

# Indoor Simulation Experiment of Soil Deformation and Fiber Strain Relations in Sinkhole Collapse Monitoring Area, Shenzhen City

Guixiang Zhang, Jun Xu

Shenzhen Investigation & Research Institute Co., Ltd, Shenzhen  
Email: vbnm\_198199@163.com

Received Jun. 17<sup>th</sup>, 2013; revised: Jun. 27<sup>th</sup>, 2013; accepted: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2013

Copyright © 2013 Guixiang Zhang, Jun Xu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** Sinkhole collapse at home and abroad in the distributed monitoring and forecasting have not yet successful applications, implementation in the field and no mature experience, field optical fiber monitoring only reflects fiber strain distribution and change, and we really need is specific soil settlement. Therefore, we need to build the relationship in fiber-optic strain and soil deformation, through fiber-optic strain can intuitively reflect the size of soil deformation. The main purpose of this experiment is reproducing the whole process of development of sinkhole collapse under different conditions indoor through physical model experiment, in order to establish the relationship in the settlement of soil deformation and fiber strain, and then research the critical condition of sinkhole collapse development, to guide the field monitoring and achieve early warning and forecast results.

**Keywords:** Sinkhole Collapse; Fiber Strain; Soil Deformation

## 深圳市岩溶塌陷监测区土体变形与光纤应变关系室内模拟试验

张桂香, 徐俊

深圳市勘察研究院有限公司, 深圳  
Email: vbnm\_198199@163.com

收稿日期: 2013年6月17日; 修回日期: 2013年6月27日; 录用日期: 2013年7月2日

**摘要:** 目前国内外在岩溶塌陷分布式监测及预测预报方面还没有成功的应用, 在现场实施方面也没有成熟的经验, 野外光纤监测仪反应的是光纤的应变分布及变化, 而我们实际需要的是土体的具体沉降量。因此, 我们需要建立光纤应变与土体变形的关系, 通过光纤应变能够直观反映土体变形量大小。本次试验的主要目的是通过物理模型试验, 室内再现不同条件下岩溶塌陷发育的全过程, 以此建立土体沉降变形与光纤应变的关系, 进而研究岩溶塌陷发育的临界条件, 以指导野外监测工作, 达到预警预报效果。

**关键词:** 岩溶塌陷; 光纤应变; 土体变形

### 1. 引言

岩溶塌陷的监测和预测预报问题一直是工程上

的难点问题, 主要原因在于岩溶塌陷以及由此而产生的土体变形所具有的突发性、隐蔽性和不确定性等特点<sup>[1]</sup>。

基于布里渊光时域分析测量(BOTDA)的分布式光纤传感技术是目前国际上最前沿的新型传感技术,它不但具有一般光纤传感技术的抗电磁干扰、电绝缘性好、化学稳定性强以及频带宽、灵敏度高、易于实现远程监测等优点,而且具有独特的分布式传感的特点<sup>[2]</sup>。这里,通过采用 BOTDA 技术,建立一套自动化的在线光纤监测系统,对由于岩溶塌陷引起的土体变形,特别是不均匀沉降的发生、发展过程进行监测,并进行有效的预测和报警。分布式光纤传感系统工作原理是同时利用光纤作为传感敏感元件和传输信号介质,采用先进的 OTDR 技术,探测出沿着光纤不同位置的温度和应变的变化,实现真正分布式的测量<sup>[3]</sup>。但是,由于目前国内外在岩溶塌陷分布式监测及预测预报方面还没有成功的应用,在现场实施方面也没有成熟的经验借鉴,由于岩溶塌陷的产生在时间上具突发性,在空间上具隐蔽性,在机制上具复杂性,因此,被普遍认为难以采取地面常规监测手段,对塌陷进行监测预报。

国外早在 1984~1987 年就尝试运用地质雷达进行潜在塌陷的监测工作。如美国学者 Benson 等在北卡罗来那州 Wilmington SW 部的一条军用铁路进行了试验,监测周期为 6 个月,取得了良好的效果。但由于操作复杂、连续性较差、无法对测线外的潜在塌陷进行监测,所以难以在大范围内推广。国内方面,2000 年,中国地质科学院岩溶地质研究所雷明堂,以模型试验结果为基础,提出了以岩溶管道裂隙系统水气压力监测为主,固定测线的地质雷达定期探测为辅的岩溶塌陷监测方法,并在桂林柘木村建成了岩溶塌陷监测预报示范站<sup>[4]</sup>。

以往对岩溶塌陷的研究仅处于试验阶段,本次工作是国内首次把光纤传感技术投入岩溶塌陷监测中,采用世界上最先进的分布式温度、应变监测仪——DSTS(加拿大 OZ 公司产品),通过对光纤变形的监测,实时监测深圳市龙岗区岩溶塌陷发展过程。但野外光纤监测仪反应的是光纤的应变分布及变化,而我们实际需要的是土体的具体沉降量,因此,需要建立光纤应变与土体变形的关系式,通过光纤应变能够直观反映土体变形量大小。

本次试验的主要目的是通过物理模型试验,室内再现不同条件下岩溶塌陷发育的全过程,以此建立土

体沉降变形与光纤应变的关系,研究岩溶塌陷发育的临界条件,以指导野外监测工作,达到预警预报效果。

## 2. 地质模式的划分和选取

根据已有勘查结果,监测区的地质模式可以分为以下几种模式:

### 2.1. 透水层 - 基岩

该模式为监测区主要地质模式,出露广泛。透水层主要由粉质粘土、砾砂、砾石类物质组成,且直接覆盖于基岩之上。

### 2.2. 透水层 - 隔水层 - 透水层 - 基岩

该模式在工作区出现的比较少,上部透水层岩性主要为细砂、卵石层以及粉质粘土,隔水层主要为粘土,下部透水层主要为卵石。基岩为裂隙比较发育的微风化大理岩。

### 2.3. 透水层 - 隔水层 - 基岩

该地质模式在监测区发育也较普遍,透水层岩性主要为粉质粘土、中粗砂;隔水层主要为粘土,基岩为局部破碎的微风化大理岩。

### 2.4. 隔水层 - 透水层 - 隔水层 - 基岩

上下隔水层均为粘土层,透水层由粉砂、中砂组成。基岩为微风化大理岩。该地质模式在本区局部出露。

### 2.5. 隔水层 - 透水层 - 基岩

隔水层主要有粘土层组成,透水层中砂、卵石等组成。

根据以上五种模式,结合工作区具体情况,在本次试验中仅选取主要 2 种地质模式进行试验,即为:透水 - 隔水 - 基岩地质模式、透水 - 基岩地质模式。

## 3. 试验工况的选取

岩溶塌陷的产生主要是由于第四系水位变化、基岩水位变化引起的,因此本次试验共选取三种工况进行现场模拟:工况 1,第四系水位变化对岩溶塌陷的影响;工况 2,基岩水位变化对岩溶塌陷的影响;工况 3,第四系水位和基岩水位变化对岩溶塌陷的影响。

## 4. 光导纤维监测技术原理

光导纤维监测技术也称布里渊散射光时域反射 (BOTDR) 监测技术, 是一种不同于传统监测方法的全新应变监测技术。其原理是, 当单频光在光纤内传输时会发生布里渊背向散射光, 而布里渊背向散射光与应变和温度成正比, 在温差小于 5℃ 时, 可以将温度影响忽略不计, 此时光纤中的应变变量可按下式计算:

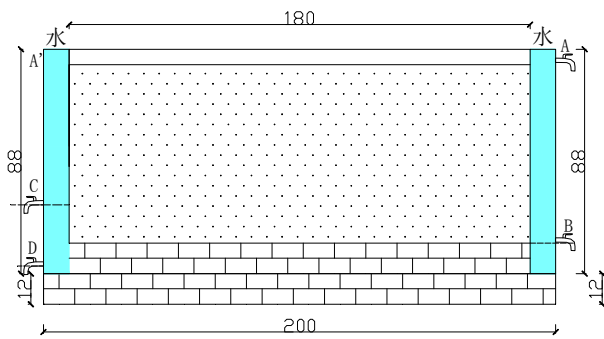
$$\varepsilon = \Delta V_B / [V_B(O) \cdot C]$$

式中:  $\Delta V_B$  为某应变下的布里渊频移,  $V_B(O)$  为无应变下的布里渊频移,  $C$  为应变比例常数,  $\varepsilon$  为应变变量。

## 5. 物理塌陷模型及试验材料

### 5.1. 物理塌陷模型(图 1)

模型箱长 2 m, 宽 2 m, 高度 1 m。底部铺设 6 层砖块, 模拟基岩裂隙, 第一层砖铺设间距为 2 cm, 第二层砖铺设间距 2 cm, 与第一层砖错缝铺设, 第三层砖铺设间距 2 cm, 与第二层砖错缝铺设, 第四层、第五层及第六层砖满铺。模型箱两侧为供水箱: 其中右侧为供水箱, 供水箱宽度 10 cm, 长度与箱体长度相同, 供水箱内壁底部与第三层砖平齐, 以模拟岩溶水的流动, 箱体外侧设两排供水阀门, 其中 A 供水阀门位于箱体顶部, 此高度共设四个供水阀门, B 供水管位于基岩面与第四系交界处, 此高度共设四个供水阀门; 左侧为排水箱, 排水箱宽度 10 cm, 长度与箱体长度相同, 排水箱内壁底部与第三层砖平齐, 以模拟岩溶水的流动, 箱体外侧设两排排水阀门, 其中 C 排水阀门位于第四系土层底部, 此高度共设四个排



注: 图中尺寸以 mm 为单位。

Figure 1. Indoor simulation model box of sinkhole collapse  
图 1. 岩溶塌陷室内模拟试验模型箱

水阀门, D 排水阀门位于第三层砖高度位置, 此高度共设四个排水阀门<sup>[5]</sup>。

### 5.2. 主要实验器材

沉降计: 沉降计共 4 个, 长度均为 0.5 m。

百分表: 百分表的构造主要由 3 个部件组成: 表体部分、传动系统、读数装置。分度值为 0.01 mm, 测量范围为 0~3、0~5、0~10 mm、0~50 mm。本次试验使用的百分表量程为 0~50 mm。

光纤: 本次试验光纤型号采用灵敏度较高的  $\Phi 0.9$  mm 紧套光缆及  $\Phi 2$  mm 聚酯护套单芯光缆, 两种光纤并行埋入土层, 监测光纤的土体内的应变分布。

分布式光纤应变温度传感器(DSTS): Optizone Laser 公司的光纤分布式应变和温度传感器利用一种称为受激布里渊散射的现象。

水管: 水管 50 m, 主要安装于供排水阀门。

熔接机: 用来熔接  $\Phi 0.9$  mm 紧套光缆及  $\Phi 2$  mm 聚酯护套单芯光缆, 使其形成回路。

OTDR: 光纤熔接后, 使用 OTDR 检测光纤线路通畅性, 如光纤有断点, OTDR 可精确对断点位置进行定位。

## 6. 试验准备工作

### 6.1. 取土

试验所取土样均来自监测区岩溶较发育地段, 根据监测区土层结构, 土样共取两种: 粉砂和粘土。首先野外取原状土, 送试验室测定土的密实度, 由于本次试验所需土样的总方量约 4 m<sup>3</sup>, 野外获取原状土的难度较大, 所以本次所取土样为扰动土。

### 6.2. 土体粉碎

取样后分别对砂土及粘土风干后进行人工粉碎, 由于野外所取粘性土大部分呈块状, 砂土颗粒粒径不均, 光纤的材质为玻璃纤维, 受力不均, 极易受损或折断, 因此光纤铺设过程中要保证光纤底部及上部土体粒径应  $\leq 5$  mm, 以免光纤出现断点。为获取细颗粒土, 用土工试验筛对粉碎后的土体进行细颗粒(直径  $\leq 5$  mm)筛取, 使过筛后土样粒径级配大致相同, 便于夯实及光纤铺设。

### 6.3. 岩土层铺设

#### 6.3.1. 岩层铺设

模型箱底部铺设6层砖模拟岩溶孔隙，第一层砖铺设间距为2 cm，第二层砖铺设间距2 cm，与第一层砖错缝铺设，第三层砖铺设间距2 cm，与第二层砖错缝铺设，第四层、第五层及第六层砖满铺。同时在第一层及第二层砖之间(靠近排水箱侧)铺设2~3 cm厚食盐，模拟岩溶孔隙内的填充物。

#### 6.3.2. 土层铺设

本次试验共模拟两种地层结构：透水 + 基岩地质模式，透水 + 隔水 + 基岩地质模式。

土层铺设采用分层夯实，使土体的密实度尽量接近原状土。

#### 6.3.3. 沉降计埋设

土层铺设约30 cm后将渗压计埋入土层中，为防止土层渗水后土颗粒进入渗压计内部，采用纱布将渗压计顶部进行包裹，并将其水平埋设于土层中。

#### 6.3.4. 光纤铺设

本次试验共选取两种光纤： $\Phi 0.9$  mm 紧套光缆及 $\Phi 2$  mm 聚酯护套单芯光缆，光纤铺设采用“井”字形方式，将 $\Phi 2$  mm 聚酯护套单芯光缆与 $\Phi 0.9$  mm 紧套光缆对接，使其形成回路，具体如图2。

由于光纤对粘性土变形灵敏度比对砂性土高，因此，光纤铺设层底部应首先铺设10 cm厚的粘性土，铺设完成后并在光纤顶部覆盖10 cm厚的粘性土，使光纤对土体变形的反应更加灵敏。此外，光纤铺设线路拐角处，土体的沉降可能会造成此段光纤的位移，

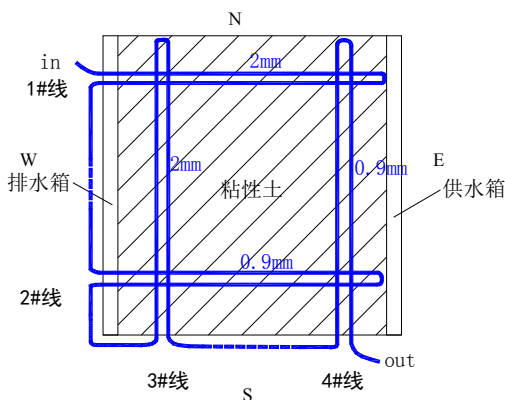


Figure 2. The schematic diagram of sensing fiber buried  
图 2. 传感光纤埋设示意图

影响监测结果，为避免拐角处光纤位移，将拐角处光纤盘成线圈，并用硬质塑胶卡片进行固定，使监测结果更加准确。

#### 6.3.5. 沉降计埋设

沉降计埋设于光纤“井”字形线路交汇处，便于光纤应变与沉降计变形进行精确比较，沉降计共4个，编号分别为：1号沉降计、2号沉降计、3号沉降计及4号沉降计。具体位置如图3。

#### 6.3.6. 百分表安装

沉降计埋设完成后即进行上部土层的覆盖及压实，土层铺设完毕后，开始百分表的固定工作。百分表共4个，位置及编号与沉降计相同，为防止百分表的振动，采用两根槽钢架设百分表，百分表底部有磁盘，可固定在槽钢上。

## 7. 试验工况

### 7.1. 工况 1：基岩水位变化对岩溶塌陷的影响

#### 7.1.1. 试验过程

本工况开始于2010年3月17日，当日结束。首先将供水井水位控制在B水位，排水井水位控制在D，自注入开始即观测百分表、渗压计，并同时光纤应变数据的采集，每次数据采集时间间隔为20分钟，进行7个小时的数据采集后，沉降基本稳定，此工况结束。

#### 7.1.2. 数据分析

工况1下2#传感光纤的应变分布随时间的变化情况见图4。图中横坐标为监测时间，纵坐标为2#传感光纤测点至试验箱东侧的距离。可见，光纤应变总体

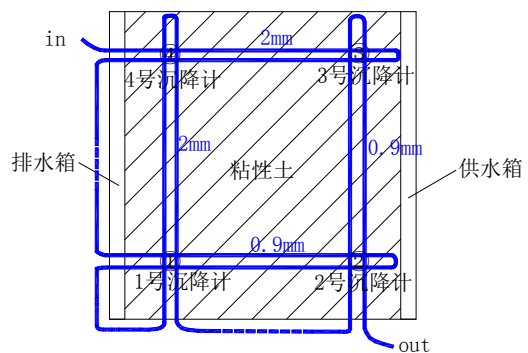


Figure 3. The location of settlement gauge buried  
图 3. 沉降计埋设位置图

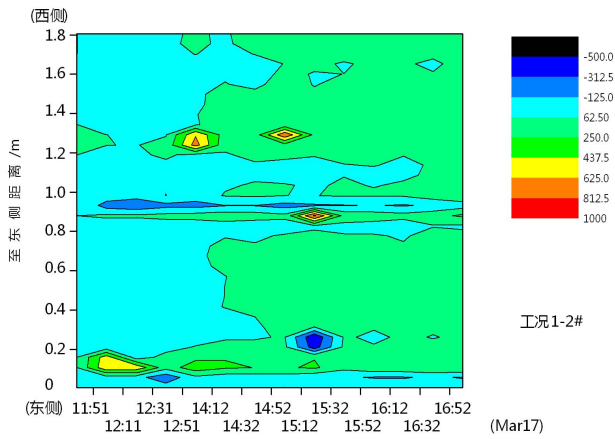


Figure 4. 2# sensing fiber strain distribution over time (condition 1)  
图 4. 2#传感光纤应变分布随时间变化(工况 1)

变化不大，一般介于 $\pm 250 \mu\epsilon$  之间，局部位置出现较大的拉应变，反映土体在工况 1 浸水过程中，局部出现较大沉降使光纤受到拉伸，应变异常的位置出现在至东侧 0.9 m 和 1.3 m 的位置。但随着土体应力应变状态的进一步调整，光纤应变逐渐趋于稳定。2#传感线路至排水箱 0.5 m 处测点的应变与相邻位置土体沉降(2号沉降测点)的关系曲线见图 5。可见，随着沉降的增大，传感光纤受到拉伸，并逐渐趋于稳定，约  $150 \mu\epsilon$ 。

工况 1 下 3#传感光纤的应变分布随时间的变化规律见图 6。可见，靠近试验箱南侧和至南侧 1.5 m 处光纤受到拉伸，介于 0.2~1.5 m 之间，光纤应变较小，局部受到压缩，其中 0.3 m 处光纤受到压缩的程度最大。

从沉降观测标的实测结果来看，土体基本处于整体沉降状态，其中百分表 2 所处区域的沉降量略小于其他区域。

## 7.2. 工况 2：第四系水位变化对岩溶塌陷影响

### 7.2.1. 试验过程

关闭所有 B 阀门，水头控制在 A，把 C 阀门或 D 阀门打开，当水位达到或超过 A' 高度，把 C 阀门或 D 阀门打开，保持在 A' 高度，目的使第四系水层充分饱水，直至第四系表层全部湿润，然后打开 C 阀门将水排出，使水位达到 C 阀门，开始观测沉降标，直至稳定。本工况共观测三个循环，第一个循环自 3 月 18 日 8: 50~16: 50，第二个循环自 16: 50~18: 10，第三个循环自 18: 10~23: 10，本工况结束。

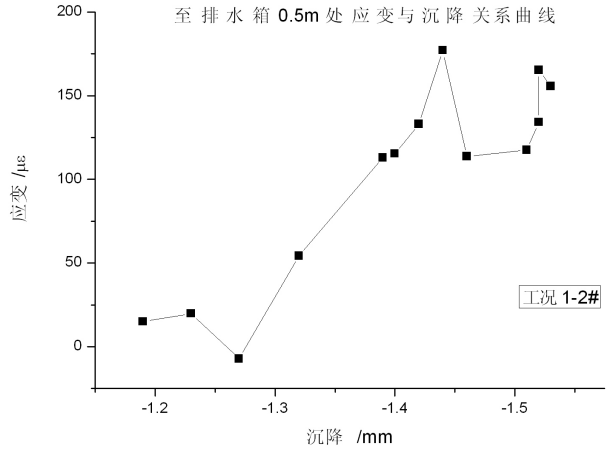


Figure 5. The curve of fiber strain and settlement  
图 5. 光纤应变与沉降关系曲线

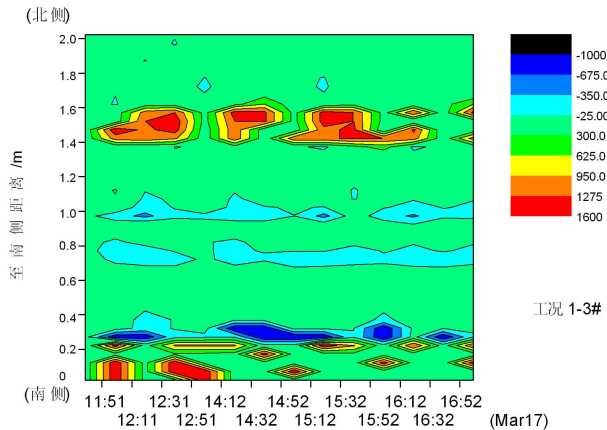


Figure 6. 3# sensing fiber strain distribution over time (condition 1)  
图 6. 3#传感光纤应变分布随时间变化(工况 1)

### 7.2.2. 数据分析

从图 7 可见，从 3 月 18 日至 3 月 21 日，1.3 m 处光纤的应变由拉伸状态转变为压缩状态，而 0.9 m 处和 1.5 m 处光纤的状态由压缩转变为拉伸，并逐渐趋于稳定。1.3 m 处光纤应变与沉降的关系曲线见图 8，随着沉降量的增大，光纤应变增大后逐渐减小，反映土体状态由拉伸转变为压缩。当土体沉降量为 4 mm 时，光纤的压缩应变约为  $-1600 \mu\epsilon$ ，随着土体沉降量的进一步增大，光纤仍处于压缩状态，压缩应变约为  $-1000 \mu\epsilon \sim -2000 \mu\epsilon$ 。图 9 为至排水箱不同距离处光纤应变随监测时间的变化规律，可见光纤状态逐渐由拉伸状态转变为压缩状态，并由排水箱侧逐渐向供水箱侧发展。

3#传感光纤应变分布随时间变化见图 10，0.1 m

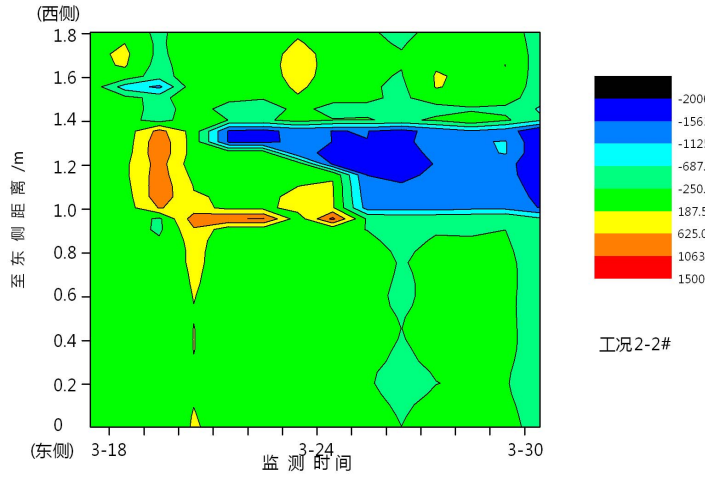


Figure 7. 2# sensing fiber strain distribution over time (condition 2)  
图 7. 2#传感光纤应变分布随时间变化(工况 2)

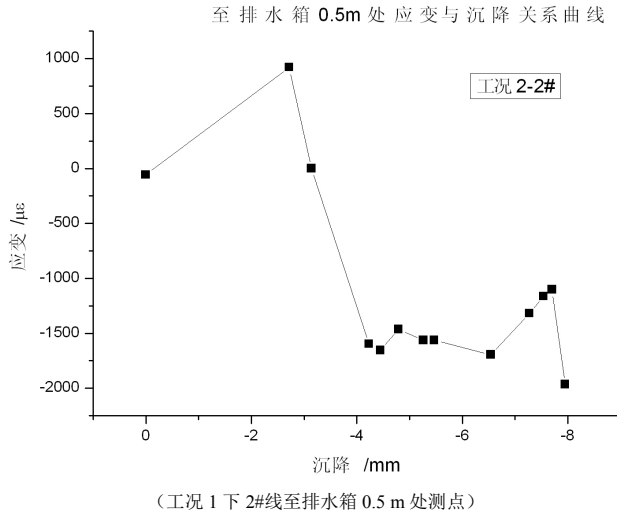


Figure 8. The curve of fiber strain and settlement  
图 8. 光纤应变与沉降关系曲线

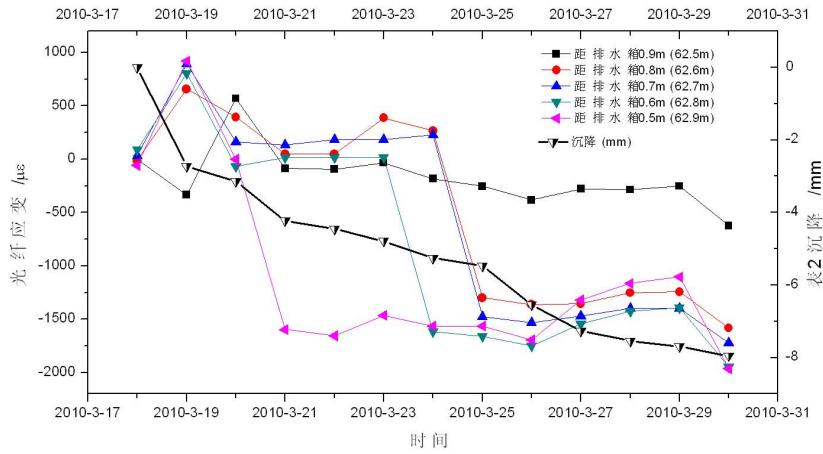


Figure 9. Fiber strain variation over monitoring time (condition 2)  
图 9. 光纤应变随监测时间的变化规律(工况 2)

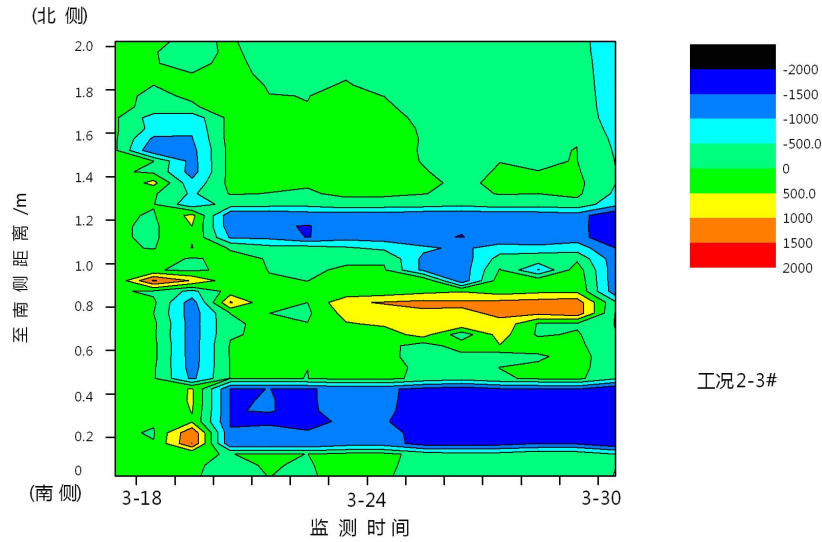


Figure 10. 3# sensing fiber strain distribution over time (condition 2)  
图 10. 3#传感光纤应变分布随时间变化(工况 2)

~0.5 m 和 1.0 m~1.3 m 区域内的传感光纤由最初的拉伸状态转变为压缩状态, 光纤最终压缩应变变量介于  $-1000 \mu\epsilon \sim -2000 \mu\epsilon$ 。0.8 m 处光纤则由最初的压缩状态转变为拉伸状态, 光纤最终的拉伸应变变量约为  $1000 \mu\epsilon \sim 1500 \mu\epsilon$ 。

### 7.3. 工况 3: 第四系和基岩水位变化对岩溶塌陷影响

#### 7.3.1. 试验过程

关闭所有排水阀门, 将排水水位升至 A', 2 小时第四系水层充分饱水, 此时将水位由 A' 降至 D, 试验过程中, 每隔 20 分钟进行数据采集。水位降至 D 后, 稳定供排水水位, 使水位始终保持在 D 位置, 每隔 20 分钟进行数据采集, 直至沉降稳定, 第一个循环自 3 月 19 日 9: 30~16: 50, 夜间将水升至 A-A', 保持稳定供排水。第二个循环自 3 月 20 日 8: 50~10: 50, 第三个循环自 11: 15~15: 30, 以此往复循环。本工况试验过程主要目的在于模拟岩溶塌陷过程, 试验时间较长, 循环次数较多, 试验时间自 3 月 19~3 月 30 日, 最终 1 号沉降计(2#线路)位置发生塌陷变形, 试验结束。

#### 7.3.2. 数据分析

图 11 和图 12 是塌陷过程中 2#传感光纤和 3#传感光纤应变分布随时间的变化情况。可见, 2#传感光纤 1.0 m~1.3 m 区域内光纤处于压缩状态, 两侧光纤

应变则基本不变或处于轻微拉伸状态。3#传感光纤的压缩区域位于 0.7 m~0.9 m 内, 两侧光纤则处于显著拉伸状态。

## 8. 结论

根据以上的分析, 可以得到以下几点规律:

- 1) 当土体沉降较小时(小于 1.5 mm), 光纤应变变化较小, 潜在塌陷区域光纤呈拉伸状态, 拉伸应变变量约为  $100 \mu\epsilon \sim 200 \mu\epsilon$ ;
- 2) 当土体沉降增大到 2 mm~3 mm 时, 光纤应变拉伸程度增大, 最大拉伸应变变量可以达到约  $1000 \mu\epsilon$ ;
- 3) 随着土体沉降的进一步增大(大于 4 mm), 光纤由拉伸状态转变为压缩状态, 最终的压缩沉降量约为  $-1500 \mu\epsilon \sim -2000 \mu\epsilon$ ;
- 4) 从光纤应变分布的形态上看, 塌陷初期, 塌陷区域上方的光纤处于拉伸或轻度压缩状态, 塌陷区域边界处光纤则呈压缩状态或基本不变; 而随着土体塌陷的进一步发展, 塌陷区域上方的传感光纤处于压缩状态, 塌陷区域边界及两侧的光纤应变则处于拉伸状态。当土体产生塌陷时, 光纤的应变分布通常具有图 13 所示的一般特征。

由此可知, 在土体塌陷过程中, 处于塌陷区上方的传感光纤的应变分布及状态是按照一定规律动态变化的, 依据这一特征, 结合现场实际情况, 进行多因素综合分析, 可以达到对可能的岩溶塌陷进行预警预报的目的。

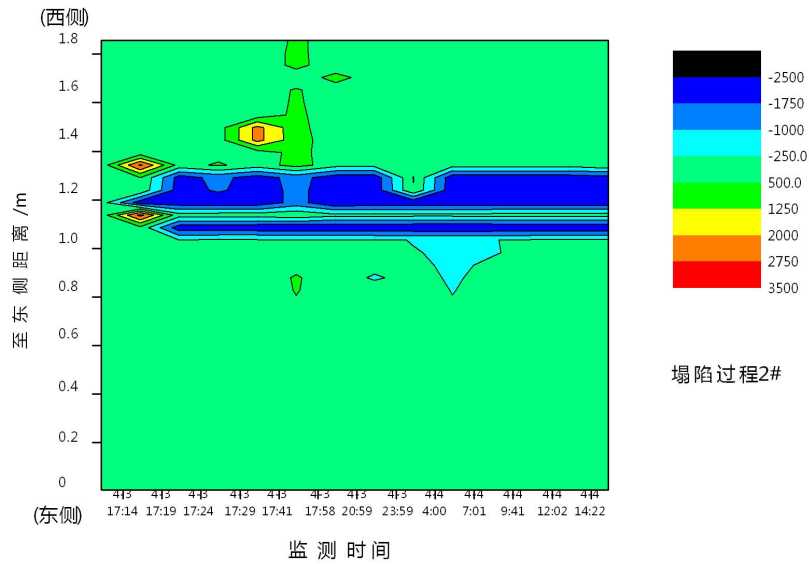


Figure 11. 2# sensing fiber strain distribution over time (condition 3)  
图 11. 2#传感光纤应变分布随时间变化(工况 3)

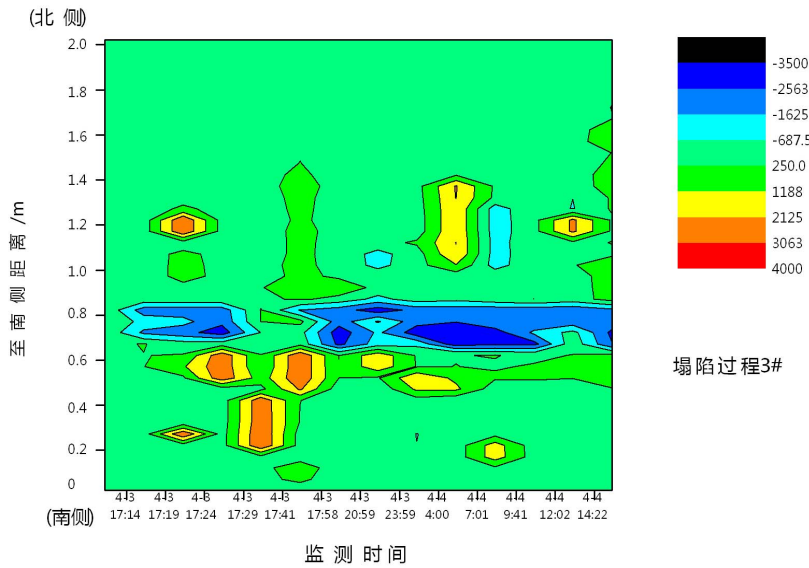


Figure 12. 3# sensing fiber strain distribution over time(condition 3)  
图 12. 3#传感光纤应变分布随时间变化(工况 3)

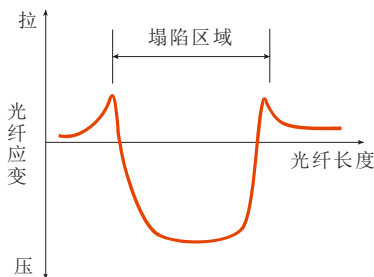


Figure 13. The general characteristics of fiber sensing strain distribution above the collapse zone  
图 13. 塌陷区域上方传感光纤应变分布一般特征

### 参考文献 (References)

- [1] Z. Liu, D. Yuan and S. He. Stable carbon isotope geochemical and hydrochemical features in the system of Carbonate-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> and their implications—Evidence from several typical karst areas of China. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(4): 446-454.
- [2] 余丽萍, 刘永智, 代志勇. 布里渊散射分布式光纤传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 4: 24-27.
- [3] 百度百科. <http://baike.baidu.com/view/644926.htm>
- [4] 雷明堂. 岩溶塌陷灾害监测预报技术与方法初步研究, *中国地质灾害与防治学报*[J], 2004, 15(7): 142-145.
- [5] 雷明堂. *地质灾害调查与监测技术方法论文集*[C]. 北京: 中国大地出版社, 2006.