

# 地质力学模型试验技术研究及工程应用

董建华<sup>a,b</sup>, 张林<sup>a,b</sup>, 陈建叶<sup>a,b</sup>, 陈媛<sup>a,b</sup>, 胡成秋<sup>a,b</sup>

(四川大学 a. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室; b. 水利水电学院 成都 610065)

**摘要:** 针对在地质力学模型试验研究过程中存在的岩体材料相似模拟以及结构面相对位移测试问题, 首先开展了不同性能岩体变形特性的相似模拟研究, 试验结果确定了配制岩体模型材料的成分及其制备方法, 得到了水泥、石蜡和机油是影响高、中、低性能岩体模型材料变形特性的控制性因素, 提出了不同变模岩体材料采用不同尺寸的模型小块体进行精细化模拟。同时, 采用应变测试技术, 研制了用于获取结构面相对位移的测试仪器, 测试时, 用应变仪记录不同加载条件下相应测点的应变变化过程, 再由埋设之前标定得到了位移和应变系数, 即可得出位移变化过程。上述研究成果在小湾拱坝模型试验中的应用表明, 所制备的模型材料以及结构面相对位移测试技术是满足模型试验要求的。

**关键词:** 地质力学模型试验; 岩体相似材料; 结构面相对位移; 应变技术

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2012)12-0078-05

## 1 研究背景

我国近期在建或拟建的高拱坝工程, 大多位于西部地区河流上, 其主要特点是山高谷深、地质条件复杂、水库库容和工程规模大、地震烈度高。上述特点导致坝肩稳定问题十分突出, 是直接影响工程安全的重要因素, 因此需要深入开展复杂岩基上高拱坝坝肩稳定问题研究, 地质力学模型试验是解决上述问题的一种重要方法<sup>[1-3]</sup>。

目前地质力学模型试验有许多关键技术问题至今未得到完全满意的解决, 如在模型材料相似模拟方面, 高拱坝工程坝肩岩体往往存在着种类多、变形模量变化幅度大、不均匀性严重等特点。如某工程拱坝两坝肩中的 I 类到 IV 类岩体的变形模量由 25 GPa 变化到 5 GPa; 又如某工程拱坝坝肩中 II, III1, III2, IV1, IV2 类岩体的变形模量从 30 GPa 到 2 GPa 不等, 这种岩体的不均匀性特点导致在受力条件下变形分布不一致, 对坝肩及坝基稳定性带来一定影响。在模型试验中, 这些岩体的不均匀性给岩体材料的相似模拟带来了较大的困难, 因此为解决岩体材料相似模拟问题, 许多研究机构对此做了大量的研究工作, 并取得了一定的研究成效<sup>[4-5]</sup>, 如:

以环氧树脂为胶凝剂的重晶石粉和石灰石的混合料, 虽然此类材料可以获得较高的强度和变形模量, 但在配制过程中需要高温固化, 在固化过程中散发的有毒气体会危害人体健康, 且环氧树脂价格较高<sup>[6]</sup>; 武汉水利电力大学(现为武汉大学水利水电学院)韩伯鲤研制的 MIB 材料, 以松香酒精溶液为胶结剂, 加膜铁粉和加膜石英砂为粗骨料, 重晶石粉为细骨料, 此类材料存在的问题主要是给铁粉加膜所用的氯丁胶粘剂中含有甲苯, 会对人体产生毒害作用, 另外, 铁粉外膜一旦脱落容易生锈, 影响材料性质的稳定性, 容易导致试验失败<sup>[7]</sup>。

岩体中的各类软弱结构面, 如断层、蚀变带、层间错动带等与高拱坝坝肩整体稳定密切相关, 因此, 在地质力学模型试验研究过程中, 掌握结构面在不同加载条件下的相对位移变化趋势对于判断坝肩失稳状态及分析整体稳定安全度有着重要的参考依据。目前对坝体及坝肩的试验数据测试主要包括表面位移和应变, 而对于结构面的相对位移却难以获取。而目前使用的现场监测仪器, 主要用来测试岩石及混凝土的应力及变形大小, 此类仪器往往结构复杂, 体积较大, 所用材料具有较高的强度和弹性模量, 因此无法直接使用在模型试验上。

针对上述问题, 本文首先开展了不同性能岩体

收稿日期: 2012-01-04; 修回日期: 2012-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879050; 51109152); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226802); 博士学科点专项科研基金(20100181110077)

作者简介: 董建华(1978-), 男, 山东省菏泽市人, 讲师, 主要从事水工结构模型试验方面的教学与研究工作, (电话) 13699486737(电子信箱) djh771002@163.com。

通讯作者: 陈建叶(1978-), 女, 浙江省诸暨市人, 讲师, 主要从事水工结构模型试验方面的教学与研究工作, (电话) 13882151341(电子信箱) jianyechen@163.com。

的相似模拟研究,确定了配制岩体相似材料的原材料成分和制备方法,得到了在不同配比条件下,相似材料的物理力学性能与各组成掺量之间的相互关系。另外,针对模型试验中存在着的内部相对位移测试技术问题,采用应变测试技术,研制了获取结构面相对位移的测试仪器,使用时将其预埋在结构面内,通过引出线与应变测试仪相连接,试验过程中通过应变仪采集应变数据,并利用埋设之前标定得到的位移与应变关系即可换算出相应的相对位移值。上述研究成果已在多个模型试验中得到成功运用。

## 2 岩体材料相似模拟研究

为便于开展岩体材料的相似模拟研究,根据岩体变形模量  $E$  的大小,将岩体划分为高、中、低3类:高性能岩体适用于变模在15 GPa以上的I、II类岩体;中等性能岩体适用于变模在6~15 GPa的III类岩体;低性能岩体适用于变模在6 GPa以下的IV、V类岩体、卸荷岩体、柱状节理等。

用于模拟岩体的地质力学模型相似材料需具有高重度、低强度、低弹模的性质,为了达到上述目标,作者进行了多种原料成分、多种配比的模型材料试验。试验结果确定了相似材料由重晶石粉、水泥、水、石蜡和液压油等材料组成,其中重晶石粉物理化学性质稳定,成本较低,是一种较理想的模型材料主要成分。

在材料试验研究过程中,配制岩体相似材料的各种原材料按不同配比制成混合料,并压制成小块体。材料配比中将重晶石粉的质量单位定为100,其它成分的含量以与重晶石粉的质量比而定(以百分比计)。试验中所用的试件在模具中夯压成型,成型后在室内自然干燥后进行力学性能试验。

### 2.1 高性能岩体相似模拟

为获得高性能岩体相似材料,在不改变其它成分配比的条件下,通过改变水泥掺量进行了力学特性试验研究,研究成果如图1所示。结果表明变形模量和抗压强度随水泥含量增加而逐渐增加,基本成正比关系。当水泥含量从0.5%增加到7%时,变形模量范围从35.2 MPa增加到85.8 MPa。试验结果表明水泥对于改善模型材料的力学性能较为敏感,当需要配制强度较高、变形模量较大的岩体相似材料时,可采用提高水泥含量来实现。

### 2.2 中等性能岩体相似模拟

对于中等性能的岩体材料的相似模拟,研究结果表明,在原材料配比中将不再掺入水泥和水,而是

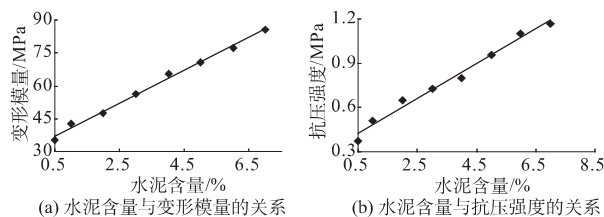


图1 模型材料性能与水泥含量关系

Fig. 1 Relationship between the properties of model material and the cement content

仅由重晶石粉、石蜡和机油组成,通过调节石蜡含量来实现。本试验中采用的半精炼固体石蜡本身具有较强的黏附性和柔韧性,材料性能比较稳定,作为中等性能岩体材料的黏结剂比较理想。但是由于石蜡在常温下是固体形态,无法与模型材料充分融合,因此为增加石蜡在模型材料配比中的均匀性,在掺入其它成分之前,需将固体石蜡与重晶石粉混合后在一定温度下溶解。试验结果如图2所示。结果表明变形模量随石蜡含量增加而相应增加,基本成正比关系,当质量比从0.5%增加到7%时,相对应的模型材料变形模量范围从22.5 MPa增加到35.6 MPa。

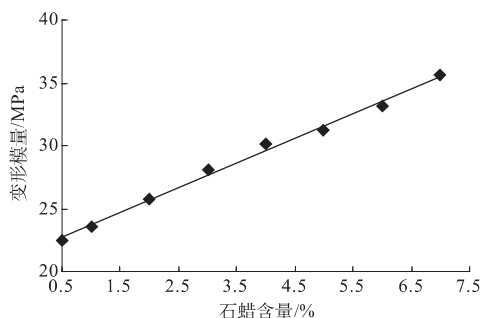


图2 模型材料的变形模量与石蜡含量关系

Fig. 2 Relationship between deformation modulus of model material and paraffin content

### 2.3 低性能岩体相似模拟

对于低性能岩体,如IV、V类岩体的相似模拟,通过调节水泥和石蜡含量已无法满足低变模的要求。试验结果表明提高机油的掺量对于降低变形模量具有明显的效果,试验结果如图3所示。由图可见,变形模量随机油含量增加而降低,基本成反比关系。当机油含量从3.5%增加到6.5%时,相对应的变形模量范围在22.5 MPa到14.3 MPa之间,可以满足低性能岩体的相似模拟要求。

因此根据试验结果可以比较方便地找到适合试验要求的材料配比,从而减少重新进行配比试验的工作量,加快试验进度。该模型材料具有变形模量变化范围大、性能稳定、成本较低、物理力学参数易于调节和没有毒副作用等特点,是一种比较理想的模拟岩体的相似材料。

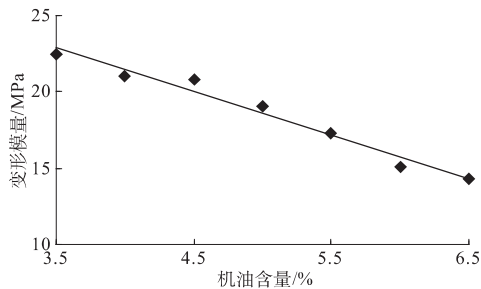


图3 模型材料的变形模量与机油含量关系

Fig. 3 Relationship between deformation modulus of model material and engine oil content

对于不同性能岩体进行模拟时,所对应的块体形状及体积也有所不同,如强度较高、完整性较好的高性能岩体材料的模拟可采用面积为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、厚度为  $7 \sim 10\text{ cm}$  的模型块体进行模拟;中等性能岩体材料的模拟通常采用面积为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、厚度为  $5 \sim 7\text{ cm}$  的模型块体进行模拟;IV类、V类岩体、深部裂隙、卸荷岩体、柱状节理等低性能岩体较常采用面积为  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 、厚度为  $1 \sim 5\text{ cm}$  的小块体进行精细模拟。

### 3 结构面相对位移测试技术

由于地质力学模型中所模拟的各类结构面均分布在岩体内部,这为直接测试结构面的相对位移值带来了较大困难,因此作者考虑利用应变测试技术,自行研制一种能够进行结构面在不同加载条件下的相对位移测试的试验装置。该试验装置在埋设时,能够将固定在测试仪内的应变片预先产生一定变形,用应变仪记录此时的初始应变值,在加载条件下,随着结构面在不同方向上的相对错动,应变片会随之发生变形响应,此时可以得到应变变化全过程,再利用埋设之前标定得到的位移与应变对应关系即可换算得到相对位移值。遵循以上研究思路,研制出了适用于地质力学模型试验中获取结构面相对位移的测试仪器,结构设计如图4所示。

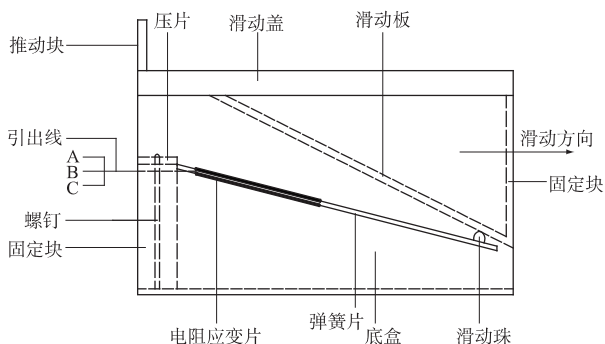


图4 结构面相对位移测试仪结构图

Fig. 4 Structure of measurement instrument for the relative displacement of structural planes

该测试仪器由底盒、弹簧片、电阻应变片、滑动盖等构成,电阻应变片为2片,分别固定于弹簧片中段的上下2面。该研究成果已获得发明专利<sup>[8]</sup>(专利号:200910058238)。

此测试仪器在埋设结构面内之前需先进行标定,标定过程为:开始标定时,使应变片产生一初始应变,此时记录初始位移和应变,之后将滑动盖朝运动方向运动一段距离后,用位移数显仪测定位移大小,用应变仪记录应变值,然后依次推动滑动盖,记录位移和应变大小,最后得到位移和应变的关系曲线,根据该曲线即可获得此仪器的标定系数(即该曲线的斜率)。图5所示为不同编号的位移计标定曲线,斜率为标定系数。

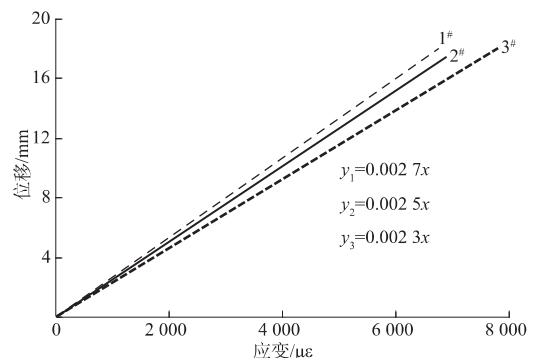


图5 不同编号的测试仪标定曲线

Fig. 5 Calibration curves of different testing instruments

将每个已注明编号的内部位移感应仪的系数标定之后,即可将其埋设在设计的断层、破碎带及软弱夹层等结构面测点部位。在试验过程中,推动块随着岩体内结构面的错动而发生移动,与其滑动连接的弹簧片随即发生回复变形,致使固定其上的电阻应变片发生变形,使用应变仪主机记录应变变化全过程,再由标定系数即可换算得到结构面相对位移变化趋势。本研究成果为研究并掌握岩体断层、破碎带及软弱夹层等不连续结构面随超载倍数的变化而发生的相对位移变化过程提供帮助,进而为评价相应工程的整体稳定安全度提供依据。

### 4 小湾拱坝结构模型试验

小湾拱坝工程地质构造中的天然岩体具有种类多、性能差异大、不均匀性严重等特点,因此为便于相似模拟,将天然岩体根据风化程度、性状、蚀变、卸荷作用程度和试验成果等因素分为I—IV类,不同类型岩体的基本参数如表1所示,模型材料参数值通过相似关系换算得到。为便于对不同类别岩体分别进行相似模拟,作者将变形模量和抗剪断强度等



表 1 不同类型岩体力学参数表

Table 1 Mechanical behavior parameters of different types of rock body

岩类	原型材料力学参数			模型材料力学参数		
	$E_0$ / GPa	$f$	$c'$ / MPa	$E_0$ / MPa	$f$	$c'$ / MPa
I	25	1.50	2.19	83.33	1.50	0.007 3
II	18	1.40	1.59	60.00	1.40	0.005 3
III	10	1.15	0.99	33.33	1.15	0.003 3
IV	5	1.00	0.60	16.67	1.00	0.002 0

性能较高的 I 类和 II 类岩体定义为高性能岩体, 将 III 类和 IV 类岩体分别定义为中、低性能岩体。

根据岩体材料相似模拟研究成果, 对于高性能岩体中的 I 类和 II 类岩体的相似模拟, 通过控制水泥掺量来实现, 试验结果得到 I 类和 II 类岩体模型材料中的水泥掺量分别为 3.5% 和 6%; 对于中性能岩体中的 III 类岩体的相似模拟, 在不掺加水泥和水的条件下, 通过调节石蜡含量来实现, 本次试验中, III 类岩体中的石蜡含量为 5% 左右; 对于低性能岩体中的 IV 类岩体, 通过调节机油含量来实现, 根据试验结果, 机油含量为 5.5% 左右。物理力学试验结果表明, 所采用的各个配比的模型材料, 较好地达到了与原型岩体材料在基本力学指标上相似的要求。图 6 所示为不同类别岩体模型材料砌块, 供模型砌筑时使用。



图 6 不同类别岩体模型材料块体

Fig. 6 Model material blocks of different types of rock body

在模型试验过程中, 为获取结构面在不同荷载条件下的相对位移变化趋势, 根据坝址区断层和蚀变带特点, 每个测点沿断层、蚀变带等结构面的走向布置位移计。在模型制作过程中, 当砌筑到相应的结构面测点时, 此时将位移测试仪进行埋入, 如图 7 所示为结构面内测试仪与应变仪连接示意图, 埋入时, 将滑动块推动一段距离以给予粘贴在铜片上的应变片一定的变形, 然后将应变片通过引出线与外界的应变数据采集仪相连接, 应变值的采集通过 UCAM-70A 型多点万能数字测试装置来完成。测试时, 首先记录下

每个测试仪对应测点的初始应变, 在加载条件下, 即可获得不同荷载时的应变值, 再由位移和应变关系系数即可换算出对应测点的相对位移值。

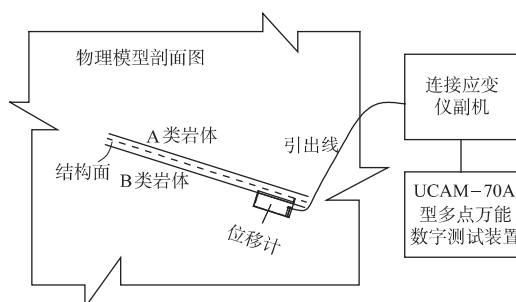


图 7 相对位移测试仪与应变仪连接示意图

Fig. 7 Schematic of the connection of testing instrument and strain apparatus

本试验采用超载和强度储备相结合的综合法进行试验。模型试验最终成果揭示了拱坝坝体和坝基失稳前后裂缝发展的全过程及其破坏机制, 得到了小湾拱坝坝肩及建基面的破坏形态和特征, 确定了工程综合稳定安全系数。

## 5 结 语

本文针对地质力学模型试验中存在的岩体材料相似模拟以及结构面相对位移测试问题开展研究。研究成果得到了制备模型材料的组成成分及其制备方法, 试验结果表明水泥、石蜡和机油是控制高、中、低性能岩体模型材料变形特性的主要因素。另外, 针对结构面相对位移测试问题, 采用应变测试技术, 研制了用于测量地质力学模型软弱结构面相对位移的应变式内部位移测试仪。使用时, 将每个已注明编号的内部位移感应仪的系数标定之后, 即可埋设在根据地质资料做成的地质力学模型内设计的岩体断层、破碎带及软弱夹层等结构面部位, 在不同加载条件下, 用应变仪主机记录应变变化过程, 再由标定系数即可得出位移变化过程。本研究成果为研究并掌握岩体断层、破碎带及软弱夹层等不连续结构面随超载倍数的变化而发生的内部位移变化过程提供帮助, 进而为评价相应工程的整体稳定安全度提供依据。该测试仪器在模型试验中的成功运用, 表明该仪器结构设计合理, 制作和使用方便, 测试准确, 可在今后的模型试验中推广使用。

## 参考文献:

- [1] 杜应吉. 地质力学模型试验的研究现状与发展趋势[J]. 西北水资源与水工程, 1996, 7(2): 64-68.  
(DU Ying-ji. Research Status and Development Trend of

- Geo-mechanics Model Test [J]. Northwest Water Resources and Water Engineering, 1996, 7(2): 64 - 68. (in Chinese)
- [2] 姜小兰, 操建国, 孙绍文. 构皮滩双曲拱坝整体稳定地质力学模型试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2002, 19(6): 21 - 24. (JIANG Xiao-lan, CAO Jian-guo, SUN Shao-wen. Geo-mechanical Model Test on Entire Stability for Goupitan Hyperbolic Arch Dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(6): 21 - 24. (in Chinese))
- [3] 张林, 刘小强, 陈建叶. 复杂地质条件下拱坝坝肩稳定地质力学模型试验研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 1 - 5. (ZHANG Lin, LIU Xiao-qiang, CHEN Jian-ye. The Geo-mechanical Model Test on Stability of Arch Dam Abutment under Complex Geological Conditions [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2004, 36(6): 1 - 5. (in Chinese))
- [4] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学模型试验中的应用 [J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 48 - 51. (MA Fang-ping, LI Zhong-kui, LUO Guang-fu. NIOS Model Material and Its Use in Geo-mechanical Similarity Model Test [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 48 - 51. (in Chinese))
- [5] 陈安敏, 顾金才, 沈俊. 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): 44 - 48. (CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun. Application Study on the Geo-mechanical Model Experiment Techniques [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 44 - 48. (in Chinese))
- [6] OBERTI G, FUMAGALLI E. Static Geo-mechanical Model of the Ridracoliarch Gravity Dam [C] // International Society for Rock Mechanics. Proceedings of the 4th ISRM Congress, Montreux, Switzerland, September 2 - 8, 1979.
- [7] 韩伯鲤, 陈霞龄, 宋一乐, 等. 岩体相似材料的研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 6 - 9. (HAN Bo-li, CHEN Xia-ling, SONG Yi-le, et al. Research on Similar Materials of Rockmass [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(2): 6 - 9. (in Chinese))
- [8] 张林, 胡成秋, 董建华. 用于测量地质力学模型内部位移的应变式内部位移测试仪: 中国, 200910058238 [P]. 2009 - 07 - 08. (ZHANG Lin, HU Cheng-qiu, DONG Jian-hua. Displacement Gauge for the Internal Displacement of Geo-mechanical Model: China, 200910058238 [P]. 2009 - 07 - 08. (in Chinese))

(编辑: 姜小兰)

## Techniques of Geomechanical Model Test and Engineering Application

DONG Jian-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Lin<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-ye<sup>1,2</sup>, CHEN Yuan<sup>1,2</sup>, HU Cheng-qiu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The objective of the present study is to tackle problems in the simulation of rock body material and the measurement of relative displacement of structural planes in geomechanical model test. Firstly, the deformation characteristics of different rock body materials was simulated, and the composition and preparation method of rock body model material were determined. It was found that the cement, paraffin and engine oil were main factors controlling the deformation characteristics of model materials of high, medium and low performances. Refined simulation using small blocks of different sizes was proposed for the rock materials with various deformation moduli. Moreover, strain test technique was employed to develop a measurement instrument for the relative displacement of structural planes. In the test, the strain changes of measurement points under different loading conditions were recorded by strain gauges, and the displacement process was obtained according to the calibrating coefficients of displacement and strain obtained before the embedment. The research findings were applied to Xiaowan arch dam model test and the results indicates that both the model material prepared in this study and the measurement technique for relative displacement of structural plane meet the requirements of model test.

**Key words:** geomechanical model test; similar material of rock body; relative displacement of structural plane; strain technique