

大坝模型试验的光纤传感变形监测

朱鸿鹄¹, 殷建华¹, 张林², 董建华², 冯嘉伟¹, 靳伟³

(1. 香港理工大学 土木及结构工程学系, 香港; 2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065;

3. 香港理工大学 电机工程学系, 香港)

摘要: 考虑到大坝模型试验中内部变形难以监测的现状, 研制了一种新型的基于光纤布拉格光栅(FBG)技术的光纤传感器。这种传感器为圆棒式结构, 其表面沿轴向安装了准分布式的光纤布拉格光栅。对于大坝物理模型, 该传感器可预埋入坝体和坝基的内部。当大坝受到油压千斤顶荷载产生变形时, 该传感器类似于根一端固定并同时受轴向拉、压和横向弯曲的弹性梁。根据弯梁原理, 由光纤布拉格光栅测得的应变结果可反算出大坝沿水平和竖向的位移分布。室内标定试验结果表明, 该传感器测得的变形量与其他常规传感器的读数一致。在一个二维混凝土重力坝物理模型的超载破坏试验中, 采用预埋于坝体、坝基内部的光纤传感器以及表面安装式位移计、电阻应变花对该模型进行实时的变形监测。试验结果验证了该光纤传感器在大坝模型内部变形监测中的有效性, 同时也揭示了大坝在超载作用下的变形机制和破坏形态。

关键词: 水利工程; 光纤传感器; 光纤布拉格光栅(FBG); 模型试验; 变形; 监测; 大坝

中图分类号: TV 321

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)06 - 1188 - 07

DEFORMATION MONITORING OF DAM MODEL TEST BY OPTICAL FIBER SENSORS

ZHU Honghu¹, YIN Jianhua¹, ZHANG Lin², DONG Jianhua², FUNG Kawai¹, JIN Wei³

(1. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 3. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: In consideration of the difficulty of monitoring internal deformation in dam model tests, a new optical fiber sensor based on fiber Bragg grating(FBG) technology has been developed. Quasi-distributed FBGs are installed on a slender bar(circular cross-section) along axial direction to make an FBG sensing bar. For the dam physical model in this study, FBG sensing bars can be embedded in predrilled holes within the dam structure and the dam foundation. When the dam is loaded by hydraulic jacks and dam deformations occur, the sensing bar works like an elastic beam under arbitrary transverse and axial loading. According to the bending beam theory, the distribution of both horizontal and vertical displacements can be calculated from the strains measured by the FBGs. The two sensing bars used in the test were calibrated in the laboratory before testing. The calibration results have shown that the displacements measured by the sensing bars were in good agreement with those obtained using other conventional gauges. Recently a two-dimensional gravity dam model was constructed and instrumented with two embedded FBG sensing bars, together with surface mounted displacement transducers and strain rosettes. In the overload test, all the sensors were used to perform real-time monitoring of the model dam deformation. Major monitoring results are presented, compared and analyzed. The displacements measured by the FBG sensing bars in

收稿日期: 2007 - 12 - 25; **修回日期:** 2008 - 04 - 03

基金项目: 香港理工大学跨学院合作项目(G - YE14); 香港理工大学与四川大学合作项目

作者简介: 朱鸿鹄(1979 -), 男, 2002年毕业于浙江大学土木工程学系, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程及光纤传感方面的研究工作。E-mail: zhuhonghu@hotmail.com

the dam model test are in good agreement with those from displacement transducers. The test results also reveal the deformation mechanism and failure mode of the gravity dam.

Key words: hydraulic engineering; optical fiber sensor; fiber Bragg grating(FBG); model test; deformation; monitoring; dam

1 引言

在大坝安全监测中, 监测对象包括大坝及坝基的变形、裂缝发展、混凝土和钢筋的应力以及渗流场、温度场等^[1]。大坝变形主要是在荷载作用或者自然环境条件(如气温)变化的情况下产生的, 根据观测对象的性质, 可以分为外部(表面)变形和内部变形。坝体和坝基的变形是大坝稳定性和潜在破坏的直接反映, 变形监测对于掌握大坝的健康状况、评价安全性以及及时发现缺陷, 都具有至关重要的意义。

为了准确把握大坝的受力变形特征、破坏规律和稳定性, 建立室内地质力学模型进行模拟试验是一种行之有效的手段^[2]。对于物理模型在外力作用下产生的外部变形, 一般采用高精度、抗干扰、体积小巧的表面安装式传感器进行监测, 如位移计、电阻应变花等^[3~7]。对于模型内部变形, 由于模型尺寸的限制, 通常无法埋置常规的仪器, 如多点位移计、测斜仪、沉降仪等, 进行实地测定。因此, 大坝模型内部变形监测一直以来都是大坝模型试验中的一个难点。

近年来, 光纤传感技术在国内外水利工程监测中得到了突飞猛进的发展^[8~12]。本文介绍了一种全新的基于光纤布拉格光栅传感技术的用于大坝模型内部变形监测的棒式光纤传感器。该传感器体积小, 可埋设于坝体或者坝基内部, 对大坝模型内部水平、垂直方向上的位移及其分布进行实时、远程的监测。该光纤传感器的尺寸和布置可根据实地情况进行设计和调整, 不仅适用于小比例尺的物理模型, 也同样适用于大坝的现场安全监测。

2 棒式光纤传感器工作原理

2.1 光纤布拉格光栅传感原理

在土木结构健康监测方面, 光纤布拉格光栅(FBG)、光时域反射(OTDR)、布里渊光时域反射(BOTDR)和法布里-皮洛特干涉(FPI)等是最为成熟和先进的传感技术。其中光纤布拉格光栅由于其

传感灵敏度高、可靠性好等优点, 是国际上应用较为广泛的光纤传感技术, 简称光纤光栅, 其工作原理如图 1 所示。当入射光进入光纤时, 布拉格光栅会反射特定波长的光, 该波长满足以下的特定条件^[13]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}A \quad (1)$$

式中: λ_B 为反射光的中心波长, 一般为 1 510~1 590 nm; n_{eff} 为光纤的有效折射率; A 为光纤光栅的栅距。

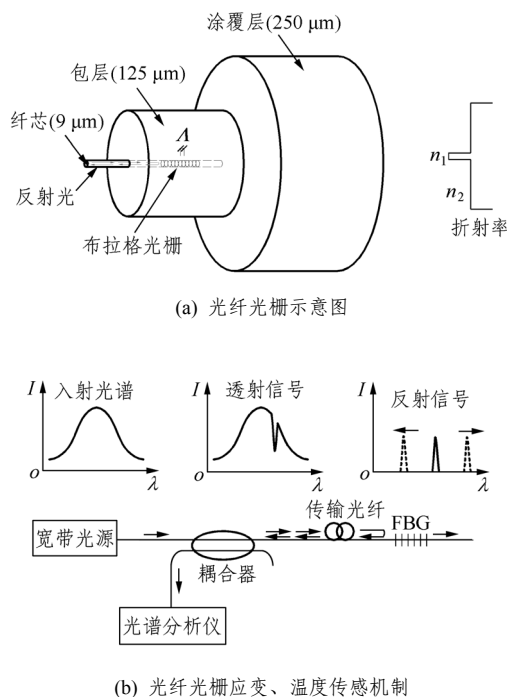


图 1 光纤布拉格光栅工作原理

Fig.1 Working principle of FBG

光纤光栅的中心波长值是其应变和温度有关的物理量。当光栅受到拉伸或者受热膨胀时, λ_B 增大; 当光栅压缩或者遇冷时, λ_B 减小。对于采用标准单模石英光纤制成的光纤光栅, λ_B 随温度和应变的变化规律^[14]可以用下式来表示:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}} = (1 - p^{\text{eff}})\Delta\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为中心波长的变化量; λ_{B0} 为不受外力、温度为 0 °C 时该光栅的初始中心波长; $\Delta\varepsilon$ 和 ΔT 分别为光纤光栅所受的应变和温度的变化量; α , ζ

和 p^{eff} 分别为光纤的热膨胀系数、热光系数和光弹系数。

式(2)可以改写成

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_B^{\epsilon} + \Delta\lambda_B^T = c_{\epsilon}\lambda_{B0}\Delta\epsilon + c_T\lambda_{B0}\Delta T \quad (3)$$

其中,

$$c_{\epsilon} = 1 - p^{eff}, \quad c_T = \alpha + \zeta$$

对于普通的石英光纤光栅而言, c_{ϵ} 和 c_T 分别为 $0.78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$ 和 $6.67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

为了准确测量物体的实际应变, 光纤光栅的读数一般需要进行温度补偿。如果在同一温度场内再增设一个不受外力作用的光纤光栅并测其温度响应 $\Delta\lambda_B^T$, 则真正的应变可以修正为

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda_B - \Delta\lambda_B^T}{c_{\epsilon}\lambda_{B0}} \quad (4)$$

光纤光栅的批量制作可采用相位掩模法^[15], 即透过特制的相位掩模板对载氢处理后的掺锗光纤的纤芯进行紫外激光干涉曝光。典型的制作设置如图 2 所示。

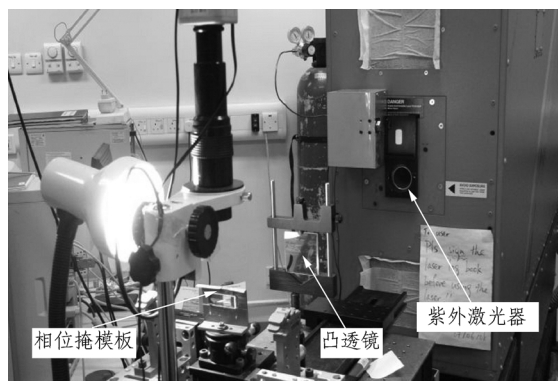


图 2 实验室内光纤布拉格光栅的相位掩模法写入
Fig. 2 Writing FBG using a phase mask in laboratory

与常规的电阻式、振弦式或电感式传感器相比, 光纤光栅不仅体积小、精度高、抗电磁场干扰、耐久性好, 还具有易于实现准分布式和自动化监测的优势。在工程应用中, 利用波分复用技术(WDM), 可将成百上千个不同中心波长的光纤光栅串联于一根直径只有 250 μm 的光纤中, 构成准分布式的应变、温度传感网络, 而不影响结构体的正常工作。经过特殊的封装, 光纤光栅还可以用来测定土压力、位移、应力、加速度等多个参量。这些优点使得光纤光栅监测技术不但适合桥梁、高层建筑, 而且也适用于岩土、水利工程中的结构体, 如土钉支护^[16-18]、桩基、大坝等。需要指出的是, 鉴于光纤纤细和软弱的特点, 对传感器和传输光缆必须进行

细致的保护。光纤传感原位监测成败的关键问题即在于如何在现场粗放作业的施工环境中实现传感器的埋设定位, 并保证其存活率。

2.2 棒式光纤传感器的研制

为了实现大坝模型的内部变形监测, 作者研制了新型的基于光纤布拉格光栅传感技术的棒式光纤传感器。设计思路如下: 根据实际应用情况, 选用具有较好的弹性和刚度的胶棒作为母体材料, 在其表面上沿 x, y 轴方向粘贴 4 条光纤, 每条光纤串联多个光纤光栅, 形成准分布式的应变传感序列。当棒式传感器沿竖向(或水平向)埋入结构体中后, 根据变形协调, 该传感器类似于于一根底端固定并受到拉弯作用的弹性梁。当该棒受到滑移发生轴向拉、压或者横向弯曲变形时, 就直接带动梁表面的光纤光栅产生拉、压应变, 见图 3(图中 a~d 分别为棒式传感器各个截面上十字形布设的 4 个传感器编号)。根据弯梁的基本理论, 如果测出梁 x, y 轴上各点的应变分布, 则可反算出该梁的轴向拉、压变形曲线, 以及 x, y 方向的受弯挠曲变形曲线, 即得到 x, y 和 z 轴各个方向上的位移值。需要注意的是, 该位移值为视底端为基准点的相对位移, 为了测得结构体的绝对位移, 需做底端位移为 0 的假设或者采用其他测量手段进行修正。

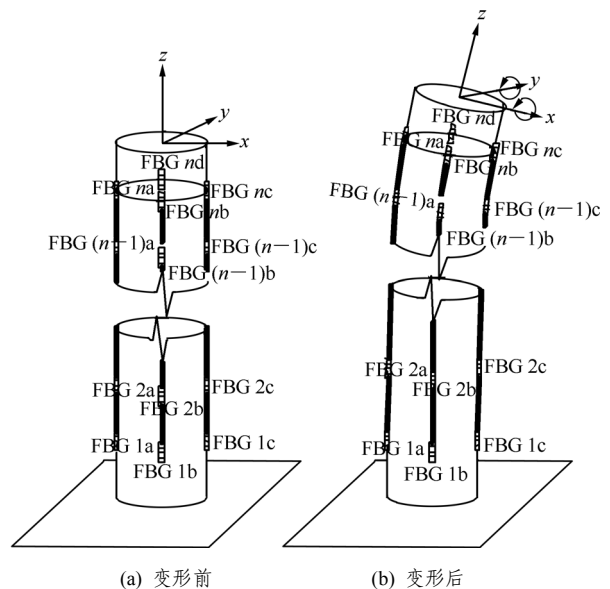


图 3 棒式光纤传感器工作原理示意图
Fig. 3 Schematic view of an FBG sensing bar

基于棒式光纤传感器的工作原理, 为了准确反映结构体的内部变形情况, 理论上光纤光栅的布设间距越小越好。但考虑到熔接技术和成本等原因, 在实践中一般采用 100 mm 左右的光栅间距。

3 棒式光纤传感器标定试验结果

3.1 标定试验方法

棒式光纤传感器的制作和标定均在香港理工大学土力学实验室进行。标定工作包括拉伸试验和挠曲试验，以测试传感器各个方向的位移响应以及标定试验参数。光纤光栅的中心波长采用 MOI 公司的四通道光纤光栅解调仪 sm 125 进行自动采集。该解调仪的波长分辨率高达 0.1 pm，采样频率为 1 Hz。在拉伸试验中，采用伺服拉伸仪对试件进行了多次单轴拉伸及卸载循环，并实时采集光纤光栅的中心波长值和表面粘贴式电阻应变片测量值；在挠曲试验中，在一端固定的棒式传感器上不同的位置人工施加一定的横向位移，采用多个数字位移计读取各点的挠曲变形，并与光纤光栅的测量结果进行校验。

3.2 标定试验结果分析

典型的标定试验结果见图 4。拉伸试验结果表明，光纤光栅的中心波长和施加的轴向位移具有极好的相关线性，相关系数 R^2 接近 1。试验中未发现任何的读数迟滞或疲劳现象，说明光纤光栅可以制成性能优异的位移传感器。根据图 4(a)的结果，可得到该光栅率定值为 1.497 2 nm/mm，初始中心波长 λ_{B0} 为 1 544.3 nm。在挠曲试验中，棒式光纤传感器的读数较为吻合，如图 4(b)所示。在试验中，当棒顶端发生 0.000 1L(L 为棒长)的位移时，光纤光栅的中心波长已经有明显的反应。而当顶端发生 0.05L 的位移时，该传感器仍能正常工作。这表明，与传统的位移计相比，该棒式光纤传感器具有精度高、量程大的优点。

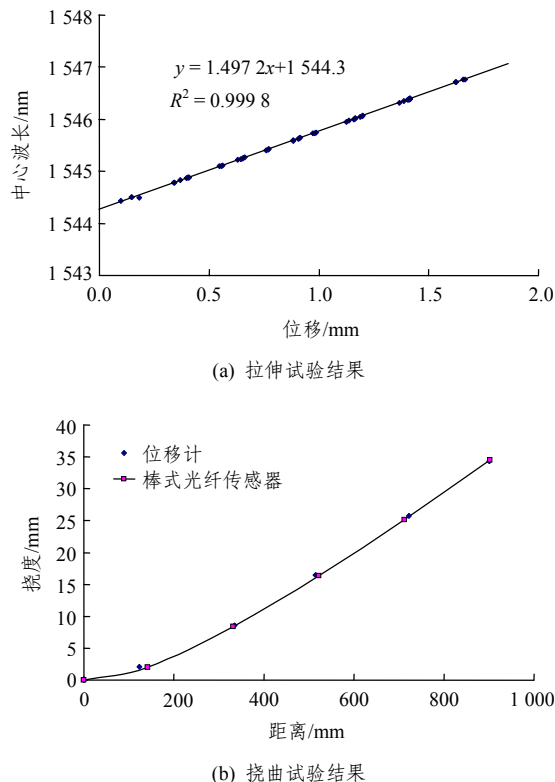
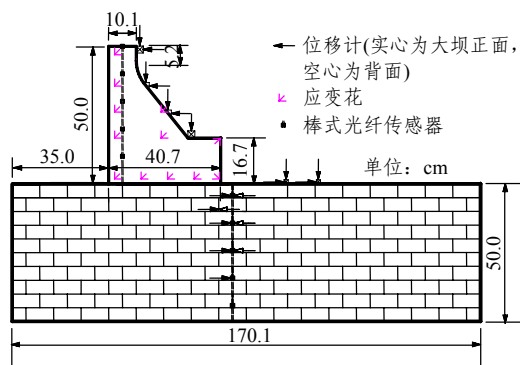


图 4 棒式光纤传感器标定试验典型结果

Fig. 4 Typical calibration test results of FBG sensing bars

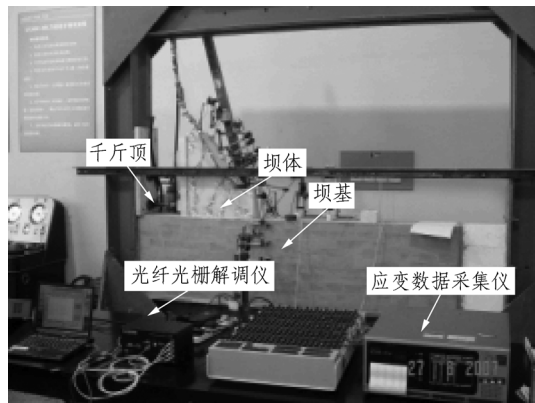


(a) 大坝剖面及监测点布置图

4 重力坝模型超载破坏试验

4.1 试验概况

重力坝模型超载破坏试验和监测工作在四川大学水利水电学院完成。为了确定四川某碾压混凝土重力坝典型坝段的安全度并模拟其超载破坏的过程，建立了一个二维的混凝土重力坝物理模型。大坝原型与模型的几何比 C_L 取 150，模型具体几何尺寸见图 5。坝体模型采用重晶石粉、少量石膏粉及水浇筑而成。作为混凝土仿真材料，该模型材料具有较好的线弹性和破坏断裂脆性，密度为 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，变形模量为 133 MPa。坝基由预制的砌块组



(b) 超载试验监测现场

图 5 重力坝模型超载试验监测布置

Fig.5 Instrumentation of the gravity dam model in overload test

成, 坝基模拟深度为 1 倍坝高。砌块单块尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$, 主要由重晶石粉、机油及掺合料等配制而成, 变形模量控制为 55.4 MPa 。

在该试验中, 外荷载重点考虑水压力, 在计算出原型的工作荷载后, 根据相似原理换算出模型所受的水压力, 然后采用千斤顶加荷法进行静力加载。根据荷载的分布特征, 采用 2 个油压千斤顶施加水平方向上的压力, 并通过传压木板扩散到坝面上形成分布荷载, 以模拟实际的水压力分布。为了研究大坝的变形机制和破坏形态, 对模型进行逐级加荷, 直至结构完全破坏。

4.2 监测仪器布置

本次超载破坏试验的监测重点为该坝段在超载情况下的应力、应变分布以及内部、外部变形情况, 为确定大坝结构的极限承载力和超载安全系数提供参考依据。首先, 在坝体模型表面安装了 12 组三片直角式应变花, 以确定主应力的方向和大小。其读数采用 UCAM-70AL 型万能数值测试装置进行实时测量。外部变形监测的对象包括大坝表面的垂直位移(用于分析坝体的转动)、水平位移(用于分析坝体的挠曲)。为此布置了 14 个水平方向和 6 个竖直方向的差动变压器式位移计(LVDT)。位移计的读数采用 SP-WB 型位移数显仪进行采集。

监测工作的最大难题在于如何测定大坝内部的变形, 包括模型坝体内部和地基深处的水平位移和竖向沉降的分布。为了解决这一问题, 将两根棒式光纤传感器埋入大坝模型, 其中一根埋设于坝体内部迎水面附近, 以测定从坝顶中心线到地基顶面的挠曲和竖向位移; 另一根则安装于坝趾附近的地基中(下游面), 以测定坝基的水平 and 垂直方向上的位移, 具体布置位置见图 5。

在水平荷载作用下, 该二维模型只会产生 x, z 两个方向上的变形, 所以每根棒式传感器上只需对称布置两根准分布式传感光纤。每根光纤上串联 5 个光纤光栅, 间距均为 100 mm 。由于超载破坏试验持续时间较短, 故可以忽略温度变化对光纤传感器读数的影响, 不必采取温度补偿措施。为了埋设方便, 传感器设计棒径为 10 mm 。在模型制作过程中, 在坝体和坝基内的布设位置预留埋设孔, 孔径为 14 mm , 深 500 mm 。在埋设传感器时, 先将适量硅胶作为灌浆材料注入孔中, 再迅速插入棒式光纤传感器。埋设就位时尽量做到埋设垂直、顺畅, 避免棒式光纤传感器自身的轴向旋转, 并使棒上粘贴光纤布拉格光栅的方向与迎水面方向一致, 以确保测量结果反映大坝的真实变形。24 h 后硅胶即完全固化。经

检测传感器和大坝模型结构体嵌固牢靠, 基本满足变形协调条件。

4.3 试验过程

在超载破坏试验开始前, 先记录各传感器的初始读数, 然后施加 $0.5q$ (q 为正常工况下的水压力) 的水平推力, 约 10 min 后所有传感器读数完全稳定, 开始第一次应变和位移值的采集。之后施加的荷载依次为 $0.8q, 1.0q, 1.2q, 1.4q, 1.6q, \dots$, 直至大坝发生完全破坏为止。

在试验过程中观测到的模型变形和破坏形态为: 当荷载从 $0.5q$ 逐级增加到接近 $3.0q$ 时, 各传感器的读数明显增大, 说明此时大坝变形发生一定的突变。坝踵处出现初裂现象, 表明坝体和地基的接触面上的抗滑力逐渐无法抵抗水压推力。继续加载到 $4.0q$ 时, 坝基的开裂程度加剧, 坝踵附近的竖向主裂缝迅速扩展, 坝趾附近出现局部压碎现象(压剪破坏), 坝基水平裂缝数量不断增加, 表明地基已完全破坏。在继续加载到 $7.4q$ 过程中, 可以看到坝基浅层的水平主裂缝完全贯通, 此时大坝的变形主要表现为坝基的水平剪切滑动(剪切失稳破坏), 坝踵下的主张拉裂缝已达 6 mm 以上。由于坝基为砌块砌筑而成, 所以位移均发生于薄弱的砌块接缝处, 见图 6。由以上分析可以推测, 大坝的初裂超载系数和最终破坏安全系数分别在 3.0 和 4.0 左右。大坝的破坏首先出现在坝踵和坝趾附近的地基中, 在大坝设计和现场施工中应对这两处薄弱部位进行适当处理, 以保证大坝结构体的整体稳定性。

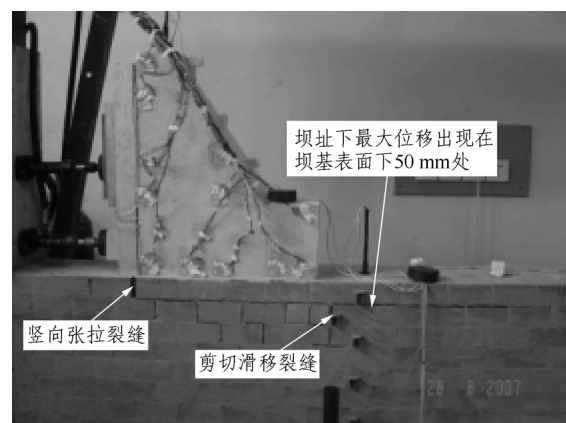


图 6 重力坝模型超载破坏形态

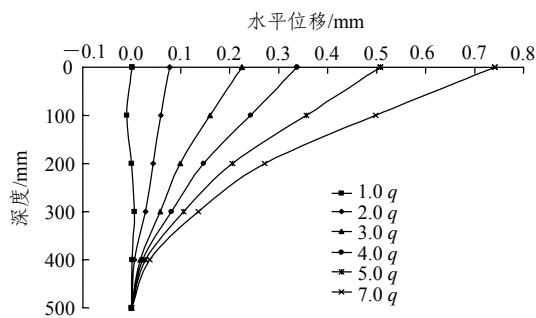
Fig.6 Overload failure mode of the gravity dam model

5 大坝内部变形监测成果分析

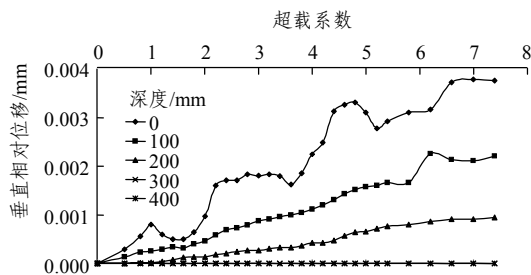
5.1 坝体水平和垂直位移结果

坝体水平位移即坝体在受到水平推力时产生的

挠曲变形, 垂直位移则是大坝坝体在垂直方向上相对地基顶面的伸缩变形(拉伸为正)。棒式光纤传感器测得的结果如图 7 所示。可以看到, 坝体的变形主要表现为水平方向上的挠曲, 位移的最大值发生于坝顶处。同时, 坝体迎水面在垂直方向上产生了微量的张拉变形, 说明这里出现了拉应力。以上结果亦表明, 由于受到水压力的作用, 大坝结构体有绕坝趾转动的趋势。



(a) 不同超载系数下水平位移沿深度分布曲线



(b) 不同深度处的超载系数 - 垂直(相对)位移关系曲线

图 7 模型坝体内部变形的棒式光纤传感器监测结果

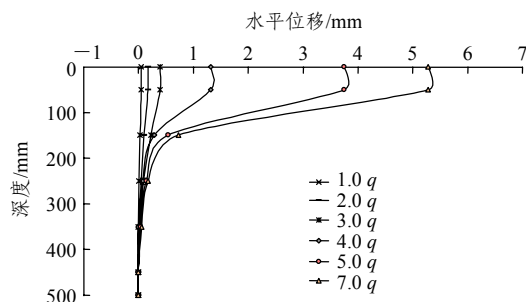
Fig.7 Dam body inner deformations monitored by the FBG sensing bar

5.2 坝基水平和垂直位移结果

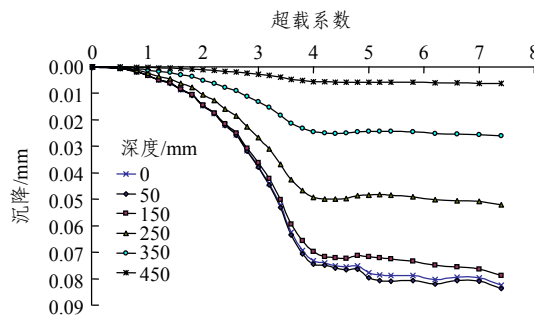
坝基水平位移分布曲线反映的是大坝地基在同一铅垂线上水平位移沿深度的分布, 坝基的垂直位移即地基沉降。图 8 中显示的棒式光纤传感器监测结果表明, 在加荷初期, 坝基变形主要由地基沉降产生, 坝趾处受压变形较多, 说明这里出现了应力集中。随着荷载的逐级增加, 地基开始出现水平方向的剪切滑移裂缝, 坝趾附近的水平位移迅速发展。由图 8(b)可以看出, 大坝初裂超载系数约为 2.6, 最终破坏超载系数约为 3.8。这与根据其他监测仪器结果得到的分析结论基本一致。

5.3 棒式光纤传感器、位移计读数对比及误差分析

坝趾以下的最大位移出现在坝基表面下 50 mm 处(见图 6)。图 9 为棒式光纤传感器和位移计对于坝基表面下 50 mm 深度处最大水平位移监测结果的比



(a) 不同超载系数下水平位移沿深度分布曲线



(b) 不同深度处的超载系数 - 沉降关系曲线

图 8 模型坝基内部变形的棒式光纤传感器监测结果

Fig.8 Dam foundation deformation monitored by the FBG sensing bar

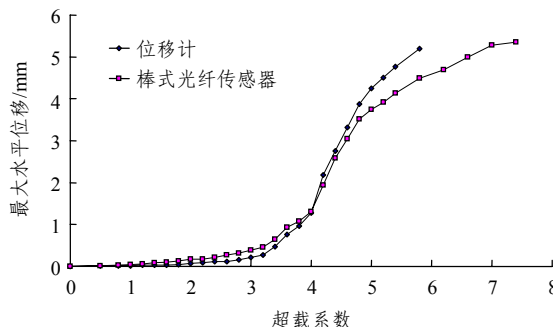


图 9 坝趾下最大水平位移监测结果比较(坝基表面下 50 mm 处)

Fig.9 Comparison of monitored maximum horizontal displacements under the dam toe(50 mm below the foundation surface)

较。可以看到, 两者的趋势较为一致。棒式光纤传感器测得值在加荷初期略为偏小, 后期则偏大。两者之间的差距主要来源于于以下两个方面:

首先, 由于坝基并非均质材料, 受力后水平变形几乎都在地基 50 mm 深度处的砌体接缝发生。界面传递过来的位移使得棒体在该处发生应变集中。因而靠近该处的 2 个光纤光栅的响应最大, 而其他距离稍远的 8 个光栅反应很小。由于 10 个光栅均布于 500 mm 长的范围内, 结构体变形的过度集中使得传感器整体的精度不能得到很好的保证。这说明在实际应用中应充分考虑到这一情况, 在重点观察

区域适当减小光栅布设间距,以提高敏感部位的测试精度,减少测量误差。

其次,位移计测得的是大坝表面的位移值,而传感器测得的是大坝内部的变形分布。试验中假定该问题为二维的平面应变情况,但是在实际中内部、外部变形两者之间可能存在一定的差异。事实上,即使在大坝两个侧面的同一位置处,位移计的测得值之间也会发生偏差。如在7倍超载时,坝基150 mm深度处2个位移计的读数分别为0.17和0.23 mm,相差0.06 mm。另一方面,由于模型和光纤传感器之间的应变由硅胶传递,界面处的变形协调亦难以完全保证。以上的问题需要进行更多的试验研究加以探索和改进。

6 结 论

(1) 基于光纤布拉格光栅传感技术,成功研制了适用于大坝物理模型的内部变形监测的棒式光纤传感器。室内标定试验结果验证了该传感器具有精度高、量程大等优点。

(2) 将棒式光纤传感器埋设于一个二维重力坝的物理模型中,解决了棒式光纤传感器的布设工艺。同时在坝体和坝基表面安装了应变花和位移计,对超载条件下大坝的内部、外部变形进行了实时监测。监测结果显示,棒式光纤传感器测得的变形值与位移计的结果较为吻合,证明该光纤传感技术用于监测大坝的内部变形是可行的。

(3) 由超载破坏试验的监测结果可以得出,该坝坝段的初裂超载系数约为2.6,最终破坏超载系数约为3.8。大坝模型的超载破坏形态主要表现为坝踵处发生张拉开裂,坝趾处出现压剪破坏。

参考文献(References):

[1] DUNNICLIFF J. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1993.

[2] 张林, 费文平, 李桂林, 等. 高拱坝坝肩坝基整体稳定地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3465 - 3469. (ZHANG Lin, FEI Wenping, LI Guilin, et al. Experimental study on global geomechanical model for stability analysis of high arch dam foundation and abutment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3465 - 3469. (in Chinese))

[3] 董建华, 谢和平, 张林, 等. 大岗山双曲拱坝整体稳定三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2027 - 2033. (DONG Jianhua, XIE Heping, ZHANG Lin, et al. Experimental study on 3D geomechanical model on global stability of Dagangshan double curvature arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2027 - 2033. (in Chinese))

[4] 陈建叶, 张林, 陈媛, 等. 武都碾压混凝土重力坝深层抗滑稳定破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2097 - 2103. (CHEN Jianye, ZHANG Lin, CHEN Yuan, et al. Failure model test on deep anti-sliding stability of Wudu RCC gravity dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2097 - 2103. (in Chinese))

[5] GHOBARAH A, GHAEMIAN M. Experimental study of small scale dam models[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(11): 1241 - 1248.

[6] MORIN P B, LÉGER P, TINAWI R. Seismic behavior of post-tensioned gravity dams: shake table experiments and numerical simulations[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(2): 140 - 152.

[7] CHEN S H, LI Y M, WANG W M, et al. Analysis of gravity dam on a complicated rock foundation using an adaptive block element method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7): 759 - 763.

[8] FUHR P L, HUSTON D R. Multiplexed fiber optic pressure and vibration sensors for hydroelectric dam monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 1993, 2(4): 260 - 263.

[9] VOET M R H, VERWILGHEN B. Fiber optic pore-water-pressure sensing system for structural monitoring of a large dam at L'Eau D'Heure in Belgium[C]// Proceedings of SPIE(vol. 3099). [S. l.]: [s. n.], 1997: 327 - 339.

[10] KRONENBERG P, CASANOVA N, INAUDI D, et al. Dam monitoring with fiber optics deformation sensors[C]// Proceedings of SPIE(vol. 3043). [S. l.]: [s. n.], 1997: 2 - 11.

[11] BROENNIMANN R, NELLEN P M, ANDEREGG P, et al. Application of optical fiber sensors on the power dam of Luzzzone[C]// Proceedings of SPIE(vol. 3407). [S. l.]: [s. n.], 1998: 386 - 391.

[12] 蔡德所. 光纤传感技术在大坝工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (CAI Desuo. Applications of the optical fiber sensing technology to dam engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002. (in Chinese))

[13] MOREY W W, MELTZ G, GLENN W H. Fiber optic Bragg grating sensors[C]// Proceedings of SPIE(vol. 1169). [S. l.]: [s. n.], 1989: 98 - 107.

[14] OTHONOS A, KALLI K. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing[M]. London: Artech House, 1999.

[15] HILL K O, MALO B, BILODEAN F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035 - 1037.

[16] YIN J H, ZHU H H, JIN W, et al. Performance evaluation of electrical strain gauges and optical fiber sensors in field soil nail pullout tests[C]// Geotechnical Advancements in Hong Kong since 1970s, the HKIE Geotechnical Division 27th Annual Seminar. Hong Kong: [s. n.], 2007: 249 - 254.

[17] ZHU H H, YIN J H, JIN W, et al. Soil nail monitoring using fiber Bragg grating sensors during pullout tests[C]// The Joint 60th Canadian Geotechnical and 8th IAH-CNC Conferences. Ottawa: [s. n.], 2007: 821 - 828.

[18] YIN J H, ZHU H H, JIN W. Monitoring of soil nailed slopes and dams using innovative technologies[C]// The 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes. Xi'an: Taylor and Francis, 2008. (to be pressed)