

天津市“131”创新型人才团队资助

橡胶集料混凝土 理论、试验与应用

韩庆华 朱 涵 著



科学出版社

天津市“131”创新型人才团队资助

橡胶集料混凝土理论、 试验与应用

韩庆华 朱 涵 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结了近 10 年来橡胶集料混凝土方面的相关研究成果, 主要内容包
括: 橡胶集料混凝土的物理性能、力学性能及耐久性, 橡胶集料钢筋
混凝土梁受弯性能及延性理论, 橡胶集料混凝土-钢组合梁静力性能、疲
劳性能试验研究及扩展有限元分析, 橡胶集料混凝土-钢组合梁疲劳寿命
预测技术等。

本书侧重于对现代试验技术及数值模拟方法的阐述, 为新型土木工程
材料以及钢-混凝土组合结构构件的理论研究和推广应用奠定了基础, 填
补了该领域的空白, 可为从事土木工程专业的广大科技工作者和设计人员
提供参考, 也可作为研究生和本科生的学习参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

橡胶集料混凝土理论、试验与应用/韩庆华, 朱涵著. —北京: 科学出
版社, 2016

(天津市“131”创新型人才团队资助)

ISBN 978-7-03-047903-7

I. ①橡… II. ①韩… ②朱… III. ①混凝土施工-研究 IV. ①TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 058337 号

责任编辑: 任加林 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1 000)

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 18 1/2

字数: 357 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(骏杰))

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135517-2028

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

钢-混凝土组合结构是现代工程结构中一种重要的新型结构体系,它兼有普通混凝土结构和钢结构共同的优点,具有承载能力高、刚度大、延性和抗震性能好等优点,并且自重较轻、节省材料。同钢结构相比可以节省用钢量和增强耐久性等,同混凝土结构相比可以大大减轻自重、减小结构尺寸、方便施工等,符合工程结构的发展方向。钢-混凝土组合结构在我国发展很快。近些年来,出现了一种被称为混合结构的房屋,它是由不同材料组成的构件或结构所构成的空间或平面系统,能够承受竖向力和水平荷载作用。应用实践表明,这种结构形式综合了钢结构和混凝土结构的优点,具有“轻型大跨”、“预制装配”、“快速施工”等特点,能够满足现代结构对功能的需求,具有显著的技术经济效益和社会效益,适合我国基本建设的国情,已成为结构体系的重要发展方向之一。作为组合结构体系中重要横向承重构件的钢-混凝土组合梁在建筑结构及桥梁结构等领域具有广阔的应用前景。

进入 21 世纪以来,随着汽车制造业、交通运输业等国民经济支柱产业的高速发展,我国成为全球最大的轮胎生产和消费国。随着橡胶制品的持续发展,同时也凸显了日益尖锐的需求与环境保护之间的矛盾,由此造成的环境污染,资源浪费以及再生循环利用问题不容忽视。但是,我国对废旧轮胎的重新利用不足,目前回收利用率仅为 50%左右,造成了巨大的资源浪费。橡胶集料混凝土的诞生为科学处理废旧轮胎提供了一条新的途径。橡胶集料混凝土中的柔性成分主要来源于废旧橡胶制品,主要是由废旧轮胎经机械破碎、研磨、除尘、清洗后得到。目前,中国商品混凝土行业仍然处于高速发展阶段,若将废旧轮胎橡胶颗粒应用于混凝土,不仅可解决日益严重的环境污染问题,而且对于那些抗疲劳、但抗裂防渗较为严格的结构具有潜在工程应用前景。

橡胶集料混凝土是一种“年轻”的新型建筑材料,仅有约三十年的研究历史,它的诞生是对水泥混凝土科学发展的推进。掺加橡胶集料后,混凝土的韧性和抗冲击性能得到了改善。橡胶集料掺量达到一定程度后,混凝土断裂模式不同于普通混凝土的脆性断裂,而是呈塑性屈服破坏形态,反复加载多次至破坏都不会完全破碎,能量吸收能力比普通混凝土增加 25%以上,极限拉、压应变远远大于普通混凝土,橡胶集料掺量越大,橡胶粉粒径越小,橡胶混凝土的变形性能越好。掺加废胶粉的混凝土表现出塑性断裂,延伸性能良好,塑性变形大幅增加等。橡胶混凝土的抗冲击性能增加,主要原因是由于橡胶颗粒其冲击波阻抗低,压缩变形大,能消耗落锤的冲击能量。此外,橡胶颗粒能够产生较大的变形,裂缝尖端

的应力得到缓解,从而抑制了裂缝的扩展。因而这种材料在国内外广泛应用于路面铺装中。然而,将橡胶集料混凝土应用于组合梁中比较晚,也比较少见。

橡胶集料混凝土-钢组合梁是在普通组合梁的基础上发展起来的,将普通组合梁中的混凝土翼缘板用橡胶集料混凝土板替代,就形成了橡胶集料混凝土-钢组合梁。将橡胶集料混凝土用于组合桥梁中,也可改善行车舒适度,降低路面铺装要求,减少桥体开裂。由于车辆载荷的随机性和运行的频繁性,桥梁长期承受不等幅疲劳荷载,加之超载现象严重,桥梁的疲劳问题日益突显。与承载力和稳定性一样,疲劳是影响桥梁结构耐久性的主要因素之一。在重复重载交通作用下,桥梁结构极易产生疲劳裂缝,降低了混凝土的耐久性,影响桥梁的正常使用。此外,疲劳裂缝不断发展,甚至会造成混凝土大面积失效和断裂破坏,引发严重事故。基于橡胶集料混凝土良好的抗裂性能和抗疲劳性能,将其应用在组合桥梁中可能会提高桥梁的疲劳性能。

从目前查阅的文献资料来看,尽管国内外学者已对组合梁和橡胶集料混凝土的力学性能做了大量研究,但尚缺乏对橡胶集料混凝土-钢组合梁受力性能的系统研究。本书系统研究了栓钉连接件在橡胶集料混凝土中的基本静力和疲劳性能、橡胶集料混凝土-钢组合梁的静力和疲劳性能,得到了完整的疲劳试验数据。在此基础上,介绍了扩展有限元分析方法,以此来预测结构的疲劳寿命。

从本书研究结果看,在组合梁中采用橡胶集料混凝土,能使组合梁性能得到进一步发挥,经济效益更加显著。在相同条件下,其承载力与普通钢-普通混凝土组合梁基本相同,但疲劳性能和抗裂性能都有不同程度的提高。可见,研究钢与轻骨料混凝土组合梁具有重要现实意义。本书首次详细介绍了橡胶集料混凝土-钢组合梁的工程性能和分析方法,填补了在这方面缺少参考资料的空白,可以给读者提供使用的依据和思路,是一本能使设计工作者和科研人员开阔眼界、增长知识的好书,值得一读。



2016年3月

前 言

橡胶集料混凝土是由普通混凝土中掺入由汽车废弃轮胎经过机械粉碎、研磨、洗净等加工处理而得到的橡胶微粒配置而成，是一种新型绿色环保材料。橡胶集料混凝土同时具有普通混凝土强度高和橡胶变形抗裂性能好的特点。由于其韧性强、振动噪声小，增加了路面耐磨性和行车舒适度，早在 1999 年就被首次应用于亚利桑那大学的校园路面，随后又被应用于桥面铺装、工程加固等领域，具有广阔的应用前景。

钢-混凝土组合梁是一种新型结构，同钢结构相比可以节省用钢量并增强耐久性，同混凝土结构相比可以大大减轻结构自重、减小结构尺寸。钢-混凝土组合梁结合了不同材料的优势，具有承载力高、刚度大、稳定性好以及施工方便等优点，目前已被广泛应用于高层建筑、多层工业厂房和桥梁当中，带来了良好的经济与社会效益。

尽管橡胶集料混凝土的研究与应用已在国内开展，但关于橡胶集料混凝土-钢组合梁的相关研究仍处于空白阶段。近十年来，作者及其课题组综合运用数学、力学、现代试验技术及数值模拟技术，对橡胶集料混凝土的材料性能及橡胶集料混凝土-钢组合梁的受力性能进行了系统研究，完成了大量的试验研究和计算分析。该研究拓展丰富了橡胶集料混凝土的应用范围，促进了橡胶集料混凝土在组合结构中的发展与应用。

本书由韩庆华教授统稿。参加本书编写的有：朱涵教授（第一、二、三章），韩庆华教授（第四、五、六章）。徐颖博士和徐杰博士参与了文字和图表的整理、绘制工作，博士研究生杨林虎、王一泓、邢颖，硕士研究生王庆余、叶友君、刘紫骐、刘斌等协助作者完成了部分试验、计算及分析工作，他们均对本书的完成做出了重要贡献，在此表示衷心的感谢。

本书是在作者多年研究工作的基础上完成的，由于材料和结构工程本身的复杂性和作者能力的局限性，本书难免存在不足和欠妥之处，欢迎广大读者提出宝贵意见，以便在今后的研究工作中加以改进。

著 者

2016 年 3 月

目 录

序

前言

第一章 概论	1
1.1 橡胶集料混凝土简介	1
1.1.1 橡胶集料混凝土的诞生	1
1.1.2 橡胶混凝土的特点	2
1.2 橡胶集料混凝土的研究概况及工程应用	4
1.2.1 国内外研究现状	4
1.2.2 橡胶集料混凝土的工程应用	7
1.2.3 应用前景与展望	9
第二章 橡胶集料混凝土的基本性能	11
2.1 橡胶集料混凝土的物理性能	11
2.1.1 拌和物性能	11
2.1.2 微观解析	11
2.1.3 孔隙结构特征	24
2.1.4 声学特性	31
2.1.5 可泵性能	32
2.1.6 小结	44
2.2 橡胶集料混凝土的力学性能	46
2.2.1 静力性能	46
2.2.2 动力性能及阻尼比	50
2.2.3 低温力学性能	52
2.2.4 孔洞集中应力分析	57
2.2.5 小结	68
2.3 橡胶集料混凝土的耐久性	69
2.3.1 收缩与抗裂性能	69
2.3.2 抗渗性能	77
2.3.3 抗盐冻性	87
2.3.4 抗冲磨性	95
2.3.5 抗腐蚀性	104
2.3.6 小结	116

第三章 橡胶集料钢筋混凝土梁受弯性能及延性理论	120
3.1 橡胶集料钢筋混凝土梁受弯承载力	120
3.1.1 矩形单筋截面简支梁受弯承载力	120
3.1.2 与普通混凝土梁受弯比较分析	123
3.1.3 算例分析	126
3.1.4 小结	127
3.2 橡胶集料钢筋混凝土梁延性理论	128
3.2.1 基本假定与受力模型	129
3.2.2 曲率延性系数	131
3.2.3 延性影响因素	133
3.2.4 小结	136
3.3 橡胶集料钢筋混凝土叠合梁受弯性能	137
3.3.1 橡胶集料钢筋混凝土叠合梁简介	137
3.3.2 橡胶集料钢筋混凝土叠合梁受弯性能理论分析	137
3.3.3 橡胶集料钢筋混凝土叠合梁受弯性能数值模拟	141
3.3.4 理论解与数值解的比较分析	148
3.3.5 小结	150
第四章 橡胶集料混凝土-钢组合梁静力性能研究	151
4.1 静力推出试验及数值模拟	151
4.1.1 橡胶集料混凝土材性试验	151
4.1.2 试验目的与试验设计	158
4.1.3 推出试验结果及分析	161
4.1.4 推出试件静力性能数值模拟	168
4.1.5 小结	174
4.2 整体梁静力试验及数值模拟	175
4.2.1 试验目的与试验设计	175
4.2.2 试验结果及分析	182
4.2.3 整体梁静力性能数值模拟	190
4.2.4 试验与数值结果比较	194
4.2.5 小结	207
第五章 橡胶集料混凝土与钢组合梁疲劳性能研究	208
5.1 疲劳推出试验与扩展有限元分析	208
5.1.1 试验目的与试验设计	208

5.1.2	抗剪连接件的疲劳寿命及其影响因素分析	210
5.1.3	基于扩展有限元的单栓钉连接件推出试验精细化模拟	217
5.1.4	小结	223
5.2	整体梁疲劳试验与扩展有限元分析	224
5.2.1	试验目的与试验设计	224
5.2.2	试验结果及分析	227
5.2.3	橡胶集料混凝土与钢组合梁疲劳寿命扩展有限元分析	238
5.2.4	小结	244
第六章	橡胶集料混凝土-钢组合梁疲劳寿命预测技术	246
6.1	槽钢连接件橡胶集料混凝土-钢组合梁	246
6.1.1	槽钢连接件简介	246
6.1.2	槽钢连接件推出模型数值模拟	246
6.1.3	槽钢连接件静力分析	250
6.1.4	槽钢连接件疲劳寿命分析	254
6.1.5	小结	262
6.2	开孔波折板连接件橡胶集料混凝土-钢组合梁	263
6.2.1	开孔波折板连接件简介	263
6.2.2	开孔波折板连接件推出模型数值模拟	264
6.2.3	开孔波折板连接件静力分析	270
6.2.4	开孔波折板连接件疲劳寿命分析	271
6.2.5	小结	272
6.3	锯齿状腹板连接件橡胶集料混凝土-钢组合梁	272
6.3.1	锯齿状腹板连接件简介	272
6.3.2	锯齿状腹板连接件组合梁数值模拟	273
6.3.3	锯齿状腹板连接件静力分析	274
6.3.4	锯齿状腹板连接件疲劳寿命分析	277
6.3.5	小结	282
	主要参考文献	284

第一章 概 论

1.1 橡胶集料混凝土简介

1.1.1 橡胶集料混凝土的诞生

橡胶集料混凝土 (crumb rubber concrete, CRC) 是一种采用废旧橡胶作为集料配制而成的新型水泥混凝土, 其目的是在原有多组分混凝土基础上引入一定量的柔性成分从而使混凝土性能得到相应改善。因其橡胶集料一般取材于废旧轮胎以及工业橡胶制品, 经过加工得到橡胶块或橡胶粉, 故此被称作橡胶集料混凝土或橡胶集料混凝土。

从 1855 年巴黎世博会第一次展出至今, 混凝土的发展已经有 160 多年的历史, 它对人类文明的发展起到了巨大的推动作用。经过多年的推广使用, 混凝土也伴随产生了许多耐久性问题, 如混凝土开裂、冻融破坏、氯离子引起的钢筋锈蚀等 (图 1.1 和图 1.2)。近几十年, 随着对建筑高度和跨度需求的不断增加, 混凝土的强度等级已提高至 100MPa 以上。然而, 混凝土强度的提高是以牺牲混凝土的延性为代价的。为提高混凝土的延性, 国内外专家学者对此开展了大量研究工作, 探寻具有重量轻、韧性高、变形大、阻尼高、抗冲击性强、干缩性小、导热低、吸声性好的高性能新型水泥混凝土材料。因此, 高性能新型水泥混凝土的研究和开发已成为当今混凝土材料学科新的生长点。



图 1.1 混凝土碳化



图 1.2 钢筋锈蚀

另一方面, 20 世纪以来汽车工业的迅速发展使得废旧轮胎所带来的回收和处理问题越来越大。废旧轮胎被称为“黑色污染”, 是固体废弃物中的一种, 其回收和处理技术一直是世界性难题, 也是环境保护的难题。至 2013 年, 我国产生的废旧轮胎达 3 亿多条, 总重约 1500 万 t。在一些城市的市郊结合处甚至都能见到绵

延上千米、像小山一样的废旧轮胎堆积点，如图 1.3 所示。废旧轮胎的大量堆积，不易降解，其固体形态难以破坏。随着时间的延长，填埋和堆放地会成为蚊蝇的孳生场所，污染环境，传染疾病，且极易引起火灾，造成二次公害。历史上，美国发生过几次大的废轮胎火灾事件和废轮胎污染引起的流行性疾病，给周围环境与人类健康造成了很大的危害。所以，处理好废旧橡胶，对于充分利用再生资源，摆脱自然资源匮乏，减少环境污染，改善人类的生存环境是非常重要的。



(a) 市郊结合处



(b) 建筑物周围堆放

图 1.3 废旧轮胎的随意堆积

在寻求混凝土高性能化和利用工业废料发展绿色高性能混凝土的过程中，橡胶集料混凝土应运而生。当前，中国混凝土年生产量为 13 亿 m^3 左右。随着我国在基础设施建设方面的投入加大，未来水泥混凝土的产量将非常巨大。普通混凝土由于耐久性差而产生的破坏将更为严重，因此需要从材料科学的角度去寻找新的解决办法。橡胶集料混凝土由于在耐久性方面出色的表现，引起了研究学者的广泛关注与重视。橡胶集料混凝土所采用的原材料主要来自废旧轮胎等固体废弃物，以每条废旧汽车轮胎可产生 5kg、粒径为 1~2mm 的橡胶集料计算， 1m^3 橡胶集料混凝土可以消耗 20~30 条废旧轮胎。理论上讲，以每立方米混凝土里加入 0.1m^3 橡胶粉为例，只要在混凝土总产量的 10% 中加入橡胶集料，所有的废旧轮胎问题就能得到解决。这对于废旧轮胎的回收利用、土地和橡胶资源的保护是非常行之有效的方法。因此，橡胶集料混凝土不仅可以弥补传统水泥混凝土的诸多缺陷，实现混凝土技术的进一步发展，同时还可以为实现资源回收利用提供新的途径。

1.1.2 橡胶混凝土的特点

1. 橡胶集料混凝土的优点

(1) 优越的变形性能

掺加橡胶粉后，混凝土的韧性和抗冲击性能得到了改善。橡胶集料掺量达到

一定程度的混凝土断裂模式不同于普通混凝土的脆性断裂,而是呈塑性屈服破坏形态,反复加载至破坏循环多次都不会完全破碎,能量吸收能力比普通混凝土增加 25%以上,极限拉、压应变远远大于普通混凝土,橡胶粉掺量越大,橡胶粉粒径越小,橡胶混凝土的变形性能越好。掺加废胶粉的混凝土表现出塑性断裂,延伸性能良好,塑性变形大幅增加等。橡胶混凝土的抗冲击性能增加,主要原因是由于橡胶颗粒其冲击波阻抗低,压缩变形大,能消耗落锤的冲击能量。此外,橡胶颗粒能够产生较大的变形,裂缝尖端的应力得到缓解,从而抑制了裂缝的扩展。

(2) 良好的隔音、隔热性能

随着橡胶粉掺量的增加,水泥砂浆的动弹性模量和固有频率降低,超声波在其中的传播速度减小,即水泥砂浆的隔声功能随橡胶粉掺量的提高而增强。与传统水泥混凝土相比,橡胶混凝土在吸音方面具有明显的优越性。

橡胶的导热系数约为 $0.1\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,普通混凝土的导热系数约为 $2.1\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。对橡胶混凝土传热效率的研究表明,用粒径 $0.5\sim 20\text{mm}$ 的橡胶粉替代粗骨料,可使混凝土的隔热性能提高至与传统绝热材料相当;当橡胶粉完全替代粗骨料时,混凝土的导热系数约为 $0.3\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,比传统混凝土显著降低了,这表明橡胶混凝土具有良好的隔热性能。

(3) 改善混凝土的抗冻性

掺加橡胶粉后,混凝土的抗冻性能得到改善。研究发现对于改善混凝土抗冻性的效果,140m 橡胶粉好于引气剂,3~4mm 橡胶颗粒与引气剂效果相当,橡胶粉可以作为固体引气剂存在,且能够保证其在混凝土分布中的稳定性及均匀性,从而提高混凝土的抗冻性。弹性橡胶颗粒在混凝土内部的广泛分布为水结成冰时的体积膨胀提供了空间。在冻融循环作用的过程中,橡胶颗粒被反复压缩而产生弹性回复,膨胀产生的应力大大削弱,故使混凝土的抗冻性大幅度提高。

2. 橡胶集料混凝土的不足之处

(1) 强度降低

掺加橡胶集料后,混凝土强度降低,这是研究人员得到的一致结论。在普通掺量下(橡胶集料的体积百分比小于 15%),强度降低 10%~30%。通过对橡胶集料的表面进行预处理(prior surface pretreatment)可以有效降低对混凝土强度带来的损失,主要方法有:①水洗法;②NaOH 浸泡方法;③偶联剂浸泡方法。采用水洗法预处理的橡胶集料混凝土强度比未处理的橡胶集料混凝土提高了 16%;采用 CCl_4 溶剂浸泡处理的橡胶集料混凝土强度提高了 57%;把粒径为 0.5mm 的橡胶颗粒用 NaOH 溶液处理后加入水泥净浆中,所得到的水泥净浆的强度损失明显降低,用 NaOH 处理后的橡胶颗粒表面与水泥基体的黏结能力增强。

(2) 橡胶集料的上浮

由于橡胶的密度小,仅为其他骨料和胶凝材料的 $1/2\sim 1/3$ 。再进行配合比设

计时, 如果设计参数不合理, 如水灰比过大, 就会出现橡胶集料的上浮现象。在适量超塑化剂下 ($3.5 \sim 9.32 \text{ kg/m}^3$), 橡胶集料能够均匀分布在混凝土内部, 而不会产生上浮的现象, 如图 1.4 所示。目前, 大多数研究人员通过控制单位用水量和水灰比来控制橡胶的上浮现象。此外, 也可以通过增加稠度的方法控制橡胶集料的上浮现象。

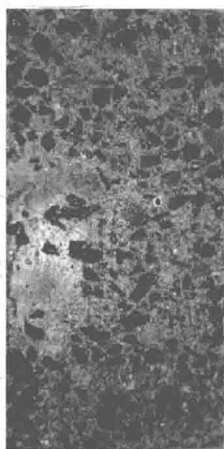
(3) 生产成本增加

根据《商品混凝土》公布的数据, 天津地区 2009 年 9 月份, C30 等级的商品混凝土售价为 340 元/m^3 。若配置相同强度等级的橡胶集料混凝土, 需增加单位体积的水泥用量, 此外, 橡胶集料也会占有一部分成本 (天津地区约 $1000 \sim 1200 \text{ 元/t}$), 以橡胶集料体积掺量为 10% 为例, 橡胶集料所占的成本为 $100 \sim 120 \text{ 元/m}^3$ 。因此, 估计橡胶集料混凝土的材料成本将有 $30\% \sim 40\%$ 的上升。

尽管橡胶集料混凝土有上述不足之处, 但如果能够将其工程性能优势在合适的应用领域中充分发挥出来, 所带来的效益会远远大于所增加的成本。



(a) 未掺加超塑化剂的圆柱体试件



(b) 掺加超塑化剂的圆柱体试件

图 1.4 超塑化剂对橡胶集料分布的影响

1.2 橡胶集料混凝土的研究概况及工程应用

1.2.1 国内外研究现状

自橡胶细集料混凝土出现以来, 其良好的力学性能引起了国内外工程界的广泛关注, 尤其是它良好的变形、抗裂纹、高阻尼以及高韧性等特性使得橡胶细集料混凝土从某种程度上突破了传统意义上认为混凝土仅为脆性材料的认识, 从而使混凝土材料具有更广泛的应用空间。橡胶集料混凝土的研究始于 20 世纪 80 年代末期, 美国一些学者进行了基础的研究, 探讨了橡胶集料的掺入对混凝土抗压

和抗折强度的影响,并建立了橡胶集料混凝土的量化抗压强度减少模型。至今橡胶集料混凝土的应用历史仅有十多年,但它的优势表明其未来的发展前途将是一片光明,势必将得到大量的应用。

Yang 等 2011 年在环境温度为 20℃ 和低温 -25℃ 下,对不同橡胶体积掺量(0%、5%、10% 和 15%)的橡胶混凝土试块进行立方抗压强度、轴向抗压强度、抗弯强度和抗裂、抗拉强度试验,同时记录弯曲应力-应变响应。结果表明,温度降低时,橡胶混凝土的强度增加,且仍然表现出较好延性,说明橡胶混凝土更适宜在低温环境中应用。

朱涵等 2007 年针对橡胶集料混凝土的抗压及抗弯性能,在 5%~15% 橡胶集料体积掺量下进行立方体抗压强度以及单轴受压应力-应变全曲线试验,并利用动态应变仪测量了 4 点弯曲状态下的拉应变。试验结果表明,橡胶集料混凝土的弹性模量较基准混凝土有大幅度的降低,峰值轴压应变可达 $4106\mu\epsilon$ 。弯曲状态下,拉应变曲线评定结果表明橡胶集料混凝土存在明显的屈服点,极限拉应变可达 $260\sim 640\mu\epsilon$ 。这些测试所得的应变数值都大大超过基准混凝土,表明掺入橡胶集料可有效地提高混凝土的韧性和变形性能。

Ghaly 等 2005 年探讨将废旧橡胶微粒添加到混凝土混合物中的可能性,研究增加胶粉后混凝土性能的改变。橡胶掺量按体积量,在混凝土中分别加入 5%、10% 和 15% 的橡胶微粒,水灰比分别采用 0.47、0.54 和 0.61,对 180 个混凝土立方体试块进行试验,分别测量试件的极限负载值,研究不同的橡胶含量及水灰比对试件负载的影响。实验结果表明,橡胶微粒的增加导致混凝土强度降低,提出了橡胶掺量作为变量的估计混凝土强度的函数。

袁群等 2013 年为研究橡胶颗粒粒径和掺量对橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变、割线模量和泊松比的影响变化规律,以 C25 强度的普通混凝土为基准,用 60 目胶粉、1~3mm 胶粒及 3~6mm 胶粒等体积取代细骨料,配制成 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 300\text{mm}$ 橡胶混凝土棱柱体试件,通过应变片测定橡胶混凝土在轴心压力作用下的应力-应变曲线。结果表明:与基准混凝土相比,橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变和割线模量均较小,且有随着橡胶掺量增大而减小的趋势;橡胶混凝土的泊松比前期比基准混凝土大,后期比基准混凝土小;橡胶颗粒粒径越小时这种差距越大,总体上表现出与橡胶颗粒粒径及掺量之间具有合理的相关关系。

张海波等 2013 年研究了橡胶混凝土经不同温度作用后外观及抗压强度的变化规律。结果表明:橡胶混凝土经 250℃ 真空温度作用后,可大幅度提高其抗压强度,其外观无明显变化; $149\mu\text{m}$ (100 目) 橡胶混凝土抗压强度提高率大于 $4000\mu\text{m}$ (5 目) 橡胶混凝土;橡胶混凝土在空气中分别经 250℃、500℃、800℃ 温度作用后,其表面留下了橡胶降解产物残留痕迹,抗压强度均有所降低,且 $149\mu\text{m}$ 橡胶混凝土抗压强度降低率大于 $4000\mu\text{m}$ 橡胶混凝土,但两者抗压强度降低率均小于混凝土对比样。

Zheng 等 2008 年按不同体积比率在混凝土中掺入橡胶粉,测试橡胶混凝土的抗压强度、变形、脆性指数、静态和动态弹性模量。试验表明,随着橡胶掺量的增加,橡胶混凝土的强度和弹性模量降低,压碎的橡胶混凝土的抗压强度和弹性模量低于地面橡胶混凝土。橡胶混凝土的脆性指数数值低于普通混凝土,即橡胶混凝土的延性较普通混凝土更好。

Yuan 等 2013 年研究橡胶颗粒的尺寸和橡胶掺量对橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变、割线模量和泊松比的影响,测试确定 C25 普通混凝土试样(100mm×100mm×300mm)及添加 1~3mm、3~6mm 的橡胶颗粒的橡胶混凝土试样的应力-应变曲线。结果表明,与普通混凝土相比,橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变和割线模量减小,而橡胶混凝土的泊松比在早期高于普通混凝土,在晚期低于普通混凝土。橡胶颗粒直径对橡胶混凝土性能影响大,需合理确定橡胶粒尺寸和橡胶量。

Yuan 等 2008 年在小变形条件下进行自由振动测试,研究橡胶颗粒的大小和体积对橡胶混凝土简支梁的阻尼和频率的影响。采用弹性波测试测量橡胶混凝土的动态模量和静态模量。结果显示,橡胶混凝土用于构件中具有更高的阻尼比和较低的弹性模量,从而减低固有频率。

Liu 等 2007 年研究橡胶粉混凝土简支梁和普通混凝土梁在静载荷作用下,梁的应变、变形及裂纹的变化。结果表明,在相同的加载和负载情况下,橡胶混凝土简支梁出现裂纹晚于普通混凝土简支梁,其裂纹的发展、弹性应变和挠度均大于普通混凝土简支梁,橡胶混凝土简支梁的韧性高于普通混凝土简支梁。

Sreekala 等 2009 年对不同类型的混凝土:普通高强度混凝土、纤维混凝土和不同乳胶百分比的天然橡胶胶乳改性混凝土进行单轴压缩试验,研究乳胶改性混凝土梁的弯曲性能,并采用有限元软件进行了数值模拟。

Chen 等 2005 年通过测试,研究了预应力和正弯矩下钢-混凝土组合梁的极限弯矩,测试结果表明组合梁外部加筋不断增加的压力显著增大了梁的负荷,在受力状态下挠度减小,然而,大量增加的压力将使筋处在极限状态。将理论结果、试验结果和有限元结果进行对比分析,最终得到预测预应力组合梁承载力的方法。

李悦等 2008 年为了探讨橡胶集料混凝土的物理力学及收缩性能,寻求改善橡胶集料混凝土强度的方法,采用常规的普通混凝土物理性能实验方法研究了橡胶掺量对混凝土强度的影响,比较了不同橡胶集料混凝土的收缩情况,考察了可再分散胶粉对混凝土性能的影响。结果表明掺入橡胶的水泥混凝土强度降低,收缩量较大,可再分散胶粉有利于提高混凝土的抗折和劈裂强度。

韩庆华等 2015 年基于 8 个组合梁试件的疲劳试验结果,采用有限元计算与名义应力法相结合的方法,提出用于模拟滑移和疲劳破坏过程的精细有限元模型和计算方法。研究了混凝土中不同橡胶掺量对组合梁极限承载力、最大滑移、栓钉应力及破坏特征的影响,得到相应的应力-疲劳寿命曲线。结果表明,简支组合梁

的疲劳破坏首先发生在端部栓钉,破坏过程为栓钉依次断裂。虽然疲劳断裂为脆性破坏,但组合梁在疲劳荷载作用下的整体破坏具有一定的延性。使用橡胶集料混凝土代替普通混凝土后,组合梁的极限承载力和刚度略有降低,但延性有所提高;当橡胶掺量为5%、10%和15%时,疲劳寿命分别提高约15%、64%和125%。基于非线性数值分析得到的组合梁极限承载力和疲劳寿命与试验所测结果吻合较好,为组合梁的抗疲劳设计提供了参考。

1.2.2 橡胶集料混凝土的工程应用

截至2010年,橡胶集料混凝土的应用历史仅有十余年。应用领域也主要集中在铺筑方面,高抗裂性、高韧性、高耐久性,以及出色的减震、降噪性能是其在道路工程应用中的最大优势。以下简要介绍橡胶集料混凝土的几个应用实例。

1. 道路、网球场——美国亚利桑那州

1999年2月,朱涵教授在美国亚利桑那州立大学校园内设计并建成了世界上第一条橡胶集料混凝土人行道,引起了工程界的广泛兴趣。其后,美国亚利桑那州交通部及相关单位在美国建造了多个橡胶集料混凝土试验点,包括停车泊位、网球场、房基等(图1.5)。2003年6月,美国亚利桑那州北部建造了世界上第一条橡胶集料混凝土路面道路,同年10月,在该州南部再次建造了相同等级的橡胶集料混凝土道路,经过数年的使用,这些试验点的路面状态仍完好。

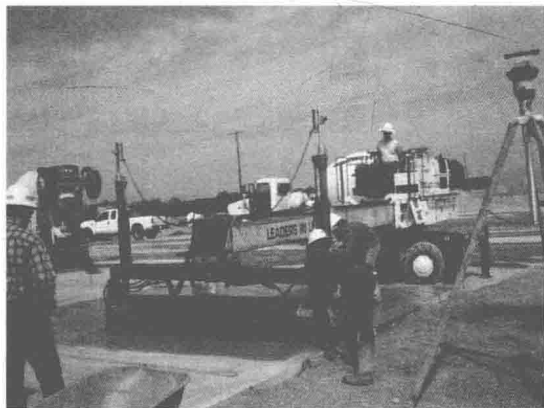


图1.5 2002年网球场的现场施工

2. 青银高速公路石家庄段——中国石家庄

2005年10月,根据朱涵教授的设计,青岛至银川高速公路河北省栾城段收费站的路面铺装层采用橡胶集料混凝土修筑(图1.6)。该铺装层中,混凝土橡胶集料掺量为 $100\text{kg}/\text{m}^3$,铺筑面积 2080m^2 ,厚度 260mm ,共消耗橡胶集料混凝土 550m^3 ,它是目前国内唯一的也是最大的一条橡胶集料混凝土道路(图1.7)。



图 1.6 青银高速公路收费站

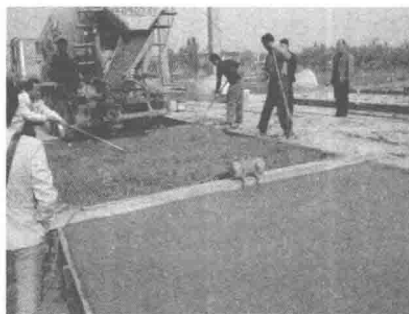


图 1.7 振动梁振实后的面层

3. 桥面铺装——中国天津

桥面铺装是桥梁结构中较为特殊的部分，面积较大而厚度相应较薄，一般为 80~150mm。桥面铺装层的作用是在复杂的外界环境下如长时间的日照、雨雪侵蚀、机械磨损等作用下保护桥面板免遭破坏，提高桥面板的耐久性和服务寿命，同时起到分散横向车载的作用。它直接承受行车过程中的弯拉荷载、冲击荷载。另外，桥面铺装层直接接受到日照，升温较快，并且比桥面板温度变化大，相对桥面板产生的温度变形大，在雨雪环境下产生的湿度变形也大，在底部又受到主梁的约束作用，部分或全部地参与了主梁的变形。因此，桥面铺装是一个极其复杂的多向受力结构，对混凝土的质量和耐久性要求较高。

2006 年 8 月建造的天津市武清区二百户东口桥使用了橡胶集料混凝土作为桥面铺装层。该桥为东西向三跨混凝土梁桥，全长 24m，每跨 8m，桥面宽 8m，其中铺装层净宽 7m，桥面净面积 168m²（图 1.8）。采用预制的预应力混凝土梁，吊装后，利用普通混凝土进行灌缝。铺装层中预设单层钢筋网，规格为双向 10cm×10cm，与梁顶面间的净空为 6cm，钢筋为 Φ10 带肋钢筋（图 1.9）。橡胶集料混凝土铺装层的设计铺设厚度为 12cm。橡胶集料混凝土的铺设总量为 26m³。在施工现场同时成型了相应的抗压以及抗折试件，其 28d 的抗压强度为 42.1 MPa，抗折强度为 6.44 MPa，脆性系数值为 6.54。满足设计要求。这是国内第一次将橡胶集料混凝土用在桥面铺装层上。



图 1.8 人工整平后桥面



图 1.9 施工前桥面