

2023 年度陕西省科学技术奖项目提名公示

项目名称	建筑垃圾公路综合应用关键技术与标准研究
项目简介	
本项目在响应国家节能减排、循环经济和建设节约型社会政策的号召下，基于双碳目标，本着低碳、环保、循环再利用的理念，通过理论分析、室内试验、工程实践、效果监测和检测及工程应用推广，首次攻克了建筑垃圾应用于公路各个层位和不同场合的技术难题，在高速公路的路基填筑、地基处理、路面铺筑、非承重混凝土构件加工、临建工程等方面进行了试验研究和工程实践，提出系统地高速公路工程再生材料加工、设计、施工、定额、环境安全、政策及效益的应用体系，制定出公路交通行业利用建筑垃圾的行业标准及管理办法，填补了国内建筑垃圾技术标准的空白，形成公路交通行业建筑垃圾综合利用的成套技术和标准，主要技术创新成果如下： 创新点一：针对我国建筑垃圾的特点和公路工程的需求，基于对我国建筑垃圾的特点和优劣分析，提出差异化利用理念和选择性加工处理方式，研制了建筑垃圾再生材料加工及基于密度和形状的砖混分离设备，提出了用于不同材料类型、不同场景的生产线，实现了轻质杂物含量和杂物含量均小于 0.1%的高品质建筑垃圾再生材料。 创新点二：建立了基于公路等级、交通分级、应用部位及加工方式的建筑垃圾再生材料综合应用指标体系，编制了《公路工程建筑垃圾利用规范》（JTG/T 2321-2021）交通行业标准，于 2021 年正式颁布实施。 创新点三：从微观结构和宏观性能分析了建筑垃圾再生材料的孔隙变化规律，自主研发了适用于建筑垃圾击实试件的长期浸水恒载装置，分析了建筑垃圾再生材料在饱水静载作用下的沉降变形规律，确定了路基沉降拟合模型方程，提出了建筑垃圾再生材料处理湿陷性黄土与湿软地基、路基填筑设计与施工技术标准及质量控制标准。 创新点四：基于试件不同的成型方法，通过对水泥稳定建筑垃圾再生混合料的力学特性、稳定性和抗裂性分析，提出了建筑垃圾再生材料用于公路路面基层的设计指标与方法，形成了施工技术与质量控制标准。 创新点五：基于建筑垃圾再生骨料在水及水泥浆中动态吸水特性，通过含砖量与再生骨料吸水率相关性研究，提出了利用吸水率指标预估再生骨料含砖量的方法；通过试验分析不同再生粗骨料取代率下混凝土的强度值，最终回归拟合出新的与再生粗骨料取代率有关的再	

生骨料混凝土鲍罗米公式。提出了建筑垃圾再生骨料混凝土技术指标和设计方法，形成了混凝土构件生产成套技术。

创新点六：根据废旧砖块的特性，首创了一种以废旧砖块为基材的，具有一定胶凝活性的，可提高混合料抗裂性能的新型掺合料——BSF 复合粉体材料，替代水泥应用于路面基层和混凝土构件，有效改善了水泥稳定碎石基层的力学特性，提高材料抗冻性能，降低其收缩变形，混凝土的性能得到进一步改善。

创新点七：提出了基于小样本容量的建筑垃圾定额实测次数确定方法和异常值剔除的 t 分布检验数据处理方法，为实施定额测定工作提供了理论基础；首次编制了建筑垃圾再生材料生产加工定额及生产加工设备安拆定额、运输定额、填筑路基定额，为编制全国公路工程建筑垃圾再生材料定额提供了参考依据。提出了建筑垃圾再生材料在公路建设中应用的财政补贴、税收优惠、源头治理等政策建议。

创新点八：系统研究了不同类型建筑垃圾中重金属的污染特征，揭示了不同条件下建筑垃圾再生材料重金属释放特征；基于路基环境因素的监测数据，首次构建了路域建筑垃圾中重金属的迁移模型，预测了典型重金属在路基环境中的迁移规律；首次分析了建筑垃圾再生材料中重金属对水土环境危害性，提出了建筑垃圾可否用于公路工程建设的选料环境依据；研发了重金属镉的快速测定方法。

编制了交通运输部《公路工程建筑垃圾利用规范》(JTG/T 2321-2021) 交通行业标准，编制了 11 项陕西省地方标准，形成了公路交通行业建筑垃圾综合利用的成套技术和标准，为全国各省建筑垃圾再生利用提供了技术支撑，有力地促进了交通运输可持续发展。项目获准国家授权专利 27 项，发表学术论文 56 篇，先后培养硕、博士研究生 13 名、博士后 1 人，工程技术人员 500 余人，获得各类人才称号 10 人次，所提出的建筑垃圾再生材料在公路建设中应用的相关政策建议被政府采纳。

该技术成果已纳入鄂周眉、西兴等 27 条高速公路设计中，在西咸北环高速公路、西安外环高速公路（南段）、西安绕城高速扩能、京昆改扩建(陕西段)等高速公路工程成功应用，使用建筑垃圾材料 2049 万吨，恢复垃圾场占用土地 9000 亩，减少土地开挖面积 4500 亩，减少碳排放量 92.64 万吨，创造了直接和间接经济效益 32 亿元，取得了重大的经济、社会、环境效益。2014 年，西咸北环高速公路被交通运输部列为“生态环保示范路”和建筑垃圾再生材料规模化利用试点工程。西安外环高速公路也成为中国高速公路建设史上应用建筑垃圾再生材料用量最大、用途最广、投资最多的绿色环保示范工程，引领了我国交通行业建筑垃

圾综合利用的技术方向，极大地推动了建筑垃圾在公路及相关行业的资源化利用，对我国建筑垃圾资源化利用全面发展具有十分重要的战略意义。 建筑垃圾综合利用的科研及大规模利用工作，先后受到了国家、交通运输部、各省市及社会各界的极大关注和好评，同时也被中央电视台、哈萨克国家电视台、凤凰卫视、凤凰网等众多国内外媒体争相报道。吉林、北京、广州等省市来陕西调研学习建筑垃圾再生处理的先进工艺和方法，已在全国 10 个省、市、自治区的 30 多项项工程中进行了推广应用，有力促进了行业技术进步。 项目评价委员会认为：该技术成果取得了重大的经济、社会、环境效益，对本行业的技术进步和产业转型升级具有重大作用，该成果总体达到国际领先水平。
提名意见
该项目在响应国家节能减排、循环经济和建设节约型社会政策的号召下，基于双碳目标，本着低碳、环保、循环再利用的理念，为解决建筑垃圾回收再利用和公路原材料紧缺两大问题，通过理论分析、室内试验、工程实践、效果监测和检测及工程应用推广，首次攻克了建筑垃圾应用于公路各个层位和不同场合的技术难题，在高速公路的路基填筑、地基处理、路面基层铺筑、非承重混凝土构件加工、临建工程等方面进行试验研究和工程实践，提出系统的高速公路工程再生材料加工、设计、施工、定额、环境安全、政策及效益的应用体系，制定了公路交通行业利用建筑垃圾的行业标准《公路工程利用建筑垃圾技术规范》（JTG/T 2321-2021）及管理办法，填补了国内建筑垃圾技术标准的空白，编制了 11 项陕西省地方标准，形成了公路交通行业建筑垃圾综合利用的成套技术和标准，为全国各省建筑垃圾再生利用提供了技术支撑，有力地促进了交通运输可持续发展。项目获准国家授权专利 27 项，发表学术论文 56 篇，技术成果已纳入鄂周眉、西兴等 27 条高速公路设计中，在西咸北环高速公路、西安外环高速公路（南段）、西安绕城高速扩能、京昆改扩建(陕西段)等高速公路工程成功应用，取得了重大的经济、社会、环境效益。 经过形式审查、评审和公示，无知识产权纠纷，研究单位与个人排名无异议，同意推荐该项目参加陕西省科学技术进步一等奖评定。 提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。

客观评价

陕西交通控股集团有限公司、西安公路研究院有限公司等十余家单位共同开展的建筑垃圾在交通领域应用研究为陕西乃至全国时间最早、规模最大、应用最广、成果最多的建筑垃圾固废再生项目。项目研究成果纳入了行业及地方工程建设标准，已在全国 10 个省、市、自治区的 30 多项项工程中进行了推广应用，有力促进了行业技术进步。

2023 年 6 月 20 日，中科合创(北京)科技成果评价中心组织了以中国工程院郑建龙院士为主任委员、王复明院士为副主任委员的专家组，召开了“建筑垃圾公路综合应用关键技术与标准研究”项目科技成果评价会。专家组审阅了相关资料，形成评价意见如下：

一、提供资料齐全、规范，符合科技成果评价要求。

二、本项目通过理论分析、室内试验、工程实践、效果监测和检测等方法，以西咸北环高速公路、西安外环高速公路（南段）等工程为依托，对建筑垃圾综合利用用于道路工程的成套技术及标准开展了系统研究，主要创新成果如下：

1. 研制了建筑垃圾再生材料加工及基于密度和形状的砖混分离设备，开发了用于不同材料类型、不同场景的生产线。

2. 提出了建筑垃圾再生材料处理湿陷性黄土与湿软地基技术，以及路基填筑、路面基层设计施工技术和质量控制标准与检测指标。

3. 建立了建筑垃圾再生骨料混凝土技术指标和设计方法，研发了基于建筑垃圾及工业废渣BSF复合粉状无机结合料，提出了再生骨料中砖块含量的快速测定方法和非承重混凝土构件预制生产技术。

4. 揭示了建筑垃圾应用于公路工程的环境影响规律，提出了快速检测建筑垃圾再生材料中有毒污染物质的方法及相关的环保要求。

四、项目获授权知识产权26件，其中发明专利4件，实用新型专利20件，软件著作权2件，编制了行业标准1部，地方标准11部，发表学术论文50篇。所提出的建筑垃圾再生材料在公路建设中应用的相关政策建议被政府采纳。

该技术成果分别在西咸北环高速公路、西安外环高速公路（南段）、西安绕城高速扩能、京昆改扩建（陕西段）等高速公路工程成功应用，使用建筑垃圾材料2049万吨，恢复垃圾场占用土地9000亩，减少土地开挖面积4500亩，减少碳排放量92.64万吨，取得了重大的经济、社会、环境效益，对本行业的技术进步和产业转型升级具有重大作用。

专家组一致认为，该成果总体达到国际领先水平。

专家组组长签字：

2023年6月20日

组织单位（盖章）：



2023年6月20日

应用情况

该技术成果列入 2015 年交通运输部科技成果推广目录，分别在西咸北环高速公路、西安外环高速公路（南段）、西安绕城高速扩能、京昆改扩建(陕西段)等高速公路路基填筑、特殊地基处理、路面基层、小型预制构件、施工便道和场地硬化 5 个方面成功应用建筑垃圾再生材料 1365.8 万方，约 2049 万吨。西安外环高速公路也成为中国高速公路建设史上应用建筑垃圾再生材料用量最大、用途最广、投资最多的绿色环保示范工程。

（1）路基填筑。在路堤、路床填筑中使用建筑垃圾再生材料 1166.31 万方，取代原设计碎石填筑、灰土填筑、水泥土填筑、砂砾填筑。

（2）路面。在路面垫层、底基层集料中掺配建筑垃圾再生粒料替代碎石，利用建筑垃圾再生骨料 77.36 万方。

（3）小型预制构件。建筑垃圾再生粒料代替混凝土中部分骨料制作建筑垃圾再生砼，在全线路肩、排水沟、边坡防护等预制构件中使用，利用建筑垃圾再生材料约 12.7 万方。

（4）临建设施。在全线的施工便道、场地硬化等各类临时设施中使用建筑垃圾再生材料 109.44 万方。

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	陕西交通建设集团公司西咸北环线高速公路建设管理处	建筑垃圾在路基、路面、地基处理、小型预制构件利用技术	西咸北环高速公路/应用建筑垃圾 600 万吨	2014. 4-2014-11	许海峰 18591088806
2	陕西交通控股集团有限公司西安外环高速公路南段建设管理处	建筑垃圾在路基、路面、地基处理应用技术	西安外环高速公路南段工程/应用建筑垃圾 772 万方	2020 年 4 月-2022 年 9 月	王鹏 18291913951
3	中交二公局第三工程有限公司	建筑垃圾在路基应用技术	西安外环高速公路南段第 LJ-17 合同段/建筑垃圾再生骨料填筑 29.57 万方	2020 年 4 月-2022 年 9 月	廖凯 18066705353
4	中铁十二局集团有限公司	建筑垃圾在路基应用技术	西安外环高速公路南段第 LJ-6 合同段/建筑垃圾再生骨料填筑	2020 年 4 月-2022 年 9 月	孙宝健 18434120215

				61 万方			
	5	中交路桥建设有限公司	建筑垃圾在路基、小型预制构件利用技术应用技术	西安外环高速公路南段第 LJ-5 合同段/建筑垃圾再生骨料填筑 69.05 万方		2020 年 4 月 -2022 年 9 月	康宁 18710468390
	6	中交二公局第四工程有限公司	建筑垃圾在路基应用技术	西安外环高速公路南段第 LJ-1/建筑垃圾再生骨料填筑 21.75 万方		2020 年 4 月 -2022 年 9 月	梁彬 15109286192
	7	陕西省交通建设集团公司绕城高速公路扩能工程管理处	建筑垃圾在路基、路面应用技术	西安绕城高速公路通行能力提升工程计划利用建筑垃圾再生材料 60 万立方米		2017 年 8 月至 2017 年 11 月	梁乐 13991831005
	8	中核西北建设集团有限公司	建筑垃圾在路基应用技术	西咸北环线高速公路 LJ-6 合同段/建筑垃圾再生材料约 30 万方		2014 年 3 月到 2014 年 11 月	刘国元 15686175786
	9	中铁十二局集团有限公司	建筑垃圾在路基应用技术	西咸北环线高速公路第 LJ-9 合同段/筑垃圾再生骨料 58 万方		2014 年 3 月到 2014 年 11 月	王志永 182 35637939
	10	陕西路桥集团有限公司	建筑垃圾在路面应用技术	西安外环高速公路南段 ZS-1 合同段/建筑垃圾再生骨料 6.6 万吨		2020 年 4 月 -2022 年 9 月	侯小波 13720731916
排序	主要完成人情况						
	姓名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目主要学术和技术创造性贡献	

1	孔庆学	董事长	正高级工程师	陕西交通控股集团有限公司		科技创新实施总负责人，投入工作量占本人工作量的 80%，全面负责项目执行，负责从立项申报、开题、研究到成果验收、评价各阶段全过程的组织与协调工作，负责项目研究目标、技术路线的制定、项目成果总体水平的把握以及创新方向与创新点的论证。对创新点 1，2，4，做出贡献。
2	冯西宁		正高级工程师	陕西省交通运输厅	陕西交通控股集团有限公司	项目负责人，统筹、主持了该项目从规划、科研到现场工程应用全过程，全面负责项目的规划、实施、协调管理、进度检查、依托工程的落实等，负责项目研究目标、技术路线的制定、项目成果总体水平的把握以及创新方向与创新点的论证，最终形成一系列科研成果。主持编制了《道路用建筑垃圾再生粗集料技术规范》陕西省地方标准。投入工作量占本人工作量的 70%，对创新点 1，2，3，4 做出贡献。
3	张东省	副总经理	正高级工程师	陕西省交通建设集团公司	陕西交通控股集团有限公司	本项目的技术负责人，在项目研究过程中，负责该项目论证、立项、协调、研究方案制定等任务。参与制定了项目总体实施方案、试验方案和试验路应用方案，论证了该技术实施的可行性，确定了施工技术中关键技术参数，解决了项目在研究和推广应用过程中的技术难题。参与编制了《水泥稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》陕西省地方标准。投入工作量占本人工作量的 50%，对创新点 1,2，3，4 做出了贡献。
4	杨育生	陕西省交通运输厅党组书记、厅长	正高级工程师	陕西省交通运输厅	陕西交通控股集团有限公司	本项目的技术负责人，在项目研究过程中，负责该项目论证、立项、协调、研究方案制定等任务。参与制定了项目总体实施方案、试验方案和试验路应用方案，论证了该技术实施的可行性，确定了施工技术中关键技术参数，解决了项目在研究和推广应用过程中的技术难题。主持编制了《公路工程利用建筑垃

						圾技术规范》交通运输部行业标准、《水泥稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》陕西省地方标准。投入工作量占本人工作量的50%，对创新点1，4做出了贡献。
5	党延兵	总经理	正高级工程师	陕西省轨道交通集团有限公司	陕西交通控股集团有限公司	时任西咸北环高速公路建设管理处处长，项目实施总负责人，负责完成依托工程具体试验场地的协调、配合和工程实施，确保各项研究内容在实体工程的顺利开展，参与该项目论证、立项、协调、研究方案制定等任务。主持编制了《石灰粉煤灰稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》投入工作量占本人工作量的50%，对创新点2，3，4做出了贡献。
6	张英治	处长	高级工程师	陕西交通控股集团有限公司	陕西交通控股集团有限公司	在项目研究过程中，负责现场研究及试验路的组织实施，参与测试方案的制定及质量控制、质量检验标准的制定。投入工作量占本人工作量的50%，参与编制了《道路用建筑垃圾再生粗集料技术规范》、《石灰粉煤灰稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》陕西省地方标准。对创新点1，3，做出了贡献。
7	高景伟	科技安全部部长	正高级工程师	陕西交通控股集团有限公司	陕西交通控股集团有限公司	在项目研究过程中，参与该项目论证、立项、协调、推广应用、研究方案制定等任务，研发了建筑垃圾中砖块和混凝土块的分离设备；形成了建筑垃圾再生材料在高速公路建设中多用途材料标准。参与编制了《道路用建筑垃圾再生材料加工技术规范》陕西省地方标准。投入工作量占本人工作量的50%，对创新点1做出了贡献。
8	徐希娟	部长	教授级高工	西安公路研究院有限公司	西安公路研究院有限公司	在项目研究过程中，参与该项目论证、立项、研究方案制定，负责课题研究总报告的编写以及建筑垃圾再生材料在路面工程中的应用研究等任务。主持编制了《建筑垃圾再生材料路基施工技术规范》，参与编制了《道路用建筑垃圾再生细集料技术规范》、《石灰粉煤灰稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》、《水泥稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》和《建筑垃圾再生材料路基施工技术规范》

						投入工作量占本人工作量的 50%，对创新点 3 做出了贡献。
9	李辉	院长	教授	西安建筑科技大学	西安建筑科技大学	开发了建筑垃圾多固废复合粉体材料，阐明了建筑垃圾复合粉体材料的水化机理，明确了建筑垃圾复合粉体材料制备胶凝材料和路面混凝土的最佳配比，降低了道路材料的生产成本，构建了建筑垃圾复合粉体材料多场景应用途径。投入工作量占本人工作量的 40%，对创新点 3 做出了贡献。
10	申爱琴	无	教授	长安大学	长安大学	研究了建筑垃圾复合粉体材料替代部分胶凝材料的可行性，揭示了建筑垃圾复合粉体材料对水泥稳定碎石力学性能及耐久性的改善机理；提出了掺建筑垃圾复合粉体材料的混凝土配合比设计方法。明确了建筑垃圾复合粉体材料对混凝土收缩、抗渗、抗冻等耐久性能的影响规律。投入工作量占本人工作量的 30%，对创新点 3 做出了贡献。
11	黄会奇	党委副书记	副教授	陕西交通控股集团有限公司	陕西交通控股集团有限公司	在项目研究过程中，参与该项目论证、立项、协调、推广应用、研究方案制定等任务，总体负责研究报告的编撰及提升。参与编制了《公路工程利用建筑垃圾技术规范》交通运输部行业标准，主持编制了《道路用建筑垃圾再生材料加工技术规范》陕西省地方标准，投入工作量占本人工作量的 50%，对创新点 1，4 做出了贡献。
12	李哲	无	教授	长安大学	长安大学	研发了建筑垃圾再生材料 CT 模具，基于 CT 扫描方法和 matlab 软件，从微观结构和宏观性能分析了建筑垃圾再生材料的孔隙变化规律。自主研发了适用于建筑垃圾击实试件的长期浸水恒载装置，分析了建筑垃圾再生材料在饱水静载作用下的沉降变形规律，确定了路基沉降拟合模型方程。投入工作量占本人工作量的 50%，对创新点 2 做出了贡献。

13	孙满成	经理		陕西交通控股集团有限公司	陕西交通控股集团有限公司	在项目研究过程中,参与该项目论证、立项、协调、研究方案制定等任务,并参与测试方案的制定及质量控制、质量检验标准的制定。参与编制了《公路工程利用建筑垃圾技术规范》交通运输部行业标准和《水泥稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》陕西省地方标准。投入工作量占本人工作量的50%,对创新点4,5做出了贡献。
14	李娜	副部长	正高级工程师	西安公路研究院有限公司	西安公路研究院有限公司	在项目研究过程中,参与建筑垃圾再生材料在路面基层工程中的应用研究立项、研究方案制定、课题研究总报告的编写以及建筑垃圾再生集料技术要求、建筑垃圾再生材料在路面基层中应用的室内外研究及观测等任务。参与编制了《水泥稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》陕西省地方标准。投入工作量占本人工作量的60%,对创新点2做出了贡献。
15	周新锋	无	正高级工程师	西安公路研究院有限公司	西安公路研究院有限公司	在项目研究过程中,参与建筑垃圾再生材料在路面工程中的应用研究立项、研究方案制定、课题研究总报告的编写以及建筑垃圾再生集料技术要求、建筑垃圾再生材料在路面基层中应用的室内外研究及观测等任务。参与编制了《道路用建筑垃圾再生细集料技术规范》、《石灰粉煤灰稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》、《水泥稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》和《建筑垃圾再生材料路基施工技术规范》陕西省地方标准。投入工作量占本人工作量的60%,对创新点2,3做出了贡献。

完成人合作关系说明:

本项目完成人共 15 位,其中孔庆学/1、张英治/6、黄会奇/11、高景伟/7、孙满成/13 隶属于陕西交通控股集团有限公司;冯西宁/2、杨育生/4 隶属于陕西省交通运输厅;张东省/3 隶属于陕西省交通建设集团公司;党延兵/5 隶属于陕西轨道交通集团有限公司;徐希娟/8、李娜/14、周新锋/15 隶属于西安公路研究院有限公司;申爱琴/10、李哲/12 隶属于长安大学;李辉/9 隶属于西安建筑科技大学。

	自 2013 年 1 月起至 2018 年 6 月止，完成人孔庆学、冯西宁、张东省、杨育生、党延兵、张英治、高景伟、徐希娟、李辉、申爱琴、黄会奇、李哲、孙满成、李娜、周新锋共同立项，完成人孔庆学总体负责立项申报、开题、研究到成果验收、评价各阶段全过程的组织与协调工作，负责项目研究目标、技术路线的制定、项目成果总体水平的把握以及创新方向与创新点的论证； 完成人冯西宁、完成人张英治、完成人徐希娟共同完成陕西省地方标准《道路用建筑垃圾再生粗集料技术规范》（DB 61/T 1148-2018）； 完成人杨育生、完成人党延兵、完成人黄会奇、完成人孙满成共同完成交通运输部 2019 年度行业标准《公路工程利用建筑垃圾技术规范》（JTG/T 2321-2021）； 完成人杨育生、完成人孙满成、完成人张东省、完成人周新锋、完成人李娜共同完成陕西省地方标准《水泥稳定建筑垃圾再生集料基层施工技术规范》（DB 61/T 1150-2018）； 完成人黄会奇、完成人高景伟共同完成陕西省地方标准《道路用建筑垃圾再生材料加工技术规范》（DB 61/T 1160-2018）； 完成人徐希娟、完成人周新锋共同完成陕西省地方标准《建筑垃圾再生材料路基施工技术规范》（DB 61/T 1149-2018）； 完成人冯西宁、完成人高景伟共同完成发明专利《一种建筑垃圾再利用材料中砖块与混凝土的分离装置》。
排 序	主要完成单位及对本项目的贡献
1	陕西交通控股集团有限公司总体负责项目的组织管理、研究大纲制定、示范性工程的实施与监测、研究报告的撰写、项目的鉴定验收等工作。研制了建筑垃圾再生材料加工及基于密度和形状的砖混分离设备，提出了用于不同材料类型、不同场景的生产线。建立了基于公路等级、交通分级、应用部位及加工方式的建筑垃圾再生材料综合应用指标体系，编制了交通行业标准《公路工程建筑垃圾利用规范》，于 2021 年正式颁布实施。提出了建筑垃圾再生材料处理湿陷性黄土与湿软地基、路基填筑设计与施工技术标准及质量控制标准，提出采用动态回弹模量（Evd）作为建筑垃圾再生材料路基施工质量检测指标。提出了全部采用建筑垃圾再生材料用于公路路面基层的设计指标与方法，形成了施工技术与质量控制标准。 建筑垃圾再生材料应用项目在陕西省 27 条公路工程中规模化利用建筑垃圾，应用于公路工程中特殊地基处理、路基填筑、路面底基层、预制构件及临建设施等各个部位，共计消纳建筑垃圾 3658.80 万方，使用建筑垃圾再生材料 2909.55 万方，节约柴油 2.34 万吨，减少碳排放 247.36 万吨。其中，已建成通车的西咸北环线、西安外环高速南段等四个项目共计消纳建筑垃圾 1365.8 万方，使用建筑垃圾再生材料 1088.07 万方，节约柴油 8753.27 吨，减少碳排放 92.64 万吨。

2	西安公路研究院有限公司参与制定了研究方案和项目实施路线，承担子课题一《建筑垃圾再生材料在路基工作中大规模应用关键技术研究》、子课题二《建筑垃圾再生材料在特殊地基处理中的应用研究》和子课题三《建筑垃圾再生材料在路面工程中的应用研究》，提出建筑垃圾再生材料填筑路基、建筑垃圾再生材料挤密桩、建筑垃圾再生材料垫层和水泥稳定建筑垃圾再生混合料基层的材料技术要求、施工工艺和施工质量控制方法及标准等成套技术体系，以及其它子课题的协同配合工作。
3	陕西省交通规划设计研究院有限公司参与制定了研究方案和项目实施路线，参与了建筑垃圾公路综合应用关键技术与标准研究，在建筑垃圾再生材料的公路工程中应用设计方法研究方面做出创造性贡献。根据建筑垃圾的特性，提出了建筑垃圾分类、再生技术、再生材料的路用性能指标及在公路工程中的应用范围；根据建筑垃圾再生材料的路用性能指标，提出了建筑垃圾再生材料作为路基、路床及基层材料的技术指标及设计要求；通过试验路验证，得出了大粒径（40mm 通过率大于 70%）建筑垃圾再生材料级配组成相对连续时，作为路基填料，其技术指标要求接近于填石路堤；提出了水泥混凝土以建筑垃圾再生材料作为粗集料时，建筑垃圾再生材料的技术指标及要求。编制了交通运输部行业标准《公路工程利用建筑垃圾技术规范》（JTG/T2321-2021）及陕西省地方标准《建筑垃圾再生材料处理公路软弱地基技术规范》（DB61/T1174-2018）、《建筑垃圾再生材料公路应用设计规范》（DB61/T1175-2018），取得实用新型专利 1 项，为建筑垃圾再生材料在公路工程中的大规模应用提供了设计依据。
4	长安大学参与制定了研究方案和项目实施路线，承担了本项目子课题《公路工程大规模应用建筑垃圾再生材料的环境影响研究》《建筑垃圾再生材料在公路工程中大规模应用政策研究》及子课题一、子课题七的部分研究内容。首次揭示了建筑垃圾再生材料在不同条件下典型污染物释放动力学特征，预测了典型污染物在路基环境中的迁移规律，提出了基于建筑垃圾再生材料中污染物对水土环境危害性为判断依据的选料原则；开展了建筑垃圾再生材料路基稳定性与耐久性研究及建筑垃圾复合粉体材料的工程应用研究，指导研发的建筑垃圾复合粉体材料在路面基层中的应用，并配合完成了建筑垃圾再生材料在路基、小型预制构件中的应用研究，为建筑垃圾的推广提供技术保障。为了更好的推广应用，解决建筑垃圾再生材料路用政策方面的困境，通过开展政策研究，促使陕西省政府办公厅印发了《关于在公路建设中推广建筑垃圾综合利用的通知》（陕政办函[2017]30 号），为后续推广应用取得了政策支持。
5	陕西省交通运输工程造价事务中心参与制定了研究方案和项目实施路线，承担了本项目子课题十《建筑垃圾再生材料大规模应用定额研究及经济效益分析》的研究任务。对建筑垃圾再生材料应用工程定额的特点进行了全面深入的分析研究，依托项目工程实际，对定额的测定及数据处理方法进行了系统研究，在此基础上对建筑垃圾再生材料应用编制了定额，并从经济效益、社会效益、环境效益三个方面对建筑垃圾再生材料的应

	用经济性进行了分析。提出了基于小样本容量的建筑垃圾定额实测次数确定方法，为定额测定工作提供了理论基础；提出了异常值剔除的 t 分布检验数据处理方法，为定额的编制提供了科学依据；研究编制了建筑垃圾再生材料生产加工、路基填筑等多项公路工程建筑垃圾再生利用预算定额及 4 种新设备机械台班费用定额，填补了我国公路定额方面的空白。为建筑垃圾再生材料在公路工程建设中推广应用提供了科学的计价依据和技术基础，并为编制全国公路工程建筑垃圾再生材料定额提供了科学参考依据；结合工程实际及编制的建筑垃圾再生利用定额成果进行了建筑垃圾再生材料应用技术经济性分析，为推进建筑垃圾再生材料在公路工程中的大规模综合利用提供了技术支撑。
6	西安建筑科技大学参与制定了研究方案和项目实施路线，主要承担了本项目子课题《建筑垃圾再生路用复合材料开发研究》的研究任务，重点开展建筑垃圾的基本物理、化学性质和易磨性研究，在此基础上开发一种以建筑垃圾为原料，可用于道路水稳基层施工和小型预制件构造及路面混凝土制备的复合矿物粉体材料，达到消纳建筑垃圾、保护环境，改善道路材料性能，降低工程成本的目的。通过研究发现将建筑垃圾砖粉与其他工业废渣复合，可提高 BSF 复合粉体活性，将 BSF 复合粉体替代部分水泥用于水泥混凝土或基层中，与传统的建筑垃圾资源化产品相比具有更高的附加值。这种再生利用途径不仅有效的提高了建筑垃圾废砖的资源化水平，而且能够减少目前生产水泥对自然资源的依赖性，扭转不可再生资源逐渐减少的局面，同时满足水泥行业发展循环经济和实现资源高效利用的客观要求。BSF 复合粉体是建筑垃圾废砖再生利用的一种新途径，应用前景广阔，本项目通过系统研究将为建筑垃圾的综合再生利用奠定一定的理论基础及技术支撑，具有深远的意义。
7	中交路桥建设有限公司参与制定了研究方案和项目实施路线，主要参与该项目的方案研究、推广应用工作。优化调整建筑垃圾再生材料加工生产线；推广应用建筑垃圾再生材料混凝土应用，建筑垃圾再生材料经过破碎、清洗、筛分后，按照一定比例混合形成再生骨料，根据混凝土配合比配置成建筑垃圾再生骨料混凝土，用于 C30 以下附属工程，大大降低了施工成本，保证了建筑垃圾循环利用。推广应用建筑垃圾再生材料填筑路基施工工艺，建筑垃圾再生料路基填筑机械使用设备与土方路基使用设备基本一致，具有通用性，且减少了土方路基不同土质未分层填筑、混合堆填这个环节，提高了施工效率，施工速度较快，并且适宜大面积施工。推广应用建筑垃圾再生材料施工路基快速检验方法，在建筑垃圾填筑路基施工连续段落，采用 EVD 设备与压实度检测相结合的方法进行快速检测，大大提升了检测速度，缩短施工时间。
8	中铁十二局集团有限公司参与制定了研究方案和项目实施路线，参与建筑垃圾再生材料混凝土预制构件以及路基填筑施工施工技术研究，并将研究成果在西安外环高速公路南段进行了推广应用。
9	陕西交控工程技术有限公司参与制定了研究方案和项目实施路线， 陕负责完成了西咸北环线高速公路建筑垃圾再生材料应用效果监测研究。对建筑垃圾再生材料和其它常用材料路基进行了五次沉降观测，得到不同填料路基工后沉降量，考虑不同地基、不

	同填高、不同材料的影响，得出不同材料路基沉降规律，在此基础上提出了西咸北环线高速公路建筑垃圾再生材料路基沉降预估公式。对建筑垃圾再生材料和其它常用材料路基进行了水平位移观测，得到不同填料路基在不同地基、不同深度、不同边坡处置措施及交通量情况下的水平位移数值和规律，得出建筑垃圾再生材料路基水平位移和竖直位移关系。通过对西咸北环线高速公路应用建筑垃圾再生材料的典型路段进行了为期一年的温湿度监测，对监测结果进行分析得出路基内部温湿度变化规律，并通过室内试验分析了温湿度变化对建筑垃圾填筑路基路用性能的影响。系统研究了建筑垃圾再生材料小型构件抗冻性、抗渗性、抗氯离子渗透性、抗融雪剂腐蚀性，得到了天然碎石和再生材料所配制试件耐久性基本相同，再生材料构件可以替代天然碎石配制构件；分析了建筑垃圾再生材料小型构件外观检测数据和强度监测数据，得到了掺加建筑垃圾材料的小型构件强度与普通小型构件并无明显差异，有些甚至优于普通材料小型构件。
10	中交二公局第四工程有限公司参与制定了研究方案和项目实施路线，负责负责建筑垃圾再生材料的推广应用工作，在西安外环高速公路南段第 LJ-1 合同段 K0+000～K3+257.25 段推广应用建筑垃圾填筑路基技术，施工优化了建筑垃圾填筑路基施工工艺，确定机械组合压实工艺，保证了路基的稳定性。采用 EVD 和压实度相结合的检测，在保证质量的前提下提升了检测效率。

完成人合作关系情况汇总表：

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果
1	共同立项	孔庆学/1、冯西宁/2、张东省/3、杨育生/4、党延兵/5、张英治/6、高景伟/7、徐希娟/8、李辉/9、申爱琴/10、黄会奇/11、李哲/12、孙满成/13、李娜/14、周新锋/15	2013.1.1	2022.12.31	科研成果
2	标准规范	冯西宁/1、张英治/4、徐希娟/	2013.1.1	2022.12.31	标准规范
3	标准规范	杨育生/1、党延兵/2、黄会奇/3、孙满成/5	2013.1.1	2022.12.31	标准规范
4	标准规范	杨育生/1、孙满成/2 张东省/3、周新锋/4、李娜/10	2013.1.1	2022.12.31	标准规范
5	标准规范	黄会奇/1、高景伟 2	2013.1.1	2022.12.31	标准规范

6	标准规范	徐希娟/1、周新 锋/7	2013.1.1	2022.12.31	标准规范
7	共同 知识 产权	冯西宁/1、高景 伟/2	2013.1.1	2016.5.25	发明专利