

再生混凝土性能调控 与配合比设计

PROPERTY REGULATION AND MIX PROPORTION
DESIGN OF RECYCLED CONCRETE

李秋义 岳公冰 郭远新 著



中国建筑工业出版社

再生混凝土性能调控与配合比设计

李秋义 岳公冰 郭远新 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

再生混凝土性能调控与配合比设计 / 李秋义, 岳公冰, 郭远新著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-112-23479-0

I. ①再… II. ①李… ②岳… ③郭… III. ①再生混凝土-性能控制-研究②再生混凝土-配合比设计-研究
IV. ①TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 050078 号

责任编辑: 戚琳琳 段 宁 张伯熙

责任校对: 焦 乐 李美娜

再生混凝土性能调控与配合比设计

李秋义 岳公冰 郭远新 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13½ 字数: 332 千字

2019 年 3 月第一版 2019 年 3 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-23479-0

(33778)

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)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的背景及意义	1
1.2 国内外再生混凝土研究及技术发展现状	3
1.2.1 再生骨料品质控制技术	3
1.2.2 再生混凝土耐久性研究	4
1.2.3 再生混凝土配合比设计的复杂性	8
1.2.4 再生混凝土应用	10
1.3 本书的主要内容简介	12
参考文献	13
第 2 章 再生骨料品质控制技术	18
2.1 再生骨料品质划分	18
2.1.1 再生骨料特点	18
2.1.2 再生粗骨料标准简介	19
2.1.3 再生细骨料标准简介	20
2.2 再生粗骨料附着砂浆定量分析	21
2.2.1 试验用再生粗骨料基本性能	21
2.2.2 试验原理及流程	22
2.2.3 煅烧温度的确定	25
2.2.4 附着砂浆定量分析	27
2.3 再生粗骨料缺陷表征方法	28
2.3.1 再生粗骨料界面结构	28
2.3.2 附着砂浆含量与技术指标的相关性	29
2.4 再生骨料品质控制技术	30
2.4.1 再生骨料制备工艺简介	30
2.4.2 物理强化对再生骨料性能的影响	32
2.4.3 化学强化对再生骨料性能的影响	39
2.4.4 复合强化对再生骨料性能的影响	43
2.5 小结	48
参考文献	49
第 3 章 再生混凝土力学性能	51
3.1 再生粗骨料混凝土的力学性能	51

3.1.1	试验原材料	51
3.1.2	试验方案设计	52
3.1.3	再生粗骨料混凝土力学性能	53
3.2	再生细骨料混凝土的力学性能	56
3.2.1	试验原材料	57
3.2.2	试验方案设计	58
3.2.3	再生细骨料混凝土力学性能	59
3.3	再生混凝土多重界面结构模型建立及研究方法	61
3.3.1	再生混凝土微观结构研究进展	61
3.3.2	再生混凝土特点	63
3.3.3	多重界面结构重构模型的建立	63
3.3.4	模型试件制备方法	65
3.4	再生混凝土多重界面结构研究方法	66
3.4.1	显微硬度分析技术	66
3.4.2	试样制备	67
3.4.3	显微硬度点阵分布	68
3.4.4	显微硬度数据处理	70
3.4.5	微观结构特征测试方法	70
3.5	再生混凝土多重界面结构	71
3.5.1	研究方案	72
3.5.2	多重界面结构 ITZ 显微硬度分析	72
3.5.3	界面过渡区微观形貌	76
3.5.4	砂浆基体微观形貌	80
3.5.5	界面过渡区水化产物	80
3.6	小结	83
	参考文献	84
第 4 章	再生混凝土耐久性	86
4.1	再生粗骨料品质对再生混凝土耐久性能的影响	86
4.1.1	再生混凝土收缩性能	87
4.1.2	再生混凝土碳化性能	89
4.1.3	再生混凝土渗透性能	91
4.1.4	再生混凝土的抗冻性能	93
4.2	再生细骨料品质对再生混凝土耐久性能的影响	97
4.2.1	再生混凝土收缩性能	97
4.2.2	再生混凝土碳化性能	98
4.2.3	再生混凝土渗透性能	99
4.2.4	再生混凝土的抗冻性能	100
4.3	碳化环境对再生混凝土界面性能的影响	102

4.3.1	试验方法设计	102
4.3.2	碳化环境下再生混凝土界面力学性能	102
4.3.3	界面过渡区微观结构特征	105
4.4	氯盐侵蚀对再生混凝土界面性能的影响	108
4.4.1	试验设计方案	108
4.4.2	不同侵蚀龄期再生混凝土界面力学性能	108
4.4.3	界面过渡区微观结构特征	111
4.5	硫酸盐侵蚀对再生混凝土界面性能的影响	114
4.5.1	试验方法设计	114
4.5.2	不同侵蚀龄期 RCA 界面力学性能	114
4.5.3	界面过渡区微观结构特征	117
4.6	小结	121
	参考文献	122
第 5 章	再生粗骨料混凝土配合比设计方法	125
5.1	再生粗骨料混凝土配合比设计的复杂性和必要性	125
5.1.1	再生粗骨料混凝土配合比设计的复杂性	125
5.1.2	再生粗骨料混凝土配合比设计的必要性	125
5.2	配合比设计的基本原则与思路	126
5.2.1	基本原则	126
5.2.2	设计的思路	127
5.3	配合比设计的试验研究	127
5.3.1	试验原材料	127
5.3.2	试验方案设计	129
5.4	简易配合比设计方法	133
5.4.1	用水量原则的确定	133
5.4.2	胶水比原则的确定	135
5.4.3	简易配合比设计步骤	140
5.5	再生粗骨料混凝土配合比精确设计方法	142
5.5.1	设计原则(复合法则)	142
5.5.2	绝对用水量公式的建立	143
5.5.3	强度公式的建立	149
5.5.4	精确配合比设计步骤	153
5.6	小结	156
	参考文献	157
第 6 章	再生细骨料混凝土配合比设计方法	160
6.1	再生细骨料混凝土配合比设计的复杂性和必要性	160
6.1.1	再生细骨料混凝土配合比设计的复杂性	160

6.1.2 再生细骨料混凝土配合比设计的必要性	160
6.2 配合比设计的基本原则与思路	161
6.2.1 基本原则	161
6.2.2 设计的思路	162
6.3 配合比设计的试验研究	162
6.3.1 试验原材料	162
6.3.2 试验方案设计	164
6.4 再生细骨料混凝土简易配合比设计方法	167
6.4.1 用水量原则的确定	167
6.4.2 胶水比原则的确定	169
6.4.3 简易配合比设计步骤	173
6.5 再生细骨料混凝土配合比精确设计方法	174
6.5.1 设计原则(复合法则)	174
6.5.2 绝对用水量公式的建立	174
6.5.3 强度公式的建立	180
6.5.4 精确配合比设计步骤	186
6.6 小结	187
参考文献	188
第7章 双掺再生骨料混凝土配合比设计方法	191
7.1 双掺再生骨料混凝土配合比设计的复杂性	191
7.1.1 配合比设计的复杂性	191
7.1.2 配合比设计的基本原则与思路	191
7.2 双掺再生骨料混凝土的绝对用水量公式	192
7.2.1 公式的理论推导与预期形式	192
7.2.2 建立绝对用水量公式	193
7.3 双掺再生骨料混凝土的强度公式	194
7.3.1 公式的理论推导与预期形式	194
7.3.2 建立强度公式	195
7.4 双掺再生骨料混凝土公式的有效性验证	195
7.4.1 试验原材料及方案设计	195
7.4.2 工作性能及绝对用水量公式误差分析	199
7.4.3 力学性能及强度公式误差分析	201
7.5 双掺再生混凝土配合比设计步骤	204
7.6 小结	206
参考文献	206

第1章 绪论

1.1 研究的背景及意义

习近平总书记在十九大报告中明确提出了“绿水青山就是金山银山”的发展理念，要“推进资源全面节约和循环利用”和“加强固体废弃物和垃圾处置”等要求。^[1] 国家限制对天然骨料的开采，导致混凝土原材料价格飞涨，为了保持建筑业的可持续发展，减少建筑垃圾对环境的污染，缓解天然资源严重短缺，再生混凝土的应用正是解决这一系列问题的有效途径，同时，要加大对再生混凝土利用技术方面研究，实现建筑垃圾的资源化高效循环再利用。^[2]

随着我国工业化、城市化进程的加速，每年拆除的废旧混凝土数量巨大，相伴而生的建筑垃圾日益增多。^[3] 中国每年建筑垃圾产生量已超过 35 亿吨，其中仅拆除的建筑垃圾就有 18 亿吨，按照这样的趋势，到 2020 年将会达到一个峰值。^[4] 在建筑施工的过程当中或遇到重大的地质灾害时，都会产生大量的固体废弃物，例如在 2008 年汶川地震和 2010 年玉树地震后产生的建筑垃圾总量达到 9 亿吨，如果将这些建筑垃圾露天堆放会占用 8.5 万亩土地。^[5] 满堆的建筑垃圾倾倒场一旦发生滑坡等事故，将形成泥石流、塌陷、水土污染等地质危害，这会给周围的居民带来巨大的灾难。

由于建筑垃圾数量巨大、种类繁多且利用率低、污染环境等一系列问题的逐渐突显(如图 1-1)，粗放式堆放对环境的影响途径多、污染的形式也是复杂多样，会直接或者间接的污染大气环境、土壤环境等。^[6] 当环境遭受到严重污染后，如果再修复不仅需要大量的人力和物力，更需要提供复杂的技术支持，而且无法恢复至以前的环境状态。^[7] 相比天然骨料，由于建筑垃圾中的废弃混凝土、废砖、废砂浆等成分十分复杂，且使用环境差



图 1-1 建筑垃圾污染

异、结构部位及强度差异等因素波动性大，使得制备得来的再生粗骨料基本性能离散性较大。^[8]

利用简单生产工艺所制备的再生骨料存在着颗粒棱角多、表面粗糙、内部存在微细裂纹、吸水率高、表观密度小、压碎指标大等缺陷，无法保证再生骨料在工程应用时的质量稳定性，严重威胁再生混凝土结构工程的安全性，制约了建筑垃圾的有效资源化再利用。^[9] 其主要原因是：经机械破碎后的再生粗骨料表面上附着了大量的水泥砂浆，而这些废旧水泥砂浆由于受外界作用力影响，会在原天然骨料-废旧砂浆界面处及废砂浆基体内部产生较多微细裂缝，旧砂浆的强度远低于骨料强度，老界面结构疏松且存有微裂纹，因为这些微细裂缝等缺陷的存在，使得再生粗骨料的吸水率比普通骨料大，且表面粗糙^[10]，导致其基本性能与天然骨料相比存有很大差异，不能正常大量使用，只能应用于路基路面、非承重结构及低级制品中。

再生骨料的生产工艺及性能提升技术是实现再生混凝土及其他再生产品高附加值应用的首要前提。为此，作者所在的课题组经过长期研究，针对再生骨料的制备工艺（如图 1-2）和不同方式的强化技术进行深入系统的研究，在国内首次提出了再生骨料颗粒整形强化技术，制备不同品质的再生骨料（如图 1-3），有效地提升了再生骨料的品质及基本性能，为再生混凝土分级分类标准的制定提供了可靠的科学依据。

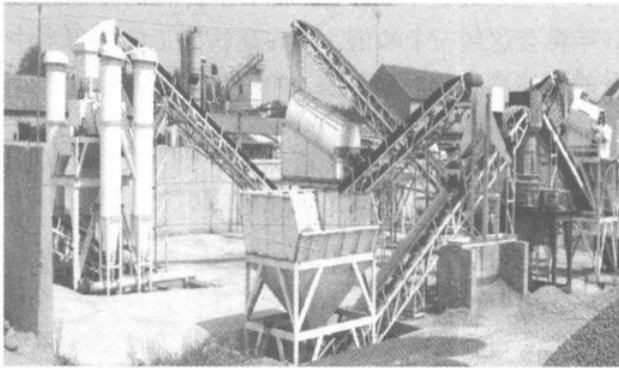


图 1-2 再生骨料生产线



图 1-3 再生粗骨料

若能实现建筑废弃物的再生循环利用，首先可以有效减少建筑废弃物对环境的污染，同时采用建筑废弃物制备再生建筑材料可以减少对天然砂石骨料的过度开采，有效缓解天然资源严重短缺的问题，提高建筑垃圾利用率，解决建筑垃圾随意堆放或填埋所导致的环境污染，而且符合推进建筑业资源全面节约和循环利用的可持续发展理念。^[11]

国内外学者通过大量研究发现再生混凝土的用水量大、力学性能降低及耐久性能较差，这主要是与再生混凝土复杂内部结构有关，由于再生骨料表面附着废旧砂浆量大，存在吸水率高、表观密度小、压碎指标高等缺陷，使得再生混凝土内部薄弱区域明显增多，在荷载作用下，再生混凝土的力学性能明显降低^[12-13]；同时，这些薄弱区域为侵蚀性介质侵入再生混凝土内部提供了便利通道，加速了再生混凝土性能的破坏。与天然骨料混凝土相比，吸水率高等性能较差，导致再生骨料混凝土与天然骨料混凝土存在明显差异。

大量研究已经得出再生骨料品质及取代率对再生混凝土性能的影响规律，但再生混凝

土性能劣化及内部损伤机理仍未得到完善；再生混凝土中存在的多重界面结构是再生混凝土中的薄弱区域，导致了再生混凝土力学性能及耐久性能的劣化。因此，本书尝试从微观角度研究再生混凝土多重界面结构性能，并找到科学有效的技术途径，探索再生混凝土的界面结构特征，并进行量化分析，提升再生骨料品质，解决再生混凝土利用难的问题，有利于再生混凝土的生产与应用，符合十九大关于环境保护及新旧动能转换的相关精神，对于人类、环境和社会的可持续发展具有重要意义。

1.2 国内外再生混凝土研究及技术发展现状

1.2.1 再生骨料品质控制技术

再生粗骨料 (Recycled Coarse Aggregate, 缩写为 RCA)，是指将建筑垃圾中的废弃混凝土在经过特定工艺分拣、破碎及筛分后制得粒径大于 4.75mm 的颗粒，由 RCA 部分或全部替代天然骨料所配制不同性能要求和使用范围的新混凝土，即为再生粗骨料混凝土 (Recycled Coarse Aggregate Concrete, 缩写为 RCAC)。

将再生骨料应用在混凝土中的相关研究最早始于第二次世界大战之后的欧洲，因战争而变成一片碎砖瓦砾的欧洲大陆，所面对的是巨量的建筑垃圾无处安放，随意堆置侵占了大量的土地资源，并且战后的资源严重匮乏，这些问题的存在逼迫他们开始考虑对建筑垃圾的循环再利用进行研究。但建筑垃圾资源化再利用^[14-16]的研究热潮发生在近二十年左右，随着全球经济的迅猛发展，环境破坏严重、矿产资源紧缺等问题的出现给人们敲响了警钟，世界各国也因此都加紧了对建筑垃圾再利用的应用技术研究。^[17-19]

虽然我国关于建筑垃圾资源化再利用的研究相对较晚，但在再生骨料的强化技术研究方面发展较快。如肖建庄等^[20]提出了一套废旧混凝土的破碎再生工艺流程；张学兵等^[21]利用 RPC (活性粉末混凝土) 浆液对再生粗骨料进行浸泡包裹处理；应敬伟等^[22]采用高浓度二氧化碳气体对再生粗骨料进行强化处理；朱亚光等^[23]利用 DSM8715 菌种对再生细骨料进行微生物矿化处理；Shi-Cong Kou^[24]、李文贵^[25]、王江浩^[26]、李滢^[27]分别使用了多种化学试剂或水泥浆对再生骨料进行改性处理等。在这些结论中可以发现，多数专家、学者都是在局部研究单一的再生粗/细骨料，虽然再生骨料的强化效果较为显著^[28-30]，但所使用的强化技术并不具备大量生产高品质再生骨料的能力，且生产成本也较高。因此，为了尽快解决这些现状所带来的困扰，有必要对再生骨料的强化技术进行进一步系统的探索。^[31-33]

杜婷等^[34]、朋改非等^[35]研究了将再生粗骨料在 620℃ 高温下处理，通过一系列方法去除再生粗骨料表面的附着砂浆后用其制备再生混凝土，测定再生混凝土的劈裂抗拉、抗压强度和断裂能，分析得出再生粗骨料表面的附着砂浆及外界作用力的机械损伤等内部缺陷是再生混凝土力学性能显著下降的主要原因，吸水率与断裂能可敏锐反映再生骨料的缺陷特征。

Hony^[36]等人将加工制得的再生粗骨料按照不同的取代率配制各种强度等级的再生混凝土，养护至相应龄期后测试其力学性能、弹性模量及干缩性能，研究发现若再生粗骨料的取代率超过 40%、水灰比 (W/C) 低于 0.45 时，再生粗骨料混凝土的抗压强度出现了

明显降低,但弹性模量的变化相对较小;100%再生粗骨料混凝土28d干缩比天然骨料高出44%。Etxeberria等人^[37]的研究表明当水泥用量相同时,利用再生粗骨料配制的混凝土强度比同龄期的天然骨料混凝土抗压强度值减小了23%,两种混凝土之间的标准差相差了近48%。

Kou等人^[38]研究表明,将部分粉煤灰掺入到再生混凝土中,会明显减小再生混凝土的劈裂抗拉强度,但是对于配制强度较高的再生混凝土而言,由于水泥用量多、W/C相对较小,胶凝材料中参加的粉煤灰对再生混凝土力学性能的影响减弱,劈裂抗拉强度降低幅度不明显。

李秋义^[39]在2005年首次提出了再生骨料的物理强化处理技术,其基本原理是通过再生骨料在高速运转的颗粒整形机内相互碰撞及摩擦,去除再生骨料表面的突出棱角及薄弱的旧水泥石,其研究表明:物理强化技术能有效提高再生骨料的基本性能,其中表观密度和堆积密度分别提高了3.5%和8.9%,空隙率降低了9.0%,吸水率降低了38.3%,压碎指标仅为9.5%,针片状含量等指标已达到天然骨料标准,完全满足生产各类混凝土的性能要求。

郭远新等^[40]分别通过物理和化学强化方法研究再生粗骨料的基本性能,评定出不同品质再生粗骨料的类别,二次物理强化后的再生粗骨料达到Ⅰ类再生粗骨料标准,各项指标均接近于天然骨料;经过浓度为6%的有机硅防水剂浸渍处理后的再生粗骨料性能得到明显改善。

Ismail等人^[41]采用适当浓度的硫酸溶液处理再生粗骨料表面的附着砂浆效果较好,可以有效避免其对天然骨料的损伤,并且用酸溶液处理过的再生粗骨料配制混凝土,其力学性能得到较为明显的改善。国外学者^[42-43]采用机械研磨技术清除RCA表面的附着砂浆,由于骨料与浆体的热膨胀系数不同,加热研磨更容易将再生骨料表面的附着砂浆清除,得到的高品质的再生粗骨料,所配制的再生混凝土的力学性能及耐久性能得到显著提高,并且其基本性能与天然的粗骨料混凝土无明显差别。

再生骨料的品质主要与其表面的硬化水泥砂浆(强度低、吸水率高且与骨料咬合较弱)附着量、自身性能(基体强度和复杂的骨料界面结构)等有关。但是由于再生骨料原料来源复杂,在生产再生骨料时所用工艺和质量评价体系均有所差别,由此产生的质量不稳定性势必限制了再生混凝土及其他水泥制品的广泛应用和进一步发展。^[44]故而,再生骨料在工程应用中必须提高其品质,并且降低其质量波动范围,这就要求在再生骨料的生产过程中必须考虑骨料的强化工艺。

1.2.2 再生混凝土耐久性研究

再生混凝土结构耐久性是指所设计的再生混凝土结构或其结构构件,在一定的环境作用下,能够满足在规定使用期限内继续保持混凝土力学性能、耐久性及安全使用的能力。^[45]由于废弃混凝土来源广泛,制得的再生粗骨料性能波动性大,再生粗骨料自身的缺陷导致其基本性能比天然骨料差,使得用其制备的再生混凝土用水量大、力学性能降低、耐久性能差等。

近年来,随着混凝土用天然原材料资源的日益匮乏,许多国家的专家及学者已经对建筑垃圾处理及资源化利用进行了研究,主要针对利用废弃混凝土制备高品质再生骨料及再

生粉体,研制开发了再生混凝土、再生砂浆等高附加值再生产品,系统分析了再生系列产品的性能,取得了大量的科研成果并实现产业化应用,但再生产品的耐久性问题依旧是研究的主导方向。因此,本节将针对再生混凝土耐久性问题,搜集并整理诸多专家学者在此方面的研究成果,分析探讨环境作用对再生混凝土耐久性能的影响规律。

1.2.2.1 抗碳化性能

碳化是造成再生混凝土结构耐久性劣化的主要原因之一,CO₂进入混凝土后与CH反应产生CaCO₃和水,降低混凝土内部的pH值,破坏了钢筋表面的钝化膜,导致钢筋锈蚀。由于再生粗骨料表面附着砂浆的存在,致使再生混凝土的界面结构及碳化机理更为复杂,不仅受胶凝材料用量、W/C、再生粗骨料取代率、CO₂浓度及湿度的影响,还与废弃混凝土强度等级、再生骨料的制备及品质有密切的关系。

黄秀亮等人^[46]通过研究胶凝材料体系、FA取代率及W/C大小对再生混凝土抗碳化性能的影响趋势,发现当W/C越大,碳化深度越大;与天然骨料混凝土相比,对于相同胶凝材料体系的再生混凝土而言,其实验室快速碳化28d后的碳化深度明显增大。李秋义等^[47]采用颗粒整形骨料强化技术,制备各种品质的再生粗骨料,系统研究了不同系列再生混凝土实验室快速碳化28d后的碳化深度,结果表明经整形强化后骨料品质得到明显提升,用其制备的再生混凝土随着取代率的增加碳化深度变化较小,抗碳化性能得到明显改善,而低品质再生粗骨料混凝土28d碳化深度较大,且取代率为100%时碳化深度是普通混凝土的2.8倍。

雷斌等人^[48]研究发现废弃混凝土的来源、再生粗骨料的性能及掺加量决定了再生混凝土的抗碳化性能,同时也会受到所配制得再生混凝土强度等级的影响,并通过试验研究建立了再生混凝土碳化深度计算模型。Evangelista等^[49]发现,与普通天然骨料混凝土相比,利用再生细骨料100%替代天然砂制备的再生混凝土,抗碳化性能明显降低,其28d碳化深度提高了29%。肖建庄等人^[50]、崔正龙等人^[51]试验发现,来源于较高强度等级的废弃混凝土制备的再生粗骨料基本性能较为稳定,且与天然骨料相近,用其制备的再生混凝土的28d快速碳化深度与普通混凝土大致相同。

国内学者对碳化后再生混凝土宏观性能进行了系统研究并取得了诸多成果,但从微观角度进行的研究较少。由于再生混凝土是一种多相、多界面、不均一的复杂碱性材料,与普通混凝土相比,其微观结构较为复杂,这是由于再生粗骨料表面部分附着砂浆的存在,使得再生混凝土中存在复杂的界面结构形式,针对复杂的多重界面形式,有必要系统地研究再生混凝土的微观结构,并找出相应改善途径。

1.2.2.2 抗氯离子渗透性

氯离子侵蚀是引起钢筋锈蚀的主要原因之一,特别是对海工混凝土或海水冷却塔等钢筋混凝土结构来说尤为严重。由于再生粗骨料空隙率大、吸水率高、表面附着砂浆微细裂缝较多,致使再生混凝土内部提供给Cl⁻通道数量较多,其抗氯离子渗透性能较差。李秋义等^[52]将再生粗骨料分别进行物理强化及化学强化处理,得到不同品质及类别的再生粗骨料,用其制备不同系列的再生混凝土,系统研究再生粗骨料品质及取代率对混凝土抗Cl⁻渗透性能的变化规律,发现经物理强化处理后高品质再生粗骨料混凝土抗Cl⁻渗透性能与天然骨料混凝土接近,利用化学强化的再生粗骨料配制再生混凝土的抗Cl⁻迁移系数降低了30%左右。

应敬伟等^[53]分析得出再生混凝土的氯离子渗透系数随着再生粗骨料取代率的增加而增大,且受W/C的影响最大,其次是矿物掺合料和养护龄期。叶腾等人^[54-55]得出相同的结论,提出掺加粉煤灰能改善再生混凝土的抗氯离子渗透性能,粉煤灰的掺量控制在15%左右为宜。确定W/C为0.52,砂率为38%,粉煤灰掺量为10%,再生粗骨料为100%取代天然骨料,配制的C25再生混凝土满足氯离子渗透等级为D级的要求。

Olorunsogo等人^[56]研究得出,全再生粗骨料混凝土与普通混凝土相比,标准养护为28d时氯离子导电率增大了73.2%,56d时增大了86.5%。Vazquez等人^[57]研究得出,氯离子在混凝土中的侵入过程较为复杂,受胶凝材料种类、W/C、密实程度等影响较大。再生粗骨料表面的附着砂浆含有一定量的C-S-H凝胶,相对增加再生混凝土中C-S-H凝胶的含量,在一定程度上可增大氯离子的吸附面积及程度,并导致再生混凝土的抗氯离子渗透性减弱。

诸多专家学者的研究结论大致相同,再生混凝土的抗Cl⁻渗透性能较差,这是由于再生粗骨料表面附着有较多的老水泥砂浆,老界面较为疏松,空隙率大,随着取代率的增大,再生混凝土内部空隙率增加及孔径变大,为氯离子在混凝土中的传输提供便利。另外,氯离子的渗透性也与再生混凝土的强度等级及外界环境有关。

1.2.2.3 干燥收缩性能

混凝土的干燥收缩是由于混凝土在不饱和空气中,逐渐失去了储存在砂浆基体内部微细孔隙中的自由水,致使水泥水化产物中的水分子转移至附近的毛细孔中,引起混凝土体积收缩。混凝土开裂大部分是由于干燥收缩引起的,是影响混凝土性能的重要因素之一,收缩开裂不仅削弱混凝土的承载力,而且为侵蚀性介质进入混凝土内部提供通道,降低混凝土的耐久性能,缩短安全使用年限。由于再生粗骨料附着砂浆的存在,使得再生混凝土的干缩裂缝的变化机理更为复杂。

韩帅等^[58]研究发现对于相同强度等级的再生混凝土及天然骨料混凝土而言,利用性能较差的低品质再生粗骨料制备的再生混凝土用水量明显增大,60d收缩率增大了47%,而高品质再生粗骨料有效地改善了再生混凝土的微观结构,60d收缩率减小了6.9%。肖建庄等^[59]研究显示再生粗骨料取代率为50%和100%的再生混凝土收缩率分别比普通混凝土增加了17%和59%,徐变变形分别增加了12%和76%,并采用BP神经网络预测混凝土徐变。霍俊芳等^[60]采用等体积砂浆法(EMV法)测试并计算再生混凝土的徐变度,其变化规律与普通混凝土相似,可以有效地改善再生混凝土的徐变性能。

肖建庄等^[61]研究了再生粗骨料取代率与再生混凝土收缩率的变化关系,研究发现取代率越大,再生混凝土收缩速率越快,且收缩率增大,掺加FA和S95矿粉可以有效改善其收缩性能。张晓华等^[62]研究发现再生混凝土早期收缩较快,收缩率略高于普通混凝土,掺加2%的K12引气剂可以有效地抑制再生混凝土在后期收缩率的增加,并通过系统研究提出了再生混凝土的收缩模型且相关性较好。安新正等^[63]研究发现再生粗骨料粒径为25~31.5mm的混凝土抗裂性较好,当粒径为15~25mm、FA掺量为15%时抗裂性也较好,表明选择合理的再生粗骨料粒径及FA掺加量可以有效地改善再生混凝土的抗裂性能。

由于国内外研究方法、试验条件及再生骨料原材料的差异,诸多学者对再生混凝土的干缩裂缝性能研究得出的结论存有较大差异。Domingo等^[64]研究了再生粗骨料与天然骨

料比例为1:1和1:0时,再生混凝土120d收缩率增加了20%和66%,持荷状态下90天徐变量增加了25%和62%。Soberon等^[65]分别研究再生粗骨料取代率为60%和100%时,再生混凝土的收缩率增加了25%和18%,徐变量增加了33%和40%。邹超英等^[66]研究了再生混凝土徐变度变化规律,并建立徐变度预测模型,发现100%全再生粗骨料混凝土中后期徐变度变化较小,普通混凝土徐变度变化较快,在90d时再生混凝土徐变度比普通混凝土降低了16.6%。

1.2.2.4 抗冻性能

混凝土的抗冻性在满足力学性能的前提下,混凝土结构抵御长期处于饱和水状态冻融循环作用的能力。由于再生骨料性能的缺陷及附着砂浆的存在,致使再生混凝土抗冻机理比普通混凝土复杂,且诸多学者研究结果差异较大。

韩帅等^[67]研究证明经过颗粒整形物理强化后的再生粗骨料,其基本性能达到了I类骨料性能标准,用其制备的再生混凝土的抗冻性能得到显著提高,并接近于天然骨料混凝土,再生粗骨料完全替代天然骨料时,混凝土抗冻等级可达到F200。岳公冰等^[68]利用骨料强化技术制备了不同品质的再生细骨料,研究了骨料性能及取代率对再生混凝土抗冻性能的影响规律,发现随着再生细骨料用量的增加,其抗冻性逐渐降低,同时也加快了再生细骨料混凝土在快速冻融环境下的破坏速率,高品质再生细骨料混凝土满足F250要求,质量损失率仅为3.9%,相对动弹性模量在78%以上。

张秋美等^[69]研究结果显示水灰比大小决定了混凝土的抗冻性能,W/C越大抗冻性越差,而对于低W/C的再生细骨料混凝土,其抗冻性能较好,并且再生细骨料对抗冻性能的影响相对较小。孙家瑛等^[70]研究结果表明再生细骨料不利于再生混凝土的抗冻性能,且再生细骨料的粒径要大于0.16mm,掺加量不得超过40%,粉煤灰有助于提高再生混凝土的抗冻性。

Gokce A.^[71]分析再生混凝土的抗冻性能良好,与普通混凝土没有明显差异,原因在于老界面与附着砂浆上的裂缝吸收了新砂浆中的水分,在界面处产生微养护作用,改善了老界面与骨料新界面的微观结构。Witesides研究显示再生粗骨料极易吸水且吸水率大,再生骨料表面附着砂浆是再生混凝土薄弱区域,Sweet等人的研究也得出类似的结果。Salem R.等人^[72]从微观角度分析,冻融破坏首先从再生骨料表面的附着砂浆开始,随着冻融循环的进行,破坏裂缝逐渐延伸至新砂浆基体后导致混凝土破坏,掺量为28%的FA能明显改善其抗冻性能。

1.2.2.5 抗硫酸盐侵蚀性能

混凝土遭受硫酸盐侵蚀机理较为复杂,主要表现为混凝土膨胀开裂及脱落,降低水泥水化产物的黏结力。实际上是 SO_4^{2-} 通过介质逐渐进入混凝土内部,再生粗骨料空隙率较高,为外界侵蚀性介质进入提供了便利通道,此时 SO_4^{2-} 与混凝土中的水泥水化产物反应,溶液中的侵蚀介质通过孔隙进入混凝土的内部与水泥水化反应生成具有膨胀性的产物^[73],随着侵蚀龄期的增长,混凝土内部的膨胀应力大于其抗拉强度时,就会在再生混凝土内部产生微细裂缝,由于再生粗骨料的存在会加剧膨胀裂缝的发展,再生混凝土表面出现浆体剥落和骨料外露的现象,直至混凝土结构遭到破坏。^[74]

目前,国内外学者已针对再生混凝土在硫酸盐等侵蚀环境下的耐久性问题进行了大量研究分析,并取得了一系列成果,由于再生混凝土本身的微细裂缝、毛细孔及再生骨料内

部缺陷,致使再生混凝土抗硫酸盐侵蚀劣化机理更加复杂。闫宏生^[75]认为增大W/C及提高再生骨料的掺加量,对再生混凝土抗 SO_4^{2-} 侵蚀性能产生不利影响,且当再生骨料掺加量越多,再生混凝土 SO_4^{2-} 腐蚀速度越快,掺加适量的FA能改善再生混凝土界面过渡区的微观结构,有助于增强再生混凝土的抗 SO_4^{2-} 腐蚀性能,并且在FA掺量为10%,再生粗骨料取代率为25%,再生混凝土的力学性能及抗 SO_4^{2-} 腐蚀较好。

张凯等^[76]研究得知,对于相同龄期的 SO_4^{2-} 腐蚀再生混凝土而言, SO_4^{2-} 渗透深度随再生粗骨料取代率的提高而增大,与普通混凝土相比,取代率为100%时, SO_4^{2-} 腐蚀含量和渗透深度分别增加了131%和43%。国内许多研究者采用相同的试验方法及硫酸钠溶液浓度,得到的研究结果及规律差异很大。唐灵等^[77]发现再生粗骨料取代率为50%的再生混凝土抗硫酸盐侵蚀性能要优于普通混凝土,高浓度硫酸盐溶液不会加速再生混凝土破坏,反而会有利于混凝土强度发展,并且从微观角度进行分析得出,再生混凝土硫酸盐侵蚀破坏主要是生成大量的钙矾石产生体积膨胀,导致混凝土破坏。

国外学者研究结论显示,Dhir R. K.等^[78]研究发现,对于低取代率的再生粗骨料混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能与普通混凝土相差不大,随着取代率的增大,再生混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能降低,研究结论与国内学者类似。祁兵等^[79]发现由于再生粗骨料本身的吸水特性,使得再生混凝土内部微观结构更为紧密,再生骨料取代率在50%以下时,再生混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能良好,取代率超过50%后,再生混凝土随着干湿循环次数的增加,抗硫酸盐侵蚀性能降低且破坏速率加快。取代率为100%时,干湿循环100次后再生混凝土的表面开始出现浆体剥落及再生粗骨料外露的现象。

通过以上分析可以看出,虽然国内外学者对再生混凝土进行了大量的研究,但再生混凝土耐久性能问题没有得到有效的解决,再生混凝土力学性能及耐久性能差的原因主要与再生骨料品质、取代率、W/C等因素有关,表明再生混凝土中复杂界面结构疏松、微细裂缝数量较多,为侵蚀性介质进入再生混凝土内部提供便利通道,为了得到这些薄弱区域对再生混凝土耐久性的影响规律,本书拟采用微观测试技术研究再生混凝土界面结构破坏规律,揭示再生混凝土耐久性能损伤机理。

1.2.3 再生混凝土配合比设计的复杂性

再生骨料表面存在着复杂的界面结构(旧骨料-旧浆体、旧骨料-新浆体、旧浆体-新浆体等)与成分组成(硬化砂浆、水泥石、附着砂粒等),导致再生混凝土的性能稳定性较差,这与再生骨料的品质多样性(参照《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177—2010^[79]将再生粗骨料分为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类,《混凝土和砂浆用再生细骨料》GB/T 25176—2010^[80]将再生细骨料分为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类)和使用的复杂性(部分取代、全部取代、单一取代、复合取代等)密切相关,也使得再生混凝土的配合比设计较普通混凝土复杂得多。实际上,纵观不同种类的混凝土,再生混凝土的配合比设计兼有普通混凝土、轻集料混凝土^[81-82]和钢纤维增强混凝土^[83-84]设计的特点。

对于普通混凝土,水胶比(W/B)是影响其性能的主要影响因素,随着水胶比的减小,普通混凝土的强度逐渐增大,在再生骨料所制备的再生混凝土中也同样符合这一研究结论,但还必须考虑再生骨料与天然骨料之间的性能差异给再生混凝土带来的影响。

对于轻集料混凝土（也称轻骨料混凝土），其强度主要受有效水胶比（ W_0/B ）和轻集料的性能两方面决定。轻集料混凝土的净水胶比与轻集料的吸水率有关，是强度的主要影响因素，净水胶比越小，轻集料混凝土的强度越高；轻集料的性能则主要由密度等级和筒压强度所决定，密度等级和筒压强度越大，轻集料混凝土的强度越高。再生骨料的性质与轻集料有相似之处，即再生骨料也具有较大的吸水性，因此可以考虑引入有效水胶比（ W_0/B ）的概念来评价再生混凝土中的水泥浆性能，它与再生粗骨料的吸水率及取代率、再生细骨料的需水量比及取代率密切相关。

对于钢纤维增强混凝土，通过掺加一定量的钢纤维来提高混凝土的性能，尤其是抗拉强度的显著增强，钢纤维在混凝土中起到正的增强效应。而在制备再生混凝土时，绝大多数情况也是以再生骨料部分取代天然骨料，但有所不同的是再生骨料的性能明显要差于天然骨料，再生混凝土的性能随着再生骨料取代率的增大而逐渐降低，即再生骨料在混凝土中起到的增强效应是负的，这与钢纤维在混凝土中起到的增强作用相反。

对于再生混凝土，水胶比或有效水胶比、再生粗/细骨料的品质差异和取代率变化等都是影响其性能的主要因素，存在如此众多的影响因素势必导致再生混凝土的配合比设计要比其他种类的混凝土复杂得多，其配合比设计的复杂性如图 1-4 所示。

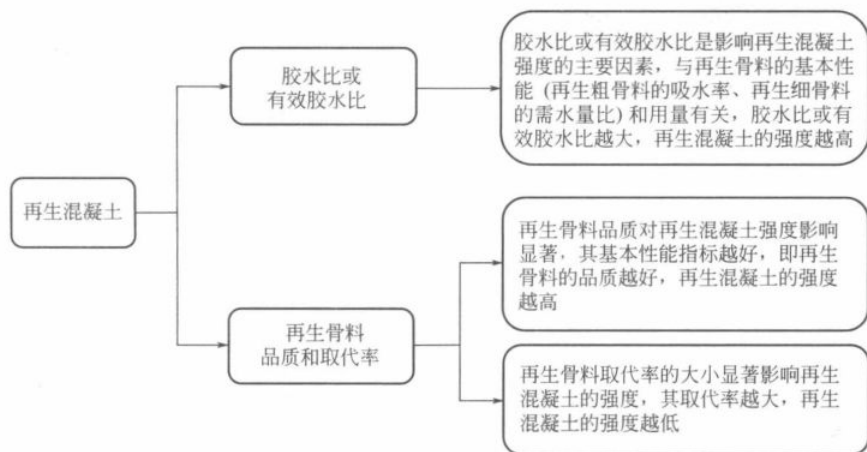


图 1-4 再生混凝土配合比设计的复杂性

面对这一严峻的前沿科研问题，国内外众多学者专家也开展了一些研究工作，并取得了一定的科研成果。如 Subhasis Pradhan 等^[85] 利用 PPM（颗粒填充）方法对再生粗骨料混凝土的配合比进行设计；George Warde 等^[86] 参照《欧洲法规 2》设计再生骨料混凝土的配合比，并研究了其性能和适用性；史魏^[87]、张亚梅^[88] 等分别提出了基于自由水灰比和再生骨料预吸水的再生粗骨料混凝土配合比设计方法。

但这些研究成果都是针对特定品质的再生骨料或特殊种类的再生混凝土而进行的有限研究，所提出的再生混凝土配合比设计方法具有很大的局限性，并不适用于全部种类的再生混凝土的配合比计算。另外，在《再生骨料应用技术规程》JGJ/T 240-2011^[89] 中并没有给出如同普通混凝土那样方便简捷的配合比设计方法，只是给出了简单的配制原则，由此导致再生混凝土的配合比设计消耗时间长，严重制约了再生骨料的广泛推广与工程应用。因此，科学建立再生混凝土的配合比设计方法，是实现建筑垃圾资源化高效循环再利

用亟待解决的基础问题。

1.2.4 再生混凝土应用

1.2.4.1 国内应用进展

我国政府及专家学者在建筑垃圾资源化利用及再生混凝土相关领域做了大量研究，并在建筑垃圾处理、再生产品及设备的研发、工程应用等方面取得了大量的研究成果。由于科教兴国及可持续发展战略，政府大力支持建筑垃圾资源化利用研究，科技部、交通部、国家自然科学基金委等政府部门相继出台科研立项政策，从1997年起，建设部就开始重点推广建筑废渣综合利用等科技项目，2004年交通部和科技部分别推出“水泥混凝土路面再生利用关键技术研究”和“建筑垃圾资源化利用”等科技研究计划，2006年科技部推出“十一五”科技支撑计划“建筑垃圾再生产品的研究开发”，2011年科技部推出“十二五”科技支撑计划“固体废弃物本地化再生建材利用成套技术”，2017年科技部相继将“工业及城市大宗固废制备绿色建材关键技术研究与应用”和“建筑垃圾资源化全产业链高效利用关键技术研究与应用”列入国家重点研发计划“绿色建筑及建筑工业化”重点专项，为相关标准及规范的出台提供了有利的理论与应用基础。

近年来，国家相关部委相继颁布了的一系列宏观政策及法规，都十分明确地将建筑环保产业作为未来战略性新型产业，相关部委也出台了一系列针对建筑垃圾资源化利用的政策和文件，推动了建筑垃圾处理行业的快速发展。2015年，国家相继出台了《促进绿色建材生产和应用行动方案》和《循环经济推进计划》，方案和计划中明确提出了要继续加大对建筑垃圾资源化利用的力度及要求，并且在2016年，国务院发布了《国家重点支持的高新技术领域》和《“十三五”国家科技创新规划》，规划中提出要大力发展建筑垃圾和建筑废物资源化再生利用技术以及开发新型再生建筑材料应用技术等。

为了保障建筑垃圾资源化利用工程应用及安全性，我国已颁布了一系列法规、国家标准及行业标准，主要包括：由住房和城乡建设部颁布的《城市建筑垃圾管理条例》（2005年）、由中国建筑科学研究院、青岛理工大学主编的《混凝土和砂浆用再生细骨料》GB/T 25176-2010和《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177-2010，由中国建筑科学研究院和青建集团股份公司主编的《再生骨料应用技术规程》JGJ/T 240-2011，由上海市环境工程设计科学研究院主编的《城市建筑垃圾管理条例》CJJ 134-2009，由中国建筑科学研究院主编的《再生骨料混凝土耐久性控制技术规程》CECS 385-2014，由北京市市政工程研究院主编的《道路用建筑垃圾再生骨料无机混合料》JC/T 2281-2014等，为国家建筑固废资源化利用提供技术支持，同时保障再生混凝土应用及产业发展。

堆满建筑垃圾的倾倒场和渣土山会产生土坡塌方、土壤及地下水、土体滑坡等严重的地质性灾害，这会给坝区周围的居民带来巨大的灾难。如2008年山西襄汾尾矿库溃坝事故，2015年深圳市光明新区红坳渣土收纳场滑坡事故就带来难以估量的生命和财产损失，为建筑垃圾资源化安全利用敲响了警钟。现全国各大城市依据自身建筑垃圾问题，在以上法律法规及标准的基础上，相继出台了关于建筑垃圾资源化利用的地方政策条例，有力推动了建筑垃圾产业化发展。

深圳市在建筑垃圾资源化利用技术等方面始终处于领先地位，于2009年颁布了《深圳市建筑废弃物减排与利用条例》，这是国内首部建筑垃圾资源化利用的地方法规。2012