

GAO XING NENG
HE CHENG XIAN WEI
HUN NING TU

高性能合成纤维 混凝土

邓宗才 著



科学出版社
www.sciencep.com

高性能合成纤维混凝土

邓宗才 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

复合材料是材料、结构工程学科的发展方向,本书所论述的合成纤维混凝土是国际上近几年十分关注的热点问题。书中全面系统地论述了合成纤维混凝土的性能。全书分两篇,第一篇介绍合成纤维混凝土的基本理论和方法,包括合成纤维混凝土阻裂机理,纤维混凝土阻裂、增韧性能的评价体系及实验方法,土木工程中选用合成纤维的原则等。第二篇为合成纤维混凝土基本性能和耐久性的试验研究成果,包括早期阻裂特性、增韧效应、抗弯曲疲劳性能、抗冲击性能等。

本书可供土木工程、材料工程专业的科学研究人员、工程技术人员、高等院校的教师及研究生、本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高性能合成纤维混凝土/邓宗才著. —北京:科学出版社,2003
ISBN 7-03-011615-1

I. 高… I. 邓… III. 纤维增强混凝土 N. TU528.572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 051900 号

责任编辑:童安齐 沈 建 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:刘士平 / 责任设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年8月第一次印刷 印张:8

印数:1—3 000 字数:146 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))



序

近几年来,世界各国都十分重视混凝土结构的耐久性,研究和制定提高混凝土耐久性的对策,其中高性能纤维混凝土是改善混凝土性能和提高结构使用寿命的有效方法之一。近几年我国在合成纤维混凝土的研究和应用方面也取得了长足的进展,在新修订的《纤维混凝土结构技术规程》中增加了有关合成纤维混凝土的内容,以推动合成纤维水泥基复合材料的迅速、健康发展。混凝土结构失效概率最高的阶段集中在混凝土施工期和老化期,尤其是混凝土施工期产生的各种裂缝或缺陷,会严重影响到混凝土的耐久性。

随着合成工业的发展,生产出了性能良好的合成纤维,如改性腈纶纤维、聚丙烯网状或单丝纤维、聚酯纤维和聚乙烯纤维等,各种性能优良的合成纤维为发展高性能混凝土提供了物质保障。混凝土中拥有根数巨多的乱向分布的合成纤维,可以有效地防止混凝土的早期开裂。合成纤维掺入混凝土中,改善了混凝土的品质,减少了混凝土在施工期的裂缝和缺陷,增强了混凝土的韧性、抗冲击、抗冻融、抗渗和抗疲劳等耐久性。合成纤维还降低了混凝土在高温下发生膨胀爆裂的概率。总之,合成纤维混凝土是一种耐久性优良、很有发展前景的高性能水泥基复合材料。

邓宗才同志多年来一直致力于高性能纤维混凝土的研究,在纤维混凝土抗断裂和抗疲劳等耐久性方面作了大量的试验和理论研究,在国内最早开发了改性腈纶纤维、碳纤维、聚丙烯粗细纤维增强混凝土的力学性能和耐久性的研究,取得了重要的进展,关于聚丙烯、改性腈纶等合成纤维增强混凝土阻裂机理的研究有独到的见解,研究了在混凝土路面、桥面中复合使用钢纤维和合成纤维的可行性,他通过试验证明复合纤维混凝土结构能够充分发挥不同种类纤维的优势,能改善路面和桥面的力学特性,对提高路、桥的使用寿命颇有益处。这本书是他本人和国内外关于合成纤维混凝土最新研究成果的总结,值得一读。

21 世纪是科学技术快速发展的世纪。我相信在党中央“科技强国”的政策指引下,在广大科技工作者的不断创新和努力工作下,我国一定会在高性能合成纤维混凝土的研究和应用方面取得新的更大的成绩。

赵国藩

中国工程院院士
大连理工大学教授

2003 年 6 月 21 日

前 言

近几年来,全世界每年混凝土的用量均在 50 亿立方米以上,混凝土已成为使用量最广泛的建筑材料,也正朝着高强度、高性能和多功能的方向发展。高强度或高性能混凝土应该是高抗裂的混凝土,但目前高强度混凝土普遍存在收缩变形大、抗裂能力低、脆性大的明显不足。如何有效地解决混凝土的抗裂问题,已成为工程界十分关注的热点课题。目前国际上基本一致的认识是纤维混凝土是提高混凝土抗裂性和韧性的有效方法。钢纤维对阻止硬化混凝土裂缝扩展有良好的效果,可以提高混凝土的抗拉强度和韧性,改善混凝土抗冻、抗冲击性和疲劳耐久性等。聚丙烯腈、聚丙烯等合成纤维在解决混凝土早期塑性开裂、减少混凝土干燥收缩变形方面具有十分独特的作用。每立方混凝土中乱向分布有数千万根至数亿根合成纤维,形成三维有力的空间支撑体系,改善了混凝土的内在品质,使混凝土的抗渗性、抗冲击、抗冻融、抗高温爆裂和抗疲劳等耐久性得到显著提高,延长了结构的使用寿命。在众多纤维中,聚丙烯纤维造价较低廉,聚丙烯腈纤维抗紫外线性能优异,弹性模量及强度较高,是解决混凝土早期开裂和提高硬化混凝土阻裂能力的高科技产品。近几年发展起来的粗合成纤维具有良好的抗腐蚀性能,可以提高掺量以代替钢纤维,用于恶劣环境,提高混凝土的韧性和抗裂性能。

合成纤维在土木工程中的使用量日益增多,有不断发展的趋势,因此,我国纤维混凝土技术规程中增加了合成纤维混凝土有关内容,以推动合成纤维混凝土的健康发展。作者在编写合成纤维混凝土技术规程的过程中感到,需要有一本系统论述合成纤维混凝土性能的书籍,以指导设计和施工。为此,本书总结了作者近几年关于合成纤维混凝土的最新研究成果。全书分两篇,第一篇介绍合成纤维混凝土的基本理论和方法,包括合成纤维混凝土的阻裂机理,纤维混凝土阻裂、增韧性能的评价体系及试验方法,土木工程中选用合成纤维的原则等。第二篇为合成纤维混凝土基本力学性能和耐久性的研究成果,包括合成纤维混凝土的早期阻裂特性、增韧效应、轴向拉伸性能、弯曲疲劳性能、抗冻融、抗高温和抗冲击性能等。

在书稿撰写过程中得到了大连理工大学赵国藩院士的热情支持和鼓励,在试验研究中得到了解放军空军工程设计研究局王璋水高级工程师,深圳海川实业科技有限公司总裁何唯平先生、总监张国庆、汤惠工博士,中国纺织科学研究院吴洪仁教授、史小兴经理,恒律公司王齐经理,北京科拉斯工程发展有限公司陈小军工程师和北京旺虹佳盛有限公司王蕾女士等专家的大力帮助,书中第二篇第四章部分引用了同济大学姚武博士的资料。在此谨向帮助完成本书的专家朋友表示衷心的感谢。书中不妥之处,尚祈读者不吝指正。

目 录

序 前言

第一篇 合成纤维混凝土的基本理论

第一章 合成纤维的基本性能	1
1.1 合成纤维的主要品种	1
1.2 合成纤维的分类	5
1.3 混凝土用合成纤维的技术要求及建议掺量	5
参考文献	7
第二章 合成纤维混凝土的塑性阻裂机理	9
2.1 概述	9
2.2 混凝土早期裂缝的防治	11
2.3 合成纤维混凝土早期抗裂的作用机理	11
2.4 合成纤维混凝土的抗冻融机理	13
参考文献	13
第三章 合成纤维混凝土早期抗裂性的评价体系	15
3.1 概述	15
3.2 纤维混凝土早期抗裂性的试验方法	16
3.3 纤维混凝土干缩试验	21
参考文献	22
第四章 合成纤维混凝土弯曲韧性评价体系	25
4.1 概述	25
4.2 美国 ASTM-C1018 方法	25
4.3 美国 ASTM-C1399-98 方法	27
4.4 日本 JSCE 方法	28
4.5 挪威 NBP NO7 方法	29
4.6 韧性等级水平的方法	30
参考文献	31
第五章 土木工程对合成纤维的基本要求	32
5.1 纤维物化性能及几何特征	32
5.2 纤维分散性的检测方法	32

5.3 合成纤维在设计与施工中应该注意的问题	33
参考文献	34

第二篇 合成纤维混凝土的基本性能和耐久性

第一章 合成纤维混凝土早期抗裂性能	35
1.1 纤维混凝土叠合板法试验结果与分析	35
1.2 纤维混凝土 ICBO 方法的试验结果	39
1.3 美国 ACI-544 大板抗裂试验结果	40
1.4 纤维砂浆圆环抗裂性试验结果	41
1.5 纤维混凝土圆环抗裂性试验结果	43
1.6 纤维混凝土干缩值	43
参考文献	44
第二章 聚丙烯腈纤维混凝土基本性能及韧性	45
2.1 概述	45
2.2 纤维混凝土韧性试验过程	45
2.3 纤维混凝土弯曲韧性试验结果及讨论	47
2.4 结论	52
参考文献	53
第三章 聚丙烯腈纤维混凝土轴心拉伸性能	54
3.1 概述	54
3.2 纤维混凝土拉伸试验方法	55
3.3 纤维混凝土的开裂与破坏过程	56
3.4 纤维混凝土轴心拉伸试验结果	58
3.5 纤维混凝土裂缝扩展宽度与承载力的关系曲线	60
3.6 纤维混凝土最大裂缝宽度	61
3.7 纤维混凝土断裂能	62
3.8 纤维混凝土特征长度	63
3.9 结论	63
参考文献	63
第四章 聚丙烯腈纤维混凝土抗低温性能	65
4.1 概述	65
4.2 纤维混凝土抗冻性试验过程	65
4.3 低温下纤维混凝土的力学性能	67
4.4 纤维混凝土抗冻融耐久性	69
4.5 纤维混凝土微观界面与抗冻融性的关系	71
4.6 结论	72

参考文献	73
第五章 合成纤维混凝土耐高温及耐磨性	74
5.1 纤维混凝土抗高温爆裂试验研究	74
5.2 纤维混凝土耐热性能	75
5.3 纤维混凝土耐磨耗性	76
5.4 纤维混凝土抗冲击性能	77
5.5 纤维混凝土抵抗温差裂缝的能力	78
参考文献	78
第六章 聚丙烯腈纤维混凝土弯曲疲劳特性	79
6.1 概述	79
6.2 纤维混凝土弯曲疲劳试验过程	79
6.3 纤维混凝土弯曲疲劳试验结果及讨论	81
6.4 结论	83
参考文献	83
第七章 复合纤维混凝土弯曲疲劳性能	84
7.1 概述	84
7.2 复合纤维混凝土试验方法	85
7.3 复合纤维混凝土基本性能试验结果	87
7.4 复合纤维混凝土弯曲疲劳性能试验结果	90
7.5 结论	93
参考文献	93
第八章 粗合成纤维增强混凝土性能	95
8.1 粗合成纤维的优越性	95
8.2 Barchip 粗纤维增强混凝土的性能	95
8.3 HPP 152 粗纤维增强混凝土性能	99
8.4 Forta Feero 粗纤维增强混凝土的性能	104
参考文献	114

第一篇 合成纤维混凝土的基本理论

第一章 合成纤维的基本性能

1.1 合成纤维的主要品种

1. 聚丙烯纤维(丙纶 PP)

丙纶纤维始生产于 1957 年。据报道,2001 年全世界丙纶的产量为 582.7 万吨,占该年度合成纤维总产量的 18.5%。聚丙烯纤维(单丝)的性能为:强度为 350~700MPa,弹性模量为 3~10GPa,极限伸长为 15%~25%,吸湿性小(0%),比重为 0.91g/cm³。聚丙烯纤维由于生产原料比较丰富,生产过程比较简短,生产成本相对于其他品种纤维较低,所以受到国内外建筑业界的重视和使用。但其不具有“高强高模”的特性,从土木工程的角度来看,它不属于“高弹模纤维”,因为构成聚丙烯纤维的大分子链比较柔,玻璃化温度只有-18℃,而一般常用的合成纤维的玻璃化温度都在室温以上,如涤纶为 69℃、锦纶为 45~48℃、腈纶为 87℃、维纶为 85℃。一般情况下,聚丙烯在室温下为橡胶态,不具有用于生产纤维的可能。用于生产纤维的聚丙烯必须是等规聚丙烯,以提高纤维的结晶度和增加纤维的刚性。

由等规聚丙烯所制得的纤维能够满足一般纤维的要求,它具有不低的强度,极限伸长相对较大,但作为服用纤维它很难进行染色,所以它实际用于服用方面的比例不大,约占总产量的 7%~8%。它的主要用途是用作装饰材料和产业应用,如用于制作地毯、人造草坪、包扎用绳子以及一次性使用的“用即弃”产品等。近几年有一定数量聚丙烯纤维用于土木工程领域,以提高混凝土及砂浆的早期抗裂性能和韧性。

2. 聚乙烯醇纤维(维纶 PVA)

日本最早于 1950 年开始生产维纶纤维,它的强度可达 700~850MPa,弹性模量达 16~20GPa,极限伸长率为 5.5%~6.0%,吸湿性较大(5%),比重为 1.26~1.30g/cm³。我国于 20 世纪 60 年代初从日本引进全套生产技术和设备,在北京顺义县建厂生产。后于 60 年代末,应用自有技术和设备在全国兴建了十多个生产维纶的大厂,使我国拥有了相当规模的维纶生产能力。但由于服用市场的不景气(如 2001 年的年产量仅为 1.9 万吨),在此情况下一些维纶厂开发、生产一定量“高强

高模”的维纶,供产业方面应用。维纶纤维强度和模量不如碳纤维等高强度和高弹性模量纤维,但比丙纶高,维纶的吸湿性较大。维纶耐碱性、稳定性虽不如丙纶,但还是比较好的。早在 70~80 年代,国内外都已用维纶纤维代替石棉,生产波形纤维水泥板、瓦^[1~18]。

维纶的生产过程冗长而复杂,且在生产过程中需用到“甲醛”,这是一种对生产环境具有污染的化学药品,故欧、美等发达国家都不再生产这种纤维。据报道,2001 年全世界维纶纤维的产量不足 5 万吨,占该年度合成纤维总产量的 0.15%,其中产量最大的是朝鲜(以用于服用为主)。

3. 聚丙烯腈纤维(腈纶 PAN)

腈纶纤维的工业产品在 1950 年问世,一开始该产品在服用领域有“人造羊毛”的美誉,该纤维的强度不很高(250~400MPa),模量较低(3~8GPa),极限伸长为 12%~20%,吸湿率为 2.0%,比重为 1.17g/cm³,除了抗腐蚀性能优越外,还具有优异的抗紫外线能力。为了满足服用需要,在聚丙烯腈长链分子中有意识地夹杂进少量(8%~9%)其他的小分子(如丙烯酸甲酯、甲基丙烯酸甲酯、醋酸乙烯等),借以适当地降低长链分子的刚性,增加其柔性(聚合物的玻璃化温度由 104℃降为约 87℃),并使其具有可染色性。

为了产业使用,则需要从调整其大分子链的构成比着手增大其强度和模量,降低其极限伸长,即生产所谓的“高强高模”改性腈纶(强度为 500~700MPa,模量为 18~25GPa)。

早在 20 世纪 70~80 年代,“高强高模”改性腈纶纤维已代替石棉来增强水泥砂浆,制成水泥波形瓦。后来欧洲将改性腈纶纤维掺入混凝土中,起阻止早期裂缝和改善混凝土韧性的作用。

据报道,2001 年全世界腈纶的产量为 256 万吨,约占该年度合成纤维总产量的 8.1%。

近几年一些国家成功地将改性腈纶纤维应用于混凝土工程,提高混凝土和砂浆的早期抗裂性能。改性腈纶纤维也是提高沥青混凝土路面的高温稳定性、低温抗裂性、弯曲疲劳性能的新型材料。另外,腈纶纤维对提高沥青混凝土路面的抗车辙性也具有独特的作用^[9~12]。

4. 聚酯纤维(涤纶 PET)

涤纶纤维始生产于 1953 年,而后发展十分迅速,现已成为合成纤维中产量最大的品种。它主要供制作服用用品和装饰用品,产业应用的比例不很大,主要用作小轿车用轮胎的帘子线。聚酯纤维的耐温性优于丙纶(涤纶的熔点为 265℃,丙纶的熔点仅为 165℃),因此也用于沥青混凝土中,增强沥青混凝土路面的抗车辙性能等,提高沥青混凝土路面的耐久性。该纤维强力型单丝的抗拉强度为 650~

850MPa,模量为10~15GPa,极限伸长为7%~12%,吸湿率为0.4%,比重为1.38g/cm³。由于它的耐碱性稳定性不是很好,所以不宜将它掺入混凝土中使用。

据报道,2001年全世界涤纶的产量为1928.4万吨,约占该年度合成纤维总产量的60.9%。

5. 聚酰胺纤维(锦纶 PA)

锦纶纤维生产始于1939年(PA66)和1941年(PA6),属最早投入工业生产的合成纤维品种(商品名“尼龙”)。该纤维的特点是强度高(540~760MPa),极限伸长率大(15%~20%),模量不高(3~5GPa),吸湿率为4.5%,比重为1.14g/cm³。由于它的强度高和极限伸长率大,耐磨性好,断裂能大,十分适合制作袜子,产业用方面十分适用于作飞机用轮胎帘子线和登山用绳索等,早年也用它制作小轿车的轮胎,但它因有“平点现象”,现在被涤纶帘子线所取代。锦纶纤维的耐碱性稳定性尚可,但耐光性不好。

据报道,2001年全世界锦纶纤维的产量为366.7万吨,约占该年度合成纤维总产量的11.6%。

以上5种合成纤维,虽然它们的模量有高有低,但均不符合土木工程对纤维“高弹模”的要求,即它们的模量还不够高,纤维的刚性尚不足。下面三种属“高弹模”纤维。

6. 芳族聚酰胺纤维(芳纶 Kevlar, Nomex)

(1) 聚对苯二甲酰对苯二胺纤维(芳纶 1414, Kevlar)

芳纶 1414 纤维性能为:强度为1800~2400MPa,模量为30~45GPa,极限伸长率为3%~5%,吸湿性为2.0%,比重为1.43g/cm³。为了提高其强度和模量,纺丝加工必须采用特殊的干湿法纺丝。因为构成该纤维的聚合物的玻璃化温度相当高,达340℃,成纤后将很难通过常规的塑性拉伸以提高其强度和模量,大分子要求的取向必须在成纤后、固化前形成,于是便开发出了干-湿法纺丝以达到上述目的。芳纶 1414 就是采用这一方法制成的。目前这一产品主要供产业用,它的性能特点是高强、高模、耐高温。

(2) 聚对苯二甲酰胺纤维(芳纶 14, Kevlar49)

芳纶 14 纤维的强度与芳纶 1414 相近(达2000MPa),但模量比芳纶 1414 高出许多,可达90~130GPa,其模量稍低于碳纤维(190~230GPa)和硼纤维(170GPa),但远大于钢纤维(20~30GPa)和玻璃纤维(30~40GPa)等,在现有各种有机合成纤维中,它的模量是最高的。

7. 超高分子量聚乙烯纤维

在通常情况下,聚乙烯的大分子链是很柔的(玻璃化温度只为-67℃),为了

获得高强高模的纤维产品,采取了使构成纤维的大分子超高分子量、高取向和高结晶度的方法,最终使成品纤维的强度达 1600~2500MPa,模量达 60~80GPa,极限延伸率为 3%~4%,吸湿性为 0%,比重为 0.94g/cm³,并具有良好的耐碱性稳定性和耐光性。该纤维的纺丝加工采用凝胶纺丝法,用十氢奈或煤油等作为稀释剂,将聚合物原料——聚乙烯制备成凝胶,而后进行低速纺丝,随后再分步、多次对初生丝进行高倍拉伸,以制得高强高模的聚乙烯纤维。

8. 碳纤维

它是取人造加工的有机纤维,如聚丙烯腈纤维、黏胶纤维、沥青基纤维等为原丝,通过在高温下的预氧化、碳化以及石墨化等加工工序而制得的。常用的高强高模碳纤维的性能为:强度为 1750~2900MPa,模量为 275~500GPa,极限伸长为 0.1%~0.2%,吸湿率为 0%,比重为 1.7~2.0g/cm³。

上述 3 种所谓的“高弹模纤维”,由于它们的生产加工过程比较复杂、特殊,产量又不很大,所以生产成本相对较高,每公斤的售价可达数百元,有的甚至高达千元以上。一般为了提高混凝土抗裂性,使用价廉物美的合成纤维就能满足工程要求,即不必采用昂贵的高弹模纤维。但是,如果为了增强混凝土的抗拉强度等机械性能,使用“低弹模纤维”难以实现,此时应掺入上述的“高弹模纤维”。

上述各种纤维的物化性能列于表 1-1-1。

表 1-1-1 纤维的物化性能

纤维种类	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	极限延伸率 /%	比重 /(g/cm ³)	耐碱性	吸湿率 /%	耐光性
低碳钢纤维	1000~2000	200~210	3.5~4.0	7.8			
不锈钢纤维	2100	154~168	3.0	7.8			
抗碱玻璃纤维	1400~2500	70~80	2.0~3.5	2.7			
聚丙烯单丝	285~570	3~9	15~25	0.91	好	0	不好
聚丙烯膜裂	450~650	8~10	8~10	0.91	好	0	不好
高强高模量维纶	700~850	16~20	5.5~6.0	1.26	尚好	5.0	好
聚丙烯腈纤维	250~440	3~8	12~20	1.17	尚好	2.0	好
高强聚丙烯腈纤维	700	18~25	10~16	1.17	尚好	2.0	好
聚酯强力丝	650~850	10~15	7~12	1.38	不好	0.4	尚好
聚酰胺强力丝	540~760	3~5	15~20	1.14	尚好	4.5	不好
超高分子聚乙烯纤维	1600~2500	60~80	3~4	0.94	好	0	尚好
间位芳香聚酰胺纤维	380~490	5~12	17~25	1.38	尚好	4.5	尚好
对位芳香聚酰胺纤维	1500~2000	27~40	3~5	1.43	尚好	2.0	尚好
高强高模量碳纤维	1750~2550	280~500	0.1~0.2	1.7~2.0	好	0	好
麻纤维	600~700	20~42	1.8~2.3	1.5	尚好	12	

1.2 合成纤维的分类

1. 按照形状分

- 1) 单丝和束状单丝。
- 2) 膜裂网状。

2. 按照材料分

目前在土木工程中使用较多的合成纤维有聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、改性涤纶纤维、尼龙纤维、芳纶纤维、聚乙烯纤维、聚酯纤维等。

3. 合成纤维按照粗细分

- 1) 直径为 $10\sim 99\mu\text{m}$ 的细纤维。
- 2) 直径大于 0.1mm 的粗纤维。

本书主要介绍低掺量合成纤维混凝土,即每立方混凝土中纤维掺量在 3kg 以内的细纤维增强混凝土(粗纤维另论)。

1.3 混凝土用合成纤维的技术要求及建议掺量

1. 纤维应满足的技术要求

混凝土必须用 100% 纯聚丙烯、聚丙烯腈、聚酯、芳族聚酰胺生产的纤维,这样才能确保纤维在混凝土中具有优良的抗酸、抗碱等抗腐蚀性能。不能用再生的材料生产土木工程用纤维,否则纤维在混凝土中的抗腐蚀性、耐久性难以保障。

聚丙烯纤维亲水性弱,必须通过表面处理增加纤维的亲水性,使纤维与水泥浆体充分黏结,确保砂浆体充分包裹在纤维表面,使纤维与混凝土间具有良好黏结性能。各种表面涂层材料应对人体健康和环境无不利影响。

生产纤维的过程应该符合环保的要求。

满足分散性要求。纤维在混凝土中的分散性极为重要,如果纤维的分散性不能满足要求,纤维的掺入不但对混凝土或砂浆没有增强增韧作用,相反,会降低混凝土的内在品质,人为增加了混凝土的缺陷,降低了混凝土的力学性能和耐久性。另外,如果纤维不能均匀分散,对早期抗裂及后期阻裂增韧极为不利。如果纤维结团,对混凝土的强度、变形性能和阻裂性能还会产生极大的负面效应。

纤维的生产厂家、纤维混凝土施工者、纤维的销售者应对纤维的分散性足够重视。生产厂家应采用切实可行的方法,使纤维能够均匀分散在混凝土中,满足混凝土对纤维分散性能的要求。容易在混凝土中分散均匀的纤维,是土木工程需要的纤

维。也就是说,评价纤维的质量不但要看强度、弹性模量等机械性能指标,而且要高度重视纤维在混凝土中的分散性能。

对于施工者而言,应采用合理的投料顺序和搅拌工法,最大限度地增加纤维的分散程度。在施工中发现纤维分散不均匀,应立即采取措施确保纤维的均匀分散。结合工程实践,总结合理有效的施工方法。

纤维生产厂家或销售商应该明确指出纤维的分散方法,指导施工方做好纤维的分散工作。

2. 纤维的合理掺量

目前商品供应商所提供的弹性模量和强度较低的单丝合成纤维的主要作用是减少混凝土塑性收缩及干燥收缩,解决混凝土的早期抗裂问题。合理的纤维掺量应结合工程实践来确定,纤维的直径愈细,纤维的根数愈多,阻裂效果愈明显。如果纤维的间距超过某临界值,纤维的阻裂效果将显著下降。

单丝或束状聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维的掺量一般为 $0.5 \sim 1.5 \text{ kg/m}^3$,不宜超过 2 kg/m^3 ,否则将影响纤维的分散性和混凝土抗压强度。通过试验研究和工程实践确定经济合理的纤维掺量。

对于纤维弹性模量、强度较低,且混凝土中纤维掺量较少的情况而言,纤维对于硬化混凝土的抗裂效果不十分明显,这一点由四点弯曲梁的抗弯韧性试验得到了证明,一旦混凝土中产生裂缝,裂缝会迅速扩展,纤维的阻裂效果很有限,常出现裂缝快速扩展的情况。也就是说低掺量低弹模合成纤维对混凝土的增韧效果不十分显著。

膜裂网状纤维在混凝土中不容易结团,便于在混凝土中分散。网状纤维在混凝土中最终状态应是单丝,即网状纤维经过搅拌撕裂为单丝纤维。纤维掺量比单丝或束状纤维可以增加。每立方混凝土中纤维掺量为 $0.7 \sim 3 \text{ kg}$ 。当掺量为 $2 \sim 3 \text{ kg/m}^3$ 时,纤维混凝土抗弯韧性试验中可以测得稳定的荷载-挠度全曲线,即在峰值之后,较高掺量的膜裂网状纤维对混凝土裂缝扩展有一定的阻裂性能,梁的承载力下降较缓慢,纤维混凝土有较好的变形软化性能。掺量较大时,膜裂网状纤维在混凝土中不但能解决混凝土的塑性抗裂,而且能够改善硬化混凝土的性能,提高混凝土的韧性,增加混凝土抗变形能力,有效抵抗温度应力,可以代替钢丝网或钢纤维用于桥梁面板铺装层,或用于喷射混凝土中代替钢丝网;可用于工业地坪提高混凝土抗变形能力、抗磨、抗冲击性能等。

3. 纤维主要用途及纤维品种的选用

混凝土中用合成纤维的极限伸长率不宜过大,极限伸长率宜在 $8\% \sim 16\%$ 之间。极限伸长率过大时,纤维不能起到良好的阻裂效果。

如果使用纤维的主要目的是为了解决混凝土早期抗裂、减少原始裂缝及缺陷、

抑制混凝土塑性状态裂缝的扩展、提高混凝土的连续性和均质性等,则所用纤维抗拉强度应不低于 250MPa,形状为单丝或网状的纤维。

如果纤维的用途是既希望解决混凝土早期抗裂,又希望采用纤维提高硬化混凝土的增韧和抵抗温度应力的能力,应选用抗拉强度不低于 400MPa、同时弹性模量较高的合成纤维。当纤维的掺量和弹性模量较低时,对硬化混凝土的增强增韧作用不明显。而具有较高弹性模量的纤维,可以改善硬化混凝土的裂后变形性能和耗能性能,降低混凝土的脆性。

合成纤维混凝土的抗渗透性能的提高与纤维混凝土的密实性的改善和原始缺陷的减少有关,纤维混凝土愈密实、原始缺陷愈少,抗渗透性愈好。从抗渗的角度,必须选用分散性好的纤维。

纤维混凝土的抗疲劳、抗冻融性、抗冲击性及抗冲磨性的改善与纤维同混凝土间的黏结性能有关。当纤维与混凝土间具有良好的黏结性能时,混凝土的抗疲劳、抗冲击等性能会得到显著的改善。在其他条件相同的情况下,增加纤维的比表面积是提高纤维与混凝土间黏结性能的有效方法之一,还可通过增加纤维表面的摩擦系数的方法,提高纤维与混凝土间的黏结强度。为了提高纤维混凝土的抗疲劳、抗冻融性、抗冲击性及抗冲磨性等性能,应选用比表面积大、表面粗糙的纤维。

粗纤维的主要作用是提高混凝土的韧性,纤维掺量可以较高,最大掺量为 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 。当粗纤维掺量少时,纤维对混凝土早期抗裂效果不十分显著;但当纤维掺量较高时,纤维对混凝土早期抗裂效果较显著,可以代替钢纤维或钢筋网片,增加混凝土的韧性或提高抵抗温度应力能力。粗纤维与混凝土间的表面黏结性能十分重要,它是选用粗纤维的重要依据。选用表面粗糙、表面有凹凸不平的纤维,增加纤维在从混凝土基体中拔出过程中的耗能。

参 考 文 献

- [1] Nemkurmar B. Shrinkage cracking in polyolefin fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 2000, 97(4):432~437
- [2] Soroushian P. Permeability characteristic of PP fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 1995, 92(3):291~295
- [3] Mobashor B. Microcracking in fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 1990, 20(5): 665~676
- [4] Johnston C. D Fiber reinforced concrete and shotcrete for repair and restoration of highway bridges in Alberta. *Transportation Research Record*, 1989, 1226:6~7
- [5] Jamal A. Almudaiheem et al. Effect of specimen size and shape on drying shrinkage of concrete. *ACI Materials Journal*, 1987, (4):130~135
- [6] Parviz Soroushian and Siavosh Ravanbakhsh. Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibers. *ACI Materials Journal*, 1998, (7):429~435
- [7] Arnon Bentur et al. Prevention of autogenously shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregate. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31:1587~1591

- [8] Kolver K. Testing system for determining the mechanical behavior of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. *Materials and Structures*, 1994, 27:324~330
- [9] Penev D. and Kawamura, M. A laboratory device for restrained shrinkage fracture of soil-cement mixture. *Materials and Structures*, 1992, 25:115~120
- [10] Agnes Nagy. Simulation of thermal stress in reinforced concrete at early ages with a simplified model. *Material and Structures*, 1997, 30:167~173
- [11] Kheder G F. A mathematical model for the prediction of volume change cracking in end-restrained concrete members. *Materials and Structures*, 1997, 30:395~403
- [12] Carlson R W and Reading T J. Model study of shrinkage cracking in concrete building walls. *ACI Structural Journal*, 1988, (4):395~403
- [13] Ø. Bjontegaard, Hammer T A and Sellevold E J. Cracking in high performance concrete before setting. *International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concrete. Canada*, 1~17
- [14] Grzybowski M and Shah. Model to predict cracking in fiber reinforced concrete due to restrained shrinkage. *Magazine of Concrete Research (London)*, 1989, 41(148):125~135
- [15] Shah S P et al. Effect of shrinkage-reducing admixture on restrained shrinkage cracking of concrete. *ACI Materials Journal*, 1992, 89(3):289~295
- [16] Standard practice for estimating the cracking tendency of concrete. *AASHTO Designation*, 34~99
- [17] David A Whiting etc. Cracking tendency and drying shrinkage of silica fume concrete for bridge deck application. *ACI Materials Journal*, 2000, 97(1):71~77
- [18] Wang K, Jansen D, Shah S P and Karr A. Permeability study of cracked concrete. *Cement and Concrete Res*, 1997, 27(3):381~393

第二章 合成纤维混凝土的塑性阻裂机理

2.1 概 述

目前,在结构工程中存在的一个相当普遍且严重的问题是结构物的开裂,并且近几年日趋严重和增多,严重影响到混凝土的耐久性,困扰着广大技术人员,已经成为必须解决的技术难题^[3~11]。众所周知,20世纪80年代,继石油危机以后,出现了世界性的混凝土耐久性危机——桥梁、隧道等使用不到20年就出现严重破坏。

美国的混凝土基建工程价值达6万亿美元,由于耐久性差,重修与维修的费用高达数千亿美元。价值1万亿美元的公路工程中,有25万座桥梁遭受破坏,重修与维修的费用达4500亿美元。

我国近几年出现了众多新修钢筋混凝土楼房、道路开裂的严重局面。原因有以下几方面:

1) 结构设计及施工要求的变化。大跨度桥梁等大跨结构、高层及超高层结构的不断增多;混凝土等级的不断提高,混凝土中水泥用量的增多;水泥标号的提高,施工期的缩短。

2) 片面提高水泥的早期强度,导致水泥水化热急剧升高,对混凝土的抗裂产生不良影响。

3) 外加剂与水泥的不相容性增多。

4) 混凝土施工所处的环境恶化,高强混凝土的发展,钢筋更密,对混凝土的约束力更大。混凝土振捣更加困难,混凝土的均匀性、整体性更差。

从混凝土产生裂缝的机理看,产生裂缝的原因主要有两类:一类是静、动荷载引起的裂缝,另一类是变形引起的裂缝。

当混凝土中的应力超过其抗拉强度时,混凝土可能产生裂缝。

变形裂缝包括由于温度应力、收缩、不均匀沉降等引起的变形裂缝。变形裂缝与时间有关,当变形累计到一定量时,混凝土开裂。即当混凝土的应变超过其极限应变时,混凝土发生开裂。

产生变形裂缝的主要原因是混凝土体积变形引起的,约占全部裂缝的80%。

混凝土中的收缩变形主要发生在浇注后1~24h,通常说的塑性变形裂缝。早期混凝土体积变化最剧烈,弹性模量由零迅速增加到几十GPa,水化热大多数集中在早期释放;混凝土的抗拉强度及极限拉应变相对较低,混凝土在约束状态下较易发生裂缝。