



Recycled
Concrete

再生混凝土

肖建庄 著

中国建筑工业出版社

TU528.59/2

2008

再生混凝土

肖建庄 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

再生混凝土/肖建庄著. —北京:中国建筑工业出版社,
2008

ISBN 978-7-112-09898-9

I. 再… II. 肖… III. 再生混凝土 IV. TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 017770 号

责任编辑:邓 卫

责任设计:崔兰萍

责任校对:安 东 王金珠

再生混凝土

肖建庄 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京千辰公司制版

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:12 $\frac{3}{4}$ 字数:310 千字

2008 年 6 月第一版 2008 年 6 月第一次印刷

印数:1—3000 册 定价:32.00 元

ISBN 978-7-112-09898-9

(16706)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

建筑废物的再生资源化利用是使建筑业实现可持续发展、建设循环经济和构建节约型社会的一个重要方面。近年来我国建筑业的快速发展和降耗减排的科学要求,使得在土木工程领域开展废混凝土的循环再生和高效利用有了可能和勃勃生机。

在过去的五年期间,作者有幸先后获得了上海市科学技术委员会重点科研项目“废弃混凝土再生及高效利用关键技术研究”(编号:02DZ12104)、上海市科学技术委员会标准专项“废弃混凝土回收与再生混凝土应用技术标准研究”(编号:04DZ05044)、上海市建设与交通委员会上海市地方标准《再生混凝土应用技术规程》(DG/T J08-2018—2007)以及教育部新世纪优秀人才支持计划“高性能再生混凝土材料与结构”(编号:NCET-06-0383)等的资助,使得作者能够在再生混凝土材料、结构和应用等方面,较系统地开展并完成了一些初步工作,本书即是这些工作的一个阶段性总结。

本书分为11章,分别是绪论、废混凝土与再生集料、再生混凝土配合比设计、再生混凝土微观结构与破坏特征、再生混凝土基本力学性能、再生混凝土耐久性能、再生混凝土构件基本性能、再生混凝土结构性能、再生混凝土应用与示范、再生混凝土效益分析与政策以及再生混凝土应用技术指南。这些内容,是在认真学习国内外专家、学者和工程技术人员研究成果和实践经验的基础上,由我和我的学生们完成的,其中凝聚着学生们的智慧和辛劳,按照参与课题研究时间的先后顺序,他们分别是:李佳彬、兰阳、朱晓晖、王军龙、孙跃东、李丕胜、王幸、陈云钢、王智威、黄运标、黄健、张宏达、袁飏、雷斌、朱剑锋、沈宏波、杜江涛、刘琼、杨洁等。在成稿过程中,雷斌做了大量卓有成效的工作。

在研究过程中,也遇到过诸多不顺和波折,感谢孙振平博士、陈海燕高工和张盛东博士的帮助,特别感谢教育部“长江学者奖励计划”首批特聘教授李杰教授的不断鼓励和鞭策。

感谢同济大学研究生教材出版基金和同济大学建筑工程系文远科技专著教材出版基金的资助。感谢中国建筑工业出版社向作者约稿,作者谨向其在编辑出版过程中付出的劳动和作出的贡献表示感谢。

由于作者水平有限,书中可能有许多不足甚至错误之处,恳请专家和读者批评指正,作者先致诚挚谢意。

肖建庄

2007年12月于同济园

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 建筑业的可持续发展	1
1.1.1 建筑业的能源和资源消耗	1
1.1.2 建筑业可持续发展新模式	1
1.1.3 实施“可持续发展”战略,混凝土工业大有可为	2
1.2 混凝土的循环利用与再生	3
1.2.1 混凝土结构的生命周期与延续	3
1.2.2 废混凝土	3
1.2.3 再生混凝土	4
1.3 国内外再生混凝土技术发展概述	5
1.3.1 国外再生混凝土技术发展概述	5
1.3.2 国内再生混凝土技术发展概述	6
1.4 再生混凝土研究中存在的主要问题与今后发展趋势预测	7
1.4.1 存在的主要问题	7
1.4.2 发展趋势预测	7
1.5 本书的主要内容	8
参考文献	8
第2章 废混凝土与再生集料	10
2.1 废混凝土的来源与分类	10
2.1.1 废混凝土的来源	10
2.1.2 废混凝土的分类与回收标准	11
2.1.3 废混凝土的再生模式	12
2.2 废混凝土破碎与再生集料加工工艺	12
2.2.1 国外破碎工艺	12
2.2.2 国内破碎工艺	15
2.2.3 破碎设备	17
2.3 再生粗集料的基本性能	19
2.3.1 单一来源再生粗集料	19
2.3.2 不同来源再生粗集料	23
2.4 再生粗集料的分级与检验	24
2.4.1 再生粗集料的分级研究	24
2.4.2 再生粗集料的检验方法	26

2.5	再生粗集料的强化与预处理	27
2.6	再生细集料的基本性能、分级与检验	28
2.6.1	再生细集料的基本性能	28
2.6.2	再生细集料的分级与检验	29
2.7	小 结	30
	参考文献	30
第3章	再生混凝土配合比设计	32
3.1	原材料	32
3.1.1	胶凝材料	32
3.1.2	再生集料	33
3.1.3	掺合料	33
3.1.4	化学外加剂	33
3.2	基于性能的配合比设计方法	34
3.2.1	基于抗压强度的配合比设计方法	34
3.2.2	基于耐久性能的配合比设计方法	38
3.2.3	基于其他性能的配合比设计方法	39
3.3	计算机在配合比设计中的应用	40
3.3.1	专家系统的应用	40
3.3.2	神经网络的应用	40
3.3.3	神经网络专家系统的应用	40
3.4	小 结	41
	参考文献	41
第4章	再生混凝土的微观结构与破坏特征	43
4.1	再生混凝土的微观结构	43
4.1.1	再生混凝土的微观组成	43
4.1.2	再生混凝土的界面特点	44
4.1.3	再生混凝土的界面强化	45
4.2	再生混凝土的破坏特征	46
4.2.1	再生混凝土的受压破坏过程与特征	46
4.2.2	再生混凝土的受拉破坏过程与特征	47
4.3	再生混凝土的损伤	49
4.3.1	再生混凝土的初始损伤	49
4.3.2	再生混凝土的损伤演化	50
4.4	小 结	50
	参考文献	51
第5章	再生混凝土的基本力学性能	52
5.1	抗压性能	52

5.1.1 立方体抗压强度	52
5.1.2 单轴受压应力-应变关系	57
5.2 抗拉性能	60
5.2.1 抗拉强度	60
5.2.2 单轴受拉应力-应变关系	61
5.3 抗折性能	62
5.3.1 抗折强度	62
5.3.2 再生混凝土断裂力学参数	63
5.4 不同来源再生粗集料对再生混凝土力学性能的影响	64
5.4.1 不同来源再生粗集料对再生混凝土抗压性能的影响	64
5.4.2 不同来源再生粗集料对再生混凝土劈裂抗拉强度的影响	71
5.4.3 不同来源再生粗集料对再生混凝土应力-应变关系的影响	72
5.5 力学指标之间的换算关系	73
5.5.1 立方体抗压强度与棱柱体抗压强度	74
5.5.2 立方体抗压强度与抗拉强度	74
5.5.3 立方体抗压强度与抗折强度	75
5.5.4 立方体抗压强度与弹性模量	75
5.6 回弹法检测再生混凝土抗压强度	76
5.6.1 再生混凝土的无损检测	76
5.6.2 再生混凝土专用回弹曲线	78
5.7 小 结	78
参考文献	79
第6章 再生混凝土耐久性能	82
6.1 再生混凝土的抗冻性能	82
6.2 再生混凝土的干燥收缩	83
6.3 再生混凝土的徐变	84
6.4 再生混凝土的抗渗性能	85
6.4.1 再生混凝土的抗水、气渗透性能	85
6.4.2 再生混凝土的抗氯离子渗透性能	85
6.5 再生混凝土的耐磨性能	86
6.6 再生混凝土中的碱集料反应	86
6.7 再生混凝土的抗硫酸盐腐蚀	87
6.8 再生混凝土的抗碳化性能	87
6.8.1 试验研究	88
6.8.2 碳化模型	94
6.9 再生混凝土的高温性能	95
6.9.1 高温试验现象	95
6.9.2 高温后抗压强度试验结果与分析	95

6.9.3 高温后抗折强度试验结果与分析	97
6.10 小 结	99
6.10.1 耐久性机理	99
6.10.2 模型建立	99
6.10.3 改善措施	100
6.10.4 试验方法	100
6.10.5 试验设计	100
参考文献	100
第7章 再生混凝土构件的基本性能	106
7.1 再生混凝土与钢筋之间的共同工作	106
7.1.1 再生混凝土与钢筋之间的粘结性能	106
7.1.2 再生混凝土与钢筋之间共同工作的基础	109
7.2 再生混凝土梁	109
7.2.1 再生混凝土梁的受弯性能	109
7.2.2 再生混凝土梁的受剪性能	115
7.2.3 再生混凝土梁的可靠度分析	121
7.3 再生混凝土柱	127
7.3.1 试验概况	127
7.3.2 试验结果与分析	127
7.3.3 再生混凝土柱的可靠度分析	131
7.4 小 结	139
参考文献	139
第8章 再生混凝土结构的力学性能	142
8.1 再生混凝土梁柱节点	142
8.1.1 再生混凝土梁柱节点的抗震性能	142
8.1.2 再生混凝土梁柱节点的抗剪分析	146
8.1.3 再生混凝土梁柱节点的研究小结	147
8.2 再生混凝土框架结构	147
8.2.1 再生混凝土框架结构的抗震性能	148
8.2.2 再生混凝土框架结构的可靠度分析	151
8.2.3 再生混凝土框架结构的抗震构造要求	152
8.3 再生混凝土组合结构的应用展望	152
8.3.1 组合结构概述	152
8.3.2 再生混凝土组合楼板	153
8.3.3 型钢-混凝土组合梁	153
8.3.4 约束再生混凝土柱	153
8.4 小 结	154

参考文献	155
第9章 再生混凝土的应用与示范	156
9.1 再生混凝土墙体	156
9.1.1 再生混凝土空心砌块	156
9.1.2 再生混凝土空心砌块砌体	159
9.1.3 再生混凝土条板	161
9.2 再生混凝土道路	162
9.2.1 再生混凝土道路基层	162
9.2.2 再生混凝土道路面层	164
9.3 再生混凝土基础	166
9.3.1 一般基础	166
9.3.2 再生混凝土桩	166
9.3.3 再生混凝土基础的环境分析	167
9.4 再生混凝土的预拌和预制	168
9.4.1 再生混凝土的预拌	168
9.4.2 再生混凝土的预制	168
9.5 小 结	168
参考文献	169
第10章 再生混凝土的效益分析与管理政策	170
10.1 效益分析	170
10.1.1 经济效益分析	170
10.1.2 环境综合效益	171
10.2 管理政策	173
10.2.1 再生混凝土产业链	174
10.2.2 再生混凝土的政策管理	177
10.3 计算机技术在再生混凝土生产过程管理中的应用	178
10.4 小 结	180
参考文献	180
第11章 再生混凝土应用技术指南	181
11.1 废混凝土的回收	181
11.2 再生集料的加工生产	181
11.2.1 再生集料的加工与分类	181
11.2.2 再生粗集料的质量指标	182
11.2.3 再生粗集料的试验方法	182
11.2.4 再生粗集料的检验规则	183
11.2.5 再生粗集料的生产与管理	183

11.2.6 再生细集料的应用	184
11.3 再生混凝土的基本性能	184
11.3.1 一般规定	184
11.3.2 性能指标	185
11.4 再生混凝土的制备及质量检验	187
11.4.1 配合比设计方法	187
11.4.2 制备和运输	187
11.4.3 浇筑和成型	188
11.4.4 养 护	189
11.4.5 质量检验	189
11.5 再生混凝土空心砌块设计建议	189
11.5.1 空心砌块的基本要求	189
11.5.2 砌块砌体设计的基本规定	191
11.6 再生混凝土道路设计建议	191
11.6.1 路面设计的基本规定	191
11.6.2 路面的基本构造要求	192
11.6.3 路面施工与质量检验	192
11.6.4 垫层与基层	192
11.7 再生混凝土构件设计建议	192
11.7.1 构件的一般规定	192
11.7.2 承载力极限状态	193
11.7.3 正常使用极限状态	194
11.8 小 结	194
参考文献	194

第1章 绪 论

1.1 建筑业的可持续发展

1.1.1 建筑业的能源和资源消耗

纵观人类的发展史,迄今为止最活跃的是20世纪。人类80%的科学技术成就都是在这100年内完成的。而在这一时期,人口的增长速度也是前所未有的。世界人口在20世纪初为15亿,到2000年达到了60亿。随着人口的急剧增长、城市化进程的加快,建筑业蓬勃发展。

然而,长期以来传统建筑业的发展,很大程度上是以能源、资源的过度消耗和环境污染为代价实现的。以混凝土工业为例,水泥产量从1900年的0.1亿t^[1-1]发展到2000年的16.6亿t。若以混凝土的质量配比计,水泥为12%,水为8%,集料为80%,则每年需砂石110.7亿t,水11.1亿t,总和为138.3亿t,每年用于生产16.6亿t水泥的原材料需要31.8亿t,由此可见,混凝土行业中每年固、液体物料处理总量达到170亿t。开采、破碎、运输集料以及生产、加工、运输混凝土等过程都要耗能。根据文献[1-2],在这些过程中,138.3亿t混凝土共消耗电力约 $1.9 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$,而生产16.6亿t水泥又产生大约14.3亿tCO₂,7.2亿t粉煤灰,498万tSO₂,332万tNO_x。此外,混凝土工程还会产生大量的建筑废物。从以下数据资料可以清楚地看到建筑业对自然环境和生态平衡的巨大影响^[1-2]:

建筑业能耗为世界总能耗的25%~40%;

建筑废物占城市垃圾的30%~40%;

建筑工地噪声约占城市噪声1/3;

水泥工业CO₂排放量约占地球总排放量7%。

1.1.2 建筑业可持续发展新模式

长期以来传统建筑工业的生产方式基本上可以概括为一种高投入、高污染、低效益的粗放型生产方式,其发展的基本模式可用图1-1来描述。从资源的开采、原材料的加工、建筑物的施工,到建筑物的使用和维护,再到建筑物的拆除,最后除很少部分建筑废物回收利用外,其余绝大部分建筑废物均直接排向自然界,整个过程中很少考虑对资源和环境产生的不利影响。

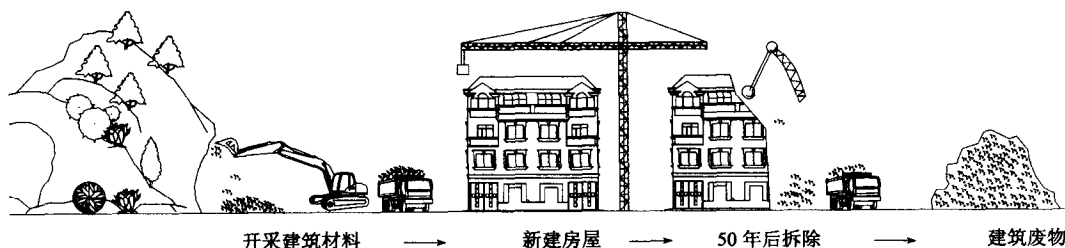


图 1-1 传统建筑业发展的基本模式

随着社会经济的发展以及人们环保意识的增强,资源和环境越来越受到重视。进入20世纪80年代后期以来,保护地球环境,寻求与自然的和谐,走可持续发展道路成为全世界共同关心的重大课题。我国也专门制定了《中华人民共和国节约能源法》。建筑业今后的发展方向必然是既要满足人们的需要,又要考虑环境的因素,减轻对地球环境的负荷,有利于资源、能源节约和生态平衡。

有关环境可持续发展的概念是在20世纪80年代提出的,它的含义简单地说就是要给人类后代留下充足的资源以满足他们的需要。1994年11月第一届世界可持续发展会议在美国佛罗里达召开,着重讨论了建筑业的可持续发展问题。对建筑业来说,必须承担起其在人类可持续发展中所负有的重要责任,也唯有这样,建筑业才能在21世纪持续发展与繁荣。

佛罗里达大学查理斯·吉伯特教授提出了可持续发展的六大原则:最小的资源消耗,最大的资源重复利用,使用再生资源,保护自然环境,创造健康、无毒的环境,追求建筑环境的质量。这六条原则很好地体现了建筑业与环境之间的关系。

研究和开发能最有效和最少地消耗资源并能与生态环境相协调的技术(例如提高建筑的能源利用率,发展生态建材,寻求废弃物再生利用的途径等),选择资源节约型、污染最低型、质量效益型、科技先导型的发展方式,走可持续发展的路线,是历史发展的必然。奥地利、比利时、巴西、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、冰岛、意大利、日本、荷兰、挪威、西班牙、瑞典和英国^[1-3]的实践已经证明了这一点。

图1-2给出了建筑业可持续发展的基本模式。将新建建筑物施工过程中和旧建筑物拆除过程中产生的建筑废物,直接回收利用于新建建筑物中。从而使得资源投入、产品生产、产品消费及废弃的全过程遵循“资源—产图1-2 建筑业可持续发展的基本模式品—再生资源”的物质闭环流动型发展模式,满足循环经济的要求,实现可持续发展所要求的环境与经济双赢。

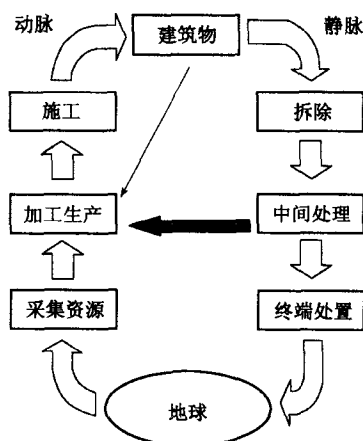


图1-2 建筑业可持续发展的基本模式

1.1.3 实施“可持续发展”战略,混凝土工业大有可为

混凝土作为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高的重视。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。

提高工程的寿命是节约资源、能源和保护环境的关键措施^[1-4]。混凝土工程因耐久性不足而提前破坏将造成社会经济的巨大损失,使人们认识到,未来的混凝土必须是高耐久的。利用工业废渣加工成的矿物掺合料部分取代水泥用于生产混凝土,可以减轻工业废渣如粉煤灰、矿渣和钢渣等占用土地及环境污染的问题,减少水泥用量及水泥生产过程中的能源、资源消耗和污染气体排放量,还可以提高水泥混凝土的耐久性能。因而,充分利用工业废渣生产绿色混凝土,是混凝土行业可持续发展的重要方向。

随着中国建筑业快速发展,砂石的需求量也越来越大,需大量开山采石和掘地淘沙,严重破坏了生态环境。近年来我国有些地区的优质天然集料已趋枯竭,须从外地长途运输,增加了建筑产品的成本。与此同时,建筑废物的排放量日益增加,废混凝土约占

30% ~ 50%。2005 年我国废混凝土排放总量达 1 亿 t。如此大量的废混凝土不仅占用宝贵的土地，而且已经引起环境和社会问题，特别是在土地和空间日趋紧张的大城市更是如此。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集料替代天然集料，可以减少建筑业对天然集料的消耗，从而减少对天然砂石的开采，缓解天然集料日趋匮乏的压力并降低大量开采砂石对生态环境的破坏，保护人类赖以生存的环境，符合人类社会的可持续发展的要求。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 混凝土的循环利用与再生

1.2.1 混凝土结构的生命周期与延续

混凝土结构生命周期包括混凝土原材料的获取、混凝土拌合物制备、混凝土构件的生产、混凝土结构的施工、使用及拆除处理的整个过程，如图 1-3 所示。

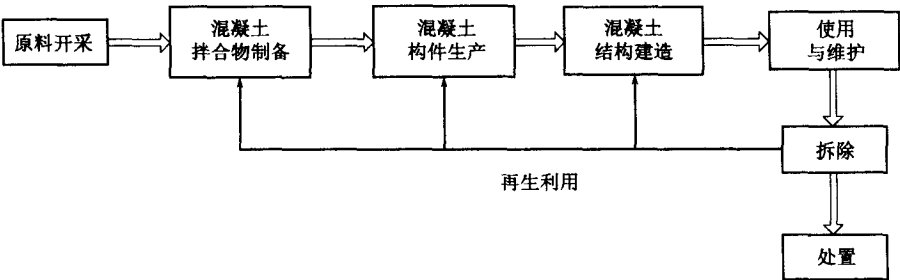


图 1-3 混凝土结构生命周期的一般模式

从混凝土结构的整个生命周期来看，其中每个阶段都涉及能源消耗、废气、废水和固体废弃物的排放。混凝土结构的生命周期评价（Life-cycle Assessment, LCA）可以对整个过程各个环节的环境影响进行定量分析，最终给出环境影响评价的结论及减少环境影响的建议。

将拆除的废混凝土经过破碎加工后，重新用于混凝土材料（即再生混凝土）的生产，降低废混凝土量以减轻对环境产生的不利影响，实现混凝土材料的循环和高效利用，即混凝土结构的生命延续，将是未来混凝土研究的方向之一。

1.2.2 废混凝土

废混凝土（Waste Concrete, WC）是指由建（构）筑物拆除、路面返修、混凝土生产、工程施工或其他状况下产生的废混凝土块。

建筑业作为国民经济的支柱产业之一，近年来得到了突飞猛进的发展，但是随之产生的

建筑废物也越来越多。据统计^[1-5], 2003 年全国建筑企业房屋建筑竣工面积 118300 万 m², 比上年增长 7.4%。若以 2003 年的增长速度计算, 2005 年全国房屋建筑竣工面积则可达 136400 万 m²。而另据有关资料介绍, 在 10000m² 建筑的施工过程中, 约产生建筑废物 500 ~ 600t, 则 2005 年我国建筑施工废物的量至少达 7000 万 t。同时据统计, 在世界多数国家, 建筑施工废物的量不及旧建筑拆除废物的一半, 若按此计算, 2005 年全国旧建筑拆除废物的量至少达 14000 万 t。因而 2005 年我国总的建筑废物的量 (建筑施工废物和旧建筑拆除废物之和) 至少达 21000 万 t。

据综合统计^[1-5], 2003 年全国共生产混凝土及其制品 150000 万 m³, 比上年增长 15.4%。若按此增长率计算, 2005 年全国共生产混凝土及其制品将达 200000 万 m³。而经测算, 每生产 100m³ 的混凝土, 将产生 1 ~ 1.5m³ 的废混凝土, 则 2005 年全国混凝土生产过程中的废混凝土的量至少达 2000 万 m³, 约 5000 万 t。而由上述可知, 2005 年全国旧建筑拆除废物的量至少达 14000 万 t, 其中废混凝土的含量按 34% 计, 则由此产生的废混凝土至少达 4700 万 t。因此, 总的废混凝土的量 (混凝土生产过程中的废混凝土和建筑拆除废物中的废混凝土之和) 至少达 10000 万 t。随着我国经济建设步伐的进一步加快, 废混凝土的数量还将逐年增多。

目前, 这些废混凝土除一小部分用作道路和建筑物的基础垫层外, 大部分未经处理, 直接运往郊外或乡村, 采用堆放或填埋的方式进行处理, 耗用大量的征用土地费、垃圾清运费、处理费等建设费用; 同时, 清运和堆放过程中的遗散和粉尘、灰砂飞扬等严重污染环境、影响市容。另外, 混凝土作为当今世界用量最大的人造建筑材料, 消耗着人类大量的资源。据统计, 我国每年要开采 50 亿 t 以上的黏土、石灰石和砂子等矿物质用于生产水泥和混凝土^[1-6]。如此巨大的砂石集料需求必然导致大量的开山采石, 最终结果必将导致生态环境的恶化。而同时由于混凝土用量的增加, 在许多国家和地区, 混凝土的原材料资源已出现了严重的危机, 须从外地远距离运送。如俄罗斯的不少地区, 砂石运费为集料成本价格的 1.5 倍。

综上所述, 人类必须开发资源节约型的混凝土材料, 并且实现资源的可循环利用。对废混凝土进行有效、合理的利用是环境保护与可持续发展战略的迫切需要。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, 混凝土的再生利用更具有极其重要的现实意义。

1.2.3 再生混凝土

再生集料混凝土 (Recycled Aggregate Concrete, RAC) 是指利用废混凝土破碎加工而成的再生集料, 部分或全部代替天然集料配制而成的新混凝土, 简称再生混凝土 (Recycled Concrete, RC)。再生集料 (Recycled Aggregate, RA) 是指废混凝土经破碎加工后所得粒径在 40mm 以下的集料。其中, 粒径在 0.5 ~ 5mm 的集料为再生细集料 (Recycled Fine Aggregate, RFA), 粒径在 5 ~ 40mm 的集料为再生粗集料 (Recycled Coarse Aggregate, RCA)。再生粗集料取代率 (Replacement of Recycled Coarse Aggregate by Mass) 是指再生粗集料质量占粗集料总质量 (再生粗集料和天然粗集料质量之和) 的百分率。再生细集料取代率 (Replacement of Recycled Fine Aggregate by Mass) 是指再生细集料质量占细集料总质量 (再生细集料和天然细集料质量之和) 的百分率。

1.3 国内外再生混凝土技术发展概述

1.3.1 国外再生混凝土技术发展概述

第二次世界大战之后,前苏联、德国、日本等国就开始对废混凝土进行了处理和再生利用的研究^[1-7,1-8]。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,RILEM设立了“混凝土的拆除与再利用技术委员会”(37-DRC)^[1-9],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2届RILEM国际会议”,会上发表了混凝土再生利用的论文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集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—再生混凝土集料的应用”会议。2004年,RILEM又在西班牙召开了“再生集料在建筑和结构中的应用会议”。联合国对此问题也相当重视。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^[1-10~1-14]。有些国家甚至还采用立法的形式来保证此项研究和应用的开展^[1-15]。

前苏联学者 Gluzhge 早在 1946 年就研究了将废混凝土制作集料的可能性^[1-16]。在 20 世纪 70 年代末已经利用废混凝土约 4000 万 t。

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《再生集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集料,其生产规模最大的每小时可加工生产 100t。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,必须运往“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 5 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、京都等地均建有再生集料厂。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%。而据最近报道,日本科学家已发明一种将粉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。

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。目前再生混凝土主要用于公路路面。德国钢筋混凝土委员会 1998 年 8 月提出了“在混凝土中采用再生集料的应用指南”,要求采用再生集料配制的混凝土必须完全符合普通混凝土的国家标准。

美国是较早提出环境标志的国家,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集料, 26 个州允许将再生集料作为基层材料, 4 个州允许将再生集料作为底基层材料, 将再生集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集料的规程。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集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^[1-17]。近年来, 美国的公司还研究出一种微波技术, 可以 100% 回收利用旧沥青混凝土路面料, 其质量与新拌沥青混凝土路面料相同, 但成本可以降低 1/3, 同时节约了垃圾清运和处理等费用, 还减轻了对城市环境的污染。

总的来说, 从 20 世纪 70 年代末开始, 德国、日本、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。综合起来看, 国外的研究主要集中在研究废混凝土作为再生集料的技术, 解决循环利用的技术难题, 努力扩大再生集料的应用范围; 再生集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、制定再生集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, 鼓励再生集料和再生混凝土的应用。

1.3.2 国内再生混凝土技术发展概述

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, 鼓励开展废弃物再利用的研究和应用, 并已对再生混凝土的开发利用进行立项研究。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。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 年科技部将“建筑垃圾再生产品的研究开发”列入国家科技支撑计划。

目前国内再生集料的应用还处于试验、谨慎使用的初步阶段, 缺乏较系统的应用基础研究, 技术上也缺少较完善的再生集料和再生混凝土技术规程、技术标准。同时国内的研究成果表明, 再生混凝土同普通混凝土在原材料、配合比以及施工工艺等方面存在很大的差别, 现行普通混凝土的标准、规范等不适合再生混凝土。虽然国外对再生集料和再生混凝土的研究已经比较深入并且取得了丰硕的成果, 但必须指出的是, 由于混凝土的地域性特点, 国外的再生集料、水泥、天然集料与我国的再生集料、水泥、天然集料在组成和性能上差别较大, 因而其研究成果只具有一定的参考价值, 不能直接用来指导我国再生混凝土在工程中的实际应用。而且由于再生集料自身的复杂性、差异大等特点, 即使是在我国国内, 各个地区的再生集料也可能各具特点。所以, 在我国开展再生集料和再生混凝土的系统研究具有重要的实际意义。

近年来, 国内一些专家学者在废混凝土利用方面进行了一些基础性的研究, 并取得了一定的研究成果。上海、北京等地区的一些建筑公司对建筑废物的回收利用也作了一些有益的尝试^[1-18]。一些高校、科研院所的研究工作得到了相关部门的资助, 我国对

再生混凝土的研究正在蓬勃兴起,已成为混凝土学术界和工程界关注的热点和前沿问题之一^[1-19,1-20]。

1.4 再生混凝土研究中存在的主要问题与今后发展趋势预测

1.4.1 存在的主要问题

近年来,国内外再生混凝土技术的研究与开发得到很大的发展。然而,目前再生混凝土的研究还主要停留在材料性能上,有关其结构性能的研究比较少。再生混凝土的研究还存在许多不足之处,需进一步加强。

(1) 再生混凝土的配合比设计方法还须进一步的研究。借鉴轻集料混凝土的配合比设计方法,需制作每 1m^3 再生混凝土的用水量 and 水泥用量的表格。这是一项大工程,因为这需要大量配合比的试验数据才能完成。

(2) 关于再生混凝土的耐久性能、抗火性能等的研究至今仍较为薄弱,这些方面的研究有待进一步展开。

(3) 关于再生混凝土结构构件的承载能力(抗弯、抗剪、抗冲切及抗震等)及变形性能(挠度及开裂等)的研究和设计方法也有待于进一步研究。

(4) 再生混凝土结构耐久性设计有待进一步研究,这是再生混凝土运用于结构所必须解决的关键环节之一。

1.4.2 发展趋势预测

(1) 再生混凝土高性能化

美国、日本和欧洲等发达国家和地区对建筑废物尤其是废混凝土等的再生循环利用研究开展得较早,目前废混凝土的再生利用率均在90%以上。而我国目前建筑废物资源化再生循环利用步伐缓慢,综合高效利用率尚不足5%。为此,将再生混凝土粗集料应用于商品混凝土,开发商品再生混凝土,可极大地推广再生混凝土在工程中的应用,提高废混凝土作为一种资源循环再生利用的效率。

利用工业废渣加工成的矿物掺合料部分取代水泥用于生产再生混凝土,可以减轻工业废渣,如粉煤灰、矿渣和钢渣等的占用土地及环境污染问题,减少水泥用量及水泥生产过程中的能源、资源消耗和污染气体排放量,还可以提高再生混凝土的耐久性能。因而,充分利用工业废渣生产高性能再生混凝土,是混凝土行业可持续发展中的重要方向。

随着高性能再生混凝土技术的发展,再生混凝土的各项性能可得到大幅度改善,可研制C60以上的高性能再生混凝土^[1-21]。

(2) 再生混凝土组合结构

由于再生混凝土的力学性能、耐久性能、变形性能等性能低于普通混凝土,使得再生混凝土结构性能较普通混凝土结构有不同程度的降低,这成了再生混凝土在结构工程中应用的最大障碍。众所周知,组合结构能使钢材(或钢纤维等增强材料)和混凝土两种不同性质的材料扬长避短,各自发挥其特长,具有一系列的优点。如果将再生混凝土应用于组合结构中,既可以使结构具有组合结构的优点,弥补再生混凝土的不足,又具有重要的生态意义。因而,这将为再生混凝土应用于结构工程提供广阔的前景,实现对废混凝土的最有效的利用,但还有许多工作需要进一步展开。