

绿色高性能混凝土

绿色高性能混凝土研究

■ 朱效荣 李 迁 张英男 孙 辉 著

LUSEGAOXINGNENG
HUNNINGTU
YANJIU
LUSEGAOXINGNENG
HUNNINGTU
YANJIU

辽宁大学出版社

■ 朱效荣 李 迁 张英男 孙 辉 著

绿色高性能混凝土研究

LUSEGAOXINGNENG
HUNNINGTU
YANJIU
LUSEGAOXINGNENG
HUNNINGTU
YANJIU

辽宁大学出版社

©朱效荣等 2007

图书在版编目 (CIP) 数据

绿色高性能混凝土研究/朱效荣等著. —沈阳: 辽宁大学出版社, 2005.9
ISBN 978-7-5610-4952-5 (2007.4 重印)

I. 绿… II. 朱… III. 高强混凝土—研究 IV. TU528.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 108849 号

出 版 者: 辽宁大学出版社

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印 刷 者: 沈阳市北陵印刷厂有限公司

发 行 者: 辽宁大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 12.5

字 数: 290 千字

印 数: 1001~4000 册

出版时间: 2005 年 10 月第 1 版

印刷时间: 2007 年 4 月第 2 次印刷

责任编辑: 马 静

封面设计: 邹本忠

版式设计: 程 丽

责任校对: 依 人

书 号: ISBN 978-7-5610-4952-5

定 价: 35.00 元

联系电话: 024—86864613

邮购热线: 024—86830665

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

电子邮件: lnupress@vip.163.com

如有印刷装订质量问题, 请与印刷厂调换。



前 言

近二十年来,随着社会的发展和技术的不断进步,人民的物质文化水平不断提高,带动了国家基本建设项目的空前发展,人们对混凝土的品质指标和经济指标提出了更高的要求,促使混凝土向着高强、高流态和高耐久等高性能方向发展。一方面,研究、开发和应用绿色环保高性能混凝土成为一种趋势,特别是西气东输、南水北调、三峡大坝、国家大剧院及奥运场馆等具有国际影响力的项目,都是使用以耐久性作为主要设计指标的高性能混凝土。另一方面,由于对水泥需求的急剧增长导致水泥生产企业大量煅烧熟料,排放到大气中的温室气体、有毒有害气体、粉尘急剧增加,燃煤供应不足,电力紧张。正是在这种条件下,本书作者确立了以水泥助磨增强剂、混凝土外加剂、矿物掺合料为切入点,先配制节能利废的高性能水泥、少熟料水泥或无熟料水泥,再以此为基础配制 C10~C100 高性能混凝土,并研究科学的检测方法的技术方案。

本书内容共九章,简介如下:

第一章为聚丙烯纤维防渗抗裂高性能混凝土的研究,通过对各种原材料的优选、配合比的调整,特别是纤维品种的选择和掺量的调整试验,配制出符合抗渗防裂要求,具有良好施工性能的纤维混凝土,应用于国家大剧院及奥运场馆等大型工程,取得了良好的效果,实现了无机刚性防裂、有机刚性防裂及复合材料柔性防裂的有机结合,在改善水泥基胶凝材料的功能方面具有鲜明的技术创新性,为今后混凝土向高性能、多功能方向发展提供了一种值得借鉴的思维方法。

第二章介绍了高强自密实混凝土的研制,利用聚羧酸减水剂能够大幅度提高混凝土的流动性、降低混凝土的流变参数 τ_0 和 η 的特点,达到配制具有较高抗压强度,具有良好稳定性和抗分离性的高强自密实混凝土的目的,并进行了工作性测定方法的探讨和工作性影响因素的正交试验极差分析。

第三章 C100 高性能混凝土介绍了国家大剧院高强混凝土钢管柱的制造技术,保证了混凝土的耐久性、工作性、强度、适用性、体积稳定性、经济性等,是目前国内应用强度等级最高的预拌混凝土,技术成果达到国际先进水平。

第四章新型无熟料水泥混凝土研究了无熟料水泥及混凝土制造技术,不用烧结熟料,大量利用高炉矿渣粉、粉煤灰、沸石粉等工业废料制作高强高性能混凝土,符合我国可持续发展战略,相对传统混凝土是一个重大突破,被称为绿色高性能混凝土,技术成果达到国际领先水平。

第五章所研究的胶凝材料是使用总掺量不少于 50% 的粉煤灰和磨细矿渣,用量不大于 50% 硅酸盐水泥熟料配制的,因此称为新型胶凝材料。研究结果表明,本产品是高性能混凝土



土优质的胶凝材料。因其低水化热、优异的工作性、耐化学侵蚀性和长期强度的较高增长率,尤其适用于较高强度大体积的基础工程。该项技术大量利用工业废料,节省能源和资源,具有明显的环境、经济和社会效益。

第六章进行了可循环集料混凝土的研究。以石灰石作混凝土集料,优质破碎筛分后的混凝土块和粉砂可以作为混凝土的可循环利用粗、细集料,大量的微粉可直接作为主要原料生产水泥。而由再生水泥和可循环集料配制的混凝土可以进入下一个循环,整个循环过程实现废弃物零排放,可循环集料不适合拌制大流动性混凝土。

第七章介绍了磨细钢渣水泥混凝土。磨细钢渣粉掺入水泥中作为混合材料,依据掺量不同,可以制备普通硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥、钢渣矿渣水泥及其他品种的水泥。所有试验结果均显示出制成的水泥强度较高。因此,磨细钢渣粉作为水泥混合材料是完全可行的。对于配制混凝土,所有的试验均表明,磨细钢渣粉是一种性能优越的混凝土掺合料。掺加磨细钢渣粉的混凝土强度符合一般的混凝土强度规律。

第八章介绍了脂肪族高效减水剂的合成技术及产品性能,该产品具有减水增强效果显著,掺量低,延缓水泥水化放热能力强、凝结时间可调性好、坍落度损失小,对各种水泥适应性强,其性能受温度变化影响很小,综合性能优异、成本低,混凝土拌和性能、力学性能、抗渗性能、干缩性能以及抗冻融性能等耐久性优异,特别适用于大体积的混凝土连续浇注等特点。

第九章介绍的 HPC-001S 高性能混凝土综合性能测试仪专利技术产品是利用混凝土的流变特性来测量混凝土的基本参数的。它通过传感器的旋转剪切运动测量出混凝土的粘滞阻力矩,利用混凝土粘滞阻力矩与混凝土基本参数的相关性,将传感器测量出的混凝土粘滞阻力矩直接转换成数字信号,数字信号送入 MCU 进行数据处理和计算。同时 MCU 还输出一控制信号以校正传感器的误差,保证测试精度,并将结果送给显示电路显示出来。该技术产品采用了传感技术和微电脑技术,能直接通过液晶显示器显示坍落度值、扩展度、水灰比、温度,预测 28 天强度等参考值,并进行平均值计算、数据打印输出或作在线测试。实现了多功能合一,使用简便、可靠、直观。它为混凝土的准确测量提供了技术基础。

本书的第一、二、三、四章由朱效荣执笔,第五、六、七章由李迁执笔,第八章由张英男和李迁执笔,第九章由孙辉和朱效荣执笔。

在本书的写作过程中,吸收和选用了国内外有关高性能水泥和高性能混凝土方面专家的论著和报告的部分内容,得到了许多预拌混凝土生产企业、水泥生产企业、建筑施工单位、监理公司及科研院所的大力支持和帮助,在此深表谢意。特别提出感谢的是:沈阳建筑大学材料学院的李生庆教授、唐明教授;东北建筑设计研究院刘良季教授;北京城建混凝土公司邢福有总经理;沈阳市科学技术协会李力主席;沈阳泰丰混凝土供应有限公司宋东升高级工程师;沈阳东昱新型建材厂王立存高级工程师;鞍钢房产建设公司王希波高级工程师;辽宁省建设科学研究院范文涛工程师;沈阳市建筑工程质量检测中心管洪海工程师。

本书的出版受到了北京灵感科技发展有限公司的大力支持和帮助,在此表示感谢。

朱效荣 李迁

2005 年 9 月 3 日





目 录

第一章 纤维混凝土的研究与应用.....	1
第一节 概述.....	1
第二节 纤维混凝土原材料的选择.....	6
第三节 纤维的选择.....	9
第四节 聚丙烯纤维抗渗防裂混凝土试验研究	14
第五节 工程应用实例	20
第六节 结论	22
第二章 高强自密实混凝土的研究	23
第一节 概述	23
第二节 原材料及高性能减水剂的选择	28
第三节 工作性测定方法的研究	31
第四节 试验研究	36
第五节 结论	47
第三章 C100 高性能混凝土的研究与应用	48
第一节 概述	48
第二节 原材料的选择及配合比的确定	49
第三节 混凝土拌合物性能试验	55
第四节 工程应用实例	60
第五节 结论	62
第四章 新型无熟料水泥及混凝土的研究与应用	63
第一节 概述	63
第二节 无熟料水泥的组成及配比试验	65
第三节 无熟料水泥混凝土的配制	71
第四节 无熟料水泥混凝土耐久性研究	73
第五节 无熟料水泥及混凝土的应用实例	77
第五章 HM 新型胶凝材料及其配制高性能混凝土的研究	80
第一节 概述	80
第二节 HM 新型胶凝材料的研制	83
第三节 HM 系列高性能水泥的性能及其检测	100
第四节 用 HM 新型胶凝材料配制高性能混凝土的试验研究	103
第五节 关于 HM 新型胶凝材料检测方法	107



第六节 工程应用实例	107
第七节 结论	108
第六章 可循环集料混凝土的研究	109
第一节 概述	109
第二节 石灰石作混凝土可循环集料的特征性能及参数研究	111
第三节 可循环集料混凝土的抗压强度及断面结构分析	122
第四节 可循环集料混凝土工作性与耐久性探讨	129
第五节 可循环集料砂浆的性能及断面结构分析	132
第六节 破碎的石灰石混凝土再生微粉的资源化利用	136
第七节 结论	141
第七章 磨细钢渣粉在水泥及混凝土中的应用研究	143
第一节 磨细钢渣粉作为水泥混合材的研究	143
第二节 磨细钢渣粉作为混凝土掺合料的研究	157
第八章 脂肪族高效减水剂的研究	169
第一节 概述	169
第二节 脂肪族高效减水剂的研制	170
第三节 结论	176
第九章 HPC-001S 高性能混凝土综合性能测试仪的研究	178
第一节 概述	178
第二节 技术基础介绍	179
第三节 技术方案的确定	182
第四节 设计与调试	184
第五节 结论	186
参考文献	188



第一章 纤维混凝土的研究与应用

第一节 概述

混凝土的高强化是 100 多年来的努力方向,强度一直是混凝土的主要性能指标,高强度一直被认为是优质混凝土的特征。但是,人们在追求高强度的同时,却发现大多数混凝土设施不是因为强度的不足而破坏,往往是耐久性不够而造成破坏。但不管是由何种原因引起的混凝土耐久性不合格而产生的破坏,其最终表现为出现裂缝。

混凝土作为现代建筑工程中最大宗的原材料,在保证建筑工程质量,改善人们的生活居住及工作环境方面发挥了巨大的作用。特别是近十多年提出高性能混凝土概念以来,研究、开发、应用高性能混凝土已经成为一种趋势。在这种情况下,针对预拌混凝土施工过程中出现的诸多问题,各施工企业、预拌混凝土生产企业和科研单位都从不同角度进行了研究并予以解决,使混凝土由最早的单一品种逐步走向多品种、多功能并逐步完善。但是,自从水泥混凝土出现以来,裂缝问题一直困扰着人们,特别是大流动性混凝土的使用、外加剂的引入及强度等级的提高使水泥用量大大增加,都不同程度的增加了混凝土在水硬化后出现裂纹的机率。因此,研究混凝土裂缝产生的原因,控制和预防裂缝的出现,是业内人士长期努力奋斗的目标。

一、国内外混凝土使用过程中出现的问题及产生原因

目前国内外建设的许多大型桥梁、江河堤坝、大型体育场馆等公用设施,都或多或少的出现结构缺陷裂缝,有的部位已经延伸到钢筋部位,使混凝土建筑物(构筑物)的整体性受到破坏,堤坝出现渗漏,地下室渗水变潮,桥梁的安全性受到质疑并最终拆除重建,许多公共场所被迫关闭,造成大量的人力物力浪费,人们的生命财产安全受到严重威胁。究其原因,主要是由于混凝土在使用的过程中内部应力集中,使内部存在结构缺陷的混凝土产生微裂纹,并逐渐扩展延伸最终形成较大的裂缝。随着这些裂缝的产生与扩展,其表层逐渐碳化,当裂缝扩展至钢筋时,混凝土的护筋作用完全丧失,空气中的腐蚀性气体直接侵害钢筋导致钢筋锈蚀,引起钢筋混凝土结构的破坏最终完全失效。

我国著名混凝土专家王铁梦教授认为,混凝土产生裂缝的主要原因有三种:1. 外荷载直接应力引起的裂缝,即按常规计算的主要应力引起的裂缝;2. 外荷载作用下,结构次应力引起的裂缝;3. 由变形引起的裂缝,如温度、收缩和膨胀、不均匀沉降等因素引起的裂缝。裂缝的产生通常是一种或几种因素的共同作用,而在产生裂缝的三种因素中,尤其以变形引起的裂缝最多,占 80% 以上。

吴中伟院士认为,复合化是水泥基材料高性能化的主要途径,纤维增强是其核心,复合



化的技术思路——超叠加效应，对材料的高性能化有重要的意义。

从国内外混凝土研究发展来看，混凝土中采用掺加纤维抗裂是一种非常有效的手段。尤其是随着合成纤维工业的飞速发展，诸如聚丙烯纤维等一些高性能合成纤维的出现，大大改善了混凝土的品质，使混凝土的综合使用性能得到提高。目前，聚丙烯纤维已经成为混凝土行业中仅次于钢筋的“次要增强筋”。在路面桥面、衬里护壁、地坪及飞机跑道等工程部位得到了广泛的应用并取得了很好的效果。

二、国内外预防裂缝产生的方法及其不足

根据裂缝产生的机理，目前国内外预防裂缝主要采取以下三种方式：

（一）膨胀剂抗裂

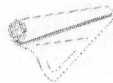
根据混凝土开裂原因的分析，目前为防止混凝土裂缝的产生，在注意砂石粒径及级配的基础上，一般采用掺加膨胀剂的方法。对于处于潮湿环境及地下的混凝土工程、游泳池及水工工程，此方法发挥了重要作用，基本上实现了在使用掺加膨胀剂混凝土后不开裂，不渗漏，保证了这些混凝土建筑物（构筑物）的正常使用。但对于大多数露天工程，特别是桥梁、大型体育场馆的顶板和屋架、大面积公共建筑的地面、飞机跑道等混凝土构筑物，掺加膨胀剂不仅不能起到防裂的作用，而且在使用过程中开裂得更严重，王铁梦教授多年的研究和测试结论也证明了这一点。究其原因，是由于膨胀剂的水化和水化产物的形成，必须在饱水的条件下进行，一旦周围环境水分不足，膨胀剂不仅不会起到膨胀抗裂作用，而且由于膨胀剂水化还要争夺原本不多的水分，在混凝土内部产生毛细管力，导致混凝土收缩，形成裂纹。在这种情况下，采用膨胀剂控制和预防露天条件下工作的混凝土的开裂显然并不适合。

（二）传统纤维抗裂

除了掺加膨胀剂外，国内外也进行了大量的试验工作，采用掺加纤维的方法来改善混凝土的性能，并取得一定的成果。传统掺加的纤维有玻璃纤维、有机质植物纤维和钢纤维三种。从使用效果看，采用玻璃纤维的混凝土主要适用于玻璃纤维增强水泥制品，且水泥石液相中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会使玻璃纤维的硅氧键发生断裂， SiO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成低钙的水化硅酸钙，此种反应可以进行至玻璃中的 SiO_2 完全消耗为止，因而玻璃纤维的抗拉强度大大降低，使混凝土的性能劣化，因此不能大规模应用于混凝土建筑物中。采用有机质植物纤维的混凝土由于纤维直径较大，强度较低，与水泥基胶结材料粘结效果较差，因此没有大规模推广使用。采用钢纤维的混凝土由于钢纤维与水泥的粘结效果好，且具有各向同性的特征，因此混凝土的强度明显提高，混凝土的耐磨性能、耐冲击性能、抗疲劳性能、韧性、抗裂性能等明显改善，减小了混凝土的各种结构缺陷，使混凝土的收缩受到一定限制，从而有效的预防了混凝土裂缝的出现。但是其昂贵的价格，复杂的操作工艺使其应用范围仅限于现场搅拌或有特殊要求的特种混凝土，不能大规模推广使用。以上三种纤维在预拌混凝土领域不能大规模应用的另一个原因就是掺加这几种纤维的混凝土坍落度损失大，扩展度小，工作性差，不利于长距离运输和泵送施工。

（三）合成纤维防裂

针对膨胀剂防裂和传统纤维防裂方法的不足，国内外又研究了采用合成纤维配制混凝土来防止混凝土裂缝的出现。据报道，近年来，美国、德国、丹麦等国家先后提出在混凝土中



掺加合成纤维来赋予混凝土一定的韧性以改善混凝土的抗裂性能。

1. 国外研究及应用现状

美国 Ngcon inc 是尼龙纤维的生产商, 它生产的尼龙纤维应用于预制混凝土构件和现场搅拌混凝土, 改善了混凝土的表面质量及整体性, 提高了混凝土的抗裂性能。该公司还研究了聚丙烯纤维和聚酯纤维在混凝土中的应用, 值得我们借鉴。

丹麦也研究了应用聚丙烯纤维减少混凝土的早期收缩裂缝的技术, 但由于掺加纤维后混凝土坍落度损失较大, 没有大量应用。

德国 Messrs P Baumhuter Rhedu - Wiedenbr uck 研究了聚丙烯纤维和它在混凝土中的应用, 得出掺加该种纤维可以提高混凝土的抗裂及抗渗性能, 抑制混凝土早期裂缝的产生, 但应用于预拌混凝土中坍落度损失大, 扩展度小, 泵送性能差, 没有在预拌混凝土行业大量应用。

2. 国内研究及应用现状

国内从 1993 年起, 上海建科院对纤维在混凝土中的应用开始研究, 研究着重于钢纤维和尼龙纤维。1994 年, 上海建科院与中国纺织大学化学纤维研究所合作, 对聚丙烯纤维在水泥中的应用进行研究, 试验表明, 聚丙烯纤维对控制减少水泥混凝土在水硬化早期产生的裂纹有较大作用。在此基础上, 上海建科院于 1995 年将聚丙烯纤维在水泥混凝土中的应用效果大力宣传, 得到许多单位的大力支持, 并根据不同的条件进行了试验, 期望聚丙烯纤维广泛应用于预拌混凝土行业。

三、混凝土的抗渗防裂的原理

当今混凝土技术发展的趋势是高强度、大流动度, C40、C50、C60 混凝土已经得到大量的应用。泵送混凝土的坍落度往往是 200 ~ 250mm, 因此每方混凝土水泥用量往往高达 650kg 左右, 但由此带来的负面作用是水化热加剧, 混凝土的凝固收缩量加大, 收缩应力增大。所以, 近年来从注重混凝土的抗渗性转向注重混凝土的抗裂性, 因为高强度的混凝土往往抗渗强度已经足够的。但从另一方面说, 混凝土的抗渗和防裂应该是相辅相成的。

国内外混凝土领域混凝土抗渗防裂的体系主要利用以下几种原理:

(一) 膨胀密实原理

对于地下及处于潮湿环境的混凝土结构工程, 采用掺加膨胀剂的办法提高混凝土的抗渗防裂性能, 把低成本的刚性防裂和柔性防裂有机结合, 从而达到抗渗防裂的有机统一, 实现抗渗防裂的合理匹配。方法是在混凝土中掺加膨胀剂, 通过补偿收缩和微膨胀达到抗收缩应力, 从而达到抗裂的目的; 并且可以通过膨胀成分达到密实抗渗目的。这种抗渗防裂原理虽然完美, 可是实践中却发现致命的缺点: 可靠度低, 受施工条件、环境等因素影响较大。如在 24h 内不及时连续浇水养护就会收缩开裂, 而且拌合物均匀要求高, 稍微过量就过度膨胀, 反而产生裂缝或稳定性不够而龟裂。掺量少, 则无膨胀效果。

(二) 减水、防水密实原理

减水密实的方法是通过掺加各种类型的减水剂减少混凝土的水泥用量和水灰比, 使得混凝土搅拌过程中水的用量减少而使凝结过程中自有水的挥发减少, 由此而产生的混凝土的毛细通道减少, 所以达到密实抗渗的目的。此外, 高效减水剂的应用, 改善了混凝土的施工性能, 提高了混凝土的耐久性。



对于地下及地上有防水要求的混凝土工程,采用防水剂也可以增加混凝土的结构密度,防止了自由水和结合水在混凝土内部的分解、移动、蒸发,从而有效的预防了混凝土脆性裂纹的产生,有效改善混凝土的抗裂性能。

(三) 高聚物填充密实原理

这种方法一般是掺加乳化的液态高聚物有机材料于混凝土拌合物之中,使混凝土在拌合和凝固时高分子乳液引入、交联成网状结构,在混凝土的颗粒之间填充和堵塞毛细孔隙达到密实抗渗的目的。由于混凝土结构中存在有机高分子的交联网状结构,当混凝土中发生裂纹扩展时,裂纹遇到弹性的高分子网就会被阻止,有机高分子的交联网状结构就会吸收部分断裂能,从而达到增韧止裂的效果。常用的有机高分子材料有丙烯酸酯乳液、氯丁乳胶、环氧乳液等。由于价格昂贵,还不能大规模应用。

(四) 掺加矿物掺合料降低混凝土水化热抗裂原理

对于大流动度混凝土,当水泥用量较多时,水化热较高,混凝土内部温度梯度太大,会产生一定的温度裂纹,因此,通过在混凝土中掺加一定量的矿物掺合料(如粉煤灰、矿粉、复合料),降低混凝土的水化热,延缓水化热峰值的出现,减少混凝土温度裂缝出现的可能性,同时可以提高混凝土结构的密实度,从而达到预防混凝土裂缝出现的目的。

(五) 纤维增强混凝土抗渗防裂

纤维增强混凝土抗渗防裂的机理是建立在对混凝土的初期(7d龄期内)固结、收缩的微观深入研究的理论基础上的,目前,这是混凝土中应用最广的抗渗防裂技术。

纤维混凝土是以水泥加颗粒集料为基体,并且用纤维来增强或改善某些性能的混凝土复合材料。纤维在混凝土中可以是长纤维,也可以是短纤维,既可以乱向分布,也可以有不同程度的定向性,而且还可以同时包含一种以上的纤维。纤维的掺入,对混凝土的基体产生增强、增韧、阻裂等效应,从而增加了混凝土的强度和抗冲击、耐疲劳等性能,改变了混凝土脆性易开裂的破坏形态,在疲劳、冻融等因素作用下,提高了混凝土的耐久性,延长了混凝土的使用寿命。

四、纤维改善混凝土性能的基本原理

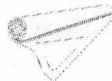
纤维改善混凝土性能的基本原理主要有以下三种解释:

(一) 多缝开裂理论

该理论认为,乱向分布的纤维与混凝土复合以后,复合基体开裂后的性能主要取决于纤维的体积分数 V_f ,当 V_f 大于体积分数 V_{fc} 时,纤维将承担全部荷载,并有可能产生多缝开裂状态,改变混凝土材料的单缝开裂、断裂性能低的状况,并出现假延性材料的特征。在多缝开裂时,裂缝间距变小,数量增多,裂缝更细,根据Griffith断裂理论可以知道,多缝开裂可以吸收更多的断裂能,使断裂应力分散,从而提高材料的断裂韧性。从宏观上讲,就是纤维分散了混凝土的定向收缩拉应力从而达到抗裂的效果,使混凝土的耐久性得到提高。

(二) 纤维间距理论

该理论认为在混凝土内部存在着不同尺寸不同形状的孔隙、微裂纹和缺陷,当受到外力作用时,这些部位将产生应力集中,引起裂纹扩展,导致混凝土结构的过早破坏。为了减少这种破坏程度,应尽量减少裂缝源的尺寸和数量,缓和裂缝间断应力的集中程度,抑制裂缝



延伸。在混凝土中掺入纤维以后,在受拉时,跨过裂缝的纤维将荷载传递给裂缝的上下表面,使裂缝处材料仍能继续承载,缓和了应力集中程度,随着纤维数量的增加,纤维间距减小并弥补于裂缝周围时,应力集中就会逐渐减少并消失。

(三) 复合力学理论

该理论是基于线弹性均衡、顺向配置连续纤维混凝土复合材料而提出的。纤维不仅能够转移荷载,还能与基体界面粘合,当沿纤维方向承受拉力时,外力通过基体传递给纤维,使纤维混凝土复合材料的抗拉强度和弹性模量有所增加,从而改善了混凝土的性能。

(四) 二次加筋作用

纤维的加入,为混凝土提供了有效的二次微加筋系统,有效抑制了混凝土因干缩、外力作用而产生的微裂缝进一步扩展,增强了混凝土的强度,延长了混凝土的寿命。

以上几种机理并不是孤立、毫无联系的,实践中可以相互结合使用,采用膨胀密实原理与纤维增强相结合,在工程中已有成功的先例。

五、抗渗防裂纤维增强混凝土的研究

孙家瑛等人研究了网状聚丙烯纤维对高性能混凝土耐久性的影响,他们发现,在混凝土中单独掺加网状聚丙烯纤维会降低混凝土的抗渗性能,通过双掺粉煤灰和硅灰,可以大幅度降低混凝土中氯离子的渗透系数并提高其抗渗能力。在素混凝土中加入聚丙烯纤维,氯离子的渗透系数明显加大,并随聚丙烯纤维的掺量的增加而增加。但掺入硅灰以后,氯离子渗透系数明显降低。这与加入硅灰后提高了纤维与水泥浆体粘结强度有关。在聚丙烯纤维混凝土的抗冻融试验中,经过 50 次和 100 次冻融循环,普通混凝土的抗压强度变化不大,但抗折强度明显降低,双掺硅灰和粉煤灰的纤维混凝土抗压强度和抗折强度均未下降。

孙伟等人研究了膨胀剂与不同纤维合并使用增强混凝土的抗裂纹收缩和抗渗性研究。通过选用不同尺寸和类型的纤维,使其在混凝土中有一定程度的相互补偿,阻止裂纹的产生和扩展,减少原生裂纹的尺寸和数量。钢纤维和聚丙烯纤维混合使用比单一使用效果都好。适量膨胀剂的加入,提高了混凝土水化早期的纤维和集料的界面结合强度,减少了收缩。由于混凝土总体结构在使用不同尺寸、不同类型纤维后得到改善,对提高混凝土的抗收缩能力有好处。膨胀剂和混合纤维合并使用,提高了混凝土的抗收缩能力和抗渗能力。

Nemkmar Banthia 研究了聚丙烯纤维对混凝土塑性收缩和热收缩的影响,纤维的类型和尺寸是控制裂纹扩展的重要因素。0.7% 体积掺量的长径比为 50/0.63 的纤维可以使混凝土中 1mm 的裂缝降低到 0.4mm,用相同体积分数的长径比为 19/0.15 的纤维则可以完全消除掉。

朱江等人研究了聚丙烯纤维在控制混凝土塑性收缩裂缝上的主要作用。由于混凝土的塑性开裂主要发生在混凝土硬化以前,特别是在混凝土浇筑后 4~5h 之内,此阶段由于水分的蒸发和转移,混凝土内部的抗应变能力低于塑性收缩产生的应变,因而引起内部塑性裂缝的产生。当掺入聚丙烯纤维之后,由于聚丙烯纤维分布均匀,起到类似筛网的作用,减缓了由于粗粒料的快速失水所产生的裂缝,延缓了第一条塑性收缩裂缝的出现时间。当裂缝出现以后,聚丙烯纤维的存在又使得裂缝尖端的发展受到限制,裂缝只能绕过纤维或把纤维拉断来继续发展。这就消耗了巨大的能量来克服纤维对裂缝扩展的限制作用,纤维体积掺量越大,这种限制作用越强。而且,混凝土收缩裂缝面积、裂缝最大宽度及失水速率均随着纤维的体



积掺量增大而显著降低，这充分说明聚丙烯纤维能有效提高混凝土的抗裂性能。

第二节 纤维混凝土原材料的选择

为了得到最优的研究结果，本研究采用单因素试验方法优选，然后将各种因素综合考虑，经过物理性能、力学性能及耐久性的试验，得到最佳配比。

各种原材料在纤维抗渗防裂混凝土的生产应用过程中起到非常重要的作用，特别是对混凝土的使用功能、耐久性指标等均会产生直接影响。因此通过大量的试验，优选出混凝土原材料及纤维的最佳掺量，是本研究的关键之一，方案如图 1-1 所示。

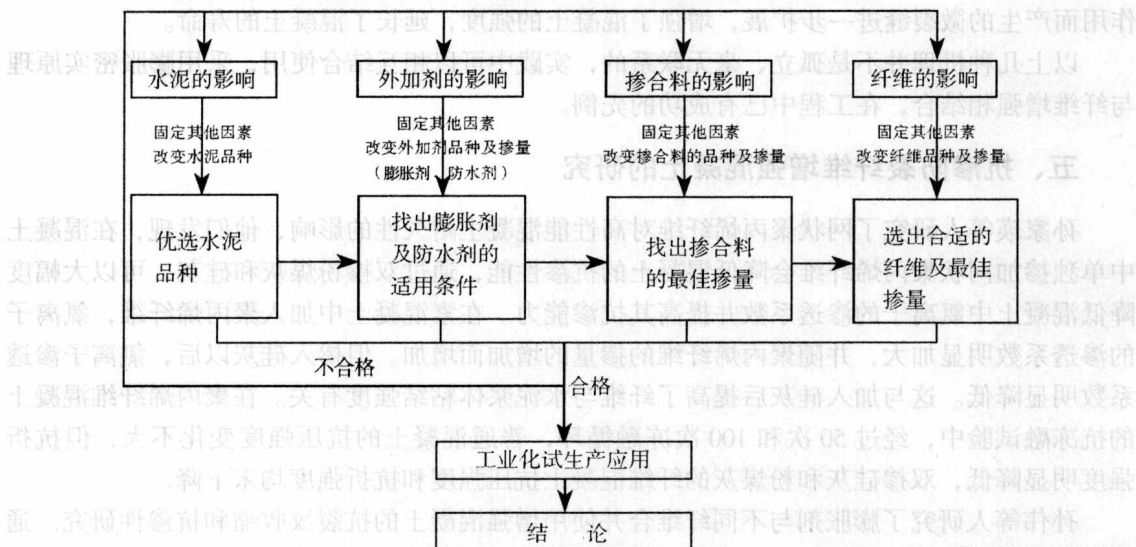


图 1-1 纤维抗渗防裂混凝土研究技术方案

一、水泥品种对纤维抗渗防裂混凝土收缩性能的影响

为了选择适合配制纤维抗渗防裂混凝土的水泥，我们分别使用普通硅酸盐水泥（P·O）、矿渣硅酸盐水泥（P·S）、粉煤灰硅酸盐水泥（P·F）、火山灰质硅酸盐水泥（P·P）采用同样的配合比配制混凝土，对它们的收缩性能进行试验，从中优选出收缩较小的水泥品种用于本研究。收缩试验结果见表 1-1。

表 1-1 不同品种水泥混凝土的收缩值

水泥品种	收 缩 （%）							
	标 养 条 件				干 燥 空 气			
	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d
P·O	0.005	0.012	0.029	0.031	0.020	0.040	0.075	0.083
P·P	0.016	0.036	0.076	0.082	0.031	0.066	0.115	0.125
P·S	0.007	0.016	0.039	0.043	0.021	0.039	0.083	0.095
P·F	0.007	0.015	0.031	0.038	0.022	0.044	0.076	0.089



通过以上数据可知,采用普通硅酸盐水泥收缩值较小,火山灰质硅酸盐水泥有明显的收缩,粉煤灰水泥和矿渣水泥的收缩值差别不大。因此要配制收缩值较小的混凝土,优先选用普通硅酸盐水泥。从理论上讲,生产抗裂混凝土优先选用普通硅酸盐水泥主要是因为普通硅酸盐水泥中熟料的含量较高,所以它的 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 的比例较大,当水泥水化时,由于各种成分都能在适当的时间内水化,生成稳定的水化产物,并且这些水化产物都不具有可逆的分解性能,因此结构稳定,收缩较小。而火山灰质水泥由于需水量大,容易导致混凝土内的水泥凝胶体积缩减,引起混凝土结构的缩减,表现在外观上就是体积收缩。当混凝土水化后各部位应力分布不均匀时就会产生应力集中,导致结构缺陷的产生,继而引起裂纹。粉煤灰硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥由于需水量与普通水泥相差不多,而且在水泥熟料水化以后,粉煤灰和矿渣粉可以进一步水化,因此收缩较小。但由于其早期强度太低,与外加剂的适应性差,因此不适于用做研究纤维抗渗防裂混凝土的基准混凝土。

二、外加剂对混凝土收缩的影响

(一) 膨胀剂对混凝土收缩的影响

为了改善混凝土的抗渗防裂性能,采用膨胀剂可以提高混凝土在潮湿环境下的抗渗防裂能力。因此我们对膨胀剂(PMB)的掺量进行试验,选出适合配制纤维抗渗防裂混凝土的最佳掺量。

表 1-2 不同掺量 PMB 混凝土的收缩值

PMB 掺量 (%)	收 缩 (%)							
	标 养 条 件				干 燥 空 气			
	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d
0	0.005	0.012	0.029	0.031	0.020	0.040	0.075	0.083
6	0.003	0.005	0.008	0.010	0.018	0.062	0.085	0.102
8	0.003	0.005	0.006	0.008	0.018	0.065	0.109	0.123
10	0.003	0.004	0.006	0.007	0.018	0.065	0.122	0.129
12	0.003	0.004	0.005	0.006	0.018	0.064	0.125	0.135

由表 1-2 数据可知,对于掺 PMB 的混凝土,在标养条件下,由于有充足的水分,膨胀作用发挥,混凝土收缩小,但在干燥环境下混凝土收缩达到甚至超过不掺膨胀剂的混凝土。因此可以得出这样的结论:

对处于地下或潮湿环境中工作的混凝土采用膨胀剂可以起到膨胀补偿收缩、防渗抗裂的作用,且从 6%~12% 的掺量变化中,随着掺量的增加,膨胀值增大,且稳定性较好,其最佳的掺量为 8%~10%,而对于干燥环境中工作的混凝土工程而言,掺膨胀剂不仅不起防裂作用,而且使收缩值更大,因此在配制潮湿环境中工作的混凝土或地下混凝土时,我们优选 8%~10% 的膨胀剂配料,使刚性防水起到最优效果。

(二) 防水剂对混凝土收缩的影响

为确保在潮湿环境和干燥环境的混凝土都具有防水抗裂的能力,有的重点工程采用掺加



防水剂的措施来改善混凝土的防水抗裂功能,为了选择合理的掺量,我们经过对比,选用了甲基硅酸钠作为防水剂,并对其掺量进行了试验,以便找到最适合于工程应用的掺量。

表 1-3 不同掺量有机硅防水剂混凝土的收缩值

有机硅防水剂掺量 (%)	收 缩 (%)							
	标 养 条 件				干 燥 空 气			
	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d
0	0.005	0.012	0.029	0.031	0.020	0.040	0.075	0.083
0.5	0.004	0.012	0.024	0.029	0.011	0.024	0.031	0.037
1.0	0.004	0.012	0.020	0.027	0.011	0.024	0.031	0.037
1.5	0.004	0.012	0.020	0.027	0.011	0.023	0.030	0.035
2.0	0.004	0.012	0.020	0.025	0.011	0.023	0.029	0.034
2.5	0.004	0.012	0.020	0.023	0.011	0.022	0.029	0.034
3.0	0.004	0.012	0.020	0.023	0.011	0.022	0.031	0.035

通过表 1-3 数据可知,掺加有机硅防水剂后的混凝土试件在标养和干燥空气中的 28 天收缩值相差不大,但随着防水剂掺量的增加,收缩值逐渐变小,超过 2.5% 后收缩值基本不变,因此我们认为掺加 2.5% 的有机硅防水剂,对于配制纤维防裂混凝土具有较理想的效果,使这种适应性很强的刚性防裂措施发挥作用。

(三) 掺合料品种及掺量对混凝土收缩的影响

采用不同的掺合料,不同的掺量对混凝土收缩的影响也不同,为了满足不同的施工需要,我们对矿渣粉、粉煤灰和复合掺合料三种材料对混凝土的收缩影响进行了试验。

通过表 1-4 数据可知,当矿渣粉掺量由 10% ~ 25% 增加,混凝土的收缩值逐渐减少,超过 25% 时收缩值又有所增加。因此用矿渣粉配制抗渗防裂混凝土时的掺量一般应在 20% ~ 30%; 当粉煤灰掺量由 10% ~ 40% 变化时,混凝土的收缩值逐渐由大变小,再由小变大,因此用粉煤灰配制抗渗防裂混凝土时的掺量宜控制在 20% ~ 40%; FK 为矿渣粉与粉煤灰复合的产品,当 FK 掺量由 20% ~ 50% 变化时,混凝土的收缩值由大变小,当掺量超过 40% 时,混凝土的 FK 掺量在 40% ~ 50% 的范围内时收缩值趋于稳定,因此我们在配制防渗抗裂混凝土时,其掺量应在 40% ~ 50%。

通过上述的相关试验可以总结出,配制防裂抗渗的混凝土选用普通硅酸盐水泥收缩值相对较小;选用复合掺合料、粉煤灰、矿渣粉产生的收缩相差不大但略有降低趋势。在潮湿环境下,可以掺加 8% ~ 10% 的膨胀剂达到抗渗防裂的效果,但是在干燥条件下掺加膨胀剂不但起不到防裂的效果,反而会因为水分的缺少导致混凝土的开裂,而且开裂程度随着膨胀剂掺量的增大而增加,所以要寻找更好的解决混凝土裂缝问题的途径。

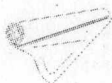


表 1-4 不同掺合料品种和掺量混凝土的收缩值

掺合料品种 及掺量 (%)		收 缩 (%)							
		标 养 条 件				干 燥 空 气			
		1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d
矿渣粉	10	0.010	0.023	0.032	0.037	0.021	0.045	0.072	0.080
	20	0.010	0.021	0.031	0.036	0.021	0.044	0.072	0.080
	25	0.010	0.021	0.030	0.035	0.021	0.043	0.072	0.079
	30	0.010	0.023	0.031	0.038	0.021	0.043	0.073	0.081
	35	0.010	0.024	0.032	0.038	0.021	0.044	0.074	0.083
粉煤灰	10	0.012	0.025	0.032	0.037	0.020	0.045	0.075	0.084
	20	0.012	0.024	0.032	0.035	0.020	0.044	0.073	0.082
	30	0.012	0.023	0.031	0.032	0.020	0.044	0.070	0.079
	40	0.012	0.024	0.031	0.039	0.020	0.045	0.072	0.081
复合掺 合料 (FK)	20	0.015	0.025	0.038	0.042	0.018	0.048	0.076	0.086
	25	0.015	0.024	0.038	0.040	0.018	0.049	0.075	0.085
	30	0.015	0.024	0.038	0.041	0.018	0.049	0.075	0.084
	35	0.015	0.024	0.038	0.041	0.018	0.049	0.074	0.085
	40	0.015	0.023	0.035	0.039	0.018	0.049	0.073	0.084
	45	0.015	0.023	0.035	0.037	0.018	0.048	0.073	0.081
	50	0.015	0.023	0.035	0.037	0.018	0.048	0.071	0.081

第三节 纤维的选择

在现有试验的基础上，采用固定的混凝土配比，通过改变纤维品种和掺量来研究混凝土的主要力学性能的变化情况。本研究采用的纤维有玻璃纤维、聚丙烯纤维和钢纤维。

一、玻璃纤维

(一) 玻璃纤维性能

通过调研和分析论证，我们在已有的工作基础上，选择抗碱玻璃纤维作为本次研究的原材料。其化学成分、物理力学性能及耐腐蚀性能分别见表 1-5、1-6、1-7。

表 1-5 抗碱玻璃纤维的化学成分

类别	化学成分 (%)								
	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃
中国锆钛纤维	61.0	5.0	10.4	2.6	14.5	6.0	0.3	0.25	0.2
英国 Cem-filz	60.0	4.7	14.2	0.3	18.0	0.1	0.7	—	—
日本 Minilonl	62.0	6.9	12.1	0.3	14.1	—	1.6	0.1	0.3



表 1-6 抗碱玻璃纤维的物理力学性能

类别	单丝直径 (μm)	长度 (mm)	密度 (g/cm^3)	抗折强度 (MPa)	弹性模量 ($\times 10^4$ MPa)	极限拉 伸率 (%)
中国锆钛纤维	12~14	30~40	2.7~2.8	2000~2100	6.3~7.0	4.0
英国 Cem-filz	12.5	30~40	2.70	2500	8.0	3.6
日本 Minilonl	13.0	30~40	2.66	2300	7.0	—

表 1-7 玻璃纤维的耐腐蚀性能

玻璃纤维类别	玻璃纤维经碱液饱和侵蚀后的抗拉强度保留率 (%)	
	100℃饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液 4h	80℃合成水泥滤液 24h
抗 碱	66.2~88.1	54.3~84.3
中 碱	41.5~44.3	24.6~26.4
无 碱	29.2~35.5	25.3~32.0

(二) 抗碱玻璃纤维抗渗防裂混凝土试验

1. 拌合物性能

拌合物中玻璃纤维的掺量分别为(占胶凝材料总量): 0; 0.5%; 1.0%; 1.5%; 2.0%。
拌合物性能见表 1-8。

表 1-8 抗碱玻璃纤维抗渗防裂混凝土拌合物性能

纤维掺量 (%)	坍落度 T_0 (mm)	扩展度 D_0 (mm)	1h 坍落度 T_1 (mm)	1h 扩展度 D_1 (mm)
0	230	520	180	470
0.5	210	450	170	380
1.0	195	400	140	300
1.5	170	350	100	240
2.0	165	340	100	240

2. 物理力学性能

物理力学性能见表 1-9。

表 1-9 抗碱玻璃纤维抗渗防裂混凝土物理力学性能

纤维掺量 (%)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	抗折强度 (MPa)	弹性模量 ($\times 10^4$ MPa)	抗冻标号	收缩率 (%)
0	46.0	3.67	6.7	2.2	F50	0.045
0.5	43.5	4.49	7.1	2.2	F50	0.044
1.0	41.2	4.60	7.0	2.2	F50	0.044
1.5	40.7	4.82	6.8	2.1	F50	0.043
2.0	38.1	4.97	7.0	2.1	F50	0.042

通过以上数据可知,用于抗渗防裂的最佳纤维掺量为 2.0%,抗碱玻璃纤维有以下特