



博士后文库

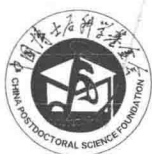
中国博士后科学基金资助出版

再生混凝土框架结构 抗震性能

王长青 肖建庄 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

再生混凝土框架结构抗震性能

王长青 肖建庄 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了作者针对再生混凝土动态力学性能和再生混凝土框架结构抗震性能研究的部分成果。基于理论分析、基础试验和数值模拟方法,探索和研究了再生混凝土技术中存在的一些关键科学问题。主要内容包括:再生混凝土结构性能研究进展,再生混凝土材料动态力学性能,再生混凝土框架结构振动台试验,再生混凝土框架结构地震反应非线性分析,再生混凝土和普通混凝土框架结构抗震性能比较,以及再生混凝土框架结构损伤评估。

本书可供土木工程专业的科学技术研究人员、设计人员和研究生,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

再生混凝土框架结构抗震性能/王长青,肖建庄著. —北京:科学出版社, 2016

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-050319-0

I. ①再… II. ①王… ②肖… III. ①再生混凝土-混凝土框架-框架结构-抗震性能 IV. ①TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 258090 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 10 月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:407 000

定价:110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵	傅伯杰	郭坤宇	胡 滨	贾国柱	刘 伟
卢秉恒	毛大立	权良柱	任南琪	万国华	王光谦
吴硕贤	杨宝峰	印遇龙	喻树迅	张文栋	赵 路
赵晓哲	钟登华	周宪梁			

《博士后文库》序言

博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为,博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段,而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚,但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制,成为造就高水平人才的重要途径,它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初,国家就设立了博士后科学基金,专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同,博士后科学基金的资助目标是“人”,也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点,通过竞争申请、独立使用基金,使博士后研究人员树立科研自信心,塑造独立科研人格。经过30年的发展,截至2015年底,博士后科学基金资助总额约26.5亿元人民币,资助博士后研究人员5万3千余人,约占博士后招收人数的1/3。截至2014年底,在我国具有博士后经历的院士中,博士后科学基金资助获得者占72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书,既是对博士后研究人员创新能力的肯定,也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情,同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播,更好地为社会所利用,进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从2013年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审,评选出博士后优秀学术著作,中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版,统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措,虽然刚刚起步,但是我们对它寄予厚望。希望

通过这项工作,使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略,服务于创新型国家的建设,也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。

李宜峰

中国博士后科学基金会理事长

前 言

再生混凝土具有很好的推广和应用价值,历史上每次大的地震灾害,都会因为房屋严重破坏或倒塌,造成巨大的经济损失和人员伤亡,同时也产生了大量的建筑废物,再生混凝土结构可以用于地震灾后重建中。当前,国内外对再生混凝土结构性能的研究相对较少,再生混凝土结构主要是参照现代国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的条文规定进行设计的,而《建筑抗震设计规范》GB50011 也没有专门针对再生混凝土结构抗震设计的相应条文,这对再生混凝土结构在具有抗震设防要求区域的应用造成了一定困难,急需填补这一研究领域的空白。因此研究再生混凝土结构在不同地震水准下的破坏特征、抗震性能以及损伤评估是十分必要的,能为再生混凝土结构抗震优化设计提供重要的试验和理论依据。

过去的几十年里,国内外学者针对再生骨料基本性能、再生混凝土材料静态力学性能以及再生混凝土构件静态力学性能开展了大量的试验和理论研究。发现,由于再生骨料和天然骨料品质的不同,再生混凝土和普通混凝土在材料性能和结构行为方面存在差异,但经过合理配合比设计后,再生混凝土的性能能够达到国家现行相关标准的规定,再生混凝土制品可以在土木工程中广泛推广和应用。再生混凝土是典型的率敏感性材料,而当前有关再生混凝土在动态荷载下裂缝、强度、变形性能以及结构行为的研究还非常少。

对此,作者就动态荷载下再生混凝土强度和变形受应变率影响的变化规律、不同地震动下再生混凝土结构的动力特性、地震反应和抗震能力等方面进行了较为系统的试验研究和数值分析。通过动态试验,提出了再生混凝土力学性能参数率相关性模型,建议了再生混凝土率型本构关系模型;通过振动台试验,描述了再生混凝土框架结构梁、柱的裂缝发展情况;分析了结构在不同地震水准下的破坏特征和机理;通过白噪声试验得到了模型的自振频率、阻尼比、结构振型等动力特性参数,并分析了它们随着结构裂缝和非弹性变形发展的变化规律;通过结构反应随地面加速度峰值变化的分布规律,建立了剪重比、楼层剪力和基底倾覆力矩模型,为再生混凝土框架结构抗震设计提供基础;提出了再生混凝土框架结构恢复力模型,并给出了恢复力模型的滞回规则;采用有限元数值模拟方法,完成了再生混凝土结构动力非线性分析,通过变参数分析,比较了再生混凝土和普通混凝土框架结构的抗震性能;在试验研究和理论分析基础上,开展再生混凝土框架结构在不同地震动下的损伤评估,取得了一些初步的研究成果。建议了再生混凝土框架结构地震破坏等级划分标准,明确了基于破坏极限状态的再生混凝土框架结构抗震性能水平

划分依据;给出了结构地震破坏等级与量化指标之间的对应关系。

本书得到了中国博士后科学基金会等部门的大力支持,涉及作者研究工作的相关资助项目包括:中国博士后科学基金特别资助项目“箍筋约束再生混凝土动态损伤本构(2015T80449)”;中国博士后科学基金面上资助项目(一等资助)“再生混凝土动态损伤本构(2014M550247)”;国家自然科学基金“高应变率反复荷载下约束再生混凝土大尺度试件损伤力学行为研究(51608383)”“十一五”国家科技支撑计划“灾区重建用再生砌块砌体与再生混凝土结构体系房屋示范(2008BAK48B03)”;河南省重点科技攻关项目“城市建筑废弃物再生利用技术研究(152102310027)”。另外,同济大学孙振平教授对本书提出了宝贵的意见。作者在此表示衷心的感谢!

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

王长青 肖建庄

2016年7月

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 选题背景	1
1.2 国外再生混凝土技术发展现状	3
1.3 国内再生混凝土技术发展现状	5
参考文献	7
第 2 章 再生混凝土结构性能研究进展	10
2.1 再生混凝土梁	10
2.1.1 梁受弯性能	10
2.1.2 梁受剪性能	13
2.2 再生混凝土板	16
2.3 再生混凝土柱	17
2.4 再生混凝土墙体	19
2.4.1 再生混凝土剪力墙	19
2.4.2 再生混凝土砌块墙体	20
2.5 再生混凝土框架	23
2.5.1 再生混凝土梁-柱节点	24
2.5.2 再生混凝土平面框架	26
2.6 本章小结	29
参考文献	30
第 3 章 再生混凝土材料动态力学性能	35
3.1 概述	35
3.2 试验概况	37
3.2.1 再生骨料性能	37
3.2.2 再生混凝土配合比设计	39
3.2.3 试件设计和制作	40
3.2.4 试验设备和测点布置	43
3.2.5 加载制度	44
3.3 破坏特征	44

3.4	试验数据处理	46
3.5	试验曲线	47
3.6	受压峰值应力	51
3.7	受压峰值应变	53
3.8	初始弹性模量	55
3.9	本章小结	57
	参考文献	58
第4章	再生混凝土框架结构振动台试验	61
4.1	概述	61
4.2	再生混凝土框架模型设计	63
4.2.1	模型相似比	63
4.2.2	模型材料	65
4.2.3	模型设计与制作	67
4.3	试验方案	73
4.3.1	波形选择	74
4.3.2	试验工况	78
4.3.3	测点布置	81
4.4	破坏现象宏观描述	86
4.4.1	模型南侧面裂缝描述	86
4.4.2	模型北侧面裂缝描述	88
4.4.3	模型东侧面裂缝描述	90
4.4.4	模型西侧面裂缝描述	91
4.5	试验结果分析	92
4.5.1	结构动力特性	92
4.5.2	结构地震反应	106
4.5.3	结构抗震性能	141
4.6	结构抗震能力评估	159
4.7	本章小结	160
	参考文献	162
第5章	再生混凝土框架结构地震反应非线性分析	166
5.1	概述	166
5.2	再生混凝土本构模型	171
5.3	钢筋本构模型	179
5.3.1	Menegotto-Pinto 模型	179
5.3.2	Hysteretic material 模型	181

5.4 纤维模型	185
5.4.1 基本假定	185
5.4.2 纤维截面分析	187
5.5 计算模型	190
5.5.1 基于有限元刚度法的非线性梁柱单元	195
5.5.2 基于有限元柔度法的非线性梁柱单元	198
5.5.3 模型质量分布	201
5.5.4 瑞利阻尼在非线性分析中的应用	201
5.5.5 动力分析的输入	204
5.5.6 分析手段	205
5.6 结构非线性分析	208
5.6.1 再生混凝土模型参数	208
5.6.2 钢筋模型参数	210
5.6.3 截面延性分析	210
5.6.4 结构动力特性	215
5.6.5 理论计算结果与试验结果对比	221
5.7 本章小结	255
参考文献	257
第6章 再生混凝土和普通混凝土框架结构抗震性能比较	263
6.1 本构模型参数调整	263
6.2 动力特性比较	264
6.3 加速度反应比较	268
6.4 楼层位移反应比较	273
6.5 层间位移反应比较	278
6.6 本章小结	284
参考文献	286
第7章 再生混凝土框架结构损伤评估	288
7.1 基于性能的结构抗震设计方法	288
7.2 地震破坏状态的划分	290
7.3 结构性能水平的确定	293
7.4 损伤指数确定	295
7.5 结构失效准则	296
7.6 基于变形和能量组合的双参数地震损伤评估	299
7.7 本章小结	306
参考文献	307

第 8 章 结论与展望.....	309
8.1 再生混凝土动态力学性能与率型模型	309
8.2 再生混凝土框架结构动力特性	310
8.3 再生混凝土框架结构地震反应	311
8.4 再生混凝土框架结构恢复力模型	312
8.5 再生混凝土框架结构地震损伤模型	313
8.6 研究工作展望	314
编后记.....	315

第1章 绪 论

1.1 选题背景

几个世纪以来,随着现代新科技的广泛普及和应用,世界范围内的工业化发展不断加速,资源化消耗和环境破坏也日益严重。建筑业作为国民经济的支柱之一,在近百年里迅猛发展,世界上每年超过 30 亿 t 的原料被用来制造建筑材料及建筑产品,占了全球经济总流量的 40%~50%^[1,2]。由此不可避免地在建(构)筑物的建造、使用、维护和拆迁过程中产生大量的建筑废物。数量庞大的建筑废物如何被适当地回收、处理和再利用已经成为世界各国共同关注的焦点问题。根据 1996 年在英国召开的混凝土会议资料,全世界从 1991~2000 年的 10 年间,废混凝土(其中包括钢筋混凝土工厂不合格的产品)总量将超过 10 亿 t。美国每年产生的建筑废物大约 1.36 亿 t,欧盟国家每年产生的建筑废物大约 1.8 亿 t,其中由建造、装修和拆迁产生的废弃物分别占建筑总废物的 8%、44%和 38%^[3],人均每年产生的建筑废物量大约 480kg^[4]。第二次世界大战结束后,德国城镇重建时期产生的建筑废物达 4 亿~6 亿 m³^[5]。德国联邦统计局 20 世纪 90 年代中前期的大量统计数据表明,德国每年产生的废弃物总量近 3 亿 t,其中建筑废料占总重量的 75%^[6],而这个数字还在不断增加。日本每年产生的废混凝土为 3200 万 t^[7],许多西欧国家每年产生的废混凝土为人均 1t^[6]。在保加利亚,从 20 世纪 90 年代以来,基于现代化发展的需要,建设了很多公共设施(道路、桥梁、市政和工业建筑),大量的建筑废物随之产生,但政府仅拿出建筑总支出的 0.5%用于建筑废物的管理^[4,7]。根据统计,在澳大利亚,建筑废物超过了城市废物总量的 44%;在丹麦,建筑废物占城市废物总量的 25%~50%;在日本,建筑废物占城市废物总量的 36%;在意大利,建筑废物占城市废物总量的 30%;在西班牙,建筑废物占城市废物总量的 70%;在中国香港,建筑废物占城市废物的 38%^[3,8]。

中国香港 2001 年产生的建筑废物达 1400 万 t,每日产生的拆建废物达 659.5 万 t^[4,9-11]。我国台湾省每年建筑拆除废料约 726 万 m³,与此同时,台湾省每年平均开采砂石约 8400 万 m³,其中河川砂石占 80%^[6]。

我国建筑废物的总量占城市废弃物总量的 30%~40%^[12]。不同时代的建筑物,在材料组成上具有很大的差异,我国 20 世纪 50 年代以前的建筑物,主要以砖、石、木材为结构材料,石灰砂浆砌筑与抹面;60 年代~80 年代,主要以混凝土、砖瓦为主要材料,这部分建筑是现在拆除建筑物的主体;90 年代以后,由于新型建筑材

料的大量应用,建筑物的组成材料趋向多元化,尤以化学建材的广泛应用为标志^[13]。调查结果表明,对我国旧建筑拆除产生的建筑废物的组成成分较为复杂,不同结构形式的建筑物所产生的废物类型有所区别,但其基本组成是一致的,主要由渣土、散落的砂浆和混凝土、剔凿产生的砖石和混凝土碎块、打桩截下的钢筋混凝土桩头、金属、沥青、竹木材、装饰装修产生的废料、各种包装材料和其他废物等组成。其中,混凝土占建筑废物总量的41%左右;砖石、渣土占建筑废物总量的40%左右;沥青占建筑废物总量的12%左右;其他废物占总量的7%左右^[12]。

现阶段,我国处于经济建设大发展时期,城市化进程速度很快。2009年统计资料表明,我国每年新建建筑面积超过20亿 m^2 的工程建设将持续10~15年,每年拆除旧建筑面积达2亿 m^2 ^[14,15]。有关数据显示,在10000 m^2 建筑的施工中,会产生500~600t建筑废物。据估计,每拆除1 m^2 的建筑,就会产生1~1.5t的建筑废物^[16,17]。2014年统计数据表明,我国每年产生的建筑废物量已超过15亿t。在北京、上海等大城市,建筑废物的年排放量均在3000万t以上^[18]。我国现有400亿 m^2 的建筑,未来大部分将转化为建筑废物。

自然灾害(地震、飓风)和人为灾害(战争)也会产生大量的建筑废物。根据Reinhart和McCreanor的统计^[19,20]发现,在美国近年来的自然灾害中,由一次自然灾害所产生的建筑废物是受影响地区年平均建筑废物量的5~15倍^[21]。通过对2004年印度洋海啸中产生的建筑废物量统计后,得到了与Reinhart和McCreanor类似的结论。在四川汶川地震中,倒塌房屋680万间(约1.3亿 m^2),受损房屋2300余万间(其中50%需要拆除)^[16,22]。倒塌房屋和危房拆除两项合计将产生建筑废物量5亿t左右,所产生的建筑废物量是上海和北京等大城市年建筑废物量的16倍左右。

1999年以后,我国混凝土用量居全球之冠。由此导致的资源、能源、环境以及相关的社会问题十分突出。混凝土是用量最大的建筑材料,要节约资源、能源和保护环境,就必须对这一领域予以特别的重视。混凝土工业在实施“可持续发展”战略中,可以发挥其不可替代的重大作用。

混凝土的再生利用具有极其重要的现实意义。人类必须开发资源节省型的混凝土材料,并且实现资源的可循环利用。对大量废混凝土进行循环再生利用即再生混凝土技术,通常被认为是解决废混凝土问题最有效的措施。再生混凝土技术的开发与应用,一方面可解决大量废混凝土处理困难以及由此造成的生态环境日益恶化等问题,另一方面,用建筑废物循环再生骨料替代天然骨料,可以减少建筑业对天然骨料的消耗,从而减少对天然砂石的开采,缓解天然骨料成本上升的压力,并降低开采砂石对生态环境的破坏,保护人类赖以生存的环境,符合人类社会可持续发展的要求。正是因为再生混凝土可以实现对废混凝土的回收,使其恢复部分原有性能,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,因此它完全满足世界环境组织提出的“绿色”的三大含义:①节约资源、能源;②不破坏环境,更应有利于环境;③可持续发展,既满足当代人的需求,又不危害后代人满足其需要的能力。再生混凝土技术已被认为是发展生态绿色混凝土、实现建筑资源环境可持续发展的主要措施之一。

1.2 国外再生混凝土技术发展现状

再生混凝土技术的应用开始于第二次世界大战之后,战争使世界上许多国家尤其是欧洲国家几乎是一片废墟,面临着重建的问题,大量的废弃混凝土的处理成为一个很大的难题。因此,苏联、德国、日本等国就开始对废混凝土进行开发和再生利用的研究^[23,24]。世界上第一次有文献记录用破碎的废砖作为再生粗骨料制成再生骨料混凝土制品的国家是德国,时间为1960年^[5,25]。

到目前为止,国际材料与结构研究实验联合会(RILEM)已召开了5次有关废混凝土再利用的专题国际会议,提出混凝土必须绿色化。1976年,国际材料与结构研究实验联合会设立了“混凝土的拆除与再利用技术委员会”(37-DRC)^[25],着手研究废混凝土的处理与再生利用技术。1988年11月,由日本建设省建筑研究所主办,在东京召开了“混凝土的拆除与再利用第二届 RILEM 国际会议”,会上发表了混凝土再利用的论文29篇。接着在加拿大渥太华举行的“水泥和混凝土工业可持续发展国际交流会”将“利用回收的混凝土作为骨料或其他再生结构材料”作为主要议题进行技术交流。1998年,RILEM在英国召开了“可持续建筑—再生混凝土骨料的应用”会议。2004年,RILEM又在西班牙召开了“再生骨料在建筑和结构中的应用”会议。1992年,联合国在巴西召开的环境开发会议(UNCEN)将地球环境问题置于相当的高度。1994年,联合国又增设了“可持续产品开发”工作组,其专门的机构——国际标准化机构讨论制定了环境协调和制品的标准。再生混凝土技术已成为世界各国共同关心的课题,也是国内外工程界和学术界关注的热点和前沿问题之一^[26-30]。有些国家甚至还采用立法的形式来保证该项技术研究的开展^[31]。

早在1946年苏联学者 Gluzhge 就研究了将废混凝土制作骨料的可能性^[32]。德国是世界上最早推行环境标志制度的国家。德国的每个地区都有大型的建筑废物再加工综合厂,仅在柏林就有20多个,并研制出可使垃圾中各种再生材料干净地分离出来的工艺。目前再生混凝土主要用于公路路面。德国钢筋委员会1998年8月提出了“在混凝土中采用再生骨料的应用指南”,要求采用再生骨料配制的混凝土必须完全符合普通混凝土的国家标准。为了鼓励私人投资垃圾回收利用行业,德国采取了一些政策性资助,例如,对居民每年征收80欧元的垃圾处理费,其中60%用于扶持垃圾处理企业;德国政府垃圾法增补草案中,将各种建筑垃圾组

分的利用率比例作了规定,即废砖瓦为 60%、道路开掘废料为 90%,并对未处理利用的建筑垃圾征收每吨 500 欧元的处理费用^[14]。

日本由于国土面积小,资源相对匮乏,因而将建筑废物视为“建筑副产品”,十分重视废混凝土的再生资源化与重新开发利用。早在 1977 年,日本政府就制定了《再生骨料和再生混凝土使用规范》,并相继在各地建立了以处理废混凝土为主的再生加工厂,生产再生水泥和再生骨料,生产规模最大的再生加工厂每小时可加工生产 100t 再生材料。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、金属等建筑废物,必须通过“再资源化设施”进行处理。日本建设省在 1992 年提出了“控制建筑副产品排放和再利用技术开发”的五年规划,并于 1996 年 10 月制定了旨在推动建筑副产品再利用的《再生资源法》,为废旧混凝土等建筑副产品的再生利用提供法律和制度保障。在东京、千叶、名古屋、大阪、京都等地均有再生骨料厂。据报道,东京在 1988 年建筑废物的重新利用率已达到 56%。1995 年,日本全国建筑废物资源利用率达到 58%,其中,废混凝土的利用率为 65%,污泥的利用率为 14%。目前很多地区建筑废物利用率已达 100%,而且实现了永久循环、优先使用的目标。日本科学家已发明了一种将破碎机和搅拌机连为一体的装置,能够把拆除建筑物所产生的废混凝土当场回收利用并生产出再生混凝土。

美国是较早提出环境标志的国家,美国建筑废物综合利用可分为三个级别:一是低端利用,如现场分拣利用、一般回填等;二是中级利用,如用作建筑物或道路的基础材料,经处理厂加工成骨料,再制成混凝土、建筑用砖、砌块等;三是高级利用,如将建筑废物还原成水泥、沥青等再利用。据美国联邦公路局统计,美国现在已有超过 20 个州在公路建设中采用再生骨料,26 个州允许将再生骨料作为基层材料,4 个州允许将再生骨料作为底基层材料,将再生骨料应用于基层和底基层的 28 个州级机构中,有 15 个州制定了关于再生骨料的规程。美国政府制定的《超级基金法》给再生混凝土的发展提供了法律保障。其中规定:“任何生产有工业废物的企业,必须自行处理,不得擅自倾卸”。20 世纪 80 年代中期,堪萨斯州交通厅把回收的旧混凝土作为骨料用于新建水泥路面,通过多年观察表明,废混凝土用于路面面层在技术上是可行的。

新加坡 1996~1998 年统计资料显示,每年排放约 33 万 t 建筑废料,其中约 63%回收利用,其余 37%则填埋掉。此外,拆除建筑物中,数量最大的为废混凝土块和砖等坚硬块体,此类废物的处理方式无偿或低价处理给建筑承包商,用于施工建筑临时道路、施工便道或基坑回填等^[6]。其余付费委托给建筑废物处理公司对建筑废物实行二次分类再生利用。新加坡 2006 年建筑废物总量约 60 万 t,98%得到了处理,50%~60%实现了循环利用^[33]。

韩国 2003 年 12 月颁布了《建设废弃物再生促进法》,2005 年、2006 年经历了

两次修订,2007年开始每五年建立再生计划,确定了提高再生骨料建设现场实际利用率、建设废物产生减量化、建设废物妥善处理三大推进政策。当年建筑废物再生率达90.7%^[14]。

荷兰于1997年4月颁布了“禁止倾倒是可回收再利用的废弃物”的规定,使得超过90%的废混凝土块被回收利用。荷兰2010年建筑废物的排放数量约为2380万t,其中94%被回收利用。废混凝土占建筑废物总排放量的40%,几乎100%回收利用。

总的来说,从20世纪70年代末开始,德国、日本、韩国、荷兰和美国等发达国家在再生混凝土开发应用方面的发展速度很快,取得了一系列的成果,并积极将其推广应用于实际工程中。综合起来,国外的研究主要集中在废混凝土作为再生骨料的技术,解决循环利用的技术难题,努力扩大再生骨料的应用范围;再生骨料和再生混凝土的分类和基本性能研究、原始混凝土对再生混凝土性能的影响、制定再生骨料和再生混凝土的技术规范,为其应用提供技术依据;研究制定相配套的法律法规,鼓励再生骨料和再生混凝土的应用。

1.3 国内再生混凝土技术发展现状

我国国土面积大,资源丰富,在一定时期内混凝土的原材料危机还不会十分突出,因而对再生混凝土的开发研究要晚于工业发达国家。然而随着人们环保意识的增强,建筑废物引起的生态环境问题日益受到人们的重视。

我国政府制定的中长期科教兴国和社会可持续发展战略,鼓励开展废物再利用的研究和应用,并将资源与环境问题提到了一定的高度,把如何实现建筑废物资源化这个综合性问题作为一个重点议题。在建筑废物资源化相关政策法规方面,我国已经颁发了相关的政策法规:1992年颁布了《城市市容和环境卫生管理条例》;1995年10月30日通过了《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》^[34];1995年11月通过了《城市固体垃圾处理法》,要求产生垃圾的部门必须缴纳垃圾处理费^[13];2005年颁布了《城市建筑垃圾管理规定》;2006年颁布了《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》。除此之外,国内各主要城市,如北京、上海、广州、西安等也针对建筑废物处理处置的相关环节制定了相应的地方性政策法规^[18]。

近年来,我国在建筑废物综合利用方面也积极开展研究。1997年,建设部将“建筑废渣综合利用”列入了科技成果重点推广项目;2002年,上海市科委设立重点项目,对废混凝土的再生与高效利用关键技术展开了较为系统的研究;2002年,科技部将“固体废弃物在水泥混凝土工业的资源化利用研究”列入社会公益基金项目;2004年,交通部启动了“水泥混凝土路面再生利用关键技术研究”;2007