

新老混凝土粘结 理论与研究

◎袁群 李立青 曹宏亮 乔连朋 著

中国建筑工业出版社

新老混凝土粘结理论与研究

袁 群 李立青 曹宏亮 乔连朋 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新老混凝土粘结理论与研究/袁群等著. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2014. 11
ISBN 978-7-112-17332-7

I. ①新… II. ①袁… III. ①混凝土-粘结性-研究
IV. ①TU528. 01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 226945 号

新老混凝土粘结是新建混凝土工程及维修加固工程中经常遇到的问题。本书详细叙述了粘结面粗糙度的测试评价方法、防碳化界面剂的配制、高耐久性新混凝土的配制、新老混凝土粘结的强度模型、新混凝土与碳化混凝土的粘结性能、混凝土冷缝的粘结性能、混凝土劈拉强度的新型测试方法——圆柱体横劈法及工程中碳化混凝土与未碳化混凝土的粘结性能等方面, 兼顾了理论研究与实际应用。

本书可为从事混凝土维修加固工作的科研与工程技术人员提供参考。

* * *

责任编辑: 王 梅 李天虹

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 刘梦然

新老混凝土粘结理论与研究

袁 群 李立青 曹宏亮 乔连朋 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
北京红光制版公司制版
廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 字数: 232 千字
2014 年 11 月第一版 2014 年 11 月第一次印刷
定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-17332-7
(26106)

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

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 研究现状	3
第三节 本书的主要内容	5
第二章 新老混凝土粘结面的粗糙度	10
第一节 引言	10
第二节 粘结面粗糙度的处理方法	10
第三节 粘结面粗糙度的度量方法	11
第四节 切槽法处理粘结面的工程实例	23
第五节 结语	25
第三章 防碳化界面剂的配制	28
第一节 引言	28
第二节 防碳化界面剂的配合比	28
第三节 防碳化效果分析	31
第四节 结语	34
第四章 高耐久性新混凝土的配制	37
第一节 引言	37
第二节 配合比设计	37
第三节 新混凝土的抗渗性	38
第四节 新混凝土的抗碳化性	40
第五节 结语	41
第五章 新老混凝土粘结的强度模型	44
第一节 引言	44
第二节 新老混凝土粘结剪切强度的塑性极限分析模型	44
第三节 新老混凝土粘结劈拉与抗折强度的神经网络模型	53

第四节 新老混凝土粘结强度影响因素的敏感性分析 60
 第五节 结语 64
 第六章 新混凝土与碳化混凝土的粘结性能 67
 第一节 引言 67
 第二节 新混凝土与碳化混凝土粘结的劈拉强度 67
 第三节 新混凝土与碳化混凝土粘结的抗折强度 72
 第四节 新混凝土与碳化混凝土粘结的斜剪强度 77
 第五节 新混凝土与碳化混凝土粘结强度的时间效应 82
 第六节 新混凝土与碳化混凝土粘结的抗渗性能 87
 第七节 新混凝土与碳化混凝土粘结的抗冻性能 92
 第八节 结语 96
 第七章 混凝土冷缝的粘结性能 98
 第一节 引言 98
 第二节 混凝土冷缝的劈拉强度 99
 第三节 混凝土冷缝的抗折强度 104
 第四节 混凝土冷缝的抗渗性能 108
 第五节 混凝土冷缝的抗冻性能 110
 第六节 冷缝对钢筋混凝土梁的抗弯影响 112
 第七节 冷缝对钢筋混凝土梁的抗剪影响 116
 第八节 结构中冷缝粘结强度的分布模型 118
 第九节 混凝土冷缝病害板梁结构安全性分析及补强加固 122
 第十节 结语 128
 第八章 工程中碳化与未碳化混凝土的粘结强度 131
 第一节 引言 131
 第二节 横劈法测强的有限元分析 131
 第三节 横劈法测强的试验研究 137
 第四节 碳化与未碳化混凝土粘结强度的横劈法研究 150
 第五节 结语 151

第一章 绪 论

第一节 概 述

混凝土结构由于其承重、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，被广泛用于水利、交通、工业民用等行业的建筑工程中，是支撑现代文明存在与发展的重要基石。

混凝土结构由于常年在恶劣的自然环境下运行，加上存在设计、施工及使用不当的因素，因此其老化病害情况频发，安全性和耐久性问题突出，造成的经济损失巨大。美国 2006 年统计资料显示，带病运行的桥梁 153879 座，约占桥梁总数的 25.8%；25% 以上的大坝服役年限超过 50 年，10 年后将提高到 50% 以上。目前美国整个混凝土工程价值约 6 万亿美元，每年用于维修或重建的费用预计高达 3000 亿美元。英国 1980 年的建筑维修改造工程占建筑工程总量的 2/3，仅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。瑞士每年仅用以桥梁混凝土检测与维护的费用就高达 8000 万瑞士法郎，若修理、更换费用将更高。在我国，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 多个乡镇的普查结果显示，已建房屋有 50% 进入老化阶段，23.4 亿 m^2 的建筑面临耐久性问题，需分批进行评估与加固。2008 年《全国病险水库除险加固专项规划》统计显示，全国共有病险水库 30413 座，占水库总数的 36.3%，这些水库大多建于 20 世纪 50 年代至 70 年代，普遍存在防洪标准低、质量差、年久失修等问题，直接威胁着水库的防洪安全。进入 21 世纪以来，我国大力推行城镇化建设，各项基础建设也正处于高潮期，大量的混凝土建筑如雨后春笋，拔地而起，在新建工程中，由于施工不当也常常出现裂缝、离析、蜂窝等各种病害。

混凝土结构耐久性问题的普遍性、严重性与紧迫性已使得混凝土结构耐久性的研究进入了前所未有的高潮，并朝系统化、国际化方向迈进。1960 年国际材料与结构研究所联合会 (RILEM) 成立了“混凝土中钢筋腐蚀”技术委员会 (12-CRC)，旨在推动混凝土结构耐久性的研究和发展，并于 1961 年和 1969 年分别召开了第六、七届水泥化学会议，使得混凝土结构耐久性问题成为国际学术会议和机构讨论的重要课题之一。1970 年第六届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。”1978 年~1993 年连续六次召开建筑材料与构件的耐久性国际学术会议；1988 年在丹麦召开了“混凝土结构的重新评估”国际会议；1989 年欧洲混凝土结构委员会发表了混凝土结构耐久性设计指南；1991 年美国 and 加拿大联合举行了第二届混凝土结构耐久性国际学术会议，同年美国混凝土学会 (ACI) 在香港专门讨论旧有建筑物的检测、修补与加固的国际会议；1987 年，

国际桥梁与结构协会 (IABSE) 在巴黎召开“混凝土的未来”国际会议, 并于 1993 年在丹麦哥本哈根召开了结构残余能力国际学术会议; 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; 2000 年前后在西班牙召开了“第五届混凝土耐久性国际会议”, 在新加坡召开了“结构缺陷的耐久性和修补”第六次国际会议; 2001 年 3 月国际桥梁结构协会 (IABSE) 代表 CEB、ECCS、FIP、RILEM 等组织在马耳他岛召开了“安全性、风险性与可靠性—工程趋势”国际学术会议; 2005 年苏格兰 Dundee 大学举办第六届国际混凝土会议, 其中提高混凝土耐久性为最重要的议题之一。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, 标志着我国混凝土结构耐久性的研究朝着系统化、规范化迈进了一大步; 建设部把混凝土结构耐久性作为“八五”科技攻关项目; 1994 年国家科委组织了国家基础性研究重大项目 (攀登计划) “重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”; 2000 年在杭州举行了土木工程学会第九届年会学术讨论会, 主题之一就是混凝土耐久性; 2001 年在北京举行的工程科技论坛上就混凝土耐久性问题进行了热烈讨论; 2002 年第五届水泥与混凝土国际会议在上海召开, 其中长江三峡工程开发总公司主持的主题为“三峡工程与耐久性”的技术研讨会最为引人注目; 2006 年沿海混凝土结构耐久性与对策国际研讨会在山东潍坊举行, 会上针对报告中的数据测试依据、日本海砂的使用情况、沿海建筑物的盐防措施等进行了广泛的交流。

为防治混凝土结构工程的老化病害, 除严格按照国家现行有关标准进行设计、施工及管理外, 还要有相应的修补补强措施, 而修补补强成败的关键是新老混凝土的粘结质量, 它是老化病害混凝土结构工程能否恢复功能及继续长效服役的重要基础, 因此对新老混凝土的粘结性能进行研究非常必要。另外, 混凝土冷缝是混凝土施工过程中常遇到的一种病害, 也是新老混凝土粘结的一种特例, 因此研究混凝土冷缝的粘结强度是评估其对混凝土结构损伤程度的基础, 也是对损伤混凝土结构进行加固的基础。基于此, 1999 年大连理工大学、汕头大学共同完成了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》之 5.2 课题“新老混凝土的粘结机理和测试方法研究”; 2000 年大连理工大学完成了国家自然科学基金项目“新老混凝土粘结机理研究” (59778045); 2008 年河南省水利科学研究院、郑州大学共同完成了河南省科研事业计划项目“混凝土冷缝对结构可靠性影响的试验研究” (0541110102); 2012 年河南省水利科学研究院、华北水利水电大学共同完成了河南省重点科技攻关项目“大型水工结构中碳化混凝土与修补材料粘结的关键技术研究” (092102310193)。除此之外, 其他高校及科研机构也就此领域开展了大量研究, 取得了丰富的成果。

综上所述, 开展新老混凝土粘结性能研究是老化病害混凝土结构评估与加固的基础工作, 具有重要的理论意义与工程应用价值。

第二节 研究现状

研究表明,新老混凝土的粘结机理非常复杂。一般认为新老混凝土粘结力同集料—水泥界面一样,主要来源于范德华力,因为水泥颗粒平均细度为 $30\mu\text{m}$,不可能在纳米级的毛细孔中水化而产生机械啮合作用。但有学者通过对新老混凝土粘结的宏观力学研究和微观结构分析,认为新老混凝土粘结除了存在范德华力外,还有化学作用力,而主要靠机械啮合力维系。机械啮合力由新老混凝土晶体互相交错抱合而形成,宏观上主要受老混凝土表面粗糙度影响,微观上主要由 3 方面引起:①新混凝土(或界面剂)的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 钙矾石,水化硅酸钙在老混凝土的大孔隙中生长;②新混凝土的水化硅酸钙凝胶毛刺以及小的针状钙矾石向外辐射进入老混凝土的毛细孔内;③老混凝土中未水化部分或未完全水化部分在新混凝土中生长长大。此外,还有学者把新老混凝土粘结界面的微观结构同集料—水泥界面进行对比,鉴于集料—水泥界面过渡区的扩散层、强效应层和弱效应层,提出了新老混凝土粘结界面微观结构模型,即渗透层、反应层和渐变层,说明了渗透层由老混凝土以及从界面长入老混凝土的晶体组成,反应层由界面剂的水化产物以及界面剂与新老混凝土的化学反应产物组成,渐变层由新混凝土的水化产物组成。

另外研究也表明,新老混凝土的粘结强度一般情况下要低于整体混凝土。其主要原因有:①老混凝土的水泥基本已完全水化而失去活性,很难与新混凝土相互水化融合,易形成薄弱界面;②老混凝土不再有体积收缩,但新混凝土浇筑后一段时间内体积一直在收缩,因而在老混凝土中会形成拉应力,在粘结界面的边界附近会产生剪应力和拉应力,致使新混凝土粘结层产生收缩微裂缝;③新老混凝土结合面处往往有新浇混凝土泌水、排气集中,致使粘结层孔隙多、孔隙大;④浇筑新混凝土之前,老混凝土粘结面除了要凿毛之外,还必须洒水,而洒水饱和程度对粘结强度是有影响:当洒水不足时,老混凝土将从新浇混凝土中吸收水分,造成粘结面附近的新混凝土因失水过多而水化反应不充分,降低粘结强度;当洒水充足时,老混凝土粘结面上的粗骨料周围将形成薄层水膜,使新浇混凝土粘结层水灰比增大,降低新混凝土强度及粘结强度。因此,通常新老混凝土的粘结面是一个质量较差的薄弱面。

目前普遍认为,影响新老混凝土粘结质量的因素主要有老混凝土的性能、老混凝土粘结面的处理方法、老混凝土粘结面的粗糙度、界面剂的性能、新混凝土的性能及新混凝土的浇筑方向等,其中影响程度较大的有老混凝土粘结面的粗糙度、新混凝土的性能及界面剂。

老混凝土粘结面粗糙处理的常用方法有,人工凿毛法、喷丸(砂)法、高压水射法、钢刷刷毛法、酸侵蚀法等。人工凿毛是采用铁锤和凿子等手工工具凿除老混凝土表层,露出骨料,该法工效低、质量差、劳动强度高,还会造成老混凝土粘结面出现微细裂缝,降低新老混凝土粘结强度;喷丸(砂)法是用喷射机向老混凝土粘结面喷射不同直径的小钢球,用喷射速度和喷射密度来控制粘结面的粗糙度,这种方法由于施工不便,因而在实际

工程中很少应用；高压水射法是由高压泵、电动机、电气控制箱、高压水管和喷枪组成，如果采用活塞式高压泵，还需要配备稳压器，该法冲毛时无多余废弃物产生，混凝土处理表面无污染程度，可有效地提高新老混凝土的粘结性能，缺点是工艺过于复杂、造价高、配套设备（如高压喷嘴、高压管接头）加工困难，一次性投入大，中小工程很少使用；钢刷刷毛法是用钢刷把老混凝土表面刷毛，但只能进行轻度处理；酸侵蚀法是一种化学方法，能显著增加新老混凝土粘结面的微观粗糙度，从而增加新老混凝土粘结面积，提高粘结强度，但一些酸溶液会腐蚀钢筋，钢筋混凝土结构的修补不易采用。新老混凝土粘结的抗折强度、劈拉强度和剪切强度研究结果表明，粘结强度随老混凝土表面粗糙度的增大而增大，但是当粗糙度达到一定程度后，其对新老混凝土粘结性能的影响程度减弱，如果老混凝土表面粗糙度过大，不仅粘结效果增强不明显，还会增加施工费用。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、变步距分维数法及粗骨料暴露比例法是目前已有的评价方法。

为保证新老混凝土粘结面具有较好的粘结性能，一般情况下新混凝土的强度应比老混凝土强度高一个等级。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，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也在进行。

界面剂总体上分为无机类界面剂和有机类界面剂两大类。无机水泥基类界面剂是新老混凝土粘结面常用的方法，主要包括水泥净浆、水泥砂浆、掺各种掺合料和外加剂的水泥浆（掺合料包括硅灰、粉煤灰等，外加剂包括减水剂、膨胀剂、减缩剂）。研究结果显示，水泥浆与水泥砂浆的效果相当，掺硅灰的水泥浆效果较好，掺其他掺合料和外加剂水泥浆的效果则不太一致。如大连理工大学赵国藩院士的研究发现，使用水泥浆界面剂可使粘结面的抗折强度比不涂界面剂的提高 13%，如采用同配比的快硬铁铝酸盐水泥浆作界面剂的抗折强度比不涂界面剂的提高 23%，采用掺 10%U 型膨胀剂的水泥浆作界面剂的抗折强度比不涂界面剂的提高 8%；郑州大学的抗冻、抗渗研究认为水泥基类界面剂抗冻、抗渗性很差，说明水泥基类界面剂可以提高新老混凝土的粘结强度，但抗侵蚀性能与耐久性能较差。有机环氧基类界面剂与老混凝土具有较好的粘结性能，由于环氧浆材是憎水性材料，其与新混凝土粘结性能很差，因此环氧类界面剂的整体粘结效果不明显。有机聚合物砂浆界面剂主要包括丁苯砂浆、丙乳砂浆等。聚合物界面剂一般会引入较多气泡，造成粘结区密实度下降，粘结效果也较差。

新老混凝土粘结性能研究的另一个主要内容是粘结力学指标与耐久性指标的研究，它包括粘结劈拉强度、粘结弯折强度、粘结剪切强度、粘结抗收缩强度、粘结抗渗等级及粘结抗冻等级等指标的研究，在此试验研究的基础上，有学者采用神经网络、塑性理论等方法建立了粘结强度的理论预测模型。特别是针对新老混凝土粘结的一种特殊工况——混凝土冷缝粘结性能的研究，及碳化混凝土与新混凝土粘结性能的研究，拓展了新老混凝土粘结研究的领域，丰富了研究成果。

第三节 本书的主要内容

本书共分八章,各章主要内容介绍如下:

第一章 介绍了国内外混凝土结构耐久性现状及开展的相应研究;综述了新老混凝土粘结研究已取得的成果;概述了本书的主要内容。

第二章 介绍了目前新老混凝土粘结面粗糙度处理的常用方法;阐述了功率谱法分维、高差法分维和变步距法分维评价粘结面粗糙度的原理及使用方法;通过工程实例介绍了一种粘结面处理方法——切槽法。

第三章 在水泥净浆的基础上,添加减水剂、减缩剂、膨胀剂等外加剂,以及掺入粉煤灰、硅灰、混合掺合料(粉煤灰+硅灰)等成分,配制出多种防碳化效果较好的界面剂。

第四章 在普通混凝土配合比的基础上,掺入引气剂、减水剂及粉煤灰,配制具有高抗渗性能及高抗碳化性能的新混凝土。

第五章 基于假定的新老混凝土粘结层的剪切破坏机构,利用塑性极限分析中的上限定理,推导出新老混凝土粘结剪切强度的理论解;分析了新老混凝土粘结的微观机理,建立了新老混凝土粘结劈拉强度及粘结抗折强度的 BP 神经网络预测模型;对新老混凝土粘结强度的影响因素进行了敏感性分析。

第六章 研究了新混凝土与碳化混凝土的粘结劈拉强度、粘结抗折强度、粘结剪切强度、粘结抗渗性能及粘结抗冻性能。

第七章 研究了混凝土冷缝的劈拉强度、抗折强度、抗渗性能及抗冻性能;研究了带冷缝钢筋混凝土梁的抗弯及抗剪性能;分析了实例工程结构中冷缝粘结强度的分布模型,并对带冷缝病害梁板结构进行了安全分析及补强加固。

第八章 介绍了一种混凝土劈拉强度测试的新方法——混凝土圆柱体横向劈拉法(简称横劈法),从有限元分析和试验研究两个方面论证了横劈法测试混凝土劈拉强度的可靠性,并研究给出了相应的劈拉强度公式;对某一水利工程中碳化混凝土圆柱体芯样进行了横劈法试验,确定了碳化混凝土、未碳化混凝土及部分碳化区混凝土(该部分的强度也即碳化混凝土与未碳化混凝土的粘结强度)的劈拉强度。

参考文献

- [1] Bruce Suprenat. Bonding new concrete to old [J]. Concrete Construction, 1988, (4): 676-680.
- [2] Castel A., Francois R., Arliguie G. Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete elements [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 561-565.
- [3] Cengiz D. A. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash [J]. Construction and Building Materials. 2003, 17(3): 147-152.

- [4] Chen P. W. , Fu X. L. Improving the bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(3): 491-496.
- [5] David G. G. Splitting prism test method to evaluate concrete-to-concrete bond strength [J]. ACI Materials Journal, 1999, (3): 359-366.
- [6] Farming P. Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams [J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2001, (2): 111-119.
- [7] George Z. , Voyiadjis T. M. Biaxial testing of repaired concrete [J]. ACI Materials Journal, 1992, (6): 564-573.
- [8] Khanm I. , Lynsdale, C. J. Strength permeability and carbonation of high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Research. 2002, 32(1): 123-131.
- [9] Mehta P. K. Concrete durability: fifty year's progress[C]//Proceeding of 2nd International Conference on Concrete Durability. ACI SP 126-1. 1991.
- [10] Mohamed A. H. , Abdel-Halim, Schorn H. Strength evaluation of shotcrete- repaired beams [J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(3): 272-276.
- [11] Montemorm F. , Cunha M. P. , Ferreira M. G. Corrosion behavior of rehars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides [J]. Cement & Concrete Composites, 2002, 24(1): 45-53.
- [12] Rasheeduzzafar, Dakhil F. H. , Gahtani A. S. Corrosion of reinforcement in concrete structures in the Middle East [J]. Concrete International, 1985, 9: 48-55.
- [13] Roy S. K. , Poh K. B. , Northwood D. O. Durability of concrete-accelerated carbonation and weathering studies [J]. Building and Environment, 1999, 34(5): 597-606.
- [14] Sanjay Narendra Pareek. Evaluation method for adhesion test results of bonded mortars to concrete substrate by square optimization [J]. ACI Materials Journal, 1995(4): 355-360.
- [15] Santhakumar R. , Chandra Sekaran E. , Hanaraj R. Analysis of retrofitted reinforced concrete shear beams using carbon fiber composites [J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2004, (4): 66-74.
- [16] Sarja A. , Vesikari E. Durability design of concrete structure committee report 130-CSL [R]. Materials and Structure, 2000.
- [17] Simon Austin, Peter Robins, Yougang Pan. Shear bond testing of concrete repairs [J]. Cement and Concrete Research, 1999, (7): 1067-1076.
- [18] Steiner W. Products and application of bonding agents for concrete [M]. Adherence of Young on Old Concrete, edited by F. H. Wittmann, 1994.
- [19] Yasuo Kosaka, Takashi Miura, Yukihiro Tsukada. Salt-damage and retrofitting of prestressed concrete bridges at Japanese sea coast in North-Japan [C]// Proceedings of 8th International Conference Structural Faults Repair, 1999, 9: 43-45.
- [20] 陈治涛. 酷暑期施工混凝土表面出现冷缝的原因及其防治措施[J]. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2003, 9: 18-21.
- [21] 邸小坛, 周燕. 旧建筑物的检测加固与维护[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
- [22] 高丹盈, 程红强. 冻融循环对新老混凝土粘结性能的影响[J]. 混凝土, 2006, (3): 29-32.
- [23] 高瑾, 郭超江, 栗湘君. 水工混凝土的碳化与耐久性[J]. 混凝土, 1994, 2: 10-14.

- [24] 韩传峰, 朱伯龙, 李娟. 集中荷载抗拉强度试验—小芯样横劈法测定结构混凝土强度的研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 1995, 10(1): 1-3.
- [25] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与防护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [26] 将元炯, 韩素芬. 混凝土工程病害与修补加固[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [27] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究与回顾与展望[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(4): 371-403.
- [28] 金祖权, 孙伟, 张云升等. 荷载作用下混凝土的碳化深度[J]. 建筑材料学报, 2005, 4(2): 179-184.
- [29] 亢景富, 冯乃谦. 水工混凝土耐久性问题与水工高性能混凝土[J]. 混凝土与水泥制品, 1997, 4: 5-10.
- [30] 李明顺. 我国混凝土结构技术五十年的发展展望[J]. 建筑结构, 1999, 29(10): 3-8.
- [31] 李平先, 张雷顺, 赵国藩等. 新老混凝土粘结面渗透性能试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 602-607.
- [32] 李田, 刘西拉. 混凝土结构耐久性分析与设计[M]. 北京: 科学技术出版社, 1999.
- [33] 刘秉京. 混凝土结构耐久性设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [34] 刘健. 新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2000.
- [35] 刘金伟, 熊光晶, 谢慧才. 新老混凝土修补界面方位对粘结强度的影响[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 67-69.
- [36] 梁发云. 碳化后混凝土基本构件力学性能试验与分析[D]. 上海: 同济大学博士学位论文, 1998.
- [37] 罗福午. 建筑结构缺陷事故的分析与防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [38] 马保国, 王迎飞, 朱洪波等. 冬季施工中负温混凝土耐久性及病害处理调查报告[R]. 1987.
- [39] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [40] 水电部混凝土耐久性调查组. 全国水工混凝土建筑物耐久性及病害处理调查报告[R]. 北京: 水利部, 1987年.
- [41] 宋中南. 我国混凝土结构加固修复技术现状与发展对策[J]. 混凝土, 2002, (10): 10-17.
- [42] 覃维祖. 混凝土耐久性综述[C]//第五届全国混凝土耐久性学术交流会论文集, 2000, pp8-14.
- [43] 王培铭, 朱艳芳, 计亦奇等. 掺粉煤灰和矿渣大流动度混凝土的碳化性能[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(4): 305-310.
- [44] 徐学东, 朱瑞龙, 张利春等. 现有铁路混凝土桥梁的耐久性问题[C]//第五届全国混凝土耐久性学术交流会论文集, 2000: 47-53.
- [45] 殷顺湖, 许强. 混凝土碳化防护材料的研究[J]. 建筑石膏与胶凝材料, 2004, 11: 54-55.
- [46] 余江滔, 蒋杰, 陆洲导. 钻芯法检测混凝土强度的一种建议: 多次横向劈拉法[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(1): 84-87.
- [47] 袁群, 杜卫兵, 李宗坤等. 圆柱体横向劈拉测定混凝土抗拉强度方法的研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(6): 83-87.
- [48] 袁群, 赵国藩. 混凝土冷缝的粘结强度分析[J]. 四川建筑科学研究, 2001, 27(1): 5-6.
- [49] 袁群. 老化病害混凝土结构质量评估及粘结加固中的基础问题研究[D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2000.
- [50] 袁群, 赵国藩, 赵志方. 新老混凝土粘结强度的影响因素分析[J]. 人民黄河, 2000, 4: 31-33.

- [51] 袁群, 李宗坤, 孙觅博等. 长龄期水工钢筋混凝土的材料特性研究[R]. 河南省科研事业计划项目(341500200), 2005.
- [52] 袁群, 赵国藩, 赵志方. 新老混凝土粘结强度的影响因素分析[J]. 人民黄河, 2000, 4: 31-33.
- [53] 袁群, 韩菊红. 混凝土粘结面粗糙度的分维评价方法[J]. 工程力学, 2000, (增): 812-816.
- [54] 袁群, 刘健. 新老混凝土粘结的剪切强度研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 2: 46-50.
- [55] 袁群, 赵国藩. 基于神经网络方法的新老混凝土粘结强度预测模型[J]. 建筑材料学报, 2001, 2: 132-137.
- [56] 袁群, 韩菊红, 于跃海. 混凝土粘结面粗糙度评价的功率谱法分维[J]. 工业建筑, 2001, 2: 4-5.
- [57] 韩菊红, 袁群, 张雷顺. 新老混凝土粘结面粗糙度处理实用方法探讨[J]. 工业建筑, 2001, 2: 1-3.
- [58] 赵志方, 周厚贵, 袁群等. 新老混凝土粘结机理研究与工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [59] 袁群. 结构中混凝土强度检测评定的综合分析[J]. 建筑结构, 2000, 9: 45-46.
- [60] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [61] 袁群, 李宗坤, 曹雪玲. 混凝土顺筋裂缝开裂分析[J]. 工业建筑, 2002, 7: 74-75.
- [62] 袁群, 赵国藩. 混凝土碳化深度随机时间序列预报模型[J]. 大连理工大学学报, 2002, 40(3): 344-347.
- [63] 袁群, 何芳婵, 李杉. 混凝土碳化理论与研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009.
- [64] 张誉, 蒋利学, 张伟平等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- [65] 赵国藩, 袁群, 赵志方等. “新老混凝土粘结机理”2000 年度总结报告, 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》之 5.2(1)课题.
- [66] 赵国藩, 袁群, 赵志方等. 新老混凝土粘结机理研究[R]. 国家自然科学基金项目(59778045), 2000
- [67] 赵国藩, 仲伟秋. 高性能材料在结构工程中应用与发展[J]. 大连理工学报, 2003, 43(3): 257-261.
- [68] 赵国藩, 竺亮, 袁群等. 混凝土冷缝病害的板梁结构安全性分析及补强加固[J]. 工业建筑, 2001, 31(3): 47-50.
- [69] 赵志方, 周厚贵, 刘健等. 新老混凝土粘结复合受力的强度特性[J]. 工业建筑, 2002, 32(4): 37-62.
- [70] 郑金泰. 水口水电厂 4 号发电机楼板结构梁的钢板箍加固[J]. 福建电力与电工, 1999, (12): 24-26.
- [71] 周 履, 编译. 21 世纪的重要课题—关于混凝土耐久性的概念[J]. 国外桥梁, 1998, (4): 62-66.
- [72] 周新刚. 混凝土结构的耐久性与损伤防治[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [73] 袁群, 李宗坤, 李立青等. 混凝土冷缝抗折性能的试验研究[J]. 混凝土, 2008, 7: 1-6.
- [74] 马朝运, 袁群, 李宗坤等. 混凝土冷缝抗冻性能试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(7): 74-75.
- [75] 马朝运, 袁群, 李宗坤等. 混凝土冷缝劈裂抗拉强度的试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(6): 79-82.
- [76] 袁群, 马朝运, 李宗坤等. 混凝土冷缝抗渗性能的试验研究[J]. 混凝土, 2008, (9): 10-12.
- [77] 袁群, 李宗坤, 李立青等. 跨中带冷缝钢筋混凝土梁抗弯性能的试验研究[J]. 混凝土, 2008,

- (8); 10-12.
- [78] 李立青, 袁群, 李宗坤等. 冷缝对钢筋混凝土梁抗剪性能影响的试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(10): 86-87.
- [79] 马峰, 袁群, 宋铁岭等. 新混凝土与碳化混凝土粘结抗折强度试验研究 [J]. 人民黄河, 2012, 34 (3): 123-127.
- [80] 乔连朋, 袁群, 冯凌云等. 新混凝土与碳化混凝土粘结的抗渗性能研究 [J]. 人民黄河, 2013(3): 103-105.
- [81] 马峰, 袁群, 宋铁岭等. 新混凝土与碳化混凝土粘结抗折强度试验研究 [J]. 人民黄河, 2012, 34 (3): 123-127.
- [82] 袁群, 马峰, 宋铁岭等. 新混凝土与碳化混凝土黏结的劈拉强度试验研究 [J]. 混凝土, 2011 (11): 56-58.
- [83] 袁群, 马峰, 曹宏亮等. 具有防碳化作用界面剂的配制研究 [J]. 混凝土, 2011(10): 139-144.

第二章 新老混凝土粘结面的粗糙度

第一节 引言

粘结面粗糙度是影响新老混凝土粘结性能的一项重要因素，而粘结面处理方法及粗糙度评价方法又是保证和衡量粘结面粗糙度质量的两个重要方面。

第二节 粘结面粗糙度的处理方法

截至目前，尚未有规范或规程对混凝土粘结面粗糙处理的方法作出明确规定。美国内务部垦务局编制的混凝土手册要求，修补浇筑混凝土前应先将老混凝土中松动、破裂的部分清除，而后采用水砂枪、风动凿岩机等打毛、清扫混凝土表面。我国《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002 指出：叠合式受弯构件的叠合面处理应根据其受剪强度的需要进行，常用方法有人工叠合面（凹凸形或锯齿形叠合面）、自然粗糙面（混凝土振捣后不加抹平形成的有一定凹凸起伏的自然表面）。由此可见，目前对粘结面粗糙度的处理和评定具有较大的主观性和随意性。为便于读者的了解和使用，下面将粘结面粗糙度处理的常用方法进行汇总：

一、人工凿毛法

该方法为实际工程中常用的界面粗糙度处理方法，采用铁锤和钻子凿毛老混凝土粘结界面，使其表面形成随机的凸凹不平状，以增加粘结界面的粗糙度。其优点为施工技术简单，无需大型机械设备，工程造价低；缺点是对老混凝土界面扰动较大，容易产生附加的微裂缝，损伤新老混凝土的粘结性能。

二、高压水射法

该方法采用高压水枪对老混凝土的粘结界面进行冲毛处理，高压水枪压力一般在 100~250MPa，通过控制喷水速度和喷射距离控制老混凝土粘结表面的冲毛程度。该方法的优点在于机械化程度高，施工便捷高效；无振动、噪声和灰尘；对老混凝土扰动小，处理界面凹凸均匀。缺点则是所用设备昂贵，工程费用高。

三、喷砂（丸）法

该方法采用喷射机向老混凝土喷射不同直径的钢球或不同粒径的小碎石，通过控制喷射速度和喷射密度对新老混凝土粘结面进行处理。该方法可得到较为满意的表面处理度且

污染和噪声相对较小。

四、钢刷刷净法

该方法对老混凝土粘结表面处理程度较轻，提高新老混凝土粘结性能的幅度较小。

五、电钻凿孔法

该方法采用轻型电钻在老混凝土表面按一定要求进行成排钻孔，但其对混凝土结构的损伤较为严重。

六、切槽法

该方法为一种新型处理老混凝土表面的施工方法，采用人工或机械在老混凝土表面按一定的深度进行间隔切槽，以达到提高粘结面粗糙度的目的。其优点在于施工质量控制方便，粗糙度均匀性良好。

七、植筋法

该方法利用专用化学粘合剂的快速高强固化特性，将锚筋或锚栓植入老混凝土中达到预埋钢筋的效果，可以增强新老混凝土之间的粘结。除了上述处理方法外，还有喷气法、真空喷砂法、气锤凿毛法等处理方法。

第三节 粘结面粗糙度的度量方法

一、粗糙度度量的一般方法

(一) 灌砂法

该法是将灌砂平均深度作为粘结面粗糙度指标，测试方法见图 2.1，灌砂平均深度计算见式 (2.1)。

$$H=V/A \quad (2.1)$$

式中， H ：灌砂平均深度，mm；

V ：灌砂体积， mm^3 ；

A ：粘结面积， mm^2 。

(二) 硅粉堆落法

欧洲标准建议，将 50g 粒径在 50~100 μm 的硅粉颗粒自然堆落于粘结面上，形成一个圆锥体，圆锥体的底圆半径被称为粘结面的粗糙度指数 (SRI)。粗糙度指数越大，表明粘结面越光滑，具体分级如下：粗糙度指数小于 200mm 时，粘结面属于粗糙；粗糙度指数大于

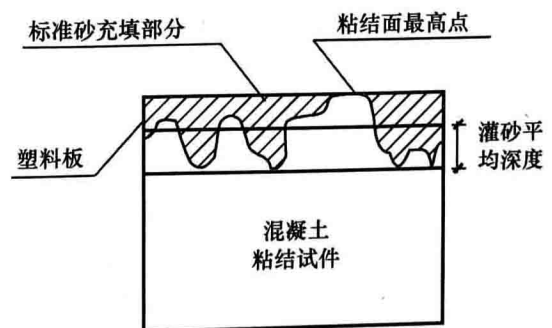


图 2.1 灌砂法测试粘结面粗糙度示意图

250mm 时, 粘结面属于光滑; 粗糙度指数 $\in [200, 250]$ 时, 粘结面属于轻度粗糙。

(三) 观察法

该法是以粗骨料暴露的百分比来度量粘结面的粗糙度: A 级粗糙度约有 10% 的粗骨料可见; B 级粗糙度约有 30%~40% 的粗骨料可见; C 级粗糙度约有 60%~80% 的粗骨料可见。有关试验结果表明, A 级粘结性能差, B 级粘结性能好, C 级粘结抗剪强度稍好于 B 级, 综合分析认为, B 级粗糙度较为合适。

二、粗糙度度量的分维方法

灌砂法、硅粉堆落法是定量测量粘结面粗糙度的一般方法方法。下面介绍粘结面粗糙度度量的三种分维评价方法, 即功率谱法分维、高差法分维和变步距法分维。

(一) 分维仪制作与测试方法

自制的分维仪结构见图 2.2。为保证测量时结构的整体稳定及水平, 用 5mm 厚的钢

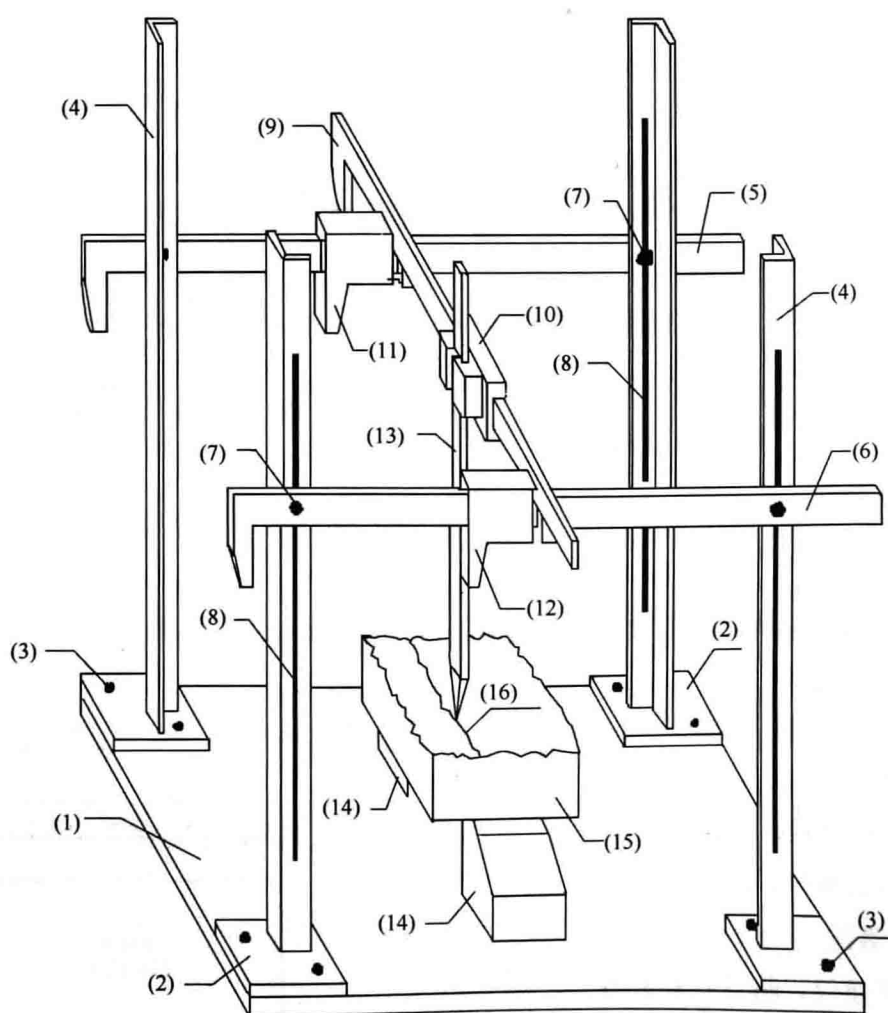


图 2.2 自制分维仪结构与工作原理示意图

- (1) 钢底板; (2) 钢脚垫; (3) 脚垫与底板固定螺丝; (4) 角钢立柱; (5) X向游标卡尺1;
(6) X向游标卡尺2; (7) X向游标卡尺与钢立柱固定螺丝; (8) 立柱与X向卡尺间联结钢槽;
(9) Y向游标卡尺; (10) Y向卡尺脚; (11) X向卡尺脚1; (12) X向卡尺脚2; (13) 深度游标卡尺;
(14) 承物台; (15) 试件; (16) 试件Y向剖面线