

XIANWEI ZENGQIANG
NAMI GAOXINGNENG
HUNNINGTU LIXUE
XINGNENG YANJIU

纤维增强纳米高性能混凝土 力学性能研究

张 鹏 李清富 著



黄河水利出版社

纤维增强纳米高性能混凝土 力学性能研究

张 鹏 李清富 著

黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书对纤维增强纳米高性能混凝土的制备方法进行了详细的阐述,系统地研究了钢纤维增强纳米高性能混凝土的抗压性能、抗拉性能、抗弯拉性能、弯曲韧性及断裂性能,详细分析了纳米材料和钢纤维对高性能混凝土力学性能及断裂性能影响的作用机制及规律。

本书可供从事土木、水利及交通运输工程的研究人员及工程技术人员参考,也可作为有关专业研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

纤维增强纳米高性能混凝土力学性能研究/张鹏,
李清富著. —郑州:黄河水利出版社,2015.3

ISBN 978-7-5509-1068-3

I. ①纤… II. ①张… ②李… III. ①纳米材料-应
用-高强混凝土-力学性能-研究 IV. ①TU528.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第068158号

组稿编辑:王志宽 电话:0371-66024331 E-mail:wangzhikuan83@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:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:3.375

字数:100千字

印数:1—1 000

版次:2015年3月第1版

印次:2015年3月第1次印刷

定价:25.00元

前 言

随着现代工程结构向高耸、轻型、大跨结构的发展,结构物对混凝土性能的要求越来越高,要求其强度高、韧性高、耐久性高以及造型美观等。然而,传统混凝土存在自重大、抗拉强度低、韧性差、脆性大、可靠性低和开裂后裂缝宽度难以控制等缺陷,使得许多结构在使用过程中甚至是建设过程中就出现了不同程度、不同形式的裂缝。为了弥补传统混凝土的上述缺点,最有效的方法是:在其中添加均匀分布的、密集的、长径比适宜的高模量纤维。在诸多混凝土用纤维材料中,钢纤维是其中应用最广泛的纤维材料之一。

“纳米”的概念形成于 20 世纪 80 年代初,纳米材料是指粒径介于 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 的粒子。纳米粒子是处在原子簇和宏观物质交界的过渡区域,是一种典型的介观系统,包括金属、非金属、有机、无机和生物等多种颗粒材料。凭着特有的“纳米效应”,纳米材料作为一种新材料已在国防、电子、化工、航天航空、生物和医学等领域展现出广阔的应用前景,被科学家们喻为“21 世纪最有前途的材料”。在 2004 年举行的第十三届全国结构工程学术会议上,南昌大学扶名福就纳米材料在混凝土中的研究与应用作了特邀报告,介绍了纳米材料的一些特性,讨论了纳米 SiO_2 及硅粉对混凝土强度和耐久性能的改善作用,提出纳米 SiO_2 及硅粉可作为外掺料制备高性能混凝土,纳米材料作为外掺料,还可用以制备具有特殊功能的混凝土。

与普通混凝土和普通高性能混凝土相比,纳米高性能混凝土具有更好的耐久性,纳米材料可提高混凝土的早期强度,提高混凝土的疲劳寿命,并对混凝土构件起到减振作用。随着掺纳米粒子混凝土研究的深入和纳米材料制造成本的降低,掺纳米材料混凝土将是未来结构工程中应用潜力极大的一种新型高性能混凝土。目前,国内外针对纳米混凝土进行了大量的研究工作,而对纤维增强纳米高性能混凝土弯曲韧性及断裂

性能的研究资料报道较少。为了弥补当前研究的不足,本书在大量试验成果的基础上,较为深入地研究了钢纤维增强纳米高性能混凝土拌和物工作性能、基本力学性能、弯曲韧性和断裂性能,以期为该新型混凝土材料在我国土木、水利及交通运输工程中的推广应用提供参考。

本书共分七章,主要内容包括:绪论;分析了纤维增强纳米高性能混凝土的制备原理,通过坍落度试验和扩展度试验,得出了纳米 SiO_2 和钢纤维掺量对纳米高性能混凝土工作性影响的规律;通过立方体抗压强度试验,得出了纳米 SiO_2 和钢纤维掺量对纳米高性能混凝土强度影响的规律;通过轴心抗压强度试验和抗压弹性模量试验,得出了纳米 SiO_2 和钢纤维掺量对纳米高性能混凝土轴心抗压强度及抗压弹性模量影响的规律;对纳米高性能混凝土抗弯拉强度及抗弯拉弹性模量进行了试验研究,得出了纳米 SiO_2 和钢纤维掺量对纳米高性能混凝土抗弯拉强度及抗弯拉弹性模量影响的规律;通过弯曲韧性试验,并分别采用了 ASTM - C1018 韧度指数法和德国纤维混凝土标准 DBV 法对试验结果进行了分析,得出了钢纤维掺量对纳米高性能混凝土弯曲韧性影响的规律;研究了纳米高性能混凝土的断裂性能,以有效裂缝长度、起裂断裂韧度、失稳断裂韧度、断裂能、临界裂缝张开位移和极限裂缝张开位移为评价指标,得出了纳米 SiO_2 和钢纤维掺量对纳米高性能混凝土断裂性能影响的规律等。

本书在编写过程中得到了三门峡市昌通路桥建设有限责任公司、河南省工程材料和水工结构重点实验室等单位的大力支持与帮助,本书试验研究同时得到了国家自然科学基金、中国博士后科学基金、水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金等的资金支持,许多同志参与了本书的试验工作。另外,本书在编写过程中还引用了大量的文献资料。在此,谨向为本书的完成提供支持和帮助的单位、参考文献的原作者、各种基金资助及所有试验人员表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

作 者

2014 年 11 月于郑州

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究的背景及意义	(1)
1.2 纳米材料国内外研究现状	(2)
1.3 钢纤维混凝土国内外研究现状	(4)
1.4 本书研究内容	(6)
第 2 章 纤维增强纳米高性能混凝土制备	(8)
2.1 试验所用原材料	(8)
2.2 纳米高性能混凝土配合比设计	(12)
2.3 试件制备	(15)
2.4 本章小结	(17)
第 3 章 纳米高性能混凝土工作性	(18)
3.1 混凝土拌和物工作性测定	(18)
3.2 纳米 SiO_2 掺量对高性能混凝土工作性的影响	(21)
3.3 钢纤维掺量对纳米高性能混凝土工作性的影响	(22)
3.4 本章小结	(23)
第 4 章 纳米高性能混凝土的基本力学性能试验研究	(24)
4.1 立方体抗压强度	(24)
4.2 轴心抗压强度与抗压弹性模量	(30)
4.3 抗弯拉强度与抗弯拉弹性模量	(37)
4.4 本章小结	(43)
第 5 章 钢纤维增强纳米高性能混凝土弯曲韧性研究	(45)
5.1 钢纤维混凝土弯曲韧性评价方法	(45)
5.2 试验概况	(50)
5.3 试验结果与分析	(52)

5.4 本章小结	(56)
第6章 纳米高性能混凝土断裂性能试验研究	(57)
6.1 试验方法	(58)
6.2 混凝土断裂模型	(61)
6.3 混凝土双 K 断裂参数确定	(63)
6.4 断裂韧度结果及分析	(66)
6.5 断裂能试验结果与分析	(71)
6.6 裂缝嘴和裂缝尖端张开位移试验结果与分析	(77)
6.7 纳米高性能混凝土缺口敏感性试验研究	(83)
6.8 本章小结	(91)
第7章 总 结	(93)
7.1 本书工作的总结	(93)
7.2 进一步研究的展望	(95)
参考文献	(96)

第1章 绪论

1.1 研究的背景及意义

混凝土材料是当今世界上用途最广、用量最大的建筑材料之一,作为最大宗的人造材料,它为人类社会的发展和进步做出了极为重要的贡献^[1]。随着现代材料科学的进步和发展,混凝土逐渐向高强度、高性能、多功能和智能化方向发展,特别是高性能混凝土,已广泛应用于高层建筑、大跨度桥梁、海上建筑、高等级公路等建设中。近年来,世界各国对高性能混凝土的研究与应用日益增多,国内很多高校和科研机构投入了巨大的人力和物力,在高性能混凝土的研究与应用方面取得了很多实用的成果,高性能混凝土的应用也愈来愈广。然而,高性能混凝土仍然不是完善的或理想的混凝土,其主要的弱点之一是:随着混凝土强度的提高,其脆性也增加,往往呈无明显征兆的脆性破坏,这对大型复杂的混凝土结构而言,增添了许多不安全因素。因此,对混凝土弯曲韧性及断裂性能进行研究,并采取措施提高其弯曲韧性及断裂性能一直是高性能混凝土研究工作的重要内容。

“纳米”的概念形成于20世纪80年代初,纳米材料是指粒径在1~100 nm的粒子。纳米粒子是处在原子簇和宏观物质交界的过渡区域,是一种典型的介观系统,包括金属、非金属、有机、无机和生物等多种颗粒材料。随着物质的超细化,其表面电子结构和晶体结构发生变化,产生了宏观物质材料所不具有的小尺寸效应、表面效应、量子效应和宏观量子隧道效应等“纳米效应”,从而使超细粉末与常规颗粒材料相比具有一系列奇异的物理性质、化学性质。纳米材料和纳米技术的发展为新材料的研发提供了一条全新的途径,必将推动国防、信息、医学、航天航空、生物和农业等领域的技术创新^[2]。凭着特有的“纳米效

应”,纳米材料作为一种新材料已在多学科领域展现出了广阔的应用前景,被科学家们喻为“21 世纪最有前途的材料”。在 2004 年举行的第十三届全国结构工程学术会议上,南昌大学扶名福就纳米材料在混凝土中的研究与应用作了报告,介绍了纳米材料的一些特性,讨论了纳米 SiO_2 及硅粉对混凝土强度和耐久性能的改善作用,提出纳米 SiO_2 及硅粉可作为外掺料制备高性能混凝土。随着掺纳米粒子混凝土研究的深入和纳米材料制造成本的降低,掺纳米材料混凝土将是未来结构工程中应用潜力极大的一种新型高性能混凝土。由于荷载、温度、地震等因素的作用,混凝土材料不可避免地存在着各种裂纹和缺陷,随着外荷载的增加,这些裂纹和缺陷将急剧扩展,如果混凝土的韧性较低,结构或构件就会发生无明显征兆的脆性破坏,最终导致结构发生低应力脆性断裂,大大降低结构的安全性。目前,国内外针对纳米混凝土进行了一些相关的研究,而对于纳米材料对混凝土断裂性能及弯曲韧性方面的研究资料较少。基于此,本书通过断裂性能和弯曲韧性试验,研究纳米材料对高性能混凝土断裂性能及弯曲韧性的影响,确定纳米材料在高性能混凝土中的最佳掺量,并对纳米高性能混凝土的断裂破坏机制进行研究,该项研究不仅具有较高的经济效益和社会效益,而且对推进纳米高性能混凝土在实际工程中的应用具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 纳米材料国内外研究现状

近年来,随着纳米材料研究的深入和制造成本的降低,其应用领域也越来越广泛,国内外有很多研究者对纳米材料在水泥混凝土中的应用进行了试验研究。国外对纳米混凝土的研究最早始于英国,2000 年,Colston S. L. 等^[3]采用轮廓测定法、微电子扫描、X 射线荧光分析、显微硬度和同步加速器辐射,研究了沸石和无机纳米材料掺入混凝土的微观结构性能,结果表明,纳米粒子对混凝土的微观结构起到了较大的改善作用。Li Gengying 等^[4]于 2004 年对掺纳米 SiO_2 的大掺量粉煤灰混凝土的强度特性及微观性能进行了研究,结果表明,加纳米材料

后,混凝土强度在3 d龄期后有很大增长,而且内部孔隙尺寸的分布也有所改善。Middendorf 和 Bernhard 等^[5] 2005 年的研究表明,微纳米技术应用于混凝土,可提高混凝土的长期耐久性。Zhang Maohua 和 Li Hui^[6] 分别对纳米 SiO_2 和纳米 TiO_2 路面混凝土的抗氯离子渗透性能、抗磨损性和弯拉疲劳性能进行了研究,结果表明,掺加纳米材料后,混凝土的抗氯离子渗透性以及抗磨损性均得到很好的改善,掺加纳米 TiO_2 比纳米 SiO_2 的效果更好。2007 年, Gunasekaran、Muthian^[7] 通过研究提出一种生成绝缘材料的新观念,即在聚合物混凝土中掺加特选的纳米材料可得到轻质绝缘混凝土。2008 年, Jo Byung-Wan 等^[8] 对纳米蒙脱石聚合材料和聚合物混凝土的力学性能进行了研究,结果表明,采用蒙脱石-不饱和聚酯纳米复合材料的聚合物混凝土的抗压强度、弹性模量和劈裂抗拉强度要超过那些单纯采用不饱和聚酯的聚合物混凝土。2009 年, Chen Meng^[9] 对纳米 TiO_2 混凝土和沥青路面进行了汽车尾气消除的模拟试验,结果表明,纳米 TiO_2 路面汽车尾气的净化率可达到 6% ~ 12%。2009 年, Qian Kuangliang 等^[10] 研究了掺加纳米 CaCO_3 粉煤灰混凝土的一些长期耐久性能,如抗硫酸化性能、收缩性能、抗氯离子渗透性能,结果表明,掺加纳米 CaCO_3 可以提高粉煤灰混凝土的耐久性能。

国内对纳米混凝土的研究也不落后于国外,2003 年浙江工业大学的叶青等通过掺纳米 SiO_2 混凝土抗压强度性能试验并运用 XRD 物相分析对纳米 SiO_2 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的反应进行了研究,研究表明,纳米 SiO_2 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 能较快地发生反应,生成水化硅酸钙凝胶,明显地提高了混凝土早期强度^[11]。福州大学的季韬等^[12] 通过试验研究得出,粉煤灰混凝土中掺入 0.5% 纳米 SiO_2 可提高 7 d 和 28 d 的抗压强度和抗弯拉强度,纳米 SiO_2 的掺入可提高粉煤灰混凝土密实性。2004 年,西北农林科技大学的杜应吉等^[13] 的研究结果表明,采用纳米微粉作为“添加剂”,除可显著改善混凝土强度等力学性能外,还可大大改善节水工程混凝土最重要的抗渗性和抗冻性。2005 年,中冶集团建筑研究总院的仲晓林等^[14] 研究了纳米黏土材料对水泥混凝土力学、抗渗和抗冻性能的影响,试验结果表明,纳米黏土

材料的掺入减水效果明显,可提高混凝土的抗压强度,并可改善混凝土的抗渗性能和抗冻性能。2006年,西南交通大学的李固华和高波^[15]研究了纳米 SiO_2 和纳米 CaCO_3 的混凝土微观结构特点,并对掺纳米材料与硅灰、粉煤灰等复合的混凝土进行了抗压强度、氯离子渗透、硫酸盐腐蚀、腐蚀干湿循环等试验研究,研究结果表明,纳米材料能够改善混凝土过渡区的结构,减少氢氧化钙造成的结构缺陷;纳米 SiO_2 和纳米 CaCO_3 能够提高混凝土的早期强度,对后期强度的提高幅度较少;纳米 SiO_2 和纳米 CaCO_3 能改善混凝土的耐久性能。2008年,上海大学的杨瑞海等^[16]和湖南工学院的彦汉军的研究表明,复合纳米材料增强了C40级混凝土的流动性、抗压强度、抗硫酸盐和氯离子侵蚀的能力,将复合纳米材料掺入减水剂中可有效地解决纳米材料直接应用于混凝土时易发生团聚的问题。2010年,郑州大学的张圣言等^[17]研究了在钢纤维混凝土中掺入纳米 SiO_2 后混凝土的泊松比变化规律,并测试了该混凝土轴心受压应力—应变曲线,探讨了其本构模型。长安大学的李朋飞等^[18]研究了纳米水泥混凝土的断裂性能、疲劳性能、干缩性,并分别对比分析了纳米材料、聚丙烯纤维和钢纤维对混凝土性能的改善效果。

综上所述,国内外众多学者对纳米混凝土作了许多研究工作,主要包括纳米混凝土的微观结构研究、基本力学性能研究及长期耐久性性能研究,如抗渗性、抗冻性、抗硫酸盐侵蚀、抗氯离子侵蚀等。研究结果表明,与普通混凝土和普通高性能混凝土相比,纳米混凝土具有更好的耐久性,可明显改善混凝土中水泥浆体的结构和性能以及水泥浆体与集料的界面结构和性能,提高混凝土早期抗压、抗拉和抗弯拉强度。由此可见,纳米高性能混凝土材料性能与应用技术的研究将是今后新型建筑材料研究的一个重要方向。该项研究就是要在前人研究成果的基础上,着重研究纳米高性能混凝土材料的断裂性能和弯曲韧性,为其在实际工程中的推广应用提供技术依据。

1.3 钢纤维混凝土国内外研究现状

自20世纪80年代开始,国内外对高性能混凝土开展了大量的研

究和应用工作,并取得了丰硕的成果。高性能混凝土与普通混凝土相比,虽具有较高的强度,能较大地提高工程结构和构件的承载能力,可减小结构构件的尺寸和自重,具有良好的耐久性,但主要缺点是:材料的脆性较大,并且随着混凝土强度的提高,其脆性更趋明显,韧性更差,抵抗突发荷载(如地震、爆炸)和疲劳荷载(如高耸结构承受的风荷载、道路承受的重复荷载)的能力也更差。

钢纤维混凝土是在混凝土基体中掺入一定量的钢纤维配制而成的新型复合材料。钢纤维的主要作用是增强混凝土的后期强度和韧性。钢纤维的弹性模量远大于混凝土,其抗拉能力也远大于混凝土,在基体开裂后,横跨裂纹乱向排布的钢纤维成为主要的受力者,因而有效地提高了混凝土的韧性及抗拉、抗弯、抗冲击等性能。钢纤维混凝土最早出现在20世纪初,1907年,俄国学者伏·波·涅克拉索夫首先提出了钢纤维增强混凝土的概念。1910年,美国的Harry. F. Porter和John Stephen Sewell等^[19]发表了有关在混凝土中掺入短钢纤维的研究报告,提出了通过将短钢纤维均匀分散在混凝土中来强化混凝土构造材料的建议,得出了钢纤维可以提高混凝土强度和稳定性的结论。1911年,美国的Graham在钢筋混凝土中掺入钢纤维,得到了可以提高钢筋混凝土强度和稳定性的结论^[20]。20世纪40年代,英国、美国、法国和德国的学者对钢纤维混凝土开展了广泛、深入的试验研究,获得了许多钢纤维混凝土应用的专利,如掺用钢纤维来提高混凝土的抗裂性、钢纤维混凝土制造工艺、改进钢纤维形状以提高钢纤维与混凝土之间的黏结强度等^[21]。日本在第二次世界大战中因军事上的需要开展了有关钢纤维混凝土的防炸弹方面的试验研究,并与普通钢筋混凝土在耐爆性能方面进行了对比分析。1963年,J. P. Romualdit和G. B. Batson发表了一系列关于钢纤维约束混凝土裂缝开展机制方面的文章,提出了纤维间距理论,使钢纤维混凝土的试验和应用得到了迅速发展。20世纪70年代,随着熔抽技术的发展,钢纤维生产成本大大降低,为其推广和应用提供了有利条件^[22]。

1979年,美国学者D. R. Lankard等^[23]多次在刊物和ACI专题报告上发表文章,介绍了一种新的纤维增强水泥基材料——渗浆高纤维

率纤维混凝土(Slurry Infiltrate Fiber Concrete, 简称 SIFCON)。SIFCON 的纤维率可以高达 20%, 力学性能较传统钢纤维混凝土有极大的提高, 而这正是常规纤维混凝土所难以达到的, 且随纤维率的提高, 其断裂性能与弯曲韧性有趋向钢材的趋势。1993 年, 法国 BOUYGUES 公司首先研制出了一种新型高韧性、高强度、低孔隙率的超高性能钢纤维混凝土——活性粉末混凝土(Reactive Power Concrete, 简称 RPC)。RPC 目前分为 200 MPa 和 800 MPa 两级, 与普通水泥混凝土相比, 其断裂性能可提高两个数量级以上, 而且具有超高的耐久性^[24]。

我国对钢纤维混凝土的研究虽然起步较晚, 但发展十分迅速。20 世纪 70 年代, 中国建筑材料科学研究院和空军工程设计局首先开展了对钢纤维混凝土的研究, 此后有更多的科研单位与高校进行了该复合材料的试验研究。80 年代起, 钢纤维混凝土已在道路、桥梁、隧道与屋面防水工程中获得日益广泛的应用^[25]。

在上述基础上, 1984 年, 哈尔滨建筑大学与大连理工大学等单位共同编制了《钢纤维混凝土试验方法》(中国工程建设标准化协会标准 CECS 13:89); 1992 年, 大连理工大学与哈尔滨建筑大学等单位又共同编制了《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》; 1999 年, 建设部与原冶金部分别发布了行业标准《钢纤维混凝土》(JG/T 3064—1999) 和《混凝土用钢纤维》(YB/T 151—1999); 2004 年, 交通部又发布了行业标准《公路水泥混凝土纤维材料 钢纤维》(JT/T 524—2004); 2009 年, 中国工程建设协会又颁布了《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13: 2009)。这些标准的实施大大推进了钢纤维混凝土在我国各项工程中的使用。

1.4 本书研究内容

尽管目前纳米高性能混凝土的研究成果越来越多, 但对其研究主要集中在基本力学性能和耐久性方面, 而对纳米高性能混凝土的断裂性能及钢纤维掺入后对纳米混凝土力学性能的影响较少。

基于国内外研究现状, 本书主要开展了以下几个方面的研究:

(1)分析研究纤维增强纳米高性能混凝土的制备原理,并采用全计算法确定 C50 纳米高性能混凝土的配合比。

(2)采用坍落度试验和扩展度试验研究不同纳米 SiO_2 掺量和不同钢纤维掺量对纳米高性能混凝土工作性能的影响。

(3)通过立方体抗压强度试验,分析不同龄期纳米高性能混凝土强度变化规律,并研究了不同纳米 SiO_2 掺量和不同钢纤维掺量对纳米高性能混凝土强度的影响。

(4)以 28 d 为龄期,通过混凝土轴心抗压强度试验、抗压弹性模量试验、抗弯拉强度试验和抗弯拉弹性模量试验,研究不同纳米 SiO_2 掺量和不同钢纤维掺量对这些力学性能的影响。

(5)以 28 d 为龄期,通过三分点加载弯曲韧性试验,研究不同钢纤维掺量对纳米高性能混凝土弯曲韧性的影响。

(6)以 28 d 为龄期,通过带缺口梁的三点弯曲试验,研究不同纳米 SiO_2 掺量和不同钢纤维掺量对纳米高性能混凝土断裂性能的影响及缺口深度变化对纳米高性能混凝土断裂性能的影响。

第 2 章 纤维增强纳米高性能混凝土制备

2.1 试验所用原材料

试验所用的原材料有水泥、I 级粉煤灰、纳米 SiO_2 、聚羧酸高效减水剂、钢纤维、细集料和粗集料,各种原材料均满足试验要求,其详细情况如下面所述。

2.1.1 水泥

本试验所用水泥为河南省卫辉市天瑞水泥有限公司生产的袋装 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,根据《通用硅酸盐水泥》^[26] (GB 175—2007) 对该水泥的各项性能进行了检测,检测结果见表 2-1。

表 2-1 水泥的各项性能检测结果

序号	测试内容	P. O 42.5 标准指标	测试结果
1	比表面积 (m^2/kg)	≥ 300	344
2	初凝时间 (min)	≥ 45	179
3	终凝时间 (min)	≤ 600	235
4	煮沸安定性	合格	合格
5	三氧化硫 (%)	≤ 3.5	2.26
6	氧化镁 (%)	≤ 5.0	3.09
7	烧失量 (%)	≤ 5.0	3.62
8	氯离子 (%)	≤ 0.06	0.015
9	3 d 抗弯拉强度 (MPa)	≥ 3.5	5.3
10	3 d 抗压强度 (MPa)	≥ 17	26.6

2.1.2 粉煤灰

粉煤灰也叫飞灰(fly ash),是由燃煤电厂从烟道收集的灰尘,其中含有大量的球状玻璃珠,以及石英、莫来石和少量的矿物结晶等物质。粉煤灰是由多种不同形状的颗粒混合堆聚的粒群,其中只有硅酸盐或铝硅酸盐玻璃体的微细颗粒、微珠和海绵状玻璃体是有活性的;而结晶体,如石英,在常温下火山灰性质就不够明显;莫来石则是惰性成分。一般来说,玻璃体与结晶体的比值越高,粉煤灰的活性越好。

本试验采用平顶山姚孟电力生产的 I 级粉煤灰,细度为 9.2%,烧失量为 1.36%,需水量比为 92.7%。

2.1.3 纳米 SiO_2

传统的水泥基材料强度较低,添加一定量的纳米 SiO_2 代替一部分水泥后,纳米 SiO_2 与水泥石中的水化产物形成化合键,产生 CSH 凝胶,而且纳米 SiO_2 具有特殊的网状结构,能在水泥浆体原有的网络结构的基础上建立一个新的网络,从而形成三维网络结构,可较大地提高水泥浆体的物理力学性能和耐久性。

本试验采用的纳米 SiO_2 为杭州万景新材料有限公司生产,外观为松散的白色粉末。纳米 SiO_2 各项指标测试结果见表 2-2。

表 2-2 纳米 SiO_2 的各项指标检测结果

序号	测试内容	测试结果
1	比表面积(m^2/g)	200
2	含量(%)	99.5
3	平均粒径(nm)	30
4	pH 值	6
5	表观密度(g/L)	55
6	加热减量,%(m/m)	1.0
7	灼烧减量,%(m/m)	1.0

2.1.4 高效减水剂

高效减水剂是制备高性能混凝土必不可少的外加剂。正确使用高效减水剂,能大幅降低混凝土的水胶比,使混凝土拌和物具有良好的工作性。目前,可用于制备高性能混凝土的高效减水剂主要有萘磺酸盐甲醛缩合物(萘系高效减水剂)、三聚氰胺磺酸盐甲醛缩合物、氨基磺酸盐系高效减水剂、聚羧酸盐系高效减水剂和脂肪族高效减水剂。

本试验采用的高效减水剂为山西黄河新型化工有限公司生产的聚羧酸高效减水剂。按照《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119—2013)^[27]对该减水剂的各项性能指标进行了检测,检测结果见表2-3。

表 2-3 高效减水剂的各项指标检测结果

检测项目	固体含量 (%)	密度 (g/cm^3)	总碱量 (%)	pH 值	水泥净浆流动度 (mm)	氯离子含量 (%)	减水率 (%)
检测结果	24.26	1.052	1.2	4.32	260	0.078	22.0

2.1.5 钢纤维

本试验采用的钢纤维为河南禹建钢纤维公司生产的铰销型钢纤维,长度为 32 mm,等效直径为 0.56 mm,长径比为 52.0,抗拉强度为 800 MPa。

2.1.6 细集料

高性能混凝土中的细集料一般采用质地坚硬、级配良好的人工砂、河砂和海砂等,其中河砂品质最好。本试验采用的天然河砂,细度模数为 2.76,其筛分曲线见图 2-1。

2.1.7 粗集料

高性能混凝土中的粗集料应选用质地致密坚硬、级配良好的石灰