

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.002

胶凝面板堆石坝离心模型试验研究

蔡 新^{1,2},武颖利³,李国英²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.南京水利科学研究院,江苏 南京 210024;
3.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了解胶凝面板堆石坝在竣工期和蓄水期的工作性态,采用离心模型试验方法对不同胶凝含量下坝体的应力变形进行试验研究,同时与非线形有限元法数值模拟计算进行对比分析.结果表明,随着坝体材料中胶凝含量的增加,坝体沉降和面板挠度在竣工期和蓄水期明显减小,改善了面板的受力条件,可保证防渗体系的正常工作.胶凝含量的增加,提高了坝体的抗剪强度和承载力,设计时坝坡可明显放陡,坝体断面显著缩小,大大节省了筑坝堆石料,并能保证大坝在应力变形和稳定性方面的安全可靠.离心试验得到的竣工期和蓄水期的坝体应力、位移,面板法向位移与数值计算结果规律基本一致,可为胶凝面板堆石坝的设计提供参考.

关键词:胶凝面板堆石坝;离心模型试验;数值分析

中图分类号:TV312;TV642 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2008)05-0585-05

作为一种新的坝型,胶凝面板堆石坝由于同时具有碾压混凝土坝和面板堆石坝的优点,在国外坝工界有一定的研究,并得到了应用.而在国内则刚引起关注,研究还处于起步阶段,尚没有具体的工程应用实例.

为了探讨胶凝面板堆石坝在竣工期和蓄水期的应力、位移工作性态,为该坝型的断面设计提供参考依据,本文采用离心模型试验方法,以成屏混凝土面板堆石坝的设计参数建立工程模型,讨论坝体堆石料掺入胶凝材料后,大坝在竣工期和蓄水期的应力、位移响应.

1 胶凝面板堆石坝离心模型试验

1.1 试验原理

离心模型试验是通过离心机快速转动提供高重力场,根据模型和原型的比例关系,选择相应的重力场,在模型和原型材料相同的条件下,使模型内部应力状态和原型一致.离心机上同时装备数据采集系统.试验过程中,测试信号先由放大器放大,再经过多通道切换开关对放大过的信号进行滤波、整形等处理,送入前级机转换成数字信号,再由集流环送入微机系统.通过磁性阀控制向模型上游的注水,用以模拟大坝蓄水过程^[1].

1.2 模型制备

离心模型试验时,根据模型箱的尺寸和原型尺寸,选定相似比例 n ,再由相似比确定模型各方向的尺寸,建立模型.本文试验原型采用成屏混凝土面板堆石坝断面的参数,大坝建造在基岩上,坝高 74.6 m,顶宽 5 m,上下游坝坡为 1:1.3,面板厚度为 35 cm^[2-3].试验选用的离心机为 50 g_t,模型箱高 40 cm、长 68 cm、宽 20 cm.相似常数 n 取原型高度和模型箱高度之比,为 200.此时坝底部分不能完全放入模型箱,截去下游小部分,取坝体的一部分.对于堆石体,模型中可直接用原型材料制作,并采用类似的级配,但对石料的粒径要有所限制,最大粒径控制在 40 mm 以内,可基本消除粒径效应对测试结果的影响.对混凝土面板,原型中厚度仅 35 cm,按相似比缩小后,模型中的厚度很小,若用原型材料制作,则成型困难,且测量也不便,须采用其他材料替代.经过比较和选择,认为铝板是比较合适的材料^[1,4].

由于铝板和混凝土的弹性模量不同,不满足相似准则,必须进行修正.

收稿日期:2008-05-18

基金项目:南京水利科学研究院科学基金(Y90301)

作者简介:蔡新(1964—),男,江苏启东人,教授,博士生导师,主要从事水工及土工结构研究.

设原型中混凝土面板的厚度为 D ,弹性模量为 E_c ,由相似准则 ,模型中若仍采用混凝土面板 ,取弹性模量不变 ,则其厚度 $d_{c\text{ }am}$ 为

$$d_{c\text{ }am} = \frac{1}{n}D \tag{1}$$

用铝板代替混凝土面板时 ,必须使两者的抗弯刚度一致 ,以满足挠度相似 ,由此确定模型中铝板的厚度 .由铝板和混凝土面板的抗弯刚度相等 ,有

$$E_{Al}I_{Al\text{ }am} = E_cI_{c\text{ }am} \tag{2}$$

而

$$I_{Al\text{ }am} = \frac{1}{12}B(d_{Al\text{ }am})^3 \quad I_{c\text{ }am} = \frac{1}{12}B(d_{c\text{ }am})^3 \tag{3}$$

由式(1)~(3)可得

$$d_{Al\text{ }am} = \sqrt[3]{\frac{E_c}{E_{Al}}} \times \frac{D}{n} \tag{4}$$

式中 : B ——模型的宽度 ; E_{Al} ——铝板弹性模量 ; $I_{Al\text{ }am}$ ——铝板的惯性矩 ; $d_{Al\text{ }am}$ ——铝板厚度 ; $I_{c\text{ }am}$ ——混凝土的惯性矩 .

由式(4)计算结果可知 ,面板可采用厚度为 0.12 cm 的铝板(弹性模量 61 GPa) .铝板长 61.2 cm ,宽 20 cm .模型中铝板的厚度与原型中混凝土面板的厚度不满足相似关系 ,故需对测得的铝板应力进行修正才能得到满足相似性要求的应力^[4] .修正公式为

$$\sigma_c = \frac{W_{Al}}{W_c}\sigma_{Al} = \left(\frac{nd_{Al}}{D}\right)^3\sigma_{Al} = \sqrt[3]{\left(\frac{E_c}{E_{Al}}\right)^2}\sigma_{Al} \tag{5}$$

式中 W_{Al} 和 W_c 分别为铝板和混凝土面板的弯曲截面系数 .

根据试验要求 ,在面板上设 5 个测点 ,布置如图 1 所示 .在测点上、下表面各贴电阻应变片 1 片 ,用以测量面板的应变 .在坝顶安装激光位移传感器 ,用以测量坝顶的沉降 .

1.3 数据测试

在进行面板变形测量时 ,可将一测点上 2 个应变片加上 2 个相同的温度补偿片构成全桥 ,如图 2 所示 ,其中 R_1, R_2 接面板上下两侧布置的应变片 , R_3, R_4 接相同的温度补偿片 .测出其应变量 $\epsilon_{\text{测}}$,则该测点的应变 ϵ 为

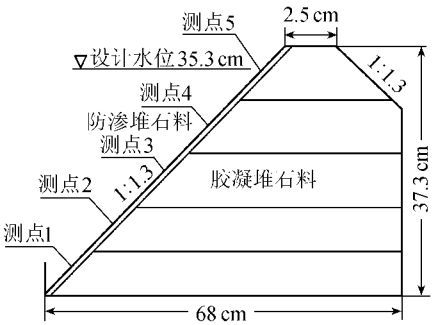


图 1 离心模型测点布置

Fig.1 Layout of measuring points of the centrifugal model experiment

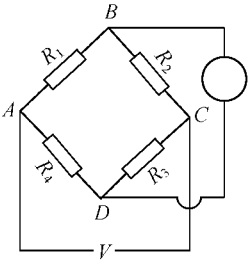


图 2 全桥示意图
Fig.2 Sketch of full-bridge circuit

各测点的弯矩 ,可根据式(7)得出 :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_{Al}} = \frac{M}{E_{Al}W_{Al}} \tag{7}$$

式中 : σ ——铝板顺坡向正应力 ; M ——待测弯矩 .

本文试验模型共 3 组 ,分别是普通的堆石坝模型、加入 3% 胶凝材料的胶凝坝体模型和加入 5% 胶凝材料的胶凝坝体模型 .通过离心机数据采集系统 ,将数据按 5 s/次的频率来采集 .

试验在室温条件下进行 ,不计因温度变化而引起电阻应变片阻值的变化 .图 2 中各应变片的阻值变化为

$$\Delta R_1 = \Delta R_p + \Delta R_w \tag{8}$$

$$\Delta R_2 = \Delta R_p - \Delta R_w \tag{9}$$

式中 : $\Delta R_1, \Delta R_2$ ——电阻 R_1 和 R_2 的阻值变化量 ; ΔR_p ——应变片拉伸引起的阻值变化量 ; ΔR_w ——应变片弯曲引起的阻值变化量 .

试验的测试电路中 , $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$,根据图 2 所示电路图 ,在 AC 点之间输入已知电压 V , BD 点之间的输出电压为

$$\Delta V_{BD} = \frac{1}{4}V\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2}\right) \tag{10}$$

将各阻值变化代入 ,得

$$\Delta V_{BD} = \frac{1}{4} V \frac{2\Delta R_W}{R}$$

(11)

可见 ,选择全桥电路 ,其中 R_3, R_4 接一样的温度补偿片 ,能测得真实应变值的 2 倍 ,并且消除了拉伸应力的影响.

同一规格型号的应变片 ,其阻值变化率($\Delta R/R$)与待测元件的应变存在的线性关系可用灵敏系数 K 来表示 :

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_x}$$

(12)

式中 ϵ_x 为应变片在电阻变化 ΔR 时的应变值.

设离心模型数据采集系统某一通道 i 的放大系数为 f_i ,根据式(11)和式(12) ,则采集到的输出电压 ΔV_o 与应变的关系为

$$\Delta V_o = f_i \Delta V_{BD} = \frac{1}{2} f_i V K \epsilon_w$$

(13)

将式(12)代入式(7) ,整理后可得 M 和数据采集系统得到的输出电压 ΔV_o 之间的换算关系 :

$$M = \frac{2EW}{VKf_i} \Delta V_o$$

(14)

其中 $E = 61 \text{ GPa}$, $W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0.2 \text{ m} \times 0.12^2 \text{ m} \times 10^{-4} \text{ m}}{6} = 4.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3$, $V = 4.968 \text{ V}$, $K = 2.15$, f_i 为采集通道的放大系数 ,各通道不同.

1.4 试验过程

试验现场模型如图 3 所示.图中模型为试验前准备阶段 ,坝体上游侧做了水袋 ,坝顶精密激光传感器安装完毕.将模型放入离心机中 ,根据试验设计的加载历程进行加载 ,得到各个测点数据随加速度变化的曲线 ,如图 4 所示.图中 g 为重力加速度.沉降曲线表示坝顶的沉降曲线 ,加速度曲线表示加速度随时间的变化曲线.其中 AB 段为离心机加载阶段 ,加速度从 0 均匀地加到 $200g$; BC 段 ,保持加速度不变 ,并打开磁性阀 ,在水袋中注入水至设计水位 ,模拟坝体的蓄水阶段 ; CD 段为离心机卸载阶段 ,加速度从 $200g$ 均匀地降到 0.



图 3 现场模型

Fig.3 Experiment model

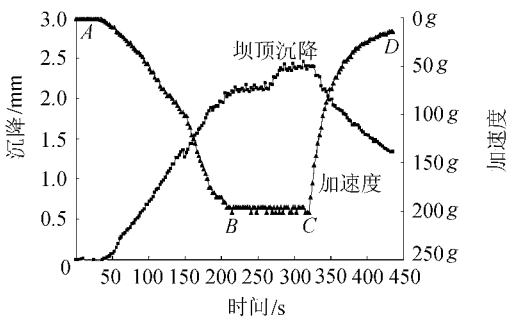


图 4 坝顶沉降随加速度变化曲线

Fig.4 Dam top settlement-acceleration curve

1.5 试验数据的整理分析

试验结果如表 1 所示.

根据测到的坝顶沉降 ,换算得到原型坝体的沉降分别为 :普通堆石坝竣工期沉降 42 cm ,蓄水期为 48 cm ; 3% 胶凝含量坝体竣工期沉降 12.2 cm ,蓄水期为 12.8 cm ; 5% 胶凝含量坝体竣工期沉降 8.6 cm ,蓄水期为 9.2 cm .通过测得的面板弯矩反算面板的挠度 ,得到普通堆石坝在竣工期的面板最大挠度为 -3.64 cm ,蓄水期为 8.93 cm ; 3% 胶凝含量坝体竣工期面板最大挠度为 -1.04 cm ,蓄水期为 3.98 cm ; 5% 胶凝含量坝体竣工期面板最大挠度为 -0.60 cm ,蓄水期为 3.47 cm .可见掺入胶凝材料后 ,坝体位移和面板挠度显著减小 ,且随着胶凝含量的增加 ,坝体位移和面板挠度逐渐减小 ,较好地改善了面板的受力和面板缝、周边缝的工作条件 ,确保了防渗系统的正常工作.

表1 竣工期和蓄水期各模型的测试结果

Table 1 Test results of different models in completion and water storage periods

模型	工况	弯矩/(N·cm)					面板最大 挠度/cm	坝顶沉降/ mm
		测点1	测点2	测点3	测点4	测点5		
普通混凝土面板堆石坝模型	竣工期	-39.9	-8.6	-5.6	-2.6	-102.8	-3.64	2.10
	蓄水期	42.7	78.0	100.2	226.2	131.8	8.93	2.40
3%胶凝含量的胶凝堆石坝模型	竣工期	-24.2	-10.0	-8.7	-18.0	-58.5	-0.01	0.61
	蓄水期	96.2	40.2	131.0	170.9	160.8	0.04	0.64
5%胶凝含量的胶凝堆石坝模型	竣工期	-37.7	-16.8	-32.6	-79.9	-18.4	-0.01	0.43
	蓄水期	47.5	129.4	262.6	246.5	95.9	0.03	0.46

2 试验与数值计算结果的比较

为便于比较,本文对试验模型大坝进行了有限元数值模拟.坝料本构关系采用邓肯-张模型,坝体单元为实体等参数单元,面板与胶凝堆石接触面上设置无厚度接触面单元^[5-6].与离心试验时一样,坝体采用相同级配和相同胶凝含量堆石料.堆石料参数选择如表2所示^[7-10].

表2 胶凝堆石料数值计算参数

Table 2 Parameters for numerical calculation of cemented-rockfill material

模型	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	φ/rad	K	n	R_f	G	F	D	K_{ur}	n_{ur}
普通堆石料	2150	0	0.890	1100	0.320	0.740	0.350	0.160	5.200	2100	0.320
3%胶凝含量的胶凝料	2120	204	0.940	1700	0.335	0.796	0.340	0.140	4.750	2200	0.330
5%胶凝含量的胶凝料	2110	290	1.105	2150	0.340	0.815	0.330	0.130	4.550	2250	0.335

面板混凝土采用线弹性模型,弹性模量 E 取15 GPa,泊松比 μ 取0.17,密度 ρ 取2400 kg/m³.接触面(Goodman)单元计算参数 c 、 K_n 、 K_t 、 n_1 、 δ 、 R_f 依次取为20.0、 1.0×10^8 、4800、0.56、36.6°、0.74.计算共分14级加载,前10级模拟坝体施工过程,第10级为竣工期,后4级模拟蓄水过程,第14级为蓄水期(设计水位情况).

计算结果表明,与普通混凝土面板堆石坝相比,掺入胶凝材料后,坝体在竣工期和蓄水期的最大沉降量和最大水平位移有明显减小,坝体的第1和第3主应力变化不大,总体应力较小,坝体的应力水平明显减小.结合文献7对胶凝材料进行的试验,坝料的弹性模量、抗压强度和抗剪强度随着胶凝含量的增加而增加,胶凝面板堆石坝与普通混凝土堆石坝相比,在强度、刚度和抗剪稳定性方面有足够的安全可靠性.

数值计算与离心试验结果的比较见表3.离心试验模型坝体一次成型,为一次加载,但实际坝体填筑和蓄水均分级进行,故数值计算按分级加载是符合实际的.总体结果比较可见,试验和计算结果规律基本一致.由表3可见,离心模型试验得到的普通混凝土面板堆石

坝最大沉降量比数值计算结果大,这一方面是因为试验无法模拟分级加载,另一方面是模型太小,振动碾压困难,模型坝体的密实度不够,加上离心模型试验测出的数据要乘以200的放大系数,可使微小的误差放大.而含有胶凝剂的坝体由于胶凝剂的黏结作用而使坝体有更高的强度和密实度,对应2种情况下不同胶凝含量的坝体在进行数值计算和离心试验时得到的结果比较接近.

离心模型试验面板挠度是根据试验采集的数据算出弯矩值,再由弯矩反推出来的.由于数据采集和中间计算存在误差,试验结果与数值计算结果有所出入,但总体规律基本一致.

表3 离心模型试验与数值计算结果的比较

Table 3 Comparison of the results between the centrifugal model experiment and numerical calculation

方法	模型	工况	坝顶沉降/ cm	坝体最大 沉降/cm	面板最大 挠度/cm
离心模型 试验	无胶凝剂	竣工期	42.00	42.00	-1.60
		蓄水期	48.00	48.00	4.90
	3%胶凝含量	竣工期	12.20	12.20	-1.00
		蓄水期	12.80	12.80	4.00
	5%胶凝含量	竣工期	8.60	8.60	-0.60
		蓄水期	9.20	9.20	3.50
数值计算	无胶凝剂	竣工期	3.17	22.20	0.37
		蓄水期	4.46	23.80	12.60
	3%胶凝含量	竣工期	1.32	10.90	0.08
		蓄水期	1.55	11.40	6.56
	5%胶凝含量	竣工期	1.07	8.90	0.07
		蓄水期	1.19	9.20	5.59

3 结 论

- a. 随着坝体材料中胶凝剂含量的增加 ,坝体在竣工期和蓄水期的沉降量明显减小 ,面板的最大挠度也相应减小 ,从而改善了面板的受力和面板缝、周边缝的工作条件 ,可保证防渗体系的正常工作 .
- b. 比较 3 组不同胶凝含量的离心模型试验结果 ,胶凝含量的增加 ,提高了坝体的抗剪强度和承载力 ,设计时可明显放陡坝坡 ,较大缩小坝体断面 ,较大幅度节省了筑坝堆石料 ,并能保证大坝在应力变形和稳定方面的安全可靠 .
- c. 离心试验得到的竣工期和蓄水期的坝体应力、位移和面板挠曲线与数值计算得出的结果规律基本一致 .由于离心试验的条件限制 ,不便模拟坝体的分级填筑 ,故在数值上尚有所差别 .试验研究和数值分析结果可为该坝型的设计提供参考 .

参考文献 :

[1] 南京水利科学研究所土工所 .土工试验技术手册[K].北京 :人民交通出版社 ,2003 .
[2] 罗谊深 .成屏混凝土面板堆石坝的监测、运行和维护[J].大坝与安全 ,2003(6) :26-29 .
[3] 谢晓华 ,李国英 .成屏混凝土面板堆石坝应力变形分析[J].岩土工程学报 ,2001 ,23(2) :243-246 .
[4] 李国英 .覆盖层上面板堆石坝防渗墙和面板应力变形的离心模型模拟技术[J].江苏力学 ,1995(10) :47-52 .
[5] 钱家欢 ,殷宗泽 .土工原理与计算[M].2 版 .北京 :中国水利水电出版社 ,1996 .
[6] 王德信 .水利水电工程大型通用程序集(一) [M].南京 :河海大学出版社 ,1999 .
[7] 唐新军 ,陆述远 .胶结堆石料的力学性能初探[J].武汉水利电力大学学报 ,1997 ,30(6) :15-18 .
[8] 孙明权 ,彭成山 ,陈建华 ,等 .超贫胶结材料坝非线性分析[J].水利水电科技进展 ,2007 ,27(4) :42-45 .
[9] 蔡新 ,施金 ,郭兴文 ,等 .胶凝面板堆石坝优化设计[J].水利水电科技进展 ,2008 ,28(1) :43-45 ,65 .
[10] 陆希 .公伯峡水电站面板堆石坝应力应变计算[J].西北水电 ,2005(1) :34-38 .

Research on centrifugal model experiment for
concrete-faced cemented-rockfill dam

CAI Xin^{1,2} , WU Ying-li³ , LI Guo-ying²

(1. College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210024 , China ;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In order to understand the work behavior of a concrete-faced cemented-rockfill dam in completion and water storage periods , the stress and deformation of the dam with different contents of cement were studied using a centrifugal model experiment , and the experimental results were compared with those of the nonlinear finite element method . The results show that the dam settlement and slab deflection in the completion and water storage periods obviously decrease with the increase of cement content , so the stress conditions of the concrete face ensuring that the impervious system works smoothly are improved . The shear strength and bearing capacity of the dam increase with cement content , so the dam slope can be designed to be steeper , reducing the size of the dam section and economizing the building materials . The stress and displacement of the dam and the normal displacement of the concrete face in the completion and water storage periods obtained by the centrifugal model experiment are in good agreement with those of the numerical model . These results can provide a useful reference for designing concrete-faced cemented-rockfill dams .

Key words : concrete-faced cemented-rockfill dam ; centrifugal model experiment ; numerical analysis