

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.06.021

大型地下洞室群地震模拟振动台试验 研究 () : 试验方案设计

刘晓敏^{1,2}, 盛 谦¹, 陈 健¹, 柯文汇¹, 杨继华³

(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. 中国建筑第六工程局有限公司, 天津 300451 ; 3. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘 要 : 为了解大型地下洞室群在地震过程中的动态响应特征, 以大渡河流域的大岗山水电站大型地下洞室群为原型, 开展地震模拟振动台物理模型试验研究。作为国内外首次进行此类振动台试验研究, 系统介绍整个试验的方案设计。首先, 根据本次试验的目的和特性, 给出试验基本简化原则, 并对模型体系进行相似设计, 按照完全相似模型推导出各物理量的动力相似常数、确定模拟范围、模型尺寸和相似材料配比。然后, 对试验边界条件进行设计, 确定了作为柔性边界的聚苯乙烯泡沫板的材料和几何参数, 制作了用于测量围岩内部应力的应变砖传感器, 并介绍模型制作、洞室成型与开挖等工艺步骤; 最后, 确定试验输入波形, 并按相似理论要求进行调整, 给出模型试验的加载工况。经后期试验数据的分析, 证明试验条件简化合理, 模型设计与制作成功。一整套模型设计方法与制作工艺, 可供今后类似试验作为参考。

关 键 词 : 振动台试验; 大型地下洞室群; 方案设计; 完全相似理论; 柔性边界

中图分类号 : TU 452

文献标识码 : A

文章编号 : 1000 - 7598 (2015) 06 - 1683 - 08

Seismic shaking table test for large-scale underground cavern group () : Test scheme

LIU Xiao-min^{1,2}, SHENG Qian¹, CHEN Jian¹, KE Wen-hui¹, YANG Ji-hua³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Construction Sixth Engineering Division Co., Ltd., Tianjin 300451, China;
3. Yellow River Engineering Planning and Design Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: In order to study the dynamic response of the large-scale underground cavern group during earthquakes, the large-scale underground cavern group of the Dagangshan hydropower is selected as the prototype to conduct the shaking table test. Being the first shaking table test on such field of research, the entire design of the experiment is given in detail. Firstly, basic simplified principles of the test, dynamic similar parameters derived by absolute similarity theory, simulation range, model dimensions and similar material ratio are given according to the objects and features of the test. Then, test boundary conditions and measurement system are designed. Polystyrene foam board is used as a flexible boundary and its material and geometric parameters are suggested. Strain brick sensors for measuring the internal stress of the surrounding rock are manufactured. Model making process, cavern forming and excavation are presented. Finally, input waveforms are elected and adjusted according to the similarity theory, and loading subsequence of the model test is given. Test data demonstrate that simplification of test conditions is reasonable, and the design and production of test model are successful, it can provide a guide for similar model designing and making.

Keywords: shaking table test; large-scale underground cavern group; program design; absolute similarity theory; flexible boundary

1 引 言

随着西部大开发战略的实施, 一大批水电站正

在或即将在我国西南部地区兴建。由于地形条件的限制, 水力发电的引水发电建筑物往往布置在地下岩体中, 形成大型的地下洞室群。这种大型地下洞

收稿日期: 2013-01-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No.2015CB057905); 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 (No.91215301); 云南联合基金重点项目 (No.U1402231)。

第一作者简介: 刘晓敏, 男, 1983 年生, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: hbulxm@126.com

室群在空间上表现为大跨度、高边墙、长轴线的特点。同时,西南地区活断层多、规模大、活动强度高,大部分地区地震基本烈度在 度或 度以上,局部地区强震周期短。因此,大型地下洞室群在强地震条件下的响应特征和稳定性分析成为亟待解决的重大问题。

目前,大型地下洞室群地震响应研究已取得了一些成果^[1-9],但多采用数值模拟手段。因缺少地震时地下结构体系地震反应的实测数据,现有的计算模型和数值模拟方法合理性无法验证,而振动台模型试验可以实时再现真实的地震或人工地震作用全过程,是研究工程抗震的一种有效手段。因此,对大型地下洞室群进行地震模拟振动台模型试验具有重要工程实用意义。

但令人遗憾的是,目前国内外均未见有关大型地下洞室群的地震模拟振动台物理模型试验研究成果的报道。作为国内外首次进行此类振动台试验研究,在充分吸取现有其他领域振动台试验经验和总结现有大型地下洞室群地震响应研究成果的基础上,根据实验室条件,确定了试验基本简化原则,并从相似关系设计、模拟范围、模型尺寸、相似材料配比、模型箱与边界条件、试验测量系统、模型制作、洞室成型与开挖、试验输入工况等方面,详细给出大型地下洞室群地震模拟振动台模型试验方案。限于篇幅,本文仅介绍振动台模型试验设计部分,试验结果及分析部分则另文给出。

2 试验方案

2.1 实验室条件

本次试验是在中国地震局工程力学研究所地震工程实验室大型振动台上进行的。振动台的主要技术参数为:台面尺寸为 5 m×5 m,频率范围为 0.1~50.0 Hz,最大模型重量为 30 t。满载时,最大位移水平向为±80 mm,竖向向为±50 mm;最大速度水平向为±600 mm/s,竖向向为±300 mm/s;最大加速度水平向为±1.0 g,竖向向为±0.7 g;最大倾覆力矩为 750 kN·m。

实验室拥有一套先进的采集与分析系统,该系统有 128 个通道,其中,64 个通道用于测量加速度和大位移,另 64 个通道用于测量应变和小位移。

2.2 试验条件简化

本试验本着抓住模型试验中的主要方面,放弃次要方面的原则,引入以下假设并对工程原型^[10]进行必要的简化:假定洞室群围岩岩体为各向同性均质弹性体,统一考虑为 类围岩,不考虑断层、

岩脉、节理等因素;不考虑洞室的支护措施,如锚杆、预应力锚索、挂网等;不考虑主厂房、主变室和尾调室之间支洞的影响;假设模型上表面为水平面,不考虑山体顶部坡体倾斜引起的效应;不考虑所取模型上覆岩体的自重和构造地应力的作用。

2.3 相似关系设计、模拟范围及模型尺寸确定

在实际相似关系设计中,几何相似常数 C_l 的取值范围受振动台台面尺寸、承载能力和模型箱尺寸等实验室设备实际情况的制约;另外,还需要考虑试验的测量要求,模型太小则不利于传感器的埋设,影响测量的精度。弹性模量相似常数 C_E 和密度相似常数 C_ρ 范围由模型材料配比试验确定。根据文献^[11]可知,在振动台试验方案设计中应尽量保证应变、加速度不失真,即采用完全相似模型,则 C_l 、 C_E 和 C_ρ 应满足 $C_E = C_l C_\rho$,以 C_ρ 和 C_l (或 C_E) 为基本未知量,就推导出其余物理量的相似常数。本次试验中,取 $C_l = 150/1$, $C_\rho = 1$,根据文献^[11]可推导出其余物理量的动力相似常数,则主要相似常数见表 1。

表 1 模型试验相似系数
Table 1 Scale relations and ratios of model test

物理量	相似常数	物理量	相似常数	物理量	相似常数
几何	150/1	位移	150/1	速度	12.25/1
密度	1/1	弹性模量	150/1	加速度	1/1
应力	150/1	泊松比	1/1	时间	12.25/1
应变	1/1	内摩擦角	1/1	频率	0.0816/1

根据现有的数值计算经验^[1-9]以及由于以上试验条件的限制,本次振动台试验所取的模拟范围为:沿主厂房上游边墙向上游方向取 110.70 m (约 3.6 倍主厂房洞跨),沿尾调室下游边墙向下游方向取 110.70 m (约 4.6 倍尾调室洞跨),水平向合计为 390 m;沿尾调室顶拱向上取 98.25 m,沿尾调室底板向下取 65.25 m,竖向合计为 240 m;洞室轴向长度取为 210 m。

试验设计中,规定以平行洞轴线方向为 X 向,以垂直洞轴线方向为 Y 向,以竖直方向为 Z 向。按几何相似比为 150/1,则模型的大小($X \times Y \times Z$)为 2.60 m×1.40 m×1.60 m。

其中,模型中的主变室和尾调室的轴线方向长度按相似比缩小后的尺寸取值;由于主厂房轴线长度方向尺寸较大,考虑到整体模型的重量不能太大和模型箱尺寸等问题,主厂房长度取模型 X 向尺寸,即 1.40 m,通长布置;由于涉及到洞室开挖的问题,主变室和尾调室贴靠模型箱开口的一侧布置。

模型结构与尺寸如图 1、2 所示。

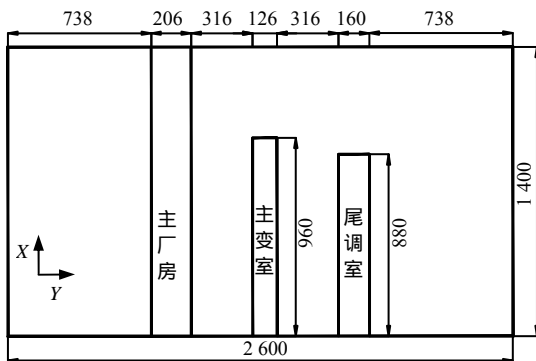


图 1 模型在 X、Y 方向剖面图 (单位：mm)

Fig.1 Model sectional view in the X、Y directions (unit :mm)

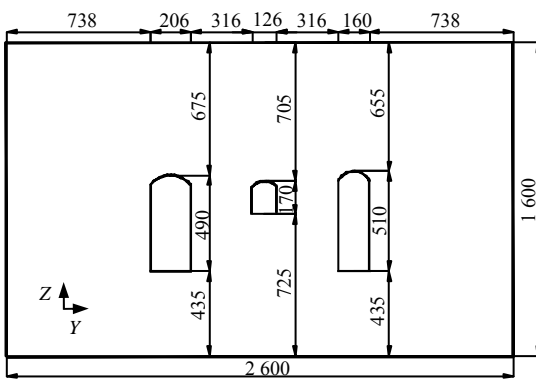


图 2 模型在 Y、Z 方向剖面图 (单位：mm)

Fig.2 Model sectional view in the Y、Z directions (unit :mm)

2.4 相似材料研制

本次试验中岩体的相似材料是用铁精粉、重晶石粉、石英砂、石膏和水配合而成。铁精粉和重晶石粉属于细骨料，石英砂属于粗骨料，以石膏为胶凝材料。通过正交试验和二次细化试验相结合的试验方法，最终选择围岩的质量配比为铁精粉 重晶石粉 石英砂 石膏 水=176 264 66 50 60。具体试验过程见文献[11]。

2.5 模型箱及边界条件

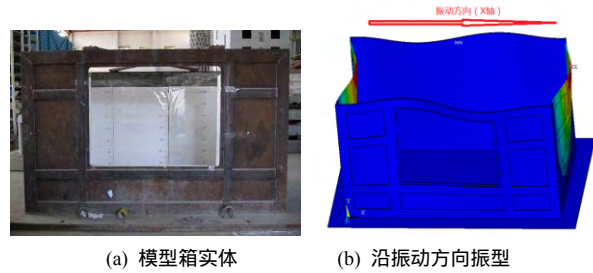
2.5.1 边界处理方法选取

岩土工程界振动台试验的边界处理方法常见的有 4 类，分别为：刚性模型箱（内侧加聚苯乙烯泡沫板或橡胶板）^[12-13]，可以用岩质、土质两类模型试验，整体刚度较大，减震效果与内衬材料性质、厚度关系密切；层状剪切模型箱（内侧加橡胶膜）^[14]，多用于砂、土等松散模型材料的振动模型试验，能模拟土中的水平剪切变形；柔性容器^[15]，多用于土质模型试验；黏滞液体人工阻尼边界^[16]，用于坝基模型试验。本次试验属于岩质类型模型试验，即选用刚性模型箱内侧加聚苯乙烯泡沫板模拟模型

的边界。

2.5.2 模型箱模态分析

为防止模型箱和模型因自振频率接近而发生共振，按照试验中使用的模型箱的几何尺寸和材料属性进行数值建模。通过模态分析可知，模型箱沿振动方向的一阶自振频率为 68.8 Hz，模型的一阶自振频率为 20 Hz 左右，二者相差较远，不会发生共振；另外，对模型箱按振动台最大输入加速度进行强度校核，计算结果表明，模型箱符合试验要求。



(a) 模型箱实体 (b) 沿振动方向振型

图 3 模型箱模态分析

Fig.3 Modal analysis of model box

2.5.3 柔性边界处理

为了尽量减小振动方向上刚性边界对模型动力反应的影响，在模型箱振动方向的两侧壁内衬聚苯乙烯塑料泡沫板，根据杨林德等^[12]对 3 种不同类型塑料泡沫板的物性参数研究及其试验结果的分析，本试验采用密度为 15 g/cm³ 的聚苯乙烯泡沫板，该型号泡沫板的厚度压缩 10% 时的动弹性模量为 4.13 MPa。

根据刘晶波等^[17]提出的黏弹性人工边界单元的概念，将基于刚度相同原理推导边界单元的等效弹性模量的方法引用到模型箱柔性边界处理中，用来反求聚苯乙烯塑料泡沫板的厚度：

$$\tilde{E} = a_N h \frac{G(1+\tilde{\mu})(1-2\tilde{\mu})}{R(1-\tilde{\mu})} \quad (1)$$

式中：按推荐系数取 $a_N = 1$ ， $\tilde{\mu} = 0$ ； a_N 为法向黏弹性人工边界参数； \tilde{E} 和 $\tilde{\mu}$ 为等效黏弹性边界单元的等效弹性模量和等效泊松比； R 为波源至人工边界点的距离； G 为介质剪切模量； h 为等效单元的厚度。

根据式(1)求得聚苯乙烯塑料泡沫板的厚度为 135 mm，并结合统计的国内各研究单位振动台试验采用的聚苯乙烯塑料泡沫板厚度，本次试验采用的厚度为 200 mm，经试验验证效果较好。

2.5.4 滑动边界处理

在顺沿振动方向的模型箱内壁上，粘贴光滑的

聚氯乙烯薄膜，薄膜表面涂润滑油，以减小箱壁在与模型接触面上的摩擦阻力。

2.6 传感器选用与加工

本次试验需要测量模型的加速度与应变响应，故需要选用符合试验要求的加速度传感器和制作能够测量围岩内部应变的测量装置。

2.6.1 加速度传感器

本试验采用朗斯测试技术有限公司生产的 LC0166 内装 ICP 压电加速度传感器产品，它将传统的压电加速度传感器与电荷放大器集于一体，能直接与记录和显示仪器连接，简化了测试系统，提高了测试精度和可靠性。LC0166 型号指标见表 2。

表 2 加速度传感器指标

Table 2 Acceleration sensor indicators

灵敏度 /(mV/g)	加速度 量程/g	频率范围 /Hz	重量 /g	外形尺寸/mm	
				直径	长度
1 000	5	0.1 ~ 2 000	120	36.0	36.5

2.6.2 应变砖传感器

电阻应变片在模型试验中常用于测量表面应变，直接粘贴于模型表面即可。而在本次试验中，需要测量模型的内部变形，且模型采用分层夯实制作，故不能将应变片直接粘贴在材料上。为此，对传统的应变片测量方法、埋设方法进行了新的尝试，参考山东大学在地质力学静力模型试验中经验^[18]，采用埋置粘贴有应变花的应变砖对模型围岩内应变进行测量。

本次试验采用 BX120-5CA 型应变花，用该型号应变花制作应变砖测量模型内部应变，桥路补偿片采用同等参数的单片式应变片。应变花主要指标见于表 3。

表 3 应变花指标

Table 3 Strain rosette indicators

电阻值 /Ω	灵敏 系数	疲劳寿命 /次	敏感栅尺寸/mm		基底尺寸/mm	
			长	宽	长	宽
119.7±0.3	2.08	10 ⁷	5	3	16.5	16.5

应变砖传感器制作工艺步骤：设计制作内部净尺寸为 30 mm 的立方体应变砖模具；制作和模型配比相同的砖体；粘贴应变片，考虑到所采用的相似材料的低弹模特性，本次试验采用氯丁胶类柔性黏结剂；焊接导线；应变片的防潮处理，采用 704 密封胶制作防潮层；检测应变砖传感器制作效果，并进行标定。应变砖传感器制作进程

见图 4。

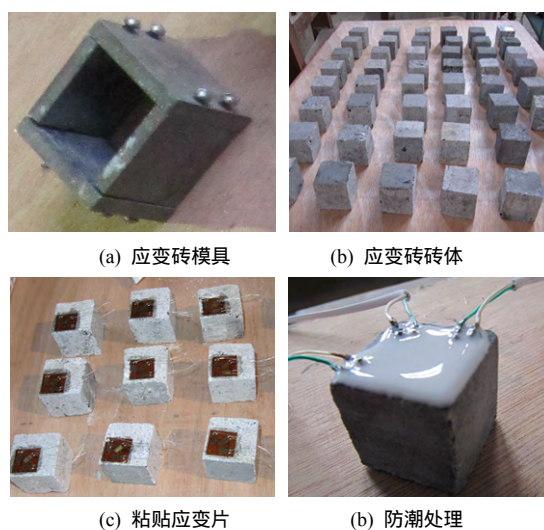


图 4 应变砖传感器制作过程

Fig.4 Production process of strain brick sensor

2.7 试验测点布置方案

在充分考虑地下室群动力响应已有理论和数值计算结果的基础上^[1-9]，根据洞室结构与模型的特点，共布置 3 个测试断面，分别为：主测试断面、辅助测试断面 1 与辅助测试断面 2。3 个测试断面位置如图 5 所示。主测试断面位于主厂房洞室轴线中心处且垂直于轴线的平面，主测试断面的传感器布置见图 6；在主测试断面两侧距离 350 mm 且与主测试断面平行布置两个辅助监测断面，其中辅助测试断面 1 的传感器布置见图 7，辅助测试断面 2 的传感器布置见图 8。另外，在主测试断面主厂房边墙上上部处沿 Y 轴方向贯穿整个模型布置一条测线 A-A，在主测试断面沿主厂房顶拱中点处沿 Z 向贯穿整个模型布置一条测线 B-B，见图 6。沿模型顶部表面布置两条测线 C-C 和 D-D，分别布置加速度计，如图 9 所示。

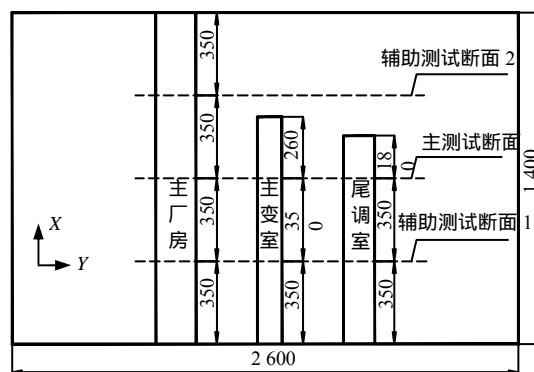


图 5 模型测试断面布置图 (单位: mm)

Fig.5 Testing sectional layout (unit: mm)

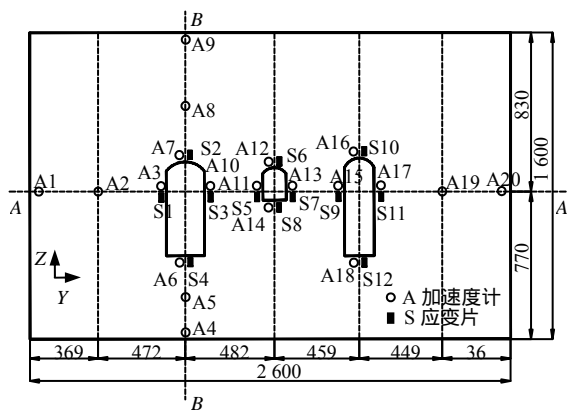


图 6 主测试断面传感器的布置图 (单位: mm)
Fig.6 Sensor layout of main test section (unit: mm)

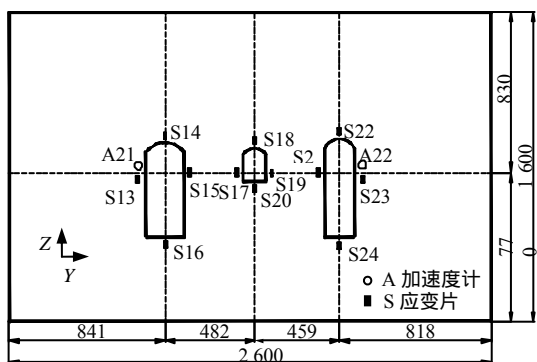


图 7 辅助测试断面 1 传感器的布置图 (单位: mm)
Fig.7 Sensor layout of auxiliary test section 1 (unit: mm)

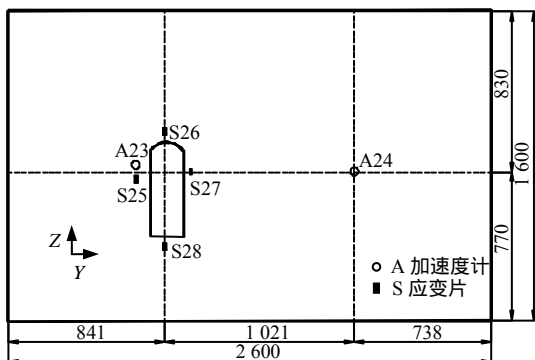


图 8 辅助测试断面 2 传感器的布置图 (单位: mm)
Fig.8 Sensor layout of auxiliary test section 2 (unit: mm)

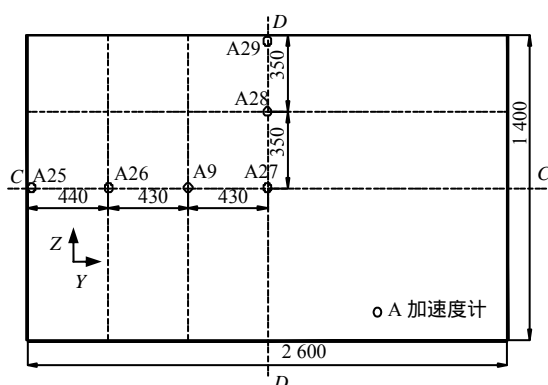


图 9 模型顶部加速度计布置图 (单位: mm)
Fig.9 Accelerometer layout of model top (unit: mm)

传感器布置方案详细说明如下:

(1) 测线 A-A 上布置的加速度计用于记录振动台输入地震波激励时沿垂直洞轴线方向 (Y 向) 围岩加速度响应时程, 并可以通过比较 A1、A2 或 A19、A20 的加速度测量结果来验证所采用的柔性边界的效果。

(2) 测线 B-B, 加速度计 A4、A5、A6、A7、A8、A9 用于记录振动台输入地震波激励时沿垂直方向 (Z 向) 围岩加速度响应时程, 可以记录结果研究地震波的传播规律。

(3) 加速度计 A3、A21、A23, 加速度计 A10、A7、A6 分别用于记录主厂房左右边墙、顶拱和底板的加速度时程。

(4) 加速度计 A11、A13、A12、A14 分别用于记录主变室左右边墙、顶拱和底板的加速度时程。

(5) 加速度计 A15、A17、A16、A18 分别用于记录尾调室左右边墙、顶拱和底板的加速度时程。

(6) 测线 C-C, 加速度计 A25、A26、A9、A27 布置在模型顶部, 其中加速度计 A25、A26 可用于验证模型箱的柔性边界效应。加速度计 A25、A26、A9、A27 可以与测线 A-A 进行对比分析。

(7) 测线 D-D, 加速度计 A27、A28、A29 布置在模型顶部, 其中加速度计 A28、A29 用于验证模型箱的滑动边界效应。

(8) 应变计 S1、S13、S25, 应变计 S3、S15、S27, 应变计 S2、S14、S26, 应变计 S4、S16、S28, 用于记录主厂房左右边墙、顶拱和底板的动态应变值。

(9) 应变计 S5、S17, 应变计 S7、S19, 应变计 S6、S18, 应变计 S8、S20, 用于记录主变室左右边墙、顶拱和底板的动态应变值。

(10) 应变计 S9、S21, 应变计 S11、S23, 应变计 S10、S22, 应变计 S12、S24, 用于记录尾调室左右边墙、顶拱和底板的动态应变值。

2.8 模型制作、洞室成型与开挖

2.8.1 基本思路

预先制作好洞室实体模型, 再用分层夯实制作大模型, 等大模型制作到洞室底部标高时放入制作好的洞室模型, 继续分层夯实至模型顶部。另外, 在设有传感器的位置布置传感器, 等大模型制作完成且干燥后, 再开挖洞室。

2.8.2 模型分层夯实与传感器埋设

把搅拌好的材料倒入模型箱中, 并进行初平; 采用包括人工踩实、重辊碾压、夯板夯实和夯锤夯

实等多手段夯实模型；在模型四角、长边中点以及模型中点等处用环刀检验压实度；若各部位均满足压实要求，则打毛夯实层面，继续填料夯实直至完成整个模型体的制作。

用盒尺、角尺定出传感器所处的位置，用小铲挖埋置传感器所用的小坑以及埋置导线的小沟，放置传感器，填料压实传感器周围材料，使传感器与周围材料充分接触，埋置导线，记录传感器编号。夯实过程和传感器埋设见图 10、11。



图 10 多手段夯实
Fig.10 Multiple means tamping

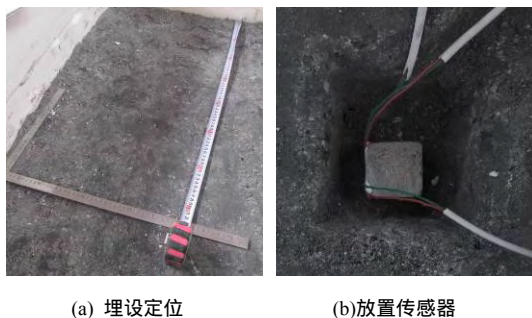


图 11 传感器埋设
Fig.11 Embedding sensors

2.8.3 洞室成型与开挖

洞室成型问题是本次模型试验中控制性问题之一，本次试验采用加硬加重聚苯乙烯泡沫塑料制成洞室模型，通过后后期洞室成型效果验证，这种方法是完全可行的。基本工艺如下：

(1) 制作与各洞室尺寸、形状一致的木质模具，按模具尺寸模塑成型加硬加重聚苯乙烯泡沫洞室模型，并在模型表面包裹一层聚氯乙烯塑料布；

(2) 在模型箱的内侧壁预定的位置上画出洞室轮廓用于定位，洞室之间和洞室与模型箱之间采用方木条固定，在洞室周围对称夯实围岩，确保洞室模型不发生偏移；

(3) 先开挖洞室横断面中间部位，再利用模型外层的聚氯乙烯塑料布的保护作用开挖边角部位。

洞室成型与开挖见图 12。



图 12 洞室成型与开挖
Fig.12 Caverns forming and excavation

2.9 地震输入及加载制度

2.9.1 输入波形选择

本次试验的输入波形主要参考其他类型岩土工程振动台试验所采用的波形^[13, 19-21]和大型地下洞室群数值模拟中采用的波形^[1-9]。本试验采用 Kobe 波、攀枝花波、大岗山场地人工波和正弦波作为输入的基本波形。

2.9.2 加速度峰值选择

根据已有的参考文献，振动台试验中加速度的峰值选择分为 3 类：按照不同超越概率所得幅值进行输入^[13, 20]；按规范条文取规定设计值，再取设计值的倍数进行输入^[22]；逐级增加，如 0.1g, 0.2g, ..., 1.0g, 1.5g 等进行输入^[19, 21]。

本次试验主要研究随着输入加速度峰值逐级加大，大型地下洞室群的动力响应特征，故采用逐级增加的方式进行加速度峰值的选择。

2.9.3 时间轴压缩与滤波

台面输入的波形必须按相似理论要求进行调整，一般包括时间轴的压缩和幅值的放大或缩小；台面输入的波形按时间相似比尺压缩后要滤除振动台上限工作频率以上的频率成分^[23]。

本次试验按照动力相似关系所得相似系数进行频谱压缩，根据相似关系，本试验时间相似比例 $C_t = 12.25$ ，振动台有效频率上限为 50 Hz，即波形在时间轴上需要压缩 12.25 倍，并滤掉 50 Hz 以上的频率成分。

2.9.4 试验加载工况

按照峰值加速度值从小到大的顺序分 5 个阶段输入。在每阶段试验前，输入峰值为 0.05g 的白噪声对模型体系进行扫频测试，观察其动力特性。每一级地震波工况分别输入 Kobe 波、攀枝花波、人工波；每一级正弦波分别按 5、10、15、20 Hz 输入。具体工况见表 4。

表 4 试验加载工况
Table 4 Loading conditions

输入阶段	工况序号	输入波形	工况代号	峰值加速度/g
第 1 级	1	白噪声	B1	0.05
	2	地震波	D1	0.10
	3	正弦波	Z1	0.10
第 2 级	4	白噪声	B2	0.05
	5	地震波	D2	0.20
	6	正弦波	Z2	0.20
第 3 级	7	白噪声	B3	0.05
	8	地震波	D3	0.20
	9	正弦波	Z3	0.20
第 4 级	10	白噪声	B4	0.05
	11	地震波	D4	0.40
第 5 级	12	白噪声	B5	0.05
	13	地震波	D5	0.60
第 6 级	14	白噪声	B6	0.05
	15	地震波	D6	0.80

3 结 语

本文系统介绍了大型地下洞室群地震模拟振动台试验的方案设计, 推导模型试验动力相似关系, 研制出满足相似关系的围岩相似材料。使用考虑柔性边界和滑动边界的刚性模型箱模拟试验的边界条件, 对应变砖传感器的制作、防潮绝缘处理等工艺进行了尝试性试验, 取得了较好的效果。根据传感器的布置原则确定了传感器布置方案, 确定使用分层夯实的方法制作整体模型, 用加硬加重聚苯乙烯泡沫塑料制成洞室模型, 洞室成型和开挖均很成功; 确定了基本输入波形, 采用加速度峰值逐级增加的方式进行工况设计。上述试验设计方法可供今后类似试验作为参考。

试验结果分析及数值模型验证结果将在后续系列论文中介绍。

参 考 文 献

- [1] 李海波, 朱莅, 吕涛, 等. 考虑地震动空间非一致性的岩体地下洞室群地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1757 - 1766.
LI Hai-bo, ZHU Li, LÜ Tao, et al. Seismic response analysis of an underground cavern group in rock subjected to spatially non-uniform seismic ground motion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1757 - 1765.
- [2] 隋斌, 朱维申, 李晓静. 地震荷载作用下大型地下洞室群的动态响应模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1877 - 1882.
SUI Bin, ZHU Wei-shen, LI Xiao-jing. Simulation on dynamic response of large underground opening complex under seismic loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(12): 1877 - 1882.
- [3] 李小军, 卢滔. 水电站地下厂房洞室群地震反应显式有限元分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 41 - 46.
LI Xiao-jun, LU Tao. Explicit finite element analysis of earthquake response for underground caverns of hydropower stations[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(5): 41 - 46.
- [4] 赵宝友, 马震岳, 梁冰, 等. 基于损伤塑性模型的地下洞室结构地震作用分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1515 - 1521.
ZHAO Bao-you, MA Zhen-yue, LIANG Bing, et al. Seismic analysis of underground structures based on damaged plasticity model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1545 - 1521.
- [5] 王如宾, 徐卫亚, 石崇, 等. 高地震烈度区岩体地下洞室动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 568 - 575.
WANG Ru-bin, XU Wei-ya, SHI Chong, et al. Dynamic response analysis of rock underground caverns in highly seismic region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(3): 568 - 575.
- [6] 崔臻, 盛谦, 刘加进, 等. 基于小波包的地下洞室群地震响应及其频谱特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3901 - 3906.
CUI Zhen, SHENG Qian, LIU Jia-jin, et al. Spectrum characteristics analysis of seismic response for underground houses via wavelet packet[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(12): 3525 - 3530.
- [7] 张玉敏, 盛谦, 朱泽奇, 等. 深度衰减效应对大型地下洞室群强震响应的影 响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3197 - 3202.
ZHANG Yu-min, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Influence of depth attenuation on seismic response of large underground cavern group[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3197 - 3208.
- [8] 张玉敏, 盛谦, 朱泽奇, 等. 地震作用下大型地下洞室群位移特征的若干影响因素分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3525 - 3530.
ZHANG Yu-min, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Some influence factors on displacement characteristics of cavern group under strong earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3525 - 3530.
- [9] 张志国, 肖明, 陈俊涛. 大型地下洞室地震灾变过程三维动力有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 509 - 523.
ZHANG Zhi-guo, XIAO Ming, CHEN Jun-tao. Simulation of earthquake disaster process of large-scale

- underground caverns using three-dimensional dynamic finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 509 - 523.
- [10] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 四川大渡河大岗山水电站可行性研究报告[R]. 成都: 成都勘测设计研究院, 2006.
- [11] 刘晓敏, 盛谦, 陈健, 等. 大型地下洞室群地震模拟振动台试验研究(): 岩体相似材料配比试验[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 83 - 88.
LIU Xiao-min, SHENG Qian, CHEN Jian, et al. Seismic shaking table test for large-scale underground cavern group (): Proportioning test on similar material of surrounding rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 83 - 88.
- [12] 杨林德, 季倩倩, 郑永来, 等. 地铁车站结构振动台试验中模型箱设计的研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 75 - 78.
YANG Lin-de, JI Qian-qian, ZHENG Yong-lai, et al. Study on design of test box in shaking table test for subway station structure in soft soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 75 - 78.
- [13] 李育枢, 李天斌, 王栋, 等. 黄草坪 2[#]隧道洞口段减震措施的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1128 - 1136.
LI Yu-shu, LI Tian-bin, WANG Dong, et al. Large-scale shaking table test for vibration-absorption measures of portal section of Huangcaoping tunnel No.2[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(6): 1128 - 1136.
- [14] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7): 781 - 785.
WU Xiao-ping, SUN Li-min, HU Shi-de, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2002, 30(7): 781 - 785.
- [15] MEYMAND P J. Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay[D]. Berkeley: University of California, 1998.
- [16] 王海波, 涂劲, 李德玉. 室内动力模型试验中辐射阻尼效应的模拟[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 39 - 44.
WANG Hai-bo, TU Jin, LI De-yu. Simulation of radiational damping of unbounded medium in shaking table test[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, 35(2): 39 - 44.
- [17] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2008, 28(9): 1070 - 1075.
LIU Jing-bo, GU Yin, DU Yi-xin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 28(9): 1070 - 1075.
- [18] 王汉鹏, 李术才, 郑学芬, 等. 地质力学模型试验新技术研究进展及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2765 - 2771.
WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHENG Xue-fen. Geomechanical model test new technology research development and its engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 2765 - 2771.
- [19] 陶连金, 王沛霖, 边金. 典型地铁车站结构振动台模型试验[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(9): 798 - 801.
TAO Lian-jin, WANG Pei-lin, BIAN Jin. A shaking table method on the representative subway station structure[J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2006, 32(9): 798 - 801.
- [20] 陈国兴, 庄海洋, 程绍革, 等. 土-地铁隧道动力相互作用的大型振动台试验: 试验方案设计[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 178 - 183.
CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, CHENG Shao-ge, et al. A large-scale shaking table test for dynamic soil-metro tunnel interaction: Test scheme[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2006, 26(6): 178 - 183.
- [21] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 28(3): 624 - 632.
XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, et al. Large-scale shaking table model tests on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 28(3): 624 - 632.
- [22] 王海波, 李德玉, 陈厚群. 拱坝振动台动力破坏试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(7): 109 - 118.
WANG Hai-bo, LI De-yu, CHEN Hou-qun. Experimental study on the dynamic failure of arch dams using a shaking table[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(7): 109 - 118.
- [23] 魏琰, 谢君斐. 中国工程抗震研究四十年(1949-1989)[M]. 北京: 地震出版社, 1989.