

光纤传感无损检测混凝土结构研究述评*

赵占朝 刘浩吾 蔡德所

成都科技大学工程结构研究所, 成都 610065

摘要 本文综述了近几年来使用光纤传感器埋入混凝土构件及结构中无损检测其内部应力、应变及评估结构完整性等研究领域的概况。探讨了光纤与混凝土接触面之间的涂层材料的基本特性及其细观力学问题。最后给出了目前国外利用这种新技术所得到的一些成果。

关键词 光纤; 传感器; 无损检测; 混凝土结构

1 引言

在航空、航天领域中, 利用埋入复合材料中的光纤传感器技术检测结构内部的应变和探测结构的损坏情况, 已充分显示了这是一种有效的无损检测(NDE)新技术。因此, 目前已成为各国竞相研究的一个有重大价值的课题^[1]。近几年来这项新技术已开始应用于土木工程界, 目前集中于探索光纤传感器埋入钢筋混凝土构件和结构中(如建筑物、桥梁、大坝)进行结构完整性无损评估和内部应力状态检测的可行性。Méndez^[2]等首先提出了把光纤传感器埋入混凝土建筑和结构中, 并描述了实际应用中这一研究领域的一些基本设想。近几年来, 美国、加拿大、欧洲国家的一些学者, 在这一研究领域做了一些工作^[3-23]。

全世界目前仍在使用的各种土木工程结构中, 由于材料的老化、超期使用、过载、风化、缺乏维修及合适的检查等, 许多结构已退化损坏。因此, 近年来利用无损检测评估结构的强度和完整性, 从而决定其是否安全, 并为检修、更新、改建、延长使用期提供了崭新的途径, 这或许也为结构安全性的控制与反馈提供了一非常有用的方法。

在土木工程领域内, 尽管已有了各种高性能的材料、先进的结构分析和设计, 但评估技术相对比较缺乏, 所使用的方法许多都是破坏性的, 也曾提出了一些无损测试混凝土结构的方法^[23]。然而, 从某种程度上讲, 这些方法并不总是非常可靠的, 或只能作为定性的评估方法。这些无损检测技术主要依据的是X和 γ 射线的吸收、传播和散射, 核子振动响应, 电阻计, 离子渗透, 超声波, 振动, 磁等方法。

* 国家自然科学基金重大项目基金与国家博士后基金资助课题

由于光纤尺寸小、重量轻，因此，将其埋入混凝土并不影响其本身的性质。埋入光纤进行传感的基本原理是光纤周围混凝土的力和热分布状态的变化会引起传过光纤的光强、相位、波长或偏振变化。因此，光纤能高精度的传感混凝土中的温度和应变值，探测裂缝的发生和增长及检测混凝土的蠕变、热应力，并利用光时域反射计（OTDR）和光频域反射计（OFDR）技术，测试从光纤反射的信号而将各种被测的量定位。在结构施工时，将光纤传感器网络埋入结构中，就可以“实时”检测结构中各种力学参数、损坏情况及进行系统评估。

要实现这些设想，首先要了解在埋入混凝土的过程中涉及到的一些问题。本文探讨了光纤与混凝土接触面间的材料特性及其细观力学问题，介绍了用光纤传感器进行内部应力、应变测量的各种方法，此外介绍了国外所做的一些试验结果，限于篇幅略去插图。

2 光纤埋入混凝土中的一些问题

要实现混凝土内部的应变、温度等物理量的传感，首先要研究光纤埋入方法及光纤与混凝土接触面怎样处理。例如，接触面特点决定了载荷传给光纤的效果，及在使用期内传感器响应的可靠性，更进一步讲，弄清楚接触区的细观力学性能，对于传感器所测物理量的结果整理分析、传感器与混凝土中所测物理量怎样关联都是至关重要的，此外，石英玻璃光纤的力学与化学耐久性要适应恶劣的水泥环境。主要有两个问题，一是光纤在埋入时，水泥、骨料填充、机械振动都不能损坏光纤。二是富含水份与高浓度碱性的水泥浆环境，将有可能侵蚀光纤。下面较详细地讨论这些问题。

2.1 化学侵蚀

众所周知，水和氢氧离子在玻璃光纤的表面反应，会减少其强度，而在应力作用下就会加速玻璃光纤表面的裂隙生长^[29]。然而，水仅在混凝土凝结的最初几天内存在，随着蒸发和化学反应，大部分水就会消失。从混凝土中钢筋不曾被腐蚀也说明了混凝土具有很高的不透水性^[30]。另一方面，水泥有很强的碱性（pH值接近12），并且它会腐蚀玻璃纤维。幸运的是，利用玻璃纤维在普通水泥中做为加筋材料已做了大量的研究^[31]，开发了抗碱玻璃纤维^[32,33]，像所谓的 Cem-Fil 纤维^[34]，它的成分中有大约17%重的氧化锆（ZrO₂）。经过试验，证明高分子材料涂层能改进光纤的化学耐久力^[35,36]。特别值得庆幸的是用聚酰胺脂涂层的标准通讯石英玻璃光纤就有这种保护性能^[37]。

2.2 接触面粘结剂

由于混凝土的凝结收缩（温度减少引起体积收缩0.05%），以及骨料的锁结和水化物钙硅酸盐晶体的形成和增长引起的收缩，在光纤与混凝土之间产生了一定的胶结，然而这种胶结是否能提供有效的载荷传递并不太清楚。因此，就需要做抗拔力试验，以确定光纤与混凝土界面之间的剪切强度。

光纤包层起着非常重要的作用，为了防止光纤从包层中脱开或包层光纤从混凝土晶体中脱开，在混凝土与光纤之间就需要性能好的包层胶结剂。这一点非常重要，否则，所做的任何无损检测都是毫无疑义的。带包层的光纤埋入环氧树脂的包层性能试验研究发现，包层与环氧树脂界面要先于包层和光纤界面脱开^[38]。

2.3 光纤定位与包层影响

假如在光纤与包层间以及包层与混凝土间有理想的胶结，那么影响埋入传感器响应的唯

一因素就是光纤的排列方向（即定位），因为定位方向跟外载荷和混凝土晶体、包层、光纤层域的力学性质有关。

考虑两个一般情况，即埋入光纤与外载荷平行以及垂直的两种情况，它分别代表了沿光纤轴向和径向的变形。对于光纤平行于外载荷的情况，假如界面间存在理想的胶结剂，那么从光纤所测得的应力、应变等是光纤长度位置的函数。然而，由于各种原因，试验时发现在光纤中应变不是长度上点的连续函数，而是存在一个临界长度（ l_c ），在这个临界长度内应力、应变是相同的，为了使光纤中的应变等于它所处混凝土周围的应变，这个临界长度的物理意义就是埋入的光纤传感器长度至少等于所给定光纤的直径和弹模的临界长度。Nanni等^[5]计算得到临界长度 l_c 约等于光纤直径的 20 倍。

对于光纤埋入轴向同外载荷垂直的情况，光纤中所代表的实际应变取决于包层材料的刚度与光纤刚度的比。也就是说，光纤包层起一个力的过渡层的作用，它可以急剧的减少混凝土与光纤之间的载荷传递。光纤中的应变与混凝土晶体中的应变之间的关系表述为^[5]：

$$\varepsilon_{\text{fiber}} = \varepsilon_{\text{concrete}} \frac{2E_{\text{coating}}}{E_{\text{fiber}} + E_{\text{coating}}} \quad (1)$$

因此，在垂直布置时，为了确保适量的载荷传递，就需要比较硬的包层材料。标准通讯光纤不适宜这种情况，这是因为它的包层设计得比较软，用来吸收机械扰动，以防止微弯曲的光损耗。

2.4 光纤埋设

要实现上述这些设想的主要困难之一，在于怎样把光纤埋入尚未凝结的混凝土料中。光纤在混凝土中的放置不能任意摆放，而是必须遵从埋入传感器所要检测的要求与目标。因为混凝土料中占体积70%的是石料和其它填充料，因此，在光纤周围的任何方向都会遇到障碍；此外，在混凝土浇筑过程中，光纤要能经得起机械的抽吸、振动和新鲜混凝土翻动的严重考验。为了克服这种困难，提出了各种不同的埋设技术^[2]。这种技术之一是光纤由小直径的金属管（如薄不锈钢细管）保护。在混凝土浇筑过程中将这种管子放在被测处，完成填料后，在硬化开始前，将管子从中轻轻抽出，把光纤留在混凝土中。这种技术有一个优点就是可以促成光纤表面形成一种光滑的水泥界面。另一种方法是在光纤传感区内允许光纤在保护筒内自由的移动，借助于滑动的金属光纤夹板把载荷传递给光纤。这种技术类同于外置式的 Fabry-Perot 应变传感器^[16] 的载荷传递原理。Huston 等进行了用塑性壳保护的光纤埋设试验^[9]。然而，到目前为止尚不清楚这种方法是否能将合适的载荷传递给光纤。

上述所有这些问题，对于大部分结构而言都普遍存在这些不利因素。因而，研究开发了各种预制的光纤传感器板^[4]。在这种方法中，光纤传感器要小心保护地放置于特殊的夹板或骨架中，然后运送到现场安装。

同以前曾提到的一样，要有效使用光纤传感器，合适的埋设位置是至关重要的，传感器的探测与它的放置有很大的关系。因此，对于应变传感器来说是合适的埋设方法，对于裂缝或凝结传感器也许不需那样埋设。众所周知，混凝土抗压能力很强，而抗拉很弱，因而人们更关注拉应力和拉应变，故光纤应变传感器就应沿平行于钢筋的方向放置，以便检测拉应力、拉应变。

对于探测和检测裂缝的情况而言，光纤应环绕实际裂缝布置，或布置在可能形成裂缝的

位置，这样，光纤才可能检测到裂缝扩张的位移。这种布置仅适用于能预测裂缝要出现的区域，并且主要是监测裂缝的尺寸使之保持在安全限以内。另一种情况是在预应力混凝土构件中一旦出现裂缝，就要立即报警。这一类型的应用，光纤必须尽可能垂直于裂缝扩展的可能方向^[4,8]。

3 应用领域

这种新技术的基本应用预测列于表 1。大致可以分为三个主要的领域：

I. 结构检测和损坏评估；II. 实验应力分析；III. 系统控制与管理及社区服务。

第一组利用单模和多模光纤传感器来探测混凝土构件，如梁、柱、板、拱及其它实体结构的应力、应变、挠度、弯曲、凝结、裂缝、蠕变以及整个结构的位移。

表 1 光纤传感器埋入混凝土的应用

| 材 料 | 结 构 | 社 区 服 务 |
|-----------|---------|---------|
| 强 度 | 应 力 | 热 量 |
| 凝 结 | 应 变 | 冷 气 |
| 蠕 变 | 剪 切 | 气 压 |
| 收 缩 | 弯 曲 | 电 量 |
| 一 致 性 | 变 位 | 保 险 |
| 孔 洞 与 缺 陷 | 裂 缝 | 电 梯 火 警 |
| 弹 模 | 热 应 力 | 电 梯 |
| 钢 筋 腐 蚀 | 损 坏 探 测 | 通 讯 |

在实验应力分析领域中，光纤可作为结构构件力学特性测量的灵敏的多用途传感器。对于那些形状复杂，用分析难于获得解答的结构和构件是特别有用的，在模型上用试验测得应力状态，就可以解决这类问题。另一个实例^[20]就是使用一个光纤应变网络传感器埋入机场跑道，检测飞机在起飞和着陆时跑道上的应力，从而得到二维应力分布图，对今后再设计和维护这样的跑道是非常有用的。埋入式的光纤应变传感器能使结构工程师比较实测与设计的应力值、弯矩及变形(挠度)。这样就可得到更精确的设计参数，使得结构更安全、更经济。

在第三个应用领域中，可以利用光纤传感器更有效、更经济的监测各种建筑的服务设施与设备(如空调、电分配与消耗、保险、火警等)中有关参量是否处于正常状态并加以调控。如压力读数、水管的流量与温度都可以按要求进行监测与自动控制，用特殊热敏感材料包层的光纤，制成分布式热传感器，用于火警系统等等，所有这些都可以建立一个光纤网络传感器控制中心，自动提供所有信息，从而可能导致“智能建筑”的出现。

4 近年来的研究工作

使用光纤传感器进行混凝土结构的无损检测与评估的潜在价值也正是在这几年才开始得到重视。到目前为止，在这个领域内仅仅有一小部分研究报告及研究活动，然而在不久的将来必有改观。下面简要介绍在这个领域内的最新发展情况。

4.1 热应力和混凝土的凝固

混凝土在凝固时伴随着化学反应中热量的释放而固化。这过程中热的释放引起混凝土内部温度上升；随着冷却的开始，混凝土的外层迅速获得强度与刚度，任何阻止这种收缩将会引起拉应力。这些影响对于一些杆系混凝土结构不是至关重要的，而对于实体混凝土结构却是主要问题之一。要获得无裂隙的实体混凝土，在凝固过程中，必须均匀冷却，为此可以把光纤温度传感器埋入实体混凝土以检测其内部温度，从而控制凝固过程中冷却的速度。

这种设想已经在实际中由日本一家建筑公司实现^[6]。在他们的报告中利用已商业化的光纤分布温度传感器，在隧道中检测混凝土的凝固。Huston 等用另一种方法^[9]，将多模光纤埋入试验梁中测量光的传播来检测混凝土的凝固。

虽然尚无凝固传感器，但 Ansari 等^[7]已开发了一种光纤折射率传感器来探测加气新鲜混凝土中气泡的含量。由于在水泥浆与空气中光纤的折射率不同，从一个扫描探测管端头就可以探测到折射光强的变化。

4.2 裂缝探测与监测

在混凝土中裂缝的出现是难以避免的。在正常载荷作用下，由于钢筋的加力阻止干化收缩或温度引起的体积变化都会引起裂缝。裂缝的出现和增长可由埋入的光纤中光传播的强度变化而较容易探测到，而其位置由 OTDR 技术来确定。

Rossi 和 LeMaou^[4]报告了使用埋入式多模光纤（100 μm ，在几个截面处把包层材料去掉）探测混凝土中的裂缝。当裂缝穿过没有包层的光纤任一截面时，就会观察到光纤中光强有一个跌落。这一方法已用在汽车隧道的壳壁上，以检测不同位置裂缝的出现。在埋入过程中，先把光纤用金属管保护起来，在混凝土浇筑完后再移去金属管。

Ansari^[8]使用环形光纤测量了混凝土梁试件裂缝的宽度，通过环形光纤传播的光是裂缝增长引起光传播波动的函数。然而，在这项研究计算方法中的一个主要缺点是裂缝的走向必须事先预知。

4.3 弯曲、挠度与位移

土木工程师和建筑师感兴趣的其它力学参量就是长跨度构件、框架及实体结构的弯曲、挠度和位移。这方面，Wolff 和 Miessler^[10]在一座 53m 长的桥梁上将光纤传感器埋入桥面内，测量了延伸率和拉应力。使用了总共 8 个光纤传感器（4 个放置于混凝土桥板上部，4 个放置在下部）。光纤延伸率的测量揭示了桥梁内温度和蠕变的影响因素。

另一种方法^[12]把多模光纤埋入桥面板与桥墩之间的弹性轴承装备内来测量混凝土桥的载荷作用情况，由光纤微弯曲损失引起的光损耗来确定载荷值的大小。

混凝土大坝坝段结点位移检测^[14]，使用了特殊设计的光纤设备。在它的第一个设备构造图中，用一个弹簧力移动锤头压缩多模光纤使光纤中光的传导产生损耗，来探测超限位移。第二个设备用于测量结点相对位移，其原理是同结点相连的小光纤环的弯曲会导致光纤中光纤损耗的变化。

4.4 应力、应变测量

要预知结构的情况，对结构中应力、应变状态的了解是至关重要的。把光纤埋入结构中的重要部位，可以相对容易地确定应变，从而推算出应力。光纤直径或折射率的变化可用来测量结构传递给光纤的应变。

Nanni 等^[5]通过试验测量了水泥柱体内部的压应变。把光纤平行于外载荷方向埋入试件中，测量光传过双折射光纤的两个偏振光成分之间的干涉。同样，把光纤垂直于外载荷埋入，仍使用偏振光纤，应力作用于光纤引起两个垂直偏振光模式间的相位不同而产生干涉。

双折射效应也用来测量混凝土柱的内部应变^[3,11,17]。Tardy 等^[3]研制了一种光纤传感器，它是用未包层的低双折射单模光纤，用两条金属板条压制在一起，外载荷作用于板条就会引起光纤双折射，在光纤内的两个偏振光模式之间发生干涉，就可以较容易测得双折射。这种传感器无需特殊埋设，直接把 14cm 长的传感器埋入混凝土试件，受压试验中光纤传感器的响应显示了一相对大的双折射，从所测结果看出，它具有高灵敏度，并且与理论上基本一致。这种技术也用于公路上测量交通工具的重量^[11]。

Escoder 等^[13]在混凝土梁的三点弯曲试验中，将单模光纤传感器贴于梁表面和埋入梁内，使用干涉计技术测量其应变，所得结果显示，在不改变正常浇筑情况下，将光纤埋入混凝土构件的可行性，所得传感器的响应具有良好的线性关系，而浇筑后，所测光纤的响应也没有衰减。也就是说用四氟乙烯包层的光纤在埋设 5 年后，在混凝土内并无显示出有利的变化效应。

Kruschwitz 等^[15]阐述了使用外置式 Fizeau 光纤干涉计贴于和埋入混凝土试件中。将两根光纤放在一玻璃细管内，使光纤的端部在空间非常靠近而形成 Fizeau 空隙，由于应变或温度的变化，光纤端部的任何位移都会使间隙的距离发生变化，那么就可以测量出间隙中频谱移动的干涉条纹，把这种类型的传感器埋入混凝土梁内，分别放置于水泥区和贴近钢筋的区域，在外载荷作用下，水泥区和钢筋区的所测应变大约有 5% 的差别，这个差别是由几个因素造成的，如传感器与混凝土间的错动，排列不平行或试验误差，此外，由环氧树脂包层的类似传感器放置于混凝土桥梁的桥面下部，用来测量移动的车辆在整个跨长不同点上所产生的应变。

Huston 等^[9]使用埋入式多模光纤（分别使用塑性套筒和不用），测试了混凝土梁从加载到破坏的试验，把在光纤中传播的光强度作为外载荷的函数，试验结果显示，直到加载到光纤断裂前，光强度实际上没什么变化。根据这点，建立了光强是两根光纤端部轴向距离损失的函数。此外，发现无包层的光纤在凝固过程中易于断裂。

Bock 等^[18]提出了用光纤传感器设备代替目前仍普遍使用的笨重的测量混凝土材料中应力的水压力技术。他们使用的传感器采用了高效双折射（HB）偏振光纤。

Hendrick 等^[20]将单模光纤埋入混凝土和土壤的飞行跑道上，检测其应力分布。Fuhr 和 Huston 等^[21]在美国佛蒙特州 Winooski 河上的一个 0.75 万千瓦的水电站工程中，将 10 个多模光纤传感器埋入 15m 高、160m 长的大坝中，另外将光纤振动传感器置入水轮发电机。埋入大坝中的光纤传感器采用光频域反射计（OFDR）技术来检测大坝的压应力。目前尚未见到试验结果报告，据作者介绍 1993 年才开始检测。

Prohaska 等^[22]使用光纤 Bragg 光栅作为应变传感器，建立了光纤折射率的相对频移与应变的关系，并在混凝土梁试件中进行了弯曲试验验证。试验中光纤传感器也采用了不锈钢护套。

目前在国内关于混凝土结构中使用光纤传感器进行无损检测刚刚起步。笔者已率先获得国家自然科学基金重大项目资助，目前已完成裂缝检测的室内试验研究，拟在四川一水电工

程中做现场实验,相信在不久的将来必会缩短与国外的差距,文[24,25]是国内学者对国外这方面工作的简要述评。

4.5 建筑物监测

将光纤传感器埋入建筑物的不同位置,就会形成一个结构“神经”系统,提供建筑物的安全性信息。把这个系统与计算中心相配合或许将形成具有自我诊断与控制能力的智能建筑物。Huston等^[16,19]在Stafford大学的一栋建筑物施工中,埋入了各种单模和多模光纤传感器,预期用这些传感器测振动、风压、使用期内载荷、混凝土蠕变、温度、裂缝等,通过一部微机进行查询。从这种传感器网络中获得的信息将用来研究和监测建筑物使用期内的性能及整个结构的安全性。

5 小结

光纤传感器提供了在现场进行无损测量混凝土构件及结构的应力、应变、温度和变形的可能性。本文展望了结构分析的新应用领域和评估结构完整性以及建筑物服务设施的控制与管理。影响埋入混凝土的光纤传感器性能的主要因素有玻璃光纤的力学和化学耐久性、界面的粘结剂、光纤的定向与包层的特性。要研制高精度的、可靠的、可反复使用的光纤传感器,必须清楚界面区域所出现的材料与细观力学现象以及在混凝土中希望所测物理量的联系。

到目前为止,在文献中仅有少量用光纤埋入混凝土中的试验情况,而这些文献大多集中于利用双折射或微弯敏感光纤及Fabry-Perot空隙原理测量混凝土构件的应力、应变。另外一些是关于研制光纤传感器用于探测裂缝的出现,测量新鲜混凝土中气泡的含量,交通车辆的重量,桥梁和大坝的位移,检测实体混凝土的热应力及凝固。分布式光纤应变传感器是最有吸引力的一个研究领域。

此外,除试验研究外,还需研究适宜的埋设技术、混凝土中光纤的长期稳定性和耐久性、光纤与混凝土界面的粘结剂、载荷传递的细观力学以及实测规划。虽然这项技术非常新且处于研究阶段,但它却给光纤、智能结构和土木工程界增强合作、实现美好的无损检测展现了广阔的前景。

参 考 文 献

- 1 Udd E. Overview of fiber optic applications to smart structure. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Plenum Press (1988)
- 2 Mendez A, Mcrse T F, Mendez F. Application of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures. *SPIE*, **1170** (1989): 60-69
- 3 Tardy A, Jurczyszyn M, Caussignac J M, Morel G, Briant G. High sensitivity transducer for fiber optic pressure sensing to dynamic mechanical testing and vehicle detection on roads. *Springer Proceedings in Physics*, **44** (1989): 215-221
- 4 Rossi P, Lemaou F. New method for detecting cracks in concrete using fiber optics. *Materias and Structures, Research and Testing (RILEM)*, **22**, 132 (1989): 437-442
- 5 Nanni A, Yang C C, Pan K, Wang J, Michael R. Fiber-optic sensors for concrete strain/stress measurement. *ACI, Mat. Jor.*, **88**, 3 (1991): 257-264
- 6 Fiber optics and curing concrete. *Photonics Spectra*, **24**, 1 (1990): 22
- 7 Ansari F, Chen Q. Fiber-optic refractive index sensors for use in fresh concrete. *Appl. Opt.*, **30**, 28 (1991): 4056-4059

- 8 Ansari F. Real-time monitoring of concrete structures by embedded optical fibers. *Proceedings of the ASCE*, San Antonio, Tx., April (1992) : 49—59.
- 9 Huston D, Fuhr P, Kajenski P, Snyder D. Concrete beam testing with optical fiber sensors. *ibid*: 60—69
- 10 Wolff R, Miesslerer H. Monitoring of prestressed concrete structures with optical fiber sensors. Proc. 1st European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow (1992) : 23—29
- 11 Teral S. Vehicle weighing in motion with fiber optic sensors. Proc. 1st European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow (1992) : 139—142
- 12 Causignac J M, Chabert A, Morel G, Rogez P, Seantier J. Bearing of a bridge fitted with load measuring devices based on an optical fiber technology. Proc. 1st European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow (1992) : 207—210
- 13 Escobar P, Gusmeroli V, Martinelli M. Fiber-optic interferometric sensors for concrete structures. Proc. 1st European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow (1992) : 215—218
- 14 Holst A, Lessing R. Fiber-optic intensity-modulated sensors for continuous observation of concrete and rock fill dams. Proc. 1st European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow (1992) : 223—226
- 15 Kruschwitz B, Claus R O, Murphy K A, May R G, Gunther M F. Optical fiber sensors for the quantitative measurement of strain in concrete structures. Proc. 1st European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow (1992) : 241—244
- 16 Huston D, Fuhr P, Kajenski P, Ambrose T, Spillman W. Installation and preliminary results from fiber optic sensors embedded in a concrete building. Proc. 1st European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow (1992) : 409—411
- 17 Pope C, Wu S P, Chuang S L, Caler J, Murtha J. An integrated fiber optic strain sensor. *SPIE*, **1779** (1992) : 113—121
- 18 Bock W J, Voot M R H, Beaulien M, Chan J H. Design and performance of fiber-optic pressure cell based on polarimetric sensing. *SPIE*, **1795** (1992) : 28—35
- 19 Ambrose T P, Huston D, Fuhr P L. Lessons learned in embedding fiber sensors into large civil structures. *SPIE*, **1798** (1992) : 194—199
- 20 Hendrick R O, Shadram M, Nazarian S, Picornell M. Measuring stress distribution in pavements using single-mode fiber. *SPIE*, **1798** (1992) : 200—204
- 21 Fuhr P L, Huston D, Spillman W B. Multiplexed fiber optic pressure and vibration sensors for hydroelectric dam monitoring. *SPIE*, **1798** (1992) : 247—252
- 22 Prohaska J D, Snitzer E, Chen B, Maher M H, Nawy E G. Fiber optical bragg grating strain sensor in large-scale concrete structures. *SPIE*, **1798** (1992) : 286—294
- 23 Mendez A, Morse T F. Overview of optical fiber sensors embedded in concrete. *SPIE*, **1798** (1992) : 205—216
- 24 阎永志. 智能结构系统中的光纤传感技术. 压电与声光, **15**, 6 (1993) : 23—31
- 25 耿文学. 分布式光纤温度传感器及其应用. 仪表工业, 3 (1993) : 20—22
- 26 Horiguchi T, Kurashima T, Koyamada Y. Measurement of temperature and strain distribution by Brillouin frequency shift in silica optical fibers. *SPIE*, **1797** (1992) : 2—13
- 27 Dakin J P. Distributed optical fiber sensors. *SPIE*, **1797** (1992) : 76—108
- 28 Malhotra V M. Testing hardened concrete: nondestructive methods. *American Concrete Institute, Monograph*, 9 (1986)
- 29 Wang T T, Razirani H V, Schonhora H, Zapk H M. Effects of water and moisture on strengths of optical glass (silica) fibers coated with a UV-cured epoxy acrylate. *J. Appl. Polym. Sci.*, **23** (1979) : 887—892
- 30 Fintel M, Editor. Handbook of Concrete Engineering. Van Nostrand Reinhold (1985)
- 31 ACI Committee 544. State of the art report on fiber reinforced concrete. ACI Report 544, R-82 (1982)
- 32 Majumdar A J. Glass fiber reinforced cement and gypsum by glass fibers. Proc. Roy. Soc. Lon., **A319** (1970) : 69—78
- 33 Majumdar A J, Ryder J F. Reinforcement of cements and gypsum plasters by glass fibers. *Science of Ceramics*, **5** (1970) : 539—564
- 34 Proctor B A. Glass fibre reinforced cement. *Physics in Technology*, **6** (1975) : 28—32
- 35 Golosova L V, Varlamov V P. The interface in portland cement matrix reinforced with fibre glass with long hardening times. *Inorg. Mat.*, **20**, 12 (1984) : 1782—1789

- 36 Datta A B, Gupta A P, Paul A. Alkaline durability of glass fibre containing SiO₂, PbO and Al₂O₃. *J. Matt. Sci.*, **21** (1986) : 2633—2642
- 37 Kuwabara T, et al. Polyetherimide coated optical silica glass fiber with high resistance to alkaline solution. OFS/89 Conference, Houston, Tx, PaperWA4
- 38 Hacksma R, Cehelnik M, Kerkhoff J. An investigation of optical fiber coating performance in embedded sensing applications. *Mat. Res. Symp. Proc.*, **172** (1990) : 71—77

OVERVIEW OF STUDIES ON NON-DESTRUCTIVE EVALUATION USING OPTICAL FIBER SENSOR EMBEDDED IN CONCRETE STRUCTURES

Zhao Zhanchao Liu Haowu Cai Desuo
Chendu University of Science and Technology, Chendu 610065

Abstract In this paper an analysis is presented on the use of embedded optical fiber sensors in concrete elements and structures for the non-destructive measurement of internal stress and strain as well as for the assessment of structural integrity. The fundamental properties of materials and micro-mechanical aspects regarding the fiber/matrix interaction are discussed. In addition, a summary of the experimental results obtained to date is made along with the prospective applications with respect to this new technology.

Keywords *optical fiber, sensors, non-destructive evaluation, concrete structures*