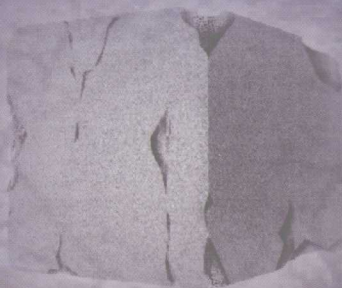


混凝土修补

——原理、技术与材料

蒋正武 龙广成 孙振平 编著

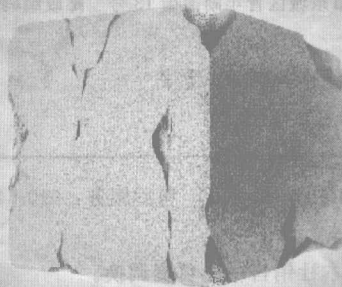


化学工业出版社

混凝土修补

——原理、技术与材料

蒋正武 龙广成 孙振平 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从科学的角度阐述混凝土修补的基本原理、修补方法、技术与修补材料,重点讨论了混凝土的劣化与修补,本书对混凝土的修补技术主要侧重于混凝土的非结构性修补技术。

全书理论与实际相结合,从混凝土基本理论出发,深入浅出地阐述混凝土的基本知识、混凝土各种劣化机理与现象;分析阐述了混凝土修补的基本原则、试验方法与步骤;阐述了修补材料的选择方法、分类及其基本性能;并以图解方式重点阐述了各类混凝土修补技术、修复防护技术的原理及其工程应用实践知识。

本书可供从事混凝土材料、混凝土结构修补与修复等研究、教学、设计、施工、生产的科技人员、大专院校师生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土修补:原理、技术与材料/蒋正武,龙广成,
孙振平编著. —北京:化学工业出版社, 2009. 2
ISBN 978-7-122-03874-6

I. 混… II. ①蒋…②龙…③孙… III. 混凝土-
修复术 IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 163584 号

责任编辑:仇志刚

文字编辑:颜克俭

责任校对:郑捷

装帧设计:杨北

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)

印装:化学工业出版社印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张17½ 字数475千字

2009年1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:48.00 元

版权所有 违者必究

前 言

钢筋混凝土是目前世界上应用最大宗的人造建筑材料，其广泛应用于建筑、市政、地下、水工、海工等工程中。一般来说，钢筋混凝土结构具有良好的长期性能与高耐久性。然而，在实际工程应用中，钢筋混凝土结构经常因结构设计不合理、施工缺陷以及各种环境条件下的物理、化学或生物侵蚀等原因而在服役期间发生劣化，有的甚至达不到预期寿命而破坏。从科学的角度来看，因不同环境下暴露条件的相互作用，涉及不同的材料以及结构，钢筋混凝土中钢筋腐蚀和混凝土的劣化是非常复杂的；从经济的角度来看，世界各国每年因钢筋混凝土的腐蚀或破坏损失费用相当高。我国大规模的工程建设刚开始几十年，大量的混凝土基础设施工程正在建设中，但因混凝土结构的腐蚀破坏已经开始显现出来并逐渐引起人们重视。研究钢筋混凝土结构的修补原理、技术与材料对保证我国钢筋混凝土结构工程的长期耐久性与使用寿命具有重要的指导意义。

混凝土修补是一门应用科学，它涉及混凝土基本理论、物理化学、结构力学、电化学等多门学科知识。混凝土修补工程是一个系统工程，应从整体论来认识与实现混凝土修补，涉及混凝土结构的现状评估、修补体系的选择、修补技术的实施、可能的加固保护与修补效果评估等方面。随着最近几十年科学技术的迅速发展，混凝土技术也在快速发展。混凝土修补也应被重新认识、评估并充分考虑到混凝土技术的发展趋势。

本书的主要目的是从科学的角度阐述混凝土修补的基本原理、修补方法、技术与修补材料，并提供国内外混凝土修补领域的最新进展。本书有意重点讨论了混凝土的劣化与修补，因此钢筋本身的

腐蚀过程没有被重点论述。本书对混凝土的修补技术主要侧重于混凝土的非结构性修补技术，更多的有关混凝土结构加固技术可参考其他资料文献。

本书不是一本纯理论应用的书籍，而是从混凝土基本理论出发，深入浅出地阐述混凝土的基本知识、混凝土各种劣化机理与现象；从整体方法论角度，分析阐述了混凝土修补的基本原则、试验方法与步骤；阐述了修补材料的选择方法、分类及其基本性能；并以图解方式重点阐述了各类混凝土修补技术、修复防护技术的原理及其工程应用实践知识。本书分类讨论混凝土修补工作中经常遇到的问题，解释问题发生的原因以及提出解决问题的建议。本书提供的混凝土修补实用建议、设计细部、实例和参考数据可帮助相关人员完成混凝土修补工作。本书将专业理论基础与专业实践知识有机地结合在一起，具有科学性、知识性、先进性与趣味性。本书可供从事混凝土材料、混凝土结构修补与修复等研究、教学、设计、施工、生产的科技人员、大专院校师生和研究生参考。

本书由同济大学蒋正武博士主编、审阅，编著的具体分工为：同济大学蒋正武（第1章、第3章、第5章～第8章）；中南大学龙广成博士（第4章、第9章）；同济大学孙振平博士（第2章）。

本书的内容不仅是作者多年来从事混凝土修补相关领域的理论教学、科研与工程实践的积累，也是参考国内外大量的资料文献编著而成。在此一并向相关作者与研究机构表示谢意。另外，由于我们水平有限，书中不当之处难免，还望广大读者不吝赐教、指正。

编著者

于同济大学

2008年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 钢筋混凝土结构修补的重要性	2
1.2.1 国外混凝土结构耐久性与修补现状	3
1.2.2 国内混凝土结构耐久性与修补现状	6
1.3 基于整体方法论的混凝土修补	11
1.3.1 整体方法论	11
1.3.2 基于整体方法论的耐久混凝土修补分析与要求	15
1.3.3 基于整体论的耐久混凝土修补应考虑的因素	18
1.4 混凝土修补的工艺流程	23
参考文献	26
第 2 章 混凝土的组成、结构与性能	30
2.1 混凝土的发展与分类	30
2.1.1 定义	30
2.1.2 历史与发展	31
2.1.3 分类	45
2.2 混凝土的基本组成材料	47
2.2.1 水泥	47
2.2.2 活性矿物掺和料	57
2.2.3 外加剂	58
2.2.4 细骨料	78
2.2.5 粗骨料	84
2.2.6 拌和用水	88
2.3 混凝土的结构形成及特征	89
2.4 混凝土的性能及影响因素	91
2.4.1 新拌混凝土的性能	92

2.4.2 硬化混凝土的性能	96
2.5 混凝土的配合比设计	114
2.5.1 普通混凝土	114
2.5.2 有特殊要求的混凝土	121
参考文献	128
第3章 钢筋混凝土的劣化机理	130
3.1 混凝土中钢筋腐蚀	132
3.1.1 腐蚀原理	132
3.1.2 介质在混凝土中传输过程	135
3.1.3 混凝土碳化诱导的腐蚀	137
3.1.4 氯离子诱导的钢筋腐蚀	138
3.1.5 腐蚀速率	141
3.1.6 钢筋腐蚀的防护	144
3.2 混凝土冻融劣化	146
3.2.1 冻融作用机理	146
3.2.2 骨料的冻融作用	148
3.2.3 除冰盐对冻融作用的影响	150
3.2.4 混凝土抗冻性的防护措施	151
3.3 混凝土碳化	153
3.3.1 碳化机理	153
3.3.2 碳化的影响因素	155
3.3.3 混凝土的碳化规律	159
3.4 混凝土的化学腐蚀	160
3.4.1 硫酸盐侵蚀	161
3.4.2 海水侵蚀	164
3.4.3 酸侵蚀	165
3.4.4 淡水溶出性侵蚀	167
3.5 混凝土碱骨料反应	169
3.5.1 碱硅酸反应	170
3.5.2 碱碳酸盐反应	171
3.5.3 碱硅酸盐反应	174
3.5.4 混凝土碱骨料反应的辨别方法	174
3.5.5 发生碱骨料反应具备的条件及预防方法	179

3.5.6 其他有关骨料的反应	180
3.6 混凝土的收缩开裂	181
3.6.1 混凝土收缩的类型	182
3.6.2 混凝土收缩机理	185
3.6.3 现代混凝土的混凝土收缩开裂趋势	188
3.6.4 混凝土收缩开裂的控制措施	190
3.7 混凝土的磨损	192
3.7.1 影响混凝土耐磨性的因素	194
3.7.2 地面混凝土耐磨性的改善措施	194
3.7.3 抗冲蚀耐磨混凝土的优化方法	195
3.8 混凝土的热损伤劣化	197
3.8.1 大体积混凝土的定义	198
3.8.2 大体积混凝土温度裂缝成因	200
3.8.3 大体积混凝土温度裂缝的主要影响因素	202
3.8.4 混凝土温度裂缝的控制措施	205
3.9 混凝土的生物侵蚀	208
3.9.1 微生物对混凝土的侵蚀机理	209
3.9.2 微生物对混凝土腐蚀的防治方法	212
3.10 混凝土结构的表面缺陷	215
3.10.1 混凝土常见表面缺陷与成因	215
3.10.2 混凝土结构的表面缺陷控制措施	217
3.11 混凝土中水分迁移与渗漏	218
3.11.1 混凝土中水分迁移机理与模型	219
3.11.2 混凝土结构的渗漏机理	224
3.12 钢筋混凝土劣化的症状图解	225
参考文献	233
第4章 混凝土修补原理与设计	242
4.1 混凝土修补的内涵	242
4.2 混凝土与服役环境的相互作用	244
4.2.1 混凝土的主要服役环境类型	244
4.2.2 服役环境对混凝土组分、结构与性能的影响	245
4.3 混凝土劣化的形成	248
4.3.1 开裂	248

4.3.2	混凝土内部水化产物和微观结构的变化	264
4.3.3	混凝土自身质量损失	264
4.4	修补材料与基层混凝土的相容性	265
4.4.1	体积变形性的相容性	266
4.4.2	黏结相容性	267
4.4.3	力学性能的相容性	269
4.4.4	电化学相容性	270
4.4.5	渗透性相容性	271
4.5	混凝土修补设计	272
4.5.1	混凝土现状调查与评价	272
4.5.2	混凝土修补技术方案选择	273
4.5.3	修补材料选择	275
	参考文献	277
第5章	混凝土修补材料	278
5.1	修补材料的分类与选择	278
5.1.1	修补材料的分类	278
5.1.2	修补材料的选择	278
5.2	水泥基修补材料	283
5.2.1	普通混凝土	283
5.2.2	普通与干粉砂浆	284
5.2.3	镁磷酸盐快硬混凝土	285
5.2.4	预置骨料混凝土	286
5.2.5	快速凝结胶凝材料	287
5.2.6	喷射混凝土	289
5.2.7	收缩补偿混凝土	291
5.2.8	硅灰混凝土	292
5.2.9	自密实混凝土	295
5.2.10	水下抗分散混凝土	305
5.3	聚合物水泥基复合修补材料	310
5.3.1	聚合物改性混凝土	310
5.3.2	聚合物浸渍混凝土	319
5.3.3	聚合物混凝土	324
5.4	灌浆修补材料	329

5.4.1	水泥基灌浆材料	329
5.4.2	化学灌浆材料	332
5.5	纤维及纤维增强复合材料	337
5.5.1	纤维的分类及其性能	338
5.5.2	纤维增强混凝土	340
5.5.3	纤维增强聚合物基复合材料	352
5.6	渗透、填充、密封类材料	355
5.6.1	水泥基渗透结晶防水材料	355
5.6.2	液体渗透结晶型防水材料	360
5.6.3	嵌缝材料	361
5.6.4	接缝密封材料	362
5.7	表面防护材料	362
5.7.1	表面密封防护材料	362
5.7.2	硅烷防护材料	364
	参考文献	368
第 6 章	混凝土修补技术	370
6.1	混凝土裂缝修补技术	370
6.1.1	混凝土裂缝修补技术的选择	371
6.1.2	混凝土裂缝修补技术	376
6.2	混凝土清除技术	388
6.2.1	混凝土清除施工的检测	389
6.2.2	混凝土清除方法的分类	389
6.3	混凝土表面处理技术	399
6.3.1	化学清洁	400
6.3.2	酸蚀处理	400
6.3.3	机械处理	400
6.3.4	磨损性处理	401
6.3.5	混凝土表面缺陷处理	401
6.4	钢筋锈蚀修补技术	402
6.4.1	钢筋周围混凝土的清除	403
6.4.2	钢筋修补	404
6.5	灌浆技术	406
6.5.1	灌浆材料的分类	406

6.5.2	灌浆材料的选择	408
6.5.3	灌浆技术的分类	408
6.6	混凝土渗漏治理技术	417
6.6.1	混凝土结构渗漏成因分析	417
6.6.2	渗漏防治技术原则	418
6.6.3	防水施工技术	419
6.7	水下混凝土修补技术	421
6.7.1	浪溅区、水位变动区混凝土修补	421
6.7.2	水下区混凝土修补	422
6.7.3	水平面表层缺陷修补	422
6.7.4	水下大面积混凝土结构修补	423
6.8	材料浇筑填充技术	423
6.8.1	现浇混凝土技术	423
6.8.2	预置(填)骨料混凝土技术	423
6.8.3	泵送混凝土和砂浆技术	424
6.8.4	抹面技术	424
6.8.5	干装填充技术	425
6.8.6	喷射混凝土技术	425
	参考文献	426
第7章	结构性修补加固技术	428
7.1	内部加固技术	428
7.1.1	优点	430
7.1.2	缺点	430
7.1.3	施工工艺	431
7.1.4	应用实例	432
7.2	外部加固技术	432
7.2.1	优点	434
7.2.2	缺点	435
7.2.3	应用实例	435
7.3	外部后张加固技术	436
7.3.1	优点	436
7.3.2	缺点	436
7.3.3	应用实例	438

7.4 包壳和柱环加固技术	438
7.4.1 优点	439
7.4.2 缺点	439
7.5 灌浆加固技术	440
7.5.1 水泥基无收缩灌浆材料	440
7.5.2 灌浆施工技术	441
参考文献	444
第8章 钢筋混凝土修复与防护技术	445
8.1 钢筋混凝土电化学修复技术	445
8.1.1 电化学修复技术的基本原理	446
8.1.2 电化学修复应用技术条件	448
8.1.3 电化学修复技术的优点和局限性	450
8.1.4 电化学脱氯技术	451
8.1.5 电化学再碱化技术	458
8.1.6 电化学沉积技术	463
8.2 混凝土电化学防护技术	469
8.2.1 阴极保护原理、分类与特点	470
8.2.2 牺牲阳极式阴极保护技术	472
8.2.3 外加电源式阴极保护	477
8.3 混凝土中钢筋腐蚀的物理化学防护技术	489
8.3.1 混凝土结构自防护技术	491
8.3.2 混凝土结构附加防护技术	492
8.3.3 阻锈剂防护技术	494
8.3.4 环氧树脂涂覆防蚀技术	511
8.3.5 钢筋镀锌防蚀技术	514
8.3.6 不锈钢钢筋	514
8.4 混凝土表面防护技术	519
8.4.1 表面防护材料性能与分类	519
8.4.2 表面密封防护技术	521
8.4.3 密封技术	521
参考文献	522
第9章 混凝土修补体系性能评估	525
9.1 混凝土修补评估的主要内容	525

9.2 修补体系性能检测与评估方法	526
9.2.1 外观性能评估	526
9.2.2 修补材料与基底结合面质量和混凝土分层的 评估	527
9.2.3 电化学性能检测	530
9.2.4 内部空隙、裂缝和蜂窝检测	534
9.2.5 修补层与基底间的黏结强度检测	536
9.2.6 混凝土保护层厚度检测	538
9.2.7 钢筋直径及其位置检测	539
9.2.8 内部组成与微观结构检测	540
9.2.9 其他性能检测	541
9.3 混凝土修补体系的耐久性	542
9.3.1 修补体系的结构特点	542
9.3.2 修补体系的耐久性内涵	543
9.3.3 修补体系耐久性评估	544
参考文献	545

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

钢筋混凝土是人类使用的最大宗建筑结构材料。随着现代混凝土技术与我国经济持续快速的发展,混凝土被广泛应用于港口、大坝、公路、桥梁、市政等现代化工程建设中。然而,钢筋混凝土结构由于受到各种环境条件,如大气、水等物理、化学或生物的侵蚀作用,即使结构设计合理、施工正确,其在服役期间也往往发生劣化、未达到预期寿命而破坏。据报道,美国承包人联合会估计美国现有的混凝土基础设施的修补和改造将耗时 19 年并花费 3.3 万亿美元以上。在英国,需要重修或大修的钢筋混凝土结构占总量的 36% 以上。在我国,钢筋混凝土结构的侵蚀破坏也十分严重,且随着我国的基本建设的全面开展,在未来一段时间内钢筋混凝土结构的修补、修复与防护等问题将会日益突出。在 21 世纪,世界上基础设施面临着改造和修复的工程将大大超过新建建筑的工程量。另外,需要认识到的一点是大多数正在被修补的混凝土结构不能达到它们的设计寿命,也不能达到预期标准的使用效果。因此,对混凝土结构进行修补、采取有效防护技术以防止混凝土的环境侵蚀、维护混凝土的使用性能,对保证并提高混凝土结构的耐久性与使用寿命具有重要的现实意义。这不仅是保证建筑物在使用寿命期间的安全性,而且也可大大减少对自然资源和能源的消耗,也符合混凝土工业的可持续发展战略。

一般,混凝土修补指替换或恢复混凝土结构中受到损害或存在缺陷的材料、组分或单元;修补系统是指用来进行混凝土修补的材

料和技术；混凝土保护或防护是指维持混凝土结构处在正常或恢复原有的条件下，以尽量减少未来潜在的危害。混凝土加固指使弱化的构件或单元恢复到原有的设计能力或是增强混凝土结构中的构件。耐久的修补混凝土是指修补后的混凝土在它的预计设计寿命中表现出所期望的安全性与作用。

混凝土修补是一门应用科学。任何混凝土结构从建设期开始，到其服役寿命期间，需合适的防护、维护、修复或修补。从科学角度来看，混凝土修补过程涉及混凝土劣化机理、检测、成因分析、修补方法与技术、修补材料以及修补前后效果评估等多方面的知识。从我国的工程建设发展来看，未来混凝土修补行业将是一个庞大的、专业化的、前途十分光明的产业。

从广义的角度来看，混凝土修补分为混凝土结构性修补与混凝土非结构性修补。

混凝土修补应从整体论进行全面考虑，不仅应考虑混凝土修补材料的性能与混凝土结构的修复效果，更重要的应考虑修补材料与混凝土结构的相容性与整体性以及修补后的混凝土结构的耐久性。

1.2 钢筋混凝土结构修补的重要性

钢筋混凝土是一种广泛应用于桥梁、建筑、港口、海工及地下结构如隧道、钢筋混凝土管道等领域的结构材料。众所周知，钢筋混凝土结构结合了钢筋与混凝土的优点，造价较低，应用范围非常广泛。可以肯定的是，钢筋混凝土结构仍然是目前最常用的结构形式之一。

一般来说，钢筋混凝土是一种非常耐久的人工复合材料，可承受各种恶劣环境如大气、海洋、工业和高山气候等条件。尽管大部分钢筋混凝土结构表现出良好的长期性能与高耐久性。然而，仍然有大量混凝土结构因结构设计、环境侵蚀、施工缺陷等各种原因引起在服役寿命期间破坏的案例。这主要包括以下原因：① 结构设计的承载力不足；② 使用荷载的不利变化；③ 施工不当引起的混

土质量缺陷；④因各类环境侵蚀引起的钢筋混凝土结构的耐久性下降，特别是沿海及近海地区的混凝土结构，由于海洋环境对混凝土的腐蚀，导致钢筋锈蚀而使结构发生早期破坏，耐久性失效是导致混凝土结构在正常使用状态下失效的最主要原因之一；⑤正常合理的维护不足等。

1.2.1 国外混凝土结构耐久性与修补现状

国内外统计资料表明，由于混凝土结构的耐久性危害而导致的破坏是巨大的，且耐久性问题会越来越严重。早在 1991 年召开的第二届混凝土耐久性国际学术会议的 Metha 教授主题报告明确指出：钢筋腐蚀是混凝土结构耐久性降低甚至破坏的首要原因。国外混凝土结构因建设早，耐久性破坏在很早就显现出来，目前更加突出。

20 世纪 30 年代建造的美国俄勒冈州 Alsea 海湾上的多拱大桥，施工质量很好，但因混凝土的水灰比太大，较短时间内大量氯离子侵入混凝土，导致钢筋被严重锈蚀，引起结构损坏。用传统的方法局部修补破坏处，不久就发现修补处附近的钢筋又加剧腐蚀，不得不拆除、更换。

1984 年，美国州际公路网 56 万座桥梁中，一半以上出现了钢筋锈蚀，处于严重失效的就有 9 万多座，损失率达 16%，一般使用 5 年后就出现钢筋锈蚀迹象，每年损失达数亿美元，美国 1998 年因钢筋锈蚀而花费的桥梁修复费用为 1550 亿美元。

1962~1964 年，Gjorv 对挪威大约 700 座混凝土结构作了耐久性调查，当时已使用 20~50 年的占 2/3，在浪溅区，混凝土立柱显示破损的断面损失率大于 30% 的占 14%，断面损失率为 10%~30% 的占 24%，板和梁钢筋腐蚀引起严重破损的占 20%。

在阿拉伯海湾和红海上建造的大量海工混凝土结构，由于气温高，在含盐、干热、多风的白昼，混凝土表面温度高达 50℃，而晚上温度低而易结露，昼夜温差很大，构成了特别严重的侵蚀环境，加上混凝土等级和混凝土保护层厚度不够、施工质量差等原因，往往在使用第一年后钢筋就遭到严重腐蚀。

澳大利亚 Sharp 对 62 座海岸混凝土结构进行调查,发现海岸混凝土结构的耐久性问题都与浪溅区的钢筋异常严重的腐蚀有关。

印度孟买某河上的第一座桥是后张预应力混凝土桥,由于预应力钢筋过早地发生严重腐蚀,不得不重修第二座桥。第二座桥预应力筋在安装前就被大气中的盐分所污染,灌注的水泥浆又使用了海水,因而不到 10 年所有的钢筋、预应力筋及其套管都遭到了严重腐蚀破坏。

英国为解决海洋环境下钢筋混凝土结构物的腐蚀与防护问题,每年花费将近 20 万英镑,英国英格兰岛中部环形线的快车道上有 11 座混凝土高架桥,建于 1972 年,建造费仅为 2800 万英镑,建成 2 年后就发现了钢筋锈蚀造成的混凝土顺筋裂缝现象。1974~1989 年的 15 年间,其修补费用已高达 4500 万英镑,为初始造价的 1.6 倍,每年英国用于修复钢筋混凝土结构的费用达 200 亿英镑。

在日本大约有 21.4% 的钢筋混凝土结构损坏实例是因钢筋锈蚀引起的,如果再加上混凝土的碳化引起的混凝土结构破坏则所占的比例更高。

2007 年 8 月 1 日,美国明尼苏达州首府明尼阿波利斯市郊外 35 号州际公路大桥在交通高峰时段瞬间坍塌,约 50 辆汽车坠入密西西比河,事故死亡人数为 13 人,受伤 70 多人。明尼苏达州 35 号州际公路大桥是一座钢桁架连续梁桥,于 1967 年建成通车。1990 年,美国联邦政府检查发现,该桥桥跨结构和桥墩之间的支座发生腐蚀,桥梁被认定为存在“结构性缺陷”。报道说有关部门随后对该桥进行了针对性的维修,并将两年一次的检测周期缩短为一年一次。2001 年明尼苏达大学土木工程系的一份研究报告指出,该桥不大可能发生钢桁架的疲劳开裂,近期不必因疲劳问题而提前进行大桥的更换。2005 年的联邦检查再次认为大桥存在结构性缺陷,并给桥跨结构、桥面和下部结构分别打了 4 分、5 分和 6 分,对应的缺陷级别分别为“不良状态”、“尚好状态”和“满意状态”。