.1 高速公路和一级公路重型交通 I 类技术要求作为再生粗集料针片状含量的技术指标要求，采用《公路水泥混凝土路面施工技术细则》（JTG F30-2014）[ii]表 3-5 再生粗集料质量中 II 级技术要求作为再生粗集料表观密度、吸水率及含泥量的技术指标要求；

表 3-5 再生粗集料物理性能试验结果

Table3-5 Test results of physical properties of recycled coarse aggregate

名称		表观密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	含泥量 (%)	针片状 (%)
再生粗料	19mm	2.618	3.0	0.3	10.5
	16mm	2.615	3.3	0.4	15.2
	9.5mm	2.620	3.9	0.2	13.9
	4.75mm	2.627	4.7	0.2	14.3
天然粗料	19 mm	2.744	0.44	0.2	4.5
	16 mm	2.737	0.47	0.2	4.2
	9.5 mm	2.730	0.43	0.2	6.8
	4.75 mm	2.743	0.64	—	7.9
规范要求		≥ 2.350	≤ 5.0	≤ 0.7	≤ 22

以上实验结果表明：

1、再生粗集料的表观密度、吸水率、针片状含量、含泥量的试验结果均能满足相关规范的要求。说明废旧水泥混凝土再生粗集料的物理性能基本能满足规范中对水泥稳定碎石基层的物理性能要求。

2、表观密度：由试验结果可以得出，不同粒径的再生集料表观密度均不小于 $2.350 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，满足规范中对粗集料的规范，但均比天然集料表观密度小。导致再生粗集料表观密度较小的原因很多，包括集料本身的粒径、原始水泥混凝土中集料的密度、水灰比等。由表观密度的定义，表观密实是指单位体积（含材料的实体矿物成分及闭口空隙体积）物质颗粒的干质量，其中闭口空隙为不吸水空隙，而再生粗集料碎石组成中有较多的表面裹覆旧水泥砂浆的碎石，旧水泥石有较多的开口空隙，因此造成再生集料的空隙率较大。所以再生粗集料的表观密度比天然集料小。

3、吸水率：再生粗集料的吸水率比天然粗集料的吸水率大，且两者之间的数值差异达 6~7 倍。再生粗集料的组成中，表面裹覆旧水泥砂浆的碎石所占比例最大，这些旧水泥砂浆的质量相对较轻，且空隙率大，吸水率大，所以导致再生集料的吸水率较

天然粗集料吸水率有 6~7 倍的差异。所以在实际施工铺筑水泥稳定碎石基层时，需要较大的含水量和相对较高的水泥用量。

4、含泥量：就试验结果来看，再生粗集料的含泥量均不大于 0.7%，即其含泥量满足规范要求。再生集料从道路中凿出及破碎过程中，产生了较多的泥土，所以再生集料的含泥量比天然集料的含泥量稍大。含泥量中“泥”并不是实际意义中的泥土，而是指粒径小于 0.075mm 的细小颗粒。集料中含有较多的泥土，不仅会增加再生集料混合料的用水量，而且会降低混合料的强度，甚至会增加混凝土的干燥收缩。因此，在实际工程中应严格控制水泥稳定碎石中集料的含泥量。

5、针片状含量：本文中再生粗集料针片状含量的测量方法按照《公路工程集料试验规程》中 T0312-2005 游标卡尺法测量，集料的最大长度（宽度）方向与最小厚度（直径）方向的尺寸之比大于 3 倍的碎石则为针片状颗粒。由试验结果可知，再生集料的针片状含量是天然集料的将近两倍之多。这是由于旧水泥混凝土在破碎加工时，一部分碎石经过了多次破碎。另外再生集料表面裹覆的水泥石使集料表面更加粗糙、棱角更多，且这部分碎石占再生粗集料的大多数。因而再生粗集料的针片状含量高于天然集料。粒径为 16mm 再生粗集料的针片状含量最高为 15.2%，完全满足《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20-2015 中针片状含量不大于 22%的规定。

3.3 依托工程试验数据

本实验中所采用的再生集料来自广西柳州（鹿寨）至南宁高速公路改扩建工程，通过挑选尺寸合适的废旧混凝土块运回实验室，经过破碎后对再生粗、细集料分别进行物理力学试验。上一章节中，依据《公路工程集料试验规程》JTG E42-2005 中相应的试验方法对再生集料和天然集料的物理力学性能进行试验评价，结果如表 4-3 所示。

表 3-6 再生粗集料物理性能试验结果

名称		表观密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	含泥量 (%)	针片状 (%)
再生粗料	19mm	2.618	3.0	0.3	10.5
	16mm	2.615	3.3	0.4	15.2
	9.5mm	2.620	3.9	0.2	13.9
	4.75mm	2.627	4.7	0.2	14.3
天然粗料	19 mm	2.744	0.44	0.2	4.5
	16 mm	2.737	0.47	0.2	4.2
	9.5 mm	2.730	0.43	0.2	6.8
	4.75 mm	2.743	0.64	—	7.9
规范要求		≥ 2.350	≤ 5.0	≤ 0.7	≤ 22

表 3-7 再生粗集料压碎值、磨耗损失试验结果

名称	压碎值 (%)	磨耗损失 (%)
再生粗集料	27.8	28
天然集料	11.2	24.1
规范要求	≤22 基层 ≤30 底基层	≤35

表 3-8 再生粗集料软石含量试验结果

集料粒径 (mm)	软石含量 (%)	
	再生粗集料	规范要求
26.5	0	≤3
19	1.17	
16	1.9	
9.5	6.1	
4.75	9.4	

表 3-9 再生细集料物理力学性能试验结果

名称	视密度 (g/cm ³)	含泥量 (%)	砂当量 (%)	含水率 (%)
再生细集料	2.522	3.2	67.3	2.967
天然细集料	2.747	2.1	72	—
规范要求	≥2.50	≤3.0	≥60	—

试验所用的水泥为 P32.5 普通硅酸盐水泥。

4 抗冻性试验数据

表 4-1 半刚性基层材料冻融循环实验结果

材料组号	材料名称	压实度/%	冻前吸水率/%	试件冻融循环质量损失率			冻融循环后强度变化		
				试件开始损坏的循环次数	10 次循环后试件损坏率	10 次循环后试件平均质量损失率	90 d 龄期抗压强度/MPa	10 次冻融循环后强度/MPa	冻后抗压强度损失率/%
iv	水泥石屑	100	3.37	—	—	0.07	8.36	5.45	35
		95	5.48	—	—	0.33	5.10	4.72	38
		90	7.88	—	—	0.46	3.39	2.5	26
⑬	水泥钎矿渣碎石	100	7.08	—	—	0.21	4.81	3.05	37
		95	7.33	—	—	0.51	3.48	2.01	42
		90	9.43	第 5 个循环	60%	9.99	2.07	1.08	48
⑭	石灰粉煤灰砂碎石	100	4.26	—	—	1.62	5.62	2.92	48
		95	5.61	第 3 个循环	20%	1.85	3.40	1.47	57
		90	6.8	第 3 个循环	全部损失	7.89	1.32	—	100
⑮	水泥石灰土砂	100	1.10	—	—	0.06	3.70	2.40	35
		95	3.57	—	—	0.57	2.92	1.68	42
		90	6.01	—	—	0.12	2.62	1.44	45
⑯	水泥石灰土(2 [#])	100	3.18	—	—	0.66	3.89	2.64	29
		95	4.12	—	—	0	2.81	2.07	27
		90	5.64	第 9 个循环	20%	0.31	1.97	1.42	28
v	石灰土(1 [#])	100	3.33	第 5 个循环	全部损失	7.25	1.61	—	100
		95	4.78	第 5 个循环	全部损失	14.52	1.13	—	100
		90	6.96	第 2 个循环 ^④	全部损失	全部崩解	0.66	—	100

注： 10 次冻融循环后平均质量损失小于 0.5% 的可视为没有损失，使用中发现这种损失多为试件断面不致密引起；
④石灰土压实度 90% 的试件在第 2 个循环之后全部破坏。

[

调研报告