

文章编号: 1000-4750(2007)Sup.II-0045-17

# 智能混凝土与结构

\*李 惠<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150090; 2. 大连理工大学, 辽宁, 大连 116024)

**摘 要:** 智能混凝土是通过将极少量具有某种特殊功能的材料复合于传统的混凝土材料中形成的具有多功能特性或某一种特殊功能特性的新型土木工程结构材料。与其他智能材料相比, 智能混凝土是多功能本征性智能材料, 可从本质上提高工程结构的性能。自感知混凝土(纳米混凝土、碳纤维混凝土)、自阻尼混凝土和自愈合混凝土等是智能混凝土研究的热点。总结了近年来作者在智能混凝土的制备、性能、机理, 以及智能混凝土结构等方面的研究成果, 并指出需进一步研究的问题。

**关键词:** 智能混凝土; 纳米材料; 碳纤维; 自感知; 自阻尼; 自愈合

**中图分类号:** TB381; TB383 **文献标识码:** A

## SMART CONCRETE AND STRUCTURES

\*LI Hui<sup>1</sup>, OU Jin-ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China;

2. Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Smart concrete is a sort of advanced structural materials which is fabricated through adding some special additives into traditional concrete, and has multifunctions as compared with traditional concrete, as well as good mechanical properties. Therefore, smart concrete is an intrinsic smart material and is a good candidate to improve structural performance. It includes concrete with nanophase materials and carbon fibre reinforced concrete with self-sensing properties, self-damping concrete and self-repairing concrete. The fabrication method, functional property, mechanism and smart concrete-based structures researched by authors are summarized. The further trends and challenge topics in this area are also figured out.

**Key words:** smart concrete; nanophase materials; carbon fiber; self-monitoring; self-damping; self-repairing

混凝土材料已有近 200 年的历史, 由于具有抗压强度高、弹性模量大、耐久性和耐高温性能好、易改性、可塑性好、可以任意规模浇注等特点, 得到了越来越广泛的应用。从诞生到现在, 混凝土经历了普通混凝土、高强混凝土到高性能混凝土的发展过程<sup>[1]</sup>。可以说, 混凝土的发展是与工程结构的新特点对其提出的新要求分不开的, 体现了科学技术的进步和人们对生存环境安全性舒适性的追求。如今, 随着地震、飓风等突发性

自然灾害造成的灾难性事故和重大的生命财产损失, 以及工程结构长期服役后由于环境侵蚀、材料老化和疲劳效应等导致的工程事故频发, 工程结构的安全性和防灾减灾能力愈发受到重视, 人们期望结构可以具有健康自诊断、自适应和损伤自修复的仿生化特征从而提高抵抗灾害的能力<sup>[2]</sup>。混凝土作为基础设施建设中应用最广泛的建筑材料, 成为实现人们对土木工程结构期望性能的载体。近年来, 随着新技术和新材料的出现, 以自

收稿日期: 2007-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50525823, 50538020); “863”计划项目(2002AA335010); 交通部西部建设科技项目(200431882021)

作者简介: \*李 惠(1966), 女, 山东人, 长江学者特聘教授, 博士, 主要从事智能混凝土与结构、结构健康监测和振动控制研究

(E-mail: lihui@hit.edu.cn);

欧进萍(1959), 男, 湖南人, 教授, 博士, 院士, 校长, 主要从事结构健康监测与振动控制、智能混凝土与结构研究。

感知、自诊断、自增强阻尼和自修复为特征的智能混凝土得到了迅速的发展。

智能混凝土分为狭义智能混凝土和广义智能混凝土。狭义智能混凝土是指在混凝土成型过程中加入某种/些材料形成的具有特殊功能特性的混凝土复合材料；广义智能混凝土除包括狭义智能混凝土外，还包括利用光纤光栅等传感元件或形状记忆合金等驱动装置形成的具有健康监测和振动控制功能的智能混凝土结构。本文只介绍狭义智能混凝土复合材料(下面简称智能混凝土)。智能混凝土是智能材料研究的一个分支，是智能材料在土木工程领域的具体体现。智能混凝土的研究是从功能混凝土开始的，20世纪60年代，苏联学者首先提出了掺加碳黑的导电智能混凝土，但当时并没有引起足够的重视。20世纪80年代末，日本土木工程界的研究人员设想并着手研究高智能结构的所谓“对环境变化具有感知和控制功能”的智能建筑材料；1993年美国科学基金会资助了土木工程智能材料与智能结构的研究<sup>[3]</sup>。在上述两项重大研究计划的推动下，90年代初期，Dry和Chung D D L分别提出了自修复混凝土和自感知混凝土，并开展了相关研究，展示了智能混凝土与传统混凝土迥然不同的功能特性。自此以后，智能混凝土的研究才得到各国学者的重视和关注。

针对混凝土工程的功能要求，智能混凝土的研究主要集中在自感知混凝土、自增强阻尼混凝土、自修复混凝土等方面。自感知混凝土是通过在普通混凝土中掺加特殊填料，使其电阻随应变而对应变化，通过电阻信号的采集实现应力、应变自监测。自感知混凝土最早是从美国的Chung D D L发现碳纤维混凝土电阻与应变的对应关系开始，国内哈尔滨工业大学、武汉理工大学、上海同济大学等也相继开展了碳纤维混凝土研究并取得了系统成果<sup>[4~18]</sup>。哈尔滨工业大学欧进萍、李惠和韩宝国等系统研究了机敏混凝土信号采集和处理系统，开发了水泥基标准应变传感器，为自感知智能混凝土的实际应用开辟了可行之路；近年来，李惠、欧进萍和肖会刚等发现了纳米混凝土的应变自感知性能，并将其成功应用于某桥关键截面应变状态的监测，同时纳米混凝土还具有高延性、高耐磨和高耐久性等优异的综合性能，成为了新的研究热点<sup>[19~29]</sup>。自阻尼混凝土是在混凝土中掺加一些自增强阻尼材料，提高混凝土自身

的阻尼系数，则可在不附加阻尼装置的前提下达到同样的减振效果，掺加的自阻尼材料一般为乳胶、硅灰、甲基纤维素、苯丙乳液等。美国的Wang Y, Chung D D L等，国内的欧进萍和刘铁军等人对自阻尼混凝土从材料到抗震结构都进行了系统的研究<sup>[30~38]</sup>。自修复混凝土是模仿生物组织对受创部位自动分泌某种物质，而使创伤部位得到愈合的机能，在混凝土中埋入装有粘合剂的胶囊，混凝土开裂后粘合剂从胶囊流出固化修补裂缝。日本的三桥博三教授、福尺公夫等，美国的Dry Carolyn等，国内上海同济大学等单位对修复材料的选择和修复效果等进行了研究，哈尔滨工业大学的欧进萍和匡亚川等人研究了修复材料的选择和布置方式，研制了一种内置纤维胶液管自修复混凝土，并利用了形状记忆合金的记忆效应，提出了主动自修复混凝土并做了深入研究<sup>[39~44]</sup>。

本文介绍了作者近年来在纳米混凝土、碳纤维混凝土、自阻尼混凝土和自修复混凝土与结构等方向的研究成果，指出了存在的问题和未来的发展方向。

## 1 纳米混凝土

纳米混凝土是一种具有优异综合性能和特殊功能的智能复合材料，本文就其成型工艺及配比、力学基本性能及改性机理、自感知特性及应用三个主要方面的研究成果展开介绍。

### 1.1 纳米混凝土成型工艺及配合比设计

纳米混凝土就是将某种纳米材料添加到普通混凝土中，从而使其具有传统混凝土所不具备的特性。一般来说，人们将粒径在1nm~100nm的材料称为纳米材料。在水泥基纳米复合材料的研究中，纳米材料的尺寸不宜太大或太小。粒径太大无法显示出纳米复合材料在力学改性上的特点，粒径太小则给制备带来很多困难，并且与水泥基体不匹配，无法实用。对于力学性能来说，纳米材料宜选择粒径在15nm~40nm左右。

纳米材料由于巨大的比表面积而极易团聚，大量团聚的纳米粒子不但不能发挥特殊的改性作用，还会在混凝土中形成薄弱区，对纳米混凝土的性能产生不利影响。因此纳米粒子在基体中的分散是一个关键问题。经过实验研究确定了如下的制备工艺：首先将分散剂和其它外加剂溶于水，然后分批次加入纳米材料长时间高速搅拌，

搅拌均匀后,再将水泥加入纳米溶液继续高速搅拌。最后再依次加入细骨料和粗骨料搅拌。搅拌完毕后,将拌和物浇入试模,然后于振动台上振动成型。1d 后拆模,将试件放在标准养护室中养护。纳米粒子的加入使拌和物较粘稠,保水性很好不易泌水或离析,因此振动成型时间可稍长一些,利于排出气泡,使成型更密实。

纳米材料种类繁多。但纳米混凝土宜采用物

理和化学性能稳定,且具有优异电学性能的半导体纳米材料如 nano-SiO<sub>2</sub> (粒径 15nm 且能参与水化), nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (粒径 30nm) 和 nano-TiO<sub>2</sub> (粒径 15nm); 以及性能稳定的导体纳米材料碳黑(粒径 100nm~130nm)进行多功能特性研究。表 1 和表 2 是力学、耐久性研究及应变感知特性研究的典型配合比。

表 1 纳米混凝土配合比

kg/m<sup>3</sup>

Table 1 Proportions of mixture

混凝土类型	编号	水	水泥	砂子	石子	PP 纤维	Nano-SiO <sub>2</sub>	Nano-TiO <sub>2</sub>	减水剂
普通混凝土	PC	151	360	650	1260	—	—	—	5.4
聚丙烯纤维混凝土	PPC6	151	360	650	1260	0.6	—	—	5.4
	PPC9	151	360	650	1260	0.9	—	—	5.4
纳米 SiO <sub>2</sub> 混凝土	NSC1	151	356.4	650	1260	—	3.6	—	5.4
	NSC3	151	349.2	650	1260	—	10.8	—	7.2
纳米 TiO <sub>2</sub> 混凝土	NTC1	151	356.4	650	1260	—	—	3.6	5.4
	NTC3	151	349.2	650	1260	—	—	10.8	7.2
	NTC5	151	342	650	1260	—	—	18	7.2
纳米与纤维掺混凝土	NTPC	151	356.4	650	1260	0.9	—	3.6	7.2

表 2 压敏性能研究用碳黑混凝土配合比

Table 2 Proportions of carbon black concrete

编号	水灰比	碳黑	减水剂	消泡剂
A-5	0.4	3.11vol.%	1.5%	0.13vol.%
A-10	0.4	6.04vol.%	1.5%	0.13vol.%
A-15	0.4	8.79vol.%	1.5%	0.13vol.%
A-20	0.4	11.39vol.%	1.5%	0.13vol.%
A-25	0.4	13.85vol.%	1.5%	0.13vol.%

表 3 纳米混凝土的抗压强度

Table 3 Compressive strength of specimens

试件编号	7d 抗压强度		28d 抗压强度	
	数值/MPa	提高率/(%)	数值/MPa	提高率/(%)
素混凝土	17.6	0	28.9	0
纳米 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3%	21.4	22.7	36.4	26.0
纳米 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5%	20.6	16.7	33.1	14.5
纳米 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10%	21.1	20.0	30.0	3.7
纳米 SiO <sub>2</sub> 3%	18.6	5.7	32.9	13.8
纳米 SiO <sub>2</sub> 5%	21.3	20.1	33.8	17.0
纳米 SiO <sub>2</sub> 10%	21.3	20.1	36.4	26.0
纳米 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3%+SiO <sub>2</sub> 2%	22.4	27.0	35.4	22.0

## 1.2 纳米混凝土力学性能及改性机理

### 1.2.1 力学性能

本部分研究了纳米混凝土的抗压强度、延性、抗疲劳和耐磨性能等力学特性,并通过 SEM 观察分析了纳米混凝土的微观结构,进而揭示了纳米混凝土的改性机理。

表 3 和图 1 分别给出了纳米混凝土的抗压强度和混凝土棱柱体受压过程的应力-应变全曲线。实验结果表明,纳米材料的增强效果与其种类和掺量密切相关。对纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 而言,纳米材料含量越高,其强度提高越少,含 3% 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混凝土抗压强度提高最大,为 26%;对纳米 SiO<sub>2</sub> 而言,纳米材料含量越大,混凝土的抗压强度提高越多,含 10% 纳米 SiO<sub>2</sub> 的混凝土抗压强度提高 26%<sup>[19]</sup>。高脆性是混凝土最大的缺点,特别是对高强混凝土更为突出,而纳米高强混凝土的延性远好于素混凝土和硅灰混凝土。图 1 表明,纳米

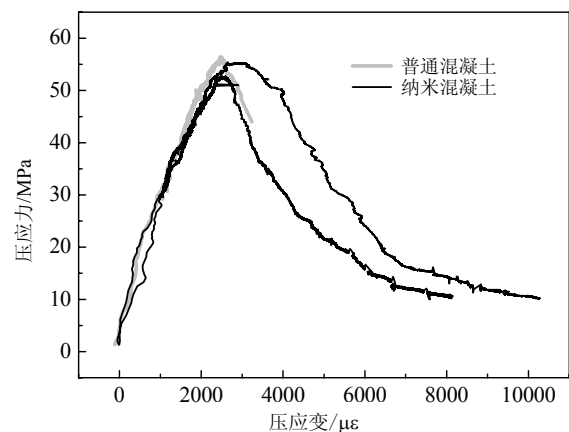


图 1 不同混凝土棱柱体的应力-应变全曲线

Fig.1 Stress-strain curves of different concrete columns

混凝土即使强度达到 60MPa，其仍然有完整的下降段，而普通高强混凝土的应力-应变关系均没有下降段，这充分说明纳米混凝土比普通高强混凝土具有良好的变形性能，对促进高强混凝土的应用具有重要意义<sup>[26]</sup>。

疲劳试验采用 100mm×100mm×400mm 的小梁试件。图 2 为失效概率为 10%时不同混凝土的疲劳曲线比较，纵坐标  $S$  表示应力比，横坐标表示疲劳寿命的对数。本次试验所涉及到的几种混凝土的疲劳性能优劣次序为：PC<NTC3<NSC1<NTPC<PPC9<NTC1。表 4 是相同应力水平下不同混凝土的理论疲劳寿命比较。随应力比的增大，纳米混凝土和 PP 纤维混凝土的疲劳寿命将成倍的增长，这说明纳米混凝土和 PP 纤维混凝土的疲劳性能优于普通混凝土。随应力水平的减小，理论疲劳次数的提高幅度会降低。即纳米混凝土和 PP

纤维混凝土在重交通荷载作用下具有优良的寿命<sup>[30]</sup>。

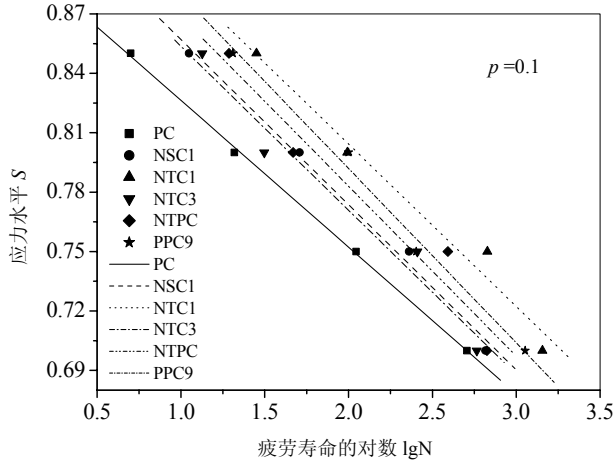


图 2 失效概率 10%时不同混凝土的疲劳曲线

Fig.2 Fatigue curves with 10% failure probability

表 4 相同应力水平下不同混凝土的理论疲劳寿命比较(用单对数方程计算)

Table 4 Comparision of theoretical fatigure lives at the same stress level (Calculated by single logarithmic equation)

混凝土 类型	S = 0.85		S = 0.80		S = 0.75		S = 0.70	
	理论疲 劳次数	提高 百分数/(%)	理论疲 劳次数	提高 百分数/(%)	理论疲 劳次数	提高 百分数/(%)	理论疲 劳次数	提高 百分数/(%)
PC	10	0.00	45	0.00	215	0.00	1016	0.00
PPC9	44	354.07	161	255.26	597	177.95	2209	117.46
NSC1	24	151.90	96	111.83	383	78.13	1522	49.79
NTC1	55	475.38	225	395.39	916	326.52	3730	267.22
NTC3	22	130.77	89	96.01	358	66.49	1437	41.41
NTPC	33	245.03	127	179.59	487	126.56	1865	83.59

表 5 为纳米混凝土耐磨性能及与聚丙烯纤维混凝土性能比较。从表 5 中可以看出，在普通混凝土中掺入聚丙烯纤维或纳米材料后，可以显著提高混凝土的耐磨性，特别是纳米混凝土。纳米混

表 5 混凝土的耐磨性试验结果

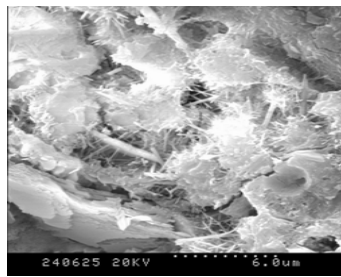
Table 5 Test results of abrasion resistance

混凝土 类型	表面耐磨度		侧面耐磨度	
	值	提高 百分数/(%)	值	提高 百分数/(%)
PC	1.19	0	1.55	0
PPC6	1.42	19.1	2.42	55.9
PPC9	1.60	34.4	2.62	69.2
NSC1	3.06	157.0	3.71	139.4
NSC3	2.39	100.8	2.93	89.0
NTC1	3.34	180.7	4.24	173.3
NTC3	2.95	147.7	3.72	140.2
NTC5	2.27	90.4	2.88	86.0
NTPC	1.36	14.1	2.20	41.6

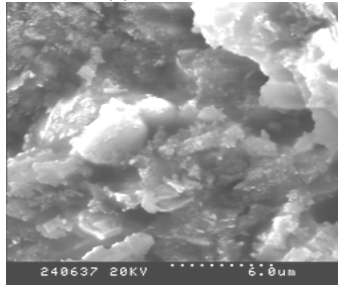
凝土的耐磨性的增长幅度远大于聚丙烯纤维混凝土。所有混凝土的侧面耐磨度大于其表面耐磨度。随掺量的增加，纳米 TiO<sub>2</sub> 对混凝土耐磨性的影响程度为：NTC1>NTC3>NTC5。对于掺有纳米 SiO<sub>2</sub> 的混凝土，也存在类似的规律。即随纳米材料掺量的增加，纳米混凝土耐磨性的增长幅度降低。纳米 TiO<sub>2</sub> 混凝土的耐磨性比相同掺量的纳米 SiO<sub>2</sub> 混凝土的耐磨性好<sup>[28]</sup>。

1.2.2 纳米混凝土微观结构改性机理

对纳米混凝土进行了 SEM 试验，如图 3 所示，在纯砂浆的水泥石中，C-S-H 凝胶质地较蓬松，大块的 CaOH<sub>2</sub> 晶体和其它形态的晶体分布于 C-S-H 凝胶中，总的来看水泥石的结构很不均匀。掺加纳米微粒的砂浆的水化产物结构均匀、质地密实、结合紧密，没有大量明显的结晶体。纳米水泥石的微观结构得到了改善，这也正是纳米混凝土力学性能提高的原因<sup>[19]</sup>。



(a) 素混凝土



(b) 纳米混凝土

图3 SEM试验照片

Fig.3 SEM pictures

图4为混凝土的孔径分布积分曲线,图5为混凝土的孔径分布微分曲线,这两种曲线可以用来表征混凝土中的孔结构状况。积分曲线的最高点即为混凝土的总比孔容,微分曲线上的峰值所对应的孔径为最可几孔径。掺入纳米材料后,混凝土的总比孔容降低,最可几孔径向小孔方向移动,都落在少害孔的范围内。这说明掺入纳米材料可以使混凝土的孔结构细化。

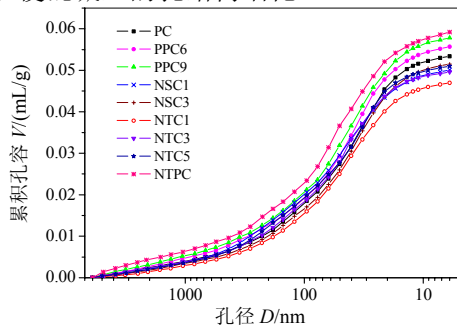


图4 混凝土的孔径分布积分曲线

Fig.4 Cumulative volume vs. Pore diameter

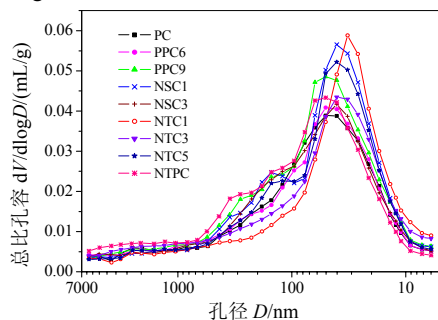


图5 混凝土的孔径分布微分曲线

Fig.5 Log differential volume vs. Pore diameter

由于水化产物密实度、均匀度和孔结构等微观结构的改善,纳米混凝土的耐久性如氯离子渗透、冻融循环等与普通混凝土比都得到了显著提高<sup>[29]</sup>,在此不一一介绍。

### 1.3 纳米混凝土应变感知特性

#### 1.3.1 应变感知基本特性及影响因素

本部分研究了纳米混凝土的应变感知特性及机理,加载制度、环境因素等对应变感知特性的影响。

纳米混凝土应变感知特性基于其电阻与应变之间的对应关系。纳米导体选用纳米碳黑,掺量分别为 5%, 10%, 12%, 15%, 20%和 25%,对应的拌和物在下文中分别被称为 A-5, A-10, A-12, A15, A-20 和 A-25。图 6 所示为纳米混凝土电阻率对数与碳黑体积掺量的关系曲线,可见掺量 7.22%~11.39%为渗流区, A-15 电导特性符合隧道效应理论。

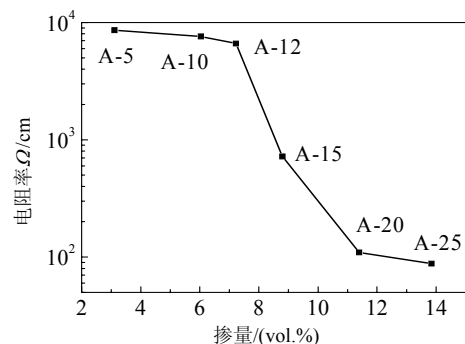


图6 电阻率对数与碳黑掺量关系

Fig.6 Relationship of Log resistivity with Content

如图 7 所示, A-15 具有很好的应变感知性能,从加载开始到试件破坏整个受压过程中,电阻率与应变的关系近似为线性;只有个别试件在临近破坏时,曲线出现了小的扰动。A-15 的应变感知灵敏度系数约为 55。并且 A-15 强度约 45MPa,极限应变约 4500 $\mu\epsilon$ ,是理想的应变传感

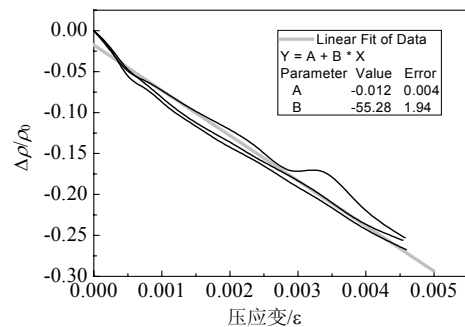


图7 A-15 应变感知性能

Fig.7 Strain-sensing performance of A-15

器原材料, 本文利用其制作了标准应变传感器, 以下简称 CCN 传感器。纳米混凝土的应变感知特性机理可基于隧道效应理论来解释, 纳米混凝土内的导电网络由碳黑粒子组成, 碳黑粒子之间的电阻与其间距为指数函数关系, 所以微小的应变就可导致电阻较大的变化<sup>[21]</sup>。

由于土木工程结构服役的环境因素多变, 因此湿度和温度对 CCN 传感器的影响特性及补偿方法得到了系统研究。CCN 传感器的初始电阻随含水率而变化, 低含水率时 CCN 传感器的信号稳定性很好, 因此采取了烘干后环氧树脂密封隔水的封装方法。电阻随温度升高呈现出先降低后增长的变化趋势。在  $-10^{\circ}\text{C}$  至大约  $50^{\circ}\text{C}$  的范围内, 可按电阻变化  $0.0007409/^{\circ}\text{C}$  来作温度补偿。也就是说正常的环境温度范围内, 传感器的灵敏度系数不受温度影响。因此, 在实际应用中, 干燥后环氧树脂封装的 CCN 传感器可实现稳定的信号采集, 只需根据标定数据进行温度补偿, 就可以转换得到准确的监测结果。

基于土木工程的荷载实际情况, 对循环荷载、变速率加载、长期荷载下的 CCN 传感器应变感知特性进行研究。循环荷载研究表明: 当荷载幅值在弹性范围内时, CCN 传感器性能的可重复性很好; 当荷载幅值在塑性范围内时, CCN 传感器的初始电阻随循环次数增加而增大, 可表征材料内部损伤的发展过程, 如图 8 所示。变速率加载下应变感知特性的研究表明, 灵敏度系数不受荷载速率的影响。

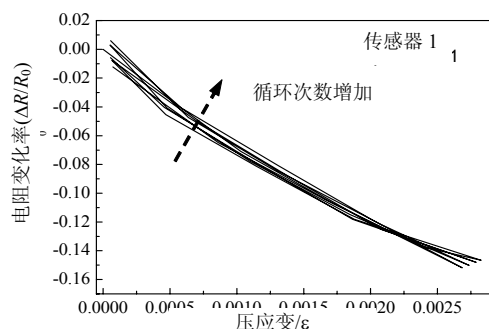


图 8 CCN 传感器在幅值 10kN 循环荷载下的应变感知特性曲线

Fig.8 Strain-sensing property of CCN sensor under cycle loading with amplitude of 10kN

图 9 为应力比 0.2 的 CCN 传感器在长期荷载过程中的总变形, 以及长期荷载过程中 CCN 传感

器电阻变化情况。在长期荷载过程中, CCN 传感器徐变变形同普通混凝土相似。CCN 传感器电阻随荷载时间的增加, 先是迅速的下降, 然后趋于缓慢降低。虽然变形和电阻随时间的变化趋势相反, 但它们随时间变化的变化速度规律是一致的, 由 CCN 传感器电阻信号转换得到的徐变变形与千分表所测结果吻合较好。研究结果表明, 灵敏度系数只与变形大小有关, 而与变形因素无关。

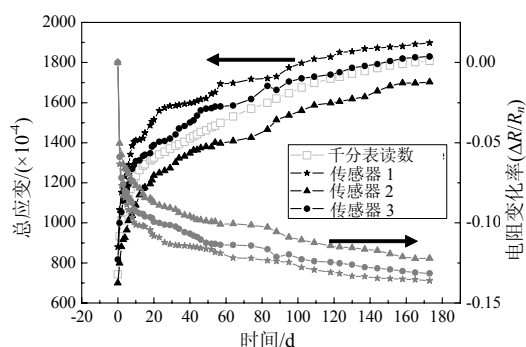


图 9 试件长期荷载下总变形

Fig.9 Overall strain under long-term loading

### 1.3.2 基于 CCN 传感器的自感知混凝土结构系统

将 CCN 传感器埋入混凝土构件和钢筋混凝土结构中, 形成自监测智能结构系统。对 CCN 传感器在不同强度和受力状态的监测特性, 以及 CCN 传感器和基体结构强度匹配关系设计进行了研究。构件形式选择为混凝土柱和混凝土梁。

混凝土柱基体强度分别为 C40 和 C80, 分别进行了循环加载和单调加载下实验, 循环荷载下 CCN 传感器与应变片监测结果吻合很好, 本文只给出单调加载下结果。图 10 所示为 C40 混凝土柱单调荷载下应变监测结果, CCN 传感器与位移计

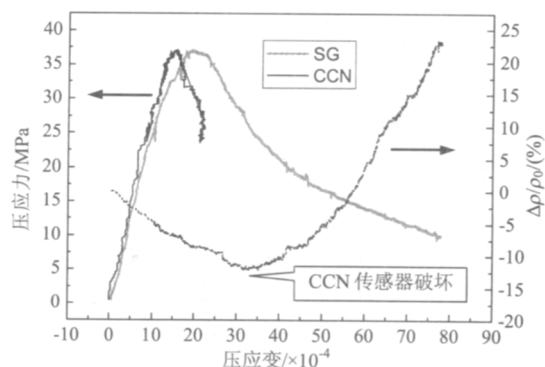


图 10 C40 混凝土柱在加载过程中由 CCN 传感器测得的应力-应变全曲线

Fig.10 Stress-strain curves of C40 Concrete Column during loading measured by CCN sensor

监测结果吻合较好,尤其在初期的弹性阶段。混凝土柱破坏时,CCN 传感器未发生破坏,电阻呈下降趋势。C80 混凝土柱中 CCN 传感器同样展现了较好的监测效果,CCN 传感器几乎与基体同时破坏,如图 11 所示。研究表明,CCN 传感器与混凝土基体需进行强度匹配设计,以保证 CCN 传感器晚于基体破坏而具有足够的监测区间<sup>[22]</sup>。

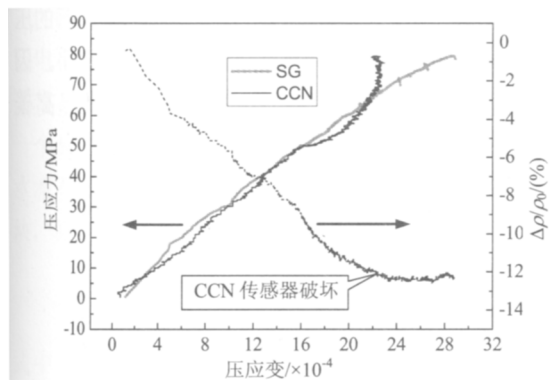


图 11 C80 混凝土柱在加载过程中由 CCN 传感器测得的应力-应变全曲线

Fig.11 Stress-strain curves of C80 Concrete Column during loading measured by CCN sensor

CCN 传感器与结构基体的强度匹配指的是它们的相对强度匹配,由于 CCN 传感器与基体弹性模量不同,因此由平截面假定 CCN 传感器与基体各自应力状态不同;CCN 传感器与基体泊松比的不同导致 CCN 传感器处于三向受力状态,因此其极限强度和其单轴受压标准值不同。充分考虑上述因素,才能进行正确的强度匹配设计,本文计算结果和实验现象吻合。图 12 和图 13 分别为 C40 和 C80 混凝土柱破坏后 CCN 传感器的情况,可见 C40 混凝土柱破坏后传感器界面处首先发生了破坏,而 C80 混凝土柱破坏时 CCN 传感器与之一起开裂从中间首先破坏。



图 12 破坏后的 C40 混凝土柱及其内的 CCN 传感器

Fig.12 Damaged C40 concrete column and CCN sensor on it



图 13 破坏后的 C80 混凝土柱及其内的 CCN 传感器

图 13 Damaged C80 Concrete Column and CCN sensor in it  
混凝土梁基体强度等级为 C40。通过简支梁三分点加载实现不同的应力区,将 CCN 传感器分别布设在弯剪段受压区(CCN-1)和纯弯段受压区(CCN-2),以研究其不同应力状态下监测特性。图 14 为 CCN-1 单调荷载下监测结果,其在加载阶段与应变片结果吻合较好,但卸载后其初始值大大偏离初始值,显示传感器内部出现损伤。损伤原因是由于其同时受压力和剪力,由多轴受力强度准则可知其抗拉强度降低很多。图 15 为 CCN-2 单调荷载监测结果,加载阶段和卸载阶段均与应变片结果吻合较好<sup>[22]</sup>。

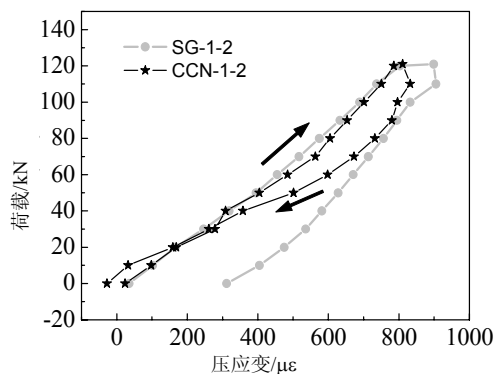


图 14 混凝土梁加载至破坏阶段 CCN-1 传感器监测结果

Fig.14 Monitoring results of CCN-1 sensor during loading up to failure

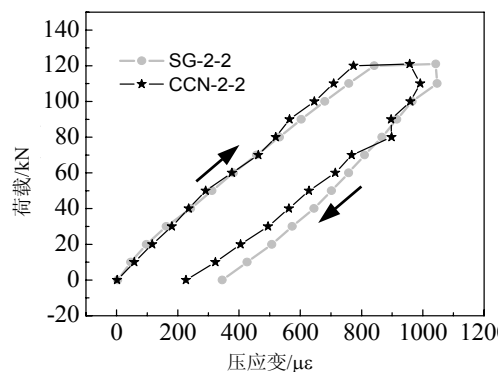


图 15 混凝土梁加载至破坏阶段 CCN-2 传感器监测结果

Fig.15 Damaged C40 Concrete Column and CCN sensor in it



将 CCN 传感器应用于重庆广阳岛大桥, 对其施工过程和成桥荷载实验时关键截面应变状态进行了监测。重庆市广阳岛大桥由主桥和引桥组成, 全桥长 1129.16m。其中主桥为 115.5m+210m+115.5m 三向预应力混凝土连续刚构桥, 单箱单室截面。通过有限元分析确定主桥中跨跨端截面 A-A 和中跨跨中截面 B-B 为监测截面, 传感器布设如图 16 所示。CCN 传感器均布设在受压区, 在相同位置处布设光纤光栅传感器进行对比校核, 布设温度传感器作温度补偿。表 6 为施工阶段监测结果, 括号内为相同位置处光纤光栅应变传感器结果, 比较可见 CCN 传感器对桥梁截面应变有较好的监测。

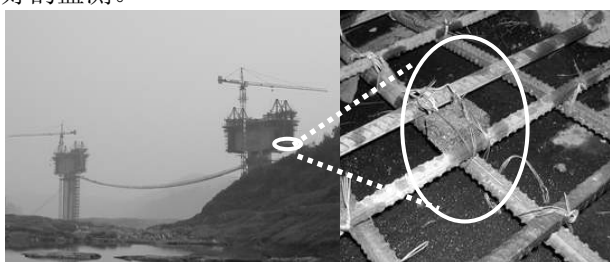


图 16 CCN 传感器布设图

Fig.16 Scenario on site

表 6 CCN 传感器监测结果( $\mu\epsilon$ )

Table 6 Monitoring results of CCN sensors

编号工况	传感器				
	CCN-1	CCN-2	CCN-3	CCN-4	CCN-5
4 号块浇注混凝土	-309.0(-288.3)	-423.8	-722.7	-456.8	-491.2(-462.5)
4 号块张拉纵向预应力	-291.4(-252.5)	-413.1	-710.5	-435.1	-461.3(-411.7)

注: 括弧内为光纤光栅传感器数据

## 2 碳纤维混凝土

### 2.1 碳纤维混凝土制备工艺及配合比

制备工艺及配合比是碳纤维混凝土性能优异和稳定的基础, 本部分从材料组成和制备工艺角度, 主要包括搅拌工艺、配合比设计以及碳纤维和碳黑复掺三个方面来优化压敏特性, 使其具有较好的稳定性和重现性。基于碳纤维混凝土的初始电阻稳定性等指标, 在正交实验的基础上, 确定了先掺法的搅拌顺序、先慢速后快速的搅拌强度和两个搅拌循环的搅拌时间。根据上述优化搅拌工艺制作的碳纤维混凝土的电阻率平均值和变异系数最小<sup>[9]</sup>。配合比设计主要包括水灰比、分散

剂掺量和减水剂掺量的确定。水灰比、分散剂和减水剂的合适用量分别为 0.32%、0.4%和 1.3%, 但在实际应用中, 它们的具体用量还需结合水泥石的力学指标以及工作性能指标进行调整。

根据上述研究结果, 采用优化的制备工艺和材料配合比, 制备了单掺碳纤维以及复掺碳纤维和碳黑的水泥石, 得到了如图 17 所示的压敏曲线。由图 17 可见: 复掺碳纤维和碳黑水泥石的压敏曲线具有较佳的重复性, 且曲线较平滑。因此, 通过碳纤维和碳黑复掺的方法, 可以提高碳纤维水泥石压敏性的重复性和线性度。

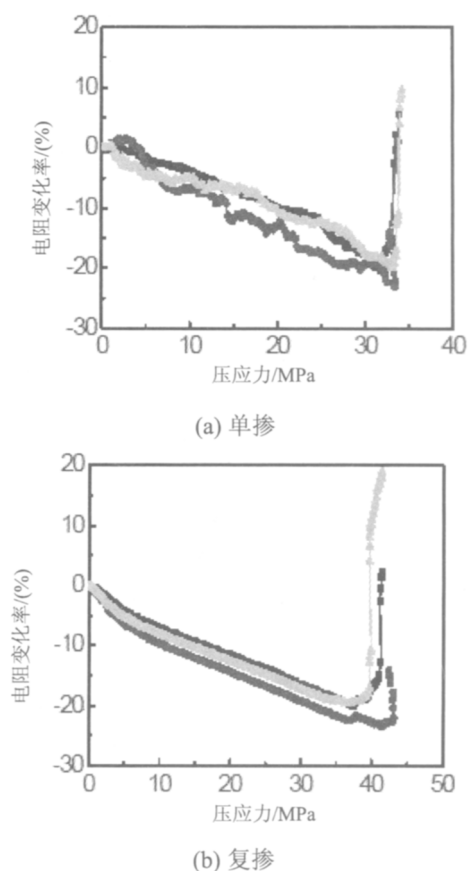


图 17 压敏碳纤维水泥石电阻率变化率与压应力之间的关系

Fig.17 Relationship of change rate of electrical resistivity with compressive stress

### 2.2 碳纤维混凝土电阻测试系统

碳纤维混凝土压敏性能基于其电阻的真实、稳定测量。电阻测试方法应满足碳纤维混凝土性能研究、传感器制作及其性能研究的需要。电极材料有碳纤维布、铜片和铜网等。布设方式有导电胶两端粘贴式和埋入式。经实验研究, 碳纤维混凝土的电极设置方式宜采用埋入式网状电极, 这样碳纤维混凝土的电阻测试结果离散性小, 并



且埋入式电极耐久性好,在实际应用中不易破坏。电阻的测量有两电极法和四电极法,研究表明:直流四端电极法可以消除在两极法测试中所存在的电极的接触电阻,实现电阻连续测量的稳定性和准确性。所以碳纤维混凝土的电极布置方式应采用四电极形式,相应的电阻测试方法应采用直流四电极法<sup>[11]</sup>。

碳纤维混凝土传感器的电阻测试确定为直流四电极法,但作为传感器其信号应实现实时连续采集,因此本研究作了信号采集系统设计。应用一个具有固定电阻值的参比电阻  $R_d$  与压敏碳纤维水泥石(传感器) $R_c$  构成一个如图 18 所示的串联模块,则:

$$\Delta R_c(t) = \left( \frac{U_c(t)}{U_d(t)} - \frac{U_c(t_0)}{U_d(t_0)} \right) R_d \quad (1)$$

式中,  $U_c(t_0)$  和  $U_d(t_0)$  分别为压敏碳纤维水泥石(传感器)和参比电阻两端电压的初始值。

对于在实际工程中采用分布式布置的多个压敏碳纤维水泥石传感器,可以对所有传感器和参比电阻模块采用如图 18 所示的并联电路。这样可以节省电源数量,而且传感器之间互不干扰,系统的可靠性比较高。然后把所有的电压信号经 A/D 卡传输到计算机中,即可实现多通路测量<sup>[18]</sup>。

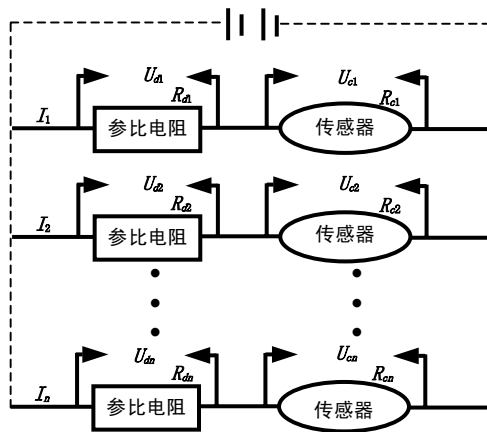


图 18 多通道数据采集的电路图

Fig.18 Circuit diagram of multichannel data acquisition

### 2.3 碳纤维混凝土传感器的应变感知特性

结合上述碳纤维混凝土传感器的制备方法和电极设计方法研究结果,定型了一种碳纤维混凝土传感器,其外形尺寸为  $30\text{mm} \times 40\text{mm} \times 50\text{mm}$ ,如图 19 所示。应用所设计的信号采集系统对其进行标定,对标定曲线进行回归可以得到传感器的输入(应力或者应变)和输出(电阻率变化率)关系:

$\Delta \rho = -0.912\sigma$  或  $\Delta \rho = -0.016\varepsilon$ ; 同时对压敏碳纤维水泥石传感器的输入范围、输出范围、灵敏度、线性度、重复性、迟滞性、零点输出以及时间零漂移等参数进行测试,得到压敏碳纤维水泥石传感器的基本性能见表 7。



图 19 碳纤维混凝土传感器

Fig.19 Carbon fiber concrete sensor

表 7 传感器性能指标

Table 7 Index of sensor

参数	指标值	
	应力监测	应变监测
输入范围	0~10MPa	0~578 $\mu\epsilon$
输出范围	0~8%	0~8%
灵敏度	0.912%/MPa	-0.016%/ $\mu\epsilon$
线性度	10%	10%
重复性	4.49%	4.49%
迟滞性	5.28%	5.28%
零点输出	2.52%	2.52%
时间零漂移	8.45%	8.45%

### 2.4 温湿度对碳纤维混凝土传感器的影响及补偿方法

温度和湿度是影响碳纤维混凝土传感器性能的两个主要外部因素,因此本部分研究了环境温度、湿度对传感器输出的影响并提出了补偿方法。

碳纤维混凝土传感器对温度的变化很敏感,从  $-30^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ ,电阻率变化率在 3% 以上;而从  $+30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ,传感器的电阻率变化率则接近 6%。图 20(a)和图 20(b)分别给出了传感器电阻率随烘干时间和泡水时间的变化曲线。图 20 表明:传感器的电阻率对其内部的含水量很敏感,传感器的电阻率从烘干到趋于稳定,变化率接近 30%,而在泡水实验过程中传感器的电阻率变化率高达 200% 左右。

由于传感器对环境温湿度的变化很敏感,本研究采用如图 21 的电路进行温湿度补偿。

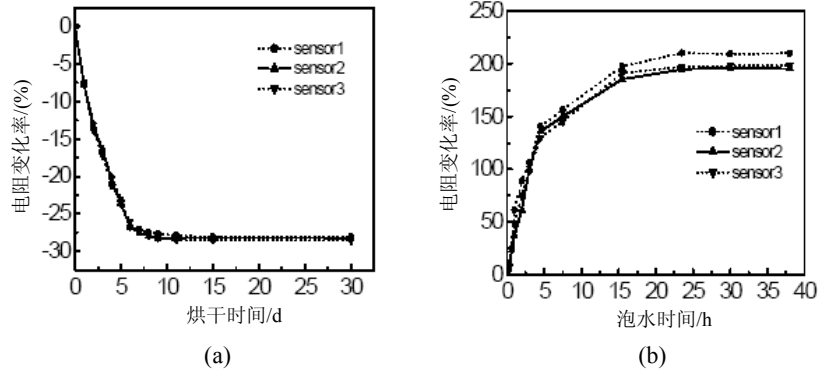


图 20 碳纤维水泥石压敏传感器电阻率与烘干时间和泡水时间的关系

Fig.20 Relationship of change rate of electrical resistivity with drying time and flooding time

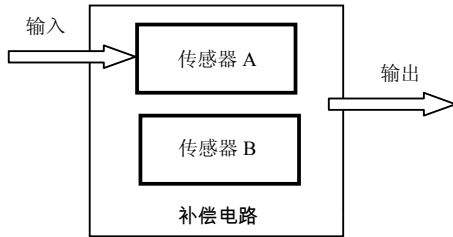


图 21 压敏碳纤维水泥石压敏传感器的补偿电路原理图

Fig.21 Compensation circuit schematic diagram of piezoresistive carbon fiber cement paste piezoresistive sensors

测试电路中, 传感器 A 接入输入信号, 而另外一个传感器 B 虚设, 作为补偿用。测试传感器 A 输出的表达式为:

$$\Delta\rho_A = \Delta\rho^F + \Delta\rho_A^T + \Delta\rho_A^H + \Delta\rho_A^O \quad (2)$$

补偿传感器 B 输出的表达式为:

$$\Delta\rho_B = \Delta\rho_B^T + \Delta\rho_B^H + \Delta\rho_B^O \quad (3)$$

对式(2)和式(3)取差, 即可得到测试系统输出  $\Delta\rho$  的表达式:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_A - \Delta\rho_B = \Delta\rho^F + (\Delta\rho_A^T - \Delta\rho_B^T) + (\Delta\rho_A^H - \Delta\rho_B^H) + (\Delta\rho_A^O - \Delta\rho_B^O) \quad (4)$$

由于测试和补偿两个传感器的性能基本相同, 温度、湿度以及其它因素对其的影响也基本相同, 故有  $(\Delta\rho_A^T - \Delta\rho_B^T) \approx 0$ 、 $(\Delta\rho_A^H - \Delta\rho_B^H) \approx 0$  和  $(\Delta\rho_A^O - \Delta\rho_B^O) \approx 0$ , 这三项与  $\Delta\rho_F$  相比可以忽略

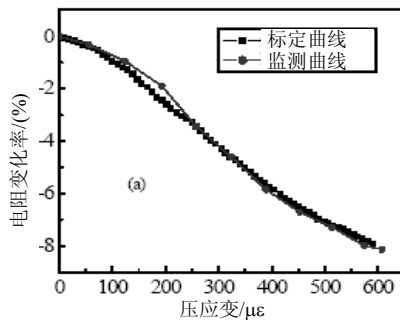


图 24 碳纤维水泥石压敏传感器压应变监测曲线与标定曲线的比较

Fig.24 Comparison of strain monitoring and calibration curves of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors

不计, 则  $\Delta\rho \approx \Delta\rho^F$ 。

## 2.5 埋置碳纤维混凝土传感器的自感知混凝土构件

钢筋混凝土梁、混凝土柱是两种基本的结构构件, 而碳纤维混凝土传感器又是一种监测压应变信号的敏感元件, 因此本部分在钢筋混凝土梁的受压区和受压混凝土柱中埋置了碳纤维混凝土传感器, 以验证应用碳纤维混凝土传感器进行混凝土结构监测的可行性。图 22 和图 23 为埋置碳纤维混凝土传感器的混凝土梁、柱的加载装置图。

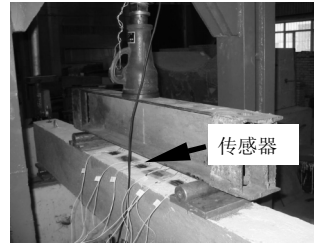


图 22 梁加载图

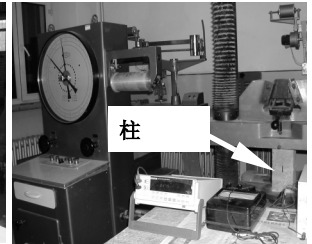
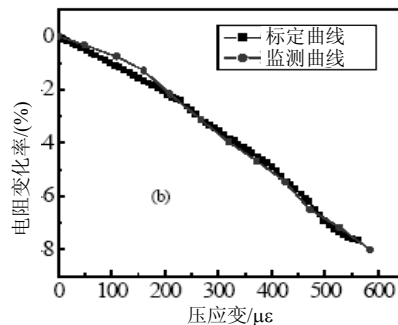


图 23 柱加载图

Fig.22 Picture of loading of concrete girder

Fig.23 Picture of loading of concrete column

应用上述实验装置, 可分别获得埋置碳纤维混凝土传感器的钢筋混凝土梁以及混凝土柱应变自感知实验曲线图 24。由图 24 可见, 埋置碳纤维混凝土传感器的混凝土构件可以实现局部压应变的自感知。



### 3 自增强阻尼混凝土

#### 3.1 原材料与配合比

自增强阻尼混凝土的原材料分为两部分，一部分与普通混凝土的相同，如水泥、砂、石子和水；另一部分为高阻尼添加料、为增加流动性而掺入的高效减水剂和消泡剂等。不同高阻尼材料其掺量也不同，如乳胶微料的掺量一般为水泥重量的 20%~30%、甲基纤维素的掺量一般为水泥重

量的 0.4%~0.8%、硅粉或改性硅粉的掺量一般为水泥重量的 15%<sup>[33]</sup>。表 8 给出了几种自增强阻尼砂浆的配合比及其阻尼比。从表 8 可以看出，各种比例掺合料的加入均能提高水泥砂浆构件的阻尼比，当掺乳胶 30%时，阻尼比提高最大，与其他掺合料相比，乳胶对于水泥净浆阻尼比的提高是最有效的。通过实验和分析，确定了阻尼增强混凝土的制备程序、制备工艺、配合比以及与增强材料相匹配的消泡剂和减水剂<sup>[34]</sup>。

表 8 自增强阻尼混凝土的配合比

%

Table 8 Mix proportions of self-reinforced damping concrete

种类	水灰比	增阻尼材料	增阻尼材料与水泥重量之比	减水剂与水泥之比	消泡剂与掺和料之比	阻尼比	阻尼提高百分比
Plain	0.44	-	-	-	-	2.15	-
1.20	0.24	乳胶	20	-	0.3	4.05	88.37
1.25	0.24	乳胶	25	-	0.3	4.38	103.72
1.30	0.24	乳胶	30	-	0.3	5.20	141.86
M0.4	0.42	甲基纤维素	0.4	0.4	2	3.68	71.16
M0.6	0.42	甲基纤维素	0.6	0.4	2	3.67	71.16
M0.8	0.42	甲基纤维素	0.8	0.4	2	3.87	80.00
SF15	0.41	硅粉	15	1.0	-	2.68	24.65
SF20	0.41	硅粉	20	1.2	-	3.32	54.42
SF25	0.41	硅粉	25	1.4	-	3.65	69.77

#### 3.2 自增强阻尼的机理

自增强阻尼混凝土阻尼增强的机理可以认为是：1) 硅粉提高水泥砂浆构件阻尼比归因于非常微小的硅粉颗粒填充于水泥浆体、填料和基体间或水泥浆体和砂之间的空隙中。硅粉使得水泥砂浆堆积更加紧密，以至于表面间的滑移变的更加困难，从而提高了试件的阻尼比。2) 乳胶或甲基纤维素对于水泥砂浆阻尼比的贡献归结于聚合物的粘弹相，阻尼来源于摩擦阻尼和耗散能量阻尼两个方面。其中，摩擦阻尼来源于聚合物分子间和水泥水化后分子间以及它们形成的内表面或层之间等的内摩擦。而耗散能量的阻尼是来源于如下的过程：高聚物都由大分子组成，每个大分子又由一种或几种化学结构相同的但构型不一定相同的链节连接而成，在外力的作用下，大分子不能立即跟上外力产生的形变，而需要经过一段时间才能产生相应的形变，这种松弛过程使得聚合物分子将机械能转化为热能耗散出去。

#### 3.3 自增强阻尼混凝土动力特性

利用 VA4000 粘弹谱仪对阻尼增强水泥砂浆的损耗因子和储存模量进行了测试和比较。研究表明：硅粉对于水泥砂浆储存模量的提高是最有效的，能够提高 30%~50%；虽然苯丙乳液使水泥砂浆的储存模量下降很多，但是它可以显著提高水

泥砂浆的损耗因子(提高几倍到几十倍)；表面改性技术可以同时提高硅粉水泥砂浆的储存模量和损耗因子<sup>[35]</sup>，改性后的硅粉与未改性的硅粉相比，改性硅粉提高了水泥砂浆的损耗因子 20%~200%、储存模量 10%~20%。

为发展大尺寸材料阻尼性能测试试验装置和试验技术，推导建立了三点弯曲梁式材料阻尼参数与梁跨中简谐加载力与位移相位差的关系，从而建立起了三点弯曲梁式材料阻尼测试的理论基础，并在此基础上自主设计和研制了三点弯曲梁式大尺寸材料阻尼测试装置<sup>[36]</sup>，发展了测试大尺寸构件材料阻尼性能的可靠技术，突破了大尺寸材料阻尼性能无法准确测试的瓶颈，开发的阻尼测试装置见图 25 和图 26。



图 25 自主开发的三点弯曲梁混凝土测试装置

Fig.25 Independently developed test instrument for three-point bending concrete beam

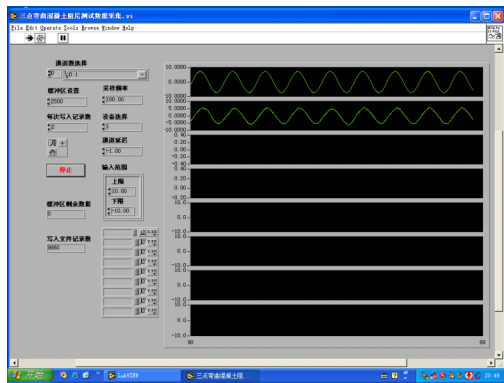


图 26 三点弯曲梁数据采集界面

Fig.26 Data acquisition of three-point bending beam

利用自主设计开发的三点弯曲梁式材料阻尼测试装置，对纤维增强混凝土的阻尼性能进行了试验研究，同时也研究了不同纤维掺量、不同气

孔结构以及不同湿度条件对聚丙烯腈纤维混凝土阻尼性能的影响，并且初步探讨了纤维混凝土的阻尼增强机理。研究表明：各种纤维和胶粉掺料均能提高混凝土的损耗因子，提高约一倍到二倍，其中胶粉、聚丙烯腈纤维和混杂纤维提高的最多；纤维混凝土的阻尼能力随着纤维掺量和引气剂掺量的增加而增加，但是考虑造价和强度问题，纤维和引气剂掺量不宜过高。混凝土材料的阻尼能力与湿度条件有很大的关系，混凝土浸水后的损耗因子大于风干状态下的损耗因子。混凝土材料在半干半湿状态下的阻尼能力优于全湿条件下混凝土的阻尼能力，不同影响条件下聚丙烯腈纤维混凝土的损耗因子与储存模量试验结果如表 9 所示。

表 9 不同影响条件下聚丙烯腈纤维混凝土的损耗因子与储存模量

Table 9 Dissipation factors and storage modulus of polyacrylonitrile fiber concrete in different influencing conditions

工况	2.0Hz		1.5Hz		1.0Hz		0.5Hz	
	$E'$	$\eta/(%)$	$E'$	$\eta/(%)$	$E'$	$\eta/(%)$	$E'$	$\eta/(%)$
B0 干	3.69	8.63	3.71	8.53	4.15	8.93	4.23	9.97
B0 半干	3.08	14.65	3.36	15.43	3.43	16.03	3.61	18.55
B0 湿	4.30	9.48	4.61	9.20	4.86	9.01	4.92	10.58
B1	4.06	8.44	4.22	8.40	4.31	8.88	4.43	9.10
B2	3.69	8.96	3.99	10.15	4.56	11.47	4.67	13.62
B3	3.32	14.21	3.41	14.68	3.47	15.72	3.50	18.72
B4	3.01	14.33	3.17	15.11	3.22	17.94	3.43	20.64
B5	2.74	14.86	2.67	15.99	3.12	18.63	3.32	21.33

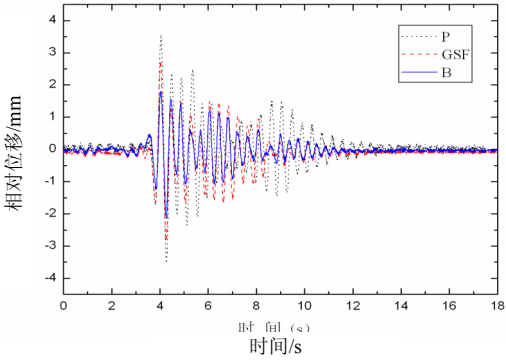
注：不同纤维掺量：B0: 0.96 kg/m<sup>3</sup>, B1: 0.72 kg/m<sup>3</sup>, B2: 1.2 kg/m<sup>3</sup>; 引气剂，掺量分别为：0.015%，0.03%，0.06%，分别记为 B3, B4, B5。

3.4 自增强阻尼混凝土结构的抗震性能

利用配制的纤维阻尼增强混凝土制作了 4 个工字形框架柱，通过单轴滞回特性试验研究了在相同的轴压比、配筋率、配箍率、剪压比条件下，纤维增强阻尼混凝土与普通混凝土在非线性阶段阻尼性能、抗震性能及破坏特征的差异，得出了纤维增强阻尼混凝土的骨架曲线和恢复力曲线的特征点。研究表明：从各掺合料混凝土柱的破坏特征可以初略判断，各掺合料混凝土相对 P 普通混凝土，延性均有不同程度的提高，纤维和胶粉均可以提高混凝土材料在弹性阶段的耗能能力，而当构件进入非线性破坏阶段，纤维和胶粉对混凝土材料阻尼性能贡献不大。

对单层两榀阻尼增强混凝土框架进行了抗震性能试验研究<sup>[37]</sup>，测定了框架结构的阻尼比和频率等动力特性；试验研究和比较了不同地震波下阻尼增强混凝土框架的相对位移和绝对加速度反应。研究表明：改性硅粉和苯丙乳液的加入均可以提高混凝土框架结构破坏前后的阻尼比，分别

提高 31.4%、61.3%和 27.5%、42.5%；改性硅粉可以有效地提高混凝土框架结构破坏前后的刚度，分别提高 5%和 15%~50%；虽然苯丙乳液的加入降低了混凝土框架结构的初始刚度，大约降低 17%，但却提高了混凝土框架结构破坏后的残余刚度，提高大约 10%~20%。改性硅粉和苯丙乳液的加入对于混凝土框架结构的地震反应的减振控制起到了很好的作用。图 27 为地震波作用下几种混凝土框架的相对位移反应。



(a) Tj50gal

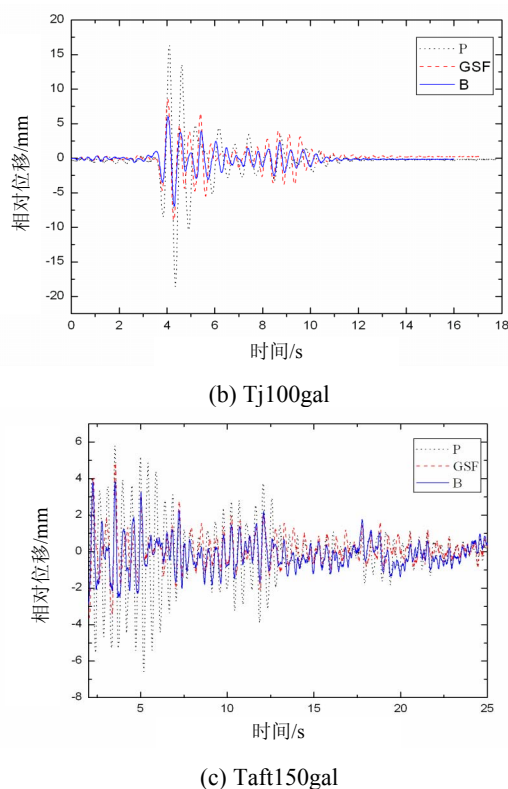


图 27 框架模型在三种地震波作用下的几种相对位移反应  
时程曲线

Fig.27 Several displacement histories of frame model under  
three different seismic waves

## 4 自修复混凝土

### 4.1 修复技术与效果

欧进萍和匡亚川根据人体伤口由“破裂流血凝结愈合”的过程,以及动物体内血液在血管中的流动来源于心脏跳动提供的能量的原理,设计了如图 28 所示的试验。此试验的特点是在系统中加入了模仿人体心脏的具有一定内压力的修复剂容器,而纤维胶管则相当于人体的血管<sup>[44]</sup>。

实验采用 C30 混凝土材料作为基材材料,外径为 6mm、壁厚为 0.75mm 的空心玻璃纤维管为愈合管道,改性  $\alpha$  氰基丙烯酸酯胶粘剂作为修复胶粘剂。之所以选用改性  $\alpha$  氰基丙烯酸酯胶粘剂是因为,它是一种具有粘度低、流动性好、渗透性好、收缩率小、粘结强度高、被粘物表面一般不用进行特殊处理等特点的单组液体胶。试验采用混凝土基体梁的尺寸为  $80\text{mm} \times 120\text{mm} \times 1100\text{mm}$ ,受拉区配有  $2\Phi 8$  的钢筋,修复纤维管的数量、在混凝土中的分布和试验装置如图 29 所示。采用分层浇注的办法在模具中成型。浇注后,在标准养护条件(温度为  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ,相对湿度大于

90%)下养护至 28d 龄期,在材料试验机上进行三分点弯曲试验。加载至发现纤维管破裂,管内修复剂胶粘剂流出,即刻停止。经一段时间后,修复胶粘剂填充、愈合裂缝。10d,修复胶粘剂完全固化,达到了其强度,再对修复后的试件进行第二次弯曲试验。表 10 为修复前后裂缝的开展情况。试验结果还表明,再次受力时,大部分修复后的混凝土裂缝没有重新裂开,而是在其周围出现了新的裂缝。

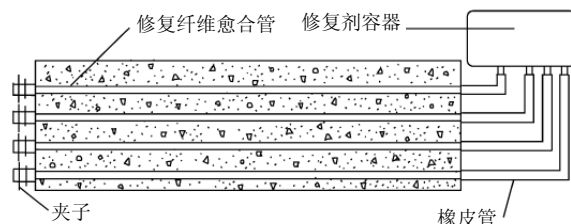


图 28 内置纤维胶液管裂缝自修复混凝土制备模型

Fig.28 Preparation model of embedded fibers filled with  
adhesive crack self-repair concrete

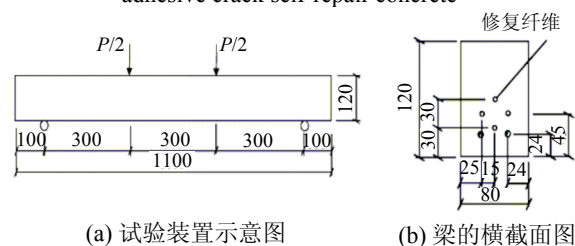


图 29 内置纤维胶液管钢筋混凝土裂缝自修复试验

Fig.29 Experiments of crack self-repair of embedded fibers  
filled with adhesive reinforced concrete

在内置纤维胶液管自修复混凝土中,是利用修复胶粘剂的粘结功能,填充、愈合裂缝。但要想达到理想的自修复效果,裂缝宽度必须控制,否则将需要大量的修复管,这将影响混凝土的性能。并且裂缝过宽,修复剂将顺着裂缝面在重力作用下往下流,而不会在裂缝面上渗透,修复效果差。因此结合修复胶粘剂对裂缝面的粘结功能和形状记忆合金的驱动功能,提出了主动智能自修复混凝土。形状记忆合金将驱使裂缝面闭合、恢复结构构件的变形和挠度,而修复胶粘剂将裂缝面粘结在一起,恢复或提高混凝土的强度。实验结果表明:裂缝产生后,通过电流加热改变形状记忆合金温度而使其对混凝土结构施加回复力,裂缝闭合。并及时打开修复容器端头的夹子,修复剂从修复容器经修复纤维管迅速渗入裂缝中。经一段时间后,合金完全回复,裂缝闭合,停止通电。10d 后,修复剂完全固化,达到了



其粘结强度，试样再次加载实验时裂缝从新位置产生，如图 30 所示。

图 31 给出了配筋混凝土梁第一次弯曲实验和修复后第二次弯曲实验的荷载-跨中挠度曲线图。

第一次弯曲实验出现裂缝后，利用形状记忆合金的回复力将裂缝闭合。裂缝修复后进行第二次弯曲实验，图 31 表明混凝土强度得到了修复，并且有一定的提高，提高程度达到了 34.5%。

表 10 修复前后裂缝的开展

Table10 Crack developing before and after repair										
修复 胶粘剂	试件 样品	修复管道 数	开裂荷 载/kN	第一次最 大荷载/ kN	第一次加载 裂缝最大宽 度/mm	第一次加载 出现的裂缝 条数	第一次加载有 胶流出的裂缝 条数	修复后(第二此加载) 最大承载力/kN	第二次加载修复裂 缝再次出现的条数	第二次加载新 出现的裂缝 条数
α-氰基丙烯 酸酯胶粘剂	1		5.8	17.2	0.19	2	2	23.2	1	5
	2	4	5.2	17.7	0.17	2	2	21.1	0	4
	3		7.5	17.5	0.21	4	3	20.1	1	4
环氧 树脂 胶粘剂	1		6.2	20.6	0.21	2	-	21.9	2	2
	2	6	6.8	20.4	0.5	2	-	26.1	2	4
	3		6.1	20.6	0.4	3	-	24.3	3	3

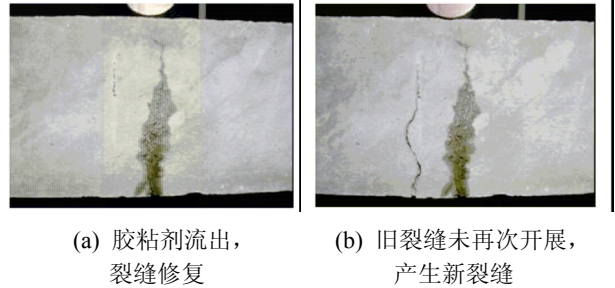


图 30 裂缝的开展及修复图

Fig.30 Crack developing and repairing

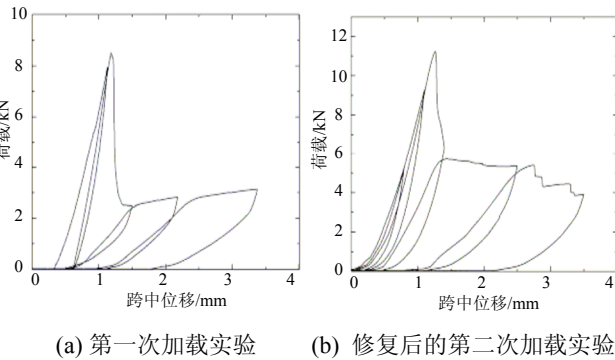


图 31 混凝土梁的荷载与跨中挠度曲线

Fig.31 Loading vs. Midspan deflection of concrete girder

4.2 自修复混凝土结构的分析方法

采用有限元方法分析了胶囊式自愈合混凝土中修复胶囊的受力状态，并对修复胶囊在混凝土中的分布和取向函数对混凝土性能的影响进行了计算。对含有修复剂的玻璃纤维管预埋在钢筋钢筋混凝土，混凝土受拉开裂，修复剂流出修复裂缝的梁进行了试验研究，并进一步从修复纤维微分单元的平衡状态，得到了混凝土开裂时，修复纤维能及时发挥修复作用的合理参数的计算方法<sup>[43]</sup>：

$$t = \frac{\left(2.7c + 0.1 \frac{d}{\rho_{et}}\right) v \tau_y}{1.5 \sigma_{fu}}, \quad 2rt \gg t^2 \quad (5)$$
$$L_{cr} = l_{cr, \min} \quad (6)$$

式中： $t$ 为修复纤维管的壁厚； $L_{cr}$ 为修复纤维管的最小长度； $L_{cr, \min}$ 为混凝土相邻裂缝间距最小值； $c$ 为混凝土净保护层厚度； $d$ 为受拉钢筋直径； $\rho_{et}$ 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向钢筋配筋率； $v$ 为钢筋表面的特征系数。

目前，除欧进萍和匡亚川对自愈合混凝土修复前性能进行了理论分析外，大部分的研究还只是处于试验验证阶段，还缺乏自愈合混凝土修复后性能的计算分析方法，是一个值得探讨的课题。

4.3 修复效果检测技术

利用声发射仪测试了混凝土自修复效果<sup>[44]</sup>。图 32 为未修复试件加荷至破坏然后卸载以及第二次加荷至破坏的声发射信号。可以看出，在第一次加荷时，从开始加载到最大荷载的整个过程中，试件的声发射振铃累计数稳定增加，表明有裂缝扩展，且有能量释放；而在第二次加荷时，试件已经破坏(但还能承受较小的荷载)，在荷载达到其最大值之前，基本上没有声发射信号产生，说明没有新的裂缝产生，原有的裂缝也没有扩展，荷载达到最大值后，原有裂缝迅速扩展，出现了声发射信号。图 33 为经修复胶粘剂修复后的试件的声发射信号，与图 32 比较可见，修复后的混凝土试件，第二次加载与第一次加载时其声发射特征基本相似，其声发射振铃累计数从一开始

便稳定增加,当荷载达到最大值时开始出现明显的声发射事件的峰值,并且没有产生不可逆效应,因此,可认为流入裂缝中的修复胶粘剂已使混凝土中的裂缝得到了修复,且效果显著。

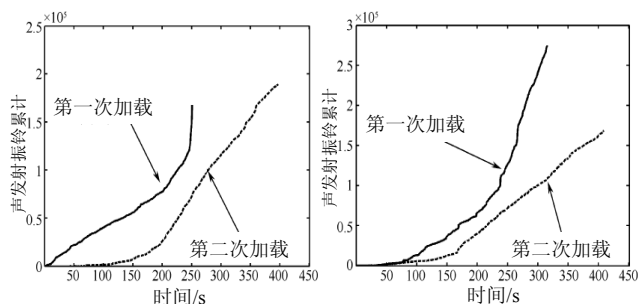


图 32 未修复试件的声发射图

Fig.32 Acoustic emission monitoring of specimen before

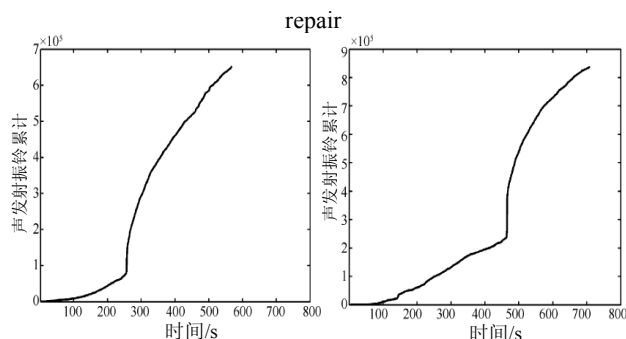


图 33 修复试件修复前后的声发射图

Fig.33 Acoustic emission monitoring of specimen before and after repair

## 5 结论与展望

智能混凝土是一种本征智能材料,具有良好的物理力学性能和智能特性,与传统混凝土具有天然的相容性,可广泛应用于大型土木水利工程、海岸结构、长输管线大跨桥梁结构、核电站建筑、高速及高等级公路和机场跑道等大型土木工程与重要基础设施建设中,单独或与普通混凝土一起构筑智能结构系统。然而,由于智能混凝土的研究时间还较短,目前还处于起步阶段,在大规模应用之前还有许多问题有待深入系统地研究:

(1) 目前的研究成功制备了具有一项或两项功能特性的智能混凝土:然而集自感知、自诊断、自增强阻尼、自修复等多种功能于一体的混凝土材料或结构还没有得到研究;智能混凝土大规模应用技术和智能混凝土结构系统还没有得到深入研究,智能混凝土与普通混凝土集成应用方法和技术还有待研究。

(2) 对于自感知混凝土,包括纳米混凝土和碳纤维混凝土:其应用形式还需进一步研究和探索;目前制作的传感器初始电阻率依然存在较大的离散性,传感器的应变感知性能也存在一定离散性,影响了其对小应变的测量准确性;长期使用过程中的环境因素耦合作用下性能的稳定性的有待研究;目前关于感知性能的研究多局限于单轴受力状态,而实际结构常处于多轴应力状态,因此应对自感知混凝土在多轴应变状态下的性能进行理论和实验研究;基于自感知混凝土的结构损伤评价方法目前研究较少,应结合自感知混凝土的应用形式和方法加强这方面工作。

(3) 对于自增强阻尼混凝土:还需要研究开发更为有效的增强阻尼材料,达到混凝土阻尼和强度的统一;由于大量使用高分子材料和化学试剂,自增强阻尼混凝土的长期性能和对环境的影响是值得关注的问题,研究者正努力使其成为绿色环保多功能混凝土;自增强阻尼混凝土结构在不同受力阶段的动力耗能特性和机理需深入研究,为自增强阻尼混凝土的抗震设计准则提供依据。

(4) 对于自修复混凝土:首先应进一步提高修复胶粘剂的性能,使其具有合理的渗透性和固化时间,否则自修复混凝土就没有实际意义;应加强修复混凝土结构的效果评价方法研究,开发更新的自修复混凝土的修复技术和大规模施工方法。

### 参考文献:

- [1] 李惠. 高强混凝土及其组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
Li Hui. High-strength concrete and composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全性评定[A]. 走向 21 世纪的中国力学——中国科协第 9 次“青年科学家论坛”报告文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 179~189.  
Ou Jinping. Accumulative damage and security assessment for significant engineering structures [A]. Mechanics in China Toward the 21st Century - 'the 9th Young Scientists Forum' by China Association of Science and Technology [C]. Tsinghua University Press, 1996: 179~189. (in Chinese)
- [3] 姚康德, 许美萱. 智能材料-21 世纪的新材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 1996.  
Yao Kangde, Xu Meixuan. Intelligent materials-new materials in 21st century [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1996. (in Chinese)
- [4] Chung D D L. Cement reinforced with short carbon



- fibers: a multifunctional material [J]. *Composites: Part B*, 2000, 31: 511~526.
- [5] Pu-Woei Chen, Chung D D L. Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flow detection [J]. *Smart Mater. Struct.*, 1993, 2: 22~30.
  - [6] Sun Mingqing, Liu Qingping, Li Zhuoqi, Hu Yaozu. A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30: 1593~1595.
  - [7] 毛起昭, 赵斌元, 沈大荣, 李卓球. 水泥基碳纤维复合材料压敏性的研究[J]. *复合材料学报*, 1996, 13(4): 8~11.  
Mao Qizhao, Zhao Binyuan, Shen Darong, Li Zhuoqi. Study on the compression sensibility of cement matrix carbon fibre composite [J]. *Acta Material Composite Sinica*, 1996, 13(4): 8~11. (in Chinese)
  - [8] 关新春, 欧进萍, 韩宝国, 巴恒静. 碳纤维机敏混凝土材料的研究与进展[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 2002, 35(6): 55~59.  
Guan Xinchun, Ou Jinping, Han Baoguo, Ba Hengjing. State of art of carbon fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Harbin University of C.E. & Architecture*, 2002, 35(6): 55~59. (in Chinese)
  - [9] 关新春, 韩宝国, 欧进萍. 碳纤维在水泥浆体中的分散性研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2002, 2: 34~36.  
Guan Xinchun, Han Baoguo, Ou Jinping. Study on dispersive ability of carbon fiber in cement paste [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2002, 2: 34~36. (in Chinese)
  - [10] 韩宝国, 关新春, 欧进萍. 碳纤维水泥基材料导电性与压敏性的试验研究[J]. *材料科学与工艺*, 2006, 14(1): 1~4.  
Han Baoguo, Guan Xinchun, Ou Jinping. Experimental research of electrical conductivity and pressure-sensitivity of carbon fiber reinforced cement [J]. *Materials Science & Technology*, 2006, 14(1): 1~4. (in Chinese)
  - [11] 韩宝国, 关新春, 欧进萍. 两种表面活性剂对碳纤维的协同分散作用分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2004, 14: 14~17.  
Han Baoguo, Guan Xinchun, Ou Jinping. Research of synergistic dispersion effect of two kinds of surfactant on carbon fiber [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2004, 14: 14~17. (in Chinese)
  - [12] 韩宝国, 关新春, 欧进萍. 导电掺和料形态与水泥基材料压敏性的相关性[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(3): 137~141.  
Han Baoguo, Guan Xinchun, Ou Jinping. Correlation between sharp of electric admixtures and piezoresistive effect of cement based composite materials [J]. *Acta Material Composita Sinica*, 2004, 21(3): 137~141. (in Chinese)
  - [13] 陈冰, 姚武, 吴科如. 用交流阻抗法研究碳纤维混凝土导电性[J]. *材料科学与工艺*, 2001, 19(1): 76~79.  
Chen Bing, Yao Wu, Wu Keru. Study on the electrical conductivity of carbon fiber reinforced concrete by A.C. impedance spectroscopy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, 19(1): 76~79. (in Chinese)
  - [14] 陈冰, 姚武, 吴科如. 受压荷载下碳纤维水泥基复合材料机敏性研究[J]. *建筑材料学报*, 2002, 5(2): 8~13.  
Chen Bing, Yao Wu, Wu Keru. Study of smart behavior of carbon fiber reinforced cement-based composites under compression [J]. *Journal of Building Materials*, 2002, 5(2): 8~13. (in Chinese)
  - [15] 张巍, 谢慧才, 曹震. 碳纤维水泥净浆外贴碳布电极的试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2002, 4: 32~34.  
Zhang Wei, Xie Huicai, Cao Zhen. Experimental research on electrodes made of carbon fiber cement and pasted carbon-cloth on its surface [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2002, 4: 32~34. (in Chinese)
  - [16] 王秀峰, 王永兰, 金志浩. 碳纤维增强水泥复合材料的机敏性[J]. *硅酸盐学报*, 1998, 26(3): 253~257.  
Wang Xiufeng, Wang Yonglan, Jin Zhihao. Smart properties of carbon fiber reinforced cement composites [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1998, 26(3): 253~257. (in Chinese)
  - [17] 宋显辉, 郑立霞, 李卓球. 碳纤维水泥变形传感器研制[J]. *测控技术*, 2004, 23(2): 22~24.  
Song Xianhui, Zheng Lixia, Li Zhuoqi. Development of carbon fiber reinforced cement's deformation sensor [J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, 23(2): 22~24. (in Chinese)
  - [18] 韩宝国. 压敏碳纤维水泥石性能、传感器制品与结构 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.  
Han Baoguo. Properties, sensors and structures of pressure-sensitive carbon fiber cement paste [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese)
  - [19] Li Hui, Xiao Huigang, Yuan Jie, Ou Jinping. Microstructure of cement mortar with nano-particles [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2004, 35: 185~189.
  - [20] Li Hui, Xiao Huigang, Ou Jinping. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34: 435~438.
  - [21] Li Hui, Xiao Huigang, Ou Jinping. Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28: 824~828.
  - [22] Xiao Huigang, Li Hui. A study on the application of CB-filled cement-based composites as a strain sensor for concrete structures [C]. *Proceedings of Smart Structures and Materials 2006-sensors and Smart Structures Technologies and Civil, Mechanical and Aerospace Systems*, V6174 II San Diego, USA.
  - [23] 李惠, 肖会刚, 欧进萍. 水泥基纳米复合材料压敏特性研究[J]. *功能材料*, 2004, 35(增刊): 2653~2656.  
Li Hui, Xiao Huigang, Ou Jinping. A Study on stress-sensing property of cement-based composites with nano-particles [J]. *Journal of Functional Materials*, 2004, 35(Sup.): 2653~2656. (in Chinese)
  - [24] 肖会刚, 李惠, 欧进萍. 温度和湿度对水泥基应变传感器性能影响的实验研究[C]. *功能材料*, 2006, 37(增刊): 619~621.  
Xiao Huigang, Li Hui, Ou Jinping. Experimental study on the effect of moisture and temperature on the property of cement-based strain sensor [J]. *Journal of Functional Materials*, 2006, 37(Sup.): 619~621. (in Chinese)
  - [25] 兰成明, 李惠, 肖会刚. 纳米混凝土抗磨及抗氯离子渗透性能研究[C]. *功能材料*, 2006, 37(增刊): 652~653.

- Lan Chengming, Li Hui, Xiao Huigang. Abrasion resistance and chloride permeability of concrete containing nano-particles [C]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(Sup.): 652~653. (in Chinese)
- [26] Xiao Huigang, Li Hui, Ou Jinping. The mechanical and mechanical-electrical properties of cement mortar with nano particles [C]. Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure. Japan: 2003, VOLS 1 AND 2: 867~871.
- [27] Xiao Huigang, Li Hui, Ou Jinping. The mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nano-particles [C]. International Conference on Advances in Concrete and Structures, China. ICACS: 2003, 32(1/2): 947~953.
- [28] Li Hui, Zhang Maohua, Ou Jinping. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement [J]. Wear, 2006(260):1262~1266.
- [29] Zhang Maohua, Li Hui. The chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement [C]. Proc. of 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Shenzhen: 2005, Nov. 16-18: 1469~1474.
- [30] Figovsky, Beilin D, Blank N. Development of polymer concrete with polybutadiene matrix [J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18: 437~444.
- [31] Gerharz B. Pavements on the base of polymer-modified drainage concrete [J]. Colloids and Surfaces, 1999, 152: 205~209.
- [32] Wang Y, Chung D D L. Effect of sand and silica fume on the vibration damping behavior of cement [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 28(10): 1353~1356.
- [33] Ou Jinping, Liu Tiejun, Li Jiahe. Analysis of the damping behavior and microstructure of cement matrix with silane-treated silica fume [J]. Journal of Wuhan University of Technology Materials Science Edition, 2006, 2(21): 1~5.
- [34] 刘铁军, 李家和, 欧进萍. 高阻尼混凝土的耐久性试验与综合评定[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 5(38): 715~719.
- Liu Tiejun, Li Jiahe, Ou Jinping. Durability of high damping concretes and the comprehensive evaluation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 5(38): 715~719. (in Chinese)
- [35] 刘铁军, 欧进萍, 李家和. 硅粉的硅烷化对水泥砂浆阻尼性能的影响研究[J]. 硅酸盐学报, 2003, 11(31): 1125~1129.
- Liu Tiejun, Ou Jinping, Li Jiahe. Effects of silane-treated silica fume on damping property of cement mortar [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2003, 11(31): 1125~1129. (in Chinese)
- [36] 欧进萍, 刘铁军, 梁超锋. 复合纤维增强混凝土阻尼测试装置开发与试验研究[J]. 实验力学, 2006, 4(21): 403~410.
- Ou Jinping, Liu Tiejun, Liang Chaofeng. Development of damping measuring instrument and experimental tesearch for hybrid fiber teinforced concretes [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 4(21): 403~410. (in Chinese)
- [37] 刘铁军, 李家和, 欧进萍. 混凝土结构减震的阻尼增强材料及其试验研究[J]. 功能材料, 2004, 35(增刊): 2592~2595.
- Liu Tiejun, Li Jiahe, Ou Jinping. Damping-reinforced materials for concrete structure and experiment research [J]. Journal of Functional Materials Contents, 2004, 35(Sup.): 2592~2595. (in Chinese)
- [38] 刘铁军, 欧进萍. 聚合物水泥砂浆阻尼性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2003, 4: 7~9.
- Liu Tiejun, Ou Jinping. Study of damping Property of Polymer Cement Mortars [J]. New Building Materials, 2003, 4: 7~9. (in Chinese)
- [39] Dry Carolyn, Nancy Sottos. Passive smart self-repair in polymer matrix composites materials. conference of adaptive materials [C]. Albuquerque, New Mexico, January, 1993.
- [40] Dry Carolyn. Preserving performance of concrete members under seismic loading conditions [C]. Proceedings of SPIE. 1998, 3325: 74~80.
- [41] 欧进萍, 匡亚川. 内置胶囊混凝土的裂缝自愈合行为分析和试验[J]. 固体力学学报, 2004, 25(3): 320~324.
- Ou Jinping, Kuang Yachuang. Experiments and analysis of concrete material with crack self-repairing performance using embedded capsules filled with adhesive [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(3): 320~324. (in Chinese)
- [42] 匡亚川, 欧进萍. 内置纤维胶液管钢筋混凝土梁裂缝自愈合行为的试验和分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 53~59.
- Kuang Yachuang, Ou Jinping. Experiments and analyses of the self-healing of cracks in reinforced concrete beams with embedded fibers filled with adhesive [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(4): 53~59. (in Chinese)
- [43] 匡亚川, 欧进萍. 混凝土裂缝自修复技术与理论[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(增刊): 248~251.
- Kuang Yachuang, Ou Jinping. Technology and theory of crack self-repairing of concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(Sup.): 248~251. (in Chinese)
- [44] 匡亚川, 欧进萍. 混凝土裂缝的仿生自修复研究与进展[J]. 力学进展, 2006, 36(3): 406~414.
- Kuang Yachuang, Ou Jinping. Research and progress of concrete materials with crack self-repairing ability similar to biomaterials [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(3): 406~414. (in Chinese)