

# 数字照相量测在大型洞群模型试验中的应用研究

张乾兵, 朱维申, 孙林锋, 郑文华

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘 要:** 地质力学模型试验和数值模拟方法是研究深埋、高地应力条件下大型地下洞室群围岩稳定性状况的重要方法。以双江口水电站地下洞群模型试验为研究对象, 为解决洞周边墙关键点微小位移的量测问题, 通过在洞周表面布置人工量测标志点和全程数字图像采集, 应用 PhotoInfor 图像分析软件系统对洞室拱顶及边墙收敛位移进行了计算分析。获得了洞室加载与开挖过程中位移的变化过程与规律曲线。同时, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件模拟了洞群围岩的稳定性状况。研究结果表明: 在大型洞群模型实验中, 数字照相量测能够识别 0.02 mm 以下的微小位移; 数值计算结果与照相量测结果规律基本吻合; 数字照相量测弥补了三维模型试验中传统预埋量测仪器而破坏模型整体性的缺点, 能够广泛应用在岩土工程试验之中。

**关键词:** 地质力学模型试验; 位移量测; 数字照相量测; 数值模拟

中图分类号: P642 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)03-0447-06

**作者简介:** 张乾兵(1986-), 男, 甘肃白银人, 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: qbzhang666@gmail.com。

## Application of digital photogrammetric techniques in 3D model tests on large caverns

ZHANG Qian-bing, ZHU Wei-shen, SUN Lin-feng, ZHENG Wen-hua

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

**Abstract:** Geomechanical model test and numerical simulation play important roles in stability analysis of large underground caverns at great depth and under high in-situ stresses. Large-scale geomechanical model tests were carried out under true three-dimensional stress state. In order to solve the problem in measurement of small displacements in the surrounding rock masses, the digital speckle correlation method was adopted. Color marks were adhered on the model surface of the caverns, and the PhotoInfor software system was employed to calculate and analyze the vertical displacement of the crown and the convergence values of the side walls. Numerical simulation was also conducted using FLAC<sup>3D</sup> software under the same conditions, and the results of the model test and the numerical approach were compared. The study shows that the research and the application of the displacement measurement methods used in the surrounding rock masses for large-scale model tests on caverns under 3D stress field have achieved satisfactory results.

**Key words:** geomechanical model test; displacement measurement; digital photography-based deformation measurement; numerical simulation

## 0 引 言

在大型地下洞群的研究和设计中大量采用了数值分析法, 但模型试验法仍是一种另具特色、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, 更能真实地反映洞群的空间结构关系、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, 特别是当研究围岩的破裂机理或破裂过程时其具有独有的优势。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, 量测的内容主要有应力、应变和位移, 量测的方法主要有电阻应变片和应变仪、光纤传感器、位移传感器和数码图像分析等。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计算应力。而位移是各种物理量中最主要、最容易量测准确的物理量, 也是验证各种数值计算和进行反馈分析最重要的依据。

基金项目: 国家自然科学基金项目(90510019, 50579033)

收稿日期: 2008-11-18

近年来前人在不断推进和发展此类模型试验方法和量测技术。朱维申等<sup>[1]</sup>开展了高地应力条件下洞群稳定性的地质力学模型试验研究, 主要在模型试验钢结构架和量测技术方面引进了新的技术, 取得了良好的效果。李仲奎等<sup>[2-3]</sup>提出了地质力学模型试验的几项新技术, 包括模拟洞室群施工过程中隐蔽开挖技术和内窥监测等, 并成功用于一个大型水电站地下厂房洞室群的施工仿真三维地质力学模型试验研究。王爱民等<sup>[4]</sup>在模型试验中的位移量测方面设计研制了一种微型高精度多点位移计, 并解决了埋设和安装等有关问题, 成功地应用于洞室围岩稳定的试验中。李元海等<sup>[5]</sup>利用数字图像相关法进行了砂土地基全程变形演变过程与破坏模式的实验观测研究, 开发了隧道洞室围岩破裂带识别方法, 为了推广数字照相变形量测技术<sup>[6]</sup>, 成功研制了一套集图像分析与结果后处理为一体的 PhotoInfor 使用软件系统<sup>[7]</sup>。而大比尺三维地下洞群模型试验及量测方法等方面的应用研究还较少, 尤其缺少三维模型试验内部物理量量测方法的应用研究, 本文以双江口水电站地下洞群模型试验为研究对象, 介绍了三维加载条件下模型试验概况, 主要应用数字照相量测技术分析三维模型试验在开挖过程中洞室边墙关键点位移的变化规律, 实现了该技术在大型地下洞群模型试验中微小位移量测的应用。

# 1 洞群模型试验概况

## 1.1 工程背景

双江口水电站位于四川省境内的大渡河上源木足河与绰斯甲河汇口以下约2~6 km河段。坝址区河谷属高山深切曲流河谷, 两岸山体雄厚, 临河坡高1000 m以上, 自然坡度左岸35°~50°, 右岸45°~60°。厂房区现场地应力测量最大主应力值高达38 MPa左右, 这是国内少见的高地应力区。

发电厂房为地下式, 包括主厂房、主变室、尾调室、母线洞和尾水洞。厂内安装4台水轮发电机组, 电站装机容量为2000 MW。厂房轴线方向为N10°W, 三大洞室平行布置, 其中主厂房全长196 m, 宽29.3 m, 高63 m。垂直埋深约498 m左右。坝址区内无区域性断裂切割, 岩体主要由致密坚硬的细-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<sup>[1]</sup>。

## 1.2 试验概况

(1) 模拟范围: 地下厂房顺水流方向上下游各取主厂房和尾调室最大开挖跨度的3.0~5.5倍长度, 实际分别为3.0和5.2倍; 沿高程方向的下方取到洞室高度的1.25~1.5倍, 实际取为1.25~1.58倍, 达到海拔93 m; 上方取到埋深145 m处, 由于实际洞室埋深约为498 m, 其余荷载由液压加载系统施加在模型顶面;

沿主厂房的纵轴线方向取2个机组的长度(完整的包括2号机组和3号机组), 长102 m。模型几何比尺为1:150, 所以物理模型尺寸为长×高×宽=2.5 m×2.0 m×0.5 m。模型内部模拟了该范围内的主厂房、主变室、尾调室、2条母线洞以及1条尾水洞, 能够较真实地反映洞群的三维效应。

(2) 相似材料: 岩体相似材料采用的是自行研制的铁晶砂胶结岩土相似材料。该复合材料由重晶石粉、铁晶粉、石英砂、一级松香、99.9%纯度的工业酒精等做原料, 已于2007年获得国家发明专利<sup>[8]</sup>。根据相似原理, 本试验采用的几何比和应力比都为1/150。表1为工程岩石与相似材料参数的对比。物理模型采用了大小不同的块体砌置而成, 块体是由以上相似材料混合搅匀后在压力机上压制成型, 待养护后基本保证每个块体的物理力学参数均满足模型试验相似比的要求。

表1 工程岩石和相似材料参数对比表(均值)

Table 1 Comparison between physical parameters of prototype rock and similar materials (average values)						
类别	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度 /MPa	变形模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	摩擦 系数
工程岩石	2.65	80.00	30.0	0.2	2.000	0.85
相似材料	2.65	0.53	0.2	0.2	0.013	0.85

(3) 试验过程: 本次模型试验是在山东大学最新研制的全三维应力状态的六面可施加主动荷载的模型试验钢结构架上进行的, 并在各主要加载面上新研制和布设了组合型的滚珠式滑动墙, 大大减小了由于模型变形引起的摩擦力。砌置完成后的模型试验钢结构架如下图1所示。

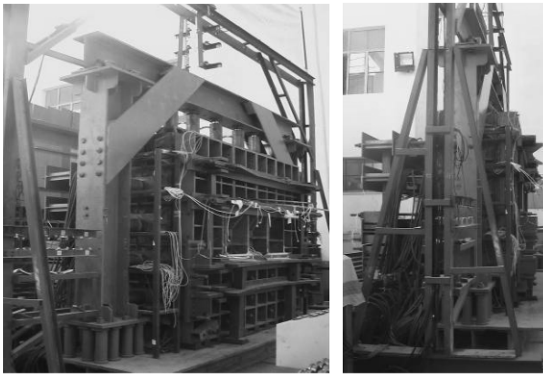


图1 安装完成后的模型试验钢结构架

Fig. 1 Structural steel frame for model tests after installation

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值, 按照应力相似比要求, 通过液压加载设备同步在6个面上施加主动荷载, 并进行较长时间的保压工作。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。

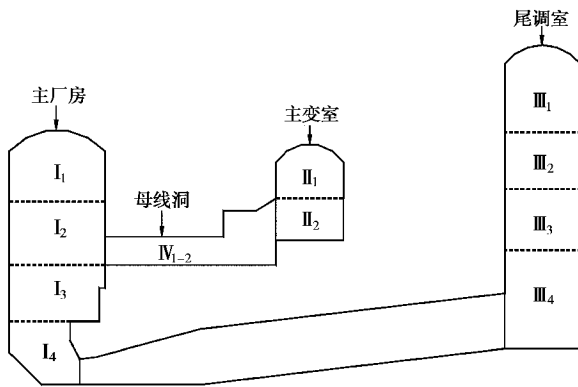


图2 洞室群模型开挖顺序

Fig. 2 Excavating subsequence of model tests

洞室开挖采用人工钻、凿掘进方式, 整个开挖过程共分22大步、52小步。开挖时每分层每次向前推进10 cm, 整个开挖过程中配备了内窥可视摄像系统进行实时监控洞室群开挖进程。

## 2 数字照相量测系统

数字照相量测技术的主要原理为数字图像相关法 (Digital Speckle Correlation Method, DSCM), 其基本测量过程为由高分辨率数码相机记录被测物体变形过程中一系列图片, 对这些有序的图片进行相关性分析, 得到相应的位移。对岩土类材料来说, 可以在模型观测面上设置彩色标点, 即采用人工斑化的方法在试件表面制作散斑, 散斑场测量时可以用白光进行照明, 对环境要求较低, 因此适于岩土工程的试验测量。

### 2.1 数字图像相关法基本原理

DSCM原理如下<sup>[9]</sup>: 首先定义变形前的图像为基准图像, 变形后的图像为目标图像。要想跟踪基准图像上一点 $P$ 的运动, 就以 $P$ 点为中心取子集 $f$ , 在目标图像上搜索与之最匹配的子集 $g$ , 即以 $Q$ 点为中心的子集 $g$ 。搜索成功后,  $g$ 所对应的 $Q$ 点为 $P$ 点变形后的位置, 两点之间的坐标差即为该点的位移。搜索过程是根据统计学的相关性原理, 建立一个相关函数 $C$ , 用这个相关函数来表示变形前后两幅图像的匹配程度, 一般当相关函数 $C=1$ 时, 表示变形前后两幅图像完全匹配, 当 $C=0$ 时, 则表示两幅图像不相关。匹配搜索算法可以达到像素级的精度, 但这样的精度对于常规的力学实验远远不够, 因此在完成像素级的匹配后, 还要进一步利用特殊的数学方法, 获得亚像素级的匹配点的位置, 以获得更高的测量精度。

$$C = \frac{\sum \sum [(f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})]}{[\sum \sum (f - \bar{f})^2 \cdot \sum \sum (g - \bar{g})^2]^{1/2}}, \quad (1)$$

式(1)中, 分母分别为子集 $f$ 和子集 $g$ 的均方根, 分子

为 $f$ 和 $g$ 之间的相关矩。

### 2.2 数字照相量测系统

数字照相量测系统由4台有效像素为1020万的Nikon (尼康) D200单反数码相机、12盏200W的普通白炽灯、若干彩色标点和数字照相图像分析软件系统PhotoInfor组成。

由于此试验需模拟三维地应力场, 整个模型是用刚度很大的模型试验钢结构架封闭的, 只有洞室开挖断面处的钢板在试验时会按照开挖方案被顺序拆掉。因此, 就需要在模型制作过程中把所有量测仪器事先安置在指定位置并埋设在模型内部。但是当模型中安装仪器较多时, 就会破坏模型材料的整体性、影响材料的物理力学性能。而高分辨率数码相机的出现为模型试验位移量测的研究开发了一条简便经济而且实用的途径。考虑到模型材料的脆性特征以及位移量测区域的隐蔽特点, 本文尝试在模型表面黏接彩色标点代替嵌入标点, 量测洞室边墙关键点的位移<sup>[10]</sup>。

### 2.3 图像采集

由于图像采集的质量与量测精度直接相关<sup>[7]</sup>, 因此, 图像采集应满足以下条件: ①光源选择和环境光线的变化是首要考虑因素, 特别是历时较长的试验观测, 力求光照在拍摄期间保持一致。由于本次模型试验历时约2 d, 因此在整个试验过程中, 用黑色避光布将整个试验钢结构架遮住, 构成较大范围的一个暗室, 在洞室周围合理的布置白炽灯, 保证量测系统是在相同的光照环境条件下进行的, 相机和灯光的布置如图3所示。②在模型试验钢结构架前后各布置2台相机, 相机镜头轴线分别正对主厂房和尾调室中心, 距离钢结构架表面约为1 m。③试验过程中, 采用红外遥控装置进行照片拍照, 相机应保持固定不动, 以减少同一系列图像变形的差异。④相机拍照范围应略大于开挖洞室的尺寸。⑤在铝片上喷撒红(R)、绿(G)、蓝(B)三色喷漆, 制成散点斑彩色标点。⑥保证彩色标点黏接的牢固、稳定, 并避免试验过程中对其扰动。⑦图像应采用未经压缩的RAW或TIFF等格式, 而不用JPG等损失大量图像细节的压缩格式。

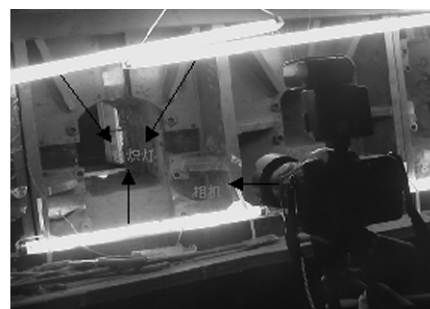


图3 相机和灯光布置

Fig. 3 Layout of cameras and lighting

2.4 量测断面布置

彩色标点的布置如图4所示,沿洞群轴线方向设置了两个监测断面,每个监测断面距离模型试验钢结构架表面50 mm。每个断面在主厂房顶拱布置1个标点、主厂房和尾调室边墙各6个标点,共13个标点。

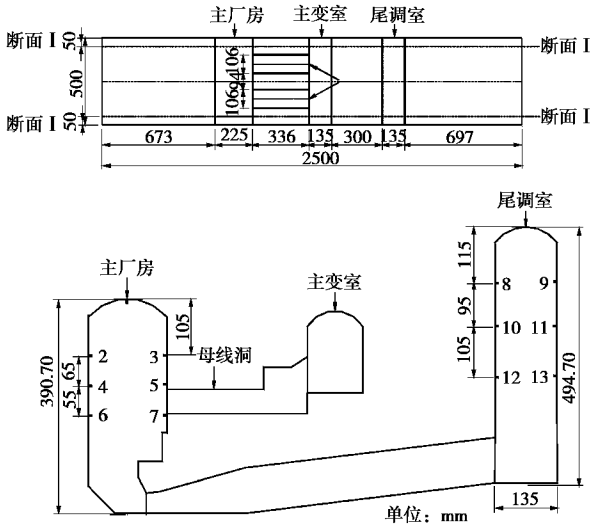


图 4 数字照相标点布置图

Fig. 4 Layout of digital photogrammetric marks

2.5 试验过程

(1) 根据整个厂区内的反演地应力值,通过液压加载设备同步施加垂直方向和两水平方向的外荷载,并进行较长时间的保压工作。

(2) 在进行第一小步开挖完成后,在洞室内部分置10 cm长的标尺,并进行拍照记录。

(3) 开挖到试验预置彩色标点位置后,在洞室边墙上黏贴彩色标点如下图5所示。



图 5 模型试验中彩色标点的布置

Fig. 5 Layout of color marks

(4) 开挖任一小步结束后,4台相机立刻同时拍照记录,并记下试验阶段,然后静置5 min左右,以使围岩应力分布均匀,在下一小步开挖之前,4台相机同样进行拍照记录。

(5) 重复上述步骤(3)、(4),直至洞室开挖完成。

2.6 量测分析过程

根据试验过程中布置的标尺在模型空间和图像空间的长度比值得到图像比例约为 0.12 mm/pixel,按 0.1 个亚像素搜索计算,数字照相量测系统的理论精度为 0.012 mm,图像有效分析范围开挖洞室的尺寸范围,采用 PhotoInfor 软件系统进行计算分析(见图 6)。

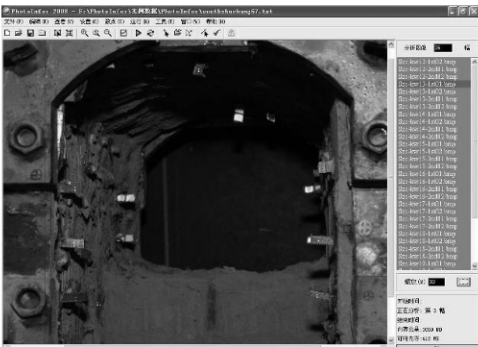


图 6 数字照相量测软件系统 PhotoInfor 计算过程

Fig. 6 Calculation process of PhotoInfor software

3 量测结果与数值计算结果对比分析

建立与实际地质力学模型试验大小相一致的地下厂房洞室群稳定分析的三维模型。整个计算域共剖分 39798 个节点和 35440 个单元,如图 7 所示,采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行数值分析<sup>[11]</sup>。

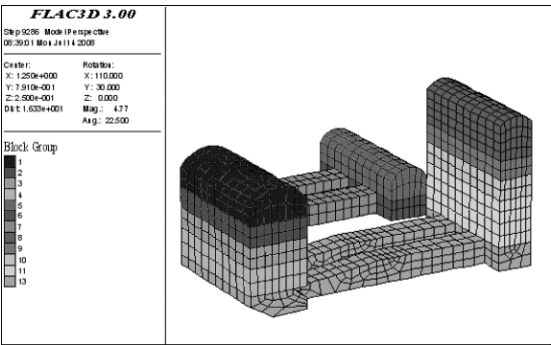


图 7 数值分析模型图

Fig. 7 Model for numerical analysis

限于篇幅,本文仅给出 I-I 断面开挖完成后数值计算的位移云图和量测结果的对比,如图 8 和表 2 所示。

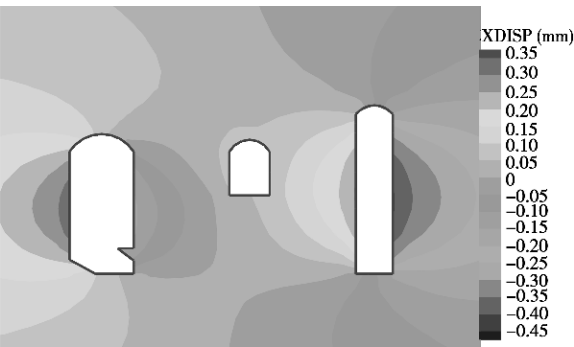


图 8 开挖完成后 I-I 断面位移云图

Fig. 8 Displacement contour of section I-I after excavation

表 2 量测结果和数值计算结果对比  
Table 2 Comparison between observed and calculated  
displacements

位置	标点	量测结果/mm	数值计算结果/mm
主 厂 房	顶拱 1	0.248	0.220
	2	0.224	0.240
	上游边墙 4	0.264	0.252
	6	0.258	0.272
尾 调 室	3	0.130	0.142
	下游边墙 5	0.186	0.168
	7	0.192	0.180
	8	0.250	0.236
尾 调 室	上游边墙 10	0.268	0.248
	12	0.242	0.226
	9	0.330	0.256
	下游边墙 11	0.420	0.442
	13	0.382	0.402

提取与数字照相量测系统中安置标点相对应位置的数值计算结果,主厂房顶拱 1 号标点、上游边墙 4 号标点和尾调室下游边墙 11 号标点的位移随开挖步的变化曲线如图 9~11 所示。

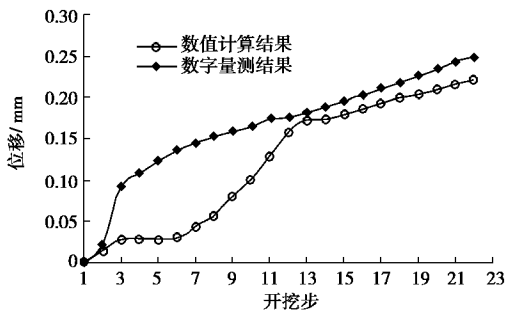


图 9 主厂房顶拱收敛位移

Fig. 9 Deformation convergence of crown of main power house

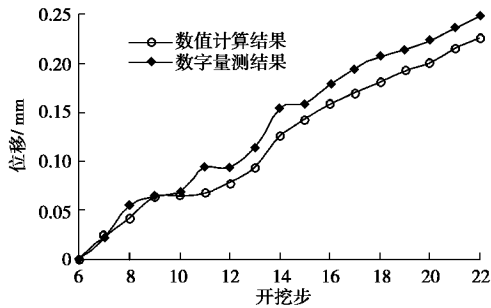


图 10 主厂房上游边墙收敛位移

Fig. 10 Deformation convergence of upstream side wall of main power house

根据物理模型试验中量测的最大位移值,换算到现场工程的实际位移,可知洞室边墙的最大位移约为

62 mm。从以上曲线可看出,围岩变形具有一定的规律性,且量测结果与数值计算结果基本吻合。

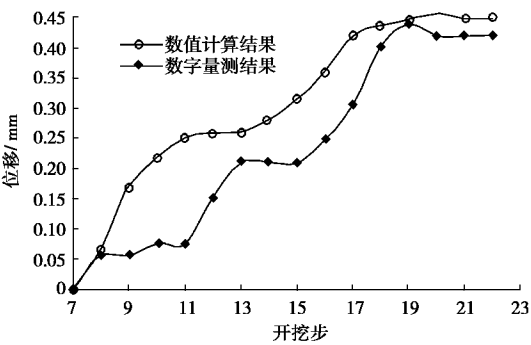


图 11 尾水调压室下游边墙收敛位移

Fig. 11 Deformation convergence of downstream side wall of surge chamber

4 结 论

- (1)三维地质力学模型试验能从全局上把握地下洞室工程的整体力学特征、变形趋势和稳定性特点,其结果能与数值模拟结果能相互验证和补充。
- (2)首次将数字照相量测技术应用在大型地下洞群模型试验中,并获得了洞室边墙关键点的收敛位移随开挖步的变化曲线。结果表明,数字照相量测能有效地量测大型模型试验中0.02 mm以下的微小位移。
- (3)由于本次模型试验中照片采集历时较长、周围光线的变化或相机的轻微晃动,导致同一序列图像会出现亮度差异或部分图像上产生斑点,将会影响个别像素测点位移分析的结果,在今后试验中应予以注意克服这些负面因素。
- (4)数字照相量测方法弥补了三维模型试验中传统预埋量测仪器量测位移而破坏模型整体性的缺点,该方法是相似模型试验中强有力的位移量测手段,能够广泛应用在岩土工程试验之中。

参考文献:

[1] 朱维申,李 勇,张 磊,等. 高地应力条件下洞群稳定性的地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1308 - 1314. (ZHU Wei-shen, LI Yong, ZHANG Lei, et al. Geomechanical model test on stability of cavern group under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1308 - 1314. (in Chinese))

[2] 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. (in Chinese))
- [3] 李仲奎, 卢达溶, 洪亮, 等. 大型地下洞室群三维地质力学模型试验中隐蔽开挖模拟系统的研究和设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 181 - 186. (LI Zhong-kui, LU Da-rong, HONG Liang, et al. Design and research on concealed excavation system for 3D geo-mechanical model test of large underground houses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 181 - 186. (in Chinese))
- [4] 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 experimen [J]. Experimental Technology and Management, 2002, **19**(5): 21 - 26. (in Chinese))
- [5] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析的砂土试验模型变形场量测[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 36 - 41. (LI Yuan-hai, ZHU He-hua, UENO K, et al. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 36 - 41. (in Chinese))
- [6] 李元海, 靖洪文, 曾庆有. 岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增 2): 3859 - 3866. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZENG Qing-you. Development and application of digital photogrammetry software package for geotechnical experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3859 - 3866. (in Chinese))
- [7] 李元海, 靖洪文, 刘刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1308 - 1314. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, LIU Gang, et al. Study on application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1684 - 1690. (in Chinese))
- [8] 张强勇, 王汉鹏, 李勇, 等. 铁晶砂胶结岩土相似材料及其制备方法[P]. 2007. (ZHANG Qiang-yong, WANG Han-peng, LI Yong, et al. Crystalline iron cemented sand and rock material similar to the method of preparation[P]. 2007. (in Chinese))
- [9] 芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994, **26**(5): 599 - 607. (RUI Jia-bai, JIN Guan-chang, XU Bing-ye. A new digital speckle correlation method and its application[J]. ACTA Mechanica Sinica, 1994, **26**(5): 599 - 607 (in Chinese))
- [10] 朱维申, 孙爱花, 王文涛, 等. 大型洞室群高边墙位移预测和围岩稳定性判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(9): 1729 - 1736. (ZHU Wei-shen, SUN Ai-hua, WANG Wen-tao, et al. Study on prediction of high wall displacement and stability judging method of surrounding rock for large cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(9): 1729 - 1736. (in Chinese))
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC<sup>3D</sup> (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D) Version 3.0, Users manual[M]. Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN 55401, USA, 2005.