

高拱坝坝肩稳定三维地质力学模型破坏试验研究

杨庚鑫, 吕文龙, 张林, 陈媛, 唐玥

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

摘要: 拱坝作为一种安全性及经济性均较优的坝型, 在世界各地都得到了广泛的采用。然而拱坝对地形地质条件的要求较其它任何坝型都高, 坝肩的稳定与否, 将直接关系到工程的正常运行和安全性。所以拱坝坝肩稳定是拱坝设计中需要重点关注的问题。锦屏一级水电站坝址具备修建高拱坝的优越地形条件, 但地质构造较复杂, 坝肩抗力体内部存在断层、层间挤压带、煌斑岩脉 X 及深部裂缝等不良地质构造, 直接影响到拱坝坝肩的整体稳定安全性, 需要开展坝肩稳定深入研究。本文采用强度储备与超载相结合的三维地质力学模型综合法试验对锦屏一级拱坝坝肩的地形、地质条件进行模拟, 研究拱坝坝肩的稳定性。通过破坏试验得出了坝体与坝肩变形及分布特征、坝肩破坏形态和破坏机理, 确定了坝肩综合试验法稳定安全度, 并针对坝肩薄弱环节提出了加固处理措施建议。

关键词: 水工结构; 坝肩稳定; 综合法试验; 高拱坝; 安全度

中图分类号: TV32

文献标识码: A

Study on the abutment stability of high arch dams by failure test on a three-dimensional geomechanical model

YANG Gengxin, LV Wenlong, ZHANG Lin, CHEN Yuan, TANG Yue

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065)

Abstract: As a type of safe and economical dam, arch dam is widely constructed in the world, but its requirements on topographic and geological conditions are stricter than any of the other dams. Abutment stability of an arch dam is a fatal factor to the project's operation performances and safety, and it often becomes one of the most concerns at the dam design stage. At the dam site of Jinping-I hydropower where the topographic conditions are relatively better, the geological structures are extremely complex and many unfavorable structures have been found in the abutment resisting rock foundation, such as faults, crushed bedding zones, X lamprophyre dikes and deep cracks. This paper presents an experimental study of the stability of Jinping-I's abutment by using a three-dimensional geomechanical model that was designed by the similarity of topographic and geological conditions. Through a comprehensive failure test combining the strength reserving and overloading techniques, the features of deformation distribution, failure pattern and failure mechanism of the dam body and the dam abutment were obtained, and a comprehensive safety factor was determined. Reinforcing measures of the abutment's weak regions are suggested.

Key words: hydraulic structure; abutment stability of arch dam; geomechanical model test; high arch dam; safety factor

0 前言

拱坝以其安全性和较优的经济性在世界各地得到了广泛的采用, 然而拱坝对地形地质条件的要求较其它任何坝型都高, 其中坝肩的稳定与否, 将直接关系到工程的安全建设和正常运行^[1, 2], 为了保证工程的顺利建成和

收稿日期: 2010-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号 50879050), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226802)

作者简介: 杨庚鑫(1986-), 男, 在读硕士研究生. E-mail: 36151431@qq.com

安全运行,必须解决好坝肩的整体稳定性和安全性。

地质力学模型试验是解决上述问题的重要方法之一^[3,4]。地质力学模型出现在上个世纪 60 年代中期,意大利贝加莫结构模型试验所成功的进行了多项地质力学模型试验^[5]。如英古里双曲拱坝,坝高 271.5 米,采用了地质力学模型试验,以确定拱坝坝肩的破坏形态,并查明其潜在的破坏机理,这个试验为设计的完善和工程的加固处理提出了可靠的论证。上个世纪 70 年代以后,地质力学模型得到了推广应用,扩大了结构模型试验研究的领域。由于计算力学的发展,地质力学模型试验的重点就放在了解决一些重大和复杂的问题,承担起了更为艰巨的任务。我国在上个世纪 70 年代中后期也开展了这方面的研究工作,四川大学在地质力学模型试验研究方面,从模型材料着手^[6,7],经过多年的不断探索,研制出了新型模型材料——变温相似材料,从而在一个模型上实现了强度储备与超载的相结合的综合法试验。

本文采用三维地质力学模型综合法试验对锦屏一级拱坝坝肩的地形、地质条件进行模拟,研究拱坝坝肩的稳定性。通过破坏试验得出了坝体与坝肩变形及分布特征、坝肩破坏形态和破坏机理,确定了坝肩综合试验法稳定安全度,并针对坝肩薄弱环节提出了加固处理措施与建议。

1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内,是雅砻江干流上的重要梯级电站。锦屏一级拱坝为混凝土双曲拱坝,拱坝坝高 305 m,库容 77.6 亿 m^3 ,总装机 3300 MW。坝址区两岸谷坡为近千米的高陡边坡,基岩裸露,岩壁耸立,为典型的深切“V”型河谷。坝区岩石以中上三叠统杂谷脑组二段大理岩为主,岩层总体倾向左岸,产状 $N15^\circ \sim 80^\circ E/NW \angle 15^\circ \sim 45^\circ$ 。两岸岩体除 1900 m 高程以上的砂板岩局部有强风化外,其余部位均未出现。此外尚有各类岩脉穿插于大理岩中,尤以煌斑岩脉较多。其中影响左坝肩及抗力体稳定的主要因素有:断层 f_5 、 f_8 、 f_2 、 F_1 及煌斑岩脉 X、 $T_{2-3Z}^{(6)}$ 大理岩层中层间挤压带、深部裂缝 SL15 及其周围的松弛破碎岩体和顺坡向节理裂隙等。影响右坝肩稳定的主要因素包括:断层 f_{13} 、 f_{14} 、 $T_{2-3Z}^{(4)}$ 含大理岩中的绿片岩透镜体夹层、近 SN 向的陡倾裂隙等。坝址区地质结构详见图 1。

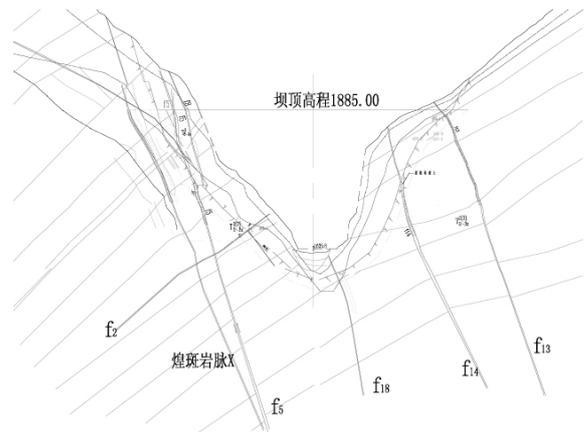


图 1 锦屏一级拱坝坝轴线地质剖面图
Fig. 1 Geological profile along the dam axis of Jinping-I arch dam

2 模型设计

锦屏一级拱坝坝肩三维地质力学模型综合法试验以超载法为主、强度储备法为辅,先进行强度储备试验,后超载至坝肩破坏失稳为止。各类断层 f_i 、煌斑岩脉 X、绿片岩透镜体及层间挤压带是影响左右坝肩稳定的重要控制因数,因此考虑对主要断层、煌斑岩脉 X 的抗剪断强度进行适当降低。

根据坝址区河谷的地形特点、坝基及坝肩主要地质构造特性、拱坝枢纽布置特点及试验任务要求等多种因素综合分析,确定模型几何比 $C_L = 300$,模型尺寸为 $4 m \times 4 m \times 2.83 m$ (纵向 \times 横向 \times 高度),相当于原型工程 $1200 m \times 1200 m \times 850 m$ 范围。本次试验重点模拟对坝肩稳定起控制性作用的主要断层、煌斑岩脉、层间挤压带、绿片岩透镜体以及左坝肩深度裂缝。根据原型材料力学参数和地质力学模型试验相似条件,计算得到模型主要结构面、各类岩体的力学参数,分别见表 1 和表 2。

荷载组合考虑自重 + 水压力 + 淤沙压力 + 温升。原型岩体和坝体自重由模型材料容重相似来实现。上游水平荷载按照上游水、沙荷载分布形式分层分块,并选用小吨位液压千斤顶加荷。因为模型试验难以准确模拟温度场,故温度荷载按当量荷载近似模拟^[8]。

本次试验的量测内容主要包括表面位移与内部位移两部分。表面位移测点量测坝肩及抗力体和坝体下游面典型高程拱冠及拱端的表面位移;内部位移测点量测左右坝肩内的各种断层 f_i 、煌斑岩脉 X、层间挤压带、深部裂缝及破碎带和绿片岩透镜体等沿结构面的内部相对位移。在模型中,左右坝肩及抗力体表面共布置 63 个表面位移测点,重点布置在断层及煌斑岩脉 X 在坝肩表面的出露位置,监测其出露处的表面错动情况;在坝体下游面五个典型高程上布置了 13 个外部位移测点,监测坝体变位及分布情况;在各断层、煌斑岩脉等软弱结构面上共布置

100个内部相对位移测点,监测软弱结构面的相对位移。

表1 模型结构面主要力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of structure planes of the model

编号	产状	宽度/cm	E_m /MPa	泊桑比	抗剪强度	
					f'_m	C'_m /kPa
f_3	N37°E/SE∠75°	大理岩中 0.33 沙板岩中 2.0	13.3	0.38	0.34	0.06
f_2	N37°E/SE∠56°	0.17	13.3	0.38	0.34	0.06
F_1	N65°E/SE∠75°	2.00	13.3	0.38	0.34	0.06
层间挤压带 g		0.10	13.3	0.38	0.34	0.06
f_{13}	N55°E/SE∠70°	0.20	26.7	0.38	0.34	0.06
f_{14}	N52°E/SE∠66°	0.17	16.7	0.38	0.34	0.06

表2 模型岩体材料主要力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of rock mass of the model

岩级	抗剪断强度		变模 E_m /MPa		泊桑比	
	f'_m	C'_m /kPa	平行于结构面	垂直于结构面		
II	1.34	6.67	89.7	85.0	0.28	
III	III ₁	1.10	5.00	47.8	29.2	0.25
	III ₂	0.95	3.33	24	16.8	0.28
IV	IV ₁	0.73	2.17	/	10.0	0.3
	IV ₂	0.60	1.33	/	6.0	0.3
V	V ₁	0.34	0.06	2.0	1.3	0.3
	V ₂	0.53	0.80	/	0.67	0.3

3 模型材料

原型坝体混凝土材料容重为 24kN/m³,变形模量 E_p 为 24GPa,由相似关系 $C_r = 1, C_E = 300$,可得模型坝体材料容重为 24kN/m³, E_m 为 80MPa。根据坝体材料试验结果,锦屏一级拱坝模型采用重晶石粉为加重料,少量石膏粉为胶结剂,水为稀释剂,并掺适量的添加剂,按一定配合比浇制而成。通过大量材料试验,研制出容重与原型相等,力学参数相似的坝体模型材料。

各类岩体也以重晶石粉为加重料,高标号机油为胶结剂,可溶性高分子材料为掺合料,并掺入一定量的添加剂等,根据不同岩类配制出不同配合比的混合料,再用 Y32-50 型四柱式压力机压制不同尺寸的块体备用。块体尺寸主要有 10cm×10cm×5cm,10cm×10cm×7cm,5cm×5cm×5cm,块体尺寸根据地质结构特征确定。

各类断层 f_i 、 $T_{2-32}^{(6)}$ 层及挤压带材料,经试验后选取以重晶石粉、机油及可溶性高分子材料等,按不同配合比制成软弱结构面特制材料,同时在制模时配置电升温系统,形成变温相似材料。在试验中通过温度的升高,软化高分子材料,使得软弱结构面强度降低,从而达到降强试验的目的。试验前通过材料试验获得变温相似材料抗剪断强度 τ_m 与温度 T 的变化关系曲线,如图 2 所示。该图表示材料的强度随温度的升高而降低,试验中可根据此关系曲线由温度确定结构的降强幅度。

4 试验成果及分析

试验步骤:首先对模型进行预压,然后加载至一倍正常荷载,在此基础上进行强度储备试验即升温降低坝肩岩体断层 f_5 、 f_2 、 f_{13} 、 f_{14} 、煌斑岩脉 X 的抗剪断强度。升温过程为四级,由 T_1 升至 T_4 ,最高温度升至 50°,此时相应抗剪断强度降低了 30%左右。在保持温度为 T_4 的情况下,再进行超载阶段的试验,对水荷载进行超载,直至坝肩破坏失稳为止。

通过试验获得以下主要试验成果:两岸坝肩及抗力体表面

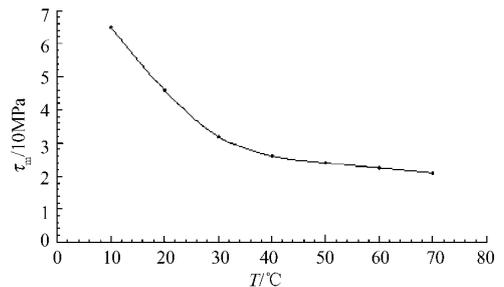


图2 典型断层 f_i 及挤压带 $\tau_m \sim T$ 关系曲线

Fig. 2 $\tau_m \sim T$ curve of a typical fault f_i and its compression zone

位移 δ_p 与超载系数 K_p 关系曲线(见图 3、图 4);坝肩、坝基各构造带内部相对位移 $\Delta\delta$ 与超载系数 K_p 关系曲线(见图 5);两岸坝肩最终的破坏形态(见图 6、图 7)。

4.1 坝肩及抗力体表面位移分布

两岸顺河向变位总体呈向下游变位趋势,局部向上游变位。对比两岸顺河向变位,左岸变位大于右岸变位,从变位分布规律看,右岸中上部变位较大,而左岸上部变位较大。当 $K_p = 4.0$ 时,左岸上部 1830 ~ 1885m 高程顺河向变位明显增大;右岸上部 1770 ~ 1885m 高程顺河向变位明显增大。两岸坝肩横河向变位总体上向河谷变形,个别测点向山里变形。两岸坝肩及抗力体 1830 高程表面位移 δ_p 与超载系数 K_p 关系曲线如图 3、图 4 所示。

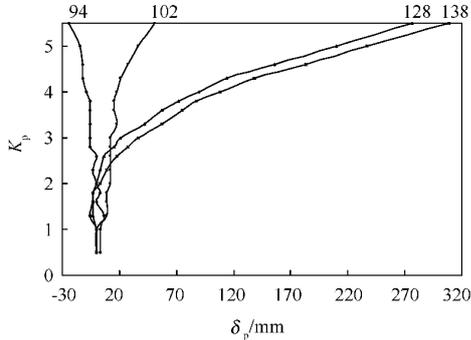


图 3 左岸顺河向典型测点 $\delta_p - K_p$ 关系曲线

Fig. 3 $\delta_p - K_p$ curve at typical measuring points on the left bank

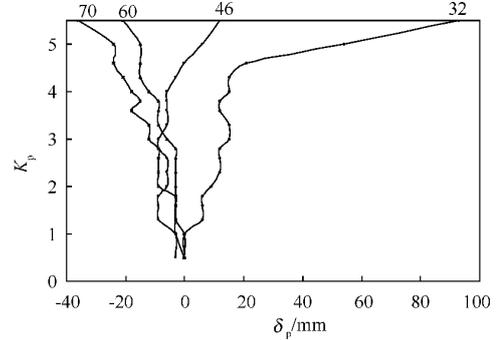


图 4 右岸顺河向典型测点 $\delta_p - K_p$ 关系曲线

Fig. 4 $\delta_p - K_p$ curve at typical measuring points on the right bank

4.2 坝肩断层及岩脉相对变位及分布特征

两坝肩相对位移 $\Delta\delta$ 近拱端大,远拱端小,总体位移呈沿各构造带走向发生变位的趋势。左坝肩受 f_5 、 f_2 断层、煌斑岩脉的影响及坝肩加固措施的作用 $\Delta\delta$ 中部较大,上部次之,表明其坝肩加固措施效果较为明显,层间挤压带 g 、 F_1 断层、深部裂缝 SL15 的 $\Delta\delta$ 较小。右坝肩抗力体变位主要受 f_{13} 、 f_{14} 断层及绿片岩透镜体控制,各构造带呈中上部 $\Delta\delta$ 大于下部 $\Delta\delta$,并随高程降低而递减的规律。总体而言,左岸 $\Delta\delta$ 大于右岸 $\Delta\delta$,左岸以 f_5 断层 $\Delta\delta$ 较大, f_2 断层及煌斑岩脉次之;右岸中上部 f_{14} 、 f_{13} 断层及绿片岩透镜体 $\Delta\delta$ 变幅相当。

在超载和降强两个试验阶段中,超载 $\Delta\delta$ 大于变温强降 $\Delta\delta$ 。两坝肩在 $K_p = 0.5 \sim 1.0$ 的加载阶段,各构造带及软弱岩体的 $\Delta\delta$ 增量较小,并伴随小幅调整;在强降阶段,左岸 f_5 、 f_2 断层、煌斑岩脉 X、右岸 f_{14} 、 f_{13} 断层 $\Delta\delta$ 变化较为敏感, $\Delta\delta$ 增幅相对初始加载阶段有所加大,但其 $\Delta\delta$ 量值较小,且无陡增现象,坝肩工作正常。超载阶段 $K_p \leq 2.0$ 时, $\Delta\delta$ 较小; $K_p = 2.6 \sim 2.8$ 时,左坝肩 f_5 、 f_2 断层、煌斑岩脉 X 及右坝肩 f_{14} 、 f_{13} 断层、绿片岩透镜体上的个别测点 $\Delta\delta$ 增幅有所加大,少数测点 $\Delta\delta$ 增加较为明显; $K_p \geq 3.6 \sim 3.8$ 以后,左坝肩 f_5 、 f_2 断层、煌斑岩脉 X 及右坝肩 f_{14} 、 f_{13} 断层、绿片岩透镜体上大部分测点 $\Delta\delta$ 曲线出现拐点或位移陡增现象,表明其相应位置构造带已有破坏迹象。 f_5 断层 1875 高程相对位移 $\Delta\delta - K_p$ 关系曲线见图 5。

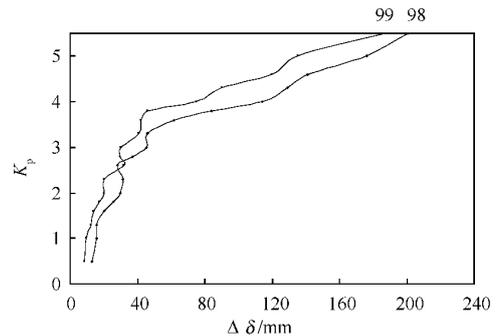


图 5 f_5 断层 1875 高程各测点相对位移 $\Delta\delta - K_p$ 关系曲线

Fig. 5 $\Delta\delta - K_p$ curve of fault f_5 at El. 1875m

4.3 破坏形态及特征

左坝肩破坏形态及特性:断层 f_5 自拱端沿结构面向下游延伸约 330m;断层 f_5 外侧的煌斑岩脉 X 外从 1885m 高程开裂至 1710m 高程;拱端顶部岩体开裂至 1960m 高程,拱端上游裂缝明显并延至坝底;中下部断层 f_2 、层间挤压带 g 及 1650m ~ 1750m 高程拱端附近岩体破坏严重。左坝肩及抗力体破坏严重,主要是受左岸复杂的地质构造条件影响。

右坝肩破坏形态及特性:顺河向断层 f_{13} 从拱端顶部开裂至 1940m 高程,裂缝长度约 150m, f_{14} 从拱端下游面开裂延伸扩展长度约 135m,下游拱端从底部 1670m 到 1885m 高程破坏严重,出现多条裂缝,裂缝走向与 SN 向陡倾节理近乎一致,尤其是绿片岩透镜体出露部分的陡岩上有多条沿层面的裂缝并与 SN 向裂隙连通,形成向下游

的剪切滑移破坏趋势。由此看出右岸断层 f_{13} 、 f_{14} 、SN 向陡倾节理及绿片岩透镜体对坝肩稳定影响程度大。两岸坝肩最终破坏形态见图 6、图 7。

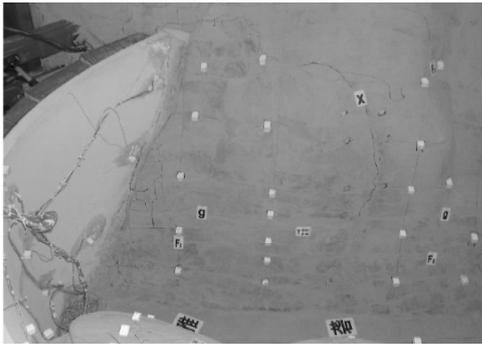


图 6 左岸坝肩破坏形态

Fig. 6 Failure pattern of the left bank abutment

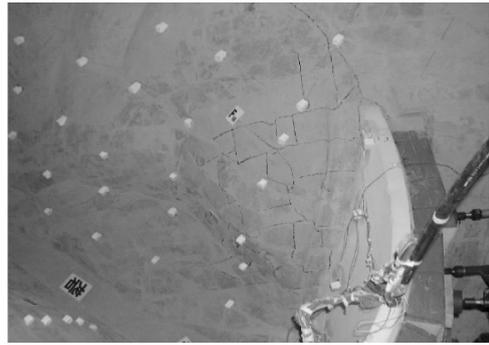


图 7 右岸坝肩破坏形态

Fig. 7 Failure pattern of the right bank abutment

4.4 综合稳定安全度

坝肩综合稳定安全度的评价方法,主要根据不同试验阶段所得的 5 个方面资料综合评定:坝肩典型高程及两岸坝肩各测点的表面位移发展过程曲线,岩体内软弱夹层相对位移发展过程曲线,坝面典型部位应变发展过程曲线,坝肩及抗力体的破坏过程和破坏形态的观测记录以及模型材料试验过程中所得的各型变温相似材料的标定曲线。由上述 5 个方面综合分析得出强度储备系数 K_1 为 1.3,超载系数 K_2 为 3.6~3.8,然后由下式计算综合稳定安全度 K_c :

$$K_c = K_1 \times K_2$$

式中 K_1 为强度储备系数; K_2 为超载系数。综合稳定安全度 $K_c = 4.68 \sim 4.94$ 。

5 结论

(1) 本文采用强度储备与超载相结合的综合法试验对锦屏一级高拱坝坝肩的整体稳定性进行研究,由试验成果综合分析得出,坝肩的强度储备系数 $K_1 = 1.3$,超载系数 $K_2 = 3.6 \sim 3.8$,坝肩综合稳定安全系数 $K_c = K_1 K_2 = 4.68 \sim 4.94$ 。

(2) 坝肩及抗力体部位的表面位移 δ_p 总体分布规律是:左岸位移大于右岸位移,中上部位移大于下部位移,总体上,顺河向位移向下游变位,横河向位移向河谷变位。

(3) 两坝肩及抗力体内部各断层 f_i 、煌斑岩脉 X、挤压带 g、深部裂隙 SL 及绿片岩透镜体对坝肩的影响程度不一。左坝肩断层 f_5 、临河侧煌斑岩脉 X、断层 f_2 以及右坝肩 f_{13} 、 f_{14} 断层、绿片岩透镜体、SN 向陡倾节理对坝肩稳定性影响较大。

(4) 根据试验显示的破坏形态和破坏区域,两岸坝肩及抗力体破坏严重,需要对破坏严重区域做进一步的处理。建议在左坝肩 1830~1885m 高程、右坝肩 1770~1885m 高程进行锚索加固处理,并设置排水洞加强排水措施,以增强两岸坝肩及抗力体的整体稳定性。

参考文献:

- [1] 潘家铮,何璟. 中国大坝 50 年 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
PAN Jiazheng, HE Jing. Large Dams in China—A fifty Year Review [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2000. (in Chinese)
- [2] FUMAGALLI E. 静力学与地力学模型 [M]. 蒋彭年译. 北京:水利电力出版社,1979.
FUMAGALLI E. Statical and geomechanical models [M]. Translated by JIANG Pengnian. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1979. (in Chinese)
- [3] 陈兴华. 脆性材料结构模型试验 [M]. 北京:水利电力出版社,1984.
CHEN Xinghua. The structural model test of brittle materials [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984. (in Chinese)

(下转至第 101 页)

2 结语

水工大坝混凝土在施工和运行期间,除承受结构自重、水压力等外部荷载,还要承受由于混凝土本身体积变化而引起的荷载,如温度、收缩、碱骨料反应、钢筋锈蚀、化学侵蚀等,因此如何选择性能优良的混凝土原材料配制体积稳定性高的水工大坝混凝土是值得水电工程技术人员深思的重要问题。

目前,对混凝土原材料影响水工大坝混凝土体积稳定性的重点都放在胶凝材料、外加剂品种的选择以及胶凝材料与外加剂的配伍上,而忽略了占水工大坝混凝土体积 80% 的骨料性能对大坝混凝土体积稳定性的影响。当受客观实际条件限制,水工大坝混凝土难以选取耐久、坚固、线膨胀系数低、骨料孔隙小、吸水率小理想的骨料时,可以选用稳定性较高的非活性骨料作为细骨料,采用组合骨料方案,从而提高水工大坝混凝土的体积稳定性。

参考文献:

- [1] Mindess S , Young J F , Darwin D. Concrete [M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall , 2002.
- [2] 姚武. 基于体积稳定性的混凝土综合抗裂模型[J]. 同济大学学报 2007 , (5) : 649 ~ 653.
YAO Wu. Comprehensive crack-Resistance model of concrete based upon volume stability [J]. Journal of Tongji University , 2007 , (5) : 649 ~ 653.
- [3] 李光伟、周麒雯. 锦屏一级水电站大坝混凝土的碱骨料反应[A]. 水工大坝混凝土材料和温度控制研究与进展[C]. 北京:中国水利水电出版社, 2009: 68 ~ 74.
LI Guangwei , ZHOU Qiwen. Alkali-reactivity of dam concrete of Jinping first stage hydropower station [A]. Hydraulic Dam Concrete Materials and the Temperature Control Research and Development [C]. Beijing: China Waterpower Press. 2009: 68 ~ 74.
- [4] 汪澜. 水泥混凝土组成、性能、应用[M]. 北京:中国建材工业出版社 2005: 469 ~ 470.
WANG Lan. Composing , properties and application of cement concrete [M]. Beijing. China Building Material Industry Publishing House , 2005.

(上接第 86 页)

- [4] 张林 陈建叶. 水工大坝与地基模型试验及工程应用[M]. 成都:四川大学出版社, 2009.
ZHANG Lin , CHEN Jianye. Model test of hydrolic dam and application in engineering [M]. Chengdu: Sichuan University Press , 2009. (in Chinese)
- [5] E. Fumagalli. Statical and Geomechanical Models [M]. New York , Springer ~ Verlag/Wien , 1973.
- [6] LIU Xiaoqiang , ZHANG Lin , CHEN Jianye , et al. Geomechanical model test study on stability of concrete arch dam [A]. In: Martin Wieland , Qingwen Ren & John S. Y. Tan , ed. In: Proc. Proceedings of The 4th International Conference on Dam Engineering [C]. London: A. A. Balkema Publishers , 2004. 557 ~ 562.
- [7] 张林 , 刘小强 , 陈建叶 , 等. 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 Xiaoqiang , CHEN Jianye. et al. The geomechanical model test on stability of arch dam under abutment complex geological conditions [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science) , 2004 , 36(6) : 1 ~ 5. (in Chinese)
- [8] 黄文熙. 温度应力的当量荷载法在拱坝模型试验中的应用[M]. 水利学报. 1963(3) : 59 ~ 61.
HUANG Wenxi. Application of Analogical Loads in temperature stress to arch dam model test [M]. Chinese Journal Of Hydrlicic Engineering , 1963(3) : 59 ~ 61. (in Chinese)