

高拱坝模型试验关键技术问题研究

丁泽霖 著



科学出版社

高拱坝模型试验关键技术 技术研究

丁泽霖 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍高拱坝模型试验关键技术的研究成果,针对地质力学模型试验中存在的模型材料及模拟技术方面、模型量测技术方面、试验成果分析方法等关键技术问题,结合工程中的特点和难点,展开高拱坝模拟研究。内容包括:概述、地质力学模型试验理论与方法、模型材料及模拟方法研究、拱坝坝肩稳定破坏机理试验研究、光纤光栅监测在模型试验中的应用研究、高拱坝坝肩典型块体抗滑稳定性分析。

本书适用于高拱坝设计、施工、运行管理人员阅读,并可供大专院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高拱坝模型试验关键技术问题研究 / 丁泽霖著. —北京: 科学出版社, 2016.10

ISBN 978-7-03-050206-3

I. ①高… II. ①丁… III. ①高坝-拱坝-水工模型试验-研究
IV. ①TV642.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第240812号

责任编辑: 耿建业 武 洲 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年10月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016年10月第一次印刷 印张: 8 1/4

字数: 207 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

拱坝是坝工建设中的一种主要坝型，它具有体积小、泄洪布置方便、潜在安全度高、抗震性能好等特点，在坝型选择中优先考虑拱坝坝型已成为坝工建设中的一个重要的发展趋势。然而，我国近期在建或拟建的高拱坝，大多位于西部地区河流上，其主要特点是山高谷深、河谷狭窄、地质条件复杂、地震烈度高等，同时工程规模大、电站装机容量大、水库库容大，拱坝坝肩的稳定问题十分突出，直接影响工程的安全性，因而需要深入开展复杂岩基上高拱坝坝肩稳定性研究，地质力学模型试验是解决上述问题的一种重要方法。

地质力学模型试验是根据一定的相似原理对拱坝与地基联合作用问题进行缩尺研究的一种破坏试验方法。试验的主要目的是研究大坝与地基的整体稳定安全度，了解拱坝及坝肩的变形失稳过程、破坏机理和破坏形态，揭示其影响坝肩稳定的薄弱部位，其试验结果给人以直观的感觉。但地质力学模型试验有许多关键技术难题，至今未得到完全满意的解决。例如，在模型材料相似模拟方面：高拱坝工程地质条件复杂，坝肩各类岩体往往存在着变形模量变化幅度大、不均匀性严重等特点，如立洲拱坝坝肩岩体变形模量从 2~12GPa 不等，这些岩体的不均匀性是影响坝肩变形的主要因素，同时，坝肩岩体中大多存在着断层、岩脉及各种软弱结构面，对坝肩稳定影响严重，因此在地质力学模型试验中，需要深入系统地开展模型相似材料研究，以适应对复杂地质条件更精细化模拟要求。在模型量测技术方面：光纤应变传感技术是一种新的测试手段，能否将其应用到地质力学模型试验中，需要开展探索性研究。在试验成果分析方面：针对坝肩岩体被断层、裂隙相互切割形成不同规模的典型块体情况，在研究拱坝整体稳定性的同时，还应分析典型滑块的稳定性等。

本书针对上述关键技术问题进行研究，首先总结国内外高拱坝工程的研究现状和研究方法，重点开展地质力学模型材料和试验技术研究，并将研究成果应用于木里河上的立洲拱坝工程，进行了立洲拱坝三维地质力学模型试验，分析复杂地质条件下拱坝及坝肩的稳定性和破坏失稳机理，验证模型试验成果的可靠性，为工程设计、施工和加固处理提供了重要科学依据。本书研究工作与工程实际需要紧密结合，通过开展深入而系统的研究，取得了以下创新性成果。

(1) 进行了模型岩体材料变形特性及结构面材料强度特性的相似模拟研究。针对坝肩岩体不均匀性严重，变形模量 E 变化幅度大的问题，需要研制出与之相适

应的模型材料,为此,开展了模型岩体材料中各组成成分对变形模量 E 的影响研究,试验结果表明,岩体材料组成成分中,水泥、石蜡和机油是控制高、中、低变形模量的主要因素,建立了各组成成分如水泥、石蜡和机油与变形模量 E 的变化关系曲线,这一研究成果适应了不均匀岩体对模型材料高、中、低变形模量的要求,提出了不同变形模量的岩体材料采用不同尺寸的模型小块体进行精细化模拟。针对各类结构面抗剪强度差异大的问题,提出了采用可溶性高分子软料夹不同塑料薄膜来模拟软弱结构面,通过改变薄膜材料与可溶性高分子软料的组合形式,满足结构面的摩擦系数,并通过控制软料中可溶性高分子材料的含量,以及调整薄膜材料的组合形式,可以实现模型结构面抗剪强度 $\tau'_m (f'_m, c'_m)$ 的综合控制。根据上述研究成果,研制了满足立洲拱坝坝体及坝肩岩体、断层和优势裂隙带等力学指标的模型相似材料。

(2) 开展了光纤光栅应变传感技术在高拱坝三维地质力学模型试验中的应用研究。研制了适用于地质力学模型试验的光纤光栅应变传感器,并以立洲拱坝三维地质力学模型为试验基础,在坝体上游建基面及顶拱圈周边铺设光纤光栅应变传感器,得到坝体超载过程中的光纤测点的应变分布情况,通过对比分析光纤传感器和传统监测方法对坝体和坝基的监测结果,表明两者在对应部位的监测结果基本一致,证明了光纤光栅应变传感器在三维地质力学模型试验应用中的可行性。

(3) 开展了典型滑移块体的失稳机理研究。针对高拱坝坝肩岩体被断层或裂隙相互切割形成不同规模的典型块体,在拱推力作用下可能沿着结构面产生滑移而失稳的情况,本书结合立洲工程,根据坝肩结构面产状及组合形态,对立洲拱坝坝肩潜在典型滑移失稳问题进行了初步分析,得到了四个典型块体及其潜在滑移模式,并在地质力学模型试验中对四个典型块体的滑裂面进行监测。由试验所得结果,分析了坝肩典型块体滑动机理及滑移模式,得到了四个典型块体抗滑稳定安全系数,总结了坝肩典型块体侧裂面及底滑面的非线性滑动失稳的相对变位临界值,论证了坝肩典型块体的稳定安全性。

(4) 进行了立洲拱坝三维地质力学模型试验研究。通过试验,得到了大坝及基础的变形及分布特性,获得了立洲拱坝超载法试验坝与地基整体稳定安全度:起裂超载安全系数 $K_1=1.4\sim 2.2$, 非线性变形超载安全系数 $K_2=3.4\sim 4.3$, 极限超载安全系数 $K_3=6.3\sim 6.6$ 。参考相关规范,安全系数均满足要求,说明拱坝坝肩是稳定的。

(5) 提出了立洲拱坝坝肩及坝基的超载破坏过程、破坏形态及破坏机理,分析坝体及基础的开裂情况。在超载条件下,两坝肩最终出现变形失稳破坏,且破坏形态不对称,具体表现在左坝肩比右坝肩严重,这是由于左坝肩软弱结构面相对集中对坝肩变形和稳定的影响较大所致。影响左坝肩稳定的主要结构面是 f_5 、 f_4 、

Lp285、L2、fj2、fj3、fj4，影响右坝肩稳定的主要结构面是 f4 及 Lp4-x、fj3、fj4。破坏区域主要出现在坝肩岩体中上，尤其是各结构面在出露处及附近岩体破坏严重，建议工程上对坝肩破坏严重部位进行适当加固处理。

本书部分内容是在笔者博士论文和近年来对大坝模型试验等研究成果的基础上凝练而成，相关资料的收集、整理得到了华北水利水电大学、四川大学等单位老师、同仁的大力支持与帮助。另外，部分理论也参考和借鉴了国内外相关论著、论文的观点。笔者在此表示感谢。本书的出版得到了水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心以及国家自然科学基金项目(51609087)、河南省高校科技创新团队支持计划(14IRTSTHN028)等项目的资助。

高拱坝模型试验研究涉及多因素影响且相对复杂，目前仍有许多问题有待解决，由于作者水平有限，不足之处恳请专家和读者不吝批评指正。

作 者

2016 年 9 月

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 高坝地基稳定研究方法	3
1.3 地质力学模型试验方法	5
1.3.1 模型材料及模拟技术概况	6
1.3.2 模型量测技术方法概述	7
1.3.3 模型试验成果分析方法概况	8
1.4 主要研究内容和成果	9
第2章 地质力学模型试验理论与方法	11
2.1 模型试验相似理论	11
2.1.1 相似理论	11
2.1.2 相似条件	13
2.2 地质力学模型试验相似关系	15
2.2.1 弹性阶段的相似关系	15
2.2.2 塑性阶段的相似关系	19
2.3 破坏试验方法	22
2.3.1 超载法	23
2.3.2 强度储备法	23
2.3.3 综合法	24
2.4 超载法安全度评价	25
2.4.1 基于相似原理和破坏试验理论的超载法安全系数关系式	25
2.4.2 超载法安全度评价方法	27
2.4.3 相关工程超载法试验安全度对比分析	27
2.5 典型高坝地质力学模型试验研究实例	28
2.5.1 沙牌水电站	28
2.5.2 瓦依昂拱坝	31
第3章 模型材料及模拟方法研究	35
3.1 地质力学模型材料选用原则	35
3.2 模型坝肩坝基岩体材料模拟研究	36

3.2.1	高性能岩体相似模拟	36
3.2.2	中等性能岩体相似模拟	37
3.2.3	低性能岩体相似模拟	38
3.3	模型结构面模拟研究	40
3.3.1	结构面模型材料研究	40
3.3.2	模型结构面几何特性与力学特性相似模拟	42
第4章	拱坝坝肩稳定破坏机理试验研究	44
4.1	工程概况及地形地质条件分析	44
4.1.1	工程概况	44
4.1.2	地形地貌	44
4.1.3	坝址区地质特点分析	45
4.2	坝肩(坝基)岩体及地质构造模拟研究	49
4.2.1	模型相似系数及模拟范围	49
4.2.2	坝肩岩体材料研究	50
4.2.3	坝肩结构面模拟研究	54
4.3	模型量测与加载布置	55
4.3.1	模型量测系统	55
4.3.2	模型试验方法及加载系统	62
4.4	试验成果及分析	64
4.4.1	坝体变位分布特征	64
4.4.2	坝体下游面典型高程应变分布特征	65
4.4.3	坝肩及抗力体表面变位分布特征	66
4.4.4	主要结构面相对变位分布特征	67
4.5	模型破坏过程及破坏形态	68
4.5.1	模型破坏过程	68
4.5.2	最终破坏形态及特征	70
4.6	拱坝与地基整体稳定安全度评价	72
第5章	光纤光栅监测在模型试验中应用研究	74
5.1	光纤传感器原理	74
5.2	光纤光栅传感器工作原理及发展现状	75
5.2.1	光纤光栅工作原理	75
5.2.2	应变传感器及发展应用	78
5.2.3	温度传感器及发展应用	79
5.2.4	压力传感器及发展应用	79
5.3	光纤光栅应变传感器在大坝模型试验中的监测研究	80
5.3.1	应变传感器封装及布置	80

5.3.2	光纤测试结果分析	81
5.3.3	测试结果对比分析	85
第 6 章	典型块体抗滑稳定性分析	87
6.1	坝肩稳定影响因素及块体滑移模式	87
6.2	立洲拱坝坝肩典型块体滑移模式分析	89
6.3	模型坝肩典型块体的滑动监测	93
6.4	模型坝肩典型块体稳定分析及破坏形态	94
6.4.1	左坝肩抗滑稳定分析及破坏形态	94
6.4.2	右坝肩抗滑稳定性分析及破坏形态	95
6.5	模型坝肩典型块体安全系数分析	96
6.6	滑裂面失稳判定区间	97
第 7 章	结论	99
第 8 章	附图及照片	101
8.1	坝体变位测试结果	101
8.2	坝体下游面应变	104
8.3	坝肩及抗力体表面变位	106
8.4	坝肩及抗力体内部相对变位	109
8.5	附照片	111
参考文献		117

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着我国国民经济的快速发展,能源问题已经成为制约我国经济发展的重要因素^[1]。西部大开发战略的深入,使得我国西部地区巨大的水电资源得到开发与利用,“清洁、可再生”的水电资源将成为我国实现经济腾飞和民族振兴的必然动力。西部地区作为国家重要的能源基地,相继兴建了一批高坝大电站,例如,锦屏一级拱坝(坝高 305m)、小湾拱坝(坝高 294.5m)、大岗山拱坝(坝高 210m)、白鹤滩拱坝(坝高 289m)等。这些高坝的主要特点是:坝高库大、拱坝承载强度大、工程地质条件相当复杂,如澜沧江上的小湾拱坝^[2],坝高 294.5m,枢纽区断裂构造较发育,存在有不同规模的断层、挤压带、蚀变岩带及节理裂隙等主要地质缺陷;又如雅砻江上的锦屏一级拱坝^[3],坝高 305m,坝址区位于变质岩地区,坝肩坝基发育有断层、层间挤压带、深部卸荷裂隙等各类结构面,这些复杂地质条件对拱坝稳定带来极为不利的影响。

拱坝是一种高次超静定空间壳体结构,以其混凝土体积小、施工快速、超载能力强等优点而得到了较广的应用和发展。拱坝在空间上是一种不甚规则的壳体结构^[4],它通过自身调节作用,将水荷载等外荷载以水平推力方式传至两岸坝肩岩体,坝体应力状态以受压为主,充分发挥混凝土抗压强度高的特点,同时,拱坝作为高次超静定的空间壳体结构,也具有相当强的承载能力。由于拱坝的荷载主要是通过拱的作用传递到两岸坝肩,所以坝肩岩体的稳定是影响高拱坝整体稳定的重要因素^[5],因此,需要开展高拱坝坝肩稳定分析,确保工程的安全运行。

由于高拱坝坝肩稳定分析的对象是被断层、节理等软弱结构面相互切割而成的非连续性、非均匀的天然岩体,其力学特性不像拱坝本身那样易于控制,具体来说坝肩坝基稳定问题研究受以下因素影响:①工程地质条件复杂,断层、夹层、蚀变带、节理裂隙等软弱结构发育,它们的产状、特性、形式、分布都具有不确定性,地基处理难度大;②坝高库大、工程规模宏大,作用于高坝的荷载除了水推力,还有坝体及岩体的自重、扬压力、岩体内的地应力、地震荷载、温度荷载、渗流场等,其中多种荷载属于不确定荷载,影响高坝稳定的荷载及荷载组合情况复杂;③坝肩岩体力学指标差异大,随机分布的结构面将岩石切割成为结构和力学参数均不连续的岩体,所以这种不连续岩体的特性往往是岩块和结构面的综合

特性,而且结构面的结构特征和力学特征越复杂,与岩块的力学差异越大,岩体表现出的多相不连续、非均匀、非弹性和各向异性现象就越突出;④软弱结构长期在库水的浸润(蚀)、渗透、溶蚀等作用下,易发生泥化、软化、湿化、流变等强度降低的力学效应的特点,因此高坝整体稳定问题突出。

以下是我国近期开发建设的部分高坝工程及影响坝肩稳定的主要地质构造特点。

(1) 坝基岩体不均匀性。

锦屏一级水电站是雅砻江干流上的重要梯级电站,混凝土双曲拱坝坝高 305m,装机容量 3600MW。

坝基基岩不均匀性十分严重,坝基岩体Ⅱ、Ⅲ1、Ⅲ2、Ⅳ1、Ⅳ2 级的变形模量从 2~30GPa 不等,导致在受力条件下变形分布不一致,影响坝肩及坝基稳定性。其中,影响右坝肩稳定的主要因素是:断层 f_{13} 、 f_{14} 、 $T_{2-3Z}^{2(4)}$ 含大理岩中的绿片岩透镜体夹层、近 SN 向的陡倾裂隙等。影响左坝肩稳定的主要因素是:断层 f_5 、 f_8 、 f_2 、 F_1 及煌斑岩脉 X 、 $T_{2-3Z}^{2(6)}$ 大理岩层间挤压带、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^[6]。

(2) 断夹层纵横交错。

小湾水电站是澜沧江干流第二个阶梯电站,总装机容量 420MW。混凝土抛物线变厚度双曲拱坝,最大坝高 294.5m^[7]。

小湾拱坝坝肩地质条件非常复杂,主要表现在以下几个方面:①断层和蚀变带纵横交错,Ⅱ级断层有 F7,Ⅲ级断层有 F5、F10、F11、F19 等 19 条,Ⅳ级小断层有 f_{11} 、 f_{10} 、 f_{14} 、 f_{17} 、 f_{19} 、 f_{12} ,此外两岸坝肩抗力体中还发育有 5 条蚀变岩带,其中右岸从西向东依次为 E5、E4、E1 和 E9,左岸 1 条,为 E8;②坝基坝肩开挖后出现浅层卸荷松弛现象,主要表现在沿已有裂隙错动、张开和扩展的现象、岩爆现象等;③多组不连续节理裂隙相互切割。V 级构造结构面的节理发育,按产状分为近 SN 向、近 EW 向和顺坡缓倾角,即“两陡一缓”三组节理组。结果导致不同类别岩体在三维空间上沿不同高程形成变倾角节理裂隙组。

(3) 层间错动带发育。

溪洛渡水电站是金沙江干流上的一个梯级电站,电站总装机容量 12600MW,混凝土双曲拱坝坝高 278m^[8]。

溪洛渡拱坝坝肩岩体由 12 层玄武岩岩流层组成,其中:在大坝 410m 高程以下,为 1~5 岩流层,具有单层厚度较薄,层间错动带断续分布,层内错动带较为发育的特点;在大坝 410~510m 高程内为第 6 岩流层,该层厚度大,约 70m 左右;在大坝 510~610m 高程内,为 7~12 岩流层,各岩流层具有单层厚度较薄、层间错动发育的特点。

以上这些都说明在研究坝肩可能的破坏机制时, 需要深入了解工程地质和水文地质情况, 选择恰当的稳定分析方法, 以便真实反映坝肩岩体的变形破坏机制。所以研究坝肩岩体稳定的实质, 就是研究具有复杂地质条件和多种力学特征的岩体在一定外在因素作用下的变形特征、破坏过程及破坏机理。

目前我国正在兴建的立洲拱坝最大坝高 132m, 是世界级高碾压砼高拱坝, 坝址区地形条件优越, 但地质条件较为复杂, 具体表现为以下几个方面。

(1) 岩体不均匀性严重: 坝址区岩体不均匀性十分严重, 各类岩体变形模量从 2~12GPa 不等, 导致在受力条件下变形分布不一致, 影响坝肩及坝基稳定性。

(2) 断层和长大裂隙纵横交错, 坝址区发育有 F_{10} 、 f_2 、 f_4 、 f_5 四条断层(其中 F_{10} 、 f_2 属 II 级结构面, f_4 、 f_5 属 IV 级结构面)、2 条长大裂隙(L1、L2 属 IV 级结构面)。

(3) 层间剪切带横切山谷, 开挖以后, 坝基面浅表部位岩体开挖变形破裂、卸荷松弛表现明显, 尤其是处在高应力区的低高程坝基。

(4) 坝肩多组不连续节理裂隙相互切割, 4 组近 EW 走向优势裂隙等主要的地质缺陷。

1.2 高坝地基稳定研究方法

在早期拱坝建设中, 人们往往只关注拱坝本身的受力状态, 而忽视了坝肩岩体对拱坝安全稳定性的影响, 直到 1959 年, 法国马尔帕赛拱坝溃坝, 人们才开始对拱坝整体稳定性分析评价有了新的认识^[9], 由重视坝体上部结构研究转向重视高拱坝整体稳定研究。据统计, 大约有 40% 的大坝失事是由于坝基地质缺陷或处理不当所致^[10]。因此, 高坝地基整体稳定问题逐渐成为国内外学者的热点研究问题, 高坝地基整体稳定分析及其他相关理论的研究也得到发展和运用。

坝肩岩体不均匀性、岩体中结构面的不连续性以及拱坝的空间超静定特点, 使得高坝地基整体稳定分析十分复杂, 寻找一种能够真实反映坝肩岩体的变形破坏机制的稳定分析方法, 准确地分析坝与地基整体稳定, 已经成为高拱坝坝肩稳定分析的重要课题^[11]。目前, 国内外研究人员提出了多种高坝地基稳定分析方法, 可以归纳为两大类: 一是数学计算分析法; 二是物理模型试验法, 包括结构模型试验以及地质力学模型试验。在地质力学模型试验领域进一步开展新型地质力学模型材料、新型量测设备以及模拟新技术等研究^[12], 进入了自动化、遥测和综合法试验阶段。

1. 有限元法^[13]

有限元法是把连续体离散成有限个单元,配合一定的强度破坏准则下分别计算每个单元中节点的应力及位移,分析连续体应力应变状态。随着计算机技术的发展,有限元法逐渐成为了工程数值仿真的重要方法。在高坝坝基稳定计算方面,由于有限单元法可以方便地模拟坝体、地基地质复杂构造和材料分区,能较清晰地模拟施工过程和加载顺序,可进行弹塑性、静动力分析,因此有限元法在高坝地基稳定分析中的应用越来越广泛^[14-23]。

针对坝肩节理岩体的研究,有限元法最早采用节点释放技术来模拟裂纹沿着单元边界的扩展。Belytschko 和 Black 等提出了扩展有限元(extended finite element method, XFEM)方法, XFEM 是近年来发展的一种可以用于模拟工程结构裂纹扩展的有限元模拟技术,该方法的特点在于不必划分非常细密网格就可以自动判断裂纹扩展方向和进行裂纹扩展,从而实现裂纹扩展的模拟计算^[24,25]。

2. 刚体弹簧元法

刚体弹簧元法(rigid body spring method, RFEM)的基本思想是将结构离散成刚性单元,各单元接触面间由弹簧系统连接,刚性单元不变形,结构的变形通过单元接触面弹簧系统变形能体现。结构内部弹塑性变形通过单元间相对变形来体现,结构内部应力则通过单元边界面的面力来体现,因此刚体弹簧元可方便求得任意给定的潜在滑裂面的抗滑稳定安全系数。该方法计算相对简洁,在坝与地基的抗滑稳定分析中可方便求得稳定安全系数^[28,29],因此,已作为一种新的数值计算方法^[26,27]在工程中应用。

3. 离散元法

离散元法最初用于模拟岩石边坡的渐进过程,该法采用牛顿定律得出不平衡力引起的速度和位移,可对不同岩块组成的岩体进行分析计算。它与其他数值方法不同的是,离散元将计算区划分成有限个独立的多边形块体单元,单元与单元之间通过接触点的耦合而互相连接在一起^[30,31]。

4. 边界元法

边界元法是与有限元法同步发展起来的又一种数值计算方法^[32-36]。该方法把均质区看成一个大单元,仅对单元边界进行离散化,区域内部不划分单元,场变量处处相等,边界元法把基本方程转化为边界积分方程,只对边界离散化建立相应的方程组进行求解。边界元法和有限元法在计算时各有缺点,为了发挥各自的优点,提高求解精度和效率,近年来提出了边界元-有限元耦合法,既充分发挥了边

界元的优势,同时又能利用有限元法的长处,在工程应用中取得了满意的结果^[37-41]。

5. 不连续变形分析法

石根华提出的不连续变形分析法(discontinuous deformation analysis, DDA)的研究对象是由节理切割而成的离散型块体系统,主要应用于分析裂隙岩体的安全稳定性^[42-44]。该方法将岩体按节理、裂隙、断层等构造面作为边界,离散成一个个完整的块体,块体运动符合牛顿定律,块体之间不能相互嵌入;根据最小势能原理建立的整体平衡方程组,求解每个块体的位移。它既可以求解静动力学问题,又可以计算岩体滑动和变形问题。因此,DDA广泛应用于水工结构及坝肩坝基变形稳定,以及采煤、挖矿等领域。

6. 物理模型试验方法^[45]

物理模型试验主要有:结构的线弹性应力模型试验、结构模型破坏试验、抗滑稳定模型试验、地质力学模型试验等四种。其中结构的线弹性应力模型试验主要是研究水工混凝土建筑物在正常或非破坏的工作条件下的结构性态,模型加荷限制在结构模型材料的弹性范围内;结构模型破坏试验是将荷载按一定荷载步继续增加,直至结构模型受荷破坏,丧失承载能力为止,其目的主要是研究结构本身的极限承载能力或安全度;抗滑稳定模型试验主要用于研究基岩中已知软弱结构面的问题;地质力学模型试验^[46-68]是通过在模型中全面模拟出岩体中的地质构造,较真实地体现出岩体的各向异性和非弹性等岩石力学特征,并以此研究结构的破坏机理和整体稳定性。

1.3 地质力学模型试验方法

20世纪60年代中期,意大利贝加莫结构模型试验研究所(Experimental Institute for Models and Structures, ISMES)成功地进行了多项地质力学模型试验,到了70年代,模型试验研究浪潮转移到了中国等亚洲国家,模型试验特别是结构模型破坏试验和地质力学模型试验得到了充分的发展和广泛的应用。近年来我国的模型试验得到快速发展,结合我国的水电工程实际开展了大量的研究,在模型材料、模拟技术和量测技术等方面都取得了长足的进展^[4]。

地质力学模型从弹塑性力学的观点出发,采用试验的手段,通过真实模拟岩体中断层、节理裂隙等软弱结构的结构特征,以及岩体的非均匀性、非弹性、非连续性及多裂隙的岩石力学特征,来研究坝与地基整体在外荷载特别是渐增荷载作用下,超出弹性范围以外的变形和破坏特性及其破坏失稳的整个变化过程,直观地揭示其破坏机理。目前在水电工程建设中,地质力学模型试验主要用来解决

以下工程问题^[69-74]。

(1) 坝与地基的相互作用及共同作用。通过地质力学模型试验可以得到大坝与基础的相互影响,观测大坝断裂与基础破坏的相互影响,特别是得到坝与地基连接薄弱地区的情况,为坝基加固措施提供参考。

(2) 地质构造对大坝稳定的影响。建在复杂地基上的大坝,地基中的复杂地质构造可能造成大坝变形过大、坝基出现失稳,对工程的安全稳定影响重大。通过地质力学模型,在模型中模拟断层、软弱夹层、破碎带、节理裂隙等地质构造,并在连续加荷或强度降低的状态下得到坝与地基的变形和破坏形态,从而分析坝肩坝基地质构造对工程安全的影响。

(3) 加固措施研究。通过地质力学模型破坏时获得的破坏机制、承载能力和安全系数,可以研究相应的加固措施,并通过试验比较几种不同措施的加固效果,为获得更有效的加固措施提出建议。

(4) 坝肩失稳破坏机理。地质力学模型试验为破坏试验,通过观测开裂破坏过程分析工程的破坏机理,从而作出相应的安全评价,为工程的加固处理提供科学依据。

随着高拱坝建设的不断发展,其坝肩岩体的多相不连续性、非均匀性、非弹性、各向异性等特点对坝肩稳定的影响越来越突出,这些问题也是地质力学模型试验所研究的重点,自研究者和工程师开发出并开始利用地质力学模型试验来解决实际工程问题以来,地质力学模型试验的试验理论和试验技术都得到了不断提高。目前地质力学模型试验的发展方向主要包括:模型材料及模拟技术、模型量测技术、试验结果处理方法等三个方面。

1.3.1 模型材料及模拟技术概况

正如前面所述,随着越来越多的高坝需要修建在具有复杂地质构造的岩基上,坝肩岩体力学指标差异大,岩体表现出的多相不连续、非均匀、非弹性和各向异性现象就越突出;断层、夹层、蚀变带、岩脉等软弱结构发育,它们的产状、特性、形式、分布都具有不确定性,在地质力学模型中,满足相似关系的模型材料是成功进行模型试验的关键,对于大型工程的研究,往往需要考虑建筑物及周围岩体在外荷载作用下,超过弹性范围直至破坏阶段的问题,所以在模型材料的选择上,已不同于传统的弹性模型试验,它需要考虑材料经过弹性、弹塑性阶段直至破坏的整个发展过程的相似问题。地质力学模型试验能否真实反映工程实际,除了岩石力学参数测试的准确性、选定概化模型的代表性,模型材料的力学性能也必须和原型材料的力学性能满足相似关系,尤其是对断层、软弱夹层和节理裂隙等软弱结构面的相似模拟至关重要。因此,研究满足相似关系的模型材料是地质力学模型试验最重要的内容之一,也是关系到模型试验是否取得成功的关键所

在。长期以来,国内外的科研机构在模型材料领域不断地探索和推陈出新,取得了一定的成果^[75-89],但是要在模型试验中找到完全满足相似关系的模型材料还是十分困难。

在模型材料的选取方面:我国在国外研究基础上,进一步丰富了地质力学模型材料的选用范围,模型材料的选择也经历了由最初的线弹性材料—常规的地质力学模型材料—新型地质力学模型材料的研究过程。目前,国内正在使用的地质力学模型试验相似材料主要有:武汉水利电力大学韩伯鲤等研制的 MIB (membraniferous iron powder) 材料,清华大学李钟奎等研制的 NIOS (natural iron ore sand) 材料,山东大学的王汉鹏等研制的铁晶砂胶结材料^[76,90,91]等,这些模型材料大多以机油、松香、酒精等有机材料类和石膏、水、水泥等无机材料为胶结剂,以铜粉、铁粉、铁精粉、膨润土、砂或硅藻土等为加重料,以甘油、松香、酒精、熟淀粉浆及石膏等为添加剂。

在结构面的模拟技术方面:对于摩擦系数的模拟,国外多采用清漆掺润滑脂及滑石粉等混合料涂于层面间,这种方法可获得较大幅度($f=0.1\sim 1.0$)的不同摩擦系数,但由于温度变化及喷涂工艺对它们的性能影响较大,成果离散度大,稳定性差;国内目前多采用不同光滑度的纸张来模拟结构面的摩擦系数,但由于纸张容易受潮影响使用效果,所以具有一定的局限性。

对于模型材料的模拟主要存在以下难点。

(1) 坝肩岩体材料性能的控制。岩体材料性能通常是指岩体自身的强度、变模等力学指标,目前兴建的主要水电工程,如溪洛渡、锦屏一级和小湾等高拱坝工程,地质条件十分复杂,坝肩稳定问题非常突出,地质力学模型试验是研究此类高拱坝坝肩稳定问题的一种重要方法。但这些工程普遍存在着坝肩坝基岩体的力学性能差异较大的问题,具体表现在强度和变模变化范围大,如小湾工程中的 I 类到 V 类岩体的变形模量由 25GPa 变化到 5GPa,因此如何准确模拟出满足相似关系的此类变模范围较大的岩体模型材料是地质力学模型试验的关键内容,也是关系到模型试验是否取得成功的关键问题。

(2) 对软弱夹层等软弱结构面的模拟。高拱坝工程地质条件复杂,坝肩地质构造中大多存在着断层、岩脉等各种软弱结构面,如立洲工程中坝肩断层和长大裂隙纵横交错,层间剪切带横切山谷,对坝肩稳定影响严重。因此在地质力学模型试验中,如何系统地模拟软弱结构面的几何特性及力学特性是试验技术上要解决的难题。

1.3.2 模型量测技术方法概述

模型量测技术是为了能够准确反映水工建筑结构及其坝肩坝基的受力状态、变形特征以及破坏机理而制定的合理方案和具体手段,通过模型试验获得各种参

量并将它们变为分析问题所依据的数据、图表或曲线。在试验中,量测的物理量通常包括应力(实际上是量测应变)、荷载、位移、裂缝等,需要采用尽量多的测量手段,并需要一次性采集到尽量多的数据,这样可以保证试验数据采集的完整性。

在地质力学模型试验中,一般所测量的数据主要包括位移和应变,位移是各种物理量中最容易量测准确的,是最主要的量测物理量,也是分析问题的最重要的依据,近年来模型试验中位移量测手段已向高精度、传感微型化、自动化及遥测等方向发展,如在表面变移的量测中,一般采用悬臂式测位仪测量坝体及坝基岩体的变位分布^[92];李仲奎和王爱民^[93]采用电阻式微型多点位移计,测量精度较高(可达0.01mm);在模型内部变位量测中,张林和胡成秋等研制的内部位移感应仪用于对坝肩软弱结构面相对位移的监测。

随着地质力学模型试验所研究工程的地质条件的越来越复杂,在模型数据分析上,以变位分析为主,应变量测作为辅助手段的量测方式已经不能满足试验要求。目前在模型试验中,最传统的测量模型坝体及坝肩内部应力应变的方法是将电阻应变片直接粘贴在模型的内外表面上,如王汉鹏等^[91]在模型量测中采用高速静态应变采集分析系统。但是,应变量测作为坝体及坝肩岩体应力分析的主要依据,量测方法较为单一,因此,应该基于模型应变量测新技术的探索研究需求,开发尽量多的应变测量手段,以保证试验数据的多样性及完整性。

光纤量测最重要的技术是光纤传感技术^[94]。光纤传感器技术是光纤通信技术的不断发展的产物,与传统的传感器相比,光纤传感器具有小巧、柔软、灵敏度高、抗电磁干扰等优点,因而得到广泛应用。在模型试验中,光纤传感监测也有所应用,如在裂缝监测中可以通过光纤网络布置的方式监测结构的随机裂缝以及捕捉结构的初裂等^[95]。因此,如何将光纤传感技术应用于应变量测中,验证光纤光栅传感器在三维地质力学模型试验应用中的可行性,开展适用于地质力学模型的光纤光栅应变传感器的探索研究,并通过光纤光栅应变量测结果与传统应变量测结果相互验证,还需要开展新型应变传感器的探索性研究。

1.3.3 模型试验成果分析方法概况

地质力学模型试验主要监测拱坝与坝肩坝基变形及失稳过程,通过试验结果反映拱坝与地基系统整体稳定性和安全性,而对于坝肩失稳破坏机理,以及与之相应的破坏演变过程和破坏特征研究甚少,因此需要对复杂地质构造条件下坝肩局部滑动失稳问题进行深入研究,在总体把握整个坝区岩体结构特征的基础上,深入发掘控制拱坝坝肩抗滑稳定性和坝基变形稳定性等主要工程地质问题。

目前地质力学模型试验中,模型试验成果分析主要集中于坝体变位及应变分