

HUNNINGTUTANHUALILUNYUYANJIU

混凝土碳化理论与研究

袁群 何芳婵 李杉 编著



黄河水利出版社

混凝土碳化理论与研究

袁 群 何芳婵 李 杉 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书内容主要涉及混凝土碳化的机理、碳化的检测、碳化混凝土的性质、碳化的危害、碳化对结构性能的影响、碳化深度预测以及碳化的防护措施等。其中既有理论研究,也有实践应用,可供从事土木工程、水利工程、港口工程、桥梁工程、市政工程等专业的设计、施工人员借鉴,也可供从事相关专业的科研人员以及大专院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土碳化理论与研究/袁群,何芳婵,李杉编著.
郑州:黄河水利出版社,2009.4

ISBN 978-7-80734-519-0

I. 混… II. ①袁…②何…③李… III. 混凝土-
化学性能-研究 IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 151397 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhsllwp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66022620(传真)

E-mail:hhsllcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:850 mm × 1 168 mm 1/32

印张:6.625

字数:166 千字

印数:1—2 500

版次:2009 年 4 月第 1 版

印次:2009 年 4 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

序

混凝土结构是当前世界上应用最普遍的结构形式之一,我国每年用在混凝土结构上的费用达 2 000 亿元以上。过去,人们认为混凝土是一种耐久性良好的建筑材料,从而忽视了混凝土结构的耐久性问题,为此已经付出了巨大的代价。近十年来,混凝土结构耐久性研究已进入了一个崭新的阶段。

影响混凝土结构耐久性的因素很多,其中混凝土碳化是一个重要的因素。对全国 32 座大型混凝土坝及 46 座钢筋混凝土闸、涵、渡槽的调查发现,碳化病害占调查总数的 40% ~ 50%。我国 20 世纪 50、60 年代,甚至 70 年代建造的钢筋混凝土结构,程度不同地受到了碳化效应的影响,而且日趋严重。混凝土碳化造成的碱度降低是钢筋锈蚀的重要前提,而钢筋锈蚀又将导致混凝土保护层开裂、钢筋与混凝土之间黏结力破坏、钢筋受力截面减小、结构耐久性降低等不良后果。因此,进行混凝土碳化的研究具有非常重要的意义。

据报道,在 19 世纪中叶,大气中二氧化碳的平均浓度为 280×10^{-6} ,2005 年已达到了 379×10^{-6} ,预计到 2100 年将上升到 650×10^{-6} 。二氧化碳浓度的增大将加剧混凝土结构的碳化,对混凝土结构的耐久性带来更为不利的影响。近年来,国内外学术界对混凝土碳化问题的研究非常关注,仅 1991 ~ 1998 年期间,据“美国工程索引(EI)”和中文科技期刊文摘收录的以“碳化”为主题发表的文章就有 300 多篇。这些研究,对认识碳化的机理、延缓碳化的发展、评估碳化的危害以及对碳化结构的维修等方面都具有积极意义。

作者多年从事混凝土耐久性尤其是混凝土碳化方面的研究工作,积累了丰富的经验,为本书的编著奠定了基础。书中内容丰富,涉及混凝土碳化问题的多个方面,相信该书的出版会对热心于混凝土碳化问题研究的人们有所助益。

中国工程院院士: 赵国藩

2008 年 4 月 3 日

前 言

混凝土是工程中用量最多、也是最主要的一种建筑材料。混凝土在环境作用下会发生碳化而失去碱性,呈现出中性化状态。此时钢筋将因脱钝失去保护而锈蚀,引发结构耐久性失效,最终导致结构承载能力丧失,危及结构安全。吴中伟院士曾指出,混凝土耐久性问题是当前一个亟待解决的重大问题。由于混凝土耐久性不好引起的结构失效与破坏,甚至倒塌的事例国内外屡见不鲜,给人类造成了严重危害。

混凝土碳化是影响混凝土耐久性的一个重要因素。对混凝土碳化现象开展研究,掌握其发生原因、发展规律,有利于我们从本质上解决混凝土的碳化问题。这可以通过更加合理的选择混凝土原材料及配合比,采取必要和有效的防护措施,来消除和延缓混凝土的碳化进程,以保证建筑物在设计使用期限内具有良好的耐久性和安全性。同时,通过对混凝土碳化规律的研究,能够为我们准确预测已有建筑物的剩余使用年限,及对已碳化混凝土结构进行科学的维修提供必要的理论依据。

目前,对于混凝土碳化的研究主要集中在三个方面:①对碳化机理的研究;②对碳化深度预测模型的研究;③对碳化病害防治方法的研究。其中对碳化机理的研究较多,也最成熟;而对碳化深度预测模型的研究及碳化病害防治方法的研究是目前的热点。

混凝土碳化研究方面的成果和文章已有很多,但都散见于文献中,这将不利于混凝土碳化研究的交流与发展。鉴于此,作者经过长期的努力,编著了此书。本书共包括八章,内容涉及混凝土的碳化机理、碳化影响因素、碳化的检测、碳化深度预测、碳化的危

害、碳化的防护等多个方面。本书兼顾理论研究与实际应用,一部分是作者的研究结果,更多的是介绍了同行的研究成果,藉此以抛砖引玉,望与同行携手共同促进混凝土碳化研究的深入开展。

此书是混凝土碳化研究初涉者快速了解混凝土碳化问题的一个窗口,也可供从事混凝土碳化研究的人员参考。

作者的恩师大连理工大学教授、中国工程院院士赵国藩先生在本书的撰写过程中给予了悉心指导,并为本书作序;在出版过程中,河南省水利科学研究院左英勇教授对书稿进行了校对,在此表示衷心感谢!

限于作者的水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 4 月

主要符号

L : 混凝土碳化深度

t : 混凝土碳化时间

t_c : 混凝土保护层完全碳化所需时间

w : 混凝土碳化速度系数

w_n : 自然环境下的碳化速率系数

w_a : 人工条件下的碳化速率系数

b : 裂缝宽度

RH : 相对湿度

c : 混凝土保护层厚度

D_e : CO_2 气体在混凝土孔隙中的有效扩散系数

D_c : 腐蚀性气体在碳化混凝土中的有效扩散系数

D_e^c : CO_2 气体在碳化混凝土孔隙中的有效扩散系数

D_{cr} : 裂缝内腐蚀性气体的扩散系数

m_0 : 单位体积混凝土吸收 CO_2 气体的量

m_c : 单位体积混凝土吸收腐蚀性气体的量

ε_p : 混凝土孔隙率

$[\text{CO}_2]^0$: 环境中 CO_2 的气体摩尔浓度

$[\text{CO}_2]$:混凝土中 CO_2 的气体摩尔浓度

C_0 :混凝土表面处腐蚀性气体的浓度

K_{CH} :氢氧化钙的碳化反应速率常数

K_{CSH} :水化硅酸钙的碳化反应速率常数

λ :碳化指数

β_b :黏结力降低系数

D :钢筋直径

目 录

序	赵国藩
前 言	
主要符号	
第一章 绪 论	(1)
第一节 混凝土碳化状况调查	(1)
第二节 国内外研究状况	(3)
第三节 本书的主要内容	(6)
参考文献	(8)
第二章 碳化的机理	(12)
第一节 碳化的化学过程	(12)
第二节 影响碳化的因素	(13)
第三节 碳化区的结构	(21)
参考文献	(25)
第三章 碳化的检测与分布	(27)
第一节 碳化深度的检测	(27)
第二节 人工碳化方法	(30)
第三节 结构中的碳化分布	(33)
第四节 裂缝处的碳化分布	(38)
第五节 高性能混凝土碳化的特点	(40)
参考文献	(41)
第四章 碳化混凝土的性质	(43)
第一节 碳化混凝土的抗压性能	(43)
第二节 碳化混凝土的抗拉性能	(45)

第三节 碳化混凝土与新混凝土的黏结性能	(63)
第四节 碳化混凝土的抗渗性及孔隙结构	(66)
参考文献	(70)
第五章 碳化的危害与作用	(72)
第一节 碳化形成收缩裂缝	(72)
第二节 碳化影响混凝土的稳定	(73)
第三节 碳化引发钢筋锈蚀	(74)
第四节 碳化抑制混凝土的盐霜	(83)
第五节 碳化保护混凝土中的玻璃纤维	(84)
第六节 碳化有利于快速养护	(84)
第七节 碳化对混凝土无损测强的影响	(85)
参考文献	(93)
第六章 碳化对结构性能的影响	(95)
第一节 碳化与混凝土均匀性的关系	(95)
第二节 碳化与混凝土裂缝的关系	(106)
第三节 碳化对保护层厚度取值的影响	(113)
第四节 碳化对结构耐久性的影响	(119)
第五节 碳化对结构安全性的影响	(124)
第六节 碳化对结构质量评估的影响	(125)
参考文献	(134)
第七章 碳化深度的预测	(136)
第一节 基于混凝土特征的预测模型	(136)
第二节 考虑多因素的预测模型	(139)
第三节 随机时间序列预报模型	(149)
第四节 基于模糊理论的预测模型	(157)
第五节 基于灰色理论的预测模型	(165)
第六节 基于神经网络理论的预测模型	(169)
第七节 基于混凝土孔隙结构的预测模型	(173)

第八节 裂缝处碳化深度的预测模型	(173)
第九节 其他预测模型	(174)
参考文献	(178)
第八章 碳化的防护	(180)
第一节 表面覆盖防护法	(180)
第二节 改善配合比提高抗碳化能力	(189)
第三节 混凝土的再碱化提高抗碳化能力	(192)
参考文献	(199)

第一章 绪 论

第一节 混凝土碳化状况调查

自从 19 世纪 20 年代波特兰水泥问世以来,混凝土材料就以其广泛的适用性和低廉的造价在工民建、水工、港工、公路等领域内得到了普遍使用。过去由于在设计和施工时对混凝土碳化问题重视不够,导致混凝土抗碳化能力较低,造成不少建筑物的耐久性差,被迫提前加固。目前,我国建筑业的重点也正由新建转向新建和维修改造并重的局面。

混凝土碳化引起的钢筋锈蚀已经或正在给国民经济带来巨大的损失。西方发达国家由于工程建设开始得比较早,工程服役时间较长,此问题暴露得比较突出。例如,美国标准局 1975 年的调查表明:美国全年各种腐蚀造成的损失约为 700 亿美元,其中因混凝土碳化引起的钢筋锈蚀损失占 40% (280 亿美元)。在英国,由于混凝土碳化引起钢筋锈蚀而需要重建或更换钢筋混凝土的建筑物占 36%。据 1975 年苏联有关资料统计,在一般的工业区,大部分冶金、化工、机械制造、造纸和食品工业的厂房和构筑物都受着钢筋锈蚀的侵害,为此受到的损耗总值超过 400 亿卢布,占工业固定资产的 16%,若不对这些厂房和构筑物采取专门的措施,则因建筑结构使用期限缩短而造成的材料损耗每年就达 20 亿卢布。

在我国,建设部统计资料表明,现有的近 70 亿 m^2 建筑物中有 50% 进入老化阶段,其中有 10 亿 ~ 12 亿 m^2 需经加固改造才能安全使用。由于建筑工程中绝大多数是钢筋混凝土结构,据调查,在

一般大气环境下有 40% 的工业民用建筑结构的混凝土已碳化到钢筋表面,在较潮湿环境下有 90% 构件的钢筋已经锈蚀。例如某企业食堂,1999 年 5 月竣工,2000 年 5 月检测发现,该食堂厨房内两道梁混凝土保护层厚度仅为 20 mm 左右,远小于 35 mm 的设计厚度,且由于处于高湿高温的环境中,保护层已完全碳化,梁底部多处出现顺筋裂缝,混凝土局部脱落。再如某公司北部机修厂机动科办公楼服役几年后,屋面板碳化 40 mm,板肋多处顺筋开裂,缝宽 6 mm,主肋挠度 40 mm,安全隐患严重。另有某钢铁公司初轧厂均热炉烟囱使用近 20 年(环境无特殊腐蚀性),筒壁混凝土龟裂,起鼓脱落。实测强度为设计强度的 58.8%,1.3 m 以上为 22.4 MPa(设计 C18),1.3 m 以下为 10.4 MPa,碳化深度 4.5 ~ 5.5 mm,底部裂缝超出允许值 0.3 mm,钢筋严重锈蚀,仅为原面积的 65.8%。

水利工程一般多处于野外,环境条件恶劣,混凝土建筑物更易出现老化病害,且有的已相当严重,必须投入巨额资金进行维修或加固。我国 1985 年对全国 40 余处中小型钢筋混凝土水闸结构的耐久性进行了调查,结果表明:由于混凝土碳化引起的钢筋锈蚀使闸墩、胸墙、大梁破坏的工程占 47.5%。1985 年安徽省对 14 座水工混凝土建筑物进行了锈蚀破坏调查,几乎全部存在不同程度的混凝土碳化和钢筋锈蚀破坏。有学者对漳山、泗阳、三河等 6 座淡水闸的调查表明,这些水库公路桥、工作桥、胸墙等钢筋混凝土构件,由于采用火山灰水泥或现场掺合火山灰质混合材料,及混凝土施工质量欠佳等原因,使用仅 15 ~ 24 年,混凝土碳化深度已接近或超过钢筋的混凝土保护层厚度,钢筋锈蚀严重,多处出现顺筋裂缝。在对 34 座水电站混凝土建筑物碳化速度的检测结果中,有 15 个混凝土工程的碳化速度不超过 1 mm/a,另外 19 个混凝土工程的碳化速度大于 1 mm/a,其中大于 1.5 mm/a 的混凝土工程有 13 个。古田溪二级水电站平板坝,挡水平板厚度为 652 mm,运行

30 多年后,平均碳化深度为 40 mm,耗资 2 500 万元加固改造;珠窝和新安江大坝经过 4 年和 33 年的运行,坝面最大碳化深度分别达到 7 mm 和 112 mm;吉林丰满水电站,大坝迎水面某处碳化深度达 50 mm 以上;吉林市某灌区始建于 1976 年,到 1986 年,灌区已有许多混凝土建筑物产生裂缝、钢筋裸露等破坏现象,究其原因,大多是由于混凝土碳化造成的。

在交通行业,混凝土碳化带来的危害也相当严重。对某高速公路段内的路桥调查显示,20 世纪 90 年代中期建成的混凝土结构,使用约 8 年,混凝土碳化深度已达 10 mm 以上。上海四川路桥建于 20 世纪 20 年代,建筑风格与周围欧式建筑遥相呼应,是一座具有历史文化价值的建筑,90 年代上海市政工程管理处在对上海市内旧桥质量普查中发现,四川路桥混凝土保护层厚度为 40 ~ 70 mm,实测碳化深度已大于或等于保护层厚度。江苏省国营淮海农场位于淮河下游、苏北浇灌总渠尾闸两岸,东临黄海,自 1995 年建场以来,大搞场内道路桥梁建设,至 2001 年底,全场共建有人行桥、机耕桥、公路桥 50 余座,1998 年对全场 90 年代以前建造的桥梁检测表明,早期建造的桥梁混凝土碳化严重,平均碳化深度 7.5 ~ 18.9 mm,部分测点已接近或超过 30.0 mm 厚的混凝土保护层。

总之,碳化普遍存在于混凝土工程中,是影响混凝土结构耐久性的一个重要因素。

第二节 国内外研究状况

20 世纪 60 年代,国际上一些发达国家就开始重视混凝土结构的耐久性问题,对混凝土碳化进行了大量的试验研究和理论分析。国内在这方面起步较晚,从 20 世纪 80 年代开始研究混凝土碳化和钢筋锈蚀问题,通过快速碳化试验、长期暴露试验及实际工

程调查,研究混凝土碳化的影响因素与碳化深度预测模型。迄今为止,国内外学者做了许多深入的研究,并取得了一系列成果。基于这些研究成果,各国工程界相继把碳化作为混凝土耐久性的一个重要方面纳入了设计规范,国际混凝土学术界已举办过多次有关混凝土碳化的学术讨论会,并且有相当数量关于混凝土碳化的论文发表。国内外对混凝土碳化的研究主要集中在碳化机理、混凝土碳化的影响因素、碳化深度预测的数学模型、碳化混凝土的研究方法以及碳化混凝土力学性能等方面,另外,碳化混凝土的防护处理措施也是目前研究的重点和热点。

混凝土碳化机理的研究涉及宏观和微观两个方面,研究内容包括混凝土中的可碳化物质分析,碳化反应过程分析,孔隙率、孔结构、孔隙大小、混凝土含水率等对 CO_2 等酸性气体在混凝土中扩散的影响,混凝土碳化前缘的物质浓度梯度,混凝土碳化的条件,水泥石中水化产物稳定存在的 pH 值分析等。一些学者还运用化学分析、X 衍射分析、热重分析、化学热力学原理及有限元计算等方法开展碳化机理的研究。

混凝土碳化是一个多相物理、化学变化过程,碳化的深度和速度受多种因素影响,这些因素可以归纳为材料本身因素和环境因素。水灰比、水泥品种与用量、骨料品种与粒径、掺加剂、混凝土抗压强度、养护方法与养护时间等属于材料本身的因素; CO_2 浓度、光照、相对湿度、温度、应力状态、表面覆盖层等属于环境条件的因素。

水灰比是决定混凝土各项性能的主要参数,很多学者研究了水灰比对混凝土碳化的影响。日本学者就曾通过假设一个混凝土孔结构模型,推导了水灰比与混凝土碳化深度的关系。水灰比对扩散系数影响的试验研究、水灰比对碳化深度(速度)的影响、水灰比与混凝土碳化速度的关系等都是研究的重点,有学者曾得出水灰比与混凝土碳化速度成线性关系,还有学者给出了碳化速度

系数与水灰比的表达式。水泥用量直接影响混凝土吸收 CO_2 的量。通过研究水泥用量对碳化的影响,有学者给出了不同水泥用量的碳化深度比值,还得出碳化与水泥用量指数的倒数成正比。另外,通过不同水泥品种的混凝土碳化对比试验,普遍得出早强型普通硅酸盐水泥混凝土碳化速度最慢,矿渣水泥混凝土与普通硅酸盐水泥混凝土碳化速度基本相同。粉煤灰(火山灰)水泥混凝土、矿渣水泥混凝土、膨胀水泥混凝土的碳化问题以及水泥含碱量对碳化的影响等都曾有学者进行过专门的研究,并且得出了有价值的结论。骨料的品种和级配不同,其内部孔隙结构差别很大,直接影响着混凝土的密实性,施工质量、混凝土养护状况对碳化也有一定影响,有学者曾将施工质量划分等级,给出了相应的碳化速度。

混凝土碳化与光照和温度有直接关系。随着温度升高, CO_2 在空气中的扩散逐渐增大,为其与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应提供了有利条件。温度、相对湿度、 CO_2 浓度对混凝土碳化的影响等方面的研究我们都可以从文献中看到。自然碳化与人工加速碳化相关性的试验研究对于以后开展碳化问题的研究具有重要意义。

混凝土碳化深度预测模型是目前研究的热点,比较具有代表性的是混凝土强度模型、水灰比模型、多因素模型、多系数方程、基于人工神经网络方法建立的多因素碳化深度预测模型以及随机模型等。

国内外研究的结果表明,混凝土碳化后抗压强度提高,延性降低,具有明显的脆性,对抗震不利,有学者专门做过新建混凝土和碳化混凝土框架柱抗震性能的差异研究;碳化导致钢筋表面的钝化膜发生破坏,引发钢筋锈蚀,降低钢筋与混凝土之间的黏结力,对结构耐久性有不利影响;高温火灾后的碳化混凝土,与未碳化混凝土相比,残余抗压强度略有提高,但残余极限应变降低,对结构抗火不利;混凝土碳化后,其表面硬度和强度都会有较大的提高,