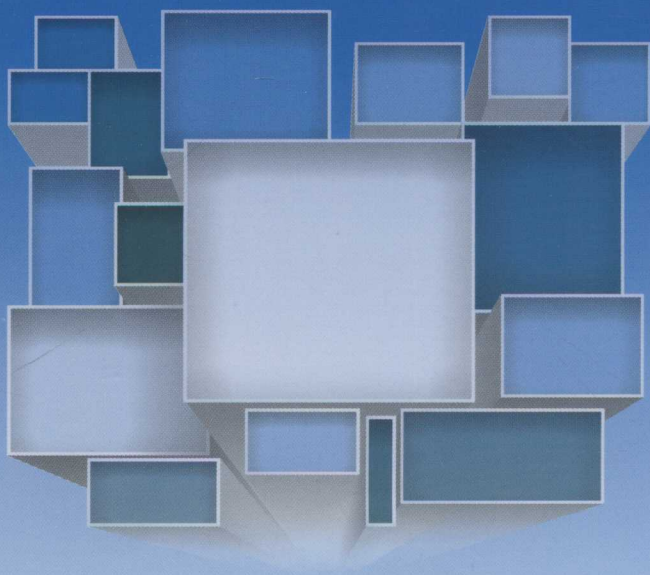


商品混凝土

抗裂性能及其评价方法研究

刘岩◎著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

014039210

TU528.52
06

内容简介
前言

商品混凝土抗裂性能及其评价方法研究

刘岩 著



北京航空航天大学出版社



北航

C1726684

TM 528.52
06

内 容 摘 要

本书以严重危害建筑工程的结构安全和正常使用的商品混凝土材料开裂问题为出发点,从测试技术、材料影响以及控制技术三个方面对混凝土开裂问题进行了研究与阐述。书中以创新思维提出了商品混凝土收缩与开裂的测试技术,可用于施工现场对不同混凝土材料开裂性能进行快速定量对比测试。运用创新研制的混凝土收缩性能测试技术和混凝土早期开裂性能评价测试技术,从材料影响角度研究了影响商品混凝土收缩开裂性能的多种因素,包括矿物掺合料种类、细度和掺量、水泥品种、减水剂种类、商品混凝土强度等级、缓凝剂与引气剂等对商品混凝土开裂性能的影响。针对商品混凝土收缩开裂控制技术从混凝土材料、配合比参数等方面做了相应的试验研究。从混凝土材料、设计以及施工等方面提出了控制改善商品混凝土收缩开裂性能的综合控制措施。

本书可供从事土木工程的广大科研工作者、技术人员以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

商品混凝土抗裂性能及其评价方法研究/刘岩著

.--北京:北京航空航天大学出版社,2014.5

ISBN 978-7-5124-1324-5

I. ①商… II. ①刘… III. ①预搅拌混凝土—抗裂性
—研究 IV. ①TU528.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 289472 号

版权所有,侵权必究。

商品混凝土抗裂性能及其评价方法研究

刘 岩 著

责任编辑 董 瑞

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316524

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:9.75 字数:208 千字

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷 印数:1 000 册

ISBN 978-7-5124-1324-5 定价:30.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

商品混凝土作为世界上用量最大的结构材料,广泛应用于我国房屋建筑、公路、铁路、水利、机场等建设工程。但随着商品混凝土的大规模应用,混凝土开裂问题逐渐暴露,成为影响我国重大工程质量的重要技术难题。目前在商品混凝土开裂控制研究方面,尚存在些许不足:第一,国内外规范中尚无统一的混凝土开裂的研究测试方法与相关技术规定,且目前的混凝土开裂测试方法尚存在些许不足,导致不同的研究方法得出不同的研究结论;第二,基于不同研究测试方法所做的基础研究尚不深入且结论尚不统一;第三,在以上两点的基础上所建立的开裂控制措施缺乏统一的评价方法,导致各个工程开裂控制效果差别较大,是混凝土开裂现象成为建设工程顽症的主要原因之一,严重危害了建设工程的结构安全和正常使用。

鉴于以上不足,作者深入研究大量的国内外相关资料,并结合较为系统的实验测试研究,做了以下工作:

首先,在开裂测试技术方面,创新地提出了混凝土收缩性能测试技术与混凝土早期开裂性能评价测试技术。深入研究了国内外混凝土开裂的测试技术,对比研究国内外现有混凝土收缩性能测试技术以及混凝土开裂性能测试技术存在的不足,提出了混凝土收缩性能测试技术和混凝土早期开裂性能评价测试技术,可快速准确地对混凝土材料的抗裂性能进行表征与量化,具有对材料的敏感性强,试验测试周期短,可操作性强,裂缝显现直观有规律,便于测量和统计分析和评价快捷等特点。

其次,从材料角度,系统研究了影响商品混凝土收缩开裂性能的多种因素。包括矿物掺合料(粉煤灰、矿粉和硅灰)细度和掺量、水泥品种、减水剂种类、商品混凝土强度等级、缓凝剂与引气剂等对商品混凝土开裂性能的影响。

最后,提出控制商品混凝土开裂的综合措施。本书针对商品混凝土收缩开裂控制技术从混凝土材料、配合比参数等方面做了相应的试验研究。从混凝土材料、设计以及施工等方面提出了控制改善商品混凝土收缩开裂性能的综合控制措施。

目前我国的混凝土材料研究主要集中于对混凝土开裂的影响因素的研究,但作为影响因素的研究基础的测试技术,尤其是关于系统研究混凝土收缩与开裂测试技术方面的相关研究较少,导致研究结果与实际工程效果有较大差距。作者多年来曾深入房屋建筑、水利建设、高速铁路建设以及机场建设等商品混凝土材料规模化应用的工程领域,积累了较为丰富的现场工程经验,深感商品混凝土开裂研究的必要性,作者希望在此方面做点抛砖引玉的基础工作。

本书的完成要感谢我尊敬的老师,同济大学王培铭教授和中国建筑科学研究院建材所郭延辉高级工程师。郭延辉老师曾作为我国混凝土材料研究的中坚力量,为我国混凝土材料研究做出重要的贡献,他坚持在病榻上完成了对本书的指导和建议。他对科研精益求精的态度,一丝不苟的学风使我受用终生,我谨以此书表达对他的深切怀念。同时对中国建筑科学研究院的张仁瑜研究员、赵霄龙研究员、郭京育研究员、冷发

光研究员等尊敬的老师和前辈对我的帮助表示深深的感谢。

在此,也对中国民航机场建设集团公司洪上元总经理、韩黎明教授级高工、苏新教授级高工、郑恒利研究员以及徐军库教授级高工等尊敬的前辈多年来对我的培养和帮助表示感谢,还对北京航空航天大学王波教授、叶英华教授表示感谢,对北京市科技新星人才培养计划给予本书的支持与资助表示衷心感谢。

鉴于作者水平有限,书中的疏漏和不当之处,敬请读者批评指正。

作者
2013年7月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 我国商品混凝土发展概况	1
1.1.1 我国商品混凝土发展历史	1
1.1.2 我国商品混凝土发展现状	2
1.2 我国商品混凝土开裂问题现状综述	3
1.3 国内外商品混凝土收缩开裂研究现状	4
1.3.1 商品混凝土收缩开裂成因	4
1.3.2 目前国内外混凝土收缩开裂测试技术	7
1.3.3 商品混凝土收缩开裂影响因素	17
1.3.4 商品混凝土收缩开裂控制措施	19
1.4 国内外研究存在的问题与不足	20
1.4.1 混凝土收缩性能和开裂性能测试技术的不足	20
1.4.2 商品混凝土抗裂性变化规律研究存在的不足	21
1.4.3 商品混凝土抗裂性的综合控制技术存在的不足	22
1.5 本书的意义与主要内容	22
第2章 混凝土自由收缩性能测试方法	24
2.1 国内外无约束条件下混凝土收缩的测试方法	24
2.2 混凝土自由收缩性能测试新方法研发思路	24
2.3 混凝土自由收缩性能测试新方法的理论基础	25
2.3.1 非接触式电涡流传感器工作原理	26
2.3.2 模数信号转换原理	28
2.4 混凝土自由收缩性能测试新方法的研发	29
2.4.1 非接触式收缩测定仪的基本构成	29
2.4.2 测试新方法评价指标	32
2.5 混凝土自由收缩性能测试新方法可靠性论证	32
2.5.1 测试误差分析	32
2.5.2 新方法的可重复性	34
2.6 混凝土自由收缩测试新方法的测试步骤	34
2.7 测试新方法数据处理	34
2.8 混凝土长期收缩性能测试方法的改进	35
2.8.1 基本思路	35

2.8.2	混凝土立式收缩测定仪的基本构成	35
2.8.3	数据处理和评价指标	37
2.8.4	试验步骤	37
第3章	混凝土在约束条件下开裂性能测试方法	38
3.1	国内外混凝土在约束条件下开裂性能测试方法	38
3.2	开裂性能测试新方法研发思路	39
3.3	开裂性能测试新方法的研发	39
3.3.1	哑铃型混凝土开裂性能测定仪基本构成	39
3.3.2	新方法的理论分析	41
3.4	评价指标与数据处理	43
3.4.1	24 h 的平均裂缝宽度	43
3.4.2	裂缝初始出现时间	44
3.5	开裂性能测试新方法可靠性论证	44
3.5.1	试验装置刚度计算	44
3.5.2	测试误差分析	45
3.5.3	试验的可重复性	45
3.6	测试步骤与注意事项	46
3.7	三种混凝土约束条件下开裂性能测试方法对比研究	46
3.7.1	板式钢筋条约束法(Kraai 法)	46
3.7.2	圆环约束法	47
3.7.3	哑铃型约束法	47
3.7.4	三种测试方法的综合对比分析	48
第4章	商品混凝土收缩开裂性能影响因素	51
4.1	影响因素试验方案设计	51
4.1.1	试验原材料	51
4.1.2	试验方法与仪器	55
4.1.3	混凝土试验方案设计	55
4.2	粉煤灰对商品混凝土收缩开裂性能的影响	60
4.2.1	粉煤灰对商品混凝土早期收缩的影响	61
4.2.2	粉煤灰对商品混凝土后期收缩的影响	62
4.2.3	粉煤灰对商品混凝土开裂性能的影响	64
4.2.4	粉煤灰对商品混凝土收缩及开裂性能的影响	66
4.3	矿粉对商品混凝土收缩开裂性能的影响	68
4.3.1	矿粉对商品混凝土早期收缩的影响	68

4.3.2	矿粉对商品混凝土后期收缩的影响	69
4.3.3	矿粉对商品混凝土开裂性能的影响	70
4.2.4	矿粉对商品混凝土收缩及开裂性能的影响	71
4.4	硅灰对商品混凝土收缩开裂性能的影响	73
4.4.1	硅灰对商品混凝土早期收缩的影响	73
4.4.2	硅灰对商品混凝土后期收缩的影响	74
4.4.3	硅灰对商品混凝土开裂性能的影响	75
4.4.4	硅灰对商品混凝土收缩及开裂性能影响分析	76
4.5	水泥品种对商品混凝土收缩开裂性能的影响	77
4.5.1	水泥品种对商品混凝土早期收缩的影响	78
4.5.2	水泥品种对商品混凝土后期收缩的影响	78
4.5.3	水泥品种对商品混凝土开裂性能的影响	79
4.5.4	水泥品种对商品混凝土收缩及开裂性能的影响	81
4.6	减水剂种类对商品混凝土收缩开裂性能的影响	81
4.6.1	减水剂对商品混凝土早期收缩的影响	82
4.6.2	减水剂种类对商品混凝土后期收缩的影响	83
4.6.3	减水剂种类对商品混凝土开裂性能的影响	85
4.6.4	减水剂种类对商品混凝土收缩及开裂性能的影响	87
4.7	混凝土强度等级对商品混凝土收缩开裂性能的影响	88
4.7.1	混凝土强度等级对商品混凝土早期收缩的影响	88
4.7.2	混凝土强度等级对商品混凝土后期收缩的影响	90
4.7.3	混凝土强度等级对商品混凝土开裂性能的影响	91
4.7.4	混凝土强度等级对商品混凝土收缩及开裂性能的影响	93
4.8	引气剂对商品混凝土收缩开裂性能的影响	94
4.8.1	引气剂对商品混凝土早期收缩的影响	95
4.8.2	引气剂对商品混凝土后期收缩的影响	96
4.8.3	引气剂对商品混凝土开裂性能的影响	97
4.8.4	引气剂对商品混凝土收缩及开裂性能的影响	102
4.9	缓凝剂对商品混凝土收缩开裂性能的影响	103
4.9.1	缓凝剂对商品混凝土早期收缩的影响	103
4.9.2	缓凝剂对商品混凝土后期收缩的影响	104
4.9.3	缓凝剂对商品混凝土开裂性能的影响	105
4.9.4	缓凝剂对商品混凝土收缩及开裂性能的影响	108
第5章	商品混凝土收缩开裂控制技术	110
5.1	聚羧酸系高性能减水剂对控制商品混凝土收缩开裂的应用	110

5.1.1	聚羧酸系高性能减水剂的定义与分类	110
5.1.2	聚羧酸系高性能减水剂基本理论基础	111
5.1.3	试验方案设计与研究	112
5.1.4	聚羧酸系高性能减水剂对商品混凝土早期收缩的影响	113
5.1.5	聚羧酸系高性能减水剂对商品混凝土开裂性能的影响	113
5.1.6	聚羧酸系高性能减水剂对控制商品混凝土收缩开裂的作用	115
5.2	纤维素纤维对控制商品混凝土收缩开裂的应用	115
5.2.1	纤维阻裂理论基础	115
5.2.2	试验方案设计与研究	118
5.2.3	纤维素纤维对商品混凝土早期收缩的影响	119
5.2.4	纤维素纤维对商品混凝土后期收缩的影响	121
5.2.5	纤维素纤维对商品混凝土开裂性能的影响	122
5.2.6	纤维素纤维对控制商品混凝土收缩开裂的作用	124
5.3	商品混凝土收缩开裂的配合比控制参数优化	124
5.3.1	水灰比对混凝土收缩开裂的影响	124
5.3.2	水泥用量对混凝土收缩开裂的影响	126
5.3.3	砂率对混凝土收缩开裂的影响	128
5.3.4	最大粒径对混凝土收缩开裂的影响	129
5.3.5	控制商品混凝土收缩开裂的配合比参数的优化	131
5.4	商品混凝土抗收缩开裂性能的综合控制	131
5.4.1	材料对商品混凝土收缩裂缝的综合控制措施	132
5.4.2	设计对商品混凝土收缩裂缝的综合控制措施	133
5.4.3	施工对商品混凝土收缩裂缝的综合控制措施	134
结 语		136
参考文献		139

第 1 章 绪 论

混凝土作为世界上用量最大的结构材料,在我国房屋建筑、公路、铁路、水利、机场等建设工程中大量使用。商品混凝土目前已在我国得到长足的发展,在经济建设和城市化建设中发挥了巨大作用。商品混凝土具有生产高度专业化和集中化的特点,使我国建筑工程质量得到了普遍提高。但随着商品混凝土的大量使用,因混凝土收缩开裂造成工程质量问题也日益凸现出来。

针对商品混凝土暴露出来的收缩开裂等问题,国内外研究工作者做了大量的研究工作。从混凝土收缩开裂性能测试评价方法、影响收缩开裂的因素以及控制收缩开裂的措施方面都做了相关的研究。因此,近年来对商品混凝土收缩开裂的测试评价方法、影响因素以及控制商品混凝土收缩开裂的措施等方面的研究已成国内外的研究热点,也是今后混凝土研究领域的重要方向之一。

1.1 我国商品混凝土发展概况

商品混凝土的产生与出现是混凝土工业走向现代化和科学化的标志。商品混凝土摒弃了传统的混凝土现场制备,通过整合备料、拌制到运输等关键生产环节,将混凝土材料通过高度专业化的集中批量生产,使其具有集中化和生产专业化的特点。商品混凝土具有计量准确、制备质量高、匀质性好、降低环境污染、节约劳力资源和施工场地等显著优点,现已大量应用于我国房屋建筑、公路、铁路、水利、机场等各个领域的工程建设中,尤其在大中城市得到普遍推广,对我国混凝土工程总体质量稳定、施工效率的提高、环境污染的减少起到了重要的作用,是我国建筑施工工艺的巨大技术进步。

1.1.1 我国商品混凝土发展历史

我国商品混凝土的发展进程与我国经济发展是密切相关的。商品混凝土的发展大致经历了三个阶段。

第一个阶段是萌芽期,从建国到 20 世纪 70 年代末。这个时期是以重工业特别是军事国防工业为主导的计划经济时期。这一时期,经济实力很薄弱。1949 年国内生产总值仅为 466 亿元。基础建设投资较少,预拌混凝土处在发展初期,没有形成规模,同时预拌混凝土的使用只限于企业内部,并未成为商品,进入到市场流动领域。

第二个阶段是徘徊期,从 20 世纪 70 年代末到 90 年代初期。这个时期主要是以农业和轻工业为主导的增长格局,我国预拌混凝土在这个阶段发展速度处于徘徊状

态,整体发展不大。但这个时期我国科技人员参考国外资料与标准结合研究成果,完成了普通混凝土长期力学性能的标准试验方法、混凝土强度合格性评定标准以及混凝土质量控制标准,意义十分重要,为下一个阶段我国商品混凝土的质量控制与行业发展奠定了扎实的技术基础。

第三个阶段是发展期,从20世纪90年代初到大约2020年以后。这个时期我国工业格局出现了新的变化,以市场经济为主导的建筑市场也蓬勃兴起,随之带来的是工程投资主体、建设主体、材料供应主体的多元发展;商品混凝土也因其成本、供应量与规模等优势迅速赢得市场的青睐;同时该时期我国加大住宅和基础设施建设的投资,以拉动国民经济增长,商品混凝土进入了蓬勃发展的快速车道。据专家预测,商品混凝土的持续发展将会延续到2020年以后,但增势从2014年以后逐渐趋缓。

1.1.2 我国商品混凝土发展现状

我国是世界上第一水泥生产大国,2006年水泥产量约12.2亿吨,其中袋装水泥7.3亿吨,散装水泥4.9亿吨(主要用于商品混凝土),散装率约40%。2012年全年规模以上水泥企业水泥产量达21.84亿吨,同比增长7.4%,其中散装水泥增长速度快于水泥增长速度4.82个百分点。2012年,全国平均水泥散装率已达到54.14%,比上年末51.78%提高了2.36个百分点。水泥散装率是商品混凝土生产工业化的重要指标,我国从2006年的40%到2012年的54%,有了较大的增长,但目前国际上混凝土工业化国家的水泥散装率已达70%以上。由此可见,与国际先进水平相比,我国混凝土生产工业化仍然有很大的差距。占我国水泥产量50%左右的袋装水泥仍然用于单机搅拌水泥混凝土和水泥砂浆。尽管我国混凝土机械行业生产的混凝土搅拌机不断升级换代,在节约原材料、降低能耗、提高生产率和提高混凝土质量等方面都取得了很大成绩,但是单机现场搅拌混凝土存在的种种弊端,已远远不能适应我国社会经济发展的需要。

随着建设规模的持续扩大,尤其是近十几年来我国城市建设的高速发展,再加之建设主管部门因势利导,出台了一系列扶持政策和措施,使城市的商品混凝土用量快速递增。

国家早在“九五”期间就提出了“巩固东部、发展中西部”的商品混凝土发展方针;商品混凝土也是建设部重点推广项目,“十五”期间即被列入建设部发展规划和2010年十年发展规划。目前,我国商品混凝土的产量呈逐年快速增加趋势如图1-1和图1-2所示。

随着我国城市化进程的加快,商品混凝土在全国各地迅速推广普及。直辖市、省会城市、沿海开放城市和旅游城市将全面发展商品混凝土(商务部、公安部、建设部、交通部早在2003年就下发通知,从2003年12月31日起,这类城市已禁止在城区现场搅拌混凝土;其他城市则规定从2005年12月31日起,禁止在城区现场搅拌混凝土)。国家发展商品混凝土政策的力度加大,各行业工程建设也逐步以商品混凝土为主,推动了我国商品混凝土的迅猛发展。

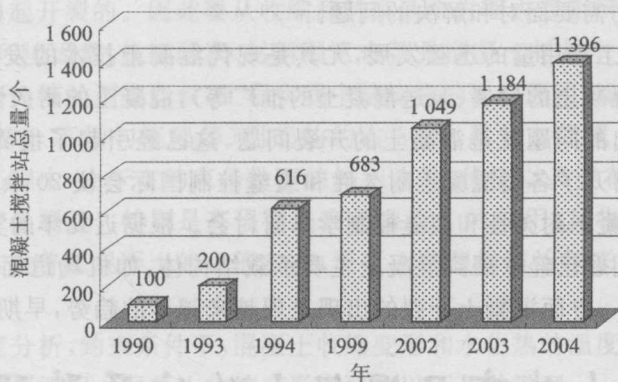


图 1-1 近年全国商品混凝土搅拌站发展情况

Figure 1-1 The Development of Commodity Concrete Mixing Stations in China

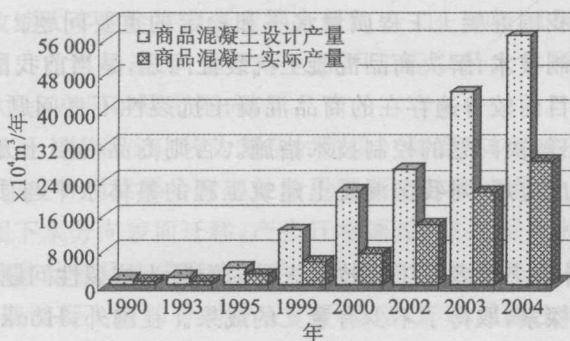


图 1-2 近年全国商品混凝土设计能力和实际产量

Figure 1-2 The Commodity Concrete Design Capacity and Output in China

但是,我们还必须清醒地认识到,无论是从数量上讲,还是从质量上讲,目前我国商品混凝土尚处在发展阶段,各地商品混凝土发展不平衡。在大城市,如北京、上海、广州、大连、厦门,商品混凝土产量比较大,已占这些城市混凝土总量的 90% 左右。但在我国中西部,有的城市甚至还没有商品混凝土搅拌站,有的城市即使有商品混凝土搅拌站,其数量也很少、产量也很低。

1.2 我国商品混凝土开裂问题现状综述

尽管商品混凝土以其快速高效、质量稳定、供应量大和不占用施工现场等特点得到了广泛应用,但随着建筑工程量及商品混凝土用量的不断增加,涉及现浇混凝土工程的开裂问题的工程事故不断增多,并且大多数发生在商品混凝土应用面较大的大中城市及大中型工程中。可见,由于混凝土生产技术的变革以及规模化的使用,混凝土开裂问题发生的可能性增加,这是混凝土技术在不断进步的同时带来的客观存在

的问题,也是迫切需要面对和解决的问题。

随着混凝土工程用量的迅猛发展,尤其是现代混凝土技术的发展(如外加剂技术、高强高性能混凝土的发展、泵送混凝土的推广等),混凝土的耐久性问题更加凸显出来,目前最突出的问题就是混凝土的开裂问题,这已经引起了世界各国的高度重视,至今已连续召开了各类混凝土耐久性和裂缝控制国际会议 20 余届,我国也召开了多次全国性混凝土耐久性和裂缝控制学术研讨会。根据近几年的实践经验和调查研究,现在裂缝问题已经扩展到混凝土主要承载结构体,如机场道面、桥面板、道路、大型地坪等。另一方面混凝土开裂的出现呈现越来越早的趋势,早期开裂现象较多。

1.3 国内外商品混凝土收缩开裂研究现状

随着商品混凝土的年用量迅速增大,混凝土工程逐渐暴露出来的开裂以及耐久性问题将是制约我国混凝土工程质量水平和稳定的重要问题。可见,研究混凝土开裂性能评价与控制技术,解决商品混凝土抗裂性问题,是当前我国混凝土界关键且迫切的任务。针对目前较普遍存在的商品混凝土抗裂性不良问题,应找到开裂原因和影响规律,并给出解决问题的控制技术措施。否则商品混凝土开裂问题势必会阻碍商品混凝土的推广应用,对我国混凝土建筑工程的整体水平与质量稳定产生不利影响。

近年来,国内外许多学者及工程技术人员对混凝土抗裂性问题十分关注,并在这方面进行了研究和探索,取得了不少有意义的成果。在国外,Houk 等人(1969 年)初步研究了混凝土收缩的影响因素,发现混凝土收缩与胶凝材料细度有一定关系;Springenschmid(1973 年)研究了混凝土开裂的测试方法,研制了一套开裂实验框架来研究混凝土的开裂趋势;Kraai(1985 年)提出平板试验方法研究混凝土开裂性能;E. Tazawa 和 Miyazawa(1995 年)等就水泥和掺合料对水泥基材料自收缩性能的影响进行了研究;Roy R. L. (1995 年)等建立了一种高性能混凝土的收缩模型;从 1996 年开始,关于混凝土收缩这一主题的国际会议每年召开。

在国内,王铁梦教授认为裂缝是不可避免的,裂缝的产生是绝对的,并提出了跳仓法的施工工艺;巴恒静教授等人进行了有关高性能混凝土收缩开裂性能方面的研究,提出了采用传感器测量混凝土收缩的测试方法;覃维祖教授等学者对于混凝土抗裂性能进行了研究,提出大掺量粉煤灰的混凝土具有较好抗裂性能的观点;马一平教授等专家采用平板法研究了水泥基体参数对砂浆塑性收缩开裂性能的影响;冯乃谦教授等专家从不同角度对商品混凝土的开裂及对策进行了探讨,认为可以从混凝土养护以及施工方面改善混凝土的抗裂性能。

1.3.1 商品混凝土收缩开裂成因

混凝土材料的开裂需要有两个条件;第一是收缩变形;第二是存在约束条件。自

由收缩是不会引起开裂的。因此要从收缩和约束两个方面去着手研究收缩开裂的原因。结构设计、环境因素、施工因素、材料因素也都是混凝土材料本身引起开裂的重要原因。根据国内外的调查资料,工程实践中结构物的裂缝原因,属于由材料体积变化为主(温度、收缩、不均匀沉陷等)引起的约占80%,属于由荷载为主引起的约占20%。在结构工程中,由于在约束条件下的体积收缩、徐变以及受荷变形等因素,混凝土结构构件产生裂缝。特别是高强泵送商品混凝土的应用,其收缩变形达到 $6 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-4}$,是普通混凝土的2倍左右,混凝土的裂缝防治越来越成为人们关注的焦点。

从材料角度分析,约束条件下,混凝土收缩变形和水化热的温度变化是产生商品混凝土开裂的主要原因。混凝土收缩变形主要有以下几种类型:

1. 塑性收缩

新拌混凝土在塑性阶段的体积变化统称为塑性变形,该时间段的体积收缩称为塑性收缩。塑性收缩大多发生在混凝土拌合后约3~12 h内,即硬化前的塑性阶段,在终凝前比较明显。在机场道面、地坪等大面积工程以及大体积工程中较为常见。裂缝深度一般不大,多在保护层范围内。

塑性阶段是混凝土体积变化较为复杂的阶段。混凝土材料本身、施工振捣、养护条件、温度、风速、湿度等因素都会对塑性阶段混凝土体积变化造成影响。新拌混凝土内部在振捣作用下水分向表面迁移,产生迁移通道,在表面失水速率较大时,混凝土内部水分的快速移动容易造成形成的毛细管通道产生负压,从而形成体积收缩变化;同时该阶段初期混凝土内的骨料位置仍不稳定,影响混凝土内部水分迁移的通道,都对塑性阶段的体积变化造成影响;在一定的温度和风速的影响下,该阶段容易造成混凝土表面失水干燥,产生干燥收缩。因此塑性阶段的收缩是多种体积收缩变形并存的阶段,因此不能用单一的某种原因解释塑性收缩。

处于塑性阶段的混凝土材料的抗拉应力尚处于逐步增长状态,尚未完全形成,因此在此阶段收缩变形产生的收缩应力有可能会大于此阶段塑性混凝土的抗拉应力,同时在一一定的外部约束条件下,极易造成塑性阶段的混凝土开裂,即混凝土的早期塑性开裂。从混凝土流动性来看,机场道面常用的干硬性混凝土拌合物的塑性收缩比塑性混凝土小,而大流动度混凝土的塑性收缩最大。

2. 干燥收缩

混凝土干燥收缩是指混凝土停止养护后,在不饱和空气中失去内部毛细孔和凝胶孔的吸附水而发生的不可逆收缩,它不同于干湿交替引起的可逆收缩。干燥收缩是混凝土后期产生裂缝的主要原因。

干燥收缩与混凝土的用水量关系密切。一般建筑工程中,引起混凝土干燥收缩的主要是失去毛细孔和凝胶孔吸附水。随着相对湿度的降低,水泥浆体的干缩增大(见图1-3)。水泥完全水化的结合水量理论上约占水泥质量的23%,而实际使水泥完全水化并具有最低毛细孔的孔隙率的水灰比为0.44;在不加减水剂时,混凝土具

备足够的施工和易性所用的水灰比大于 0.5。

混凝土在养护过程中,随着凝胶体强度的增长,毛细孔或毛细管的水分也逐步减少。毛细管失水后,表面张力增大,引起混凝土收缩。在失水过程中,较大孔隙中的自由水失去后所引起的干燥收缩值虽然不大,但留下孔洞,降低了混凝土的抗渗能力。

干缩裂缝一般为表面性,宽度大多在 0.05~0.2 mm 之间,走向纵横交错呈龟裂状,没有规律性。

3. 自收缩

混凝土自收缩是指混凝土胶凝材料在恒温绝湿的条件下发生的体积收缩。混凝土自收缩现象早在 50 多年前就由 H. E. Davis 和 Powers 等人提出,后来许多学者对它进行了深入

研究。与普通混凝土相比,商品混凝土的自收缩现象更加明显。在外界水分供应不足的情况下,商品混凝土由于水灰比小,能提供水化的自由水分少,自收缩现象明显,产生自生的原始微裂缝,影响混凝土强度和耐久性。一些施工现场,混凝土浇筑后 2~3d 内就产生贯通的裂缝,常是自收缩引起的早期开裂。

不同于混凝土的干燥收缩,自收缩是水泥石在与外界无水分交换的条件下出现的。自收缩现象与混凝土在水化过程中产生的自干燥现象紧密相连,首先,在水化硬化过程中,水泥水化消耗了毛细孔水,使混凝土内部相对湿度降低。再则,水化反应产物的绝对体积小于消耗的水体积和水泥的原体积之和,因为水化反应前后它们的平均密度不同,所有的胶凝材料都有这种水化减缩作用。水化减缩就不可避免地造成在原来水饱和的孔洞中形成气孔,随着水化反应的进行,这种气孔所占的空间越来越大,水蒸气和水的平衡压也越来越低,出现“自干燥”现象。

混凝土自收缩与水泥品种、水泥用量以及掺合料等因素密切相关。在水泥的几种主要成分(C_3S 、 C_2S 、 C_3A 以及 C_4AF)中 C_3A 的水化减缩最大,是 C_3S 的 4 倍以上, C_2S 和 C_4AF 水化速度相对缓慢,对自收缩影响相对较小。

混凝土自收缩引起的开裂多出现在大体积混凝土工程中,例如水坝等水利工程中。

4. 温度收缩

由于混凝土内外温差过大,混凝土随温度下降而发生收缩(称为温度收缩,又称冷缩),从整体结构温度分布来看,在混凝土中形成较大的温度梯度,从而产生相当大的结构温差应力,导致裂缝生成。它与混凝土及其各组分的热膨胀系数、内部最高温

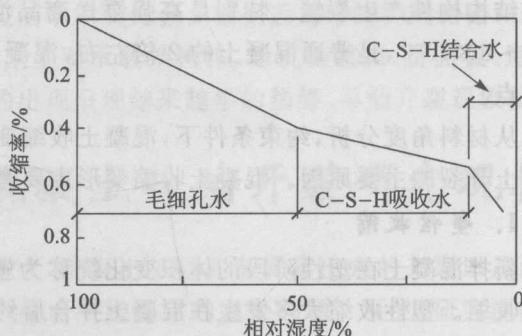


图 1-3 收缩与相对湿度之间的关系

Figure 1-3 Relationship between Shrinkage and RH

度和降温速度等因素有关。对于大体积混凝土,裂缝的产生主要是由于温度变化引起的。温差的产生原因可以是原材料自身温度较高、水泥水化时放出热量以及外界气温的升高等,其中水泥水化时放出的热量是温度升高的主要原因。由于混凝土结构的热传导性能差,混凝土的外部温度可能已接近于环境温度,而内部温度仍处于原始状态,外层混凝土降温产生很大的限制作用,从而导致开裂。

不同形式的温度应力相叠加,造成混凝土承受相当大的温度应力,有时甚至比荷载产生的应力还大,造成内部微裂缝扩展,形成上下贯通裂缝。

5. 碳化收缩

大气中的 CO_2 在有水分的条件下,与水泥的水化产物发生化学反应产生 CaCO_3 和游离水等,伴随着体积收缩,该过程称碳化收缩。碳化速度取决于混凝土结构的密实度、孔洞溶液的 PH 和混凝土的含水量、周围介质相对湿度以及 CO_2 的浓度。如果混凝土有足够的密实度,碳化就只限于表面层,而表面层的干燥速率也是最大的,干燥与碳化收缩的叠加受到内部混凝土的约束,会引起混凝土开裂。

1.3.2 目前国内外混凝土收缩开裂测试技术

1. 混凝土收缩性能测试方法

(1) 固定接触式混凝土收缩性能测试方法研究现状

固定接触式测量混凝土收缩的方法是通过预埋测头或者后粘测头,用与测头接触的测长仪器来测量试件的尺寸变化,是使用最为普遍的方法。有关固定接触式混凝土收缩的试验方法,欧美国家研究较早,都已经形成相对比较成熟的方法,并且写入各国有关混凝土收缩性能测试方法的标准中。国内主要在国标 GBJ 82—85、中国交通行业标准 JTJ 270—98、中国电力行业标准 DL/T 5150—2001 等标准中采用该方法。国外采用该方法的混凝土试验标准主要有美国 ASTM C 157/C 157M—2003 以及欧洲 EN 标准草案 EN 480—3,英国 BS 标准 BS1881:Part 5,日本 JIS 标准 JIS A 1129:2001 等。

1) 国内外标准中固定接触式混凝土收缩测量方法主要区别与比较

各国混凝土试验方法标准中都有测量混凝土长度变形的内容,都侧重对混凝土自由收缩进行测量的试验方法。各国标准中也存在着一些差异。美国 ASTM C 157 采用比长仪进行测量;英国标准受美国的影响较大;日本 JIS A 1129 提供三套测量方法来测量混凝土试件的变形;欧洲采用接触式传感器来测量。我国国标采用卧式收缩仪来测量混凝土的收缩。

① 初始长度测量时间与恒温恒湿条件方面

目前各国混凝土试验标准中的恒温恒湿条件、温度方面差异不大。湿度方面,国外取值一般在 $50\% \pm 5\%$,我国国标和交通、水电标准的湿度取值 $60\% \pm 5\%$,取值相对较高。

在试件初始长度测量时间方面各国的标准差异很大:我国国标取在 3 d 龄期(从加水搅拌开始);美国 ASTM 选用 23 ± 0.5 h 拆模,然后浸入 23 ± 0.5 °C 饱和石灰水中,30 min 后取出初测;欧洲 EN 480—3 采用水养护 3 d 拆模,立即测量;日本 JIS A 1129,采用 24 h 拆模后初测,水养 7 d 再测,以 7 d 测值为基准值。

② 测长变化仪器原理方面

a. 千分表

国内的 GBJ 82—85 以及交通部 JTJ 270—98、国家电力行业标准 DL/T 5150—2001 所使用的收缩仪原理就是使用千分表来测量长度变化。国内的收缩仪基本都是卧式结构。美国 ASTM C157 和英国 BS1881 试验方法使用的比长仪也是使用千分表来测量长度变化,但都属于立式结构。

千分表测量长度变化的特点如下:

优点:易于操作,设备经济,直观。

缺点:需要被测体有足够强度,人工测量,试验测量受人为因素影响较大。

b. 应变计

优点:精度较高,而且数字显示,不受人为因素影响。

缺点:需要被测体有足够强度,若无足够强度,弹性模量低,应变计与混凝土无法同步变形,无法保证测量初期应变计与混凝土成为一个整体;造价较高,无法重复利用。

2) 国家标准 GBJ 82—85 收缩试验方法在以下几个方面存在问题

① 收缩的初测时间

GBJ 82—85 要求试件养护 3 d 并且拆模后开始测量收缩值。美国 ASTM C 157 要求 23.5 ± 0.5 h,日本 JIS A 1129 要求 24 h 初测;英国 BS 标准 BS1881:Part 5 要求 24 h;欧洲 EN 标准 EN 480—3 要求水中养护 3 d 拆模立即测定初始长度。

由于商品混凝土品种增多以及矿物掺合料、外加剂等广泛使用,导致某些混凝土的早期收缩明显增大。混凝土前 3 d(即早龄期)的体积变形最为复杂,包括全部的塑性沉降收缩以及在早龄期占较大比例的自生收缩、水泥水化的化学收缩和混凝土表面失水产生的干燥收缩。混凝土的这种体积变形往往发生在从加水搅拌开始到 GBJ 82—85 规定的初测龄期之间,因此应用 GBJ 82—85 规定,在试件标养 3 d 并且拆模后测量体积变形的的方法,只能测量从标准养护室移入恒温恒湿室后试件的长度变化,无法反映出早龄期 3 d 之内的长度变化情况。

对于早期强度较低的混凝土,使用 GBJ 82—85 混凝土收缩仪更无法测定其收缩。另外对于某些水灰比较低的高性能混凝土,早期自收缩在 1 d 龄期内(龄期从搅拌混凝土加水时算起)已经开始产生,并且很大部分都是在这期间产生的。目前收缩的测量方法也无法反映出类似混凝土这一期间的真实体积变形。GBJ 82—85 收缩试验的测定值并不包括初始的早龄期收缩值,因此对设计和研究造成一些不利的影响。