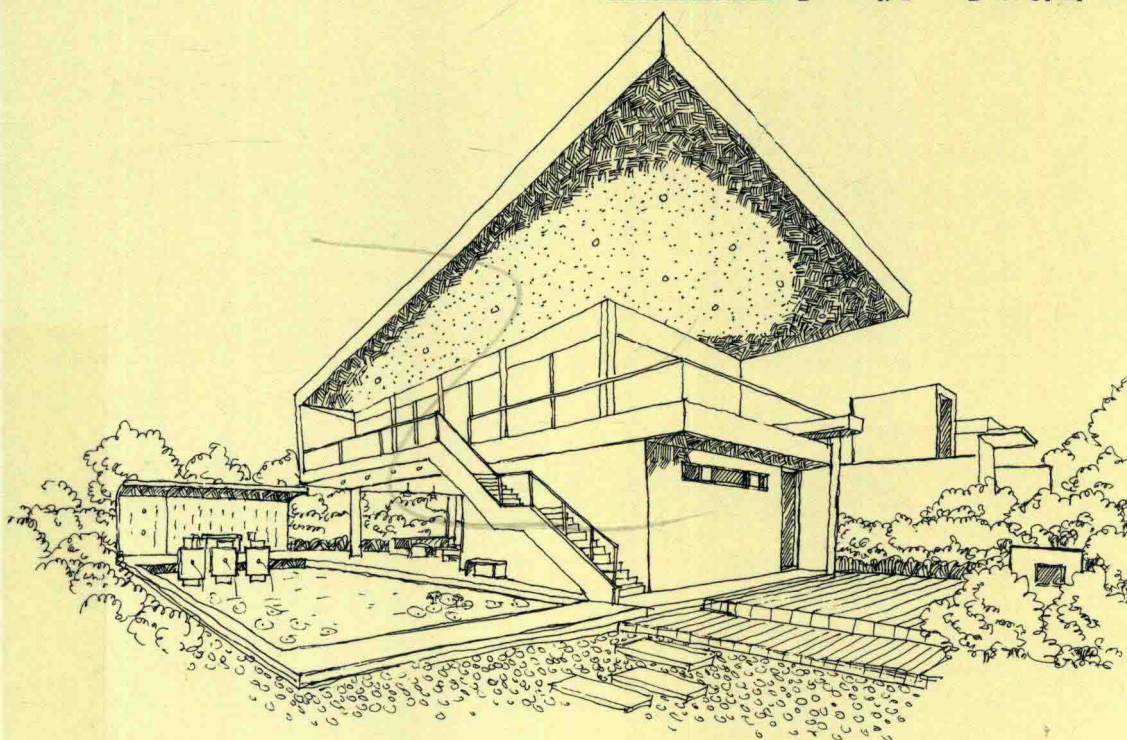


混凝土工程应用新技术丛书

混凝土渗裂性能 与改善技术

PENETRATION AND CRACKING PERFORMANCE
OF CONCRETE AND IMPROVING TECHNOLOGY

李悦 李战国 著



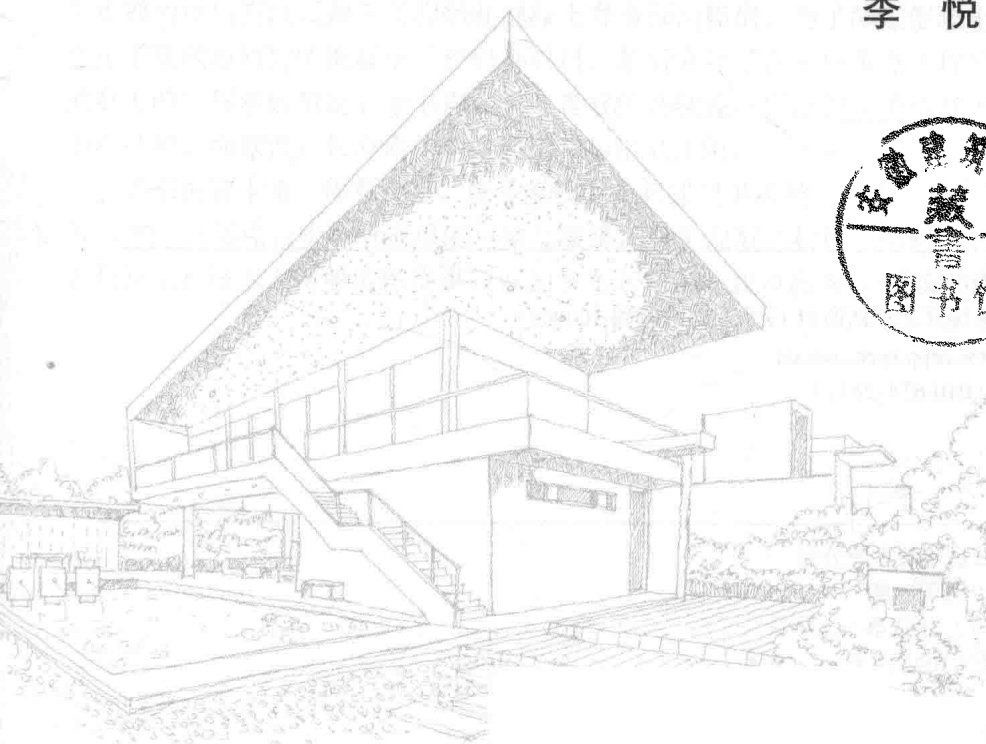
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

混凝土工程应用新技术丛书

混凝土渗裂性能 与改善技术

PENETRATION AND CRACKING PERFORMANCE
OF CONCRETE AND IMPROVING TECHNOLOGY

李悦 李战国 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书总结了作者近年来对混凝土基体开裂与渗透、钢筋锈蚀、混凝土防护与修补及高性能混凝土工程实践等方面的研究内容,共包括三篇:第一篇介绍了混凝土开裂原理及改善方法;第二篇介绍了混凝土渗透原理及改善方法;第三篇介绍了混凝土防护修补材料与高性能混凝土工程实践。

本书可供混凝土结构设计单位、混凝土施工单位、混凝土原材料供应企业、混凝土搅拌站、监理单位、政府建设管理部门的科研、技术与管理人员,以及高等院校的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土渗裂性能与改善技术 / 李悦, 李战国著. —北京: 中国电力出版社, 2018.9
(混凝土工程应用新技术丛书)
ISBN 978-7-5198-1992-7

I. ①混… II. ①李… ②李… III. ①防渗混凝土—研究 ②混凝土—抗裂性—研究 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 116793 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 未翠霞 (010-63412611)

责任校对: 朱丽芳

装帧设计: 王英磊

责任印制: 杨晓东

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2018 年 9 月第一版

印 次: 2018 年 9 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 21.25

字 数: 518 千字

定 价: 68.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

序

目前我国重大基础工程规模空前，大型公共基础设施、水工结构、电力工程、超高层建筑等重大工程对混凝土有着巨大的需求，传统混凝土已难于满足现代混凝土结构的多样性与复杂性要求，亟需混凝土技术不断发展和创新，以满足超长跨距、超大体积、超高层、复杂设计等特点，对混凝土提出了更多、更高、更新的要求。然而，现代混凝土结构早期开裂问题、严酷环境下混凝土耐久性问题突出，现代混凝土结构亟需突破混凝土功能化瓶颈。

针对上述问题，应加大混凝土理论的原创性研究，重视基于混凝土耐久性的高增韧、高抗裂、高抗渗、高耐蚀的新理论与新技术的研究，“背靠理论、面向生产”，重点发展混凝土流动性调控技术、混凝土收缩与裂缝控制技术、混凝土耐久性提升技术、混凝土功能化关键技术等先进技术改造传统混凝土材料，积极将新理论、新技术应用到国家重大工程建设之中。

该书针对混凝土容易出现渗裂等通病问题，从混凝土渗裂、钢筋锈蚀、修补加固等全寿命周期的角度，开展了系统研究：首先介绍了混凝土开裂与渗透的基本原理及改善方法，研究了荷载与侵蚀环境耦合作用下钢筋混凝土中钢筋锈蚀变化规律，提出了锈蚀钢筋混凝土构件承载力评估方法及地下工程钢筋混凝土寿命预测模型。为了降低混凝土渗裂危害，该书还介绍了课题组研发的混凝土防护修补材料，最后介绍了在多项重点工程中采用抗渗裂高性能混凝土的工程实践情况。全书内容具有良好的连续性，提出的理论与技术方法为实现混凝土的高抗裂、强韧性、长寿命具有重要意义与推动作用。

该书内容丰富、体系完整，是李悦教授及其课题组成员在“十三五”国家重点研发计划、国家 973 计划项目中科研成果的总结与凝练，对于混凝土材料与结构领域的高校师生、科研人员及工程技术人员等能够提供较好的参考和帮助。我很高兴看到该书的出版，特为之序。



中国工程院院士

前 言

现代混凝土已经成为应用最为广泛的土木工程材料，中国土木工程高速建设对混凝土的各项性能提出了更多、更高、更新的要求。现代混凝土的三大关键技术包括：混凝土材料裂缝控制技术，混凝土材料耐久性提升技术，混凝土材料多功能化和高性能化。开裂问题仍然是混凝土的通病，从混凝土的全寿命周期来看，为实现混凝土结构材料的高性能与长寿命，下面系列关键性能具有显著因果关系与连续性：容易开裂→加速渗透传输→造成钢筋锈蚀→需要修补加固。因此，为实现混凝土的高抗裂、强韧性、长寿命，非常有必要对上述混凝土损伤过程及性能提升方法进行系统研究。

为此，本书介绍了作者在上述领域的研究成果，主要内容包括三篇。

第一篇介绍了混凝土开裂原理及改善方法。首先简述了混凝土开裂机理与常用的分析测试方法，然后采用现代微观测试技术研究了水泥基材料水化硬化过程及对开裂有重要影响的孔结构变化规律，建立了微观孔结构与强度等物理力学性能的关系，研究了不同材料组成、温度、湿度、荷载作用及工程结构类型条件下水泥基材料的开裂机理，最后提出了相应的改善措施。

第二篇介绍了混凝土渗透原理及改善方法。首先简述了硫酸盐和氯盐环境下混凝土的渗透性原理与测试方法，然后分别研究了混凝土组成、微结构与氯盐和硫酸盐渗透性的相互关系，探明了在荷载与侵蚀环境耦合作用下，钢筋混凝土中钢筋锈蚀变化规律，提出了锈蚀钢筋混凝土构件承载力评估模型及地下工程钢筋混凝土结构寿命预测模型。

第三篇介绍了混凝土防护修补材料与高性能混凝土工程实践。为了降低混凝土渗裂危害，介绍了项目组研发的混凝土防护修补材料，包括环氧灌浆材料、聚合物修补砂浆、水泥基渗透结晶材料等，比较分析上述材料的修补加固效果，并以受损钢筋混凝土为例，综合比较了多种修补方法及其可行性。最后介绍了在多个重点工程中采用的抗渗裂高性能混凝土的工程实践情况。

本书内容是作者在混凝土抗渗裂领域多年的研究成果，希望能够对混凝土长寿命和高耐久起到积极的推动作用。此外，武汉理工大学丁庆军教授在抗渗裂高性能混凝土设计与工程实践方面给予了大力指导和帮助，在此表示感谢。

本书得到了“十三五”国家重点研发计划“高抗裂预拌混凝土关键材料及制备技术”（2017YFB0310100）资助。

由于编著者水平有限，书中疏漏之处在所难免。如蒙指正，不胜感谢。

作 者

2018年8月

目 录

序

前言

第一篇 混凝土开裂原理及改善方法

第1章 混凝土开裂原理及改善方法概述	3
1.1 研究意义	3
1.2 国内外研究现状	4
第2章 水泥基材料水化硬化过程及微观结构研究	17
2.1 水泥浆体水化硬化过程的交流阻抗研究	18
2.2 水泥浆体微观孔结构的研究	21
2.3 X射线衍射定量物相分析研究	27
第3章 水泥基材料抗裂性能研究	28
3.1 试验材料	28
3.2 水泥砂浆物理力学性能研究	28
3.3 水泥基材料受限浆体开裂敏感性研究	31
3.4 水泥基材料轴向拉伸性能研究	34
3.5 水泥基材料抗拉强度和断裂面三维总面积关系	38
第4章 材料组成对水泥混凝土开裂的影响	44
4.1 材料组成对水泥净浆受限收缩开裂的影响	44
4.2 材料组成因素对混凝土抗裂性能的影响	52
4.3 常用外加剂对混凝土抗裂性能影响的试验研究	59
第5章 温度变化导致混凝土开裂的温度应力理论模拟研究	70
5.1 理论依据	70
5.2 不同因素对混凝土温度效应影响的数值算例	73
5.3 结果分析	75
第6章 湿度变化导致的水泥基材料收缩开裂研究	81
6.1 不同养护条件下水泥基材料收缩性能的试验研究	81
6.2 不同养护条件下水泥基材料内部相对湿度的研究	84
6.3 内部环境湿度变化对水泥基材料微观收缩及开裂的影响	89
第7章 荷载作用下水泥基材料开裂过程的新型检测方法	95
7.1 水泥基材料的开裂过程的交流阻抗研究	95
7.2 水泥基材料开裂过程的超声波脉冲法研究	98

第 8 章 荷载作用下二次衬砌混凝土结构的开裂研究 101

8.1 二次衬砌模型的制作 101

8.2 二次衬砌结构模型的有限元分析 115

参考文献 123

第二篇 混凝土渗透原理及改善方法

第 9 章 混凝土渗透原理及改善方法概述 131

9.1 硫酸盐作用下混凝土的渗透性研究现状 132

9.2 混凝土中氯离子的传输与破坏 134

9.3 氯盐环境下混凝土中钢筋锈蚀原理、检测方法与研究现状 139

9.4 现状与不足 146

第 10 章 氯离子在混凝土中的渗透性研究 147

10.1 氯离子渗透性试验 147

10.2 混凝土渗透性与孔结构关系的研究 152

第 11 章 硫酸盐在混凝土中的渗透性研究 157

11.1 试验方案设计 157

11.2 试验结果及分析 159

第 12 章 多因素耦合作用下混凝土中钢筋锈蚀的试验研究 164

12.1 试验材料及试验配合比 164

12.2 试验方案 165

12.3 氯盐和荷载耦合作用下混凝土中钢筋锈蚀研究 168

12.4 硫酸盐和荷载耦合作用下混凝土中钢筋锈蚀研究 174

12.5 不同浸泡状态下混凝土中钢筋锈蚀的研究 184

12.6 疲劳荷载作用下混凝土中钢筋锈蚀的研究 187

12.7 钢筋锈蚀膨胀时的应力应变 191

第 13 章 锈蚀钢筋混凝土构件承载力评估 199

13.1 锈蚀钢筋混凝土构件的破坏模式 199

13.2 锈蚀开裂前钢筋混凝土构件承载力评估 200

13.3 锈蚀开裂后钢筋混凝土构件承载力评估 202

第 14 章 地下工程钢筋混凝土结构寿命预测模型 208

14.1 多因素作用下钢筋混凝土中氯离子扩散模型的建立 208

14.2 不同裂缝控制等级时构件的寿命预测 217

参考文献 226

第三篇 混凝土防护修补材料与高性能混凝土工程实践

第 15 章 修补防护材料与方法的简介 231

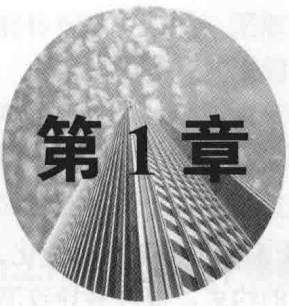
15.1 混凝土裂缝修补技术 231

15.2	混凝土裂缝修补材料	233
15.3	环氧树脂灌浆材料	234
15.4	聚合物改性水泥砂浆	235
第 16 章	环氧灌浆材料的制备与性能研究	240
16.1	试验原材料	240
16.2	环氧灌浆材料的制备	241
16.3	环氧树脂灌浆材料性能测试方法	241
16.4	裂缝修补灌浆材料的性能研究	242
第 17 章	裂缝修补材料灌注带缝混凝土的强度试验研究	248
17.1	带缝混凝土试件制备	248
17.2	模拟灌浆	248
17.3	试验测试方法	250
17.4	结果分析	250
第 18 章	裂缝修补材料灌注带缝混凝土的灌注饱和度检测	254
18.1	灌浆修补效果的渗水试验检测	254
18.2	灌浆修补效果的超声波检测	255
18.3	渗水试验结果及分析	258
第 19 章	聚合物修补砂浆的制备与性能研究	261
19.1	修补砂浆制备	261
19.2	修补砂浆的工作性	267
19.3	修补砂浆的抗压强度和抗折强度	268
19.4	修补砂浆的劈裂抗拉强度	269
19.5	修补砂浆的轴向拉伸性能	270
19.6	修补砂浆的黏结性能	271
19.7	修补砂浆的收缩性能	272
第 20 章	修补砂浆在混凝土构件中的应用研究	274
20.1	试验原材料及配比	274
20.2	修补厚度对修补效果的影响	274
20.3	修补界面方位对黏结强度的影响	280
20.4	错台结构修补试验	282
第 21 章	水泥基渗透结晶材料的研制	285
21.1	CCCW 防水机理简介	285
21.2	试验方法	286
21.3	活性物质的优化试验研究	287
21.4	CCCW 配方优化试验	290
21.5	CCCW 性能测试	294
21.6	自修复性能试验	298
第 22 章	受损钢筋混凝土的修补及其耐久性	299
22.1	试验过程	299

22.2 试验结果及分析	302
22.3 修补方法的改进建议	306
第 23 章 抗渗裂高性能混凝土工程实践	307
23.1 混凝土关键性能对材料组成的要求	307
23.2 低温升抗裂大体积混凝土	309
23.3 外包钢管的 C30 抗裂混凝土	316
23.4 C80 高抛自密实微膨胀钢管混凝土	320
参考文献	325

第一篇

混凝土开裂原理及改善方法



第1章

混凝土开裂原理及 改善方法概述

1.1 研究意义

众多建筑材料中,水泥混凝土是土木工程中运用最广泛的人工材料。但是水泥混凝土容易开裂,造成工程结构服役寿命降低。例如有的公路桥梁使用 3~5 年后就出现破损,个别的建成后尚未投入使用已需要维修,甚至边建边修的情况也时有发生。中国工程院调研报告表明,我国每年土建工程仅因钢筋混凝土结构的过早失效造成的直接经济损失超过 1000 亿元。

水泥混凝土是由粗细骨料、水泥水化产物、未水化的水泥颗粒、水及气孔等组成的复合胶凝材料体。水泥混凝土在水化硬化的过程中,会形成一些原生固有缺陷,包括原生的凝胶孔、毛细孔及早期非受力变形所造成的微裂缝等,这些缺陷是水泥混凝土后来出现宏观性能缺陷的重要原因^[1-1]。混凝土浇筑成型后,即使未承受荷载,内部也存在微裂缝。主要原因有二:一方面混凝土是由水泥浆体硬化后的水泥石与骨料组成,它们的物理力学性能并不一致,水泥浆体硬化后收缩值较大,而混凝土中的骨料则限制了水泥浆体的自由收缩,这种约束作用使混凝土内部从硬化开始就容易在骨料与水泥浆体的黏结面上出现了微裂缝;另一方面混凝土成型后由于泌水作用,某些上升的水分为粗骨料所阻止,因而其被聚积在粗骨料的下缘,混凝土硬化后就成为界面裂缝。当荷载或变形引起的拉应力没有达到极限抗拉强度时,这些裂缝是稳定的。只有当外力或变形过大时,这些存在于界面上的微裂缝才会发展成为宏观裂缝^{[1-2],[1-3]}。

裂缝的存在会降低混凝土的密实性、抗渗性、抗冻性、强度和表观密度,当裂纹与水相通时会导致漏水,轻则影响建筑物的美观,重则影响结构物的整体强度,降低结构物的使用寿命,危害建筑物的安全运行。因此,裂缝的形成机理及防治一直是混凝土工程领域的重要课题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 混凝土收缩开裂机理

混凝土收缩是指混凝土在凝结硬化过程中和外界环境作用下,由于混凝土内部水分变化、化学反应和温度变化等而引起的体积收缩。当混凝土的收缩受到一定的约束,很容易导致混凝土开裂,这种开裂现象即为混凝土的收缩开裂。目前混凝土的收缩开裂主要分为塑性收缩开裂、自收缩开裂、干燥收缩开裂、温度收缩开裂和碳化收缩开裂五大类。

1.2.1.1 塑性收缩开裂

早在 1942 年 Swayze^[1-4]提出塑性收缩的概念,目前 ACI(The American Concrete Institute, 美国混凝土协会)将混凝土的塑性收缩定义为“发生在混凝土凝结前的收缩”。

混凝土塑性收缩是指混凝土由于表面失水而产生的收缩,主要发生在混凝土硬化前的塑性阶段。在混凝土浇筑几个小时内,混凝土外表面的水分会从水泥浆体蒸发出去,因此浆体孔隙内部形成的弯月面形状复杂,进一步会产生毛细管负压,使水泥浆体的体积发生收缩^[1-5],但此时混凝土自身的抗拉强度很低,所以当负压引起的收缩应力大于混凝土的抗拉强度时,

混凝土外表面就会出现开裂现象。开裂现象在混凝土养护期间的前几个小时内会越来越严重,裂缝的数目、长度及最大裂缝宽度都有一定的发展,一直持续到混凝土初凝时为止。裂缝的宽度 0.01~3mm,长度不等,裂缝深度不深,开裂都发生在混凝土暴露在外的较薄的砂浆层内,如图 1-1 所示,因此将这类裂缝称为塑性收缩裂缝^[1-6]。塑性收缩裂缝的产生受外界温度、湿度、风速的影响,也同时受到混凝土本身温度和泌水性的影响。

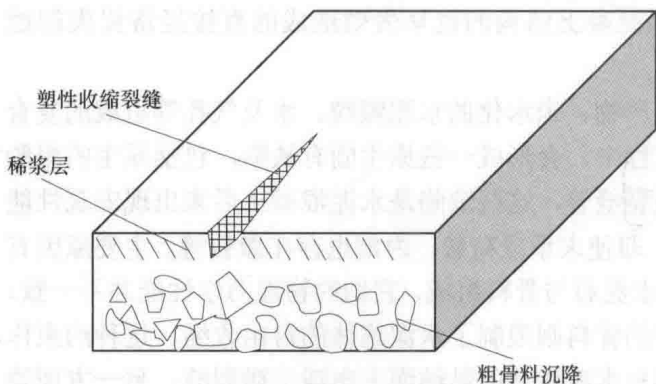


图 1-1 混凝土塑性收缩开裂示意图

1.2.1.2 混凝土自收缩开裂

Lyman 在 1934 年将自收缩定义为非温度或水分扩散的原因而导致的收缩^[1-7]。随后, Davis^[1-8]发现混凝土在质量和温度没有任何变化的前提下自身体积能够发生收缩。

混凝土自收缩是指在自身温度不变和外界无水分交换的条件下,硬化过程中宏观的体积减小。它不仅在混凝土表面发生,在其内部也均匀地发生。一般认为,混凝土自收缩是混凝土中水泥水化后的产物体积小于水化前的体积造成的,其作用机理为水泥在水化过程中形成了大量的微细孔结构,同时由于水化作用,自由水的含量会逐渐降低,内部的相对湿度也会随之降低,从而会在毛细孔水中形成复杂的弯月面,在混凝土内部空隙中会产生毛细管张力,在混凝土硬化过程中毛细管张力会越来越大,当混凝土终凝后,毛细管张力会让混凝土的宏

观体积发生收缩。采取阻止其水分扩散到外部环境的措施并不能有效降低自收缩^[1-9]。

自收缩主要发生的时间是混凝土凝结硬化后几周内，尤其是开始凝结硬化后的几天。影响混凝土自收缩因素有很多，如水胶比、水泥和掺合料的化学成分和种类、粗细骨料级配及用量、养护条件等。由于测试方法不同而导致的测定自收缩值有很大差别，在测量自收缩时，应该从混凝土开始凝结就将试件密封并开始测量^[1-10]。

1.2.1.3 混凝土干燥收缩开裂

干燥收缩指在混凝土停止养护后，其内部毛细孔和凝胶孔中的吸附水散失到空气中而引起的收缩，干燥收缩是一种不可逆的收缩，其产生的根本原因是因为 C-S-H 中水分布的变化以及 C-S-H 粒子间黏结的变化，致使 C-S-H 粒子产生重新排列，进而产生的收缩。影响混凝土干缩的因素很多，如 C-S-H 颗粒的高分散度，水泥石中毛细管孔网络的高孔隙率以及 C-S-H 凝胶中的范德华力等。随着湿度的降低，干燥收缩增加，但是不同相对湿度内，干燥收缩的变化规律并不相同^[1-11]，如图 1-2 所示。

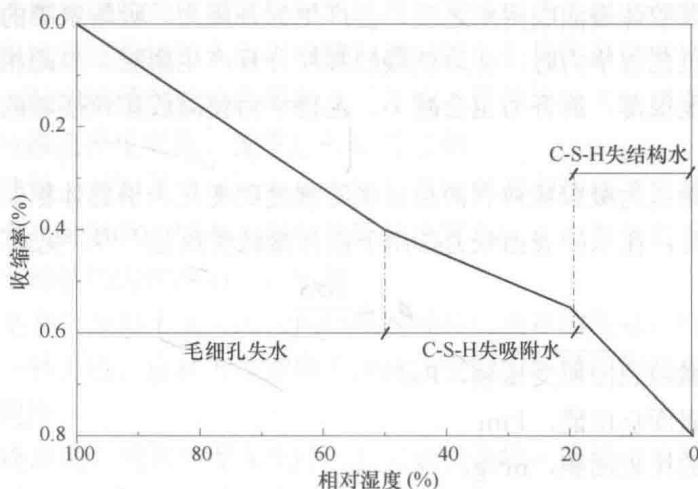


图 1-2 水泥浆体的收缩与相对湿度的关系

对于混凝土的干燥收缩解释有很多种，目前已经被普遍认同和接受的学说包括毛细管张力学说、拆开压力学说和凝胶体颗粒表面能变化学说。

毛细管张力学说认为，平面状态的水的饱和蒸汽压取决于温度，而硬化水泥石内部的毛细孔水由于液面成曲面，比平面下水的饱和蒸汽压低。毛细管负压是平液面水的饱和蒸汽压与弯液面水的饱和蒸汽压之差。因为混凝土是亲水性材料，水泥能被完全润湿，所以水与毛细孔壁的接触角 $\theta = 0$ 。根据 Laplace 方程能计算出附加压力为：

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1-1)$$

式中 ΔP ——毛细孔中弯曲液体表面下的附加压力；

σ ——毛细孔中液体的表面张力；

θ ——毛细孔中液体与毛细孔壁的接触角（此时 $\theta = 0$ ）；

r ——毛细孔半径。

同时由 Kelvin 公式可知，当混凝土所处的环境相对比较干燥时，在其中形成临界半径 r

越来越小,毛细管负压增大。负压作用使水泥石产生收缩。当相对湿度降到更低时,毛细管负压引起的应力迅速增大,从而导致更大的干燥收缩^[1-10]。

$$\frac{M}{\rho} \times \frac{2\sigma}{r} \cos \theta = RT \ln \frac{p_0}{p_r} \quad (1-2)$$

式中 M ——水的分子量;

ρ ——水的密度;

R ——气体常数;

T ——绝对温度;

σ ——水的表面张力;

r ——毛细管半径;

p_0 ——正常蒸汽压;

p_r ——与液相平衡的蒸汽分压。

拆开压力学说是指由于水泥石中的凝胶体存在范德华力,致使其能吸附周围的凝胶颗粒,并且接触密实。当凝胶体表面吸附水之后,会产生拆开压力。吸附水膜的厚度越厚,拆开压力也越大,当其超过范德华力时,会迫使凝胶颗粒分开产生膨胀。与此相反的是,空气干燥时,吸附的水膜厚度很薄,拆开力也会减小,范德华力使凝胶颗粒接触的更加紧密,从而就产生收缩^[1-11]。

表面自由能理论认为凝胶颗粒表面自由能随湿度的变化会引起体积的收缩。当固体微粒表面吸附一层水膜时,在水的表面张力作用下固体微粒受压强^[1-12],见式(1-3)。

$$p_{sc} = \frac{2\sigma S}{3} \quad (1-3)$$

式中 p_{sc} ——固体微粒表面所受压强, Pa;

σ ——水的表面自由能, J/m;

S ——固体的比表面积, m²/g。

C-S-H 凝胶体具有很大的比表面积 S , 因此表面自由能 σ 的变化可引起 p_{sc} 较大变化, 从而使凝胶体系发生体积变化。相对湿度在 20%~50%, σ 随相对湿度的变化而变化。而相对湿度较大时, 由于凝胶体颗粒表面吸附多层吸附水, 故产生的压力极小^[1-10]。如果混凝土受到约束, 则发生干燥收缩时将会产生约束拉应力。当其超过混凝土的抗拉强度时, 混凝土就会发生开裂现象。

1.2.2 水泥基材料内部裂缝的宏观研究方法

随着工程建设技术的持续发展, 人们对工程质量日益关注, 无损检测技术在建设工程尤其是混凝土结构工程中起着越来越重要的作用。它不仅已经成为工程事故的检测和分析手段之一, 而且正在成为工程质量控制和构筑物使用过程中可靠性监控的一种有力工具。可以说, 无损检测技术应用的深度及广度, 将成为衡量建筑技术发展水平的重要指标之一。但是目前常用的无损检测方法只能检测到较浅范围(20~30cm)内的裂缝, 范围有限, 且至今还没有一种方法能实现实时在线监测混凝土内部裂缝缺陷动态变化情况。

目前普遍采用的混凝土缺陷的无损检测方法主要有超声脉冲法、脉冲回波法、雷达扫描

法、红外热谱法、声发射法和光纤传感检测等^[1-13]。

(1) 超声脉冲法检测内部缺陷可以分为穿透法和反射法。穿透法是根据超声脉冲穿过混凝土时,在缺陷区的声时、波高、波形等参数所发生的变化来判断缺陷的,因此它只能在结构物的两个相对面上进行检测或在同一个面上平测。目前超声脉冲穿透法已经较为成熟,并普遍用于工程实测中,我国也已经编制了相应的技术规程。反射法则是根据超声脉冲在缺陷表面产生反射波的现象对缺陷进行判断。由于它不必像穿透法那样在两个相对测试面上进行,因此对某些只能在一个测试面上检测的结构物(如球罐等密闭容器、护壁、路面等)具有特殊意义。就目前来说,超声脉冲法检测多用于裂缝位置已知的情况。

(2) 脉冲回波法是一种首先采用落球、锤击等方法在被测物中产生应力波,然后用传感器接收回波,进而用时域或频域方法分析回波反射位置,以判断混凝土中的缺陷位置。其特点是击力足以产生较强的回波,因而可检测较大的构件,如深度达数十米的基桩等。另外只要适当调整激励频谱,也可测试厚度数厘米的板。但其缺点是对混凝土内部纵向尺度较小的缺陷体的下界面难于分辨。

(3) 雷达扫描法所利用的是电磁波反射的原理,其特点是可以迅速地对被测结构进行扫描,适用于道路、机场等结构物的大面积快速扫描。但由于其仪器价格昂贵,且受钢筋低阻屏蔽的影响较大,实际应用受到一定的限制。另外其工作量比较大,要求相邻两种物质的介电常数相差较大,且探测深度有限,无法进行实时监测。

(4) 红外热谱法是一种测量或记录混凝土结构热发射的方法,当混凝土中存在缺陷时,缺陷区的热传导将会受到阻抑,因而可判断缺陷的位置和大小。但是由于受红外线穿透能力的限制,对于混凝土深层的内部缺陷难以检测。

(5) 声发射法是利用混凝土受力时因内部微区破坏而发声的现象,根据声发射信号分析混凝土损伤程度的一种方法。这种方法常用于混凝土受力破坏过程的监视,用以确定混凝土的受力历史和损伤程度。

(6) 光纤传感检测法,须预先埋入光纤,且只能检测埋入光纤位置处的裂缝,在实际工程应用中环境条件对精密纤细的光纤测量的长期有效性影响很大。

1.2.3 水泥基材料收缩开裂的微观研究方法

电子显微镜是研究水泥基材料微观收缩开裂的有力工具,人们可以借助电子显微镜直接观察到水化产物的形貌及其产生收缩和开裂的形态。常用于水泥基材料微观研究的电子显微镜有透射电镜、扫描电镜、高压透射电镜和扫描透射电镜等。

透射电子显微镜(TEM)和扫描电子显微镜(SEM)是较为常用的方法,但对这两者来说样品的制备过程都比较复杂,并有可能破坏样品。例如,TEM必须将试样制备的很薄以获得足够的电子透明度,但这样会使样品的显微结构遭到破坏,并且有可能会引起产物的变化。SEM所用样品必须保持干燥并在表面镀上导电层(金或碳)以防止观察时发生表面放电现象。干燥样品有时会使其微结构失真而镀导电层则往往会掩盖样品表面的精细结构^[1-14]。此外,在TEM和SEM观察过程中,由于样品受高真空条件下电子束轰击,也可能受到破坏。样品制备和观察过程中的高真空度决定了TEM和SEM无法用于连续观察水泥水化硬化过程中的微观收缩开裂。

电子显微技术的进步使原位观察湿态样品成为可能。环境扫描电镜(ESEM)采用多级

真空系统、气体二次电子信号探测器等独特设计，观察不导电样品不需要镀导电膜，可以在控制温度、压力、相对湿度和低真空度的条件下进行观察，减少了样品的干燥损伤和真空损伤，这些改进使 ESEM 显著区别于传统的电子显微技术。ESEM 非常适用于连续观察水泥水化过程中的微观收缩开裂。

图 1-3 是 J.Bisschop^[1-15]利用 ESEM 观测同一位置不同湿度下混凝土界面处微裂缝的变化情况。试验发现，湿度在 90%~100%时没有看到任何微裂缝，甚至将湿度缓慢降到 70%时仍然没有发现裂缝 [见图 1-3 (a)]。但是，当湿度降低到 13%时二次自收缩微裂缝在几秒内就出现了 [见图 1-3 (b)]。由此可推知，SEM 观测到的裂缝不一定是它的原始形貌，而有可能是在制样和观测过程中产生的，因此采用 ESEM 对裂缝尤其是水泥水化早期的微裂缝进行观测更科学也更真实。

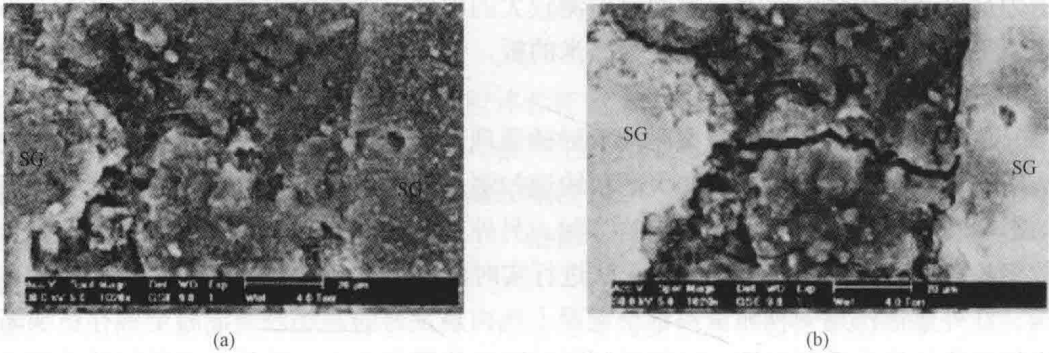


图 1-3 微裂缝的照片
(a) 相对湿度 70%，温度 3℃；(b) 相对湿度 13%，温度 30℃

1.2.4 水泥基材料收缩开裂的宏观试验方法

混凝土的收缩在时间上是连续的，并没有客观存在的分水岭，因此早期收缩和后期收缩的划分必然也是主观的。最近，一些研究者已经将收缩试验的研究提前到了混凝土由半液体向骨架形成阶段^[1-16]。此外，还有把混凝土从浇筑到温度稳定这段时间称为早期^[1-17]。

目前国内测量混凝土收缩所依据的标准是 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的接触法。该方法指出，在测量收缩前，试件应带模养护 1~2d，再在标准养护室中养护到 3d 龄期。因此，早期收缩无法依据该方法测量。国内外已经针对早期收缩的特点提出了多种试验方法，大致可以分成自由收缩试验方法和受限收缩试验方法两大类。一般认为自由收缩的测量方法可以获得不同混凝土试件的收缩值，用于定性分析混凝土抗裂性的优劣，但自由收缩测量的结果不能定量分析收缩对结构的影响，而受限收缩试

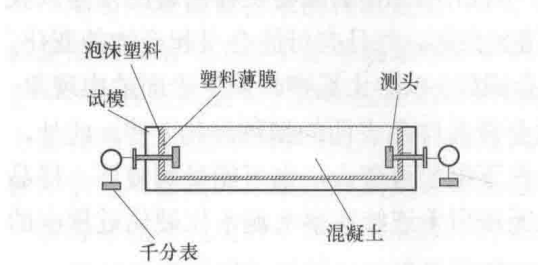


图 1-4 Tazawa 的混凝土早期自收缩测定示意图

验除了分析开裂趋势外，还可以进一步量化分析收缩对结构造成的影响。但是实际工程中结构是多样化的，目前还没有一种受限收缩试验具有普遍适应性。

日本的 Tazawa^{[1-18]~[1-20]}将混凝土自收缩测量分成两个部分测定，即拆模前的收缩测定与拆模后的测定。图 1-4 给出了拆模前带模测定混凝