

The background features a light gray grid. On the left, there are two red rectangular areas: a solid red triangle in the top-left corner and a larger red rectangle in the bottom-left corner containing a pattern of small red arrows pointing upwards. The main title is centered in the upper half of the page, with several white arrows pointing upwards around it.

# 纤维混凝土与 既有混凝土黏结性能研究

高丹盈 程红强 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 纤维混凝土与既有混凝土 黏结性能研究

高丹盈 程红强 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

新混凝土与既有混凝土黏结是混凝土工程中经常涉及的一个问题,对两者之间黏结性能的研究具有十分重要的理论意义和实用价值。本书对纤维混凝土与既有混凝土的黏结性能进行了系统的试验研究,探讨了纤维混凝土与既有混凝土的黏结剪切、劈拉等基本力学性能及黏结面抗冻、抗渗耐久性能,同时运用断裂力学方法对纤维混凝土与既有混凝土黏结Ⅱ型断裂性能进行了试验研究及理论分析,并通过约束收缩试验分析了纤维混凝土与既有混凝土的黏结性能。

本书对工程设计和施工具有较高的参考价值和指导意义,可供水利工程、土木建筑、桥梁市政等专业的工程技术人员借鉴,也可供大专院校师生和相关领域的研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

纤维混凝土与既有混凝土黏结性能研究 / 高丹盈,程红强著. 北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021893-3

I. 纤… II. ①高…②程… III. 混凝土黏结性研究 IV. TU528.01

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第064285号

责任编辑:周 炜 王志欣 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008年6月第 一 版 开本:85(720×1030)

2008年6月第一次印刷 印张:9 1/4

印数:1 3 000 字数:181 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

## 编 委 会

主 任 张忠素

副主任 赵 健 陈姝萍 汤留生 周朝坤 闫正斌  
何成炳 马玉生

顾 问 经福谦（中国科学院院士）

董海山（俄罗斯自然科学院院士；中国工程院院士）

编 委 （以姓氏笔画为序）

王亚龙 王明政 亓希国 左敬军 孙小川

严 军 李军刚 张 伟 张志杰 陈 婕

林明宗 赵传东 高 勇

## 前 言

混凝土结构具有承重、耐火、耐久、经济适用、易于成型等优点,是当今世界上用途最广、用量最大的建筑结构形式。随着使用年限的增长,既有混凝土结构在各种使用荷载及侵蚀环境作用下,已相继出现了相当严重的老化和病害问题,严重影响了建筑物的正常使用。处于这些状况的混凝土结构,由于经济原因和社会原因等,往往不便拆除重建,通常是经过严格的鉴定和评估,在技术可行、经济合理的情况下进行维修和加固。以新混凝土加同既有混凝土结构的加大截面法,以其抗火、经济及相互兼容等特点,在既有混凝土结构的维修、加固及改造中被大量使用,尤其适用于水利工程和大体积混凝土结构,交通运输工程中的混凝土路面、桥面等大面积混凝土结构及建筑工程中的梁、板、柱、墙和一般构筑物等多种混凝土结构的加固,该方法的关键问题是新混凝土与既有混凝土上的黏结性能和方法。因此,研究新混凝土与既有混凝土的黏结机理、黏结性能和黏结方法具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

纤维混凝土是一种新型复合建筑材料,具有优良的抗拉、抗弯、抗剪、抗裂、阻裂、耐冲击、抗疲劳、高韧性等性能,将其作为修补材料,能提高修补结构的物理力学性能。对于用于环境恶劣、受荷复杂的混凝土结构的修补,纤维混凝土是一种理想的修补材料。本书以钢纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土作为修补材料,对纤维混凝土与既有混凝土的黏结性能进行了系统全面的研究,主要内容包括新混凝土与既有混凝土黏结面处理方法、黏结面基本力学性能、黏结面抗冻和抗渗性能、黏结面的收缩和断裂性能等,分析了有关因素对黏结性能的影响,提出了一系列可供理论研究、数值分析和工程设计参考的计算模型。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏及不足之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1-1 概述 .....	1
1-2 研究现状 .....	3
1-3 主要研究内容 .....	6
<b>第 2 章 既有混凝土结构常见缺陷及其成因</b> .....	7
2-1 既有混凝土结构常见缺陷 .....	7
2-2 混凝土碳化 .....	9
2-3 混凝土碱-集料反应 .....	11
2-4 混凝土冻融破坏 .....	12
2-5 混凝土侵蚀破坏 .....	14
2-6 混凝土冲磨剥蚀 .....	16
<b>第 3 章 新混凝土与既有混凝土黏结面处理及评定</b> .....	18
3-1 概述 .....	18
3-2 黏结面常用处理方法 .....	19
3-3 黏结面粗糙度测量方法 .....	21
3-4 小结 .....	25
<b>第 4 章 纤维混凝土与既有混凝土黏结剪切性能</b> .....	27
4-1 试验概况 .....	28
4-2 钢纤维混凝土与既有混凝土黏结剪切性能 .....	34
4-3 聚丙烯纤维混凝土与既有混凝土黏结剪切性能 .....	41
4-4 纤维混凝土与既有混凝土黏结剪切强度计算公式 .....	46
4-5 小结 .....	47
<b>第 5 章 纤维混凝土与既有混凝土黏结劈拉性能</b> .....	48
5-1 试验概况 .....	48
5-2 钢纤维混凝土与既有混凝土黏结劈拉性能 .....	52
5-3 聚丙烯纤维混凝土与既有混凝土黏结劈拉性能 .....	61
5-4 纤维混凝土与既有混凝土黏结劈拉强度计算公式 .....	63
5-5 小结 .....	64

<b>第 6 章 纤维混凝土与既有混凝土黏结面抗冻性能</b> .....	65
6-1 试验概况 .....	66
6-2 钢纤维混凝土与既有混凝土黏结面抗冻性能 .....	68
6-3 聚丙烯纤维混凝土与既有混凝土黏结面抗冻性能 .....	78
6-4 纤维混凝土与既有混凝土黏结面冻融劈拉强度计算公式 .....	86
6-5 小结 .....	87
<b>第 7 章 纤维混凝土与既有混凝土黏结面抗渗性能</b> .....	89
7-1 试验概况 .....	89
7-2 纤维混凝土与既有混凝土黏结面的渗流特性及相关参数 .....	93
7-3 钢纤维混凝土与既有混凝土黏结面抗渗性能 .....	95
7-4 聚丙烯纤维混凝土与既有混凝土黏结面抗渗性能 .....	99
7-5 纤维混凝土与既有混凝土黏结面平均渗透系数计算公式 .....	103
7-6 小结 .....	103
<b>第 8 章 纤维混凝土与既有混凝土黏结面 II 型断裂性能</b> .....	105
8-1 试验概况 .....	105
8-2 钢纤维混凝土与既有混凝土黏结面 II 型断裂性能 .....	108
8-3 聚丙烯纤维混凝土与既有混凝土黏结面 II 型断裂性能 .....	115
8-4 纤维混凝土与既有混凝土黏结面 II 型断裂韧度计算公式 .....	122
8-5 小结 .....	123
<b>第 9 章 纤维混凝土与既有混凝土黏结收缩性能</b> .....	124
9-1 试验概况 .....	125
9-2 新混凝土与既有混凝土黏结收缩力学模型 .....	126
9-3 纤维混凝土与既有混凝土黏结收缩性能 .....	129
9-4 小结 .....	139
<b>参考文献</b> .....	141

# 第 1 章 绪 论

## 1-1 概 述

混凝土结构由于具有承重、耐火、耐久、经济适用、易于成型等优点,广泛应用于土木、水利、交通、国防等大型基础设施中,成为当今世界上用途最广、用量最大的建筑结构形式,取得了良好的经济效益和社会效益。据初步估计,目前全世界每年生产的混凝土材料超过 100 亿 t,我国现有的各种建(构)筑物的总面积至少在 100 亿  $\text{m}^2$  以上,其中绝大多数是混凝土结构。如世界十大超巨型水利工程之一的三峡水利枢纽工程,其主体建筑物,如大坝、船闸、升船机、电站厂房等均为混凝土结构,整个工程混凝土浇筑量约为 2941 万  $\text{m}^3$ ,最高年浇筑混凝土达 400 余万  $\text{m}^3$ 。根据预测,在 21 世纪以至今后更长的一段时间内,混凝土材料仍将是最主要的建筑材料,混凝土结构仍有广阔的发展和 application 前景。

混凝土的使用已有百余年的历史。我国在 1949 年后大规模兴建的混凝土工程已历经了半个多世纪。这些既有的混凝土结构在使用过程中,由于各种使用荷载及侵蚀环境的作用,已相继产生了相当严重的老化、病害等耐久性问题,严重影响了建筑物的正常使用,甚至危及人民的生命财产安全。常见的混凝土结构耐久性病害类型主要有:使用环境引起的混凝土碳化、冻融和腐蚀;设计缺陷和使用功能改变导致的混凝土开裂、变形过大及钢筋锈蚀等;自然和人为的突发性灾害(地震、爆炸、火灾、水灾等)造成的混凝土破坏;施工质量和原材料缺陷引起的混凝土碱-骨料反应及物理磨损破坏等。

国内外统计资料表明,由于混凝土耐久性病害而引起的损失是巨大的,而且问题将越来越严重。美国国家材料顾问委员会 1987 年提交的混凝土耐久性报告指出,20 世纪 50 年代以后修建的混凝土工程,尤其是混凝土桥面板这类工作环境较为严酷的结构,出现了病害、开裂和严重破坏,其中部分使用不到 20 年,就已经产生了不同程度的破坏,在 57.5 万座钢筋混凝土桥中,50% 以上出现腐蚀破坏,40% 承载力不足,需进行修复加固处理,且每年还将增加 3.5 万座。英国建造在海洋及含氯化物介质环境中的混凝土结构,因钢筋锈蚀和混凝土剥落需要重建和加固的占 1/3 以上。在日本,由于较多地区采用海砂作为混凝土的细骨料,钢筋锈蚀已成为严重问题,冲绳地区 177 座桥梁的调查表明,桥面板和钢筋混凝土梁的损坏率已达 90% 以上;日本的新干线使用不到 10 年,就出现了大面积的混凝土开裂、剥蚀



现象。

我国混凝土结构的老化病害问题也相当严重。建国初期大规模修建的大型水利及工业民用基础设施中的混凝土结构大都经过了近 50 年的运行,正逐渐进入老化病害严重期。另外,正常使用期内的混凝土结构也由于设计、施工及运行不当,特别是受到突发性的风灾、水灾、火灾及震灾等意外作用而造成损伤和病害。1985 年,原水电部混凝土耐久性调查组对全国大中型水工混凝土建筑物老化病害的调查结果表明,22% 的大型混凝土坝和 21% 的中小型钢筋混凝土水闸等存在冻融剥蚀破坏;45% 左右的大型混凝土坝和钢筋混凝土闸、涵洞、渡槽等出现了严重的混凝土裂缝、碳化、钢筋锈蚀等病害;68.7% 的泄水建筑物出现了冲刷磨损和汽蚀损坏。1981 年对我国华南地区 18 座钢筋混凝土码头的调查表明,尽管使用期仅 7~15 年,已有 16 座码头的混凝土侵蚀和钢筋锈蚀严重;新建的混凝土公路和大桥 5~10 年就要进行一次大修。1986 年国家统计局和建设部对全国 28 个省、市、自治区的 323 个城市和 5000 个镇进行的普查结果表明,已建房屋的 50% 进入老化阶段,有 23.4 亿  $\text{m}^2$  的建筑物面临耐久性问题,需要分批进行评估与加固。

处于老化、病害、损坏状况的混凝土结构,由于经济和社会因素,往往不便拆除重建,而是经过严格的鉴定和评估,在技术可行、经济合理的情况下进行维修与加固。对混凝土结构老化病害的鉴定、评估、维修加固已经成为一个新兴的行业,相应的维修加固费用也在逐年增加。美国 1998 年仅用于修复混凝土腐蚀破坏的费用就高达 2500 亿美元,近年来,每年用于维修或重建的费用估计达到 3000 亿美元;英国每年用于修复钢筋混凝土结构的费用高达 200 亿英镑;日本用于房屋维修方面的费用也高达 400 亿日元;德国用于旧建筑物维修加固的投资约占建设总投资的 45% 以上;瑞典每年用于桥梁耐久性修复的投资达 2800 万美元之多。

我国用于既有建筑物维修加固的投资也在逐年增加。有关资料显示,“一五”期间我国用于维修加固的投资仅为同期基本建设投资的 4.2%,“三五”期间达 27%，“四五”和“七五”期间分别达 31.7% 和 54%。自 1997 年以来,我国加固工程量年平均递增 30% 以上,到 2000 年,全国年修复加固工程已突破 100 万  $\text{m}^2$ ,建筑加固业已成为 21 世纪最为热门的行业之一。在理论研究和应用推广方面,我国制定了一系列相应的建筑物维修加固技术规范,并出版了大量与建筑物维修加固有关的参考书。

在混凝土结构的维修、加固和补强中,修复质量的好坏决定着结构的安全性和正常使用功能的发挥,也决定着维修、加固和补强的效益。混凝土结构加固修复工程通常包括结构检测鉴定与评估和加固设计与施工等多个环节,涉及材料、技术和管理等多方面的因素。工程中常用的混凝土结构加固方法有:黏钢加固、加大截面加固、外包钢加固、预应力加固及碳纤维增强聚合物加固等,这些方法已被列入有关标准,其中加大截面法是较为传统的加固方法,它以新混凝土加固既有混凝土结

构,以其抗火、经济及相互兼容等特点,在混凝土结构的维修、加固和改造中仍被大量使用,适用于水利工程和大体积混凝土结构,交通运输工程中混凝土路面、桥面等大面积混凝土结构,以及建筑工程中的梁、板、柱、墙和一般构筑物等多种混凝土结构的加固,但该方法涉及新混凝土与既有混凝土的黏结问题。

新混凝土与既有混凝土的结合面广泛存在于混凝土结构的加固、维修及新建结构中,如叠合结构的结合面;梁、板、柱等截面的加大;水利工程中大坝的加高与坝面修补;机场跑道、桥梁面板及混凝土路面的修补;混凝土结构施工缝;混凝土结构工程的后浇带和装配式整体结构等。在混凝土结构的维修、加固和改造中,新混凝土与既有混凝土的黏结状态直接关系到维修和加固改造工程的质量。修补后新混凝土与既有混凝土能否很好的工作在很大程度上取决于新混凝土与既有混凝土界面的黏结性能。不少维修加固工程因为新混凝土与既有混凝土黏结不好而影响了工程的质量和耐久性。因此,研究新混凝土与既有混凝土的黏结性能有着十分重要的理论意义和实用价值。

新混凝土与既有混凝土黏结性能受多方面因素的影响,目前国内外围绕这一课题开展了一些试验研究和理论分析,但绝大多数研究所采用的新混凝土为普通混凝土,而对纤维混凝土与既有混凝土的黏结性能则很少涉及。纤维混凝土是一种新型复合建筑材料,与普通混凝土相比,纤维混凝土具有优良的抗拉、抗弯、抗剪、抗裂、阻裂、耐冲击、抗疲劳、高韧性等性能,将其作为修补材料,能提高修补结构的物理力学性能,这对于使用环境恶劣、受荷复杂的混凝土结构来说无疑是一种理想的修补材料。目前,纤维混凝土已广泛应用于混凝土修补、加固工程中,如隧洞和护坡的喷锚支护;公路路面、桥面、机场道面、码头堆场铺面、工业建筑地坪等的修补;混凝土溢流坝面、泄水建筑物等的表面修补。纤维混凝土在大量的既有混凝土修补和加固工程中的实际应用,提出了研究纤维混凝土与既有混凝土黏结性能这一新的课题。

## 1-2 研究现状

新混凝土与既有混凝土黏结补强加固方法在实际工程中的应用早于其机理研究,大量需要补强加固的既有混凝土结构又促进了新混凝土与既有混凝土黏结机理和补强加固方法的深入研究。桥梁、路面、停车场、火灾后结构等不同结构形式、不同使用条件下的新混凝土与既有混凝土黏结加固的实例丰富了研究内容。由于新混凝土与既有混凝土黏结性能研究关系到混凝土结构的维修、加固和改造,具有很强的工程背景和实用意义,有关这方面的理论研究正在不断完善和深入。

1991年,美国混凝土学会(American Concrete Institute, ACI)曾在香港召开过专门的国际会议讨论旧建筑物的检测、维修和加固,新混凝土与既有混凝土黏结

性能是讨论内容之一。1993年4月,在瑞士也举行了新混凝土与既有混凝土黏结的专题学术会议。日本在1995年阪神大地震后,专门组织开展了新混凝土与既有混凝土黏结性能的研究。新混凝土与既有混凝土黏结性能研究涉及很多方面的问题,国内外对其黏结性能和工程应用技术已进行了一系列研究,在新混凝土与既有混凝土黏结面宏观力学性能和微观结构等方面取得了一定的研究成果。研究表明,新混凝土与既有混凝土的黏结性能和新混凝土与既有混凝土本体的强度、黏结面的处理方法、黏结面的粗糙度、界面剂的类型、黏结面的方位及环境条件等因素有关,一般情况下黏结面的强度低于新混凝土与既有混凝土本体相应的强度。

国内外对新混凝土与既有混凝土黏结力学性能的研究主要集中在以下几个方面:新混凝土与既有混凝土立方体黏结试件劈拉强度试验和直接抗拉强度试验;新混凝土与既有混凝土黏结面的剪切强度试验,包括Z型试件的单剪、拉剪、压剪、拉压剪试验及小型试件的双面剪切试验等;新混凝土与既有混凝土黏结的抗折(弯)强度试验;新混凝土与既有混凝土黏结的拉拔强度试验;新混凝土与既有混凝土黏结的断裂性能研究;高温下新混凝土与既有混凝土的黏结性能研究;新混凝土与既有混凝土黏结面的抗冻及抗渗性能研究;用超声波无损检测方法检测评估黏结质量及数值计算方法研究等。已有的研究成果表明,在常温条件下,新混凝土与既有混凝土黏结劈拉强度达到新混凝土相应强度的62%~75%;黏结抗折(弯)强度达到新混凝土抗折强度的47%~53%;新混凝土与既有混凝土黏结面的抗剪强度达到新混凝土抗剪强度的17%~38.5%。

在新混凝土与既有混凝土黏结之前,应对既有混凝土表面进行处理,以提高其相互之间的黏结强度。目前对新混凝土与既有混凝土黏结面的处理方法国内外还没有相应的标准或规范可循。美国内务部垦务局编制的《混凝土手册》要求在补浇新混凝土之前,要用铁凿和其他工具把松动的、损伤的和未胶结好的混凝土全部清除掉,然后用水砂枪、风动凿岩机或其他适当的方法打毛、清扫干净并干燥;我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)要求根据叠合式受弯构件的叠合面所受剪力的大小进行处理,常用的方法有人工叠合面(即用人工方法加工成有规则的凹凸型叠合面或锯齿型叠合面)和自然粗糙面(即施工中采用混凝土振捣后不加抹平而自然形成的有一定凹凸起伏不平的叠合面),必要时加配构造钢筋。

在科研及工程实践中,对新混凝土与既有混凝土黏结面常用的处理方法有:人工凿毛法、高压水射法、化学腐蚀法、喷砂(丸)法及机械刻痕法等,以清除既有混凝土表面的污痕、油迹、残渣及附着物,改善新混凝土与既有混凝土之间的黏结性能。对于经粗糙处理后的新混凝土与既有混凝土黏结面,如何定量评定其粗糙程度,并使其满足良好界面黏结性能的要求,是新混凝土与既有混凝土黏结性能评价及预测的关键。相关文献报道中关于黏结面粗糙度的定量评定方法主要有:灌砂法、分数量法、粗糙度测定仪法、硅粉堆落法和粗骨料暴露比率法等,其中灌砂法是一种

简单易行的方法。一般认为,在一定的粗糙度范围内,粗糙度越大,其黏结效果越好,但过大的粗糙度反而会降低新混凝土与既有混凝土的黏结性能。

新混凝土与既有混凝土结构黏结修补失效大多数情况下都是由于两者之间局部或全部未黏结好,而两者之间所产生的黏结力大小与新混凝土性能、既有混凝土是否经过妥善处理及所使用的黏结剂有关。黏结剂的组分是形成黏结面结构的主要因素。目前,黏结剂已广泛应用于新建结构的各种类型施工缝处理及修补结构中新混凝土与既有混凝土结合面处理上。研究人员对水泥净浆、聚合物浆体、聚合物水泥浆和环氧水泥浆四种黏结剂的抗压强度、抗弯强度、黏结强度、弹性模量、热膨胀效应等物理特性进行了试验研究,认为黏结材料的弹性模量与相邻混凝土相接近时效果最为理想,黏结层厚度在3~6mm之间时,黏结厚度对黏结强度影响很大,过厚的黏结层将使黏结强度明显降低。常用的界面剂有水泥基类黏结剂、环氧基类黏结剂和聚合物类黏结剂等,不同的界面剂对黏结性能的改善程度不同。黏结剂在新混凝土与既有混凝土黏结中的物理化学作用有待进一步研究。

通过对新混凝土与既有混凝土黏结面的微观结构分析认为,新混凝土与既有混凝土黏结面上存在机械咬合力、范德华力、表面张力和化学力。新混凝土与既有混凝土的黏结面可分为扩散层、强效应层和弱效应层三个区域,界面的黏结力主要来自于机械咬合力。研究人员通过对黏结面的电镜扫描分析,对界面的微观结构与宏观黏结力学性能的关系进行了初步探讨。

新混凝土收缩产生的微裂缝是新混凝土与既有混凝土黏结面黏结强度降低的主要原因之一,所以通常应选择收缩小的材料。在既有混凝土表面补浇新混凝土时,应使新浇的混凝土比既有混凝土高一个强度等级,以减小新混凝土上的收缩,降低收缩应力,保证新混凝土与既有混凝土之间的黏结质量。采用低收缩、高强度、低孔隙率的新混凝土是保证黏结面黏结质量的关键。相关研究认为,修补用新混凝土中加碳纤维能明显提高新混凝土与既有混凝土之间的黏结性能,其原理是加入碳纤维后使新混凝土的收缩减小。有文献建议采用预铺骨料混凝土,又叫PA混凝土(preplaced aggregate concrete),认为PA混凝土收缩非常小,因而具有良好的黏结性能。PA混凝土与待修补构件的混凝土采用同一配比,它们的强度、弹性模量等物理力学性质相同,使新混凝土与既有混凝土能协同工作,而且工程应用中施工也比较方便。有机聚合物及其改性材料作为修补材料也有广泛的研究和应用。许多学者认为修补材料的力学性能与既有混凝土一致或相近有利于新混凝土与既有混凝土的黏结。

目前,国内外新混凝土与既有混凝土黏结性能研究所采用的新混凝土多为普通混凝土,纤维混凝土很少涉及。纤维混凝土用于既有混凝土黏结修补有其自身的优点,已在实际工程中大量采用。本书结合前人的研究工作,围绕纤维混凝土与既有混凝土黏结剪切强度、劈裂抗拉强度,黏结面抗冻、抗渗性能及新混凝土与既有混凝土黏结断裂性能,开展了纤维混凝土与既有混凝土黏结性能的研究。

### 1-3 主要研究内容

既有混凝土的黏结修补既有材料和施工工艺的问题,又有设备机具的问题,涉及材料学、工艺学和结构工程学等多种学科的理论和技术,修补的难度有时比重建还要困难,对材料的要求也很苛刻。本书在国内外学者对普通混凝土与既有混凝土黏结性能研究的基础上,对纤维混凝土与既有混凝土的黏结性能进行了系统的试验研究和理论分析,主要内容如下:

(1) 对混凝土结构常见缺陷进行了综述与分析,寻找混凝土缺陷的“病因”;在国内外研究基础上,对新混凝土与既有混凝土的黏结面处理及评定方法进行分析与总结,为新混凝土与既有混凝土黏结性能的研究奠定基础。

(2) 进行了多组纤维混凝土与既有混凝土 Z 型黏结试件及整体试件的剪切试验,主要探讨纤维类型、纤维掺量、界面粗糙度、界面剂类型等因素对黏结剪切性能的影响,研究了纤维混凝土与既有混凝土黏结剪切机理,建立了纤维混凝土与既有混凝土黏结面剪应力-剪切滑移关系式,提出了纤维混凝土与既有混凝土黏结剪切强度的计算公式,为纤维混凝土在既有混凝土黏结修补与加固工程的应用提供参考。

(3) 根据纤维混凝土与既有混凝土黏结立方体试件的劈拉试验,探讨了纤维类型、纤维掺量、界面粗糙度、界面剂类型等因素对黏结劈拉强度的影响规律,为进一步研究黏结抗拉机理提供了系列的试验依据,提出了纤维混凝土与既有混凝土黏结劈拉强度的计算公式。

(4) 设计了适用于 II 型断裂的带切口的双面直接剪切试件,进行了若干个纤维混凝土与既有混凝土黏结试件的 II 型断裂试验,分析了各因素对黏结面 II 型断裂性能的影响,探讨了黏结面断裂损伤机理,建立了纤维混凝土整体试件及纤维混凝土与既有混凝土黏结试件 II 型断裂韧度的计算公式。

(5) 进行了一系列纤维混凝土与既有混凝土黏结立方体试件冻融循环后的劈拉试验,探讨了纤维混凝土与既有混凝土黏结面的冻融损伤机理,建立了冻融循环条件下纤维混凝土与既有混凝土黏结劈拉强度计算公式。

(6) 采用纤维混凝土与既有混凝土黏结复合圆台体试件,进行了一系列黏结试件的抗渗试验,主要考察了各因素对黏结面渗透性的影响,探讨了黏结面的渗流特性及层面力学参数,如黏结面等效水力隙宽、渗透系数及渗透规律等。

(7) 进行了一系列纤维混凝土整体试件的自由收缩试验及纤维混凝土与既有混凝土黏结试件的约束收缩试验,分析了纤维类型和纤维掺量等因素对黏结约束收缩的影响及新混凝土与既有混凝土收缩差异对黏结性能的影响。建立了纤维混凝土自由收缩应变的统一计算模式和新混凝土与既有混凝土黏结的约束收缩模型。

## 第2章 既有混凝土结构常见缺陷及其成因

### 2-1 既有混凝土结构常见缺陷

混凝土结构在使用过程中,随着使用年限的增长,在人为和环境作用的影响下,其内部和外部常常出现各种质量问题,具体表现为各种缺陷的存在。随着缺陷的不断发展,由表及里,由量变到质变,最终将导致混凝土结构的破坏,造成灾害性事故,给国家和人民带来难以弥补的灾难与损失。

混凝土结构因缺陷而产生的现象有以下几种:

(1) 裂缝。裂缝是最常见的混凝土缺陷之一,其对建筑物的危害很大,严重的会恶化结构应力状态,破坏其整体性和抗渗性,危及建筑物的安全运行;轻微的也会影响建筑物的耐久性和美观,有的还会发展成为严重裂缝。

(2) 内部架空。内部架空是一种隐蔽性缺陷,它的存在将降低混凝土的密实性、抗渗性、抗冻性、强度和容重。当架空出现在受力钢筋附近时,会降低混凝土对钢筋的握裹力;靠近混凝土过水建筑物溢流面时,易导致溢流面磨损和气蚀破坏。

(3) 表面不平整与空蚀磨损。这类缺陷主要有蜂窝麻面、外形尺寸走样、高低不平和错台、陡坎、磨损、冲槽、冲坑、气蚀坑、气蚀洞等。此类缺陷轻则影响建筑物的美观,重则影响建筑物的泄流性能,危及建筑物的安全运行。

(4) 渗漏溶蚀和化学侵蚀。坝体渗漏亦是常见的混凝土缺陷,它给土工混凝土建筑物带来了一系列的不利影响,危及建筑物的安全运行,会使建筑物产生溶出性侵蚀,即外渗水将水泥中的氧化钙溶化析出,变成氢氧化钙,在出水中形成碳酸钙结晶等溶蚀状态,从而使混凝土的强度下降。

(5) 材料的强度降低,构件的承载力或截面刚度减小。混凝土硬化后,达不到相应龄期的设计强度,给建筑物带来了极大的隐患,并最终影响结构物的整体强度,降低结构物的使用寿命。

此外,混凝土结构的常见缺陷还有冻融破坏、海水侵蚀等,这在我国北方寒冷地区和沿海地区修建的混凝土建筑物中经常遇到。

混凝土结构常见缺陷按其产生位置可分为以下几类:

#### 1) 内在质量缺陷

(1) 强度不足。混凝土实际强度低于设计强度值。

(2) 耐久性不足。混凝土耐久性指标低于耐久性指标设计值。

(3) 保护性能不良。钢筋混凝土结构的保护层被破坏或混凝土本身的保护性能不良,钢筋发生锈蚀,铁锈膨胀使混凝土开裂造成钢筋暴露现象。

### 2) 表面质量缺陷

(1) 麻面。混凝土结构或构件表面呈现许多小凹点。

(2) 蜂窝。混凝土结构或构件形成许多有蜂窝状的窟窿,骨料间有空隙存在。

(3) 露筋。钢筋露在混凝土外。

(4) 孔洞。混凝土结构或构件中存在空隙,局部或全部没有混凝土。

(5) 缝隙及夹层。缝隙及薄夹层将混凝土结构或构件分成几个不连接的部分。

(6) 缺棱掉角。结构或构件及孔洞直角边上的混凝土局部残损掉落。

(7) 板面不平整。混凝土板的表面不平整,厚度不均匀。

(8) 变形。混凝土构件或结构的外形竖向变形或表面平整度超过允许偏差值。

### 3) 混凝土裂缝

(1) 干缩裂缝。多为表面性,宽度为 0.05~0.2mm,其走向没有规律性。一般是混凝土经过一段时间的露天养护后在表面或侧面出现,并随温度和湿度的变化而逐渐发展。

(2) 温度裂缝。多发生在施工期间,裂缝的宽度受温度的影响较大,冬季较宽,夏季较窄。裂缝走向无规律,深进和贯穿的温度裂缝对混凝土有很大的破坏性,宽度一般在 0.5mm 以下。

(3) 不均匀沉降裂缝。大多数属于贯穿性裂缝,其走向与沉降情况有关,一般走向与地面呈 40°~90°方向发展。裂缝的宽度与荷载的大小有较大关系,并且与不均匀沉降值成正比。

上述缺陷和损伤往往会严重影响混凝土建筑物的整体性和耐久性,使其整体承载能力严重降低,缩短了建筑物的使用寿命。

混凝土结构缺陷所涉及的方面非常广泛,其形成原因也相当复杂,主要有以下几个方面:

#### 1) 材料选配不当

常见因素有水泥过期或品种选用不当;混凝土配比不良;水泥、骨料含过量有害物质;碱-骨料反应;外加剂使用不当;水泥水化热过高;钢筋技术性能不良等。其中多数属化学性缺陷。

#### 2) 施工违反操作规程

常见因素有搅拌、运输时间过长;振捣不良;浇筑速度过快;塑性混凝土下沉;施工缝接茬处理差;初期养护不当,早期受冻;钢筋骨架构造不当(主箍筋配置、主箍筋间距、主筋搭接焊接锚固、辅筋和预埋件问题等);乱踩配筋致使保护层减小;模

型板刚度不足;模板支架下沉或不稳;过早拆模等。其中多数属物理性缺陷。

### 3) 构件受力、变形使内力超越材料强度

常见的受力有拉伸(中、偏拉),压缩(中、偏压、局压),弯曲(少筋、适筋、超筋),剪切(少箍、适箍、超箍、冲切),扭转等状态。常见的变形主要由不均匀沉降、收缩和温度变形受到约束等原因引起。它们所造成的缺陷均属物理性缺陷。

### 4) 环境因素影响

常见因素有环境的温湿度变化和差异、混凝土碳化、钢筋腐蚀、地震作用、火灾袭击或构件表面遭灼热等。其中有些属化学性缺陷,有些则是物理性缺陷。

混凝土结构缺陷形成原因既有物理方面的,也有化学方面的,或者两者兼而有之。如果不考虑人为因素的影响,混凝土结构缺陷形成的原因主要有混凝土碳化、碱-集料反应、冻融破坏、侵蚀破坏、冲磨剥蚀等。

## 2-2 混凝土碳化

混凝土的基本组成是水泥、水、砂和石子,其中的水泥与水发生水化反应,生成的水化物(称为水泥石)自身具有强度,同时将散粒状的砂和石子黏结起来,成为一个坚硬的整体。在混凝土的硬化过程中,大约 1/3 的水泥将发生水化反应生成氢氧化钙,氢氧化钙在硬化水泥浆体中结晶,或者在其孔隙中以饱和水溶液的形式存在。氢氧化钙的饱和溶液是 pH 为 12.6 的碱性物质,所以新鲜的混凝土呈碱性。

然而,大气中的二氧化碳却时刻在向混凝土内部扩散,与混凝土中的氢氧化钙发生作用,生产碳酸盐或其他物质,从而使水泥石原有的强碱性降低,pH 下降到 8.5 左右,这种现象称为混凝土的碳化。

在某些条件下,混凝土的碳化会增加其密实性,提高混凝土的抗化学腐蚀能力,但由于碳化会降低混凝土的碱度,破坏钢筋表面的钝化膜( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),使混凝土失去对钢筋的保护作用,造成混凝土中钢筋的锈蚀。钢筋混凝土结构中,钢筋之所以不锈蚀是由于混凝土对它有保护作用。未经碳化的混凝土,pH 高达 12 以上,使钢筋表面形成一层很薄但致密的钝化膜,保护钢筋不发生锈蚀。但随着碳化反应的进行,混凝土中氢氧化钙含量减少,pH 逐渐降低。当 pH 小于 11.5 时,钝化膜即开始破坏,从而使钢筋直接接触到水分和氧气而锈蚀。钢筋锈蚀的产物为氢氧化铁,体积较原来增大 2~3 倍,在混凝土内部产生膨胀应力。混凝土的特性是耐压不耐拉,因此保护层沿钢筋产生顺筋裂缝,这样水分和氧气更易进入,加剧钢筋锈蚀,导致混凝土剥落甚至结构物破坏。同时,混凝土碳化还会加剧混凝土的收缩,这些都可能使混凝土产生裂缝和结构的破坏。

混凝土的碳化是一个复杂的物理化学过程,伴随着二氧化碳气体向混凝土内部扩散,溶解于混凝土孔隙内的水,再与各水化产物发生碳化反应。研究表明,混



混凝土的碳化速度取决于二氧化碳气体的扩散速度及二氧化碳与混凝土成分的反应。二氧化碳气体的扩散速度又受混凝土本身的组织密实性、二氧化碳气体的浓度、环境湿度、试件的含水率等因素的影响,所以碳化反应受混凝土内孔溶液的组成、水化产物的形态等因素的影响。这些因素可归结为与混凝土自身相关的内部因素和与环境相关的外界因素。

水灰比是决定混凝土性能的重要参数,对混凝土碳化速度影响极大。众所周知,水灰比基本上决定了混凝土的孔结构,水灰比越大,混凝土内部的孔隙率就越大。混凝土中的孔隙主要有胶孔、气孔和毛细孔。胶孔的半径很小,二氧化碳分子很难自由进出;二氧化碳扩散均在内部的气孔和毛细孔中进行。因此,水灰比一定程度上决定了二氧化碳在混凝土中的扩散速度,水灰比越大,孔隙率越高,二氧化碳的扩散越容易,混凝土碳化速度越快。国内外进行了大量的快速碳化试验和长期暴露试验,研究水灰比与混凝土碳化速度的关系,认为混凝土碳化速度与水灰比大致呈线性关系。

水泥用量直接影响混凝土吸收二氧化碳的量。混凝土吸收二氧化碳的量取决于水泥用量和混凝土的水化程度,水泥用量越大,其碳化速度越慢。Meryer 等通过试验给出了不同水泥用量的碳化深度比值。同济大学也进行了快速碳化试验,得出碳化与水泥用量指数的倒数成正比。

混凝土施工质量对混凝土的质量有很大的影响。混凝土浇筑、振捣和养护不仅影响混凝土的强度,而且直接影响混凝土的密实度。因此,施工质量也是影响混凝土碳化的一个重要方面。实际调查结果表明,在其他条件相同时,施工质量好,混凝土强度高,密实性好,其抗碳化性能强;施工质量差,混凝土表面不平整,内部有裂缝、蜂窝、孔洞等,增加了二氧化碳在混凝土中的扩散路径,使混凝土的碳化速度加快。日本学者白山将施工质量划分为优、良、一般、差四个等级,其相应的碳化速度比为 0.5 : 0.7 : 1.0 : 1.4。混凝土养护状况对混凝土的碳化也有一定影响。混凝土早期养护不良,水泥水化不充分,使表层混凝土碳化渗透性增大,碳化加快。山东建筑科学院进行了标准养护时间与混凝土碳化速度的快速碳化试验,结果表明,养护时间对碳化速度影响较大。

环境湿度对混凝土碳化速度有很大影响。相对湿度的变化决定着混凝土孔隙水饱和度的大小,湿度较小时,混凝土处于含水率较低的状态,虽然二氧化碳气体的扩散速度较快,但由于碳化反应所需水分不足,因此碳化速度较慢。湿度较高时,混凝土的含水率较高,阻碍了二氧化碳气体在混凝土中的扩散,因此碳化速度也较慢。当相对湿度为 50%~60%时,混凝土的碳化速度最快,因为此时混凝土的孔隙尚未充满水分,二氧化碳可以向混凝土内自由扩散,而孔隙中的湿度也为氢氧化钙向外扩散提供了必要条件,从而使化学反应进行较快;当相对湿度小于 25%时,混凝土处于干燥状态,虽然二氧化碳向混凝土内扩散较快,但水分不足,化