

DOI: 10.11779/CJGE201705014

# 土工离心机光纤光栅测试系统及其模型试验研究

贾立翔<sup>1</sup>, 施斌<sup>\*1</sup>, 魏广庆<sup>2</sup>, 张振<sup>1</sup>, 童恒金<sup>2</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 215123)

**摘 要:** 光纤光栅传感技术 (Fiber Bragg Grating, 简称 FBG) 具有准分布、测量精度高、抗电磁干扰强和实时监测等优点, 其传感器可根据监测对象要求小型化。介绍了一套土工离心机光纤光栅测试系统, 包括系统的软硬件构成, FBG 解调仪, FBG 传感器小型化, 锚杆、桩基、测斜管以及挡土墙感测模型的制作工艺等。通过一组土工离心机边坡模型试验, 验证了该系统应用于土工离心机模型多参量监测的可行性, 显示出该系统具有结构简单, 测量内容多, 测试精度高, 量程大, 抗电磁干扰强, 系统工作稳定, 配套光纤光栅传感器重量轻、体积小、可准分布布设、形成整体监测网络等优点, 为土工离心机试验监测提供了一种新的手段。

**关键词:** 土工离心机; 光纤光栅测试系统; 小型传感器; 感测模型

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)05 - 0896 - 10

**作者简介:** 贾立翔(1990 - ), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程及其分布式监测技术研究。E-mail: jialx@nzsensing.com。

## Fiber Bragg grating test system and model tests based on geotechnical centrifuge

JIA Li-xiang<sup>1</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>, WEI Guang-qing<sup>2</sup>, ZHANG Zheng<sup>1</sup>, TONG Heng-jin<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Suzhou NanZee Sensing Technology Ltd, Suzhou 215123, China)

**Abstract:** The fiber Bragg grating (FBG) sensing technology has many advantages such as associate distribution, high precision, anti-electromagnetic, real-time monitoring, etc., and the sensors can be miniaturized according to monitoring objects. A set of FBG sensing monitoring system is introduced, including the software and hardware of the system, the FBG demodulator, the miniaturization of the sensors and the manufacturing process sensing models for anchors, pile foundation, inclinometer pipes and retaining walls. The monitoring data show that the system can be availably applied to geotechnical centrifuge model for multi-parameter monitoring, and it is of advantages such as simple structure, abundant test content, high precision, high range, anti-electromagnetic interference and stable performances. The matching FBG sensors are light and small and can be arranged in the way of associate distribution so as to form an overall monitoring network. The FBG monitoring system may provide a new method for the measurement of geotechnical model tests.

**Key words:** geotechnical centrifuge; FBG test system; small sensor; sensing model

## 0 引 言

在地质与岩土工程等学科中, 常常需要制作各种物理模型, 验证理论分析结果和发现一些新的现象。对于多数岩土工程结构而言, 其受力状态和变形特性很大程度上取决于本身所受到的重力。由于普通小比尺模型的自重应力远低于原型的水平, 因此很难反映原型的受力状况<sup>[1]</sup>。为解决这一问题, 一种行之有效的办法就是离心机模拟技术。由于惯性力与重力绝对等效, 且高加速度不会改变工程材料的性质<sup>[2]</sup>, 因此, 土工离心机可以提供一个人造高重力场, 再现土工原型的受力性状<sup>[3]</sup>。

然而, 土工离心机虽然解决了重力场的模拟问题,

但要获得一个完整的高质量的模型试验结果, 必须还要有一个可靠的模型试验监测系统。由于离心试验是在高速旋转的离心机中进行, 所有的数据采集和模型观测只能通过各种量测传感器来实现<sup>[4]</sup>, 因此, 传感器和数据采集系统的性能, 直接影响到土工离心试验的成败。由于离心机在运转过程中会产生高重力场和高频电磁场<sup>[5]</sup>, 土工离心模型的尺寸较小, 长度在 0.20~1.5 m 之间<sup>[6]</sup>, 传统的电类传感器尺寸一般偏大,

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41230636); 国家重大科研仪器研制项目 (41427801)

收稿日期: 2016 - 03 - 21

\*通讯作者 (E-mail: shibin@nju.edu.cn)

在重力作用下会对模型产生较大影响, 且易受电磁干扰而出现很大测试误差。如振弦式土压力传感器、应变片传感器等<sup>[7]</sup>, 虽然已经能达到毫米级的测量精度, 但经离心机惯性力作用放大后, 测量精度和可靠性会受到很大影响。

在岩土-结构相互作用研究中, 王玉峰等<sup>[8]</sup>进行的不同支护模式下边坡变形的离心试验中, 由于作为土钉相似材料的钢丝太细, 无法粘贴应变片而选择铝合金材料代替, 使模拟材料性质发生了变化, 影响了测试结果; 郭永建等<sup>[9]</sup>利用离心模型探究了桩基的受力特性, 选择在模拟桩基的铜管上进行钻孔, 以方便大量的应变片引线, 这不仅操作繁琐, 还影响了桩基模型本身的结构和完整性; 冯振等<sup>[2]</sup>在离心模型发展综述中指出, 滑环周围的强电干扰严重影响了模型试验水平的提高。因此, 研制适合离心机特点的传感器件和监测系统十分必要。

光纤光栅技术是一种光传感测试技术, 其感测元件重量轻, 体积小, 抗电磁干扰, 能实时监测, 并且具有多个光纤光栅传感器串联准分布式监测的特点<sup>[10]</sup>, 十分符合离心机模型试验的监测要求。但是要将这一技术应用于土工离心机的模型监测还必须克服诸多软硬件方面的技术瓶颈, 如应力、应变、位移、倾斜、沉降等参数的感测元件小型化, 数据采集仪的防震和数据无线传输, 数据显示与分析软件等。

本文针对土工离心机及其模型的特点, 介绍了本课题组所在的南京大学产学研平台——苏州南智传感科技有限公司, 最新研发的一套土工离心机光纤光栅测试系统, 并将这一系统应用于土工离心机边坡模型试验中, 验证了这一测试系统的可靠性和适用性。

## 1 光纤光栅感测原理

### 1.1 FBG 测试原理

光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, 简称 FBG)是利用光纤材料的光敏性, 通过紫外光曝光的方法而制成的一种纤芯折射率周期性变化的相位光栅, 其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的滤波器或反射镜。当一束宽光谱光经过光纤光栅时, 满足布拉格衍射条件的入射光将产生反射, 其它波长的光会全部穿过而不受影响。测量原理如图 1 所示。

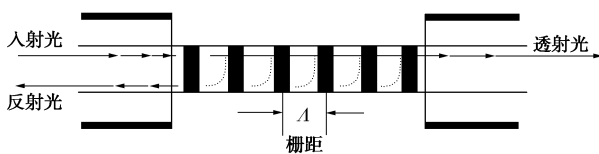


图 1 FBG 测量原理

Fig. 1 Measuring principles of FBG

布拉格衍射条件可表示为

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

式中,  $\lambda_B$  为 FBG 中心波长,  $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  为光纤光栅折射率调制周期。

反射的中心波长跟光栅周期, 纤芯的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  有关, 因此 FBG 传感器周围的温度和应变的改变均能引起布拉格反射光中心波长  $\lambda_B$  的改变。

### 1.2 轴力与变形计算

FBG 测试得到的是光纤光栅的轴向应变, 其轴向变形与结构物轴向变形一致, 剔除温度对测试结果的影响后, 可由式 (2)、(3) 获得结构轴力数据<sup>[11]</sup>。结构物应力  $\sigma(Z)$  为

$$\sigma(Z) = \varepsilon(Z) \cdot E_c \quad (2)$$

式中,  $E_c$  为结构物的弹性模量。则结构物轴力  $Q(Z)$  为

$$Q(Z) = \sigma(Z) \cdot A \quad (3)$$

式中,  $A$  为结构物截面面积。

悬臂梁结构(测斜管等)的挠度也可直接由轴向应变计算获得<sup>[12]</sup>。设  $\varepsilon_1(z)$  和  $\varepsilon_2(z)$  分别为在水平荷载方向上对称分布的两条传感光纤在深度  $z$  处的应变测试值, 则轴向压缩应变  $\varepsilon(z)$  和弯曲应变  $\varepsilon_m(z)$  值分别为

$$\varepsilon_m(z) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2} \quad (4)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} \quad (5)$$

图 2 为测斜管受水平荷载作用下的变形状况。测斜管在水平荷载  $p$  作用下, 测斜管管顶部位移由  $mn$  变为  $m'n'$ , 此时, 选取管中性轴上纵向线段  $O_1O_2$  长度为  $dz$ , 中性层上的  $O_1O_2$  线段曲率半径为  $\rho(z)$ , 管的旋转角度为  $d\theta$ , 距中性轴  $y(z)$  处的弯曲应变为

$$\varepsilon_m(z) = \frac{y(z)d\theta}{dz} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho(z)} = \left| \frac{d\theta}{dz} \right| \quad (7)$$

把式 (7) 代入式 (6), 得到弯曲应变与桩径方向位移间的关系:

$$\varepsilon_m(z) = \frac{y(z)}{\rho(z)} \quad (8)$$

式 (8) 表明, 横截面上任一点的纵向弯曲应变随该点在截面上的位置呈线性变化。

管发生弯曲时, 曲率半径与弯矩之间的关系为

$$\frac{1}{\rho(z)} = \frac{M(z)}{EI} \quad (9)$$

式中,  $EI$  为管身抗弯刚度 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ),  $E$  为管身材料弹性模量,  $I$  为管身换算截面惯性矩。

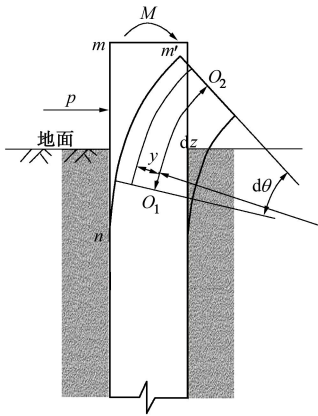


图2 测斜管受水平荷载变形图

Fig. 2 Deformations under horizontal load

由此可得

$$M(z) = E \cdot I \cdot \frac{\varepsilon_m(z)}{y(z)} \quad (10)$$

由挠曲线上，挠度和曲率关系可以得到

$$\frac{1}{\rho(z)} = \frac{\frac{d^2\omega}{dz^2}}{\left[1 + \left(\frac{d\omega}{dz}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (11)$$

测斜管在弯曲时，其转角一般很小，即  $(d\omega/dz)^2$  远小于 1。因此，可以把式 (11) 简化，得到

$$\frac{d^2\omega}{dz^2} = \frac{1}{\rho(z)} \quad (12)$$

把式 (9)、(10) 代入式 (12)，得到挠曲轴近似微分方程。测斜管在水平荷载作用下，底部变形很小，因此，假设测斜管底部不发生位移，并对挠度进行积分，则得到挠度的积分方程：

$$v(z) = \int_H^z \int_H^z \frac{\varepsilon_m(z)}{y(z)} dz dz \quad (13)$$

式中， $H$  为测斜管的埋深。

## 2 测试系统

### 2.1 系统构成

土工离心机光纤光栅测试系统由硬件和软件两部分组成。硬件部分，采用多通道传输方式，即将多个 FBG 传感器串联在同一条光纤线缆上，将每个传感串组成的通道集合到数据解调仪，形成分布式传感网络结构。软件部分，采取多线程模式，实时采集和分析测试数据。

系统的组成及工作流程见图 3。

测试系统主要包括 3 个子系统：①传感器子系统，采用准分布式 FBG 传感技术，研制成不同功能的小型传感器。②数据采集与传输子系统，主要包括光纤光栅解调仪和传输光缆，功能是采集并传输传感器感测

数据。③数据接收与管理子系统，主要功能是接收并处理数据，获得测试所需要的物理量，并对测试结果数据进行管理存档。测试系统如图 4 所示。

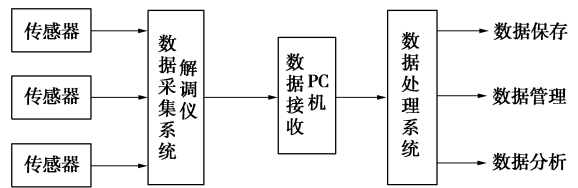


图3 监测系统组成

Fig. 3 Composition of monitoring system

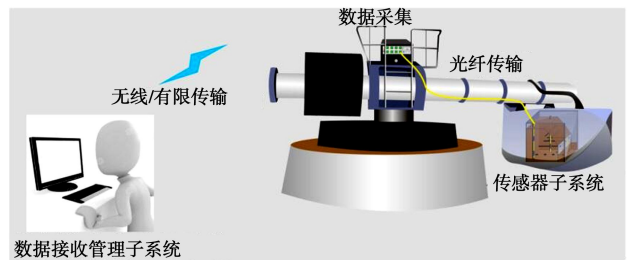


图4 土工离心机光纤光栅测试系统

Fig. 4 FBG system based on geotechnical centrifuge

### 2.2 FBG 传感器小型化

在土工离心机光纤光栅测试系统中，对于土工模型中各物理量的测试需要相应的 FBG 传感器。由于土工离心机试验模型体积较小，一般在  $0.03 \sim 2.25 \text{ m}^3$  之间<sup>[6]</sup>，因此，所采用的 FBG 传感器的尺寸也应很小，这样才能不影响所测模型本身的性质。为此，课题组专门研发出了适用于土工离心机模型测试的小型 FBG 传感器，主要有：土压力传感器、位移传感器、温度传感器等，传感器的相关尺寸和性能见表 1。

表1 传感器性能参数

Table 1 Performance parameters of sensors

传感原件	用途	主要参数
FBG (串)	结构应变 结构内力 温度测量	感测精度为 $1\mu\epsilon$ ， $0.1^\circ\text{C}$ ，尺寸为 $\Phi 0.25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 最小间距：20 mm
微型 FBG 土压力盒	土层压力	量程为 200~3000 kPa 分辨精度为 1%F.S. 外形尺寸为 $\Phi 40 \times 16 \text{ mm}$
微型 FBG 位移计	土体压缩结构 位移 土体沉降	量程为 50 mm 分辨精度为 1%F.S. 外形尺寸为 $\Phi 6 \times 170 \text{ mm}$
FBG 温度计	温度测量	量程为 $-40^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 分辨精度为 $0.1^\circ\text{C}$

### 2.3 感测模型制作

在土工离心机模型试验中，需要根据试验要求，

制作各种感测模型。

(1) 锚杆和桩感测模型的制作

锚杆及锚索模型主要承受拉应力, 因此其抗拉强度为主要的测试量, 而模型桩通常按与原型桩的抗弯强度  $EI$  相同来采用铝合金或铜制作而成<sup>[13]</sup>。本文以不锈钢钢棒作为锚杆模型, 以铝合金空管作为桩模型, 来介绍锚杆与桩的感测模型的制作工艺。具体步骤为: ①用砂纸将不锈钢钢棒与铝管表面打磨粗糙以增加胶水的黏结效果, 再用酒精或丙酮擦拭干净; ②预拉光纤光栅, 将光栅的两端用速干胶固定, 然后在整个光栅串表面涂抹固化胶, 高温固化 24 h。③在光栅串表面再涂抹一层环氧树脂, 固化 24 h, 锚杆与桩感测模型制作完成, 示意图见图 5。

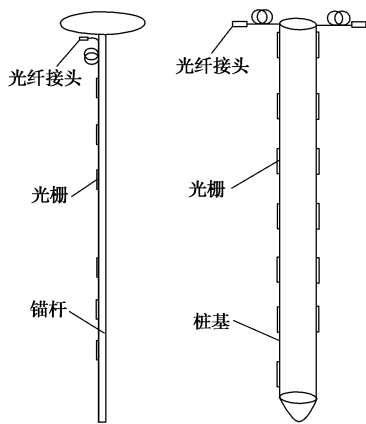


图 5 锚杆与桩基模型

Fig. 5 Sensing models for anchors and pile foundation

(2) 测斜管与挡土墙感测模型的制作

测斜管和挡土墙模型可选用高强度的有机玻璃管和有机玻璃板模拟<sup>[14]</sup>。制作工艺与锚杆和桩感测模型相似, 但由于有机玻璃不能进行高温固化, 因此选用紫外线固化胶代替。测斜管光纤光栅布设于对称的两边, 挡土墙按照待测内容针对性布设。感测模型示意图如图 6 所示。

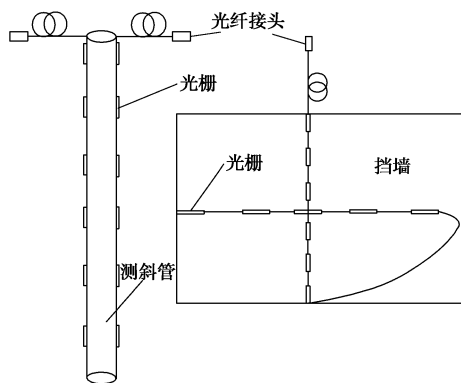


图 6 测斜管与挡墙模型

Fig. 6 Sensing models for inclinometer pipes and retaining walls

光纤光栅串尺寸很小, 又轻巧, 不会对测量结构

造成影响, 亦不会对整个模型产生扰动。

2.4 光纤光栅解调仪

离心模型试验在高速旋转的离心机上进行, 对光纤光栅解调仪的要求较高。本系统采用了苏州南智传感科技有限公司最新研发的离心机专用解调仪 (Nzs-FBG-A07), 如图 7。该产品具有抗震性能好的集成光学模块, 满足高离心力的工作环境, 并且包含多个传感器通道, 可以同时解调多条光纤上的传感器或进行通道分析; 根据离心设备现场环境和数据传输条件, 采用有线通讯或无线通讯方式将测数据传送至数据接收与管理子系统, 进行测试分析。仪器技术指标见表 2。



图 7 光纤光栅解调仪

Fig. 7 FBG demodulator

表 2 光纤光栅解调仪技术指标

Table 2 Technical indices of FBG demodulator

指标类型	指标值	指标类型	指标值
通道数	8	光学接口类型	FC/APC
波长范围/nm	1529~	每通道最大	30
	1569	FBG 数量	
波长分辨率	1	通信接口	以太网(RJ45)
/pm		供电电源	AC220V/50 Hz
重复性/pm	±3	功耗/W	<15
解调速率/Hz	≥1	工作温度/°C	0~45
动态范围/dB	35		

3 边坡离心模型试验

3.1 传感器系数率定

为确定传感器测试性能, 确保试验数据的有效性, 试验前对所使用光纤光栅裸栅、微型光纤光栅土压力计以及微型光纤光栅位移计进行了率定试验。

(1) 光栅裸栅率定

对光纤光栅裸栅的标定选用标准位移台, 光栅两端固定于标定台, 长度为 2 m。试验采用分级拉伸、回拉方式, 拉伸时分 10 级, 每级拉 300 με, 即拉伸 0.6 mm, 用千分表控制拉伸长度, 回拉时分 5 级, 每级 600 με, 即每级回 1.2 mm。试验装置与率定结果如图 8, 9 所示。

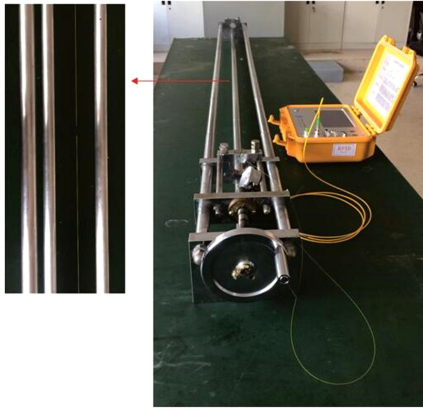


图8 光纤光栅裸栅率定装置

Fig. 8 Calibration devices of FBG

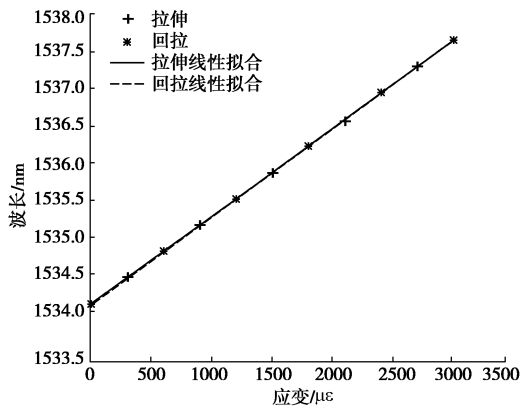


图9 光纤光栅裸栅率定结果

Fig. 9 Calibrated results of FBG

结果显示，光纤光栅裸栅的波长值与应变值满足很好的线性关系，拉伸与回拉阶段的校正决定系数都达到了 0.99992，测得的波长应变系数为 1.18 pm/με。

### (2) 微型光纤光栅土压力计率定

对 FBG 土压计的测试装置选用活塞式油压压力标准器，试验采用分级加卸载的方式，按土压计量程的不同分级进行，加载分 12 级，卸载 6 级。图 10 为光纤光栅土压计标定装置。



图10 微型光纤光栅土压计率定装置

Fig. 10 Calibration devices of FBG earth pressure gauge

图 11 为量程 0.6 MPa 的微型土压计率定结果，可以看到，土压计波长与压力存在很好的线性关系，加载与卸载的校准决定系数分别达到了 0.99996 与 0.99997，得到的波长压力系数为 1.71 nm/MPa。依次对量程为 0.8, 0.8, 1.0, 0.6, 0.6, 0.25 MPa 的 6 个土压计进行了率定，得到的波长压力系数分别为 1.33,

1.21, 1.08, 1.76, 1.71, 4.63 nm/MPa。

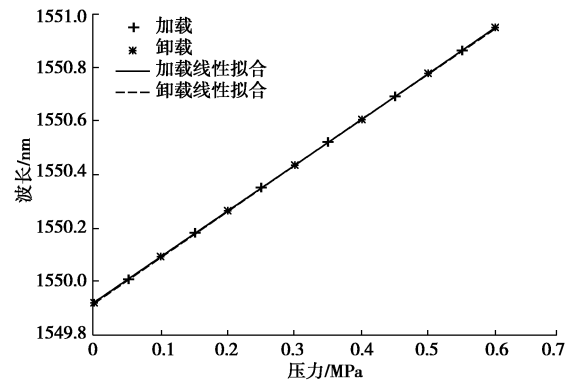


图11 微型光纤光栅土压计率定结果

Fig. 11 Calibrated results of FBG earth pressure gauge

### (3) 微型光纤光栅位移计率定

利用标准位移台对光纤光栅位移计进行率定，将位移计两端固定，选用千分表控制拉伸距离。所选用位移计量程 40 mm，每级拉伸 4 mm，回拉每级 8 mm。图 12 为微型位移计率定装置。

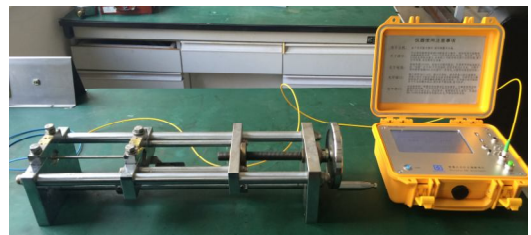


图12 微型光纤光栅位移计率定装置

Fig. 12 Calibration devices of FBG displacement meter

图 13 为微型光纤光栅位移计标定曲线，结果显示，位移计波长与位移线性关系较好，拉伸与回拉的校准决定系数达到了 0.99996，波长位移系数为 24 pm/mm。

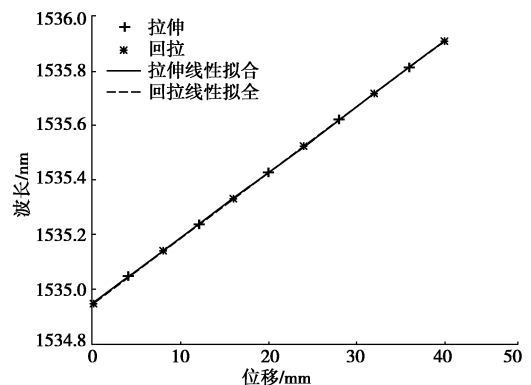


图13 微型光纤光栅位移计率定结果

Fig. 13 Calibrated results of FBG displacement meter

## 3.2 边坡模型设计

离心模型试验已经成为研究边坡稳定性的重要手段<sup>[15-17]</sup>，为了验证土工离心机光纤光栅测试系统的可靠性和适用性，笔者在同济大学的离心机上进行了一组边坡模型试验。模型设计为箱长 51 cm，宽 45 cm，

高 55 cm, 侧面和底面均为厚钢板。边坡模型采用高岭土、粉土和水混合填筑而成, 高岭土: 粉土为 1 : 4, 含水率为 15%, 坡度 1 : 1.25, 具体土性参数为土粒相对密度  $G_s$  为 2.52, 黏聚力为 21 kPa, 内摩擦角为  $21.6^\circ$ , 密度为  $1.95 \text{ g/cm}^3$ 。模型中设计了一组由抗滑桩、测斜管、锚杆和挡土墙组成的加固结构, 边坡模型见图 14, 15。

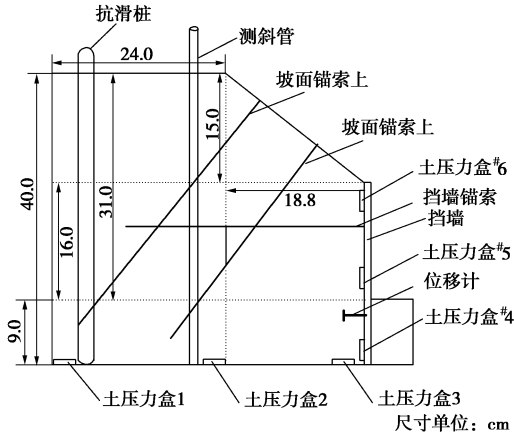


图 14 边坡模型剖面图

Fig. 14 Profile of slope model

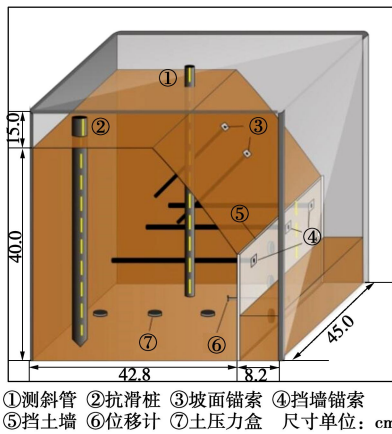


图 15 边坡模型三维示意图

Fig. 15 Three-dimensional diagram of slope model

按前述制作工艺制作了各感测模型。选择  $\phi 3 \text{ mm}$  不锈钢棒模拟锚杆, 边坡模型中共布设了 5 根锚杆, 其中 3 根为感测模型, 分别为坡面上部锚杆、坡面下部锚杆以及中间位置的挡墙锚杆。以  $\phi 12 \text{ mm}$  铝合金空管模拟抗滑桩, 以  $\phi 10 \text{ mm}$  有机玻璃管模拟测斜管, 以厚度 5 mm 有机玻璃板模拟挡土墙。传感器为课题组研发的新型迷你土压力盒以及微型位移计。传感器和模型如图 16 所示。

### 3.3 边坡模型制作

边坡模型材料为调配的粉质黏土。由于颗粒之间存在空隙, 离心机加载过程中会产生过大的沉降, 因此在填土过程中, 采用分层夯实法对模型土体进行夯实, 以减小离心试验中沉降的影响。模型填筑时, 在相应位置布设传感器以及感测模型, 同时检测传感器

的工作情况, 保证传感器功能正常。填筑完毕后, 用刮刀进行削坡处理, 并且将挡土墙外围的填土高度控制在挡墙高度的 2/5 左右。将制作完成的模型箱安装到离心试验机上, 调节离心机配重, 整理并固定各传感器信号传输光缆, 接入光纤光栅解调仪, 以 5g 加速度试转, 测试解调仪以及传感器工作情况。试验准备过程如图 17 所示。



图 16 传感器

Fig. 16 Sensor devices

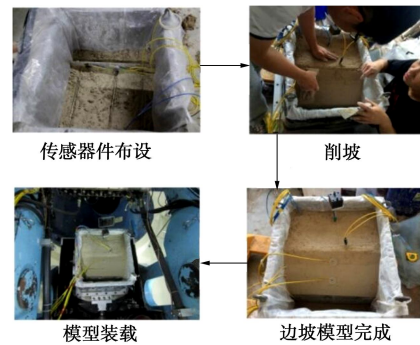


图 17 试验准备过程

Fig. 17 Test preparation

### 3.4 试验测试过程

试验中, 土工离心机最大加速度设计为 60g。试验时, 离心机从 0g 逐级加速到 60g, 每级增加 5g, 在此过程中实时监测模型中传感器以及结构模型的数据变化, 当观测到数据无明显变化时, 加速到下一级离心加速度。离心机加速过程如图 18 所示。图中横坐标为离心机运行时间, 纵坐标为离心机加速度值。

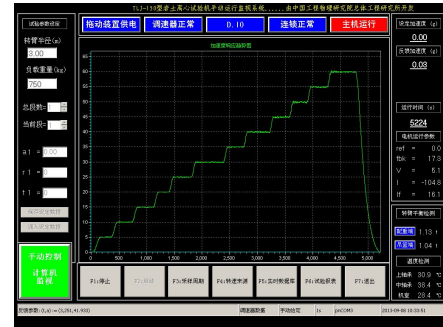


图 18 离心机加速过程

Fig. 18 Acceleration process of centrifuge

在离心机运转过程中, 监测各加固结构的应变, 边坡底部土压力和侧部土压力, 以及挡墙下部的位移量。

### 4 结果及分析

光纤光栅解调仪采集的原始数据为传感器的波长值, 根据各类传感器的率定系数, 可换算成应变、压力、位移等参量。由于试验过程持续时间短, 环境温度稳定, 温度对测试结果的影响可忽略不计, 因此以下分析皆不考虑温度因素。

#### 4.1 锚杆测试结果

图 19, 20 分别给出挡墙锚杆及上部坡面锚杆中数据变化较大点位处的测试波长曲线, 图 21~23 为根据光纤光栅裸栅的率定系数及式 (2)、(3) 计算出的锚杆轴力曲线。

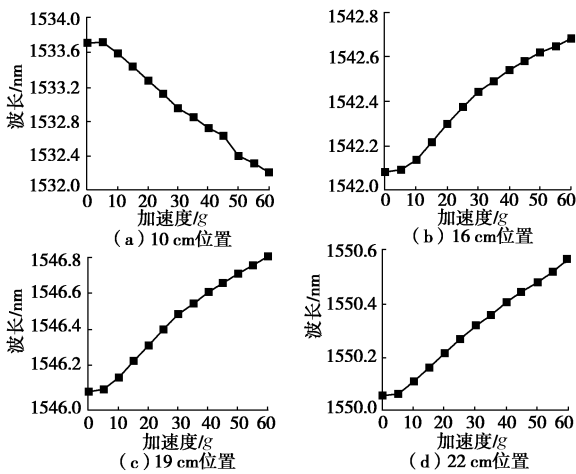


图 19 锚杆波长曲线(挡墙)

Fig. 19 Wavelength curves of anchors (retaining walls)

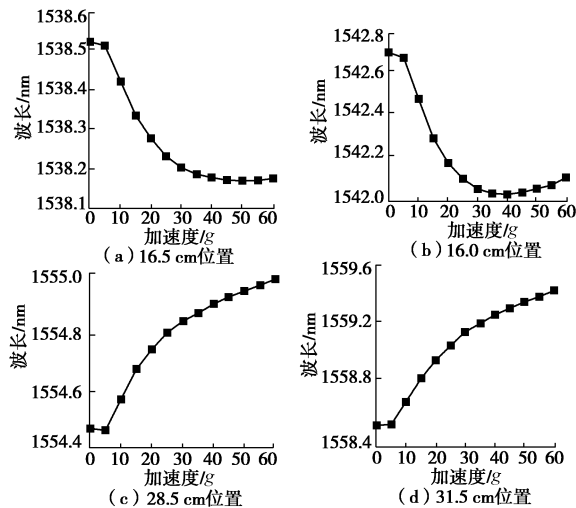


图 20 锚杆波长曲线(坡面上部)

Fig. 20 Wavelength curves of anchors (top of slope)

由波长曲线可以看出, 在 5g 加速度之后, 波长呈规律性增大或减小, 大体规律为锚杆前部分光栅波长减小, 后部分波长逐渐增大。图 21 挡墙轴力曲线显示挡墙锚杆在 13cm 附近开始发挥作用, 在 18.8 cm 附近达到最大轴力值, 此处正好是坡面与坡顶交接的纵面所在位置, 表明此纵面比较软弱, 易发生错动。由图

22, 23 可知, 坡面锚杆轴力达到最大的位置在挡墙填土表层所在的平面 (34.40 cm 与 26.92 cm 处), 此平面以上挡墙前部悬空, 容易产生滑动, 因此锚杆在此平面发挥最大作用。由此可见, 挡墙锚杆与坡面锚杆在边坡中起到了销钉作用, 锚杆凭借杆体自身的抗剪能力阻止了结构面的相对滑动, 从而提高了边坡的稳定性。同时注意到, 离心加速度在 0~30g 时, 坡面锚杆前部分产生较大压缩, 这是由于离心过程中, 土体压缩所导致。图 20 中前两个曲线波长值在下降到 30g 加速度以后基本恒定也印证了土体已压缩稳定。

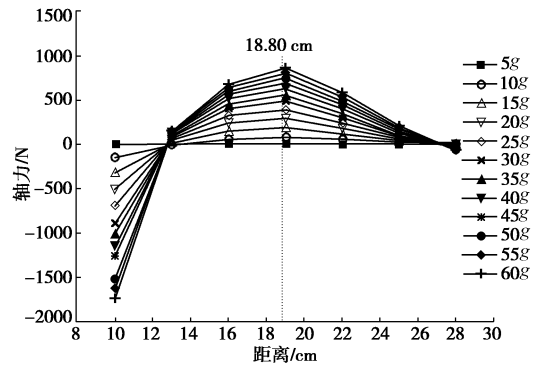


图 21 锚杆轴力曲线(挡墙)

Fig. 21 Axial force curves of anchors (retaining walls)

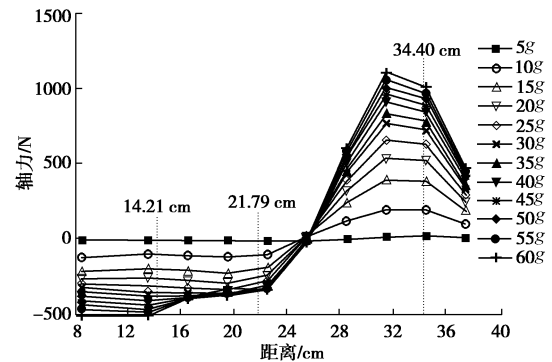


图 22 锚杆轴力曲线(坡面上部)

Fig. 22 Axial force curves of anchors (top of slope)

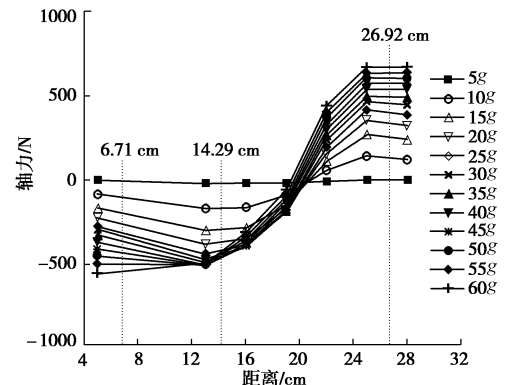


图 23 锚杆轴力曲线(坡面下部)

Fig. 23 Axial force curves of anchors (bottom of slope)

#### 4.2 测斜管与抗滑桩测试结果

测斜管位于边坡坡顶前缘位置, 用以测量自坡顶向坡底的水平位移。为避免抗滑桩加固边坡, 导致边坡不

能够发生破坏, 因此将抗滑桩布设于坡顶后缘位置。图 24, 25 为测斜管与抗滑桩中数据变化较大点位处波长曲线, 图 26 是由式 (13) 计算出的测斜管位移曲线, 图 27 为根据式 (2)、(3) 计算的抗滑桩轴力曲线。

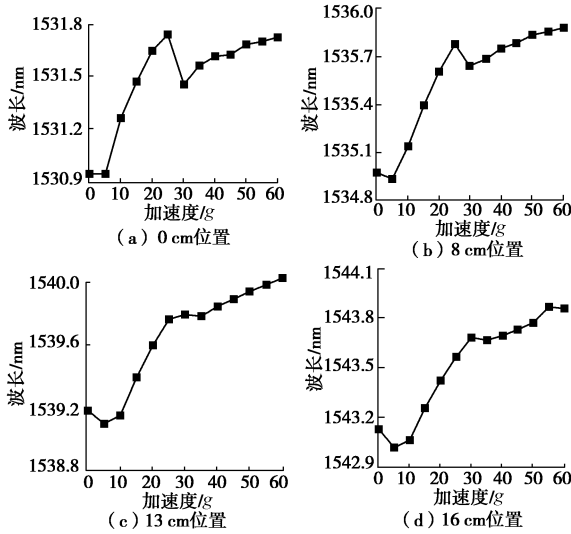


图 24 测斜管波长曲线

Fig. 24 Wavelength curves of inclinometer pipes

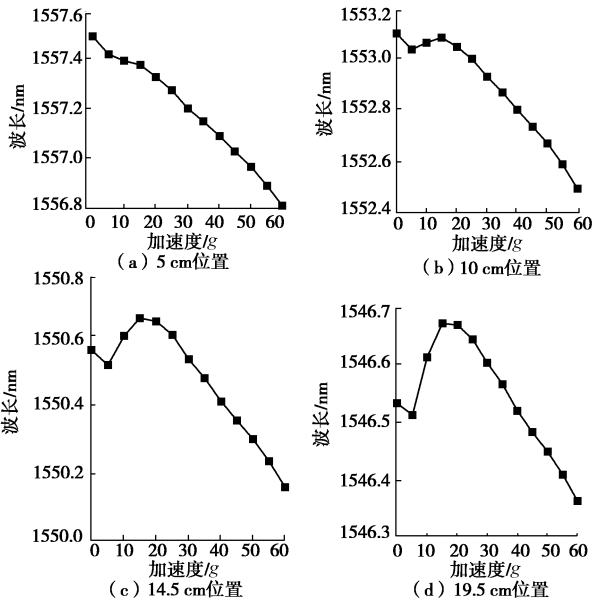


图 25 抗滑桩波长曲线

Fig. 25 Wavelength curves of pile foundation

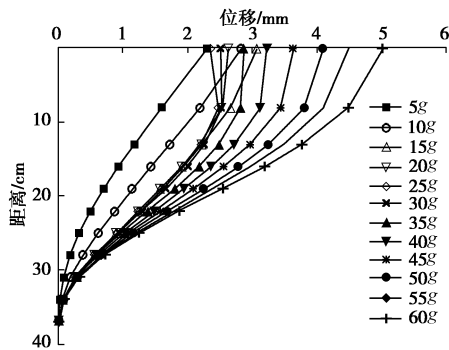


图 26 测斜管位移

Fig. 26 Displacements of inclinometer pipes

图 24 显示 30g 加速度以后, 测斜管波长值变化速

率减缓, 各测点保持大致相同的变化规律。由图 26 可知, 沿着测斜管从下到上水平位移逐渐增大, 坡顶水平位移最大达到了 5 mm, 7 cm 处有一明显的转折, 0~7 cm 斜率较大, 保持较大的水平位移。试验后查看边坡模型, 发现测斜管后部出现一条裂缝, 深度在 7 cm 左右, 如图 28 所示。由图 25 可知, 抗滑桩波长值在 30g 加速度之后线性减小, 30g 之前受土体压缩影响稍有差异。从图 27 可看出, 该桩在加载过程中发生明显的偏心, 导致很长一段拉应力的出现, 但大体轴力变化规律符合桩基的加载过程。

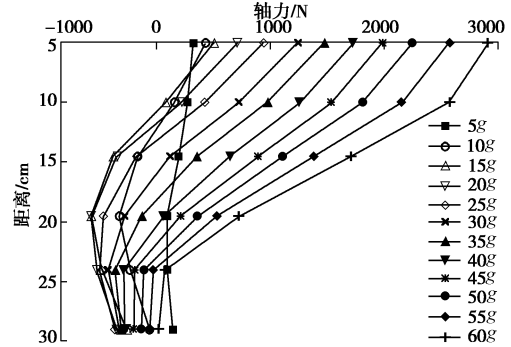


图 27 桩基轴力

Fig. 27 Axial forces of pile foundation



图 28 坡顶裂缝

Fig. 28 Crack of top of slope

### 4.3 挡土墙、底部压力测试结果

模型布设了六个土压力盒, 一个位移计, 并在挡墙的纵向黏贴光纤光栅串, 监测挡墙应变。土压力盒 #1~#6 的量程分别为 0.8, 0.8, 1.0, 0.6, 0.6, 0.25 MPa, 位移计量程 20 mm, 传感器率定系数见 3.1 节。测试结果如图 29~33 所示。

底部土压力随着离心力增加线性增长, 然而同样深度的土压力盒 #1 要比 #2 大 0.07 MPa, 这可能是由于 #1 土压力盒放置在靠近模型箱侧壁的部位, 侧壁对土的摩擦力抵消了部分土的自重, 导致其土压力减小。位移计显示, 挡土墙底部往外偏移了将近 1.8 mm, 这部分位移是由于挡墙外填土的压缩造成, 挡土墙的偏移也导致 #5 和 #6 侧向土压力盒所测土压力很小。挡土墙波长值呈线性增减, 应变曲线中, 6.0, 16.0 cm 处分别为挡墙锚杆以及填土表层所在位置, 两者限制了



挡墙的大变形,因此在两者中间挡土墙所受应变最大,往两侧逐渐减小。

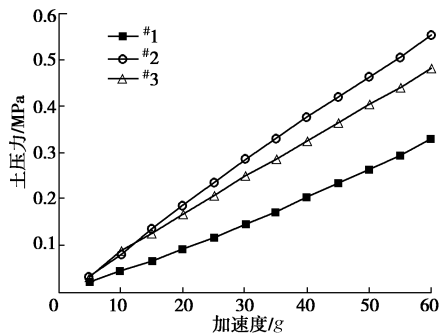


图 29 底部土压力

Fig. 29 Soil pressures of bottom

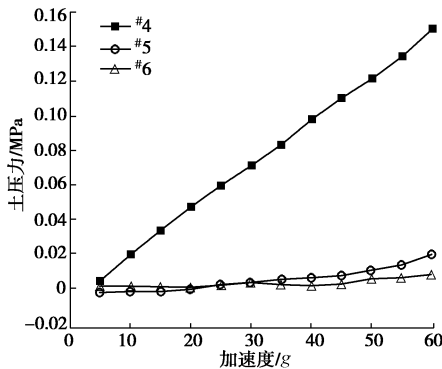


图 30 侧向土压力

Fig. 30 Soil pressures of side

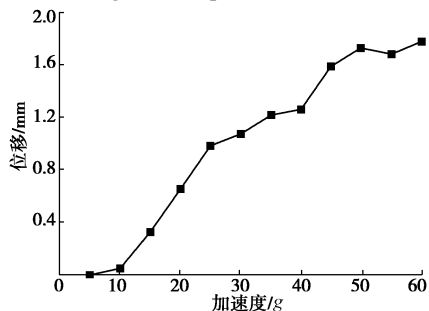


图 31 位移计曲线

Fig. 31 Curves of displacement gauge

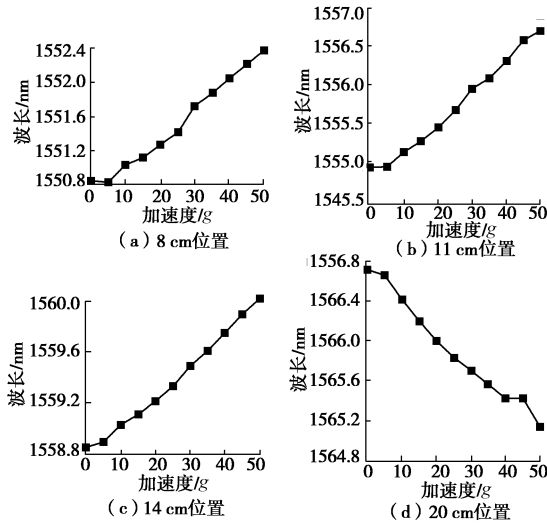


图 32 挡土墙波长曲线

Fig. 32 Wavelength curves of retaining walls

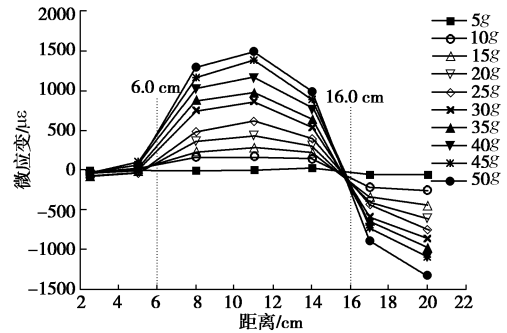


图 33 挡土墙应变曲线

Fig. 33 Strain curves of retaining walls

### 5 结 论

本文针对土工离心机及其模型的特点,介绍了一套土工离心机光纤光栅测试系统,并将这一系统应用于土工离心机边坡模型试验中,获得了很好的测试效果,取得了如下3点结论。

(1) 土工离心机光纤光栅测试系统,结构简单,测试范围大,测量内容多,完全抗电磁干扰,系统工作稳定。配套光纤光栅传感器重量轻,体积小,可准分布布设。该系统非常适合离心机模型试验的监测。

(2) 该测试系统能够对包括边坡在内的土工离心机模型形成整体的监测网络,可对土体压力、土体位移,尤其对桩基、锚杆、测斜管以及挡土墙等结构物模型的受力与变形进行全面的实时监测。

(3) 土工离心机光纤光栅测试系统的研制成功,为离心机试验提供了一种新的监测手段。模型试验结果表明该系统应用于土工离心机模型多参量准分布监测是完全可行的,显示出独特的优势,应用前景广阔。

致 谢: 在本项目的离心机试验过程中,得到了同济大学黄雨教授、马险峰教授、孙长安老师和温卓强同学在离心机场地和模型试验方面的热心帮助,在此深表感谢!

### 参考文献:

[1] 濮家骝. 土工离心模型试验及其应用的发展趋势[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 92 - 94. (PU Jia-ju. Development trend of the geotechnical centrifuge modeling test and application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 92 - 94. (in Chinese))

[2] 冯 振, 殷跃平. 我国土工离心模型试验技术发展综述[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 323 - 331. (FENG Zheng, YIN Yue-ping. State of the art review of geotechnical centrifuge modeling test in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(3): 323 - 331. (in Chinese))

[3] 张建民, 于玉贞, 濮家骝. 电液伺服控制离心机振动台系

- 统研制[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 843 - 845. (ZHANG Jian-ming, YU Yu-zhen, PU Jia-ju. Development of a shaking table in electro-hydraulic servo-control centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 843 - 845. (in Chinese))
- [4] 邢建营, 刑义川, 梁建辉. 土工离心模型试验研究的进展与思考[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, **3**(1): 27 - 31. (XING Jian-ying, XING Yi-chuan, LIANG Jian-hui. Development and thoughts of geotechnical centrifuge modeling[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2005, **3**(1): 27 - 31. (in Chinese))
- [5] 谢欣. 大型土工离心机数据采集与监测系统研制[J]. 大坝观测与土工测试, 1992(4): 15 - 20. (XIE Xin. Development of data acquisition and monitoring system for large scale geotechnical centrifuge[J]. Dam Observation and Geotechnical Test, 1992(4): 15 - 20. (in Chinese))
- [6] 邢建营. 土工离心模型试验技术的研究和应用[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2005. (XING Jian-ying. The research and application of the technology of geotechnical centrifuge modeling test[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2005. (in Chinese))
- [7] BROWNELL K. Dynamic capabilities of the wright lab-oratory geotechnical centrifuge[C]// Centrifuge 94. Singapore, 1994: 177 - 181.
- [8] 王玉峰, 程谦恭, 黄英儒. 不同支护模式下黄土高边坡开挖变形离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 1032 - 1046. (WANG Yu-feng, CHENG Qian-gong, HUANG Ying-ru. Centrifuge tests on excavation of high loess slope with different reinforcement modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2014, **33**(5): 1032 - 1046. (in Chinese))
- [9] 郭永建, 谢永利, 江黎, 等. 边坡桩基受力特性的离心模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, **30**(1): 35 - 39. (GUO Yong-jian, XIE Yong-li, JIANG Li, et al. Centrifugal model test on mechanic features of pile foundation at slope[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, **30**(1): 35 - 39. (in Chinese))
- [10] 汪云龙, 王维铭, 袁晓铭. 基于光纤光栅技术测量模型土体内侧向位移的植入梁法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 181 - 185. (WANG Yun-long, WANG Wei-ming, YUAN Xiao-ming. Embedded-beam approach for measuring interior lateral displacement of soils using FBG technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 181 - 185. (in Chinese))
- [11] 魏广庆, 施斌, 贾建勋. 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 Guang-qing, SHI Bing, JIA Jian-xun. 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))
- [12] 隋海波, 施斌, 张丹. 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**(增刊 2): 3725 - 3731. (SUI Hai-bo, SHI Bin, ZHANG Dan. Study on distributed optical fiber sensor-based monitoring for slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S2): 3725 - 3731. (in Chinese))
- [13] 李嘉雨. 岩土边坡及支护结构土工离心机模型制作方法的研究[J]. 中国水运, 2014(11): 336 - 338. (LI Jia-yu. Study on the method of making geotechnical centrifuge model of rock and soil slope and retaining structure[J]. China Water Transport, 2014(11): 336 - 338. (in Chinese))
- [14] 白冰, 周健. 土工离心模型试验技术的一些进展[J]. 水电自动化与大坝监测, 2001, **25**(1): 9 - 11. (BAI Bing, ZHOU Jian. Some advances in geotechnical centrifuge model test technology[J]. Hydropower automation and dam monitoring, 2001, **25**(1): 9 - 11. (in Chinese))
- [15] VUCETIC M, TUFENKJIAN M R, DOROUDIAN M. Dynamic centrifuge testing of soil-nailed excavations[J]. Geotechnical Testing Journal, 1993, **16**(2): 172 - 187.
- [16] TUFENKJIAN M R, VUCETIC M. Dynamic failure mechanism of soil-nailed excavation models in centrifuge[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(3): 227 - 235.
- [17] LI J, THAM L G, JUNAIDEEN S M. Loose fill slope stabilization with soil nails: full-scale test[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(3): 277 - 288.