

橡胶集料混凝土工程应用 研究与探讨

王存贵 朱涵 主编

- 在混凝土中按一定比例掺入橡胶颗粒，这些橡胶颗粒在混凝土中形成分布性微型胀缩缝群，减小了混凝土的脆性，提高了混凝土的形变协调能力。
- 本书系统地介绍了橡胶集料混凝土的国内外研究状况与应用趋势。
- 橡胶集料砼具有较高的强度、韧性和耐久性，抗裂、抗冻、抗腐蚀、抗渗。
- 橡胶集料砼应用范围广，实际应用效果良好。

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS



橡胶集料混凝土工程应用研究与探讨

王存贵 朱涵 主编

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书系统地介绍了橡胶集料混凝土的抗渗性、氯离子渗透性、抗盐冻性、氯盐侵蚀环境下橡胶集料混凝土内钢筋锈蚀性的机理以及工程实际应用情况。

本书共分九章,内容包括:绪论、国内外研究与应用现状、橡胶集料混凝土抗渗性、橡胶集料混凝土氯离子渗透性、氯盐侵蚀环境下橡胶集料混凝土内钢筋锈蚀性、橡胶集料混凝土抗盐冻性研究、橡胶集料混凝土在桥面铺装中的应用、橡胶集料混凝土在结构加固改造中的应用、结论与展望。

本书可供建筑、水利、交通等部门的工程技术人员和研究人员使用,也可作为高等院校建筑材料工程和相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

橡胶集料混凝土工程应用研究与探讨 / 王存贵, 朱涵主编; 张立敏等编. — 天津: 天津大学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5618-5503-4

I. ①橡… II. ①王… ②朱… ③张… III. ①混凝土施工—研究 IV. ①TU755

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第319046号

出版发行 天津大学出版社

地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部: 022-27403647

网 址 publish.tju.edu.cn

印 刷 廊坊市海涛印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm × 260mm

印 张 9.25

字 数 231千

版 次 2016年1月第1版

印 次 2016年1月第1次

定 价 48.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

橡胶集料混凝土作为一种新型水泥混凝土材料具有重量轻、韧性好、变形大、阻尼高、抗冲击性强、干缩性小、导热系数低、吸声性好的突出优点，弥补了传统水泥混凝土的诸多缺陷，成为当今混凝土材料学科新的增长点。中建六局总工王存贵和天津大学美籍教授朱涵组建的课题组以产学研相结合的方式对橡胶集料混凝土展开了深入的材料性能与工程应用研究。

本书通过橡胶集料混凝土与普通混凝土的大量对比试验，结合工程应用实际情况，研究了它们的抗渗性、氯离子渗透性、抗盐冻性以及氯盐侵蚀环境下橡胶集料混凝土内钢筋锈蚀性机理等。本书所述的很多试验方法及应用均具有创新性，为该学科的发展提供了技术支持，例如：首次对橡胶的水接触角进行测定，发现该接触角介于 80° 和 116° 之间，且接触角大小受橡胶品种及表面粗糙程度的影响，由此计算的毛细孔压力可降至普通混凝土的 38% ~ 80%；首次将橡胶集料混凝土应用于桥面铺装工程中，对橡胶集料混凝土的压、弯性能和冲击韧性进行了试验分析，结果表明单轴受压下橡胶集料混凝土表现出很大的压缩变形，弯曲开裂应变可达到 $(260 \sim 640) \times 10^{-6}$ ，大大超过了普通混凝土，冲击破坏次数是普通混凝土的 1 倍以上。在天津某桥梁桥面上设计并建造了宽 7 m、长 24 m、厚 120 mm 的橡胶集料混凝土桥面铺装试验段，结果表明橡胶集料混凝土值得在桥面铺装工程中进一步推广。还针对加固改造工程的具体情况，研究确定了不同的配合比，应用在多个建筑工程的加固改造中，取得了很好的效果。

本书由王存贵、朱涵主编，参加编写工作的有：张立敏、张新民、刘春生、段前忠、刘义猛、王建来等。由于编者水平有限，对书中可能存在的不足和错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

2016 年 1 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 橡胶集料混凝土简介	1
1.2 橡胶颗粒的生产与利用	3
1.3 橡胶混凝土结构的耐久性	5
1.4 研究目的与意义	6
第2章 国内外研究与应用现状	7
2.1 橡胶集料混凝土拌和物的性能	7
2.2 橡胶集料混凝土的强度	8
2.3 橡胶集料混凝土的弯曲韧性	9
2.4 橡胶集料混凝土的弹性模量	10
2.5 橡胶集料混凝土的阻尼	10
2.6 橡胶集料混凝土的吸声性	11
2.7 橡胶集料混凝土的导热性	12
2.8 橡胶集料混凝土的工程应用	15
2.8.1 道路、网球场——美国亚利桑那州	15
2.8.2 青银高速公路石家庄段——中国石家庄	15
2.8.3 桥面铺装——中国天津	16
2.8.4 工程加固——中国天津	17
第3章 橡胶集料混凝土抗渗性	18
3.1 橡胶集料混凝土的孔结构	18
3.2 毛细水压力	21
3.2.1 液体的表面张力与接触角	21
3.2.2 橡胶、水泥石的水接触角测定	23
3.2.3 橡胶集料对毛细孔压力的影响	31
3.3 静水压力作用	32
3.4 橡胶集料混凝土的渗透模型	34
3.5 橡胶集料混凝土抗渗性试验	35
3.5.1 试验原材料	35
3.5.2 试验配合比	37
3.5.3 试验方法	38
3.5.4 试验结果分析	39
3.6 本章小结	43

第4章 橡胶集料混凝土氯离子渗透性	45
4.1 干湿交替区域橡胶集料混凝土氯离子渗透过程	45
4.1.1 扩散过程	45
4.1.2 橡胶集料混凝土中氯离子的扩散方程	48
4.1.3 干湿交替作用下氯离子的渗透模型	49
4.2 外加电场对橡胶集料混凝土氯离子渗透的加速作用	49
4.2.1 电迁过程	50
4.2.2 Nernst-Planck 方程和 Nernst-Einstein 方程	51
4.2.3 极化作用的影响	52
4.3 测试氯离子渗透性的试验方法	52
4.3.1 自然扩散法	53
4.3.2 电量法	54
4.3.3 稳态电迁移法	55
4.3.4 电导率法	55
4.3.5 快速电迁移法	55
4.4 橡胶集料混凝土氯离子渗透性试验	56
4.4.1 试验原材料	56
4.4.2 试验及评价方法	56
4.4.3 试验配合比	58
4.4.4 试验结果分析	59
4.5 本章小结	63
第5章 氯盐侵蚀环境下橡胶集料混凝土内钢筋锈蚀性	64
5.1 混凝土内钢筋的锈蚀机理	64
5.2 氯离子加速锈蚀试验原理及方案	66
5.2.1 试验原理	66
5.2.2 试验方案	67
5.2.3 试验材料和配合比设计	68
5.2.4 锈蚀程度评定方法	69
5.2.5 锈蚀后受弯性能试验方法	69
5.3 试验结果分析	70
5.3.1 加速锈蚀试验结果	70
5.3.2 锈蚀后受弯性能试验结果	73
5.4 本章小结	76
第6章 橡胶集料混凝土抗盐冻性研究	78
6.1 橡胶集料混凝土盐冻破坏机理	78
6.1.1 冻融破坏的经典理论	78
6.1.2 橡胶集料对孔隙结冰压力的作用	79

6.2 橡胶集料混凝土盐冻试验	84
6.2.1 原材料及配合比	84
6.2.2 试验方法	84
6.2.3 试验结果分析	85
6.3 本章小结	86
第7章 橡胶集料混凝土在桥面铺装中的应用	88
7.1 橡胶集料混凝土的突出特点	88
7.2 桥面铺装的设计方法	89
7.3 桥面铺装混凝土的力学性能试验	91
7.3.1 原材料与试验配合比	91
7.3.2 试验方法	91
7.3.3 试验结果分析	92
7.4 试验段的设计与建造	96
7.5 橡胶集料混凝土桥面铺装的技术经济性分析	98
7.6 本章小结	100
第8章 橡胶集料混凝土在结构加固改造中的应用	101
8.1 某化工厂环氧丙烷增稠器加固工程	101
8.1.1 工程概况	101
8.1.2 加固方案	102
8.1.3 实验室工作	103
8.1.4 工程施工	105
8.1.5 后期检测	106
8.2 某化工厂合成盐酸框架加固工程	106
8.2.1 工程概况	106
8.2.2 加固方案	107
8.2.3 实验室工作	112
8.2.4 工程施工	113
8.2.5 后期检测	115
8.3 某化工厂烧碱降膜框架加固工程	116
8.3.1 工程概况	116
8.3.2 加固方案	116
8.3.3 实验室工作	117
8.3.4 工程施工	117
8.3.5 后期检测	118
8.4 在香榭丽舍公寓吊柱上的应用	121
8.5 橡胶集料混凝土工程应用总结	124
8.5.1 施工中的室外养护问题	124

8.5.2 橡胶集料混凝土施工要点	124
8.6 橡胶集料混凝土的不足之处	125
8.6.1 混凝土强度降低	125
8.6.2 橡胶集料上浮	125
8.6.3 生产成本增加	125
第9章 结论与展望	127
9.1 主要结论	127
9.2 研究工作展望	128
参考文献	129

第1章 绪 论

1.1 橡胶集料混凝土简介

橡胶集料混凝土(Crumb Rubber Concrete, CRC)是一种将橡胶颗粒按一定比例加入混凝土配制而成的新型混凝土。这些橡胶颗粒在混凝土内形成一个分布性的微型胀缩缝群,减小了混凝土的脆性,提高了混凝土的形变协调能力,可减少或避免产生裂纹。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。橡胶颗粒取材于废旧轮胎以及工业橡胶制品等废橡胶,经破碎、筛选、清洗等工序加工得到橡胶粉。橡胶集料混凝土也被称作橡胶改性混凝土或弹性混凝土,橡胶集料混凝土的性能介于传统水泥混凝土和沥青混凝土之间,是一种半刚性的混凝土材料。

橡胶集料混凝土产生于20世纪90年代的美国。当时,一方面美国在20世纪六七十年代经济快速发展时期建造的混凝土结构,经过二三十年的使用,已经产生了许多耐久性问题,例如混凝土开裂、冻融破坏、氯离子引起的钢筋锈蚀等;另一方面,美国汽车工业高度发达,产生了大量的废旧轮胎,一时难以解决,从而有学者萌发了采用废旧橡胶作为混凝土集料的想法。

关于橡胶集料混凝土的最早文献资料见于美国俄勒冈州立大学的 Eldin 教授等人于1993年发表的论文,其将橡胶集料混凝土表述为 Concrete Made with Rubber Particles as Aggregate,即以橡胶为集料的混凝土。同年,宾夕法尼亚大学的 Rostami 博士等人 在其著作中提到橡胶集料混凝土是含橡胶的混凝土,即 Rubber Including Concrete。国内的相关研究工作是由石家庄铁道学院宋少民等人率先开展的,他们将橡胶集料混凝土命名为橡胶粉增韧混凝土,同济大学袁勇等人将其命名为橡胶混凝土。上述各种表述方法的主导思想基本上都是用橡胶集料以一定比例取代粗细集料,这种表述方法的特点是直观、简单。

近几年来,本工作团队在橡胶集料混凝土研究上做了大量的工作,取得了很多成果,对橡胶集料混凝土的性能有了较为透彻的了解。

橡胶集料一般从尺度上加以区分。有的文献提出了四种尺度区分,分别是 Slit Tires (轮胎整体一分为二),Shredded/Chipped Tires(长300~400 mm,宽100~230 mm),Ground Tires(0.15~19 mm)以及 Crumb Rubber(0.075~4.75 mm);也有文献提出采用40~80目(180~380 μm)的超细橡胶粉配制橡胶集料混凝土。可见橡胶集料的尺度范围是相当宽的,配制的橡胶集料混凝土性能也有较大差别。

因此,为了研究的方便性,参考我国现有关于混凝土用砂石集料的标准 GB/T 14684—2001《建筑用砂》和 GB/T 14685—2001《建筑用卵石、碎石》中的相关规定,粒径在4.75~75 mm的橡胶集料称为橡胶粗集料[图1-1(a)],粒径在0.075~4.75 mm(包括0.075 mm

和 4.75 mm) 的称为橡胶细集料[图 1-1(c)], 粒径在 0.075 mm 以下的称为橡胶微集料[图 1-1(e)], 所配制的橡胶集料混凝土相应地称为橡胶粗集料混凝土[图 1-1(b)]、橡胶细集料混凝土[图 1-1(d)]和橡胶微集料混凝土[图 1-1(f)]。本书的研究内容所涉及的主要是橡胶细集料混凝土和橡胶粗集料混凝土。

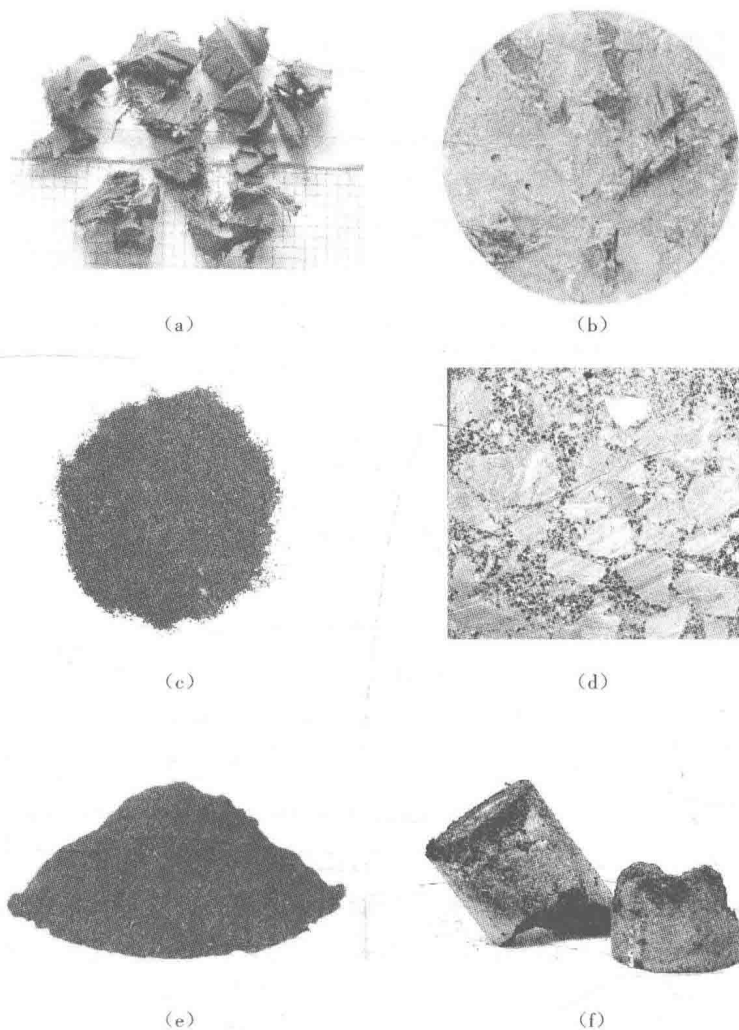


图 1-1 三种类型的橡胶集料及相应的混凝土

(a) 橡胶粗集料; (b) 橡胶粗集料混凝土; (c) 橡胶细集料;
(d) 橡胶细集料混凝土; (e) 橡胶微集料; (f) 橡胶微集料混凝土

随着橡胶集料掺量的变化,混凝土的各方面性能会发生不同程度的变化,主要体现在强度、弹性模量、韧性、渗透性、收缩性以及破坏模式等方面,如表 1-1 所示。

表 1-1 橡胶集料掺量对混凝土性能的影响

掺量水平	体积分数(%)	混凝土性能
低掺量	$0 < R \leq 3$	强度有较小降低,弹性模量小幅下降,抗渗性提高,干缩减小,破坏仍呈脆性
中等掺量	$3 < R \leq 10$	抗渗性显著提高,弯曲韧性显著增加,干缩明显减小,耐热、耐火性能提高
高掺量	$10 < R \leq 25$	抗冻性明显增强,阻尼比增大,吸声系数增大,破坏表现出一定塑性
超高掺量	$R > 25$	阻尼大幅提高,强度大幅降低,抗渗性下降,破坏时产生极大的变形

1.2 橡胶颗粒的生产与利用

废旧轮胎被称为“黑色污染”,是固体废弃物中的一种,在固体废弃物排行榜上高居第二位,其回收和处理一直是世界性难题,也是环境保护的难题。然而,直到 20 世纪 90 年代初期,美国产生的大量废旧轮胎无法处置,这一问题才得到了人们的重视。

进入 20 世纪后,汽车工业迅猛发展,使得废旧轮胎问题所带来的压力越来越大。2001 年,我国轮胎实际产量为 1.2 亿条左右,仅次于美国、日本而居世界第三位,至 2004 年我国轮胎产量已突破 2 亿条。据统计,目前全世界每年有 15 亿条轮胎报废,其中北美大约 4 亿条,西欧近 2 亿条,日本约 1 亿条。我国 2000 年产生的废旧轮胎已达 4 000 万条,截至 2004 年底,每年产生废旧轮胎达 6 500 万条以上,若以每条 15 kg 计,则超过 97.5 万吨,在某些城市的市郊接合处甚至能见到绵延上千米、像小山一样的废旧轮胎堆积点,如图 1-2 所示。



图 1-2 废旧轮胎的堆积造成了严重的环境污染和火灾隐患

20 世纪 90 年代,世界各国处理废旧轮胎最普遍的做法是掩埋或堆放。但随着地价上涨,征用土地做废旧轮胎的掩埋、堆放场地越来越困难;同时,废旧轮胎大量堆积,极易引起火灾。美国是世界上汽车保有量最多的国家,废旧轮胎的产生量也居世界第一位。美国每年约产生废旧轮胎 3 亿条,此外还有历年尚未处理的废旧轮胎。历史上,美国发生过几次大的废旧轮胎火灾事件和废旧轮胎污染引起的流行性疾病,给环境与人的健康造成了很大的危害。所以,美国政府的措施主要针对废旧轮胎的回收、运输、处理和再利用,并以立法的形式推动废旧轮胎回收利用市场的发展。在我国,废旧轮胎的问题正在逐渐为人们所重

视。1992年7月,国务院环委会组织编制了《中国21世纪议程》,把资源综合利用与废弃物资源化技术列入中国可持续发展战略框架中。1995年10月,全国人大常委会通过了《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》。因此,处理好废旧橡胶,对于充分利用可再生资源、减少环境污染、改善人类的生存环境是非常重要的。

目前,废旧轮胎的回收利用分为直接利用和间接利用两种。轮胎翻新是直接利用废旧轮胎的最佳方式,就是将废旧轮胎已经磨损的外层削去,粘贴上胶料,再进行硫化,重新使用。世界上新胎和翻新胎数量之比平均为10:1,而中国仅为26:1。早在1990年,美国翻新胎产量就高达3300万条,约为当年新胎产量(2.3亿条)的14.3%,占世界翻新胎总产量的40%以上;全美只有40家轮胎厂,而翻新胎厂却有1500家之多。在良好的使用、保养条件下,一条轮胎可以翻新多次,具体地说,尼龙帘线轮胎可翻新2~3次,钢丝子午线轮胎可翻新3~6次。每翻新一次,可重新获得相当于新轮胎60%~90%的使用寿命,平均行驶里程为5万~7万km。通过多次翻新,至少可使轮胎的总寿命延长1~2倍,而翻新一条废旧轮胎所消耗的原材料只相当于制造一条同规格新轮胎的15%~30%,价格仅为新轮胎的20%~50%。在我国,轮胎的翻新和利用价值没有被管理者、生产者和消费者所了解,许多人认为翻新轮胎不如新胎安全、可靠,不接受翻新轮胎;也没有一套相应的政策法规和管理办法。其他的直接利用方法还包括:做人工鱼礁石,做船只、码头的护弦,做车辆缓冲材料,做高速公路隔音墙。在英国,甚至将废旧轮胎投入被原子能发电站排出水污染的河中吸收重金属。

间接利用是指将废旧轮胎通过化学或物理方法加工而制得系列产品加以利用,主要有生产再生胶和胶粉、热分解回收化学品以及燃烧热利用等方式。世界各国由于情况不同,所采用的方法也不尽相同。

由于生产胶粉具有能耗小,无须使用脱硫剂、软化剂、活化剂等化学外加剂,污染小等特点,我国正在向将废旧轮胎加工成胶粉(包括精细胶粉)这一主导方向迈进。胶粉的生产工艺有常温粉碎法、低温粉碎法、湿法(或称溶液法)三种。常温粉碎法是指在常温下对废旧橡胶用辊筒或其他设备的剪切作用进行粉碎的一种方法,是目前国际采用最多、最为经济实用的方法。其工艺主要分为三个阶段:首先将整个轮胎破碎成直径为50mm的胶块,再在粗碎机上将上述胶块再粉碎成直径为20mm的胶粒;其次将粗胶粒送入金属分离机中分离出钢丝杂质,再送入风选机中除去纤维;最后用细碎机将上述胶粒进一步磨碎,经筛分后可以得到粒径为0.1~10mm的橡胶粉。这里值得注意的是,上述三个阶段所得的产物,在颗粒形状上和普通水泥混凝土骨料(包括粗细骨料)存在很多相似之处,并且通过适当的整合也能够形成所谓级配的概念,但是它们在化学成分、物理力学性能等方面与普通水泥混凝土骨料存在巨大差异。低温粉碎法是指将橡胶经低温脆化作用后采用机械进行粉碎的一种方法,可比常温粉碎法得到粒径更小的胶粉,主要用于生产50~200目(75~270 μm)的超细橡胶粉。而采用湿法生产,首先要在轮胎粉碎前用化学试剂进行处理,生产出的胶粉可以达到200目(75 μm)以上。

胶粉的用途非常广,譬如掺入胶料中可代替部分生胶,降低产品成本;活化胶粉或改性胶粉可用来制造汽车和橡胶工业部件等;还可用于制造防水卷材、水管、油管、包装材料、蓄

水池内衬,与热塑性塑料共混可改善塑料的韧性和强度。橡胶粉在土木工程中也有非常广泛的用途,例如将整条轮胎破碎成直径为 50 ~ 300 mm 的碎块,作为土方工程的回填料,可降低上覆压力、减少沉降、增强整体稳定性。橡胶粉改性沥青是橡胶粉在土木工程中的另一重要用途。采用橡胶沥青路面可减少噪声,提高路面耐磨、抗冻等性能,延长路面的使用期限,缩短刹车制动距离。美国的橡胶路面协会报道了橡胶粉改性沥青混合料作为降噪措施的效果,加利福尼亚州萨克拉门托交通局于 1993 年 10 月在 Alta-Arden 快速路上铺筑了橡胶沥青路面,研究表明,与传统的沥青路面相比,使用橡胶沥青后道路噪声分贝平均降低了 40%,且持续了 6 年之久。我国在 20 世纪 80 年代初进行了橡胶粉改性沥青的初步尝试,1982 年在江西省和四川省进行了路面试铺,10 余年的试验表明该路面的抗裂性能提高,并且有很好的热稳定性。2001 年春,交通部公路科学研究所首次在钢桥桥面铺设中采用 30% 橡胶粉改性沥青,经受了 4 年的超重交通考验,基本保持完好,各项性能指标保持优良。

橡胶粉用于水泥混凝土的研究正在逐渐为人们所重视,研究的重点主要是针对混凝土的物理力学特性和耐久性两方面。

1.3 橡胶混凝土结构的耐久性

混凝土结构耐久性是指混凝土结构及其部件在可能引起材料性能劣化的各种作用下能够长期维持其应有性能的能力。混凝土耐久性是一个综合性的概念,包括很多内容,如混凝土的抗渗性、抗冻性、抗碳化性能、抗侵蚀性、抗碱集料反应等。Mehta 教授在“混凝土耐久性——50 年的进展”主题报告中指出:“当今世界混凝土破坏的主要原因为钢筋锈蚀、寒冷气候下的冻害、侵蚀环境下的物理化学作用。”橡胶集料混凝土中由于引入了橡胶集料,使得混凝土的孔结构、物理性能都发生了一定的改变,而这些变化在很大程度上提高了混凝土的耐久性。因此,开展橡胶集料混凝土在干湿和冻融交替变化、侵蚀性无机盐作用、人为污染、非正常使用等外界条件下以及在水泥和骨料的选用、混凝土水灰比、外加剂的品种、钢筋保护层的厚度、浇注和养护的施工工艺等多种内部因素下的研究就显得尤为重要。

从历史上看,由于混凝土耐久性问题而导致的结构破坏非常突出。据美国联邦公路管理局 1997 年统计,有 31% 的桥梁低于标准,其中 17% 的桥梁被划为有结构缺陷,将被迫关闭、限载或立即修复;另外 14% 的桥梁被划为功能过时,即桥面构造、净空高度或承载能力不符合标准要求。低于标准的混凝土桥梁中,属于结构和功能不良的超过 10%,其中结构不良主要是指混凝土材料性能劣化而造成的早期损坏。混凝土桥梁建成后 10 ~ 20 年就需要维修的情况非常普遍。

据英国 1979 年调查,混凝土结构有 36% 需要重建或改建。1978 年建筑维修费用上升到 1965 年的 3.76 倍。在靠海及严寒地区,由于海水中盐分的侵蚀与冬季使用化冻的除冰氯盐,导致了钢筋严重锈蚀。

日本在 1986 年以前,因不重视混凝土的耐久性,在工程中使用高碱水泥与含盐的海砂及活性骨料,导致了国内混凝土结构的碱骨料损坏与钢筋锈蚀,对结构今后的使用产生了严重的影响。

我国混凝土结构因耐久性问题导致破坏的情况也很严重。1981年,南京水科院、四航局科研所共同进行的调查显示,华南使用了7~25年的18座海港码头中,浪溅区梁板底部钢筋严重锈蚀引起破坏的码头有16座。据1995年统计,当时在役的60亿 m^2 城镇民用建筑中,有30亿 m^2 需要加固,其中10亿 m^2 急需修理加固。1995年,香港土木工程署委托Taywood公司对93个码头进行综合调查,结果发现:13个(约占14%)码头主筋截面损失率达到25%,箍筋截面损失率达到50%;10个(占11%)码头主筋截面损失率达到10%~25%,箍筋截面损失率达到25%~50%。天津市滨海新区的大部分桥梁,实际上都存在耐久性问题,至少有70%的桥梁伸缩缝发生渗漏水,其下对应的所有盖梁都有不同程度的冻伤、钢筋锈蚀、梁体表面出现裂缝等现象,而且其中的一些桥梁运营仅10年左右,如图1-3和图1-4所示。



图 1-3 混凝土碳化

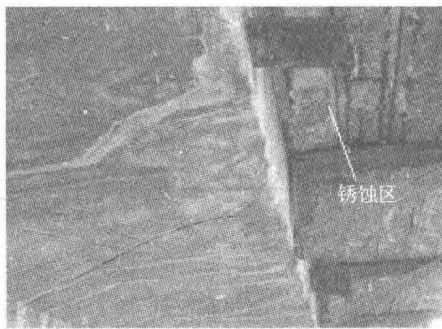


图 1-4 钢筋锈蚀

1.4 研究目的与意义

本书的研究目的包括两方面:通过理论分析和试验手段搞清橡胶集料混凝土产生高耐久性,特别是高抗渗性、高抗冻性和高抗锈蚀性的机理;针对工程上对耐久性要求高的结构,特别是桥面结构,开发橡胶集料混凝土的设计理论与施工工艺,开发针对桥梁结构的橡胶集料混凝土配合比。

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,以每条废旧轮胎可产生5 kg粒径为1~2 mm的橡胶集料计算,1 m^3 橡胶集料混凝土至多可以消耗20~30条废旧轮胎,对于处理废旧轮胎、保护日益紧张的土地和橡胶资源是行之有效的方法;同时,由于橡胶集料本身的成本很低,在成本上有优势,因此橡胶集料混凝土的开发研究具有很高的经济效益和社会效益。另一方面,中国近年来的混凝土年用量为13亿 m^3 左右,随着我国在基础设施建设方面投入的进一步加大,可以预见未来水泥混凝土用量将会是非常巨大的,如此大量的混凝土如果产生耐久性破坏,后果是极为严重的,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有出色的表现,从而引起了广泛的关注与重视。因此,对橡胶集料混凝土耐久性及其机理的分析和研究对于解决工程耐久性问题、保证工程质量具非常重大的意义。

第2章 国内外研究与应用现状

橡胶集料混凝土的研究开始于美国,之后加拿大、土耳其、秘鲁、西班牙、法国、泰国、巴西、意大利、中国等国家陆续开展了这方面的研究,我国的研究工作是从20世纪90年代后期开始的。橡胶集料混凝土的研究内容包括强度、变形、韧性、收缩性、导热性、耐火性、吸声性、阻尼等混凝土材料学基本性质,同时对橡胶集料混凝土用于钢筋混凝土结构和预应力钢筋混凝土结构的可行性进行讨论。工程应用方面,橡胶集料混凝土已经在诸如公路路面、运动场、停车场、房屋基础、结构加固工程中得到了应用。

2.1 橡胶集料混凝土拌和物的性能

Raghvan 和 Huynh 对掺有橡胶集料的砂浆的工作性能进行了研究,同时采用直径为2 mm 的橡胶粒和尺寸为5.5 mm × 1.2 mm 以及10.8 mm × 1.8 mm 的两种橡胶块,并以0 ~ 15% 的质量分数代替水泥,维勃稠度试验结果显示掺有橡胶的砂浆工作性能与基准砂浆相当,并优于掺合成纤维的砂浆。

Khatib 和 Bayomy 的研究发现,随着橡胶集料掺量的增加,新拌混凝土的坍落度降低,并且同等掺量下,橡胶细集料混凝土的坍落度值大于橡胶粗集料混凝土。当橡胶集料掺量超过40% 时,混凝土坍落度几乎为零。

Turatsinze 和 Garros 研究了橡胶集料自密实混凝土(Self-compacting Concrete Incorporating Rubber Aggregate)的流动性(扩展度试验)、填充性(J形环试验,RILEM TC 174 - SCC)和组分分离性,其中所用橡胶集料直径为5 ~ 10 mm,掺量分别为76 kg/m³、116.2 kg/m³、152.1 kg/m³、355.8 kg/m³。结果表明,橡胶集料的掺入减小了混凝土扩展度,但在超塑化剂掺量为3.5 ~ 9.32 kg/m³的范围内可以配制出扩展度达到(630 ± 30)mm 的橡胶集料自密实混凝土;J形环内外高度差在5 ~ 6 mm(小于10 mm 时填充性较好);组分分离性试验显示,在适量超塑化剂下,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2-1所示。

Bignozzi 和 Sandrolini 配制出了扩展度达到700 mm 的橡胶集料自密实混凝土(橡胶细集料取代1/3砂),与相同条件下普通自密实混凝土相比,橡胶集料自密实混凝土的扩展度损失降低了64%。

Savas 等人的研究发现,即使在不使用引气剂的情况下,橡胶集料混凝土的含气量要高于普通混凝土,文献[30-31]也得到了同样的结论,即由于橡胶是非极性有机材料,并且粗糙的表面很容易在拌和时裹挟空气,随着橡胶集料掺量提高,含气量增大。同时,由于橡胶集料的表观密度(1.1 ~ 1.2 g/cm³)相对砂石小很多,则拌和物表观密度必然要降低。

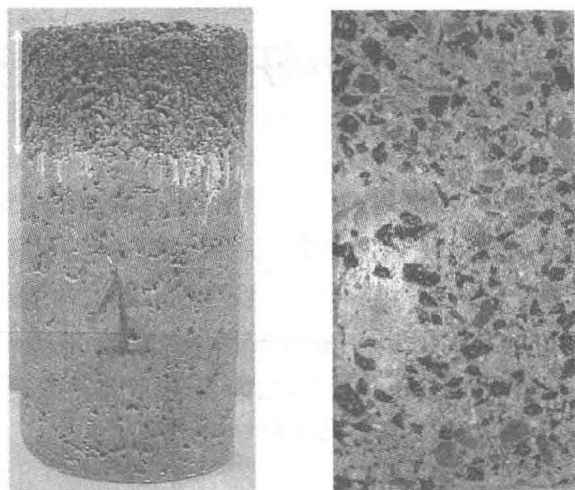


图 2-1 使用超塑化剂对橡胶集料混凝土组分分离性的影响

2.2 橡胶集料混凝土的强度

橡胶集料混凝土强度方面的研究得到的一致性结论是橡胶集料掺入会降低混凝土的强度,且随着掺量的增加,降低幅度增大。Eldin 和 Senouci 首先用试验方法证明了采用橡胶粗集料和橡胶细集料会使混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度降低:当粗骨料完全被橡胶粗集料代替后,混凝土的抗压强度和抗拉强度分别降低了 85% 和 50%;当全部细骨料被橡胶细集料代替后,抗压强度和抗拉强度分别降低了 65% 和 50%。值得注意的是,这两种试件都表现出了非同寻常的破坏模式,破坏时都经历了非常大的变形,出现了延性破坏的特征。

Khatib 和 Bayomy 通过大量试验得到了橡胶集料混凝土强度折减系数 (SRF , Strength Reduction Factor) 与橡胶集料掺量间的数学模型:

$$SRF = a + b(1 - R)^m \quad (2-1)$$

式中: R 为橡胶集料相对于普通混凝土粗细骨料的体积取代量; a 和 b 分别为回归模型的参数,且 $a + b = 1$; m 为反映强度折减系数对不同橡胶集料掺量和粒径敏感性的参数,取值最小为 2,最大为 17。

文献[3]也发现使用橡胶粗集料的混凝土强度低于使用橡胶细集料的混凝土,然而 Ali 以及 Fattuhi 等人的研究却发现了与之相反的现象。

为了提高橡胶集料混凝土的强度,各国学者进行了各种尝试。最为普遍的方法是对橡胶集料进行表面预处理 (Surface Pretreatment),主要有水冲洗法、NaOH 浸泡法、高分子偶联剂法和等离子体预处理法,其中前两种方法由于操作简单而使用较多。Rostami 等人分别用水冲洗法和四氯化碳溶剂浸泡法进行表面预处理,结果显示,采用水冲洗预处理的橡胶集料混凝土的强度比未处理的橡胶集料混凝土提高了 16%,而用四氯化碳溶剂浸泡处理的橡胶集料混凝土的强度比未处理的橡胶集料混凝土提高了 57%。

Segre 和 Joeke 的工作是针对橡胶集料砂浆的,他们对 35 目($425\ \mu\text{m}$) 橡胶细集料的表面处理方法进行了探讨,发现采用 NaOH 浸泡法能够增强橡胶集料的亲水性。将橡胶集料浸泡在 NaOH 饱和溶液中 20 min,然后用以拌制混凝土,对成型的混凝土进行吸水性、表观密度、抗压强度、抗折强度、磨耗性能和弹性模量试验,结果显示 NaOH 浸泡法使橡胶集料混凝土的力学性能有了很大的改善,SEM 分析显示处理后橡胶集料与水泥基体的黏结比未经处理的橡胶集料混凝土更紧密,如图 2-2 所示。

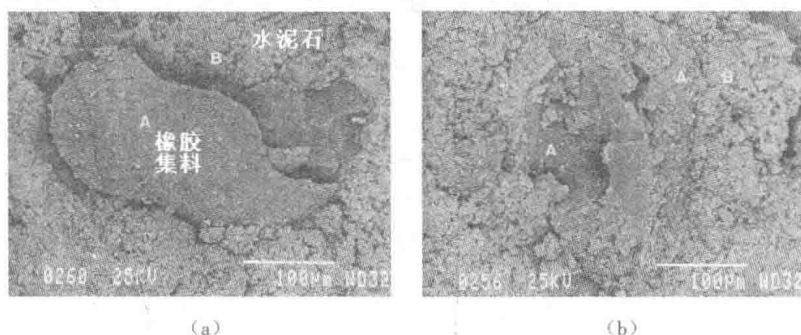


图 2-2 表面处理前后的 SEM 结果

(a) 未经处理的试样; (b) 经 NaOH 饱和溶液浸泡处理的试样

2.3 橡胶集料混凝土的弯曲韧性

Hernández-Olivares 等人研究了橡胶集料混凝土的弯曲疲劳性能,采用尺寸为 $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$ 的小梁,橡胶集料的体积掺量分别为 3.5% 和 5%,在 MTS 试验机上加载,测得疲劳次数 N 和弯曲应力 σ_f 的数据,并通过回归分析得到了 95% 置信水平下的 $N - \sigma_f$ 方程,发现在 10^6 次疲劳荷载作用下,橡胶集料混凝土的应力水平低于普通混凝土,且随着橡胶集料掺量增加,应力逐渐降低。

Reda Taha 等人研究了橡胶集料混凝土的抗冲击性,试件破坏时所吸收的冲击能量表示为

$$IE = \sum_{i=1}^{N_f} w_i h_i \quad (2-2)$$

式中: IE 为试件破坏时吸收的冲击能量 ($\text{kN} \cdot \text{m}$); w_i 为落锤质量 ($10\ \text{kg}$); h_i 为下落高度 ($60\ \text{mm}$); N_f 为试件破坏时经历的冲击次数。

结果显示,掺入橡胶集料能够大幅提高混凝土的抗冲击性能,当橡胶集料掺量为骨料体积的 50% 时,所吸收的冲击能量是普通混凝土的 2.5 倍以上。文献[7]中还进行了带槽口(Notch)的 $100\ \text{mm} \times 75\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ 橡胶集料混凝土梁弯曲韧性试验,得到了弯曲状态下的荷载-位移曲线,并分别计算出了断裂能量 G_f (RILEM Committee 50 - FMC) 和非线性能量 J_{IC} (J 积分方法)。结果显示,随着橡胶集料掺量的增加,混凝土的断裂韧性达到普通混凝土的 2.3 ~ 3.9 倍,其原因主要是橡胶集料通过自身的受压、受弯和受扭抵消了一部分