

水工结构研究 与工程应用

HYDRAULIC STRUCTURE STUDY
AND ITS APPLICATIONS
IN ENGINEERING

韩世浩 主编

华中理工大学出版社

内容简介

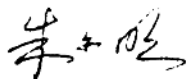
本书是一部反映我国水工结构最新研究成果的著作。内容主要涉及三峡、南水北调等大型水利工程的溢流坝、电站厂房、船闸、升船机、渡槽和隧洞等各种典型水工建筑物的静、动力数值分析和模型试验研究成果以及设计思想和方法。

本书可供水电、交通等专业的科研和设计人员,以及高等院校有关专业的师生参考。

序

《水工结构研究与工程应用》是一本值得一读的好书,它总结了我国包括三峡、南水北调等大型水利工程的部分水工结构新近研究的成果.书中的研究对象有水利枢纽中的溢流坝、电站厂房、大型船闸、升船机、冲沙闸,也有大型渡槽、软基上用盾构法施工的大型隧洞等结构问题.研究的方法有数学模型,包括二维和三维有限元计算方法、线弹性和非线性问题、静力分析和动力分析等多种计算程序的应用成果;有物理模型试验研究,包括脆性模型、光弹模型、离心模型、动力模型,还有较为新兴的地质力学模型等.本书另一个令人注目的特点是,一些设计工程师论述了在设计工作中如何成功地应用这些科研成果,做出了很好的设计.我曾多年从事水利工程设计工作,作为设计工程师,深深体会到水工结构是水利工程设计中极为重要的学科.设计者根据水利枢纽所担负的任务,从水力学、河流泥沙、地基基础、结构力学、建筑材料、机电、环境等诸多学科进行综合研究,而最终集中体现在水工建筑物结构中,可以说水工结构是水利工程设计中诸多学科中的中枢、纽带.建国以来,我国在各大、小河流上兴建了数以千计的大、中型水利工程.这些工程中有各种各样的结构形式,也出现了各种各样的结构问题,尤其是多目标综合利用的大型水利工程,其结构更为复杂,需要研究解决的结构问题也更多.水利工作者就是在研究解决一个一个的问题中,将水工结构学科的理论、研究方法和设计水平不断提高.实践表明,科研人员须充分了解设计思想和设计方法,了解设计中需要进行研究问题的关键,科研成果才能符合实际,才有实用价值.另一方面设计工程师也应了解科研工作的思路和方法,了解其全过程,才能正确地选择应用好科研成果.本书作者中也许有些是并不知名的科研人员、设计工程师,但由于二者的紧密结合,做出了象三峡等大型工程一流的设计,经验是十分可贵的.

最后,我衷心地希望本书的出版能对其它水利工程水工结构的科研、设计起到参考和借鉴作用,更希望将涌现出更多更好的水工结构的科研、设计成果,写出更多更好的书,从而不断提高我们的理论水平和应用水平,以推动我国水利水电事业的发展.



1996年10月

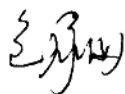
前 言

《水工结构研究与工程应用》一书汇集了为建设三峡、南水北调等工程重大水工建筑物而开展的主要研究成果,这是一个理论与实践紧密结合的产物,是水工结构学科在工程中运用和发展的又一结晶。论文的作者们为解决这些工程中存在的问题和技术难点,依靠以往水工建设的丰富经验和当代最新的科技成就,寻求解答上述难题的最佳途径和最优方案,以保证工程建设的可靠和合理,这是工程建设中必不可少的重要组成部分,没有这种针对性地工程研究,工程建设的成功是不可想象的。可以认为,工程研究是工程建设的先导和关键,它为工程建设出谋献策,开拓思路,提供论证,优化方案,是工程设计赖以成功的基础和科学依据。

工程科学的发展总是伴随着工程建设实践而进行的。工程建设,尤其是大型的、高难度的工程建设是工程科学发展最好的土壤和温床。这些工程在实施过程中必然会遇到许多技术难题,为解决这些难点必须引入新的理论、新的方法、新的材料和新的工艺,并针对工程特点创造性地加以运用,才能收到多快好省之效果。这一点对水工建筑物特别明显,因为每一座水工建筑物都有它特定的地质、水文、环境和各种建设条件,因此,每一座新的水工建筑物的建设,必然是水工结构理论的又一次发展和完善,这一点在本书中是充分体现了的。

三峡工程、南水北调工程、构皮滩高拱坝工程等都是我国重大的水工建设项目,在这些工程中包含了许多前人尚未很好解决,甚至还未遇到过的技术难题,其中也有许多水工结构方面的问题。长江科学院和长江水利委员会设计院的水工结构研究人员与武汉水利电力大学、华中理工大学、同济大学、华北水利水电学院、大连理工大学、武汉工业大学、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国科学院力学研究所、三峡开发总公司、湖北水利设计院、龙泉市水电局等同行一道,为上述大型水工建筑物的建设做了许多重要的、难度很大的研究工作,对工程建设做出了贡献,同时也为水工结构理论的发展做出了贡献,它们的辛勤劳动是值得称颂的。在这一研究过程中,长江科学院的研究人员向国内其他参与研究的同行,学到了许多好的经验和好的科研作风,他们的精湛技术和高超的学术水平为这些研究的顺利完成起了重要的作用,我们向他们表示深切的感谢。

长江科学院



1996年10月

目 录

地质力学模型在三峡工程中的应用.....	沈 泰	(1)
三峡泄洪坝段结构分析.....	韩世浩 马 迁	(12)
三峡左岸厂房 3 [#] 坝段弹塑性有限元分析.....	陈 进 黄 薇	(18)
三峡工程碾压混凝土的性能研究.....	杨华全 周守贤	(24)
三峡水利枢纽永久船闸衬砌式闸墙结构优化分析.....		
..... 童 迪 李仲康 钮新强 张传健		(31)
三峡水利枢纽永久船闸中隔墩输水廊道施工方案及结构优化研究.....		
..... 张海洪 张立龙 张传健 蒋筱民 李安斌		(40)
三峡水利枢纽永久船闸衬砌式闸墙墙后排水措施综合研究.....		
..... 胡 敏 赖跃强 朱庆福 李江鹰		(49)
三峡水利枢纽永久船闸衬砌式闸首结构非线性有限元分析.....		
..... 宋志忠 任继礼 钮新强		(54)
三峡 RCC 纵向围堰温度控制与实施结果.....	邓景龙 孙志禹 段亚辉 夏长征	(61)
三峡水利枢纽构筑物抗震研究.....	钱胜国	(66)
三峡垂直升船机整体结构抗震计算研究.....	吴杰芳 陈敏中 戴湘和	(71)
三峡电站水下结构及厂房动力数值分析.....	戴湘和 钱胜国	(77)
三峡垂直升船机结合式结构动力分析.....	陈敏中 王 晶	(84)
三峡水利枢纽临时船闸冲砂孔坝段动力分析.....	陈玲玲	(88)
水工补偿收缩混凝土用于三峡大坝泄洪坝段温度应力分析.....	肖汉江 张锡祥	(95)
三峡船闸闸室墙静力模型试验研究.....	刘 建 叶 柳	(102)
三峡升船机结构的风载响应分析.....	任晓崧 陈清军	(109)
长江三峡工程永久船闸高边坡三维有限元分析.....		
..... 丰定祥 郑 宏 邓建辉 葛修润		(115)
三峡工程二期围堰及防渗墙应力变形的弹塑性和非线性弹性有限元分析.....		
..... 徐纪林 薛以年 范 韬		(122)
简化模型下不同底部结构防渗墙的受力分析.....	燕 琳 李世海	(126)
巨型预应力 U 形薄壳渡槽结构优化设计.....	刘宪亮 刘东常 白新理	(132)
南水北调中线工程总干渠刁河渡槽结构选型初探.....		
..... 邢贵碧 许凌云 朱 曦 刘子慧 黄 炜		(137)
盾构法施工输水隧道衬砌设计研究.....	朱 曦 邢贵碧	(144)
南水北调中线总干渠漕河渡槽刚构拱桁架结构设计初探.....		
..... 邢贵碧 李遇春 朱 曦 牛桂林 孙尔超		(150)
南水北调中线刁河渡槽槽身结构湿模态特性及地震动力反应.....	李遇春 朱 曦	(156)

特大型梁式渡槽竖向地震动力反应分析.....	李遇春 朱 瞰	(163)
超大型预应力渡槽结构的计算模型与成果分析		
..... 朱以文 王长德 何英明 葛平一 王红旗 贺采旭 雷声昂 陈月明		(168)
牯牛河渡槽的温度应力计算		
..... 朱以文 王长德 何英明 王红旗 贺采旭 陈月明		(175)
超大型预应力混凝土渡槽设计		
..... 何英明 贺采旭 王长德 朱以文 王红旗 李树申		(181)
大型复杂空间结构——垂直升船机承重结构的光弹性分析		
..... 云大真 于万明 王喜闻 吕志久		(188)
离心结构模型实验在溢流坝工程研究中的应用		
..... 王 鹏 高大水 王 城 周晓雁		(192)
三峡船闸输水廊道正、反弧门振动试验研究	汪海潮 李治江 张晓平	(198)
碾压砼重力坝的渗流问题.....	邓景龙 段亚辉 孙志禹	(207)
碾压混凝土坝稳定分析的分项安全系数法.....	常晓林 赖国伟 陆述远	(210)
具有变温作用的弹塑性有限元法.....	赖国伟 常晓林 陆述远	(217)
岷江紫坪铺水库坝前左岸堆积体稳定性研究		
..... 吕大川 刘德富 王 城 张述琴		(224)
自动分析光弹性条纹图的新方法.....	何玉明 张标标 王 城 胡 飞 胡 鹏	(232)
关于混凝土坝抗震与减震研究的若干问题.....	楼梦麟	(238)
基于 Sarma 法的二维边坡可靠性分析.....	揭 敏 王 华 章建军 陈传尧	(242)
基于条分法的边坡抗滑稳定可靠性分析		
..... 章建军 王继华 揭 敏 陈传尧 高大水		(247)
碾压混凝土多轴抗剪试验研究及破坏准则.....	彭 军 宋玉普 赵国藩	(253)
构皮滩拱坝泄洪诱发坝体振动试验研究.....	余 岭 吴杰芳	(259)
弧形闸门框架支臂有效长度系数的理论推导.....	杜新喜	(264)
结构可靠度分析的贝叶斯方法.....	李正农 孟吉复 宋一乐 袁文阳	(269)
用于砼坝自诊断检测的 CFRC 的压敏性力学模型的研究		
..... 毛超群 陈品华 李卓球 沈大荣		(272)
坝基岩体排水孔幕的等效模拟.....	周创兵 熊文林 骆雨文	(277)
装配式重力坝的二维结构分析.....	刘川顺 朱以文	(283)
挡板式护岸边坡稳定离心模型试验研究.....	高大水 陈传尧 章建军	(287)
拱坝技术的发展与地质力学模型在坝肩抗滑稳定分析中的应用.....	赖跃强	(293)
用预处理共轭梯度法求解有限元方程组程序设计.....	林绍忠	(299)
用于离心模型试验的云纹采集与分析系统.....	王 城 何玉明	(304)

CONTENTS

The application of geomechanical model test on the Three Gorges project	Shen Tai	(1)
An analysis of overflow dam structure of three gorges project ...	Han Shihao, Ma Qian	(12)
Analysis of elastoplastic FEM on No. 3 dam section of the left power house for the Three Gorges project	Chen Jin, Huang Wei	(18)
Reserch on properties of rcc for the Three Gorges project		
.....	Yang Huaquan, Zhou Shouxian	(24)
Structural optimization of the concrete lining type chamber wall in the permanent shiplocks of the Three Gorges project		
.....	Tong Di, Li Zonglian, Niu Xinqiang, Zhang Chuanjian	(31)
Study on construction scheme and structural optimization for the middle wall filling tunnel in the permanent shiplocks of the Three Gorges project		
.....	Zhang Haihong, Zhang Lilong, Zhang Chuanjian, Jiang Xiaomin, Li Anbin	(40)
Study on the drainage system behind the lining type chamber wall of the permanent shiplocks in the Three Gorges project	Hu Min, Lai Yaoqiang, Zhu Qingfu, Li Jiangying	(49)
Nonlinear finite element analysis on the lining type gate bay structure of the permanent shiplocks in the Three Gorges project	Song Zhizhong, Ren Jili, Niu Xinqiang	(54)
Temperature control for the longitudinal RCC cofferdam of the Three Gorges projects and results implemented ...	Deng Jinglong, Sun Zhiyu, Duan Yahui, Xia Changzheng	(61)
Antiseismic reseach on the hydraulic structures of the Three Gorgec project		
.....	Qian Shengguo	(66)
Aseismic computational study on the whole structure of the Three Gorges shiplift		
.....	Wu Jiefeng, Chen Minzhong, Dai Xianghe	(71)
Dynamic numerical analysis of the underwater structure and plant of the Three Gorges power station	Dai Xianghe, Qian Shengguo	(77)
Dynamic analysis of combined shiplift structures of the Three Gorges project		
.....	Chen Minzhong, Wang Jing	(84)
Dynamic numerical analysis on sluicing sand section of temporary ship lock of the Three Gorges project	Chen Lingling	(88)
Temperature stress analysis on the hydraulic shrinkage-compensating concrete applied in the RCC spillway dam section of Three Gorges dam ...	Xiao Hanjiang, Zhang Xixiang	(95)
An experimental study on statical model for shiplocks' combinative wall of the Three Gorges		
.....	Liu Jian, Ye Liu	(102)
Response analysis of ship-lifting structures of the Three Gorges under wind load		
.....	Ren Xiaosong, Chen Qingjun	(109)

Three-dimensional FEM analysis for high slope of permanent lock of changjiang the Three Gorges project	Feng Dingxiang, Zheng Hong, Deng Jianhui, Ge Xiurun	(115)
Elastic-plastic and nonlinear elastic finite element analysis of stress-strain of second-stage cofferdam with concrete diaphragm walls of the Three Gorge project	Xu Jilin, Xue Yinian, Fan Tao	(122)
Mechanic analysis of antiseep wall with different root structure by means of simplified model	Yan Lin, Li Shihai	(126)
Optimum structure design to giant scale U-shaped thin shell aqueduct of prestressed concrete	Liu Xianliang, Liu Dongchang, Bai Xinli	(132)
Primary study on the structure selecting for the diao river aqueduct of the central line main canal in the project of water conveying from the south to the north	Xing Guibi, Xu Lingyun, Zhu Tun, Liu Zihui, Wuang Wei	(137)
Design research on the lining of conveying tunnels with shield-driven	Zhu Tun, Xing Guibi	(144)
Primary study on the structural design of stiff arched-truss for the chao river aqueduct of the central line main canal in the project of water conveying from the south to the north	Xing Guibi, Li Yuchun, Zhu Tun, Liu Guilin, Sun Erchao	(150)
The wet-mode characteristics and earthquake response of flume-body structures for the diaohe flume of swnd	Li Yuchun, Zhu Tun	(156)
The analysis of vertical earthquake response for the huge beam-type flume	Li Yuchun, Zhu Tun	(163)
The calculation model of super prestressed concrete aqueduct structure and analysis of its calculation results	Zhu Yiwen, Wang Changde, He Yingming, Qian Pingyi, Wang Hongqi, He Chaixu, Lei Shengang, Li Shushen, Chen Yueming	(168)
The thermal stress calculation of aqueduct on Mang Niu river	Zhu Yiwen, Wang Changde, He Yingming, Wang Hongqi, He Chaixue, Chen Yueming	(175)
The design of super prestressed concrete aqueduct	He Yingming, He Chaixue, Wang Changde, Zhu Yiwen, Wang Hongqi, Li Shushen	(181)
The photoelastic stress analysis for the weighted structure of large complex spatial structure—a vertical ship-lifting machine	Yun Dazhen, Yu Wanming, Wang Xiwen, Lu Zhongjiu	(188)
Application of the centrifugal structure model experiments in the engineering study of overflow dam	Wang Peng, Gao Dashui, Wang Cheng, Zhou Xiaoyan	(192)
Experimental study on vibration of the normal and reversed tainter valves of the transfer culvert of the Three Gorges project's shiplock	Wang Haichao, Li Zhijiang, Zhang Xiaoping	(198)
On percolation problem of roller compacted concrete gravity dam	Deng Jinglong, Duan Yahui, Sun Zhiyu	(207)
Component safety factor method for stability analysis of roller compacted concrete dams	Chang Xiaolin, Lai Guowei, Lu Shuyuan	(210)

Elasto-plastic FEM considering temperature effect	
..... Lai Guowei, Chang Xiaolin, Lu Shuyuan	(217)
Study on stability for soilmass at left-bank of the Zipingpu reservoir, the Minjiang river	
..... Lu Dachuan, Liu Defu, Wang Cheng, Zhang Shuqing	(224)
A new method used for automatically analyzing photoelastic fringes	
..... He Yuming, Zhang Biaobiao, Wang Cheng, Hu Fei, Hu Pong	(232)
Study on seismic resistance and mitigation of concrete dams	
..... Lou Menglin	(238)
Reliability analysis of two-dimensional slopes based on Sarma's method	
..... Jie Min, Wang Hua, Zhang Jianjun, Chen Chuanyao	(242)
Reliability analysis for stability against sliding of slope based on slice methods	
..... Zhang Jianjun, Wang Jihua, Jie Min, Chen Chuanyao, Gao Dashui	(247)
Multiaxial shear experimental study and failure criteria for roller compacted concrete ...	
..... Peng Jun, Song Yupu, Zhao Guofan	(253)
Experimental study on vibration of Goupitan arch dam due to flood releasing	
..... Yu Ling, Wu Jiefang	(259)
A theoretical solution for the column effective length of loads bearing frames of radical gate	
..... Du Xinxi	(264)
The Bayes method of structural reliability analysis	
..... Li Zhengnong, Meng Jifu, Song Yile, Yuan Wenyang	(269)
Study on the compressive sensibility and mechanical model of CFRC applied in self-diagnosis	
concrete dams	
..... Mao Qizhao, Chen Pinhua, Li Zhuoqiu, Shen Darong	(272)
Equivalent modelling of drainage curtain in dam rock foundation	
..... Zhou Chuangbing, Xiong Wenlin, Luo Yuwen	(277)
2-D structural analysis of prefabricated gravity dam	
..... Liu Chuanshun, Zhu Yiwen	(283)
An experimental study on the stability of bank slope by means of the centrifugal model	
..... Gao Dashui, Chen Qanyao, Zhang Jianjun	(287)
The develop ment of arch dam technology and application of the geomechanical model	
test on stability analyses of dam abntment	
..... Lai Yueqiang	(293)
Application of preconditioned conjugated gradient method to solving finite element equations	
and programme design	
..... Lin Shaozhong	(299)
A moire digitizing and analysing system used in centrifugal model tests	
..... Wang Cheng, He Yuming	(304)

地质力学模型在三峡工程中的应用

沈 泰

(长江科学院, 武汉, 430010)

摘 要 地质力学模型是一种主要用来研究基岩稳定的现代化的物理模型. 由于它能较真实地反应岩体尤其是结构面的各种力学性能, 能解决大范围三维非线性问题, 因此在国内外得到了广泛应用.

本文介绍了地质力学模型在三峡中的应用, 特别介绍了三峡左厂房坝段整体稳定研究. 该项研究利用大型三维地质力学模型, 模拟了区域内的主要断层和裂隙组, 精确地模拟了缓倾角裂隙组的面连通率和抗剪强度, 提供了在设计荷载及超载作用下大坝和基础的位移场、安全储备及超载破坏机理, 验证了大坝设计, 并为优化设计和基础处理方案的确定作出重要贡献.

关键词 地质力学, 模型, 结构, 基岩, 稳定

1 引言

地质力学模型是国际上 70 年代发展起来的一种较现代化的物理模型, 它主要用来研究基岩稳定问题. 由于它能较真实地模拟岩体的强度和本构关系、结构面的各种力学性能, 并能用模型材料本身的容重来模拟岩体和建筑物自重, 避免了外加自重引起的不应有的约束和误差, 可以研究在特定荷载作用下建筑物和基础的位移场, 也可以研究超载作用下的破坏机理和安全系数. 因此成为研究大坝基岩、地下洞室围岩稳定、岩石边坡稳定的理想手段. 70 年代以来计算机及计算方法迅速发展, 许多物理模型被数学计算取而代之, 而地质力学模型却正是在这一阶段发展起来的, 直至 90 年代的今天, 世界上还找不到一种较完善的研究大范围的三维非线性的计算方法可以取代地质力学模型的方法, 这也说明了地质力学模型的优势和生命力.

意大利模型与结构试验研究所 (ISMES) 的 Fumagalli 教授率先从事了这项研究, 并使 ISMES 始终保持了世界领先水平. ISMES 为依泰普工程作的地质力学模型研究, 全面分析了依泰普坝基的稳定, 对大坝基础处理和优化设计起到了指导作用, 成为地质力学模型的代表作.

我国从 70 年代末开始从事地质力学模型研究, 通过对葛洲坝、长潭、铜街子、二滩、龙羊峡等工程的研究, 从模型设计、模型材料研究、各种模拟技术直至制模工艺、加荷及量测技术等都已具备进行复杂的特大规模的地质力学模型研究的能力, 已全面达到国际先进水平.

三峡工程坝址基岩主要为元古代闪云斜长花岗岩, 岩质坚硬, 岩体完整, 但局部坝段缓倾角结构面较发育. 它们控制局部坝段的深层抗滑稳定, 故此曾做过多个平面和整体地质力学模型研究, 为设计提供了大量可贵的资料. 下面主要以左厂房整体地质力学模型为例说明这项技术在三峡工程中的应用.

该项试验研究是中国-意大利协议的一部分, 整个模型研究由长江科学院负责, 意大利 ISMES 为中方提供技术咨询和高精度的量测设备及压模设备, 配合这项研究, 同时还进行了

三维非线性有限元和典型坝段平面地质力学模型及平面有限元计算,对大坝的稳定变形进行了较系统深入的分析。

2 问题的提出

三峡左厂房坝基缓倾角裂隙相对较发育,特别是1号~5号机组和10号~13号机组为相对发育区(1)。该区又有规模较大的断层 F_{23} 、 F_7 通过。 F_7 斜穿坝基,在坝轴线处与4号机组相交,在坝趾处与11号机组相交,这些地质构造对大坝的稳定有多大的影响?尤其是缓倾角裂隙组在Ⅰ类岩区,发现随机组合的长大段(较长大的连通处)。这些长大段的不同组合组成了不同的可能滑移通道,对大坝的稳定会有不同程度的影响。1号机组到14号机组是从岸坡坝段逐步过渡到河床坝段,建基面高程相差甚远,如1号机组建基面高程为98 m,14号机组建基面高程为25 m,水头差达73 m,这必将会引起不均匀变形。不均匀变形到底有多大?会不会影响建筑物止水、坝顶建筑物或压力钢管的设计?

基坑的开挖在1号~5号坝段将形成沿坝轴线和顺水流两个方向的边坡,最大开挖深度达120 m左右。在地应力的作用及水压力的作用下,边坡能否维持稳定?

厂房压力钢管的设计现采用半背式,整体稳定性如何?坝和厂房间的相对位移有多少?压力钢管在此处要不要设伸缩节?

为了解决这些问题,特别是要了解各坝段在设计荷载下的位移场、超载作用下的安全度、破坏机理,找出薄弱环节,并为基础处理提供建议,决定采取大比例尺地质力学模型来研究。

3 模型设计

3.1 模拟范围及边界条件

本课题主要研究坝段为左厂房1号~14号及安Ⅲ坝段,共15个坝段,对大坝应力及稳定有影响的地质构造主要有 F_7 断层、 F_{23} 断层、缓倾角裂隙组及平行于 F_7 的陡倾角裂隙组。考虑到地应力及水压力的影响范围,模型不可能只模拟这15个坝段,必须扩大到一定范围,具体设计的边界如下:

右边界:由于缓倾角裂隙组是倾向下游偏左岸的,在水压力作用下,基础可能有沿缓倾角裂隙面向左的运动趋势,因此,在砌模时只是简单地将模拟岩体的砖块紧贴右边界反力钢架。根据意方的建议,切向并没有采取什么剪摩措施。

左边界:厂房坝段左端与山头相连,具有较大的地应力。由于地应力钻孔距离较远,计算所得的此处地应力值误差较大。为了减少对1号机组坝段模拟的误差,决定扩大模拟范围至临时船闸中心线,一是因为临时船闸距1号机组已有近300 m的距离,二是因为临时船闸在施工过程中较早开挖,闸室开挖后地应力释放较大,所以将左边界定在临时船闸中心线,而且也是将模型直接与反力钢架接触,不再另施加地应力。

上游边界:为了施加大坝上游面及帷幕前渗透水压力,按照地质力学模型试验的传统做法,上游边界只模拟到坝轴线上游75 m处。为了施加帷幕前渗透水压,按不同坝段不同高程,沿坝轴线上游30 m处将岩石垂直切开,便于安装加荷设备。

下游边界:由于要考虑 F_{23} 的影响,并充分研究水压对下游的影响范围,下游模拟得比较

远,一直模拟到坝趾下游 460 m,而且也是与反力钢架紧贴。

为了进一步扩大模拟范围,使所研究坝段的资料更加准确可靠,在下游边界及左边界各布置了 30 cm 宽较软弱带,其变形模量仅等于应模拟变形模量的 1/3,这样就相当于在不扩大模型槽的前提下,扩大了模拟范围。如图 1 所示,顺水流方向共模拟了 645 m。沿坝轴线方向,上游边界模拟了 841 m,下游边界模拟了 1 003 m,共模拟了左厂房 14 个机组坝段、第三安装间坝段、10 个非溢洪坝段及临时船闸(后改冲沙闸坝段)等 26 个坝段。

模型深度:模拟到 -100 m 高程。

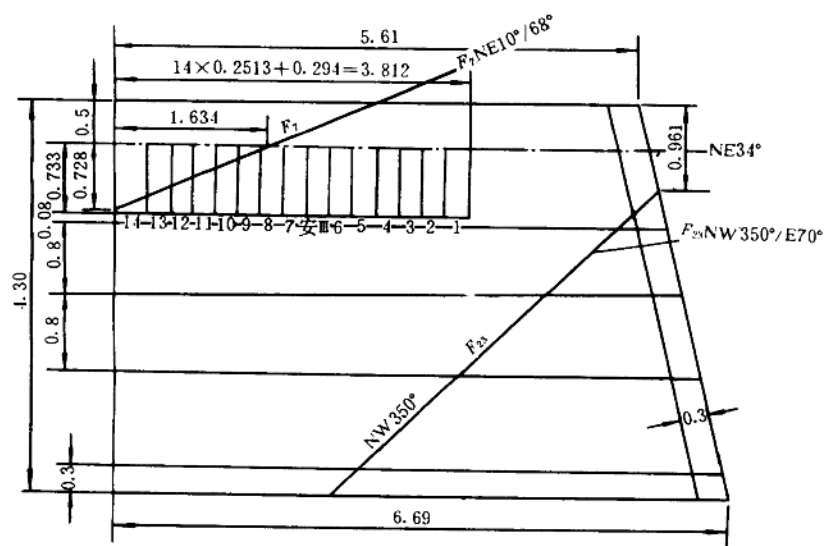


图 1 模型简图(单位:m)

3.2 对地质构造的模拟

模型中共模拟了两组裂隙组:缓倾角裂隙组(NE15°/SE22°)及平行于 F_1 的陡倾角裂隙组(NE10°/W68°),两组裂隙组成正交。

断层共模拟了两条: F_1 (NE10°/W68°)和 F_{23} (NW350°/E70°)。 F_1 、 F_{23} 都概化成直线,取 F_1 厚 10 m,综合变形模量 10 GPa。 F_{23} 核部厚 0.3 m,变形模量 0.8 GPa。影响带厚 18 m,变形模量 10 GPa。混凝土弹性模量 26 GPa,闪云斜长花岗岩变形模量 30 GPa。

缓倾角裂隙组分相对发育区和一般区(不发育区),1号~5号机组及10号~13号机组为发育区,其余为一般区。

相对发育区每 15 m 模拟一条,每条裂隙在坝的下面都模拟一段 30m×37.7m 的长大段。不同层面的长大段相互错开,长大段以外部分按 4%面连通率模拟,在整个坝体下面,1号、2号机组的缓倾角裂隙面连通率约占 50%,发育区的其他坝段约占 30%。

一般区(不发育区)的缓倾角裂隙组也是每 15 m 模拟一条,按面连通率 10%模拟,裂隙连通处模拟 $C=0$, $f=0.7$,不连通处模拟 $C=0.0015$ GPa, $f=1.0$ 。(C 为凝聚力; f 为摩擦系数)。

陡倾角裂隙组即平行于 F_1 断层的裂隙组也按 15 m 一条来模拟,连通率 50%,裂隙连

通处按 $C=0, f=0.8$ 模拟, 不连通处按 $C=0.0015 \text{ GPa}, f=1.0$ 模拟。

另一组平行于河床的裂隙组因不发育, 在模型中没有考虑。

对裂隙面连通率的模拟要求较高, 意方专家曾建议缓倾角裂隙面和陡倾角裂隙面都按全部连通考虑。这样做可以大大简化制模过程和对层面模拟材料的研究, 但方案太保守, 与三峡实际情况不符, 经过国内各方面专家讨论, 最后才决定按上述办法模拟, 这就给模拟技术提出了更高的要求, 要求真实地模拟裂隙不连通处的 C, f 值。

缓倾角裂隙相对发育区的长大段所处位置不同, 将会对该坝段的稳定产生不同影响, 特别是不同缓倾角结构层面的长大段可能组成不同的破坏通道。这是一个很有价值的研究课题, 在模型设计中是将这些长大段错开布置, 使它在同一层面或不同层面的任何方向都不会出现太大的连通率。同时详细记录下各坝段长大段实际所处位置, 供成果分析时考虑。

3.3 相似关系及模型材料研究

地质力学模型必须满足以下相似关系:

$$C_v = C_g/C_l, \quad C_\tau = 1$$

$$C_\sigma = C_g \cdot C_\epsilon = C_g, \quad C_p = C_g \cdot C_l^2$$

$$C_f = C_\mu = 1$$

其中 $C_v, C_g, C_l, C_\epsilon, C_\sigma, C_p, C_f, C_\mu$ 分别为容重、弹性模量、几何、应变、应力、集中力、摩擦系数和泊松比的相似比。

根据要模拟的范围、模型场地、加载能力、模拟精度及模型材料研究, 取 $C_l=150, C_g=150$, 按干容重设计, $C_v=1$ 。下游水位以下的岩体容重和坝体容重按浮容重模拟, 即岩体容重按 1.7 模拟, 混凝土容重按 1.4 模拟。下游水位以上的岩体容重按 2.7 模拟, 混凝土按 2.4 模拟。

本模型的材料性能研究主要分岩体、坝体、断层及粘结材料等四方面。与以前的地质力学模型材料相比, 主要特点是:

(1) 三峡坝基闪云斜长花岗岩的变形模量较高, 要求模型材料的变形模量也比常用的地质力学模型材料的变模要高。

(2) 裂隙不连通处要模拟岩体抗剪断的 C 值及 f 值。

(3) 模型规模大, 耗材料多, 所以要考虑材料的经济性。

我们研究材料的原则是:

(1) 要满足按相似关系要求模拟的各种力学性能指标, 尤其是关键指标必须符合要求。

(2) 材料的力学性能稳定, 受环境温度、湿度变化的影响小。

(3) 材料经济、成本低、来源容易。

(4) 对人体无毒, 对环境无污染。

(5) 加工工艺性能好。

在这些原则的指导下, 通过一系列的研究, 发现了一些新材料, 如用一定粘度的机油可以代替石腊油作粘结剂, 用立德粉代替氧化锌作加强剂, 效果差不多, 可以节约大量经费。

为了确保材料性能稳定, 整个模型材料没有用水, 全部是用油作粘结剂, 用压模成型的办法, 先将材料压成一定大小的砖块, 再砌成模型。

具体模拟的材料力学性能典型曲线如图 2.3 所示。

裂隙面抗剪性能的模拟是本项研究的关键之一, 为此进行了大量的试验, 找到了合适的模拟块体和粘结材料, 基本上同时满足了裂隙连通和不连通处的要求。

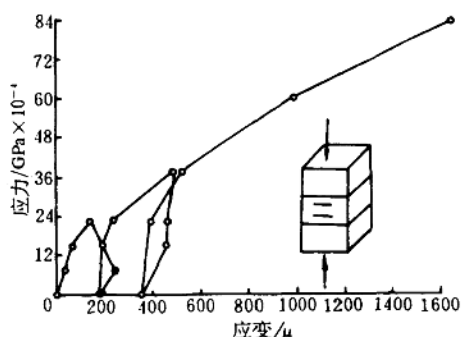


图2 模拟花岗岩材料的应力-应变曲线

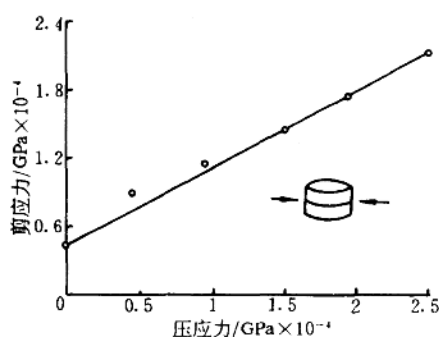


图3 模拟基础粘结材料抗剪强度曲线

3.4 加载系统

根据设计部门提出的要求考虑了以下几种荷载:自重、浮托力、坝的上游面水压力、泥砂压力及帷幕前渗透水压力。

自重是靠模型材料本身的容重来施加的。浮托力是将下游水位以下的岩体和混凝土的容重减去1来实现的。上游水压力、泥砂压力及帷幕前的渗透水压力是采用千斤顶施加的。考虑到岸坡坝段和河床坝段的不同及对厂房基坑的影响,不同坝段帷幕前渗透水压力施加到不同的高程,非溢流坝段加到50 m高程,1号~4号坝段加到10 m高程,5号、6号及安Ⅲ坝段加到-5 m高程,7号~14号坝段加到-60 m高程。

帷幕前渗透水压力大小的施加:设坝高为 h ,离建基面深 h 处的渗透水压力为 b , b 按一定大小折减,岸坡坝段 $b=0.6h$,河床坝段 $b=0.5h$;非溢流坝段,1号~安Ⅲ为岸坡坝段,7号~14号为河床坝段。当深度超过 h 时,超过部分按矩形图加压,即不再继续折减;不到 h 深时,还按原来的梯形加压。

坝前水压布置了56个千斤顶,帷幕前水压布置了37个千斤顶,共93个千斤顶,采用高精度、稳定性能好的液压加荷台供压,基本上可以达到同步加载,且加压稳定性好。

3.5 量测

量测技术是本项研究的另一个关键问题,也是我国地质力学模型技术与世界领先水平之间的主要差距所在。

这次引进了德国HBM公司生产的高精度电感式位移传感器及其转换箱,从根本上缩小了这种差距。这套系统的最大优点是量测稳定可靠、精度高,对测量环境要求低,如不发生特殊事故,可以几年率定一次。

对如此大的整体模型来讲,仅仅测量表面位移是远远不够的,在以前研究的基础上又研制了小型双向内部位移计,较好地解决了以前不够稳定的问题。位移计的设计采用悬臂等应力梁,双面贴片,半桥联接,由于有较好的防潮措施,有的安装好半年后才做试验,仍能正常运行。

测量架由建筑用脚手架组成独立系统,用地脚螺丝固定,并设计了灵活方便的专用夹具固定位移计。这比以前也有了相当大的改进。

地质力学模型研究的不是单一的某种状态,而是一种过程,即随着某一项或某几项荷载

的增加,建筑物和基岩逐渐变形,直至破坏的过程.这便要求量测系统不仅能测量某一状态下的数值,而且要有实时跟踪的能力.通过改革和开发原有 UCAM 机的功能,实现了实时跟踪,同时可以跟踪 6 个、12 个或更多的点.

外部位移计用来量测各坝段坝顶(上、下游面)、坝趾、厂房、护坦、断层表面的绝对位移.内部位移计用来测量沿缓倾角裂隙、陡倾角裂隙及断层的相对位移.整个模型共布置外部位移计 136 个,其中百分表 36 个,双向内部位移计 51 个.

由于位移计数量有限,不可能在每个坝段都布置大量的位移计,通过与设计部门商量,选择 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号、7 号、9 号、11 号为重点坝段,布置较多的位移计,其余为非重点坝段.

3.6 试验程序

本项目主要研究设计荷载和超载作用下大坝及基础的位移场和超载破坏机理.但因工程在施工期要用围堰挡水发电(上游水位 135 m),建成后运行期中,正常库水位是 175 m,汛期防洪库水位是 145 m,为了研究这种工况,试验程序作了如下安排(以 180 m 水位的荷载为 1.0).

- (1) $0 \rightarrow \nabla 135 \text{ m}$ (坝前+帷幕前) $\rightarrow 0$;
- (2) $0 \rightarrow \nabla 175 \text{ m}$ (坝前) $\rightarrow \nabla 175 \text{ m}$ (坝前+帷幕前) $\rightarrow 0$;
- (3) $0 \rightarrow 1.0$ (坝前) $\rightarrow 1.0$ (坝前+帷幕前) $\rightarrow 0$;
- (4) $0 \rightarrow 1.0$ (坝前+帷幕前) $\rightarrow \nabla 145 \text{ m}$ (帷幕前维持 1.0) $\rightarrow 1.0 \rightarrow 0.45 \rightarrow 1.0 \rightarrow 0.45 \rightarrow 1.0 \rightarrow 0.45 \rightarrow 1.0 \rightarrow 0.45 \rightarrow 1.0 \rightarrow 0.45 \rightarrow 1.0 \rightarrow 0.45 \rightarrow 1.0 \rightarrow 0$;
- (5) $0 \rightarrow 1.0$ (坝前) $\rightarrow 1.0$ (坝前+帷幕前) $\rightarrow 1.5$ (帷幕前维持 1.0) $\rightarrow 0$;
- (6) $0 \rightarrow 1.0$ (坝前+帷幕前) $\rightarrow 1.5$ (帷幕前维持 1.0,下同) $\rightarrow 2.0 \rightarrow 2.5 \rightarrow 2.8 \rightarrow 3.0 \rightarrow 3.2 \rightarrow 3.5 \rightarrow 3.8 \rightarrow 4.0 \rightarrow 4.2$.

超载试验只超坝前上游水压力,而且是用三角形超载法即增加上游水容重的办法.帷幕前的渗透水压则维持在设计荷载不变.

每一级加载或卸载都要做实时跟踪,等位移稳定后再进行下一步程序,这一点是非常重要的,特别是在荷载较高的情况下,有时一级荷载要等 2~3 个小时,甚至更长时间.

4 成果分析

本试验研究提供了施工期发电、运行期低水位(防洪限制)、正常蓄水位及超载作用下等不同工况左厂房各坝段的位移场.

4.1 施工期及运行期设计荷载作用下的位移状况

(1) 当自重位移完成后,在设计荷载的纯水压和泥沙压力作用下(包括帷幕前渗透水压),坝顶向下游位移,略有上抬,水平位移从岸坡至河床坝段逐渐加大,最小为 1 号坝段 15.1 mm,最大为 11 号坝段 48.8 mm,上抬量最大不超过 12.5 mm,坝趾的位移主要为沉陷,岸坡坝段沉陷不超过 1 mm,最大的沉陷在 11 号坝段,为 6.2 mm,坝趾几乎没有什么水平位移,只在河床坝段的 12 号、13 号有小量水平位移.河床坝段的位移大于岸坡坝段,其原因是河床坝段的水头高些,荷载大些,相应的帷幕前的渗透水压力也大些.

(2) 大坝运动期间水位从 145 m 到 175 m 的变化过程中,各坝段的坝顶都会产生一定的位移,最大水平位移不超过 26.5 mm,发生在 11 号坝段,相邻两坝段最大水平位移差为

4.3 mm.

(3) 从 0 到设计荷载变化过程中相邻两坝段最大垂直位移差为 4.1 mm, 最大水平位移差为 11.1 mm, 都发生在 9 号与 10 号坝段间.

(4) 坝基中缓倾角裂隙的产状是倾向下游偏左岸的, 但左岸山头抗力体较强, 形成一对矛盾, 究竟这一对矛盾谁是主要方面? 通过试验可看出, 在设计荷载下, 各坝段基本不产生向左或向右的位移, 在超载作用下, 某些坝段(主要是 1 号~7 号坝段)产生极小量的向右(向河床)运动的趋势.

4.2 超载作用下各坝段的安全度评价及破坏机理

(1) 当上游水压逐渐加大时, 坝顶、坝趾的位移也随之增大, 但 10 号~13 号坝段的增加速度明显大于其他坝段.

(2) 由于各坝段的水头和基岩的构造不同, 在超载作用下, 各坝段的破坏机理也是不一样的, 1 号坝段在 3.8 N 时沿第一条缓倾角裂隙产生剪切滑移. 2 号~5 号坝段在 3.5~3.8 N 时沿坝下第一条(4 号坝段沿第二条)缓倾角裂隙同时产生了张开和剪切滑移破坏, 以滑移为主. 从内部位移计及下游岩石坡面可以明显看到沿缓倾角裂隙面剪切破坏滑移的迹象. 6 号~8 号坝段超载至 4 N 时也未发现明显的破坏. 9 号坝段受 10 号坝段的影响, 在 3 N 以后沿第一条缓倾角裂隙产生了较大的相对位移. 10 号~14 号坝段在 2.5 N 以后便出现了较大的绝对位移, 荷载继续加大到 2.8~3.0 N 时沿第一条缓倾角裂隙产生了张开和滑移, 破坏是以张开为主.

(3) 从试验的全过程可以看出, 各坝段的建基面都有足够的安全储备, 大坝的超载破坏主要发生在基础的第一条和第二条缓倾角裂隙, 当缓倾角裂隙被拉开后, 建基面的拉应力得到了缓和.

(4) 纵观试验全过程, 所研究坝段中无论是坝顶位移还是基础的相对位移, 无论是发生的时间还是位移量都以 10 号、11 号、12 号坝段(特别是 11 号坝段)最为突出, 4 号、5 号坝段安全储备大于 10 号、11 号坝段, 设计荷载下的位移也远小于 10 号、11 号坝段. 1 号~3 号坝段的安全储备又比 4 号、5 号坝段高, 但还不如 6 号~8 号坝段.

究其原因, 把 11 号坝段与 4 号坝段相比, 两坝段都处在缓倾角裂隙相对发育区, 裂隙面都有长大段, 但坝高和 F_T 所在位置有很大差别. 4 号坝段 F_T 在坝踵附近, 11 号坝段 F_T 在坝趾附近, 这是造成 11 号坝段较差的主要原因. 4 号坝段建基面高程为 87.5 m, 坝高为 97.5 m, 帷幕前水压施加了 77.5 m, 11 号坝段建基面高程为 37.5 m, 坝高为 147.5 m, 帷幕前水压施加了 97.5 m. 而且超载时只超坝前水压力. 由此可见, 坝高相差 50 m 是造成 11 号坝段比 4 号坝段稳定性差的另一主要原因.

(5) 超载是一种相对概念, 可以在一定意义上研究建筑物及基础的安全度. 不同的模型、不同的研究方法一般都只能选定某一种或两种超载方法. 如有的是保持自重不变, 只超某一个特定的外荷载, 有的是将自重和其他荷载同时超. 作为大坝上游水压的超载办法, 一般有超水头和超容重两种. 数学模型则可以做到保持材料的弹性模量不变, 而降低材料的强度, 以研究设计荷载下结构物和基础的强度安全储备. 有的物理模型也在朝这方面努力. 根据国内外的经验, 通常地质力学模型都是采用加大水容重的超载方法, 而自重和渗透水压力保持不变, 本次试验就是采取这种超载方法. 因此在谈到安全度及破坏机理时, 必须考虑到这是在特定的超载方法前提下的结果, 否则有可能产生误解. 由于 11 号坝段的上游水压力相当于 4 号坝段的 2.4 倍, 因此对于抗剪能力相近的裂隙面来说, 11 号坝段的超载效应要

远大于4号坝段。

(6) 试验结果还说明,沿坝轴线方向的边坡在设计荷载及超载作用下并未发现失稳,而顺河流方向的边坡,1号~5号机组的坡面上在超载至3.5~3.8 N时都发现明显的沿缓倾角裂隙面的滑移。但在设计荷载作用下,顺河流方向的边坡还是稳定的。

(7) 为了研究上游水压(包括超载作用下)究竟对下游抗力体影响有多远,根据意大利专家的建议,模型研究的范围相当大。顺水流方向共模拟了645 m,其中坝轴线以上模拟了75 m,坝轴线以下模拟了570 m。坝趾下游120 m、132 m及252 m处共布置了3排测点,而且有的地方在地表20 m、-10 m几个高程都布了测点。试验结果表明,由于基础闪云斜长花岗岩比较坚硬,在左厂房地段, F_7 距坝趾较近, F_{23} 很远,其他结构性能较好,因此,即使在超载作用下,距坝趾下游132 m以远的地方并未发现明显的位移。

4.3 几种主要地质构造对稳定的影响

4.3.1 缓倾角裂隙对稳定的影响

如上所述,在超载作用下,各坝段的破坏都是沿着坝下第一条或第二条缓倾角裂隙面产生的。位移较大、安全储备较低的10号~13号、4号~5号坝段都处在缓倾角裂隙相对发育区。处在不育区6号~8号坝段的水头要比1号~5号坝段的高,但安全储备反而大,这些都说明缓倾角裂隙面对该坝段的稳定有着很重要的影响。

缓倾角裂隙长大段所在位置对稳定也有一定影响。将其他情况相近的某些坝段作比较,可以看出对于以剪切破坏为主的情况(1号、2号与3号相比),长大段在坝趾处比在坝踵处更危险。这是因为裂隙连通处的 f 值小于不连通处,而坝趾处正应力比较大,因此当 f 值较小的部分分布在坝趾时,缓倾面整体抗剪能力会降低。而对于以拉应力破坏(张开)为主的情况(10号与11号相比),则正好相反,超载时,拉应力是从坝踵附近开始发展的,若抗拉强度极低的缓倾角裂隙连通处分布在坝踵,则会明显降低大坝的安全度。

由此可见,不能对缓倾角裂隙长大段分布位置的优劣一概而论,首先要了解超载条件及在这种条件下的主要破坏模式,不同的模式可能出现不同的结论。

4.3.2 F_7 断层对稳定的影响

F_7 断层斜穿左厂房坝段。试验结果看出它也明显对该地区的稳定有影响。4号、5号坝段 F_7 出露在坝踵附近,坝踵区有拉应力, F_7 断层的抗拉强度较新鲜花岗岩低,因此对稳定不利。10号、11号坝段 F_7 出露在坝趾附近, F_7 断层又是陡角,且倾向上游,在坝趾附近断层法线方向压应力较大, F_7 的变形模量大大低于周围的新鲜花岗岩,因此有一定的压缩变形。在设计荷载作用下,11号坝段坝趾处 F_7 的压缩变形大约为5.7 mm(10号坝段为5.2 mm),这个压缩变形,会对坝体、岩体的应力和稳定造成一定的不利影响。试验证明: F_7 断层出露在坝趾比出露在坝踵对稳定的影响大些。

4.3.3 F_{23} 断层对稳定的影响

试验中对 F_{23} 布置了若干个断面,监视其对位移稳定的影响,结果说明, F_{23} 虽然本身性质较差,但因其左厂房区距离坝轴线较远,所以对大坝的稳定并无明显的影响。当然,冲砂闸坝段例外。根据模型的概化, F_{23} 距冲砂闸坝基非常近,冲砂闸水头不高,但 F_{23} 从其附近通过,对其稳定可能会有一定影响。本模型未将冲砂闸坝段作为研究坝段,而且也不满足边界条件的要求,建议以后对此坝段作专门的研究。

4.4 试验成果与有限元计算及平面地质力学模型成果的简单比较

在做三维物理模型研究的同时,还进行了与此模拟范围相同的三维非线性有限元分析