

光纤光栅传感器在混凝土模型试验中的应用



深圳市简测科技有限公司

2014 年 12 月

1、混凝土结构的裂缝检测及监测

1.1 混凝土结构裂缝检测的意义

混凝土是当代土木工程中应用最广、用量最大的一种建筑材料。它是由胶凝材料，颗粒状集料（也称为骨料），水，以及必要时加入的外加剂和掺合材料按一定比例配制，经均匀搅拌，密实成型，养护硬化而成的一种人工石材。混凝土具有原料来源丰富，方便就地取材，避免远距离运输，价格低廉，生产工艺简单，施工方便的特点，因而使其用量越来越大。同时混凝土还具有抗压强度高，可与钢筋进行良好的匹配，耐久性能好，强度等级范围可根据设计需要进行调整等特点。但是，由于混凝土的这种由多种材料混合而成的非均质脆性材料，使得混凝土结构中不可避免的存在着裂缝。混凝土裂缝已经成为困扰建筑业多年的质量通病，严重危害混凝土结构的安全^[49]，并且成为结构损伤达到危险程度的集中体现^[50]。实际情况中，混凝土结构和构件通常都是带裂缝工作的^[51]。对于这部分不可避免的，对结构的安全性能不造成影响的裂缝，钢筋混凝土结构设计规范作了明确的规定，允许某些结构存在一定宽度范围内的裂缝。但是这些裂缝的存在和扩展容易造成使用者的不安全感，会在一定程度上影响建筑物的外观正常使用。混凝土结构产生裂缝的原因复杂多样，但主要可以归结为两大类，即结构性裂缝和非结构性裂缝。结构性裂缝主要是由于外荷载过大，而结构承载力不足所引起的裂缝；非结构性裂缝则主要是由于变形过大引起的裂缝：如温度变化、湿度变化、混凝土收缩、结构不均匀沉降、以及施工过程中由于操作不当引起的裂缝等等。混凝土结构中裂缝的存在和发展会对整体结构安全产生严重的危害。混凝土结构中裂缝的存在，一方面会加速混凝土的碳化。裂缝的存在使得空气在混凝土中的渗透速度加快，深度加大，尤其在相对潮湿的环境中，空气中的二氧化碳会与水泥中的碱性物质发生化学反应，使混凝土的碱性降低，导致内部钢筋失去钝化膜的保护，引起钢筋的锈蚀，钢筋锈蚀产生的锈蚀物体积膨胀，又会加速混凝土裂缝的扩张，从而形成恶性循环，影响结构的安全。另一方面，混凝土结构中裂缝的存在会大大降低钢筋混凝土材料的承载能力，影响结构的整体强度

及整体稳定性，减少结构的使用寿命。实际工程中，混凝土内部的裂缝在某些作用下会发生突然的变化，造成结构内部产生力学间断面，引起结构的突然失效。为了避免有害裂缝的出现和扩展，需要对混凝土结构的裂缝进行检测及监测，及时掌握混凝土结构的健康状况，从而确保结构物的质量安全，保障使用者的生命财产安全。

1.2 混凝土结构裂缝检测技术的发展现状

目前可用于工程及试验中混凝土裂缝的检测方法有很多种^[52]，常用的检测方法主要包括以下几种：

（1）直接观察法：直接观察法是一种利用带刻度的放大镜、钢尺等相对比较精密的测量仪器或工具，通过人工的观察记录来描述混凝土裂缝的长度、宽度、扩展情况等。这种方法只能作为一种粗略的检测方法。

（2）超声波无损检测法：超声波无损检测方法是一种非破损的检测混凝土裂缝深度的方法，是目前在混凝土裂缝检测过程中最常应用的一种方法。这种检测方法具有检测分辨率高、检测费用低、检测设备操作方便、对工作环境要求宽松等特点。假定两块混凝土试块的基本特征（如混凝土的组成成分，混凝土配合比、养护条件龄期等）相同，则超声波在两个试块中传播的波速、衰减、散射等特性都是相同的。当一个试块内存在裂缝，则超声波传播的特性将发生改变。超声波无损检测法正是通过对比超声波在混凝土结构中传播时波速等特性的改变程度来判定混凝土结构内部裂缝的分布与发展情况。

（3）微波无损检测法：微波无损检测技术^[53]是利用波长介于红外线波与无线电波之间的，频率范围处于 330MHz ~3300GHz 的一种电磁波对被检测物体进行损伤检测的一项技术。由于所用的微波具有波长短，频带宽的特点，当这种微波照射到被测物体上，它与被测物体会发生一系列的相互作用^[54]，利用特殊的仪器设备，可以采集到检测微波的透射波和反射波。通过分析波形、相位、振幅的变化，可以推断出被检测物体内部的裂缝、气孔、分成等缺陷，进而可以对被测物体的损伤程度进行评价。

（4）摄影检测法：

摄影检测法是一种利用照相机等其他可以记录影像的设备,对混凝土表面的裂缝进行实时监测记录的一项技术^[55]。这种检测方法不但能够对混凝土结构表面存在的裂缝进行检测,而且能够实现对该裂缝的实时监测,更能够全面反映裂缝动态的扩展情况及变化状态^[56]。直接观察法、超声波无损检测法、微波无损检测法等是常用的混凝土裂缝的检测方法,但是这些检测方法收集的信息在时间分布和空间分布上不连续,因而有一定的局限性。相比之下,摄影检测法收集到的变化信息则是连续的,基本可以实现对混凝土裂缝的检测及长期监测。但是这种方法需要后期对大量图像数据进行分析处理,不利于智能化监测,另外这种方法也无法做到对裂缝变化的实时分析,容易造成险情或重要的先兆信息的漏检。由于以上几种常用的检测方法都或多或少存在不足,利用光纤光栅传感技术尝试研制了一种用以监测裂缝变化情况的传感器。

2 光纤光栅裂缝传感器在模型试验中的应用

2.1 光纤光栅裂缝传感器的制作及标定

采用两端夹持构造的光纤光栅应变传感器主要是由两个固定的支点,相应的夹持部件以及传感测量用的光纤光栅构成。这种传感器的原理图如下图 2.1 所示。

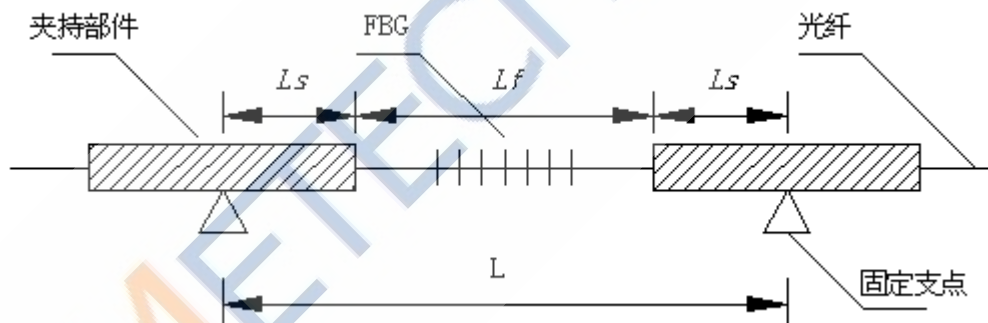


图 2.1 光纤光栅应变传感器原理图 传感测量用的光纤光栅区

段采用胶接的方式与外部的夹持构件相连,假设夹持构件是直径 d

的钢管,夹持构件之间的包含光栅区段的光纤长度为 L_f ,固定支点之间的长度为 L 。

在忽略光纤自身变化以及钢管内部粘接用胶的变化的情况下,当两固定支点间发生轴向变形量的大小为 ΔL 时,将会引起光纤光栅产生大小为 ΔL_f 的变形量,同时夹持构件也将产生大小为 ΔL_s 的变形量。由此材料力学知识可以得出如下结论:

$$\Delta L_s = \frac{P_s L_s}{E_s A_s} \quad (3.1)$$

$$\Delta L_f = \frac{P_f L_f}{E_f A_f} \quad (3.2)$$

其中， E_s 为钢管的弹性模量； A_s 为钢管的横截面面积； P_s 为钢管所受到的内力； E_f 为光纤光栅的弹性模量； A_f 为光纤光栅的横截面面积； P_f 为光纤光栅的所受到的内力。由于假定结构内部所受的内力处处相等，可以得出如下公式：

$$\frac{\Delta L_s}{L_s} = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \frac{\Delta L_f}{L_f} \quad (3.3)$$

即：

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_f} = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \quad (3.4)$$

通过相应的实验研究可知，该光纤光栅传感器各部分的参数如下表 3.1 所示。

表 2.1 光纤和中间层的机械性质

材料参数	符号	数值范围	单位
钢管的弹性模量	E_s	210×10^9	Pa
钢管的直径	d_s	0.8	mm
光纤的弹性模量	E_f	7.2×10^{10}	Pa
光纤的直径	d_f	0.125	mm

将上表 2.1 中的参数代入式 (3.4) 中，可以得出如下结论：

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_f} = 0.0084 \quad (3.5)$$

由上式可以看出，在假定内力相等的情况下，由于钢管夹持构件的弹性模量及横截面积的乘积比传感光纤的弹性模量及横截面积的乘积大很多，因此夹持构件所产生的应变可以忽略不计。这样在整个光纤光栅传感器中，就可以用光纤光栅产生的变形量来代表两个固定支点之间的所产生的变形量。当测试用的光纤光栅传感器的中心波长处于 1550 nm 波段时，可以

得出外界应变与该光纤光栅传感器中心波长变化之间的关系如下式 3.6:

$$\varepsilon = \frac{L_f}{L} \varepsilon_f = \frac{L}{1.2L} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{FBG}} \quad (3.6)$$

虽然光纤光栅传感器已经在模型试验及实际工程中普遍采用,但是通常情况下都用这种传感器来测量被测物体应变变化情况,而裂缝的变化幅度一般都比物体应变量大很多,很有可能超过普通光栅光纤传感器的可测量范围,从而导致光栅光纤传感器因为量程较小而失效。

因此利用前文所述的两端夹持构造的光纤光栅传感原理设计制作的裂缝传感器是正是通过调整 L_f 与 L 的比值,来实现了传感器减敏机制,从而增大了传感器的量测范围。金属化封装后的光纤光栅应变传感器如图 2.2 所示。

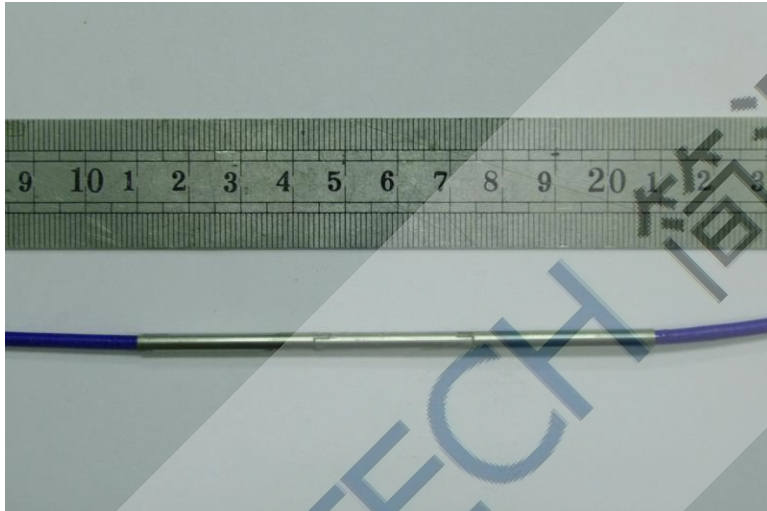


图 2.2 光纤光栅应变传感器

试验采用的 FBG 裂缝传感器的有效测量距离 $L=30\text{mm}$, 光栅长度 $L_f=60\text{mm}$, 由上式可以计算得出该传感器的理论应变传递率为 $1.667 \mu\varepsilon/\text{pm}$ 。同时可以得出, 该传感器与同等条件下未进行封装的裸光纤相比, 理论减敏系数为 0.5。为了认证设计制作的光纤光栅裂缝传感器的工作性能, 对该传感器进行了标定试验。标定试

验前, 先利用粘接剂将 FBG 裂缝传感器粘贴于钢板上, 并在钢板的相应位置粘贴未进行封装的裸光纤, 然后将钢板在万能试验机上进行连续拉伸。在线弹性范围内, FBG 裂缝传感器与裸光纤可以视为具有相同的应变值。

标定试验采用深圳简测科技有限公司生产型号为 JEME-iFBG-S15 的 15 路光栅光纤解调设备, 这种解调仪集成了可调光纤滤波器模块以及扫频激光光源, 仪器的测量范围大, 测量精度高,

与光纤光栅传感器连接方便快捷，工作性能良好。为了方便数据的存储和采集，试验同时利用了一种自行研制开发的光纤光栅应变仪同步采集系统对 FBG 裂缝传感器的中心波长和裸光纤的中心波长进行同时采集。将采集得到的数据进行处理，可以得到钢板的标定实验结果如下图 2.3 所示。从图中所示结果可以看出自行设计制作的光纤光栅裂缝传感器具有良好的线性性能，相关系数达到了 0.997 以上。同时所得结果与未进行封装的裸光纤对比可得，该裂缝传感器的减敏系数为 0.5001，与理论计算结果 0.5 非常接近。

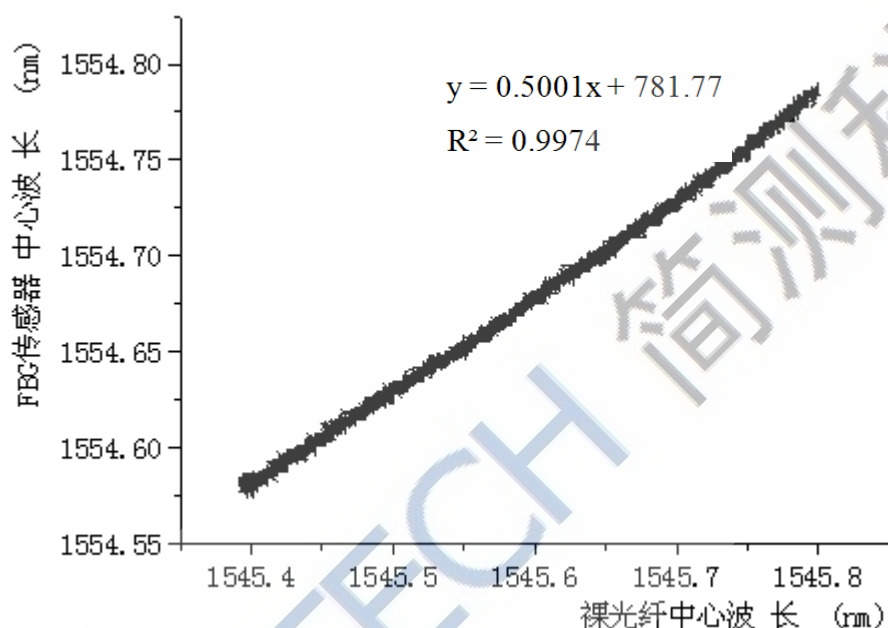


图 2.3 FBG 裂缝传感器在钢板上的应变标定结果

2.2 裂缝传感器的布置

试验所用模型的原型为某高桩预应力码头，模型采用九块预制混凝土板拼装，并采用预应力后张法施工。本试验需要对板上几个不同位置施加集中荷载，采用油压千斤顶加载的方式。该预应力码头模型及加载装置如图 2.4 所示。上部混凝土试块及相应的固定结构可以为油压千斤顶提供反力，保证加载的顺利进行。



图 2.4 码头模型

本试验用光纤光栅裂缝传感器测量该混凝土模型板的拼装缝在不同荷载作用下的变化情况。传感器布置位置、编号及其相应的初始中心波长见图 2.5 和表 2.2。

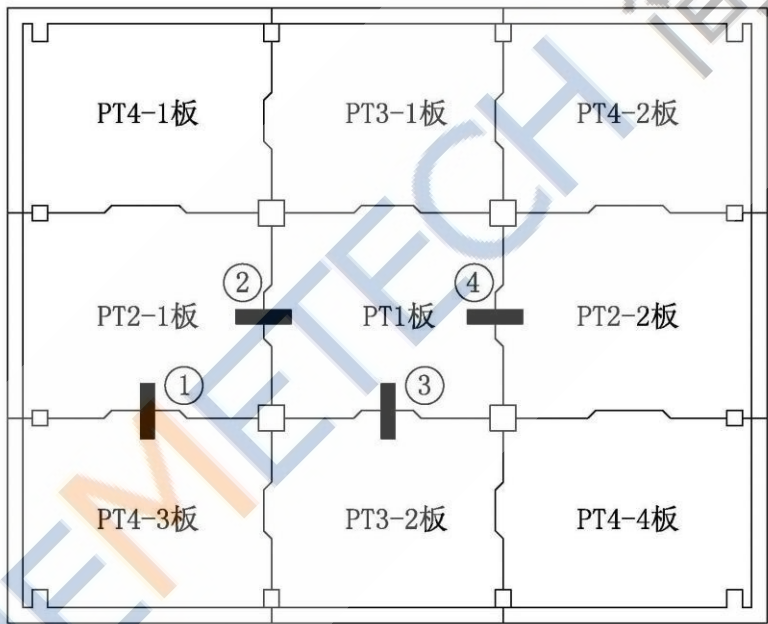


图 2.5 FBG 裂缝传感器布置

表 2.2 传感器编号及对应波长

传感器编号	中心波长/nm
-------	---------

No.1	1550.910
No.2	1546.797
No.3	1534.925
No.4	1554.562

为了对试验结果进行准确的比较分析，在布置了光纤光栅裂缝传感器的相应位置，同时布置了电阻应变片，实际布置图如下图 2.6 所示。



图 2.6 FBG 裂缝传感器及应变片

2.3 实验结果与分析

实验使用油压千斤顶进行集中荷载的加载。第一种工况，对 PT2-1 板板中施加集中荷载，荷载分别为 0.5t，1t，1.5t。由各个 FBG 裂缝传感器测得波长值经处理可以求得相应裂缝宽度的变化值。

从图 2.7 中可以看出，在相同荷载作用下，不同位置裂缝的扩展宽度不同，其中位于板 PT2-1 板缝位置的 No.2 传感器测得的裂缝宽度变化最大，No.1 传感器次之。而远离集中荷载作用位置的 No.3 及 No.4 传感器处裂缝变化较小。

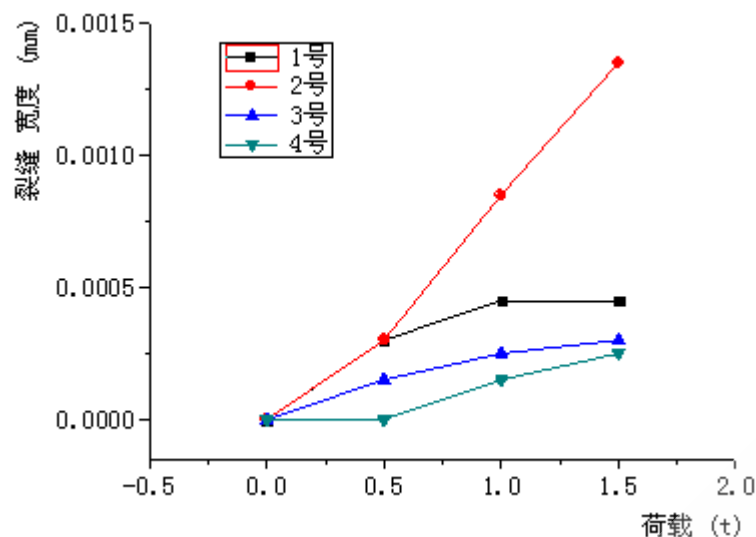


图 2.7 PT2-1 集中荷载作用下各裂缝宽度变化

第二种工况，对 PT1 板板中施加集中荷载，荷载分别为 1t, 2t, 2.5t, 3t, 3.5t, 4t, 4.5t, 5t, 5.5t 和 6t，主要研究在不同荷载情况下 PT1 板与 PT2-2 板之间的板缝（No.4 传感器）的扩展情况。采用与工况一相同的处理方式，可以得到 FBG 裂缝传感器测得的裂缝宽度变化。对于处于相同位置的应变片，由测得的应变值及应变片的标距，可以算的应变片测得的裂缝宽度变化。将两者测试结果进行对比，如图 2.8 所示。

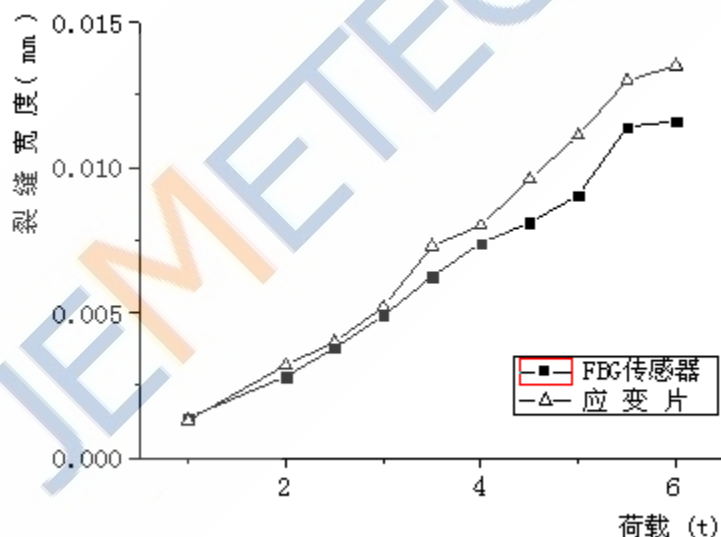


图 2.8 PT1 集中荷载作用下 No.4 裂缝宽度变化

从图 2.8 中可以看出，在集中荷载作用下，PT1 板与 PT2-2 板之间的板缝随荷载的增加而加

宽。FBG 裂缝传感器与应变片测得的变化趋势相同，所得的结果相近，都很好的反映了裂缝的变化趋势。

3 微型光纤光栅应变传感器在模型试验中的应用

在该高桩预应力码头模型试验中，除了布设前述的光纤光栅裂缝传感器对预制板拼接处缝隙变化情况进行监测外，还在预应力钢筋上布置了大量微型光纤光栅应变传感器，以达到在实验过程中对预应力钢筋应力变化情况进行测量的目的。根据试验方案的要求，共需进行四种不同工况的加载试验，分别为：工况一：均布荷载布置在 PT1 板上；工况二：集中荷载布置在 PT2-1 板中间；工况三：集中荷载布置在 PT2-1 板与 Pt1 板之间；工况四：集中荷载布置在 PtT1 板中间。

加载点及码头模型的示意图如下图 3.1 所示。

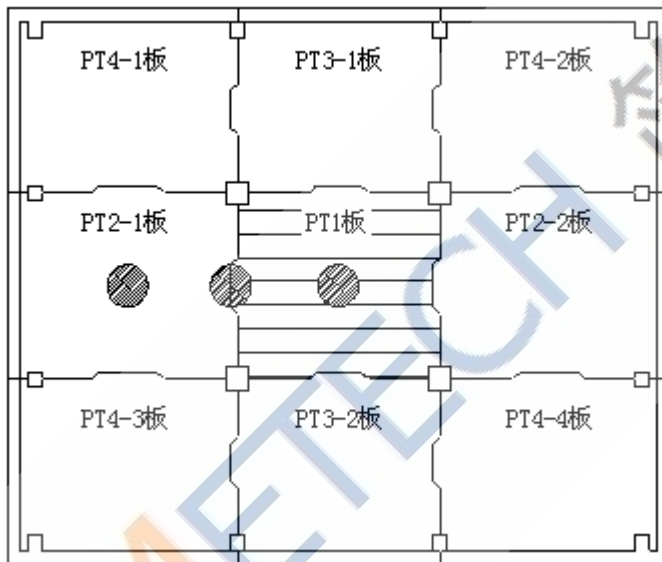


图 3.1 加载点示意图 该高桩预应力码头模型中的预应力钢筋为上下两层双向布置，根据试验

前数值计算所得结果，

仅对受力较大的预应力钢筋进行相应的应变测量。传感器的布置图如下图 3.2、3.3 所示，对其中标有序号的钢筋应变进行测量。

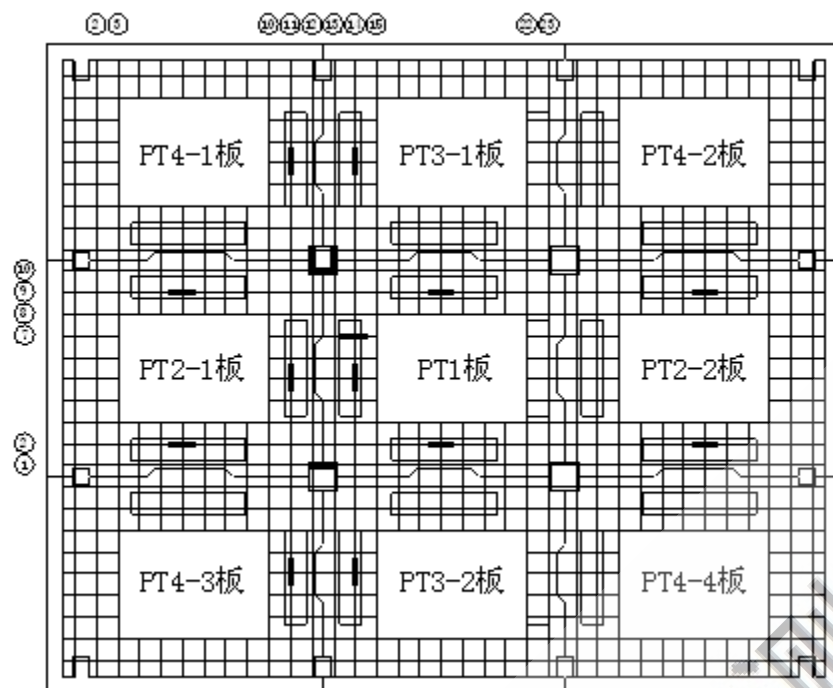


图 3.2 上层钢筋图

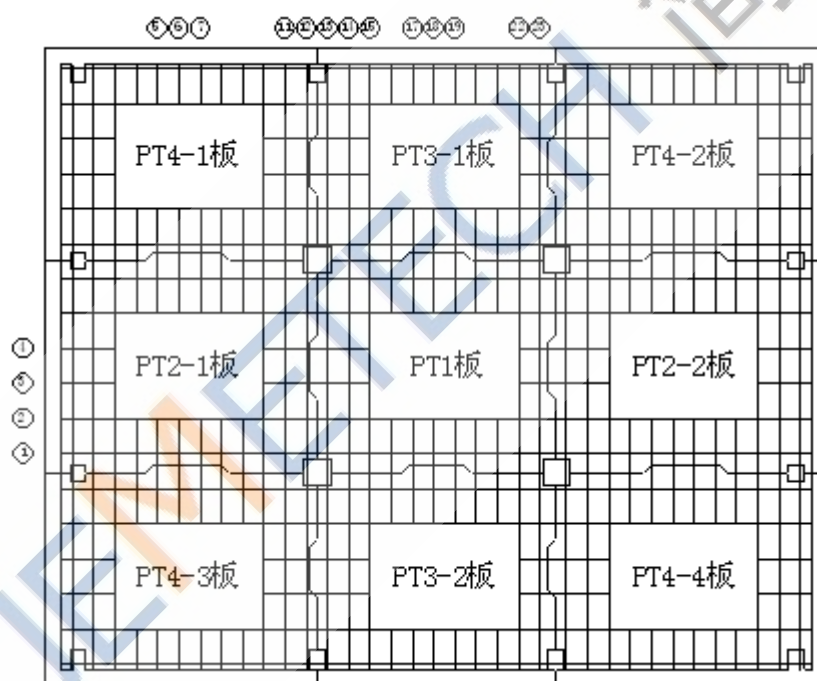


图 3.3 下层钢筋图 为了保证光纤光栅传感器与预应力钢筋的良好接触与牢固粘接,使测量

数据更加真实准确的

反应试验中预应力钢筋应变变化情况,在安装传感器之前,对预应力钢筋相应部位进行了打磨处理,将处理后的表面用酒精进行擦拭,将微型光纤光栅应变传感器沿钢筋轴向牢固地粘

贴在钢筋表面，如下图 3.4 所示。为了使传感器在试验过程中免受破坏，又用环氧树脂及纱布对光纤光栅传感器进行了加固处理。



图 3.4 FBG 应变传感器及预应力钢筋 试验所用的预应力钢筋采用后张法施工工艺，而高桩

码头模板上预留的孔洞较小，且内部并

不光滑，也存在一定的弯曲。为了避免在预应力钢筋安装过程中对传感器的损坏，选择了将测试用光纤光栅传感器安装在预应力钢筋张拉端端部，并设计制作了一种垫块，使其不会影响预应力钢筋张拉施工。安装及张拉后的情况如下图 3.5 所示。

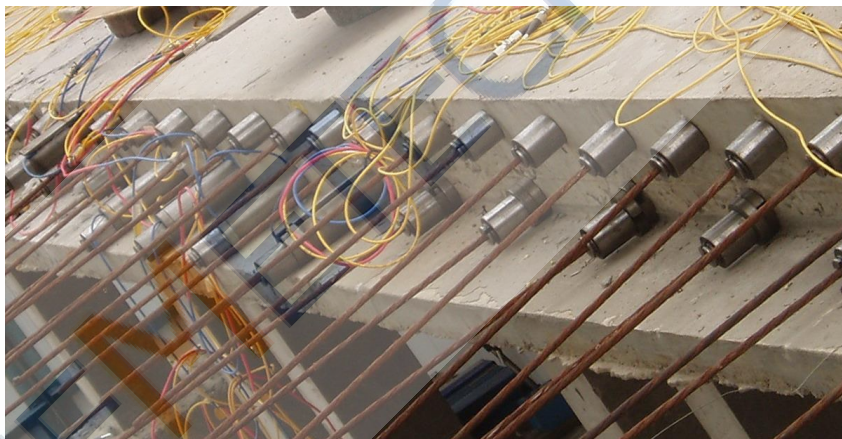


图 3.5 FBG 应变传感器安装图

此试验采用深圳简测科技有限公司生产型号为 JEME-iFBG-S15 的 15 路光栅光纤解调设备，这种解调仪集成了可调光纤滤波器模块以及扫频激光光源，仪器的测量范围大，测量精度高，与光纤光栅传感器连接方便快捷，工作性能良好。为了方便数据的存储和采集，试验同时利用了一种自行研制开发的光纤光栅应变仪同步采集系统对 FBG 传感器的中心波长进行采集。

将采集所得的结果进行处理，得到相应钢筋的应变变化情况。

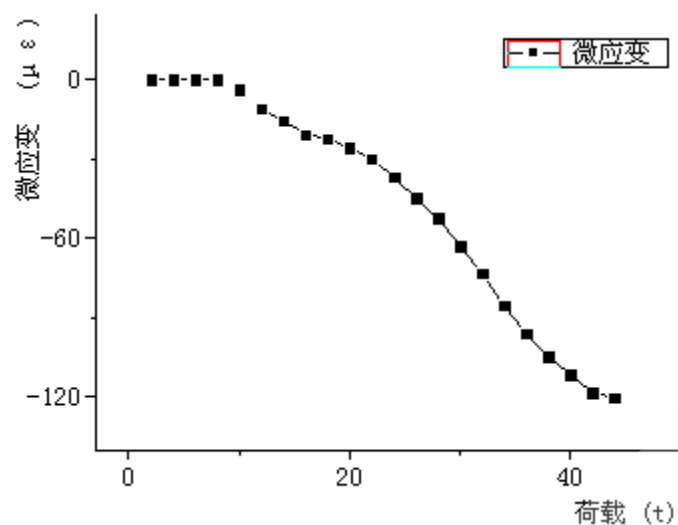


图 3.6 均布荷载情况上层#14 钢筋应变

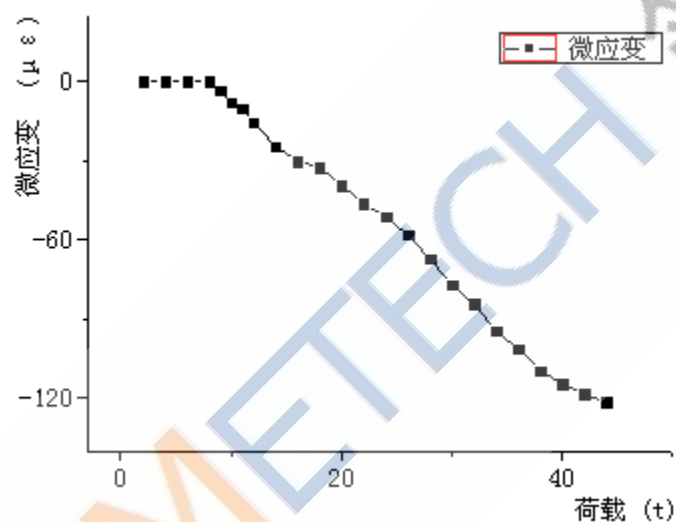


图 3.7 均布荷载情况下层#14 钢筋应变

上图 3.6、3.7 为在 PT1 板上布置均布荷载情况下钢筋应变变化情况，从图中可以看出，初期均布荷载较小时，预应力钢筋的应变很小，基本保持为 0；随着均布荷载力的不断增大，预应力钢筋的应变也随之不断增加，并且二者的变化趋势相同。

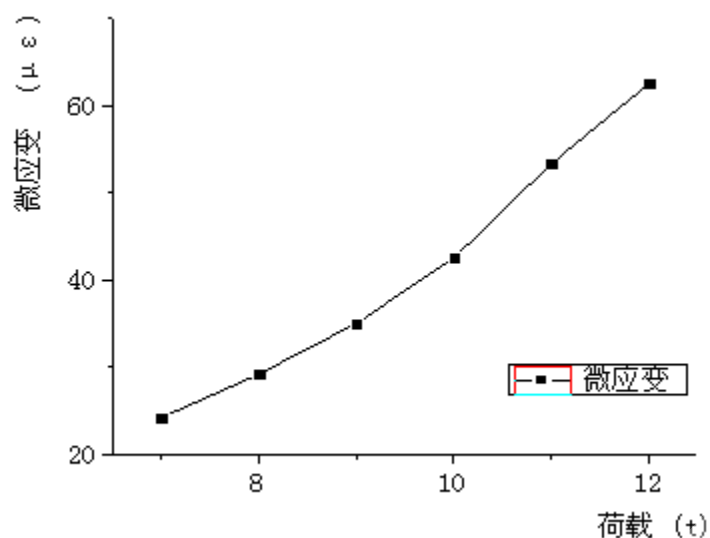


图 3.8 集中荷载（PT1 板中）情况上层#1 钢筋应变

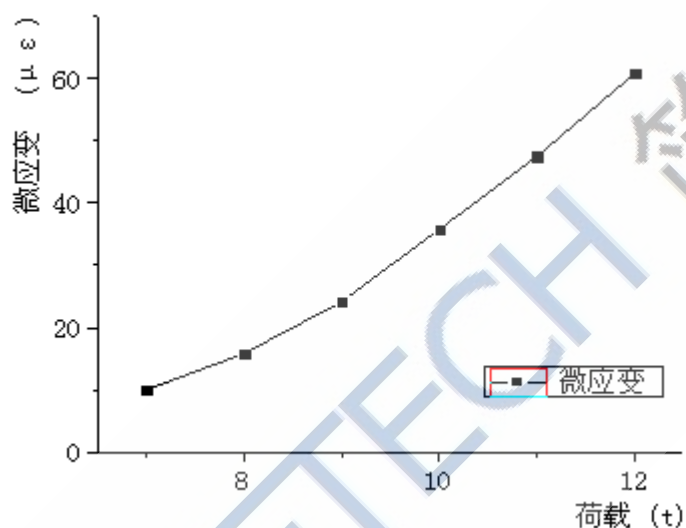


图 3.9 集中荷载（PT1 板中）情况下层#17 钢筋应变

上图 3.8、3.9 为在 PT1 板板中布置及集中荷载情况下钢筋应变变化情况，随着均布荷载力的不断增大，预应力钢筋的应变也随之不断增加，并且二者的变化趋势相同。

4 小结

根据裂缝监测的需要，提出了一种 FBG 传感器的减敏机制，并以此为基础开发制作了一种用于监测裂缝的减敏传感器。万能试验机标定表明，这种 FBG 裂缝传感器的线性相关度良好，减敏系数为 0.5001 与理论计算结果一致。这种传感器在预应力混凝土板模型试验得到了应用，成功的监测了在不同工况，不同荷载等级作用下混凝土板裂缝的变化情况，与传统

的应变片测量结果一致。分析可知,在荷载作用下,靠近荷载作用位置的裂缝宽度变化明显,且变化幅度随荷载的增大而增加。另外,在该模型试验中,也同时应用了一种微型应变传感器,对模型中预应力钢筋的应变进行了测量,并取得较好的试验结果。