

# OFDR 光纤传感技术在 十字岩柱暗挖法物理模型试验中的应用

刘泉声<sup>1,2</sup>, 王俊涛<sup>1</sup>, 肖龙鸽<sup>3</sup>, 李继超<sup>3</sup>, 刘滨<sup>1</sup>, 张晓磊<sup>4</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中建南方投资有限公司, 广东 深圳 518022; 4. 武汉隼龙科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 现阶段岩土工程模型试验围岩变形监测多采用点式传感器, 仅能获得部分测点的应变, 而光纤传感作为一种迅速发展的分布式监测技术, 能很好地解决这一问题。对于岩土工程室内试验, 现有光纤传感技术无法满足试验对空间分辨精度的高要求。对一种新型光纤传感技术光频域反射技术(OFDR)的测量原理和优点进行介绍, 并将其应用于浅埋超大断面圆形隧道十字岩柱开挖模型试验中, 对整个模型不同断面进行水平向应变连续监测。根据试验结果, 结合有限元分析, 表明 OFDR 能准确记录试验过程中模型内部的应变变化, 揭示围岩在十字岩柱开挖方法下的变形规律, 反映十字岩柱对围岩的支撑作用, 为今后隧道工程开挖提供参考。另外通过算法将应变结果转化为位移结果, 并与多点位移计的监测结果进行对比分析, 偏差在 10%以内。结果表明, 该技术可应用于岩土工程试验中的变形监测。

**关键词:** 隧道工程; 十字岩柱; 模型试验; 光纤传感器; 应变分布; 光频域反射(OFDR); 分布式监测

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2017)05-1063-13

## Application of OFDR-based sensing technology in geo-mechanical model test on tunnel excavation using cross rock pillar method

LIU Quansheng<sup>1,2</sup>, WANG Juntao<sup>1</sup>, XIAO Longge<sup>3</sup>, LI Jichao<sup>3</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, ZHANG Xiaolei<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. China Construction South Investment Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518022, China; 4. Wuhan Junno Technology Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** The point-type sensors are widely used for monitoring the surrounding rock deformation in geo-mechanical modelling tests, but they can only obtain the strains at a few measuring points. Fibre optic sensing, as one rapidly developing distributed monitoring technology, can resolve this problem, but it cannot yet meet the requirement of high spatial resolution. This paper introduces one new OFDR(optical frequency domain reflectometry)-based sensing technology, and applies it in the geo-mechanical test modelling the excavation of shallow buried large diameter circular tunnel using the cross rock pillar method to achieve the continuous monitoring on the horizontal strains in different tunnel cross sections during excavation. Combined with the FEM

**收稿日期:** 2016-07-27; **修回日期:** 2016-11-28

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51474205)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51474205)

**作者简介:** 刘泉声(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于山东矿业矿山建设专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn。通讯作者: 王俊涛(1992-), 男, 现为硕士研究生。E-mail: wangjuntao@geotech@gmail.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0956

analysis, the results show that the OFDR based sensing technology can accurately record the change of strain inside the geo-mechanical model during testing. It can reveal the deformation tendency of the surrounding rock when excavated using the cross rock pillar method, reflect the supporting effect of the cross rock pillar to the surround rock, and then guide the future tunnel excavation activities. The results are compared with the monitoring results obtained from the multipoint displacement meter after converting the strain-type results into the displacement-type results, and their deviations are within 10%. Generally, the OFDR-based sensing technology can be applied to the deformation monitoring in geo-mechanical modelling tests.

**Key words** : tunnelling engineering ; cross rock pillar ; model test ; fiber optic sensor ; strain distribution ; optical frequency domain reflectometry(OFDR) ; distributed monitoring

## 1 引言

光纤传感<sup>[1]</sup>作为一种快速发展的传感监测技术,其以光波为载体、光纤为传输媒介,将传感与数据传输结合在一起,对比传统机械式或电测式传感器<sup>[2]</sup>,如位移计、电阻应变片等,光纤传感技术具有抗电磁干扰、防水防潮、不易疲劳、便于安装、灵敏度高、可实现准分布式或分布式监测等优点<sup>[3]</sup>,使其在岩土工程监测领域得到了越来越广泛的应用。

1990年 A. Mendez 等<sup>[4]</sup>率先将光纤传感技术应用于岩土工程领域的混凝土结构健康监测。其后,许多学者将光纤传感技术用于岩土工程领域。国内学者刘雄等<sup>[5-6]</sup>于20世纪末首次将光纤传感的概念引入国内岩土领域,其后,国内学者对此进行了大量的研究,并取得了丰富的研究成果:朱鸿鹄等<sup>[7-8]</sup>研制了基于光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)技术的棒式传感器,将其应用于大坝超载破坏模型试验变形监测和水电站地下洞群模型试验位移监测,取得良好效果;陈旭光等<sup>[9]</sup>研制光栅位移传感器及配套自动数据采集系统,并在岩盐地下储气库力学模型试验中成功应用,成功测得围岩内部位移;杨庚鑫等<sup>[10]</sup>将FBG光纤埋入拱坝地质模型,并将超载试验后的监测结果与传统电阻应变片监测结果进行对比,证实了其在模型试验中的可行性;柴敬等<sup>[11]</sup>提出一种基于光时域反射技术(optical time domain reflection, OTDR)的分布式蛇形光纤传感器,并在模拟矿山开采试验中成功对岩梁的变形进行监测;解爱国等<sup>[12]</sup>将布里渊光时域反射技术(Brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR)应用于地质构造模拟试验中寻找断裂构造潜在面,取得良好效果;王宝军等<sup>[13]</sup>将BOTDR光纤传感技术应用于室内边坡模型试验中,得出光纤

在土工布中的变形协调性和敏感性均优于在土工格栅的结论,为边坡加固工程现场监测提供了参考;隋海波等<sup>[14]</sup>和魏广庆等<sup>[15]</sup>分别将BOTDR技术应用于某高速公路边坡变形的分布式测量与预制桩的内力监测,对光纤布置方式、温度补偿等进行优化,得到相对传统点式测量方法更加全面的监测结果;葛捷<sup>[16]</sup>将BOTDR应用于上海临港新城海堤变形监测,成功获得了长时间、大范围的分布应变监测数据,通过与水准测量数据比较,说明BOTDR光纤传感器具有覆盖区域大、连续数据采集、环境兼容性强和使用寿命长等优点;张丹等<sup>[17]</sup>将BOTDR应用于淮南矿区,采用钻孔技术将光缆植入煤层顶板覆岩中,根据得到的分布式监测结果,分析得到了应变分布与地层的对应关系;丁勇等<sup>[18]</sup>将布里渊光时域分析(Brillouin optical fiber time domain analysis, BOTDA)技术应用于SMW工法桩的桩身分布式应变测量中,成功得到了施工过程中H型钢翼缘与桩身的应变曲线;朱鸿鹄等<sup>[19]</sup>将BOTDA用于室内边坡模型试验的分布式应变测量,实现了10cm的空间分辨率的分布式应变测量,揭示了其在边坡稳定分析方面的巨大潜力;王飞等<sup>[20-21]</sup>将BOTDA应用于盾构隧道管片变形的检测中,取得良好效果,结果表明BOTDA监测变形最大误差仅为15%,但其长距离传输、高密度测点以及分布式结果是传统监测方法难以实现的;卢毅等<sup>[22]</sup>将BOTDA应用于气囊模型试验中,得到了不同条件下地面土体塌陷的“马鞍形”应变分布曲线,并以此判断出地面变形可能发育的区域。国内学者除了上述成果,还有许多学者采用联合传感方式,如李焕强等<sup>[23]</sup>将BOTDR和FBG技术联合应用于边坡降雨模型试验,得到模型内部不同深度、不同坡面位置在降雨作用下的分布式变形规律,得到其他试验监测方法不易取得的数据;朱友群等<sup>[24]</sup>将BOTDA和FBG技术联合应用于管桩击入土层的模型试验

中,利用 FBG 监测管桩打入过程中的桩身应变变化,反映不同深度应变变化规律,利用 BOTDA 监测暂停过程中桩身整体应变变化,得到管桩在打入过程中的桩土作用规律。除了上述技术之外,2015 年,王兴等<sup>[25]</sup>提出将布里渊光频域分析技术(Brillouin optical frequency domain analysis, BOFDA)应用于土木与岩土工程领域,并通过试验将 BOFDA 与 BOTDA 优、缺点进行对比,说明了 BOFDA 的优越性。

综上,光纤传感器在岩土工程领域的应用愈加广泛,但现有技术仍有诸多不足。首先,虽然基于 FBG 光纤光栅原理的传感器能较精确测量应变,但是其无法实现分布式测量,并且成本较高,相较于传统传感器优势不大。而基于 OTDR, BOTDR 和 BOTDA 原理的光纤传感技术虽然能实现长距离、长时间分布式测量,但测量空间分辨率低,短距离仅能实现分米级别空间分辨率,长距离分辨率则降低到米级别,对于各种岩土工程试验,空间精度过低。

而本文将基于光频域反射(optical frequency domain reflectometry, OFDR)传感技术的光纤传感器应用于隧道开挖模型试验中,提出了用于土工模型试验分布式应变监测新方法,实现空间分辨率为 1 cm 的应变分布式测量,并研究和探讨这一方法的优缺点和实际效果。OFDR 作为一种新型分布式应变监测技术,在土木工程领域,国内目前暂未见相关文献报道。

## 2 光频域反射技术原理

目前各类光纤测量与传感技术,主要分两大类:一类是准分布类,其以 FBG 光栅为代表,优点是测试精度高,测试频率高;另一类为分布式,代表为 OTDR, BOTDR 和 BOTDA 等技术,优点是能实现连续的空间分布式测量<sup>[26]</sup>。而本文采用的 OFDR 技术属于分布式测量技术。

### 2.1 OFDR 原理

从光学原理可知,光纤中有 3 种主要散射(见图 1<sup>[27]</sup>),即瑞利散射,布里渊散射以及拉曼散射<sup>[28]</sup>。其中瑞利散射是入射光与介质中微观粒子发生弹性碰撞引起的散射,散射光频率与入射光频率相同,OFDR 就是基于测量瑞利散射变化的一种应变测量技术。

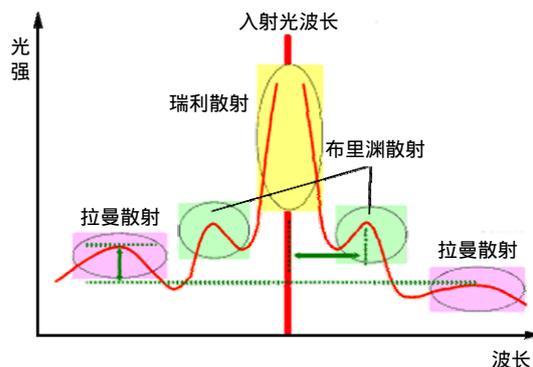


图 1 光纤中三种主要散射<sup>[27]</sup>

Fig.1 Three type of light scattering in fiber<sup>[27]</sup>

OFDR 的基本原理如图 2 所示<sup>[28]</sup>,它利用连续波频率扫描技术(FMCW)<sup>[29]</sup>,运用外差干涉方法,采用周期性线性波长扫描的光源,利用耦合器分别接入参考臂和信号臂。参考臂的本振光与信号臂的背向瑞利散射信号因为光程不同,所以其自身携带频率也不同,故二者发生拍频干涉,其干涉信号的拍频与信号臂发生背向散射位置的距离成正比,经过快速傅里叶变换(FFT),就可以得到距离域上光纤背向瑞利散射信号信息。

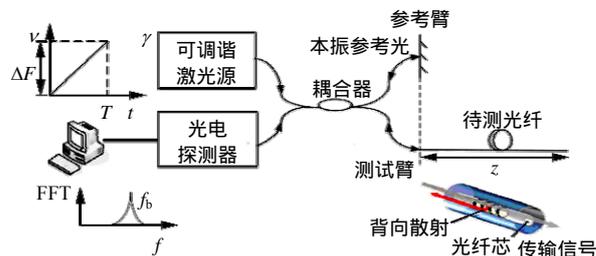


图 2 OFDR 技术原理图<sup>[28]</sup>

Fig.2 Technical setting of OFDR measurement<sup>[28]</sup>

由于光纤本身折射率在生产过程中就产生,且以后不再变化,光纤中瑞利散射是由光纤本身折射率随机变化导致的,而散射的振幅又是测试距离的函数。由于光纤存在这种比较稳定的随机分布特性,M. Froggatt 和 J. Moore<sup>[30]</sup>提出将光纤中瑞利散射等效为一种随机周期弱 Bragg 光栅,当外界刺激(如应变)发生变化时,光纤的背向瑞利散射信号光谱发生漂移,其漂移量大小与光栅所受拉应变成正比。通过对测量信号(存在扰动)与参考信号(没有扰动)进行相关运算可以得到光谱移动值,而应变值与光谱移动值成线性正比关系,因此可以获得相应的应变值,应变值为该空间分辨率内的平均应变。具体操作如图 3 所示。

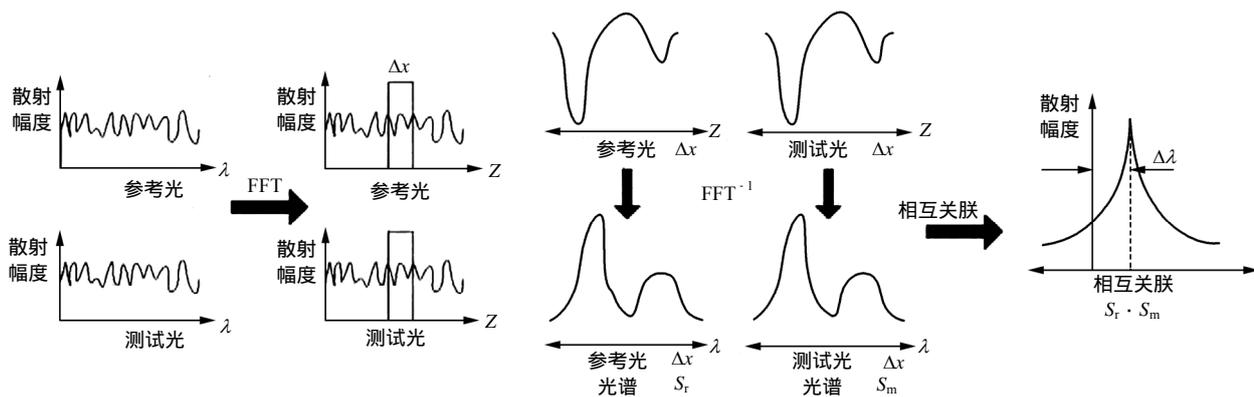


图3 基于OFDR应变测量光谱漂移调解原理<sup>[28]</sup>

Fig.3 Demodulation principle of the wavelength shift in strain measurement by fiber sensing based on OFDR<sup>[28]</sup>

### 2.2 OFDR 与其他光纤传感技术对比

目前在各类分布式光纤测量与传感技术中，最基本的方法就是光时域(optical time domain)方法。光时域反射计是通过分析后向反射光的时间差和光程差之间的关系来进行测量的<sup>[31]</sup>。它的空间分辨率提高需要缩短光源脉冲宽度和增大接收机带宽。而系统噪声正比于接收机带宽，因此增大接收机带宽意味着系统动态范围和信噪比的减小<sup>[27]</sup>。所以OTDR在选择参数时要在空间分辨率与系统灵敏度之间做出取舍<sup>[29]</sup>，因此现阶段常用空间分辨率仅为0.1 m及以上。而从节2.1中OFDR原理可知OFDR技术空间分辨率与频谱分析精度有关，与探测器带宽无关，因此这样可以获得非常高(微米级)的空间分辨率<sup>[32]</sup>。

表1 几种主要光纤传感技术特点和基本参数

Table 1 Parameters and main characteristics of optical fiber sensing technology

名称	最小空间分辨率/cm	测试距离	测量时间	应变传感精度/ $\mu\text{m}$	测试方式	传感器成本	其他
FBG	0.01	短	3 s	0.6	准分布式	200元/光栅	三激光器
OTDR	40	长	3 min	60	分布式	普通单模光纤	单向光源
BOTDR	100	长	1 min	60	分布式	普通单模光纤	双端测量
BOTDA	10	长	1 min	20	分布式	普通单模光纤	双端测量
OFDR	0.5	短	3 s	1	分布式	普通单模光纤	单向光源
BOFDA	20	长	1 min	2	分布式	特殊光纤	双端测量

由表1可以看出，OFDR技术对比其他技术拥有显著的优越性，特别是在空间分辨率与应变测试精度上。但由于OFDR技术对光源光强要求特别严

格，目前国内对于OFDR传感测量研究尚处于实验室阶段，是阻碍其广泛应用的主要原因。

### 3 “十字岩柱”暗挖法模型试验

为了验证OFDR光纤传感技术在模型试验中对应变监测的有效性，将其应用于超浅埋超大断面隧道十字岩柱开挖模型试验中。十字岩柱暗挖法是近年来提出的一种超大断面隧道在开挖过程中预留十字岩柱，将大断面转化为五步小断面开挖的新方法<sup>[33]</sup>，十字岩柱法与双侧壁导坑法的区别在于将双侧壁导坑法的左右导洞上下顺次开挖转变为对角开挖，再解除中部岩体。该方法充分发挥了中部岩体对围岩的支撑作用，改善了围岩及中心岩柱的受力状态，在抑制隧道围岩变形、提高隧道施工稳定性等方面起到了明显的作用。十字岩柱暗挖法隧道开挖示意图和流程图如图4、5所示。但十字岩柱法开挖施工过程中内岩与围岩的相互作用、围岩的变形及失稳机制等关键问题尚缺乏系统研究。本次试验的目的就是为了通过模型相似试验来分析十字岩柱对于围岩变形及其稳定性的影响规律。

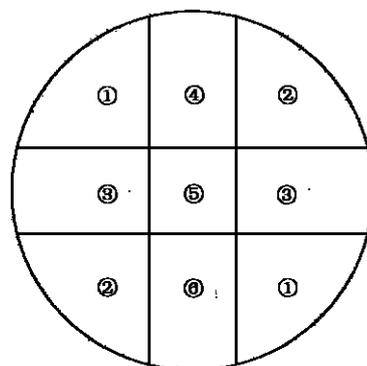


图4 隧道开挖示意图

Fig.4 Scheme of excavation of tunnel

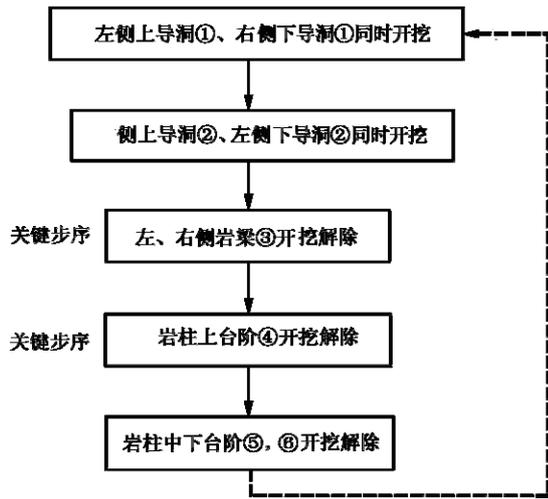


图 5 现场开挖流程图

Fig.5 Flow chart of the excavation at the scene

### 3.1 试验概况

试验模拟在典型 4 类围岩(围岩参数见表 2)中进行直径为 20 m 的圆形隧洞开挖,隧洞埋深为 10 m,开挖方法采用十字岩柱暗挖法。由于模拟的隧道属于超浅埋隧道,主要受自身重力影响,其构造应力影响可以不考虑,边界条件与受力条件简单、清晰,因此不考虑加载系统。在自主研发的钢结构试验台架<sup>[34]</sup>中进行试验。试验台架长 1.8 m,宽 0.6 m,高 1 m,主骨架用型钢支撑,采用组合螺栓连接,正面配有高强度有机玻璃板,可进行不同断面开挖试验,并可在模拟开挖过程中对洞室周围岩体变形破坏过程进行实时观察监测。

表 2 原型和模型材料的物理力学参数

Table 2 Mechanical parameters of prototype and model materials

材料类型	容重/ (kN · m <sup>-3</sup> )	变形模量/ MPa	抗压强度/ MPa	抗剪强度指标	
				c/kPa	φ(°)
原岩	25.09	4 569	41.20	1 800	40.5
模型	25.10	110	1.06	44	39.0

根据相似原则,经过综合考量,隧道开挖采用几何相似比尺  $C_L=40$ ,容重相似比尺  $C_R=1$ ,模拟范围为长 72 m,宽 24 m,高 40 m,由此确定弹性模量相似比尺  $C_E=40$ ,黏聚力相似比尺  $C_c=40$ ,抗压强度相似比尺  $C_{\sigma_c}=40$ ,抗拉强度相似比尺  $C_{\sigma_t}=40$ ,根据计算得到模型材料的物理力学参数,相似材料根据参数经过配比试验自行配置,具体采用石膏,砂,水按一定比例混合,具体相似材料参数见表 2,浇筑完成的模型见图 6。



图 6 浇筑完成的试验模型

Fig.6 The photo of the test model of tunnel

### 3.2 测量仪器布置

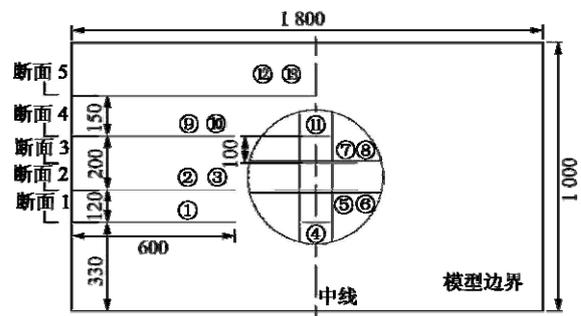
根据前文介绍,由于 OFDR 技术对光源光强要求特别严格,目前仅有美国 LUNA 公司研制出商用产品,本次试验使用的仪器为 LUNA OBR 4600,为国内首次引进的,其具体参数见表 3<sup>[32]</sup>。

表 3 LUNA OBR 4600 仪器部分参数<sup>[32]</sup>

Table 3 Parameters of instrument LUNA OBR 4600<sup>[32]</sup>

光纤类型	空间分辨率/m	应变测试精度/ $\mu\epsilon$	应变测试范围/ $\mu\epsilon$	测试量程/m	测量时间/s
Single Mode Fiber	0.005	$\pm 1$	$\pm 1\ 250$	70	3

试验中采用了直径为 9,125  $\mu\text{m}$ (指光纤的纤核为 9  $\mu\text{m}$ ,包层为 125  $\mu\text{m}$ )普通单模裸光纤,由于光纤比较脆弱,容易产生拉伸破坏,因此仅能水平布置,光纤布置见图 7。共布置 5 层 13 根光纤,光纤编号为 1~13,每层光纤按预先设定的路径进行埋置,埋置过程如下:



(a) 总布置图



(b) 隧道开挖进尺断面示意图

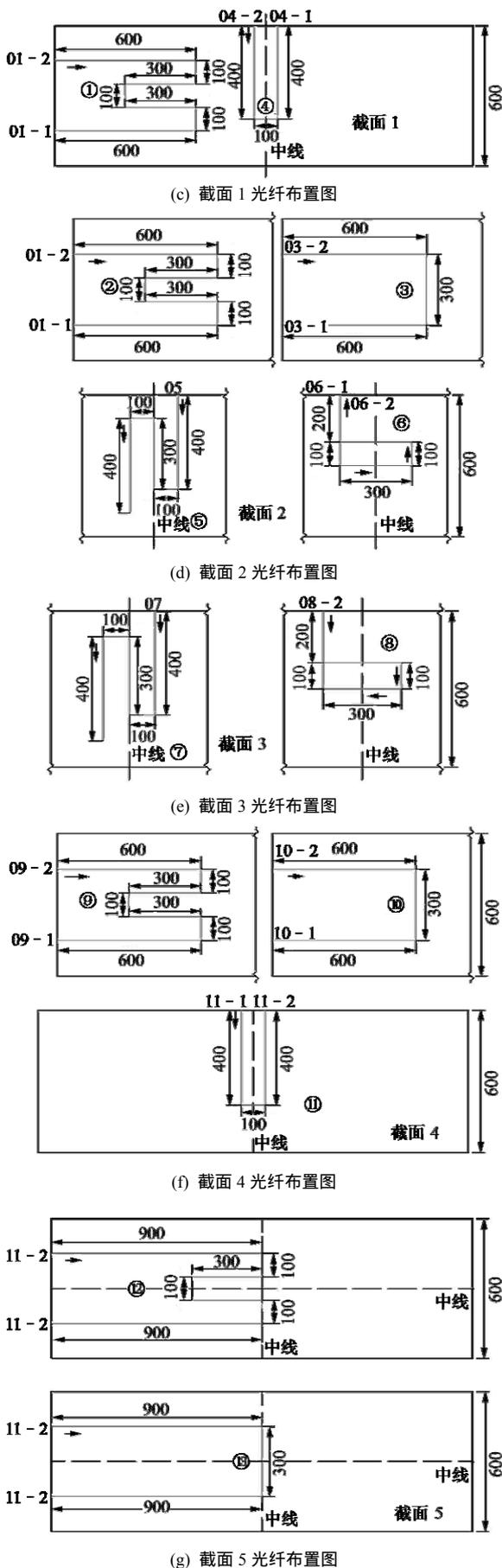


图7 OFDR 传感光纤布置图(单位: mm)

Fig.7 Layout of the OFDR sensing fiber(unit: mm)

(1) 先将模型试验材料浇筑至高于预埋标高 10 cm 左右;

(2) 用直尺进行定位, 使用专用挖槽工具进行开槽, 开槽深度为 10 cm;

(3) 将光纤按预先设定路径进行预埋, 预埋过程中将光纤拉直, 给予一定的初始拉应变, 再将相似材料进行回填压实, 回填过程采用小夯锤, 轻夯多次, 以确保光纤不断裂, 对于模型材料与试验台架相交处, 采用内径 0.3 mm 金属毛细管(见图 8)进行保护, 防止光纤发生剪断;

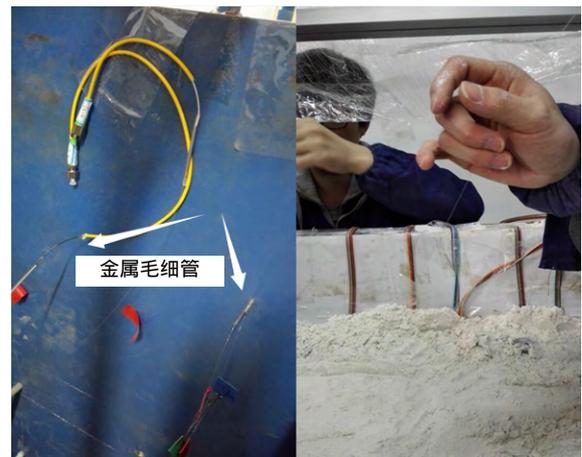


图8 预埋的光纤

Fig.8 The photo of the Fiber

(4) 将光纤接头与法兰头进行熔接;

(5) 熔接完成后用光电笔进行测试, 看光纤是否完好。

因为光纤多数预埋出 2 个接头, 光电笔检查结果显示, 13 根光纤都完好, 未发生破坏。

为了验证 OFDR 技术测试结果的准确性, 采取光栅尺多点位移计进行相互验证, 光栅尺多点位移计的测点布置如图 9 所示。

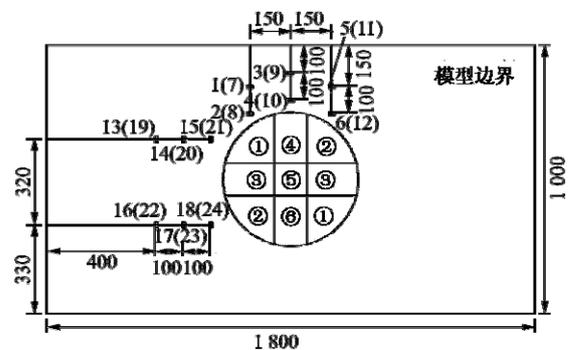


图9 光栅尺多点位移计布置图(单位: mm)

Fig.9 Layout of multipoint displacement meters(unit: mm)

此外, 为了监测洞室开挖过程中关键部位处应

力变化，在本次试验中还预埋了应变砖和压应力感应片来监测开挖过程中应力变化情况。

### 3.3 试验过程

通过不同方案比选，最终确定开挖时每次开挖循环进尺为 10 cm(4 m)，每个大循环进尺再细分为 5 cm(2 m)的小循环进尺，开挖过程中应变砖、光栅尺多点位移计进行实时记录数据。在每循环进尺开挖结束后，暂停开挖 20 min，令围岩充分变形后 5 min 进行光纤数据扫描。整个开挖过程分为 21 步，隧洞开挖采用人工钻凿方式，由于开挖过程持续时间长，监测要求高，所以在开挖过程中要做好人员安排和后勤保障工作，以保证试验过程持续不间断的按计划实施。

开挖区域分为图 4 所示的 6 个部分，具体开挖步骤如表 4 所示，开挖过程如图 10 所示，开挖后的模型见图 11。

表 4 洞室开挖步骤

Table 4 Excavation sequences of tunnel

开挖 步序	是否测试	施工步骤内容
0	是	测试各光纤初始应变，设置基准值
1	是	部位 开挖 25 cm，每次开挖 5 cm
2	是	部位 开挖至 30 cm
3	是	部位 开挖 10 cm，每次开挖 5 cm
4	是	部位 开挖 10 cm，每次开挖 5 cm
5	是	部位 开挖 10 cm，每次开挖 5 cm
6	是	部位 开挖至 35 cm
7	是	部位 开挖至 40 cm
8	是	部位 开挖至 20 cm
9	是	将部位 上下切薄 4 cm 共 8~20 cm
10	是	将步骤 9 切薄部位开挖至 20 cm
11	是	将部位 左右切薄 4 cm 共 8~20 cm
12	是	将步骤 11 切薄部位开挖至 20 cm
13	否	部位 开挖至 50 cm，每次开挖 5 cm
14	是	部位 开挖至 30 cm，每次开挖 5 cm
15	是	部位 开挖至 30 cm，每次开挖 5 cm
16	是	部位 开挖至 30 cm，每次开挖 5 cm
17	否	部位 开挖至 60 cm，完全贯通，每次开挖 5 cm
18	是	部位 开挖至 40 cm，每次开挖 5 cm
19	是	部位 开挖至 40 cm，每次开挖 5 cm
20	是	部位 开挖至 40 cm，每次开挖 5 cm
21	是	隧道整体分步全部开挖完成，每次开挖 5 cm

## 4 隧道开挖有限元模拟分析

在将 OFDR 技术用于隧道开挖模型试验应变监

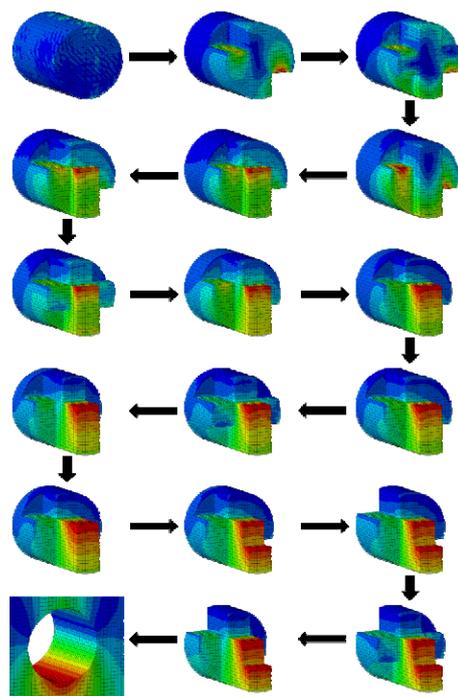


图 10 洞室开挖过程

Fig.10 Excavation processes of tunnel



图 11 试验中的隧道模型

Fig.11 Photo of 3D test model of tunnel during the experiment

测的结果分析之前，首先应对隧道开挖过程中围岩应变分布有初步的认识，再进行比较分析。

为了直观了解圆形洞室围岩应变分布，采用 ABAQUS 软件建立有限模型，如图 12 所示。该模型长 180 m，宽 24 m，高 90 m，左、右边界固定  $x$  向位移，前、后边界固定  $z$  向位移，底部固定  $x, y, z$  三个方向位移，采用莫尔-库仑本构模型，单元类型为六面体实体单元，共划分 145 800 个节点，137 496 个单元。有限元分析具体参数见表 5。

1 号光纤有限元计算结果见图 13。

## 5 监测结果及分析

### 5.1 光纤应变监控结果

经过数据汇总，得到 OFDR 传感技术在隧道开

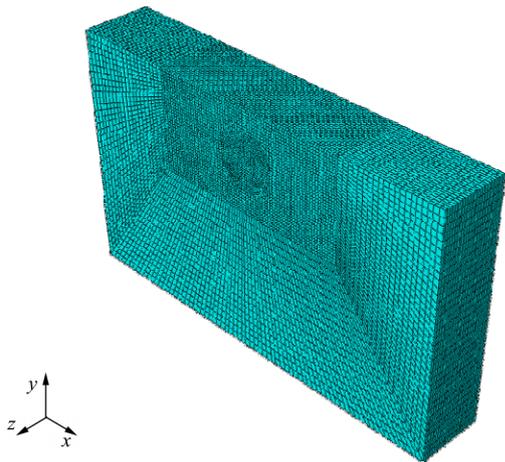


图 12 计算模型

Fig.12 Simulated domain and meshes

表 5 有限元分析参数

Table 5 Parameters used in finite element analysis

容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	变形模量/ MPa	泊松比	抗剪强度指标	
			黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
25.09	4569	0.17	1800	40.5

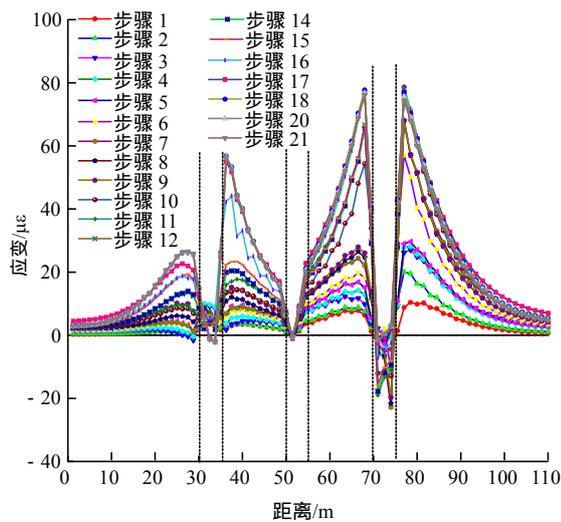
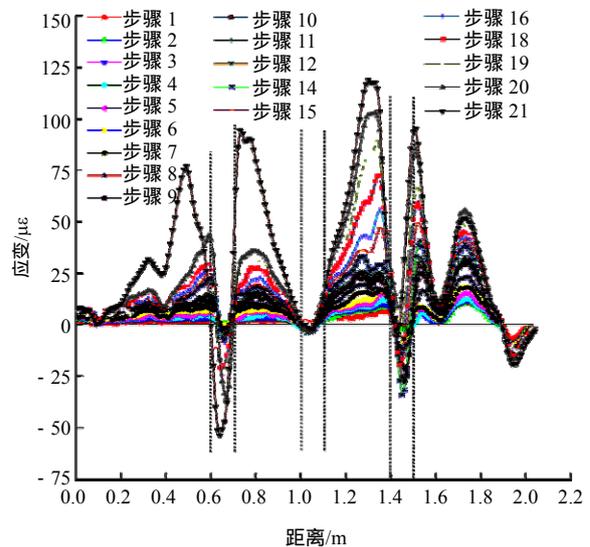


图 13 有限元分析 1 号光纤应变结果

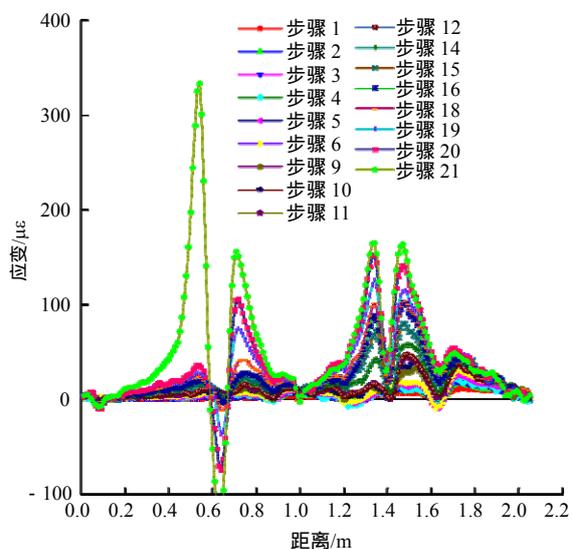
Fig.13 The results of finite element analysis of fiber No.1

挖过程隧道围岩应变值，该应变值已经除去铺设时的初始应变值，应变值为各监测断面的水平应变，从中取较典型的监测结果，如图 14 所示，图中虚线处为光纤转折点的位置。可以看出，随着开挖进行，各部位应变不断增大，相同位置的不同光纤其应变分布形态一致，因此可认为光纤传感器较为真实地反映了隧道在开挖过程中围岩变形状态。光纤监测结果显示，对于隧道左侧的光纤，很好地反映了隧道开挖过程中岩体变形，从 1 号光纤实际应变曲线与图 13 有限元计算曲线进行对比可知，随着开挖的

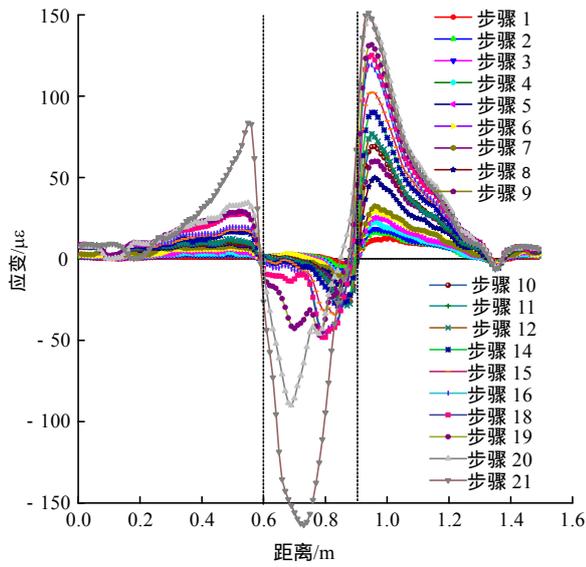
进行，两者应变分布形态几乎一致。对试验过程中的开挖步进行分析，取开挖步 12 及开挖步 16，进行单独的实测值与有限元计算值进行对比，如图 15, 16 所示。从图中可以看出，实测结果与有限元计算结果吻合良好，对于 A, D 段有误差的部分，经分析应该是光栅尺位移传感器对其产生了影响，由于光栅尺位移传感器较大，对周围岩体产生了类似于锚杆的加固效果，致使该部分出现实测结果小于有限元分析结果的现象，从图 15, 16 中可看出对应于光栅尺测点布置范围内有应变降低的现象。试验结束时实测值峰值大于有限元计算结果峰值 30%左右，分析其原因有限元为完全弹塑性分析，而在实际试验中，模型材料在开挖过程中的变形是复杂的力学效应，且其中有可能存在节理面等，使其变形大于理论分析的数值。



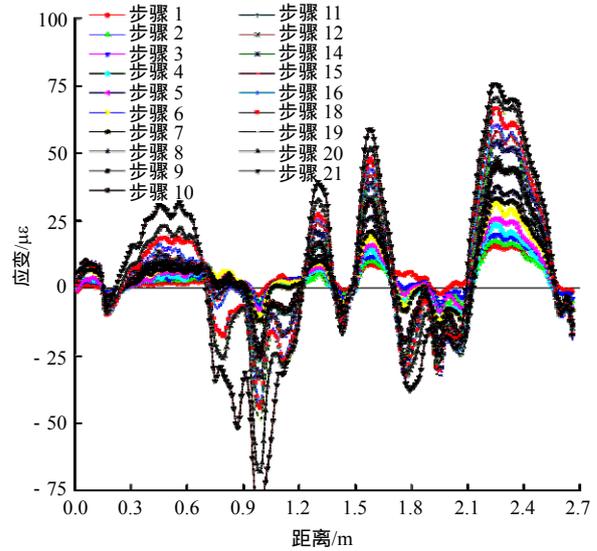
(a) 1 号光纤



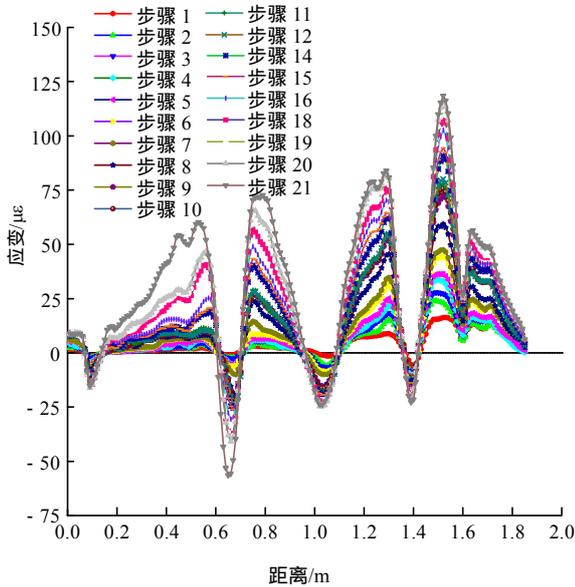
(b) 2 号光纤



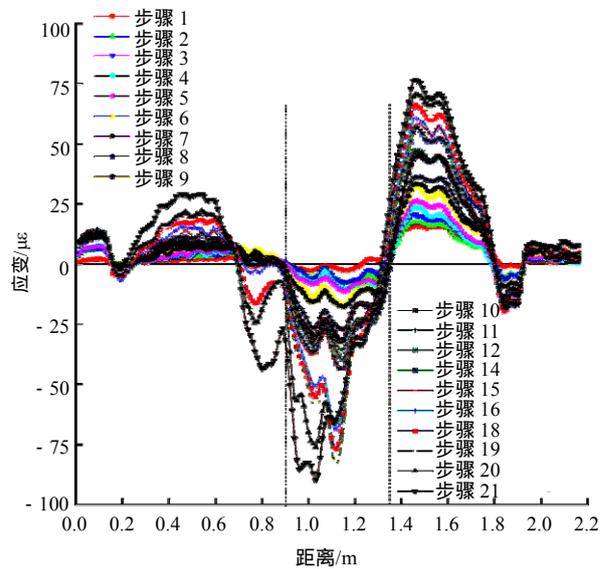
(c) 3号光纤



(f) 12号光纤

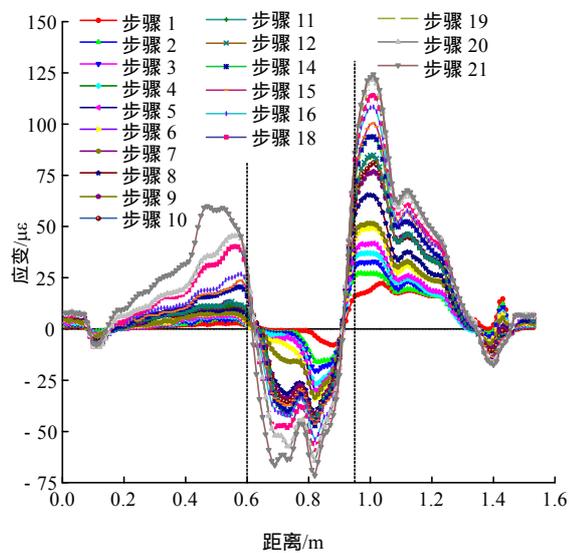


(d) 9号光纤



(g) 13号光纤

图 14 应变测试结果



(e) 10号光纤

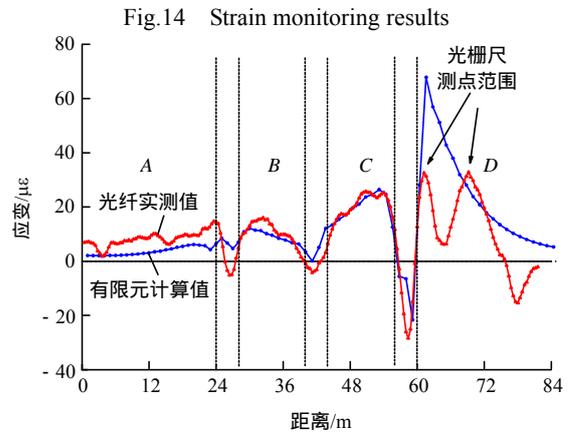


图 15 开挖步 12, 1号光纤应变对比

Fig.15 The strain contrast of fiber No.1 in step 12

图 14(a) ~ (e)为隧道左侧断面 1、断面 2、断面

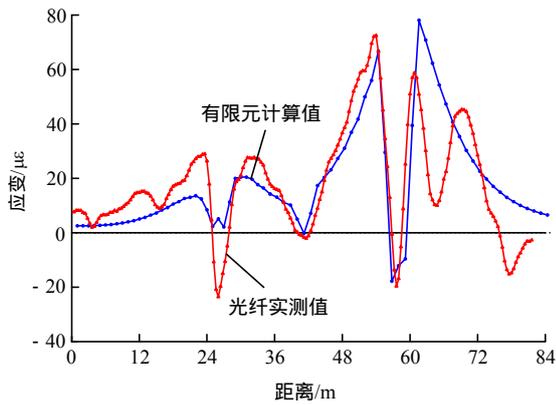


图 16 开挖步 16, 1 号光纤应变对比

Fig.16 The strain contrast of No.1 fiber in step 16

4 的应变监测结果, 其光纤传感器分布为左侧位于隧道轴线 40~50 cm 开挖进尺断面内, 右侧位于 10~20 cm 开挖进尺断面内, 中间为沿着隧道轴线方向距断面 5 cm 处。在第 1 步开挖时, 5 根光纤右侧在洞室围岩水平方向均发生较大拉应变  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_1$  沿远离隧道方向逐渐减小, 其减小趋势逐渐放缓, 这与有限元分析趋势吻合, 反映岩体在隧道开挖后, 开挖对深处岩体的影响越来越小。

取 10~20 cm 开挖进尺断面隧道左下部位岩体(光纤 1 右侧)分析, 监测断面 1 的光纤监测结果显示, 在部位 开挖后, 其右侧产生较大的临空面, 开挖断面转化为由部位 与部位 支撑, 支撑作用比原岩减弱, 围岩向洞内挤压, 产生较大应变。其中, 解除部位 的第 3 步、第 8 步、第 14 步和第 18 步应变之和(占总应变的 27.88%), 解除部位 的第 4 步、第 9 步、第 10 步、第 15 步和第 19 步应变之和(占总应变的 30.18%), 二者应变之和占总应变的 58.06%, 说明对于隧道左下侧岩体, 部位 与部位 的开挖会产生较大的水平位移。对于 10~20 cm 开挖进尺隧道断面左侧中偏下部岩体(光纤 2、光纤 3 右侧), 监测断面 2 的应变监测结果显示, 解除部位 的第 3 步、第 8 步、第 14 步和第 18 步应变之和(占总应变的 29.8%), 解除部位 的第 4 步、第 9 步、第 10 步、第 15 步和第 19 步应变之和(占总应变的 37.23%), 二者应变之和占总应变的 67.23%, 说明隧道断面左侧中偏下部岩体的变形主要是部位 与部位 解除产生的。而对于部位 的解除, 会产生较大变形, 说明水平岩梁对隧道断面起明显支撑作用, 由此推知, 对于隧道断面左侧中点位置, 岩梁的支撑作用会更加显著。对于 40~50 cm 开挖进尺断面隧道左上部岩体, 监测断面 4 的应变监测结果显示, 解除部位 的第 1 步、第 2 步、

第 6 步、第 7 步、第 13 步和第 17 步应变之和(占总应变的 39.5%), 解除部位 的第 4 步、第 9 步、第 10 步、第 15 步和第 19 步应变之和(占总应变的 19.87%), 解除部位 的第 3 步、第 8 步、第 14 步和第 18 步应变之和(占总应变的 28.39%), 三者应变之和占总应变的 87.76%, 说明隧道断面左上部岩体的变形主要是部位 解除产生的; 而对于部位 的解除, 也会产生较大变形, 说明断面下部岩体的解除对整个隧道断面的变形都有很大影响, 岩梁对左上部的侧向变形也起到一定的支撑作用。综上所述, 横向岩梁对于隧道开挖过程中的围岩侧向变形起到明显的支撑作用, 对抑制围岩变形有良好的效果。

对于在 3 号光纤、10 号光纤、13 号光纤中部, 沿隧道轴线方向的应变  $\epsilon_2$  表现为明显的压应变, 并且随着断面的开挖, 其应变峰值逐渐向里推进, 说明在隧道开挖过程中, 未开挖部分岩体向已开挖断面挤压。

图 14(f)~(g)为断面 5 的 12, 13 号光纤应变监测结果, 从图中可以看出, 位于隧道正上部的光纤处于压应变状态, 从光纤布置位置分析, 说明该位置处的围岩受到外部岩体的挤压, 对于 40~50 cm 开挖进尺断面(光纤 12, 13 左侧)的部位, 可看到应变图产生明显的下凹区域, 说明该部位发生较大挤压变形, 上部岩体向下挤压, 这与竖向光栅尺监测结果的发展趋势一致。

### 5.2 光纤传感器、光栅尺数据对比及误差分析

根据几何原理, 实际应变与位移的几何示意图见图 17, 其关系为

$$\epsilon_{AB} = \frac{U_A - U_B}{L_{AB}} \tag{1}$$

式中:  $U_A, U_B$  分别为点 A, B 的位移;  $L_{AB}$  为光纤初始长度;  $\epsilon_{AB}$  为 A, B 区间内的传感器监测点应变。

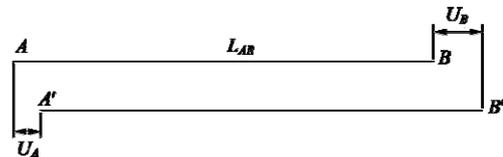


图 17 几何示意图

Fig.17 Geometric sketch

当 AB 一端固定, 即  $U_A=0$ , 可得  $U_B = \epsilon_{AB} L_{AB}$ , 若对整条光纤进行积分, 可得端部光纤位移为

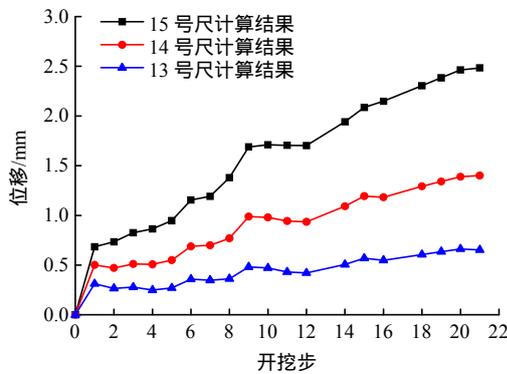
$$\Delta U = \int_{Z_1}^{Z_2} \epsilon(Z) dZ \tag{2}$$

式中:  $\Delta U$  为  $Z_1, Z_2$  区间内的相对位移量, 当  $Z_1$  固定, 则  $\Delta U$  即为  $Z_2$  的位移量;  $\epsilon(Z)$  为  $Z_1$  到  $Z_2$  区

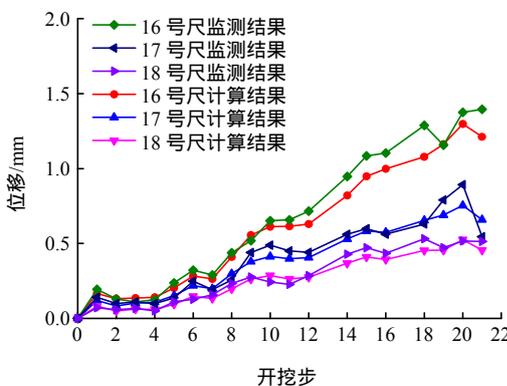
间内的传感器监测点的应变变量。

从式(1)和(2)可以看出， $\Delta U$  的精度随传感器空间分辨率的提高而提高，本文采用 1 cm 空间分辨率，是以往光纤传感精度的 10 倍以上，认为可用于位移的计算。光纤应变积分的计算结果与光栅尺多点位移计的位移结果对比见图 18，其中由于 10~20 cm 开挖进尺断面上部光栅尺在试验中受到外部干扰，数据发生破坏，此处仅给出光纤应变积分结果。

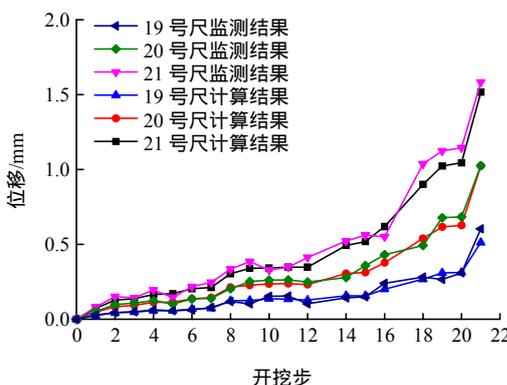
由图 18(b)~(d)可知，在整个开挖过程中，各光栅尺多点位移计位移量与积分计算的位移量的变化趋势基本一致，但光栅尺多点位移计位移比计算位移大 5%左右，经分析是可能由于模型相似材料与光纤之间无法完全变形协调，故光纤产生的变形稍小。



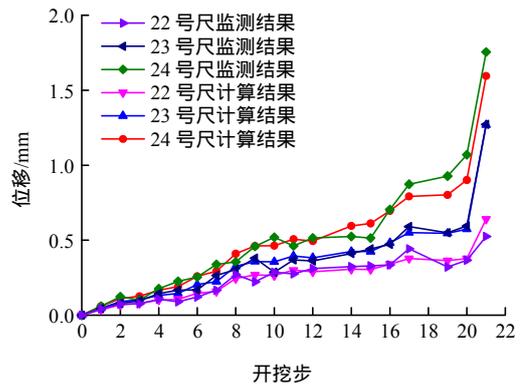
(a) 10~20 cm 开挖进尺断面上部



(b) 10~20 cm 开挖进尺断面下部



(c) 40~50 cm 开挖进尺断面上部



(d) 40~50 cm 开挖进尺断面下部

图 18 位移结果对比

Fig.18 Displacement result contrast

从图 18 可以看出，当开挖光纤传感器与光栅尺多点位移计所在的断面时，光纤应变变化量明显大于开挖非光纤所在断面所产生的应变变量，且开挖光纤所在断面之后断面的影响明显大于开挖其所在断面之前断面产生的影响，这都与实际经验相吻合，说明 2 种检测结果的是有效的。

从图 14(a), (b), (d), (e) 光纤应变监测结果可以看出，在光栅尺多点位移计埋设部位会出现明显的应变降低区域，其降低幅度比较明显。原因上文已经提及，应该是由于光栅尺多点位移计对土体产生了锚固效应，对其部分模型进行了加固，因此产生了较大的误差。而对比图 14(b), (c) 可知，由于光栅尺多点位移计传感器距其较远，产生影响较小，更为真实地反映了开挖过程中围岩变化，曲线更加平滑。由于传统传感器都较大，或需要采用较多的传输线缆(如：应变砖)，因此传统传感器或线缆会对试验产生较大影响，但这类误差几乎不可避免，而光纤传感器由于直径小( $< 0.1 \text{ mm}$ )，并且能将监测与数据传输同步进行，且能得到更多的数据，因此认为光纤传感器相较于传统各类传感器更有应用前景。

## 6 结论与展望

(1) 在十字岩柱暗挖法隧道施工模型试验中，应用了基于光频域反射(OFDR)原理的分布式光纤传感技术，它具有空间分辨率高、精度高、分布式数据采集、连续数据采集、受环境影响小和不易疲劳等特点。

对试验中的分布式应变监测结果进行处理、分析，并与光栅尺多点位移计数据对比，偏差在 10%

以内,表明其监测结果的有效性。

(2) 通过对分布式应变监测结果分析,得到了在十字岩柱暗挖法施工过程中围岩的分布式应变分布规律,并将其与有限元数值模拟结果相对比,得到较满意的结果。

通过对比,分析了光频域反射分布式应变监测技术相对于传统传感器或其他光纤技术的优越性,并成功将其应用于十字岩柱暗挖的大断面隧道开挖模型试验中,初步揭示了其在地下工程模型试验中应变监测的巨大潜力,并且认为该技术在其他土木工程试验(如钢结构试验、边坡试验等)中也有较好的应用前景。但需要指出的是,在其应用过程仍有许多待完善的因素,如监测距离短(70 m),光纤与相似材料的变形协调问题,如何将光纤传感器竖向布置并且保证正常工作等。这些问题有待于进一步的试验和分析加以解决。另外,对于隧道岩体开挖后周围围岩应变的分布式空间规律还处于摸索状态,需要进一步研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘泉声,徐光苗,张志凌. 光纤测量技术在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 310-314.(LIU Quansheng, XU Guangmiao, ZHANG Zhiling. Application of fiber optic sensors to geotechnical engineering monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 310-314.(in Chinese))
- [2] 王爱民,陶记昆,李仲奎. 微型高精度多点位移计的设计及在三维模型实验中的应用[J]. 实验技术与管理, 2002, 19(5): 21-26.(WANG Aimin, TAO Jikun, LI Zhongkui. The design of the miniature precision multi-point displacement meter and the application in the three-dimensional model experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2002, 19(5): 21-26.(in Chinese))
- [3] 柴敬,张丁丁,李毅. 光纤传感技术在岩土与地质工程中的应用研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3): 28-37.(CHAI Jing, ZHANG Dingding, LI Yi. Research progress of Optical Fiber sensing technology in geotechnical and geological engineering[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(3): 28-37.(in Chinese))
- [4] MENDEZ A, MORSE T F, MENDEZ F. Applications of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures[J]. Fiber Optic Smart Structures and Skins II, 1990, 60(2): 60-69.
- [5] 刘雄. 光纤传感技术在岩土力学与工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 588-591.(LIU Xiong. On the application of fiber optical sensor to geo-mechanics and geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 588-591. (in Chinese))
- [6] 刘元雪,郑颖人. 光纤检测技术及其应用于岩土工程的关键问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 585-587.(LIU Yuanxue, ZHENG Yingren. Fiber optics detection technology and the key problems of its application in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 585-587.(in Chinese))
- [7] 朱鸿鹄,殷建华,张林,等. 大坝模型试验的光纤传感变形监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1188-1194.(ZHU Honghu, YIN Jianhua, ZHANG Lin, et al. Deformation monitoring of dam model test by optical fiber sensors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1188-1194.(in Chinese))
- [8] 朱鸿鹄,朱维申,殷建华,等. 地下开挖模型试验的光纤监测[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 826-830.(ZHU Honghu, ZHU Weishen, YIN Jianhua, et al. Fiber optical monitoring of an underground excavation model test[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(6): 826-830.(in Chinese))
- [9] 陈旭光,张强勇,段抗,等. 基于光栅传感的模型测量系统应用研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1409-1415.(CHEN Xuguang, ZHANG Qiangyong, DUAN Kang, et al. Research on application of optical sensors-based measuring method to model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1409-1415.(in Chinese))
- [10] 杨庚鑫,张林,朱鸿鹄,等. 光纤光栅传感监测在拱坝地质力学模型试验中的应用[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(8): 52-57.(YANG Gengxin, ZHANG Lin, ZHU Honghu, et al. Application of fiber bragg grating sensor in geomechanical model test of arch dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(8): 52-57.(in Chinese))
- [11] 柴敬,魏世明,常心坦,等. 岩梁变形监测的分布式光纤传感技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4068-4071.(CHAI Jing, WEI Shiming, CHANG Xintan, et al. Distributed optical fiber sensor for monitoring rock deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 4068-4071.(in Chinese))
- [12] 解国爱,贾东,吴晓俊,等. 构造模拟实验中的光纤应变测量[J]. 地质通报, 2007, 26(5): 520-525.(XIE Guoai, JIA Dong, WU Xiaojun, et al. Measurement of optical fiber strain in structural analogue modeling experiments[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(5): 520-525.(in Chinese))
- [13] 王宝军,李科,施斌,等. 边坡变形的分布式光纤监测模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 325-332.(WANG Baojun, LI Ke, SHI Bin, et al. Simulation experiment for distributed fiber monitoring on deformation of soil slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 325-332.(in Chinese))
- [14] 隋海波,施斌,张丹,等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3725-3731.(SUI Haibo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Study on distributed optical fiber sensor based monitoring for slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3725-3731.(in Chinese))
- [15] 魏广庆,施斌,贾建勋,等. 分布式光纤传感技术在预制桩基桩内力测试中的应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 911-916.

- (WEI Guangqing, SHI Bin, JIA Jianxun, et al. Application of distributed optical fiber sensing to testing inner force of prefabricated piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 911–916.(in Chinese))
- [16] 葛捷. 分布式布里渊光纤传感技术在海堤沉降监测中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1 856–1 860.(GE Jie. Application of BOTDR to monitoring sea dyke subsidence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1 856–1 860.(in Chinese))
- [17] 张丹, 张平松, 施斌, 等. 采场覆岩变形与破坏的分布式光纤监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 952–957.(ZHANG Dan, ZHANG Pingsong, SHI Bin, et al. Monitoring and analysis of overburden deformation and failure using distributed fiber optic sensing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 952–957.(in Chinese))
- [18] 丁勇, 王平, 何宁, 等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 719–724.(DING Yong, WANG Ping, HE Ning, et al. New method to measure deformation of SMW piles based on BOTDA[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 719–724.(in Chinese))
- [19] 朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821–828.(ZHU Honghu, SHI Bin, YAN Junfan, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber optical strain sensing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 821–828.(in Chinese))
- [20] 王飞, 黄宏伟, 张冬梅, 等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的盾构隧道变形感知方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1 901–1 908.(WANG Fei, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei, et al. Deformation sensing method of shield tunnel based on optical fiber sensing technology of BOTDA[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1 901–1 908.(in Chinese))
- [21] 沈圣, 吴智深, 杨才干, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的盾构隧道横截面收敛变形监测方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 104–116.(SHEN Sheng, WU Zhishen, YANG Caiqian, et al. Convergence deformation monitoring of shield tunnels based on distributed optical fiber strain sensing technique[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 104–116.(in Chinese))
- [22] 卢毅, 施斌, 于军, 等. 地面变形分布式光纤监测模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 896–901.(LU Yi, SHI Bin, YU Jun, et al. Model test on distributed optical fiber monitoring of land subsidence and ground fissures[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 896–901.(in Chinese))
- [23] 李焕强, 孙红月, 刘永莉, 等. 光纤传感技术在边坡模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 703–1 708.(LI Huanqiang, SUN Hongyue, LIU Yongli, et al. Application of optical fiber sensing technology to slope model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 703–1 708.(in Chinese))
- [24] 朱友群, 朱鸿鹄, 孙义杰, 等. FBG-BOTDA 联合感测管桩击入土层模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增 2): 695–702.(ZHU Youqun, ZHU Honghu, SUN Yijie, et al. Model experiment study of pipe pile driving into soil using FBG-BOTDA sensing monitoring technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Supp.2): 695–702.(in Chinese))
- [25] 王兴, 施斌, 魏广庆, 等. 土木与岩土工程监测新技术——BOFDA 的性能与特点[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 763–768.(WANG Xing, SHI Bin, WEI Guangqing, et al. A novel technique for civil and geotechnical engineering monitoring: performance and characteristics of BPFDA[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 763–768.(in Chinese))
- [26] 柴敬, 张丁丁, 李毅. 光纤传感技术在岩土与地质工程中的应用研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3): 28–37.(CHAI Jing, ZHANG Dingding, LI Yi. Research progress of optical fiber sensing technology in geotechnical and geological engineering[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(3): 28–37.(in Chinese))
- [27] 顾一弘. 高分辨率 OFDR 关键技术研究[硕士学位论文][D]. 西安: 电子科技大学, 2009.(GU Yihong. The research of the key of High-resolution OFDR technology[M. S. Thesis][D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.(in Chinese))
- [28] 刘琨, 冯博文, 刘铁根, 等. 基于光频域反射技术的光纤连续分布式定位应变传感[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 187–193.(LIU Kun, FENG Bowen, LIU Tiegeng, et al. Continuous distributed fiber strain location sensing based on optical frequency domain reflectometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 187–193.(in Chinese))
- [29] 丁振扬. 几种改进 OFDR 性能方法的提出及验证[博士学位论文][D]. 天津: 天津大学, 2013.(DING Zhenyang. Methods for improving OFDR performances and their experimental verifications[Ph. D. Thesis][D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.(in Chinese))
- [30] FROGGATT M, MOORE J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1 735–1 740.
- [31] 蔡志岗, 靳珂, 李伟良, 等. 光时域反射仪(OTDR)的研制[J]. 半导体光电, 2002, 23(1): 48–50.(CAI Zhigang, JIN Ke, LI Weiliang, et al. Manufacture of optical time domain reflectometer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23(1): 48–50.(in Chinese))
- [32] Data sheet for OBR 4600. [http://www.lunatechnologies.com/products/obr/files/OBR4600\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.lunatechnologies.com/products/obr/files/OBR4600_Data_Sheet.pdf).
- [33] 黄明利, 谭忠盛, 郭家, 等. 特大断面超浅埋隧道预留十字岩梁岩柱开挖技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 299–307.(HUANG Mingli, TAN Zhongsheng, GUO Jia, et al. Excavation technology of super-large cross-section ultra-shallow tunnel with reserved cross rock beam-pillar method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 299–307.(in Chinese))
- [34] 刘泉声, 雷广峰, 肖龙鹤, 等. 十字岩柱法隧道开挖地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 919–927.(LIU Quansheng, LEI Guangfeng, XIAO Longge, et al. Geo-mechanical model test on the tunnel excavation with cross rock pillar method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 919–927.(in Chinese))