

# 采用分布式光纤传感技术的土坝模型渗漏监测分析

朱萍玉<sup>1,2</sup>, 蒋桂林<sup>3</sup>, 冷元宝<sup>2</sup>

(1. 广州大学机械与电气工程学院, 广州 510006; 2. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003;

3. 湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201)

[摘要] 建立了采用分布式光纤传感技术的模拟堤坝渗漏监测系统, 用来人工模拟土坝渗漏, 并得到该种情况下测试光纤长度上的应变图, 验证了采用分布式光纤传感技术监测土坝的可行性; 运用 ANSYS 软件建立与试验模型相对应的有限元分析模型, 通过选择合适单元, 简化边界条件, 对一定的工况进行加载分析, 得出载荷与应变的关系, 以及载荷与塌陷土层重量的关系。文中方法和结论有助于进一步定量研究土坝渗漏大小程度和光纤传感器的合适埋设深度。

[关键词] 光纤传感技术; 土坝模型; 监测; 应变; ANSYS

[中图分类号] TP212.14; TN247 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)03-0082-04

## 1 前言

目前, 我国堤坝众多, 且很多属于土石坝, 黄河堤坝则是其中的典型代表。黄河历来水少沙多, 致使河床不断升高, 并形成“悬河”或“多级悬河”, 近年来修建的险工和控导(护滩)工程旨在对河道进行整治, 保护有生命保障线和防洪保障线之称的黄河大堤。然而, 这些土石坝基础较差, 当洪水冲刷来临时, 易发生根石走失和坍塌, 如险情发现较迟而导致抢险物料投入不及时, 则会造成坝身土胎外露, 土体迅速被水流带走, 使险情恶化。因此, 对堤坝安全的监测和预警显得尤为重要<sup>[1,2]</sup>。

光纤对于外界温度和应力变化敏感, 使得光纤越来越多地被用作监测温度和应力变化的传感器而埋设于各种介质中。国外已有将光纤埋设于堤坝中监测堤坝渗漏情况方面的应用, 国内亦逐渐开始注重光纤传感技术在这方面的研发工作。光纤实际应用的前提是准确地掌握其相关性能, 目前对于光纤的光性能分析, 大多数研究集中在对裸光纤的直接

拉伸应变性能分析。而光纤应用于监测堤坝的形变和渗漏时, 光纤与周边松散介质的随动性将影响光纤传感器反应土层沉降而产生的应力应变<sup>[3]</sup>。因此沉降应力与光纤应变之间的关系以及光纤应变与被监测土坝的沉降程度之间关系的确定, 直接影响光纤在实际应用中的标定。

## 2 光纤监测模拟堤坝渗漏实验

在采用分布式光纤传感技术监测堤坝渗漏隐患时, 渗漏发生的判据可借助温度和应变两个物理量, 而实际渗漏发生时和加剧过程中的信号变化受具体边界条件影响。堤坝渗漏模拟实验采用黄河堤防原土建立堤坝模型, 监测系统的分布式光纤传感器分为四层布设<sup>[4]</sup>, 如图 1 所示, 研究采用分布式光纤传感技术实时监测模拟堤坝渗漏的可行性、可靠性以及应变信号特征。

模拟系统包括水箱、水泵、流量控制阀、土堤坝模型、光纤、DiTeSt-STA202 分析仪及其分析软件和附件。考虑到分析仪的空间分辨率为 0.5 m, 土

[收稿日期] 2009-12-08; 修回日期 2010-11-15

[基金项目] 国家水利部 948 引进国际先进技术基金资助项目(200608); 清华大学水利系与黄河水利科学研究院博士后工作站基金资助项目(201002)

[作者简介] 朱萍玉(1971—), 女, 湖北钟祥市人, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感及应用; E-mail: zhu.pingyu@gmail.com

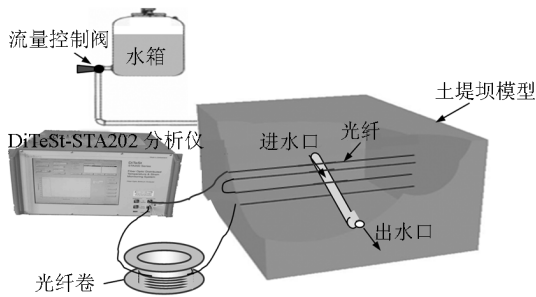


图1 采用分布式光纤传感技术监测土堤坝模型渗漏和沉降的系统

Fig. 1 A monitoring system of seepage and settlement for an earth embankment dam model using fully distributed optical fiber sensing technology

变出现了大的变化,应变最大值达 400 微应变,其他位置的光纤应变只出现微变。根据光纤埋设的布局和标定可得,40 m 附近正是沉降发生位置的正下方光纤段,实验结果较好地证明了采用分布式光纤传感系统监测土堤坝渗漏的可行性。

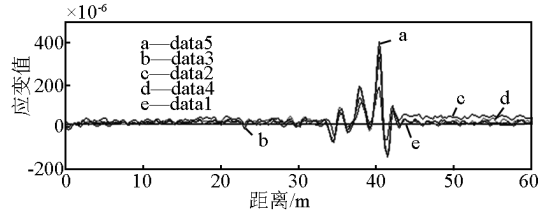


图3 光纤传感器监测模拟渗漏的应变曲线

Fig. 3 The strain curve of optic fiber sensors to monitor simulant seepages

堤坝模型尺寸建为 2 m × 1.2 m × 1 m。预埋管道拔出后在坝体内形成模拟的渗流通道,水箱中的水通过通道渗漏流经坝体,模拟渗漏发生。流量控制阀控制水流大小,以模拟不同的渗漏程度。渗流进水口和出水口布置在模拟堤坝的中间,进水口距离底部 0.8 m,出水口距离底部 0.25 m。在距离模拟堤坝尾端开始铺设传感光纤,下面两层光纤间距为 0.1 m,从堤坝底部起的第三层和第四层之间的光纤间距为 0.05 m。信号由分布式光纤传感分析仪 DiTeSt - STA202 采集,并通过自带软件对信号进行前处理,定量给出标定后的光纤段上应变变化信息,本实验关注有明显变化的光纤段 39.25 ~ 41.00 m。

### 3 实验结果

图 2 为大流量下堤坝模型发生塌陷后的外观图,在渗漏通道的出溢口附近发生了深度沉降和塌陷,该处的土层较之渗流通道的其他段更厚重。

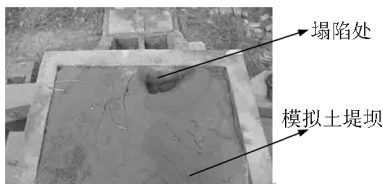


图2 模拟土堤坝塌陷外观图

Fig. 2 The appearance of soil collapse of the earth embankment dam model

图 3 为应用 DiTeSt - STA202 分析仪在堤坝模型发生渗漏前后扫描 5 次所得的应变图, data1 ~ data5 分别表示光纤整个长度上 5 次扫描的光纤应变曲线。由图可知,光纤在标定的 40 m 处附近,应

## 4 基于 ANSYS 的模拟土堤坝模型及分析

### 4.1 基于 ANSYS 的模拟土堤坝模型

尽管实验证明光纤传感器能够监测堤坝由于渗漏而导致的沉降,但对于堤坝沉降的大小程度还不能准确地进行定量判断。本文充分利用 ANSYS 软件方便模拟加载的优势,建立模拟堤坝模型,并对边界条件适当简化,结合实验结果合理加载,定量分析了堤坝模型沉降大小和光纤应变之间的关系。在 ANSYS 软件界面建立与实际实验尺寸相同的堤坝模型,并进行网格划分,如图 4 所示,(a)为整个模拟堤坝模型的网格划分示意图,(b)为光纤的网格划分示意图,(c)为模拟堤坝模型与光纤网格接触处的放大细节图。

由于土壤层的力学性能很难把握,土体的应力应变关系呈现为复杂的弹塑性本构关系<sup>[5]</sup>,但是光纤的应变监测在大沉降发生之前,光纤和土层的变形均不大,故假定土坝发生大沉降之前,土体和光纤均呈现线性变化。利用可构造三维实体结构的 SOLID45 单元的性质构造模拟土堤坝的三维实体结构模型,每个单元通过 8 个节点定义,每个节点分别有沿着  $x$ 、 $y$  和  $z$  3 个方向平移的自由度。假定定义的单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力。由于 BEAM188 单元适合于分析从细长到中等粗短的梁结构,该单元基于铁木辛哥梁结构理论,并考虑了剪切变形的影响,因此非常适合用于建立堤坝模型中的光纤。BEAM188 是三维线性(2 节点)或者二次梁单元,每个节点有 6 个或者 7 个自由度。在不考虑横截面子模型的基础上,BEAM188

支持弹性、蠕变和塑性模型,允许改变横截面惯性属性来实现轴向伸长的功能。默认情况下,通过截面面积的改变使得单元的体积变形后仍不变化,这种

默认的值对于弹塑性应用是适用的。理论分析中,模拟土堤坝模型和光纤的各参数值如表 1 所示<sup>[6,7]</sup>。

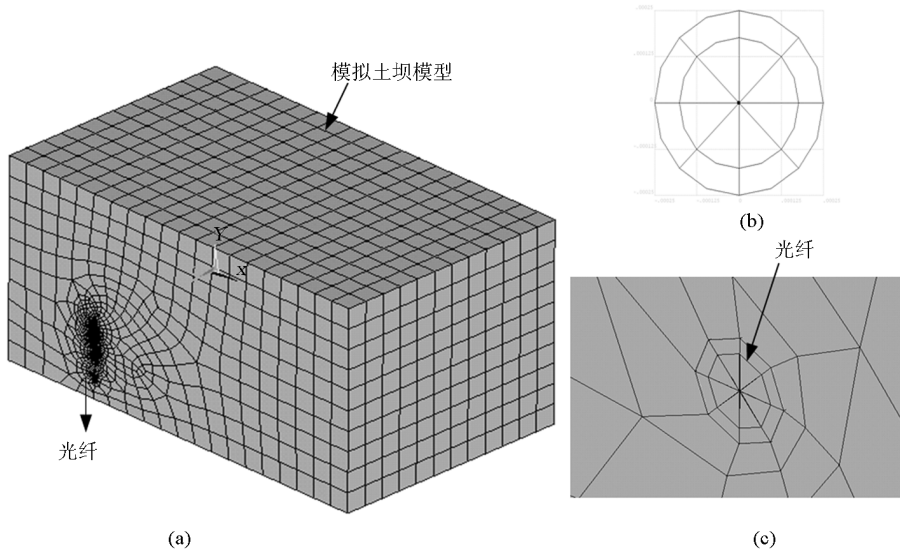


图 4 模拟土堤坝网格模型

Fig. 4 Mesh model of the earth embankment dam model

表 1 基本参数值表

Table 1 The basic parameters

模型	弹性模量/Pa	泊松比	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	尺寸/m
土堤坝模型	$5.4 \times 10^6$	0.12	1 600	$2 \times 1.2 \times 1$
光纤	$7.3 \times 10^{10}$	0.17	2 200	$0.25 \times 10^{-3}$ (半径)

#### 4.2 工况及边界条件的分析与简化

由于光纤的尺寸足够小,光纤埋设于堤坝中不会改变堤坝的强度,埋入堤坝中的光纤发生变形时随周围土层的形变而发生变形,与周围接触土层之间未发生大的相对摩擦,即光纤与周围土层可视为一个整体,但光纤的材料和单元与堤坝土体不一样,分析时分别建立了土层和光纤的模型,并设置了相应的参数。由于模型坝采用的 SOLID45 和光纤单元 BEAM188 节点不相容,因此,实施模拟运算前对两个单元接触面节点进行了节点耦合。

一般光纤所受的压力随渗漏发生的大小程度而变化,渗漏程度越严重,光纤所受来自塌陷土层的压力将越大。当渗漏逐渐严重甚至发生塌陷时,光纤会在急剧塌陷的土层作用下发生大的变形。实验中发生大流量时,渗漏通道上的土层最厚处发生了塌陷,即在出溢点附近的土体出现了较大范围的沉降

和塌陷,坝中沉降上方对应光纤段显示应变陡增。对于建立的 ANSYS 模拟土堤坝模型,在对模型约束和加载时,考虑到模拟堤坝底层土相对地面不会发生移动,则首先对光纤两端和模拟坝底部施加全约束,然后在发生沉降的坑土范围表面逐步施加不同大小的载荷。如图 5 所示,划分网格时把模拟堤坝模型的上表面分成  $20 \times 12$  个单元,发生塌陷的范围相当于图中深色框的加载区域。最后对模拟堤坝模型进行分析和后处理,输出所求参数和结果。图 6 为模拟堤坝模型加载后的等效应变图,在加载中心部位凹陷最为厉害,应变值最大,ANSYS 分析结果和实际实验塌陷的外观图吻合。

#### 4.3 载荷与应变的关系

在对模拟堤坝模型进行加载分析时,模型上方所施加的载荷不同,光纤长度上各单元的应变值也不同。施加载荷越大,光纤应变越大。由于施加的载荷模拟沉降土壤的压力,因此载荷的大小可以用来定性衡量沉降大小程度,实现通过应变值判断沉降大小程度的目的。

在 ANSYS 模型中逐步在沉降上方加载,每加载一次可得到 4 根光纤相对应的最大应变值。把载荷和光纤对应的应变值在 MTALAB 软件中进行拟合,可得到载荷大小与光纤应变值的关系,如图 7 所示。

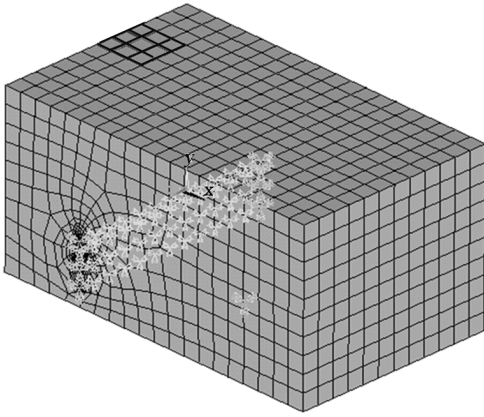


图5 土堤坝模型的施加约束和载荷图

Fig. 5 Imposed constraints and load of the earth embankment dam model

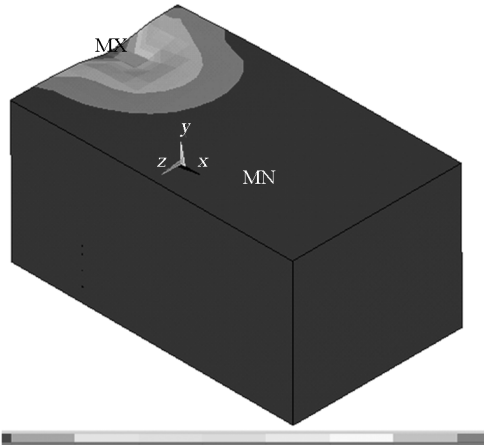


图6 模拟堤坝土模型加载分析后的等效应变图

Fig. 6 Equivalent strain of the embankment dam earth model after loading and analysis

data1 ~ data4 4条直线分别表示最下层、次下层、次上层和最上层的光纤受到的载荷与应变的关系。由图得知,载荷与光纤的应变呈线性关系。当光纤的埋设深度不一样时,代表载荷与光纤应变关系的直线斜率有差异,即埋设于不同深度的光纤对载荷的敏感度不一样。其中,最上层光纤由于离载荷最近,对载荷最敏感。

## 5 结语

通过实体实验和软件模拟,实现了对堤坝渗漏监测中光纤传感器的受力分析,得出了有益的结论。实际实验中,发生塌陷的干燥土层产生的重力约 37.6 N,

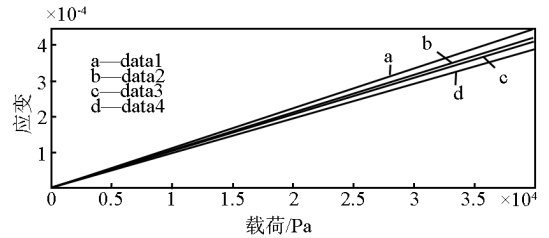


图7 模拟土堤坝模型沉降上方载荷与光纤应变的关系图

Fig. 7 The relationship between settled load on the top of the earth embankment dam model and strain of optic fiber

在发生沉降时,光纤的最大应变值约为 400 微应变。软件模拟分析中,当光纤的应变值为 400 微应变时对应的载荷约为  $3.6 \times 10^4$  Pa,加载面积约为  $0.09 \text{ m}^2$ ,则与之对应的载荷约为 3.24 kN,为塌陷干燥土层重力的 86 倍,即软件模拟中作用到光纤上的力远大于实际沉降部位上方干燥土层的重力。所以,发生渗漏后,土层的含水度和土层对光纤的动态作用不容忽视。光纤承受载荷与光纤上部对应土层重力关系的确定,将有助于工程实际施工中对光纤埋设深度的确定。

## 参考文献

- [1] Zhu P Y, Zhou Y, Luc Thevenaz, et al. Seepage and settlement monitoring for earth embankment dams using fully distributed sensing along optical fibers[C]//2008 International Conference of Optical Instrument and Technology (OIT'08). 北京:中国仪器仪表学会、中国光学学会、SPIE,2008: 716013-1-7.
- [2] 张宝森,郭全明.黄河河道整治工程险情分析[J].地质灾害与环境保护,2002,13(3):1-5.
- [3] 朱萍玉,冷元宝,王少力,等.基于分布式光纤传感的堤坝形变监测系统设计[J].光电工程,2009,36(1):57-62.
- [4] 王送来.堤坝渗漏分布式光纤传感检测模拟装置试验研究[D].湘潭:湖南科技大学,2007:53-63.
- [5] 杨光,田堪良.土的弹性模量测试方法的研究[J].城市道桥与防洪,2006(5):145-147.
- [6] 李端有,熊健,於三大,等.土石坝渗流热监测技术研究[J].长江科学院院报,2005,22(6):29-33.
- [7] 厉善元,蒋冬青,梁磊.新型光纤光栅加速度传感器动态特性的研究[J].武汉理工大学学报,2008,12(30):117-120.

(下转 96 页)