

文章编号: 1000-7598 (2011) 03-757-05

混凝土高坝动力模型材料的试验研究

李 弋¹, 张少杰¹, 徐 进¹, 唐天国², 刘浩吾¹

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 2. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065)

摘 要: 基于动力模型试验的动力相似准则, 经一系列配合比和力学性能试验及动弹性模量超声波检测, 研制了新型高混凝土坝动力试验模型材料 DMM。初次提出以河砂作为混凝土坝动力相似材料的粗骨料主材, 显示出能够借此有效调控动弹性模量和材料重度的新特点, 明显优于石英砂等材料。大量试验结果表明, DMM 材料不仅重度高、动弹性模量低, 且其应力-应变关系中具有稳定而明显的线弹性阶段, 符合高混凝土坝动力模型试验和相似准则的基本要求, 且环保无毒、价廉、制作周期较短, 可成为优良的动力相似材料。

关 键 词: 相似材料; 试验研究; 模型试验; 动力模型试验; 动力相似; 混凝土高坝; 超声波检测

中图分类号: TV 32

文献标识码: A

Experimental research on dynamic model material of high concrete dam

LI Yi¹, ZHANG Shao-jie¹, XU Jin¹, TANG Tian-guo², LIU Hao-wu¹

(1. School of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the dynamic similarity criteria of dynamic model tests, a new type of dynamic test model materials of high concrete dams named DMM has been developed through a series of tests of proportion of mixture and mechanical properties as well as the ultrasonic detection. The fluvial sand being used as the coarse aggregate in the dynamic similarity material of concrete dams has been presented for first time. It has been found that by the way of regulating its mixture proportion the dynamic elastic modulus and density of the model material can be controlled and adjusted efficiently. So it's significantly better than the quartz sand and so forth. The results of a large number of experiments show that DMM material has advantages of not only the high density, low dynamic elastic modulus, but also stable and apparent linear elastic stage involved in its stress-strain relation, with a stable and significant linear elasticity, conforming to the basic requirements of dynamic model test of high concrete dam and similarity criteria. It is green and non-toxic, cheap and its making is shorter. It's expected to be an excellent dynamic similarity material.

Key words: similarity material; experimental research; model experiment; dynamic model experiment; dynamic similar; high concrete dam; ultrasonic detection

1 引 言

高坝的研究主要手段之一是物理模型试验, 具有直观性、整体性和全过程的优点。这对于高坝抗震尤其重要, 因高坝坝体-坝基-库水动力系统的动力反应特别复杂, 数值模拟尚难以全面、准确地反映(如地震中的大坝震动实为多相耦合波动过程, 而常按振动过程加以分析)。重大工程多采用计算分析与试验研究相结合的方法相互验证, 为工程设计和施工提供科学依据。

模型相似材料是模型试验正确模拟原型性态的

关键。模型相似材料的研究多以静力模型材料为主, 动力相似材料的成果较少。本文旨在研究高拱坝的气幕隔震原理与技术, 依托全球最高的 305 m 锦屏一级高拱坝为结合点, 进行大缩尺动力试验。为此, 本文在借鉴现有成果的基础上, 通过大量配比试验和材料波速检测, 研制出一种新型的动力相似材料, 其动弹性模量低, 性能与相似判据要求符合程度较高, 应用方便。

动力相似包括: 几何相似、运动相似、力和质量关系相似。完全的动力相似难以实现, 为研究某一类问题, 常突出某一类相似关系, 而弱化其余相

收稿日期: 2010-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 90715026)。

第一作者简介: 李弋, 男, 1979 年生, 博士, 主要从事工程安全检测方面研究。E-mail: 360138428@qq.com

似关系。

在动力相似中有 3 个互相独立的基本量, 即长度、力、时间。由于模型和原型都处于同一引力场中, 从而有:

$$\left. \begin{aligned} C_g = g_p / g_m = C_a = a_p / a_m = 1 \\ \frac{l_p}{l_m} = \frac{t_p^2}{t_m^2} = C_l \\ C_l = \sqrt{C_l} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: C 为相似比尺; g 为重力加速度; a 为加速度; l 为长度; t 为时间; 下标 p 、 m 分别指原型和模型。

式 (1) 说明易得材料的动态弹性模量相似准则为

$$C_E = C_l \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; 故几何比尺 C_l 较大时, 相似材料的动态弹性模量相当低。

综上所述, 动力模型试验中, 相似比尺的 3 个控制量为 C_l 、 C_E 和 C_γ (γ 表示重度)。

2 模型试验材料研究的新近进展

意大利等国曾用的模型材料多以铅氧化物 (PbO 、 Pb_3O_4) 和石膏为主, 辅以砂或小石; 另一种为环氧树脂、重晶石粉、甘油等混合材料^[1]。前者有毒性, 后者经高温固化, 也有毒气散发。近年来, 在模型材料方面进行了多种研究探索^[7-8], 其代表性成果简述如下。

2.1 MIB 模型材料

MIB 模型材料由武汉大学韩伯鲤等^[2-3]提出。MIB 的骨料采用铁粉、重晶石粉和红丹粉, 以松香和石蜡为黏结剂, 调剂剂为酒精, 以氯丁胶黏结剂为柔性附加剂。

MIB 重度范围为 22~40 kN/m³, 弹性模量为 60~300 MPa, 抗压强度约为 0.55 MPa。

研制的 MIB 材料具有高重度、低强度、低弹模、易干燥、砌块易黏结等优点, 并在 9 座水电工程结构模型试验中应用。但由于使用氯丁胶、红丹粉等材料, 制作中也有一些毒性。

2.2 NIOS 相似材料

NIOS 相似材料由清华大学马芳平等^[4]研制, 含有磁铁矿精矿粉、河砂、黏结剂石膏或水泥、拌和用水及添加剂, 重度较大, 弹性模量和抗压强度等主要力学指标可以在较大范围内调整, 配制较方便, 物理化学性质比较稳定, 成本低、无毒。当胶结剂选用水泥时, 弹性模量为 750~3 000 MPa;

当选用石膏时, 弹性模量为 80~300 MPa。后一配方曾用于金沙江溪洛渡电站地下洞室群地质力学模型试验。

对于高拱坝动力模型试验水泥胶结的 NIOS 材料显然弹性模量偏高。当用石膏胶结时, 石膏干燥过程中, 伴随有体积收缩, 表面可能产生微裂纹, 对于在大型高频振动台上需反复承受多工况激振试验而言, 存在局部裂纹扩展的可能, 以至影响模型力学参数的测量精度。材料干燥过程长也影响工效。

2.3 地质力学模型材料

四川大学高玉磊、张林等^[5]提出的地质力学模型材料, 以重晶石粉为加重料, 高标号机油为黏结剂, 可溶性高分子材料为掺和料, 根据岩类的不同, 掺入一定量的添加剂等, 制成混合料, 由压力机压制成块状体。经测试, 该模型材料的应力-应变曲线显示它属于弹塑性材料, 应变达 1% 时仍无屈服点, 在初加载时, 亦未出现线弹性阶段。故该材料适用于模拟弹塑性岩体, 而不适用于本项目模拟的小变形、线弹性高拱坝动力过程。

2.4 IBSCM 相似材料

山东大学王汉鹏等研制的新型相似材料晶砂胶结料 (IBSCM)^[6], 以重晶石粉、铁精粉、石英砂作为骨料, 松香、酒精溶液作为胶结剂, 石膏作为调节剂混合而成。具有重度高、抗压强度与弹性模量低、性能稳定等特点。弹性模量为 60~1 400 MPa, 抗压强度为 0.3~4.0 MPa, 重度为 23~30 kN/m³, 可以覆盖低强度和中等强度的岩体材料^[6]。其典型应力-应变曲线显示^[6], 该材料属于弹塑性材料, 很明显缺乏加载初期的线弹性阶段。因此, 同样不适用于小变形、线弹性的混凝土坝动力模拟的试验任务。

3 材料的研制及动力性能试验

针对高混凝土坝大缩尺动力试验对于模型材料的高重度低弹性模量的特点要求, 借鉴上述相关研究的新近进展, 取其所长, 研制了新型混凝土坝动力试验的模型材料 DMM (dynamic model material)。

3.1 模型材料 DMM 的合成组份选择

在理念上模拟材料力求接近其模拟对象混凝土。混凝土成分为骨料 (粗骨料、细骨料)、胶结剂 (水泥)、调剂剂 (水)。经一系列优化试验得到的 DMM 材料的组份如下: ①河砂为 DMM 的粗骨料; ②重晶石粉、铁粉为 DMM 的细骨料; ③松香为 DMM 的胶结剂; ④酒精为起调剂剂作用。

试验表明,河砂含量对模型材料的弹性模量起着重要调节作用,有利于力学强度。相比石英砂,河砂具有颗粒级配好的优势。重晶石粉和铁粉均用粒径为 0.074 mm 的材料,起细骨料的充填作用,铁粉还起增重作用。

松香为天然树脂类胶结剂,无毒、溶于酒精。制备中避开用水,以免除水对其他材料的物理化学作用、干燥耗时、干缩等不利影响。松香酒精浓度会影响胶结强度,这为调节模型材料强度提供了一种简便调控手段。酒精仅起到调和与稀释作用,它与松香并不产生不可逆的化学变化。故砌筑模型时,材料接触面经洒酒精润湿即重新出现黏结能力,既方便,又不影响模型的均质性。鉴于高坝模型需带水库试验,本组成中避开了石膏,可消减模型迎水面的防水难度。

3.2 配合比要点

经一系列试验表明,针对高混凝土坝动力模型的需要,松香酒精溶液的摩尔浓度,即松香/(松香+酒精)的浓度控制在 13%~15%为宜。

松香、酒精的总用量和在全部用材中的比例是另一项重要指标,其所占比例为 6%~8%为宜,有利于拌合和填筑。当低于 6%时,胶结力不足;而高于 8%时,则会导致拌合材料过稀。干燥时间过长,不利于及时脱模。

3.3 DMM 材料动弹性模量和力学性能试验测试

3.3.1 动弹性模量的超声波检测

测定脆性材料试件的动弹性模量以前多采用固端梁(或简支梁)激振法。其试件制作较费事,且固端条件不易保证,影响精度。

本试验采用超声波法,即通过测试圆柱状试件中超声波的传播速度,反算模型材料在高频简谐荷载作用下的等效动弹性模量。检测仪器采用新型全数

字化(美)MTS815 岩石——混凝土试验动态测定仪。

为保证检测精度并同时测定材料的泊松比,采用了纵波检测和横波检测共用的方法。

当纵波(P波)和横波(S波)检测时,有动弹性模量-波速关系式各为

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (3)$$

$$E_d = \rho V_s^2 (1+\mu) \quad (4)$$

式中: E_d 为动弹性模量; ρ 为试件密度; V_p 为纵波波速; μ 为泊松比; V_s 为横波波速。

由式(3)、(4)易得

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (5)$$

测试波形示例见图 1。多组试件的动弹性模量试验结果见表 1。

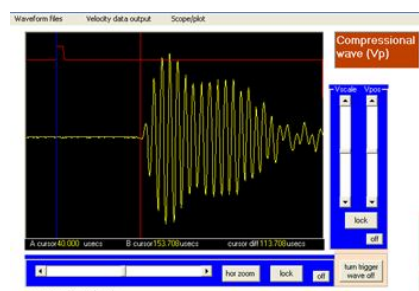


图 1 动弹性模量超声波检测的实测波形
Fig.1 Wave of ultrasonic testing to dynamic elastic modulus

表 1 动弹性模量检测和力学性能试验结果汇总

Table 1 Test results of dynamic elastic modulus and mechanical characteristics

试件编号	抗压强度 /MPa	泊松比	动弹性模量 /MPa	静弹性模量 /MPa	试件编号	抗压强度 /MPa	泊松比	动弹性模量 /MPa	静弹性模量 /MPa
1-1	0.77	0.28	398.4	400.0	2-1	0.77	0.27	425.6	322.2
1-2	0.69	0.27	433.6	425.0	2-2	0.78	0.25	426.9	475.0
1-3	0.75	0.26	429.6	342.9	2-3	0.71	0.26	441.1	314.3
1-4	0.74	0.26	416.8	357.1	2-4	0.75	0.25	432.8	375.0
平均值	0.74	0.27	419.6	381.3		0.75	0.26	431.6	371.6

3.3.2 DMM 材料力学性能试验

试样为 $\phi 50$ mm、高为 110 mm 的标准圆柱体。试验采用全数字化(美)MTS815 岩石——混凝土

试验系统进行多组试件的轴向压缩试验,并同时测定泊松比。

一试件在承载试验中的局部图像见图 2, 受压

破坏后的照片见图 3。

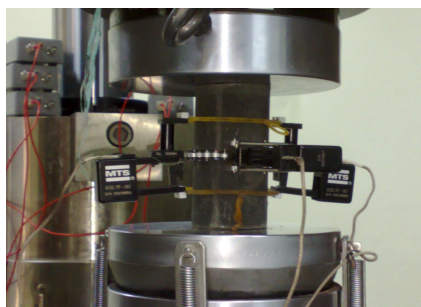


图 2 试件安装在 MTS 试验机上进行测试 (局部照片)
Fig.2 Specimen in MTS to test (local photo)

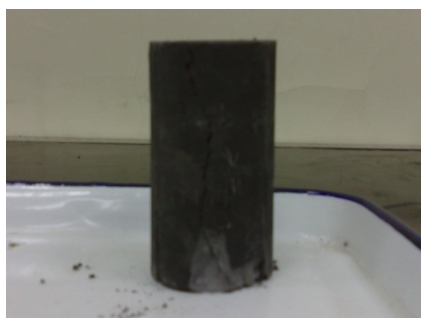


图 3 破坏后的试件
Fig.3 Specimen after damage

3.3.3 试验结果及分析

作为示例, 给出 2 条代表性压缩试验应力-应变曲线如图 4 所示。

部分代表性试件试验 (两组、每组 4 件) 的动弹性模量检测和力学性能试验结果汇总于表 1。

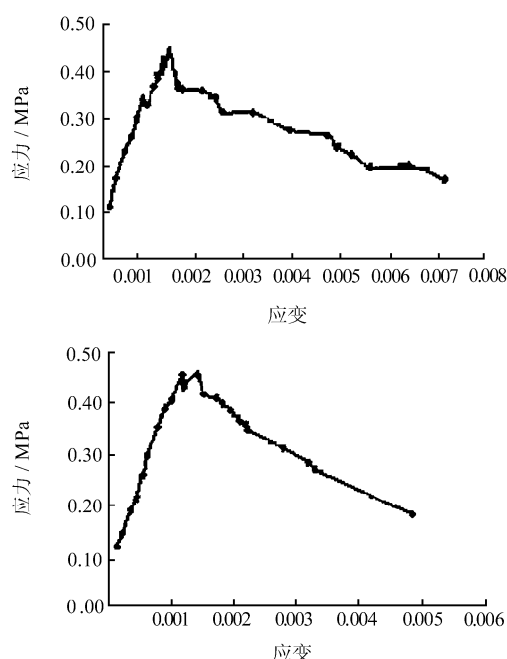


图 4 压缩试验应力-应变曲线示例

Fig.4 Stress-strain curves of compression test

综上所述, 实测的各试件应力-应变成形态类同, 规律性良好, 数值彼此接近, 离散性不大, 符合脆性材料承载变形破坏的一般规律, 表明采用新型原装 MTS 刚性试验机完成的测试, 结果趋势与分布合理, 数据可信。

DMM 材料的代表性配方的代表性试件力学试验主要结果是, 平均密度为 2.4 g/cm^3 , 平均静弹性模量为 376.45 MPa , 动弹性模量为 425.6 MPa , 泊松比为 0.27。动弹性模量为静弹性模量的 1.13 倍, 符合一般规律。

由此可见, DMM 材料在力学性能上表现稳定, 在高重度低弹性模量上有优势, 且材料和模型制作工艺简便, 价格价廉, 干燥周期短, 环保、无毒, 具有综合优势, 对于高拱坝动力模型试验具有较好的应用价值。

4 结 论

(1) 经一系列配合比、力学性能试验及动弹性模量超声波测试和逐步优化, 研制了高混凝土坝动力试验新型模型材料 DMM。初次提出以河沙作为粗骨料主材, 河沙粒径级配连续性好, 研究表明, 调控其配比可成为调控动弹性模量和重度的有效手段, 明显优于石英砂等材料。

(2) 试验结果表明, DMM 材料不仅重度高、弹性模量低, 且其应力-应变关系中具有稳定而明显的线弹性阶段, 符合高混凝土坝动力试验和相似准则的基本要求; 价廉、环保无毒, 制作周期较短。

(3) DMM 材料制备和整体模型砌筑, 工艺简便易行, 砌筑面涂酒精而自行黏结, 无需环氧树脂等黏结剂, 以免因出现高强度黏结层而影响整体模型的均质性, 从而避免高拱坝模型在高频振动动力试验中因此而诱发的动力响应局部畸变。

参 考 文 献

- [1] 陈兴华等. 脆性材料结构模型试验[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [2] 韩伯鲤, 张文昌, 杨存奋, 等. 新型地质力学模型材料 (MIB)[J]. 武汉水利电力学院学报, 1983, (1): 11-17.
HAN Bo-li, ZHANG Wen-chang, YANG Cun-fen, et al. A new model material of geomechanics(MIB)[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1983, (1): 11-17.
- [3] 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 material of rock mass[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1997, 30(2): 6-9.

- [4] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 相似材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[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 geomechanical similarity model test[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2004, 23(1): 48—51.
- [5] 高玉磊, 张景华, 石云, 等. 地质力学模型材料试验研究[J]. 四川水利. 2007, (2): 35—37.
- [6] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (9): 1842—1847.
WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHANG Qiang-yong. Development of a new geomechanical similar material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25 (9): 1842—1847.
- [7] FRANCOIS E HEWZE. Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials[J]. **Inter Rock Mech. Min. Sci. and Geo. Abstr.**, 1978
- [8] 陈勤, 段亚辉. 洞室和围岩温度对泄洪洞衬砌混凝土温度和温度应力影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31, (3): 986—992.
CHEN Qin, DUAN Ya-hui. Influence of temperature in tunnel and surrounding rock on temperature and thermal stress of lining concrete of flood discharge tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 986—992.