

鲁丽华 吴欲晓 王有刚 著

粉煤灰混凝土 的耐久性



学工业出版社

鲁丽华 吴欲晓 王有刚 著

粉煤灰混凝土 的耐久性



化学工业出版社

· 北京 ·

《粉煤灰混凝土的耐久性》通过配比试验,采用Ⅱ级粉煤灰配制了强度较高的C40、C50混凝土及C40钢纤维混凝土。利用该粉煤灰混凝土,进行了一系列的试验:如混凝土立方体抗压强度试验、粉煤灰钢筋混凝土试件的偏心受压试验、粉煤灰混凝土拉拔试验、粉煤灰混凝土装配式节点黏结强度试验、钢纤维混凝土强度和弯曲韧性等试验。通过试验分析了二级粉煤灰混凝土在冻融和腐蚀环境下的力学性能。试验表明,在混凝土中添加二级粉煤灰不仅可以减少水泥用量,而且具有较好的耐久性能。

《粉煤灰混凝土的耐久性》可供土木工程、建筑材料等专业的科研人员阅读,还可供高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉煤灰混凝土的耐久性/鲁丽华,吴欲晓,王有刚
著. —北京:化学工业出版社,2018.9

ISBN 978-7-122-32614-0

I. ①粉… II. ①鲁…②吴…③王… III. ①粉煤灰
混凝土-耐用性-研究 IV. ①TU528.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第146187号

责任编辑:满悦芝
责任校对:王素芹

文字编辑:向东
装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京京华铭诚工贸有限公司

装订:三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张10½ 字数192千字 2018年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

前言

◆◆◆◆◆

粉煤灰俗称“飞灰”，是燃煤发电产生的废弃物。我国是制造业大国，每年需要的发电量达到6万多亿千瓦时，其中有近4万亿千瓦时是利用燃煤发电，由此每年产生燃煤废弃物——粉煤灰近6亿吨。如果不能充分利用，粉煤灰的堆积将带来诸如土地、资源、扬尘等环境污染，因此，粉煤灰的有效利用非常重要。混凝土是我国国民经济建设非常重要的材料之一，配制混凝土消耗大量的水泥。据统计，仅2016年一年我国就生产水泥24亿吨。一方面，粉煤灰堆积占用土地；另一方面，生产水泥需要大量的资源。如果能够将粉煤灰代替水泥配制混凝土，将解决上述两个资源与环境难题。将粉煤灰充分应用于混凝土中，在国内外已有广泛的应用，但目前对粉煤灰仅限于Ⅰ级粉煤灰的利用，利用率还远远不够。

本书汇集了笔者近年从事Ⅱ级粉煤灰混凝土研究的经验，从充分利用Ⅱ级粉煤灰配制混凝土的角度，以试验研究为手段，进行了一系列的Ⅱ级粉煤灰高强度混凝土配比、冻融腐蚀等实验以及利用Ⅱ级粉煤灰制作的钢筋混凝土构件的一系列耐久性能试验。探讨了Ⅱ级粉煤灰对混凝土耐久性的影响，分析了冻融、腐蚀对粉煤灰混凝土材料及钢筋混凝土构件的作用机理，取得一些规律性认识，研究成果可作为低等级粉煤灰综合利用的参考。

本书中的主要工作是在沈阳工业大学辽宁省建筑材料力学重点实验室及沈阳工业大学-辽宁新发展交通集团大学生校外实践基地完成的。感谢陈四利教授及辽宁新发展交通集团的周涌波副总裁及奥路通科技有限公司的大力支持。潘桂生、张月、曲坤、刘润东、罗丰等在写作过程中提供了资料和帮助。在此，对他们的工作表示感谢！

由于笔者水平有限，不足之处敬请批评指正。

鲁丽华

2018年5月

目录

◀◀◀◀◀◀◀◀

第 1 章 绪论

1.1 混凝土结构耐久性概述	001
1.1.1 混凝土应用概述	001
1.1.2 混凝土耐久性概述	004
1.1.3 混凝土耐久性研究现状	007
1.2 粉煤灰应用概述	011
1.3 主要研究内容	015

第 2 章 混凝土材料要求及试验

2.1 原材料	016
2.1.1 水泥	016
2.1.2 粗骨料	018
2.1.3 天然砂	021
2.1.4 粉煤灰	023
2.1.5 减水剂	023
2.2 混凝土配合比试验	024
2.2.1 概述	024
2.2.2 试件的制作和养护	027
2.2.3 试验设备和仪器	028
2.2.4 粉煤灰混凝土配合比设计	031
2.3 混凝土材料耐久性试验	032
2.3.1 性能等级划分	032
2.3.2 冷冻试验	032
2.3.3 腐蚀溶液的配制	035
2.4 粉煤灰钢筋混凝土构件试验设计	037
2.4.1 材料选用	038

2.4.2 试件的制作与养护	040
2.4.3 试验设备	041
2.5 混凝土黏结强度耐久性试验	042
2.5.1 混凝土黏结力及研究的必要性	042
2.5.2 钢筋与混凝土黏结的试验方法	043
2.5.3 试件数量及分组	044
2.5.4 冻融循环下高强粉煤灰混凝土的拉拔试验	044

第 3 章 粉煤灰混凝土强度发展规律

3.1 引言	046
3.2 粉煤灰混凝土坍落度和抗压强度试验	047
3.2.1 粉煤灰混凝土坍落度试验	047
3.2.2 粉煤灰混凝土抗压强度试验	047
3.3 试验结果分析	050
3.4 粉煤灰对混凝土的作用机理分析	050
3.4.1 粉煤灰对混凝土和易性改善机理	050
3.4.2 掺粉煤灰可改善混凝土的耐久性机理	050
3.4.3 掺粉煤灰可以提高混凝土后期强度作用机理	051
3.5 小结	051

第 4 章 粉煤灰混凝土冻融腐蚀力学性能

4.1 概述	052
4.2 普通混凝土冻融腐蚀循环试验	053
4.2.1 普通混凝土的冻融腐蚀试验	053
4.2.2 试验结果分析	054
4.3 粉煤灰混凝土的冻融腐蚀试验研究	056
4.3.1 粉煤灰混凝土配比试验	056
4.3.2 不同掺量粉煤灰混凝土强度测试试验	057
4.3.3 不同掺量粉煤灰混凝土冻融循环试验	058
4.3.4 试验要求	059
4.3.5 质量和动弹性模量损失率	059
4.3.6 硫酸钠溶液浓度、盐酸 pH 值、粉煤灰掺量对混凝土强度的影响	061
4.4 冻融及腐蚀对粉煤灰混凝土强度的影响	065
4.4.1 混凝土冻融破坏机理分析	065
4.4.2 硫酸盐侵蚀混凝土的机理	066

4.4.3 酸类腐蚀混凝土的机理	067
4.4.4 质量损失分析	067
4.5 小结	068

第 5 章 钢筋混凝土构件应力冻融试验

5.1 引言	070
5.2 钢筋混凝土的损伤破坏状况	071
5.2.1 钢筋混凝土试件冻融腐蚀试验	071
5.2.2 各种试件破坏情况	074
5.2.3 试验结果分析	076
5.3 粉煤灰在混凝土中的作用机理分析	084
5.3.1 粉煤灰混凝土抗冻性的机理分析	084
5.3.2 在混凝土中掺入粉煤灰能够提高混凝土抗裂性能的机理分析	084
5.4 小结	084

第 6 章 钢筋混凝土黏结强度耐久性

6.1 概述	085
6.2 冻融循环对高强粉煤灰混凝土的影响	086
6.2.1 冻融循环对粉煤灰混凝土黏结力的影响	088
6.2.2 高强粉煤灰混凝土抗压强度与时间的关系	088
6.2.3 冻融循环后高强粉煤灰混凝土的轴心抗压强度	090
6.2.4 冻融循环对钢筋与粉煤灰混凝土黏结力的影响	091
6.2.5 冻融循环后钢筋与粉煤灰混凝土的黏结强度分析	092
6.2.6 冻融破坏机理分析	093
6.3 冻融和氯溶液耦合作用下高强粉煤灰混凝土的拉拔试验	094
6.3.1 引言	094
6.3.2 试验概况	094
6.3.3 冻融循环和溶液侵蚀共同作用下对钢筋混凝土黏结力的影响	096
6.4 溶液腐蚀与冻融循环作用后粉煤灰混凝土的黏结强度	099
6.5 溶液腐蚀与冻融循环共同作用下黏结退化机理的分析	100
6.6 滑移本构关系	101
6.6.1 滑移本构关系模型	101
6.6.2 本书试验的滑移本构关系	101
6.7 小结	104

第 7 章 粉煤灰混凝土装配式预埋套管节点耐久性

7.1 引言	105
7.2 混凝土装配式节点试验	107
7.2.1 混凝土装配式节点选用原则	107
7.2.2 构件尺寸	108
7.2.3 压浆料	109
7.3 改性砂浆的基本力学性能和抗冻性试验研究	113
7.3.1 试验研究概述	113
7.3.2 改性砂浆的抗压强度试验	114
7.3.3 改性砂浆的劈裂强度试验	117
7.3.4 改性砂浆的抗冻性试验	120
7.3.5 改性砂浆黏结机理	124
7.4 后锚固节点黏结性能试验及研究	125
7.4.1 试验研究概述	125
7.4.2 C40 混凝土材料抗压强度与耐久性试验研究	126
7.4.3 后锚固节点拉拔试验	130
7.4.4 后锚固节点抗冻性试验	135
7.4.5 后锚固节点的破坏机理	137
7.5 小结	139

第 8 章 尾矿砂钢纤维混凝土的力学性能

8.1 引言	141
8.2 原材料	142
8.2.1 骨料	142
8.2.2 水泥	143
8.2.3 粉煤灰	143
8.2.4 钢纤维	143
8.2.5 减水剂	143
8.2.6 水	143
8.3 试验方案	144
8.4 力学性能试验	144
8.4.1 试验方法	144
8.4.2 尾矿砂喷射钢纤维混凝土的抗压性能	145
8.4.3 尾矿砂喷射钢纤维混凝土的劈裂抗拉性能	146

8.4.4 尾矿砂喷射钢纤维混凝土的弹性模量	146
8.4.5 试验结果与分析	147
8.4.6 粉煤灰掺量对力学性能的影响	148
8.4.7 钢纤维掺量对力学性能的影响	149
8.5 钢纤维混凝土的弯曲韧性研究	149
8.5.1 引言	149
8.5.2 弯曲韧性	150
8.5.3 试验原材料及试验方案	151
8.5.4 结果分析	152
8.5.5 韧性分析	154
8.6 小结	155
参考文献	156

第1章

绪论

1.1 混凝土结构耐久性概述

1.1.1 混凝土应用概述

混凝土结构自 19 世纪中叶开始应用以来，至今不足 200 年，发展的历史较砖木及钢结构相比，可以说非常短，但其发展非常迅速，目前已经成为世界上土木建设中占主导地位的结构。

混凝土结构广泛应用在房屋、桥梁、水工大坝，甚至核电站等方面，并取得了惊人的成就。图 1.1 为重庆石板坡长江复线桥，主跨径达 330m，是目前世界上最大单孔跨径的混凝土梁式桥。图 1.2 是建于 2003 年的上海卢浦大桥，主跨径 550m，为目前世界上跨径第二的拱桥，第一大混凝土拱桥。

在水利建设上，混凝土更是有非常广泛的应用。图 1.3 为长江三峡水电站大坝。大坝为混凝土重力坝，坝顶总长 3035m，坝顶高程 181m，枢纽工程混凝土浇筑总量达 $2800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

以钢筋混凝土为主要承重结构的建筑非常多，图 1.4 为历时 30 年，在 2016 年完工的朝鲜柳京饭店，高 330m，105 层。图 1.5 为中国辽宁省沈阳市的方圆大厦，占地面积 5580 m^2 ，总建筑面积 48000 m^2 ，建筑高度 99.75m，共 24 层，地上 22 层，地下 2 层，为钢筋混凝土框架剪力墙结构。

混凝土还广泛应用于核电站的建设中，图 1.6 为在建的辽宁红沿河核电站，图





图 1.1 重庆石板坡长江复线桥



图 1.2 卢浦大桥



(a)



(b)

图 1.3 长江三峡大坝

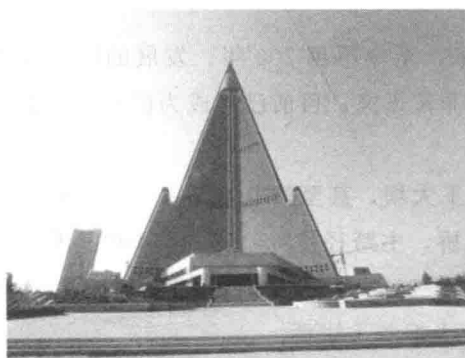


图 1.4 朝鲜柳京饭店



图 1.5 沈阳方圆大厦

1.7 为广西防城港核电站项目。混凝土由于其比较密实，防辐射作用明显，被广泛应用于核电站的防护罩建设中。

图 1.8 为水泥混凝土路面，南方地区，如我国海南等地，采用水泥混凝土路面的道路比较多，而北方相对较少。

图 1.9 为已经完工的隧道，图 1.10 为正在进行的隧道衬砌工程，目前几乎所有公路及铁路隧道的衬砌都采用混凝土材料。

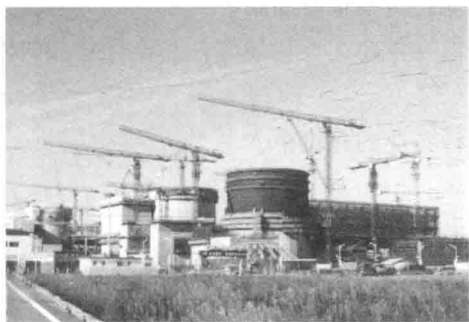


图 1.6 在建的辽宁红沿河核电站



图 1.7 广西防城港核电站



(a) 城市道路



(b) 公路

图 1.8 水泥混凝土路面



图 1.9 隧道衬砌

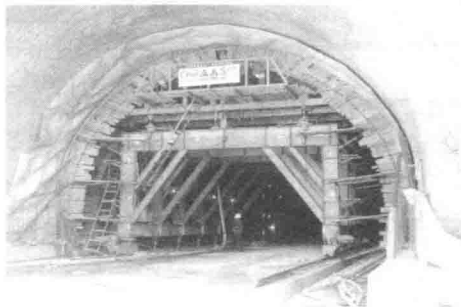


图 1.10 正在施工的隧道衬砌

混凝土之所以有如此广泛的应用主要在于混凝土有以下一些优点：

一是造价低。相同使用功能的混凝土结构比钢结构造价平均要低 20%~30%，因此在工程造价不足的情况下，混凝土结构是一个比钢结构更经济实惠的结构形式。

二是混凝土成型容易。相对于钢结构，现浇的混凝土结构在成型前为流态，需

要什么形状，基本可以实现，同时能够与其他构筑物很好黏结。

三是相对钢结构后期维护费用低。由于混凝土耐久性比较好，在设计基准期内几乎不需要维修。

因此，混凝土被广泛应用在国民经济各行各业的建设中。

1.1.2 混凝土耐久性概述

随着人口的增长、工业化的迅速发展，人类赖以生存的空气、水和土地受到严重污染，因此造成广大地区的雨水、海水、地下水中带有各种侵蚀性离子，如 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等，对建筑物中的混凝土等材料有着严重的腐蚀破坏作用。如图 1.11(a) 为东北某地的跨线桥。由于冬天降雪，人工播撒除冰盐，雪融化后顺着伸缩缝流下来，造成桥墩墩顶及墩侧混凝土腐蚀剥落，受力钢筋裸露在外。图 1.11(b)、(c) 为较早拍摄的我国西北地区的两座跨河桥。由于河流中存在大量的腐蚀性成分，对桥墩混凝土产生腐蚀作用而使混凝土桥梁几近报废。图 1.11(d) 为北方某地一座公路桥的栏杆，由于常年受到冻融等腐蚀作用而产生混凝土剥落。

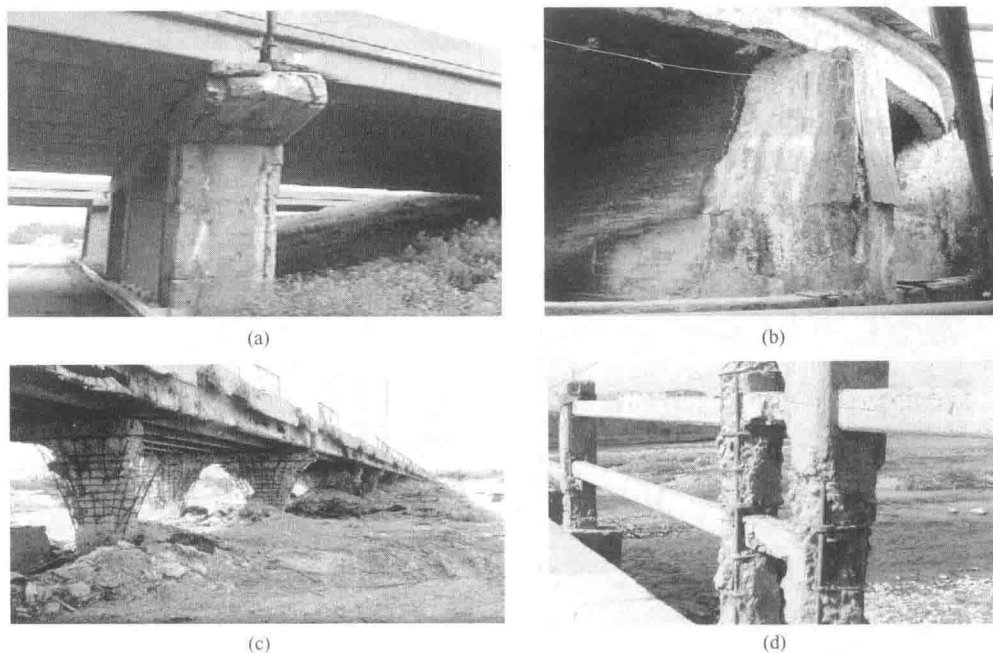


图 1.11 受到腐蚀的混凝土桥梁

图 1.12(a) 为我国北方某段高速公路混凝土路缘石，由于除冰盐的作用，在高速路运营不到两年的时间，其路缘石就如图上一样被腐蚀得面目全非。图 1.12(b) 为我国西北某地一个标志牌，由于当地空气环境恶劣，导致混凝土受到腐蚀，钢筋裸露。

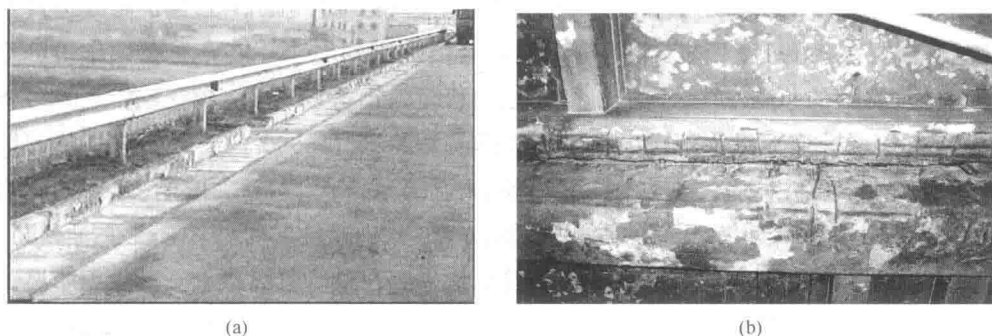


图 1.12 受到腐蚀的混凝土构筑物

混凝土构件一旦出现上述情况,将很快降低甚至丧失承载力,威胁到结构的安全,因此需要维修、加固以及报废重建。

混凝土耐久性问题由来已久,半个世纪以来,许多工程没有达到预期的使用年限就发生了劣化,最终导致破坏。由于混凝土材料具有原材料易得、经济、便于施工、耐久等多方面的显著优点,广泛应用于建筑、水利、交通和能源等工程,其结构也由此成为重要的建筑结构形式。因此一旦产生耐久性问题,重建和维修的费用巨大,引起了工程界人士的高度重视。混凝土耐久性不足所带来的严重经济损失、资源浪费和种种社会问题已迫使我们不能忽视和要求其使用寿命指标。20世纪90年代以来,混凝土耐久性已经成为全世界密切关注和全力攻关的重大科学技术问题。有关侵蚀性离子对混凝土等材料力学性能影响的研究的作用尤为重要和紧迫。

众所周知,混凝土具有高碱性。如果选用适合于具体环境的正常材料,严格按照规范要求设计和施工,使混凝土保护层具有足够厚度、振捣密实,并在使用中防止微裂纹扩展,基本可以保证混凝土性能稳定、钢筋长期完好,不受腐蚀。也就是说,在一般环境甚至恶劣的海洋环境及北方冬季撒除冰盐的盐污染环境中,钢筋混凝土和预应力混凝土结构也应该是可以很耐久的。但是,事实上由于混凝土的碳化、氯化物污染(海洋、海岸工程与撒除冰盐的路桥工程)、硫酸盐侵蚀、酸性介质腐蚀作用,常常会引起混凝土性能下降,也会引起钢筋腐蚀、混凝土顺筋胀裂、层裂和剥落破坏,目前已成为威胁全世界混凝土结构耐久性的主要灾害,它造成的直接、间接损失之大,远远超出人们预料,给世界各国的人们带来严重的财政负担。

据调查,美国1949年由腐蚀引起的损失约为55亿美元,1975年则达到700亿美元,相当于GDP的4.9%,1985年则达到2650亿美元,1995年总腐蚀损失为2757亿美元,其中直接损失为1379亿美元,而基础设施直接腐蚀损失为226亿美元,占总直接腐蚀损失的16.4%。2000年,美国直接腐蚀损失为4400亿美元,

占 GDP 的 5%，较 1995 年增加 48%，其中交通和公共设施占 32%，而间接损失超过 8000 亿美元。就土木工程而言，混凝土结构受到周围环境介质腐蚀作用的危害和日益加剧的事态也远远超出人们的意料。目前美国整个混凝土的价值约为 60000 亿美元，而今后每年用于维修重建的费用将高达 3000 亿美元。这样的问题同样出现在英国、澳大利亚、波兰、德国等国家。美国腐蚀控制技术委员会 (CCT) 报道，当今世界面临的重大问题之一就是基础设施的破坏，主要是公路、桥梁，特别是腐蚀引起的混凝土破坏。整个世界正在进行着混凝土基础设施防腐蚀损失的战斗。混凝土易碎易裂、钢筋易锈蚀等，使混凝土桥梁的破坏尤其突出。2001 年 4 月，在美国举行的“基础设施腐蚀专题讨论会”，公路、桥梁等基础设施的危险性成为会议的焦点。

在我国，工业厂房主体的钢筋混凝土结构情况更加严重，特别是化学工业、冶金工业的选矿、烧结、焦化、冶炼、铸造、造纸、印染等长期在腐蚀环境下工作的钢筋混凝土结构物，由于生产过程中有害介质的跑、冒、滴、漏现象造成构件长期受到侵蚀性介质的腐蚀，耐久性严重降低。

混凝土的抗冻性是混凝土耐久性的另外一个重要内容，也是工程中亟待解决的重要问题之一。在北方寒冷地区气温温差达到 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，冬季最寒冷时可以达到 -30°C ，混凝土在反复冻融循环作用下，也极易出现劣化等现象，造成混凝土材料的破坏，影响结构的寿命。

我国地域辽阔，有相当大的部分处于严寒地带，致使不少水工建筑物发生了冻融破坏现象。尤其在东北严寒地区，兴建的水工混凝土建筑物，几乎 100% 工程局部或大面积遭受不同程度的冻融破坏。据水工建筑物耐久性调查资料显示：在 32 座大型混凝土坝工程和 40 余座中小型工程中，22% 的大坝和 21% 的中小型水工建筑物存在着冻融破坏问题，大坝混凝土的冻融破坏主要集中在东北、华北、西北地区。尤其在东北严寒地区，兴建的水工混凝土建筑物几乎 100% 的工程局部或大面积地遭受不同程度的冻融破坏。1998 年，我国北方某国际机场使用仅数年的混凝土停机坪被发现混凝土道面多处出现坑蚀剥落破坏，严重影响飞机正常安全起降。后分析得知是道面混凝土遭受冻融及除冰盐侵蚀双重破坏作用所致。除东北、华北、西北地区普遍发现混凝土的冻融破坏现象外，地处较为温和的华东地区的混凝土建筑物也发现有冻融破坏现象。在国外，混凝土的抗冻性能也是一项重要指标，同时也是一项综合性能指标。水工混凝土的设计指标中经常用抗冻性指标代替其耐久性指标。例如，英国英格兰岛中部环形快车道上 11 座钢筋混凝土高架桥，当初建造费为 2800 万英镑，到 1989 年因为维修而耗资 4500 万英镑，是造价的 1.6 倍，估计以后还要耗资 1.2 亿英镑，累计接近当初造价的 6 倍，这反映了结构耐久性造成的损失大大超过了人们的估计。

总之,无论是在国内还是国外,氯化物污染(来自海洋环境、化工企业或冷天撒盐化冰雪)、硫酸盐侵蚀、酸性环境以及冻融循环引起的腐蚀破坏,都是严重威胁混凝土材料耐久性的最主要、最普遍的危害。

1.1.3 混凝土耐久性研究现状

1.1.3.1 混凝土结构冻融破坏国内外研究现状

表面剥落和冻胀开裂是混凝土冻融破坏的两个主要现象,从20世纪30年代开始,关于混凝土受冻破坏的机理各国学者进行了大量深入的研究,并提出了一系列的假说。混凝土冻融破坏的机理非常复杂,到目前为止,没有得到一个公认的理论来完全解释冻害机理。但这些假说的提出,对以前和现在的研究及工程抗冻设计起到很大程度的指导作用和理论依据。提出的假说主要有Helmuth的渗透压理论、T. C. Powers的静水压理论、DunHndec的吸附水理论、Fagerlund的临界饱水程度理论、Setzer的微冰晶模型理论、Litvan理论以及Cady的双机制理论。

这些假说中以Powers和Helmuth的渗透压理论和美国T. C. Powers的静水压理论比较著名,混凝土的受冻破坏机理直到现在仍还是不完全清楚,有可能是上面假说的一个或多个综合作用的结合。下面简单介绍一下这几个假说。

(1) 静水压理论

1945年,鲍尔斯(T. C. Powers)提出了静水压假说,后来Fagerlund进一步发展了他的理论。

该假说认为:混凝土在冰冻的过程中,孔隙中的部分水会结冰,结冰部分的孔内溶液体积膨胀,迫使未结冰部分的孔隙溶液向外部迁移,孔隙中的溶液克服了黏滞阻力在水泥浆体结构中移动,就会产生静水压力。这种压力属于破坏应力,流动黏滞阻力(静水压力)的大小随孔溶液流程的长度增加而增大,流程长度大到一定程度(即临界值)时,将产生超过混凝土抗拉强度的静水压力,从而造成结构的破坏。

(2) 渗透压力假说

静水压力假说解释了如结冰速度对抗冻性的影响、引气剂的作用等很多混凝土冻融破坏过程中的现象,但不能解释另外其他很多很重要的现象,如冻结过程中体积并不膨胀的有机液体如三氯甲烷、苯等冻结对混凝土的破坏,再比如温度不变时非引气浆体体积的膨胀和冻结过程中引气浆体的收缩等对混凝土的破坏。在此现象下Powers、Helmuth和Litvan提出了渗透压力假说。

渗透压力假说认为,混凝土孔内溶液的冰点与孔径大小相关,大孔溶液中的部分溶液先结冰,未冻溶液中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^+ 等碱性离子浓度提高,蒸气压将会下



降,和周围的溶液形成浓度差,导致溶液向那部分冻结的孔隙移动,形成压力,当这种渗透压力大于混凝土的抗拉强度时,混凝土被破坏。

由上面可以看出,混凝土受冻结破坏是溶液中盐浓度差和冰水蒸气压差造成的渗透压和空隙水结冰体积膨胀造成的静水压力二者共同作用的结果。根据国内外研究显示,混凝土的抗冻性还与许多因素有关,如混凝土的内部孔结构、混凝土的强度、冻结时间、水的饱和情况等,最主要还是它的孔结构。国内外大量研究表明,引气剂的掺入能显著提高混凝土的抗冻性。国内对于混凝土的抗冻性能研究比较多,但只是针对混凝土材料本身,对钢筋混凝土的抗冻性研究很少,对粉煤灰钢筋混凝土的研究就更是罕见。T. S. Shih 的试验研究表明,钢筋混凝土的黏结强度受冻融循环影响很大,但没有考虑溶液侵蚀以及冻融循环对粉煤灰钢筋混凝土构件及黏结性能的影响。

在第二届混凝土耐久性国际会议的报告中,Mehta 教授指出:“当今世界引起混凝土破坏的主要原因有寒冷地区的冻融破坏、钢筋锈蚀和侵蚀环境的物理、化学作用。”施工中为了保证得到混凝土必要的和易性,加水拌制混凝土时,所加的水总要多于理论上水泥水化所需的水,多余的水一部分滞留在混凝土的各种孔隙中。混凝土冻融破坏就是混凝土硬化后多余的留在微孔隙中的游离水,在温度升高或结冰时,体积膨胀,温度降低或结冰后融化体积收缩,反复交替产生的膨胀压力和水分的渗透压力共同作用的疲劳应力,使混凝土逐渐由表及里被剥蚀破坏,慢慢地导致混凝土力学性能降低的现象。

水的渗入使混凝土处于高饱和状态和温度的正负反复交替是导致混凝土发生冻融破坏的必要条件,也正因为如此,混凝土的冻融破坏几乎都发生在寒冷地区的各种海工、水工建筑物以及接触雨水和蒸汽作用的厂房、桥梁和路面等地方。我国国土面积辽阔,而且东北等大部分地区都处于严寒的地带,因此水工建筑物发生冻融破坏的现象很严重。

例如,东北地区的回龙山大坝,在建成几年后就发生了冻融破坏,有的溢流面骨料外露,有的溢流面钢筋也露了出来,有 65% 的溢流面面积遭到了冻融破坏;再比如云峰大坝、丰满大坝、参窝大坝、水丰大坝等情况都非常相似;还有黑龙江省与内蒙古东部建成的热电厂 16 座冷却塔中,有 7 座破损,1 座坍塌,皆是由冻融破坏作用严重引起的,由于有些梁和立柱等构件长期与水接触,表面剥落严重,大部分的面积骨料脱落甚至露出钢筋。

除“三北”(东北、华北、西北)地区外,位于较为温和的华东地区的混凝土建筑物也发生了冻融破坏现象。在美国北部、北欧各国、加拿大、俄罗斯等寒冷地区,混凝土结构也遭受着各种程度的冻融破坏。据美国 1980 年相关的报道,在所调查的 56 万座公路桥中,有 9 万座因使用除冰盐导致混凝土冻融剥蚀和钢筋锈蚀,