

新老混凝土粘结机理 研究与工程应用

赵志方 周厚贵 袁群 马金刚 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

新老混凝土粘结机理 研究与工程应用

赵志方 周厚贵 袁群 马金刚 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

新老混凝土粘结机理研究与工程应用/赵志方等著. - 北京: 中国水利水电出版社, 2003

ISBN 7-5084-1691-0

I. 新… II. 赵… III. 混凝土-粘结性-研究 IV. TU528.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 080459 号

书 名	新老混凝土粘结机理研究与工程应用
作 者	赵志方 周厚贵 袁群 马金刚 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 6.125 印张 148 千字
版 次	2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—2900 册
定 价	16.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



序

研究我国水利与土木工程的安全性及耐久性问题，具有十分重大的意义。鉴于历史的原因，1976年以前在工程抗震方面缺乏系统研究，为此曾付出了较大的代价。由国家科学技术部正式立项的“国家攀登计划B”以几种典型的与我国国民经济息息相关的重大结构物（高层建筑、高坝和大型桥梁）为依托，以结构“生命过程”三阶段（施工、使用、老化）为主线，以基础研究为平台，结合工程实际，对结构的安全性及耐久性进行系统的研究。

目前我国正在进行世界上最大规模的基础建设，如举世瞩目的长江三峡水利枢纽和南水北调工程等，均需强有力的基础科学研究和先进的工程技术作支持。

新老混凝土粘结研究课题是混凝土结构延展和改进的关键一环，它涉及面广、应用量大，曾先后获得国家基础性研究重大项目（攀登计划B）“重大土木与水利工程安全性及耐久性基础研究”的5.2子题——“新老混凝土粘结机理和测试方法”、国家自然科学基金“新老混凝土粘结机理研究”（批准号：59778045）和烟台大学青年基金“新老混凝土粘结抗拉特性的试验研究和数值分析”（批准号：TM01Z4）的资助，前

后历时7年，取得了丰富的研究和应用成果，为新老混凝土粘结课题的研究和工程应用奠定了基础。

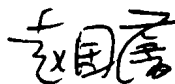
上述课题均对新老混凝土粘结机理进行了大量的基础性和应用研究。从微观的粘结力形成机理到宏观的粘结面抗拉、抗剪、复合受力、断裂、收缩乃至长期静动力性能，均进行了系统的试验研究。其试件之多，覆盖范围之广，在国际上亦不多见。

新老混凝土粘结研究的主要成果已发表在《土木工程学报》、《建筑结构学报》、《水利学报》、《工程力学》等国内核心期刊上，并已有多篇被“美国工程索引EI”收录。此外，还应用于长江三峡水利枢纽等实际工程，取得可喜成果。同时通过这项研究工作也为国家培养了一批专业技术后备人才。

中国葛洲坝集团公司在我国水利水电工程施工中具有雄厚的实力，是正在建设的三峡工程的主力军，在新老混凝土粘结方面有成熟的施工技术和丰富的施工经验。更为可贵的是，在三峡工程施工中，该集团结合上述基础性研究成果做了大量成功的应用性研究。

成果和经验需要总结，我们十分高兴地看到这本《新老混凝土粘结机理研究与工程应用》面世，并衷心希望今后能有更多更好的科研成果应用于工程实际，为祖国的建设贡献力量。

中国工程院院士



2003年8月

前 言

混凝土结构是当代土木和水利工程中应用最多的结构类型，其结构延展、加固和改造是一个涉及面广、工程量大的十分重要的工程领域。有不少工程因新老混凝土粘结不好，致使新补混凝土很快产生裂缝、脱空和剥落，从而影响工程质量和耐久性。因此，研究新老混凝土粘结机理和关键技术是混凝土结构安全性和耐久性基础研究的重要课题。

为此，国家在基础性研究重大项目“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”（攀登计划B）中，设立了“新老混凝土的粘结机理和测试方法研究”课题，“国家自然科学基金”（批准号：59778045）也资助了这方面的研究。在赵国藩院士的指导下，在中国葛洲坝集团公司和烟台大学领导的支持下，前后历时7年，取得了相当的研究和应用成果。

本书以新老混凝土粘结面处理、粗糙度的测量方法、各种力学性能、粘结面的收缩和断裂特性的研究成果为主要内容，阐述新老混凝土粘结机理。并结合长江三峡工程，介绍成果的应用，同时还对南水北调中线源头工程——丹江口大坝加高中的新老混凝土粘结问题进行了有益的探索。

本书是中国葛洲坝集团公司和烟台大学等高校院所合作科研成果，是基础理论与重点工程项目紧密结合的成果，也是通过产学研结合推动先进生产力发展的创新成果。

全书共十二章，前十章为理论研究成果，后两章为工程应用。除本书的著者外，其中第八章为根据大连理工大学刘健博士的研究成果撰写，第九章为韩菊红博士撰写，张国才参与了第十一章、关云航参与了第十二章的撰写。王端明参与了本书的初审工作。

在本书出版之际，谨向国家基础性研究重大项目（攀登计划B）——“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”的首席科学家、清华大学教授刘西拉对本书的关心和指导表示衷心的感谢。同时，向为本书作序的赵国藩院士，向对本研究工作给予指导和帮助的大连理工大学教授黄承逵等，也一并表示真诚的感谢。

限于作者的水平和经验有限，本书定有不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2003年8月



内 容 提 要

研究新老混凝土粘结机理和关键技术，对混凝土结构的加固、扩建等工程具有重要意义。本书根据新老混凝土粘结面处理、粗糙度的测量方法、各种力学性能、粘结面的收缩和断裂特性等研究成果系统地阐述了新老混凝土粘结机理，并结合长江三峡工程，介绍成果的应用，同时还对南水北调中线源头工程——丹江口大坝加高中的新老混凝土粘结问题进行了有益的探索。

本书的内容既有理论研究，也有实践应用，对工程设计、施工具有较高的参考价值和指导作用，可供从事水利水电工程建设的广大工程技术人员借鉴，也可供有关大专院校师生和研究人员参考。

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 研究现状	3
第三节 研究方法及其成果	5
第二章 新老混凝土粘结面的处理	8
第一节 粘结面的处理方法	8
第二节 粘结面的进一步处理	12
第三节 高压水射法处理粘结面的实施过程	14
第四节 高压水射法处理粘结面的效果分析	15
第五节 结语	18
第三章 新老混凝土粘结面粗糙度的测量方法	19
第一节 概述	19
第二节 粘结面粗糙度的测量方法	20
第三节 灌砂法测量粘结面的粗糙度	23
第四节 分数维法测定粘结面的粗糙度	29
第五节 灌砂法与分数维法测定粘结面粗糙度之间的关系	38
第六节 结语	39
第四章 新老混凝土粘结的抗折性能	41
第一节 选用的材料及其配合比	41
第二节 抗折试件的制作	45

第三节	试验方法与抗折计算	47
第四节	试验结果及分析	48
第五节	粘结模型与粘结机理	60
第六节	结语	64
第五章	新老混凝土粘结的抗拉性能	65
第一节	抗拉性能试验	65
第二节	试验结果及粘结机理分析	74
第三节	结语	80
第六章	新老混凝土粘结的复合受力性能	82
第一节	试件制作	82
第二节	测试方法	85
第三节	试验结果及分析	87
第四节	结语	93
第七章	新老混凝土粘结剪切强度的塑性极限分析	95
第一节	剪切试验	95
第二节	塑性极限分析	100
第三节	剪切强度的回归分析	107
第四节	结语	109
第八章	新老混凝土粘结的收缩性能研究	110
第一节	新混凝土的约束收缩性能	110
第二节	新老混凝土约束收缩的力学性能分析	121
第三节	结语	128
第九章	新老混凝土粘结的断裂性能	130
第一节	试验简介	130
第二节	粘结面断裂韧度的试验结果及分析	138
第三节	粘结断裂韧度影响因素的显著性检验	149

第四节	粘结断裂韧度的多因素计算	153
第五节	粘结断裂韧度与粘结抗折强度的关系	154
第六节	结语	155
第十章	基于神经网络的新老混凝土粘结强度预测模型	157
第一节	粘结机理浅析	157
第二节	预测模型中影响因素的确定	159
第三节	神经网络预测模型的建立	160
第四节	结语	166
第十一章	新老混凝土粘结在长江三峡工程中的应用	168
第一节	概述	168
第二节	施工缝面处理	168
第三节	接缝材料	172
第四节	结语	174
第十二章	丹江口混凝土大坝加高工程中新老混凝土粘结问题的探讨	176
第一节	工程概况	176
第二节	粘结问题分析	178
第三节	技术措施	179
第四节	结语	183
参考文献		184

第一章 绪 论

第一节 概 述

混凝土结构广泛用于水利、建筑、交通、港口等工程。从雄伟矗立的水库大坝，到高耸入云的摩天大楼；从四通八达的高速公路，到通达全球的河海港口，混凝土结构处处都得到广泛的应用。混凝土工程已成为构筑现代文明大厦的“奠基石”。

混凝土的使用已有百余年的历史。我国 1949 年解放后大规模兴建的混凝土工程也已历经了半个多世纪。它们经历了无数风霜雪雨，受到自然界无情的物理、化学及生物作用，多已进入老化期，各种病害、事故频繁发生；即使新建的混凝土工程，也会因设计、施工及使用不当，导致混凝土出现蜂窝、空洞、裂缝甚至倒塌等，各种病害与缺陷亦屡见不鲜。20 世纪 80 年代，原水利电力部组织的调查表明：在全国 32 座大型混凝土坝及 46 座钢筋混凝土闸、涵、渡槽中，出现严重混凝土碳化及钢筋锈蚀的占调查工程总数的 40%~50%。有的水电站运行仅 10 年，部分构件的混凝土碳化深度已超过保护层厚度；有的水闸运行 20 年，碳化深度就已达 60mm。1972 年铁道部对全国 30~70 年代修建的 94 座隧道进行了调查，结果有 93.2% 的隧道混凝土衬砌开裂，裂缝长度占隧道总长度的 19.2%。至 20 世纪末，我国已建房屋就有 50% 已进入老化阶段，有 23.4 亿 m^2 的建筑物面临耐久性问题；仅 1958~1989 年间，就有 588 起房屋倒塌事故发生。在英国，1980 年的建筑维修改造工程占建筑工程总量的 2/3。在美国，50 万座高速



公路桥中,大约有 20 万座处于危险状态。现今美国新建筑业开始萧条,而维修改造业却方兴未艾。不仅如此,由于混凝土老化病害造成的经济损失也相当惊人。目前美国整个混凝土工程价值约 6 万亿美元,而今后每年用于维修或重建的费用预计将高达 3000 亿美元,1991 仅修复因耐久性不足而损失的桥梁就耗资 910 亿美元。英国每年用于修复钢筋混凝土结构的费用就达 200 亿英镑。日本目前每年仅用于房屋结构维修的费用即达 400 亿日元。

对混凝土老化病害的研究与防治已引起人们的高度重视。1970 年第六届国际预应力会议上明确指出:“混凝土的耐久性与其强度同等重要。”1987 年,国际桥梁与结构学会(IABSE)在巴黎召开了“混凝土结构的未来”国际会议;1988 年在丹麦召开了“混凝土结构的重新评估”国际会议。自 1976 年以来,由欧洲 RILEM 协会发起的建筑材料与构件的耐久性国际会议每 3 年举行一次。1991 年美国混凝土学会(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。日本 1995 年阪神大地震后,建设省专门组织有关建筑物修复加固的研究。在我国,1990 年建设部组织成立全国建筑物鉴定与加固委员会;1991 年全国钢筋混凝土标准技术委员会混凝土结构耐久性学组成立;1992 年中国土木工程学会混凝土与预应力混凝土学会混凝土耐久性专业委员会成立。

混凝土结构补强加固的方法有许多种,比较成熟的方法有加大截面法、外包钢法、外加预应力法及改变传力途径法。这些方法均已列入国家标准 CECS25:90《混凝土结构加固技术规范》中,其中加大截面法涉及到新老混凝土的粘结问题。在机场跑道、道桥路面等大面积混凝土改扩建和修补加固中,在老混凝土上铺筑新浇混凝土目前还是最为常用的方法,而施工

成败的关键是新老混凝土的粘结质量。以往,人们常根据经验对新老混凝土结合面进行处理,缺乏对其粘结力学性能的系统研究和分析,结果因新老混凝土粘结不牢导致加固失败的故事时有发生。因此,对新老混凝土的粘结性能进行研究非常必要。1995年,国家在基础性研究重大项目“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”(攀登计划B)中,就设立了“新老混凝土的粘结机理和测试方法研究”课题,“国家自然科学基金”(批准号:59778045)也资助了这方面的研究。除此之外,省市和各高校结合具体工程也开展了这方面的研究和实践工作。

鉴于新老混凝土粘结对改扩建及修补加固工程的可靠性具有重要作用,因此研究新老混凝土粘结机理与测试方法具有现实意义。

第二节 研究现状

新老混凝土粘结关键是粘结面的质量。粘结面打毛处理方式、粘结面粗糙度、新混凝土种类和配比、界面剂种类等都是影响粘结面性能的主要因素。

喷丸(砂)法、高压水射法处理粘结面具有效率高,不损伤周围老混凝土的特性,可获得较高的粘结强度,在机场跑道、道桥路面的修补和加固、加高已有水库坝体中有广阔的应用前景。人工打毛法、钢刷刷毛法具有施工简便、成本低廉的特点,但是易损伤周围的老混凝土,处理效果不及上述方法。另外,喷蒸气法、真空喷砂法、喷烧法、气锤凿毛法、机械切削法及酸浸蚀法也用来处理粘结面。一般说来,粘结面粗糙度越大,新老混凝土粘结强度越高。但是也有试验表明,过大的粗糙度并不能获得较高的粘结剪切强度。因此,定量评价粘结



面粗糙度就显得尤为重要。触针式平均深度法、灌砂法、硅粉堆落法、粗骨料暴露比例法等，都是评价粘结面粗糙度的方法。

为保证新老混凝土粘结面具有较好的粘结性能，修补补强所用新混凝土的强度应比老混凝土强度提高一个等级。为减少新混凝土的收缩，改进新老混凝土的粘结性能，在新混凝土中加入碳纤维、尼龙纤维和钢纤维，以及应用预铺骨料混凝土、收缩补偿砂浆和有机聚合物及其改性材料作为修补材料的研究工作亦逐步展开。

与不使用界面剂的新老混凝土粘结性能相比，水泥净浆、水泥砂浆、快硬铁铝酸盐水泥浆、掺膨胀剂的水泥浆及聚合物类界面剂，都可不同程度地改善新老混凝土的粘结微观结构，提高粘结强度。从粘结效果、成本及施工等方面综合考虑，水泥净浆是其中比较理想的一种界面剂。

新老混凝土粘结面在实际工程中会受到各种作用，因此掌握粘结劈拉强度、粘结弯折强度、粘结剪切强度、粘结多轴强度、粘结收缩性能及粘结抗渗性能等物理力学指标，是结构粘结加固设计及已加固结构安全性与耐久性评估的基础。对上述指标进行研究，应充分考虑前述影响因素，不仅要规范室内试验方法，而且也要尽可能制定统一的现场测定方法，使获得的数据客观，有可比性。除此之外，也有一些学者从断裂力学角度分析了新老混凝土的粘结机理及聚合物水泥砂浆与混凝土粘结界面的断裂性能，从试验与有限元计算两方面综合分析了界面的力学性能。

微观机理的研究是从本质上对新老混凝土粘结性能的揭示。一般认为，机械咬合力、范德华力及化学力是粘结作用力的主要来源。借助电镜观察，目前已对粘结层内的微观结构有了一定了解。有的学者将粘结层分为渗透层、强效应层及弱效



应层,并分析了老混凝土龄期、空隙率,新混凝土水灰比、种类及界面剂对强效应层厚度的影响。

第三节 研究方法及成果

一、研究方法

研究方法与技术路线如下。

(1) 查阅文献,调查国内外近年来的最新研究成果,归纳影响新老混凝土粘结的主要因素,并选出几种有工程应用价值的粘结面处理方法。

(2) 采用分形理论对新老混凝土粘结面粗糙度进行定量描述。

(3) 结合电镜观察结果,分析新老混凝土粘结面的微观结构。

(4) 试验研究粘结面的强度和变形性能,提出粘结面的破坏准则和本构模型。

(5) 试验研究新老混凝土的粘结约束收缩性能,分析混凝土粘结约束情况下的收缩变形规律及粘结面约束收缩应力的变化规律。

(6) 根据试验结果,建立粘结强度的神经网络预测模型。

(7) 试验研究粘结面的断裂性能,得到粘结面的Ⅰ型断裂韧度值。

二、研究成果

取得的研究成果如下。

(1) 采用高压水射法对新老混凝土粘结面进行冲毛处理试验,在不同喷射水压力下,得到不同粗糙度的粘结面。对此种



粘结面与人工凿毛面的粘结劈拉强度及整体混凝土的劈拉强度进行了对比分析。结果表明, 高压水射法是一种理想的粘结面处理技术。

(2) 定量评价粘结面的粗糙度对控制和预测新老混凝土粘结性能具有重要作用。采用灌砂法测量新老混凝土粘结面的粗糙度, 是简单实用的粗糙度测试方法。采用分形理论对粗糙度进行分数维研究, 经和灌砂法试验结果对比, 表明该法也可用来定量评价粘结面的粗糙度。

(3) 选取 1 年以上龄期的老混凝土制成新老混凝土粘结抗折试件 (试件尺寸: $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 550\text{mm}$, 试件数量: 多于 100)。选用 4 种界面处理方法得到 I、II、III、IV 型不同的粘结面。选用不同的水泥浆类界面剂: 水泥净浆、快硬铁铝酸盐水泥浆、掺 10% U 型膨胀剂的水泥浆。新混凝土选用: 普通硅酸盐水泥混凝土、尼龙纤维混凝土、钢纤维混凝土、快硬铁铝酸盐水泥混凝土。综合考虑上述影响因素, 对新老混凝土粘结的抗折性能进行系统的试验研究, 并阐述了粘结机理。

(4) 进行近百块新老混凝土粘结抗拉试件的试验研究, 探讨不同粘结面处理方法 (高压水射法和人工凿毛法)、粗糙度、新混凝土强度、浇筑方式、试验方法 (粘结劈拉和粘结轴拉试验) 对粘结抗拉性能的影响规律, 为阐明粘结抗拉机理提供系列的试验依据, 并为混凝土修补工程提供参考。

(5) 采用 Z 型和立方体型作为新老混凝土粘结试件, 对粘结的单拉、直剪、拉剪、压剪等多种强度性能进行试验研究, 提出了粘结面的破坏准则。

(6) 依据试验假定新老混凝土粘结层的剪切破坏机构, 在选用扩展的 Mises 屈服条件及库仑剪切破坏条件下, 利用塑性极限分析的上限定理, 推导出新老混凝土粘结层剪切强度的理论解, 确定影响粘结层剪切强度的因素。并进一步从破坏机理