

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0623-06

洞群模型试验中微型多点位移计的设计及应用

张乾兵, 朱维申, 李 勇, 孙林锋, 张 磊

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 地质力学模型试验是研究大型地下洞室群围岩稳定性状况的重要方法, 但是, 许多制约因素使得这类试验难以达到预期效果, 其中包括试验过程中物理量的量测问题。以双江口水电站地下洞群稳定性为研究对象, 开展了模型试验为准确测量三维应力状态下洞群模型试验中围岩内部的微小位移, 设计、制作和安装了高精度微型多点位移计, 获得了围岩在开挖全过程中的位移变化规律曲线, 同时, 还开展了与模型试验相对应的数值模拟。将试验结果与数值模拟结果进行了对比分析。研究表明, 设计成功的微型多点位移计能够广泛应用在各类岩土工程模型试验之中。

关 键 词: 地下洞群; 地质力学模型试验; 位移量测; 微型多点位移计; 数值模拟

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Design of mini multipoint extensometer in geomechanical model test of cavern group and its application

ZHANG Qian-bing, ZHU Wei-shen, LI Yong, SUN Lin-feng, ZHANG Lei

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Geomechanical model tests play important roles in stability analyses of large-scale underground cavern groups. However, the application of this type of test was restricted by a number of factors, in particular the measurement of physical quantities during the test. A large-scale geomechanical model test was conducted under three-dimensional stress state. To measure small displacements in the surrounding rock masses, a mini multipoint extensometer measurement system was developed. The variation process and regular curves of the displacements of surrounding rock masses during excavation can be obtained. In addition, 3D numerical simulation was performed to simulate the whole process of the physical model tests. The comparison between experimental and numerical results leads to conclusions on the stability of the underground cavern group. The study shows that design and application of the mini multipoint extensometer measurement system have achieved satisfactory results.

Key words: underground cavern group; geomechanical model test; displacement measurement; mini multipoint extensometer; numerical simulation

1 引 言

目前, 大型岩土工程的研究和设计中大量采用了数值模拟方法, 但地质力学模型试验仍是一种另具特色、常为不可或缺的方法。因为物理模型是真实的物理实体, 在基本满足相似原理的条件下, 更能真实地反映空间结构关系, 试验过程和结果能给人以更直观的感觉, 使人更容易从全局上把握岩体工程的整体力学特征、变形趋势和稳定性状况, 特别是当研究超载试验的安全度和破裂机理方面时具

有独有的优势^[1-8]。实验力学发展最快的领域是量测和数据采集技术, 在地质力学模型试验中, 量测的物理量主要有应力、应变和位移等。量测的方法主要有: 格栅法、机械法、电测法、光测法、声测法、热测法等。由于地质力学模型材料的变形模量较低, 只有通过量测变形并在修正刚化影响的基础上才能换算出应力。围岩变形是工程设计人员最关注的, 是进行支护设计的最主要的依据, 同时也是验证各种数值模拟方法和进行反馈分析最重要的物理量。实际工程中, 由于大量的监测仪器是在洞室

收稿日期: 2009-06-06

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 90510019); 国家重点基础研究发展规划 973 项目 (No. 2002CB412705)。

第一作者简介: 张乾兵, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: qianbing-zhang@epfl.ch

通讯作者: 朱维申, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: zhuw@sdu.edu.cn

开挖完成后埋设，不能记录到开挖引起的全过程变形。而在模型试验中，可预先在模型内部安置监测仪器量测开挖过程中围岩内部位移变化的全过程，但三维应力场条件下地下洞群的大型模型试验、以及新型位移量测方法的应用研究还较少^[9-10]。

本文以双江口水电站地下洞群的三维应力状态地质力学试验为研究对象，介绍了模型试验的基本概况，为了能准确量测围岩中的位移变化，就设计、埋设和安装微型多点位移计等相关问题进行了探索研究，并详细介绍了它在模型试验中的应用。同时，为了验证量测结果的准确性还开展了对应的三维数值模拟进行对比分析。

2 洞群模型试验概况

2.1 工程背景

双江口水电站位于四川省境内的大渡河上源足木足河与绰斯甲河汇口以下约 2 km 河段。厂房区现场实测最大主应力值达 38 MPa 左右，这是国内外少见的高地应力区水电站。发电厂房为地下式，包括主厂房、主变室、尾调室 3 大洞室平行布置，最大垂直埋深约 500 m。厂内安装 4 台水轮发电机组，电站装机总容量为 2 000 MW。坝址区内无区域性断裂切割，岩体主要由细~中粒似斑状黑云钾长花岗岩和细~中粒二云二长花岗岩组成^[2]。

2.2 试验概况

本次模型试验是在山东大学最新研制的三维应力状态的模型试验钢结构架上进行的，并在各主要加载面上研制和布设了组合型的滚珠式滑动墙，大大减小了由模型变形引起的承压面上的摩擦力。试验台架的全貌见图 1。



图 1 安装完成后的模型试验钢结构架
Fig.1 The structural steel frame for model tests

模型相似率的几何比和物理量比为 1:150，模型体尺寸（宽×高×厚）为 2.5 m×2 m×0.5 m，在模型

中考虑了 2 个机组的空间布置，包括主厂房，主变室、尾调室、母线洞和部分尾水洞，能较真实地反映洞群开挖的三维效应。相似材料采用的是铁晶砂胶结复合材料，其主要成分为由重晶石粉、铁晶粉、石英砂、一级松香、99.9%纯度的工业酒精等做配料^[11]。模型体采用了预制模型块堆砌成型的工艺方法，块体堆砌时采用新拌和的同配比材料作胶结剂，故接缝的性能与模型块体的相同，能较好地保证模型材料在力学性能上的一致性。同时，在预制块中的设计位置预留监测孔、预埋锚杆和预应力锚索，堆砌时在预留孔中埋设各种测试元件。

表 1 工程岩石和相似材料的参数对比表（均值）
Table 1 Comparison of physical parameters between prototype rock and modeling material (average values)

类别	密度 /(g/cm ³)	抗压强度 /MPa	变形模量 /GPa	黏聚力 /MPa	泊松比
工程岩石	2.65	80.00	30.0	2.000	0.2
相似材料	2.65	0.53	0.2	0.013	0.2

因受到模型尺寸的限制，将实际工程的 8 个开挖分层进行简化后合并为 4 个分层进行模拟开挖，开挖顺序如图 2 所示。洞室开挖采用了人工钻、凿掘进方式，整个开挖过程共分 22 大步（如第一大步包括 I₁、II₁ 和 III₁ 依次开挖 10 cm）。根据现场实测地应力值进行数值分析反演后得到整个厂区内的地应力，通过液压加载控制系统同步施加垂直方向和两水平方向的外荷载，并进行 24 h 的保压工作。

为了全面准确地量测洞壁收敛和围岩内部位移，在整个试验过程中还应用了内窥可视摄像系统、数字照相变形量测系统、棒式光纤 Bragg 光栅传感器和光纤悬臂梁位移计等先进的量测技术。由于不在本文讨论范围之内，故不一一进行说明。开挖过程中同步安装相似材料锚杆和锚索进行支护模拟。

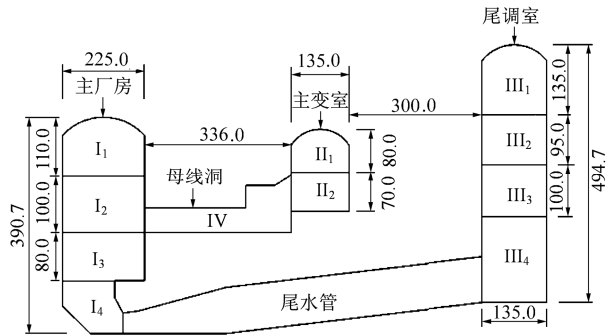


图 2 洞室群模型尺寸及开挖顺序（单位：mm）
Fig.2 The dimensions and excavating subsequence of underground cavern group (unit: mm)

3 微型多点位移计量测系统

3.1 设计思路

在模型体内部的被测部位固定测点锚头, 当被测部位发生位移时, 其位移量就通过与锚头连在一起的细钢丝绳传递到模型结构架外侧的固定于独立基准钢架上的光纤传感器, 信号转换和数据采集系统将实时采集传感器信号并储存在采集器中, 最终通过洞室挖掘软件实时动态显示记录数据。

根据目前大多数水电站地下厂房现场监测和数值分析的资料, 洞室围岩出现的最大位移值约为 ± 100 mm, 若位移小于 0.1 mm, 则对工程意义不大。由模型试验的相似比可知, 若试验中满足量程为 ± 6.67 mm, 并可分辨出 0.001 mm 的位移, 则能满足实际工程的需要。考虑到靠近洞室周边的岩体可能会产生非连续变形, 所以位移传感器的设计量程要求达到 ± 8 mm, 量测精度为 1 μ m。

多点位移计应满足以下条件: 外形尺寸小且能多点测量; 锚头位置固定牢固; 传递摩擦阻力要小; 具有较高的位移传递精度; 测量过程中受外界条件的影响较小。基于上述考虑, 设计了这套高精度微型多点位移计量测系统。

3.2 组成构件和工作原理

微型多点位移计量测系统系统主要由以下部件构成: 测点锚头、细钢丝绳、柔性塑料套管、3孔式塑料自润滑减摩定位盘、高精度光栅尺传感器、重锤、测量基准钢架、信号转换和数据采集系统以及洞室挖掘软件系统等。

工作原理: 设计采用 3 点式位移计; 测点端头采用体积小的小钢爪子, 将其固定在被测部位, 保证其固定的牢固、稳定; 位移计测杆采用连续的柔性钢丝绳, 细钢丝绳直径为 0.5 mm, 由 7×7 股的细钢丝绞成; 细钢丝绳外部采用柔性塑料套管(外径仅 6 mm)做保护管, 塑料套管内部安装若干 3 孔式塑料自润滑减摩定位盘, 3 个小孔用来隔离 3 条细钢丝绳, 使其在固定通道中能沿轴向运动而不互相接触、也不与塑料管接触, 这可保证测绳以很高的精度传递被测点的位移; 从测点到测头传感器之间的连线传递采用 1 根连续的柔性钢丝绳, 用重锤将钢丝绳拉紧。为了将围岩内部的位移传递到模型外部的传感器上, 需要在试验钢结构架和液压加载系统的外侧再安置一个独立的测量基准钢架, 将光栅尺传感器固定在上面。要求该基准钢架完全独立、不受试验加载和人为开挖动作过程的影响, 该钢架的跨度为 6 m, 高度为 4 m。信号转换和数据

采集系统能实时采集传感器光信号并将其转换为电信号储存在采集器中; 洞室挖掘软件可实时动态显示记录数据和进行后处理。设计工作原理见图 3。

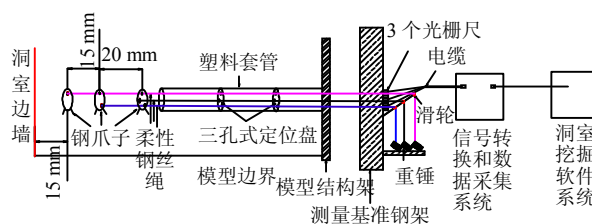


图3 微型多点位移计系统工作原理示意图

Fig.3 Working principle of a mini multipoint extensometer measurement system

3.3 标定试验

根据多点位移计工作原理和模型试验的要求, 对制作成功后的多个微型多点位移计进行标定和精度测试。标定的内容主要有: 固定测点锚头胶水的选取和其长期工作的蠕变变形量(标定时间为 15 d); 细钢丝绳在受拉条件下的变形量, 拉紧钢丝绳所用重锤质量的确定等。

取套管长度为 1.2 m 的多点位移计安置在模型块的预留半圆孔中, 保证安装方式和实际试验中的基本相同。模型块固定在高灵敏度螺纹摇杆标定试验台上(摇杆旋转 1 圈的示值为 ± 1 mm)。一端通过手摇标定台、千分表和光纤光栅传感器进行标准位移给定, 另一端采用光栅尺传感器与采集转换系统进行标定。标定试验装置如下图 4 所示。标准位移以 1~20 mm 等间隔的 20 个值给定, 对其进行受拉变形测试, 每旋转 1 圈摇杆得到 1 组数据, 取 3 组的平均值与标定位移进行对比分析。大量标定试验结果表明, 当固定测点锚头选用 302 胶水、重锤重量为 0.25 kg 时能满足量测精度的要求。



图4 多点位移计标定试验装置

Fig.4 Calibration of test equipment

标定结果显示, 量测系统的重复误差为 0.12%、迟滞误差为 0.08%、钢丝绳形变误差为 0.04%, 302 胶水的蠕变变形误差为 0.08%, 其误差值均小于 0.5% 的要求。

3.4 布置和安装

洞室开挖后的变形主要分布在洞周围岩内，因此多点位移计的测点需布置在离开挖边界较近的不同位置。沿洞室群轴线方向布置 2 个监测断面，在每个断面的主厂房顶拱布设 1 套、主厂房和尾调室边墙的不同高程各布设 2 套多点位移计系统。每个断面共 15 个测点，2 个断面总共 30 个测点，最浅的测点距离边墙 15 mm，另 2 个测点距离边墙依次为 30 mm 和 50 mm。布置断面和高程如图 5 所示。

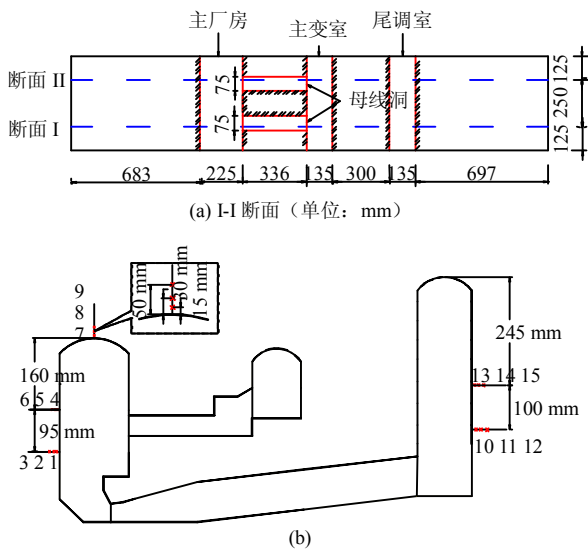


图 5 微型多点位移计监测布置图
Fig.5 Layout of mini multipoint extensometers

制作预制模型块时预留了监测孔，当堆砌到需埋设多点位移计的设计高程时，在下层模型块的预留半圆孔中安置多点位移计。安装过程非常重要，必须保证测点锚头的位置准确、固定牢靠；测点锚头固定完成后，在其顶部安置半圆型塑料套管保护锚头；柔性细钢丝绳必须平直地穿过定位盘和塑料套管；塑料套管在模型块的半圆孔中应放置平直；光栅尺传感器的固定位置必须与塑料套管在同一条线上，并保证与钢丝绳在同一水平线上；安装完成后再堆砌上层半圆孔的模型块，保证上下 2 层模型块上的半圆孔能很好的对接。多点位移计系统的安装过程部分细节如图 6 所示。

4 量测结果与数值模拟结果对比

由量测结果可知，洞室顶拱的变形随开挖步的增加均以下沉为主，最大下沉量达 28 mm（按相似比换算到实际工程的位移量）；边墙的变形均向开挖临空面变化（规定向临空方向变形的位移为正）。

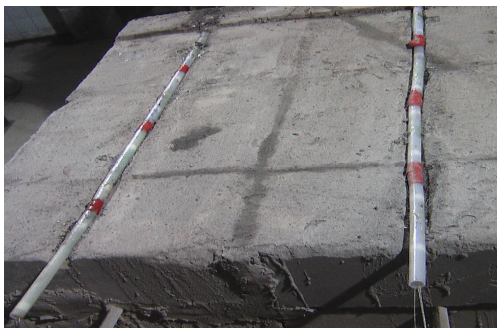
洞群开挖完成后，最大位移值出现在尾调室下游边墙的中部位置，其值约为 40 mm。主厂房上游边墙和尾调室下游边墙的量测结果（I-I 断面），见图 7、8。



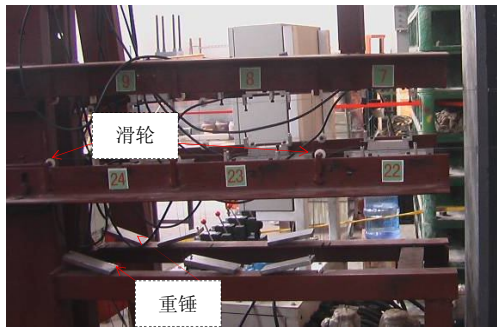
(a) 钢丝绳穿过定位盘和套管



(b) 安装完成的测点锚头和套管



(c) 设计高程底层模型块安装后的套管



(d) 基准钢架上安装光栅尺、重锤和滑轮



(e) 采集和记录系统

图 6 多点位移计系统的安装过程
Fig.6 Installation procedures of the mini multipoint extensometer measurement system

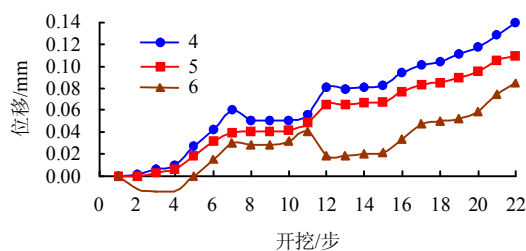


图7 主厂房上游边墙变形曲线

Fig.7 Measured deformations near upstream side wall of main power house

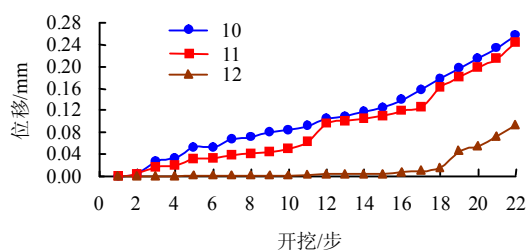


图8 尾调室下游边墙变形曲线

Fig.8 Measured deformations near downstream side wall of surge chamber

数值模拟分析中, 建立与实际模型尺寸大小一致的三维模型。模型中的围岩采用空间 8 节点等参实体单元, 整个计算域共划分为 39 798 个节点和 35 440 个单元, 如图 9 所示。运用 FLAC-3D 软件进行计算分析^[12], 其中物理力学参数与模型材料参数一致, 采用 Drucker-Prager 屈服准则。

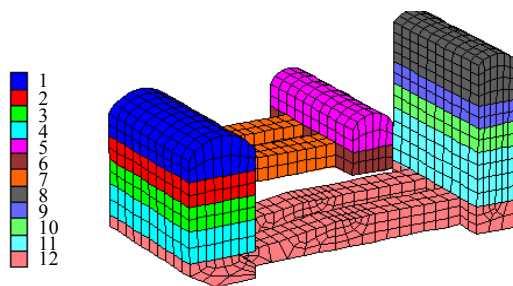


图9 数值分析模型图

Fig.9 Model for numerical simulation

开挖完成后, I-I 断面数值模拟的水平位移云图如图 10 所示, 最大位移值同样出现在尾调室下游边墙的中部位置, 其值为 67.5 mm。由于数值模拟中的最大值在洞壁位置, 而试验量测的是洞室围岩内部的位移, 因此量测结果小于洞壁的变形。在数值模拟结果中提取与多点位移计相对应位置的结果进行对比分析, 图 11 为尾调室下游边墙 14 号测点的位移随开挖步的变化曲线。从曲线可看出, 围岩变形具有一定的规律性, 且量测结果与数值模拟的结

果趋势基本一致。至开挖完成后未发现有围岩掉块或明显的破裂现象, 说明在设计条件下, 围岩经过加固还是较为稳定的。

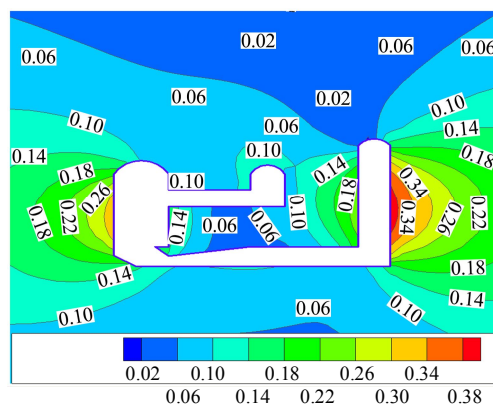


图10 开挖完成后 I-I 断面位移云图 (单位: mm)

Fig.10 Displacement nephogram of the section I-I after excavation (unit: mm)

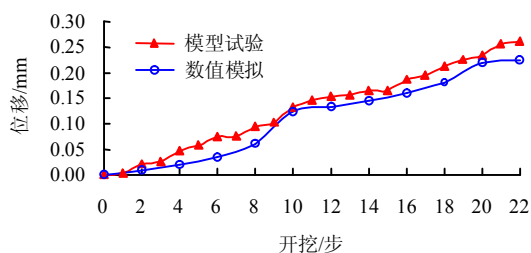


图11 尾调室下游边墙模型试验与数值模拟结果对比

Fig.11 Comparison of measured and calculated deformations of downstream side wall of surge chamber

5 结 论

(1) 微型高精度多点位移计的设计思路合理、制作水平较高、安装过程可靠, 充分显示了体积小、可复用、量测精度和灵敏度高、能实现长期稳定工作、自动化操作、实时数据采集、抗干扰性等优点。是一种较理想的位移量测系统, 可广泛应用于岩土工程模型试验中。

(2) 洞室在开挖过程中引起的围岩变形量与开挖步有较好的规律性, 且位移值一直维持在较小的范围内, 表明开挖和支护设计方案合理可靠。量测结果与对应的数值模拟结果也较接近。

参 考 文 献

- [1] ZHU Wei-shen, ZHAO Jian. Stability analysis and modelling of underground excavations in fractured rocks[M]. Amsterdam: Elsevier, 2004.

- [2] 朱维申, 张乾兵, 李勇, 等. 真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 1—7.
- ZHU Wei-shen, ZHANG Qian-bing, LI Yong, et al. Development of large-scale geomechanical model test system under true 3D loading condition and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 1—7.
- [3] 陈霞龄, 韩伯鲤, 梁克读. 地下洞群围岩稳定的试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(1): 17—23.
- CHEN Xia-ling, HAN Bo-li, LIANG Ke-du. Test research for surrounding rock stability of underground openings[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering**, 1994, 27(1): 17—23.
- [4] 李仲奎, 徐千军, 罗光福, 等. 大型地下水电站厂房洞群地质力学模型试验[J]. 水利学报, 2002, 33(5): 31—36.
- LI Zhong-kui, XU Qian-jun, LUO Guang-fu, et al. 3D geo-mechanical model test of large scaled underground hydropower station[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, 33(5): 31—36.
- [5] 李仲奎, 卢达溶, 中山元, 等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1430—1436.
- LI Zhong-kui, LU Da-rong, ZHONG Shan-yuan, et al. Development and application of new technology for 3D geomechanics model test of large underground houses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1430—1436.
- [6] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 地质力学模型试验技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3785—3789.
- CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Application study on the geomechanical model experiment techniques[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(22): 3785—3789.
- [7] 王汉鹏, 李术才, 张强勇. 分岔隧道模型试验与数值模拟超载安全度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2521—2526.
- WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHANG Qiang-yong. Model test and numerical simulation of overload safety of forked tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2521—2526.
- [8] 卢增木, 陈从新, 左保成, 等. 对影响逆倾层状边坡稳定性因素的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 629—632.
- LU Zeng-mu; CHEN Cong-xin; ZUO Bao-cheng, et al. Experimentation research on factors influencing stability of anti-dip layered slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 629—632.
- [9] 李仲奎, 王爱民. 三维地质力学模型试验中光纤传感器的应用研究[J]. 实验技术与管理, 2006, 43(12): 62—65.
- LI Zhong-kui, WANG Ai-min. Application and consideration of using fiber sensor measurement in 3D geomechanical model test[J]. **Experimental Technology and Management**, 2006, 43(12): 62—65.
- [10] 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 Ai-min, TAO Ji-kun, LI Zhong-kui. Design of the minisize high-precision multipoint displacement indicator and its application in the 3D model experiment[J]. **Experimental Technology and Management**, 2002, 19(5): 21—26.
- [11] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2126—2130.
- ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, GUO Xiao-hong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2126—2130.
- [12] Itasca Consulting Group. Fast Lagrangian analysis of continua in 3D (Version 3.0) (Users manual)[M]. USA: Itasca Consulting Group, 2005.