



复杂条件下 高碾压混凝土重力坝 设计理论与实践

洪永文 杜成斌 江守燕 著



科学出版社

复杂条件下高碾压混凝土重力坝 设计理论与实践

洪永文 杜成斌 江守燕 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共分六章,结合已建成的金安桥高碾压混凝土重力坝工程,丰富和发展了复杂条件下高碾压混凝土重力坝的设计理论,并在实际工程中进行了创新性实践。主要研究内容包括:大坝混凝土材料选择、基本力学特性及动力破坏机制研究;裂面绿泥石化岩体作为高混凝土坝坝基的适应性研究;强震区高碾压混凝土重力坝工程抗震措施方案;高碾压混凝土重力坝抗震分析理论模型、安全性评价;碾压混凝土重力坝抗震动力模型试验;碾压混凝土重力坝监测安全评价。

本书可供水利水电工程领域的工程技术人员和科研人员以及高等院校水利工程专业及其相关专业的研究生、高年级本科生及教师参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂条件下高碾压混凝土重力坝设计理论与实践/洪永文,杜成斌,江守燕著. —北京:科学出版社,2014.5

ISBN 978-7-03-040601-9

I. ①复… II. ①洪…②杜…③江… III. ①碾压土坝-混凝土坝-重力坝-设计 IV. ①TV642.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第095685号

责任编辑:伍宏发 曾佳佳/责任校对:朱光兰

责任印制:肖兴/封面设计:许瑞

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

安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年5月第一版 开本:B5(720×1000)

2014年5月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:290 000

定价:69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序 言

我国经过 30 多年对碾压混凝土坝的研究与实践,不断总结完善提高,在碾压混凝土筑坝技术方面,取得了令人瞩目的进展和成就,积累了宝贵的经验。目前已建成 100 多座碾压混凝土坝,20 世纪 80 年代主要是建设 70 m 以下的中低坝,90 年代至今已建成一大批百米级以上高碾压混凝土坝,其中龙滩及光照两座坝为 200 m 级高碾压混凝土坝。这些工程绝大部分分布在我国西部地区,工程场址处于新构造运动强烈、地质环境极不稳定的高山峡谷区,地震活动频繁,滑坡、崩塌及泥石流等地质灾害高发。金安桥水电站在这些水电工程中属工程规模大、建坝地质条件复杂、设计地震动峰值加速度高的典型工程。

金安桥水电站是云南金沙江中游河段“一库八级”水电规划的第五级电站,总库容 $9.13 \times 10^8 \text{ m}^3$,总装机容量 2400 MW,最大坝高 160 m。坝基岩性为玄武岩、杏仁状玄武岩夹火山角砾熔岩及凝灰岩。坝基工程地质条件复杂,在河床坝基出露的地层岩性中分布有绿泥石化岩体,厚度为 30~40 m,分布范围较广,其力学参数较低。坝址区地质构造发育,尤其河床坝基下伏的 t_{10} 凝灰岩夹层,对河床坝基抗滑稳定不利;左岸坝基分布有缓倾角绿帘石、石英脉错动面(EP),对左岸坝段的坝基抗滑稳定影响较大;大坝的设计地震动峰值加速度高达 $0.3995 g$ 。如此高的地震设防烈度加上坝基存在上述的不利地质问题,相应于 160 m 高碾压混凝土坝的抗震结构设计,已远远超出了工程经验能及的范围,尤其对坝体碾压混凝土层面的结合质量和大坝的基础处理等方面均相应有更高的要求。碾压混凝土坝作为一种新型坝型在近十多年发展迅速,但是在高碾压混凝土坝的防震抗震研究和抗震措施设计方面,国内外尚无工程实例可循。大坝抗震安全评价涉及的因素很多,由于水电站工程地震的不确定性以及人们对这些问题的认识深度不够,许多关键技术问题还很缺乏经验。如大坝混凝土材料动参数设计取值,可供参考的碾压混凝土坝抗震措施研究成果相对较少;在材料抗力、评价控制准则等方面还没有形成公认的统一标准;数值计算模型、地震输入模型、边界辐射阻尼的处理以及坝体分缝模拟等方面,不同研究者有不同做法,在进行具体抗震安全评价时很大程度上仍依靠研究人员和设计者的经验来判断。汶川特大地震后,大坝的抗震安全评价已引起科研人员和设计者的高度重视。为了使位于强震区的金安桥碾压混凝土重力坝的坝体及坝基能适应抗震要求,确保大坝的抗震安全,中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院分别在可行性研究阶段和招标施工图阶段,联合河海大学、成都理工大学、大连理工大学、清华大学、武汉大

学等几所高等院校分 15 个专题协同攻关,对金安桥高碾压混凝土坝抗震的关键技术问题和裂面绿泥石化岩体作为高碾压混凝土坝坝基的适应性问题展开了系统和深入的理论分析研究,同时也做了大量的科学试验研究,专题成果内容非常丰富。这些成果解决了位于强震区金安桥高碾压混凝土坝的基础处理和抗震设计的一些难题,不仅在碾压混凝土坝的抗震计算理论(模型)研究方面有所创新,而且在碾压混凝土坝的抗震设计和施工工艺方面也进行了创新性实践,取得了非常显著的社会效益和经济效益。科研成果具有理论研究价值和实用性,我们希望这些成果能对在建和拟建的类似碾压混凝土坝工程的基础处理、防震抗震措施研究及设计方面提供借鉴。因篇幅所限,我们不能把所有成果纳入本书,仅通过归纳整理,精选了部分具有重要创新的科研成果和设计经验在书中加以介绍。

本书主要内容:第 1 章大坝混凝土基本力学特性研究,介绍了大坝碾压混凝土的重度、强度及静、动弹性模量等设计参数取值研究成果,大坝混凝土的静、动力试验与动载下强度提高机制研究成果,基于 CT 图像的混凝土三维骨料重构技术。第 2 章裂面绿泥石化岩体作为高混凝土坝坝基的适应性研究,介绍了坝基裂面绿泥石化岩体的成因机制、工程特性、结构特征、岩体质量类别划分等研究成果,以及其对建坝影响和作为高坝坝基的适应性研究成果。第 3 章高碾压混凝土重力坝工程抗震措施方案,介绍了强震区碾压混凝土坝坝体分缝方案研究、坝体间断式横缝设置、坝体抗震钢筋设计与配置、大坝抗震监测设计。第 4 章高碾压混凝土重力坝抗震分析理论模型,介绍了新开发的能模拟横缝在地震荷载下张开、闭合以及滑移等非线性效应的动接触本构模型,整体式钢筋混凝土动力本构模型,反映无限地基辐射阻尼效应的三维黏弹性边界单元及外源波动输入研究成果,考虑碾压混凝土层面损伤的内聚力本构模型,坝体头部含有水平贯穿裂缝块体的地震破坏模式理论模型及有损坝体抗震加固效果。第 5 章碾压混凝土重力坝抗震动力模型试验,介绍了坝体混凝土的试验模拟仿真材料、等效弹性模量等试验模拟,在配筋区域局部增大仿真混凝土弹性模量来模拟配筋混凝土的新方法和碾压混凝土坝的抗震薄弱部位和可能破坏模式。第 6 章碾压混凝土重力坝监测安全评价,介绍了大坝监测成果分析及安全评价。

成都理工大学聂德新教授课题组在金安桥碾压混凝土坝坝基的绿泥石化岩体特征、形状方面开展了大量的现场实测、室内试验、数值计算、变形监测资料反馈分析等研究工作;大连理工大学林皋院士、周晶教授课题组对金安桥碾压混凝土坝地震模型试验研究及资料整理分析等开展了大量的研究工作,并为本书的编写工作提供了方便,在此一并感谢。另外,参加本书有关内容研究的还有第二著者指导的研究生,具体有孙立国博士、陈灯红博士、苑举卫博士、刘志明博士、秦武硕士和徐海荣硕士;陈小翠博士协助书稿的整理与校对等工作,在此一并致以谢忱。

本书部分研究成果获得了国家自然科学基金项目（50779011，11372098）的资助。

鉴于强震区水电站场址的区域地质和工程地质的复杂性，以及水工建筑物体型的复杂性和受载的多样性，加上人们对这些问题认识的局限性，许多问题还很难彻底弄清楚并达成共识。尽管针对金安桥水电站的工程地质特征和碾压混凝土坝的特点，我们对碾压混凝土坝的抗震和复杂坝基条件下的基础处理等方面做了大量的研究和归纳总结，但受到所掌握的资料和知识水平的限制，书中难免有不足之处，恳请读者和同行批评指正。

作 者

2014年2月

目 录

序言

| | |
|--|----|
| 第 1 章 大坝混凝土基本力学特性研究 | 1 |
| 1.1 大坝混凝土设计参数研究 | 1 |
| 1.1.1 碾压混凝土压实密度 | 1 |
| 1.1.2 碾压混凝土强度及弹性模量 | 1 |
| 1.1.3 碾压混凝土层面抗剪强度 | 2 |
| 1.2 混凝土静、动力试验研究 | 3 |
| 1.2.1 不同应变率下混凝土受压的破坏形态 | 3 |
| 1.2.2 湿筛混凝土梁弯拉破坏试验 | 5 |
| 1.2.3 全级配混凝土梁弯拉破坏试验 | 8 |
| 1.3 全级配混凝土动强度提高机制..... | 11 |
| 1.3.1 计算模型..... | 11 |
| 1.3.2 数值模型的静力试验结果验证 | 13 |
| 1.3.3 全级配混凝土梁动强度提高机制研究 | 14 |
| 1.3.4 材料初始缺陷对全级配混凝土梁破坏的影响 | 17 |
| 1.4 基于 CT 技术的混凝土细观层次力学建模..... | 18 |
| 1.4.1 混凝土试件 CT 切片的获取 | 18 |
| 1.4.2 基于 CT 切片的三维混凝土模型重构 | 20 |
| 1.4.3 三维混凝土有限元模型细观层次分析 | 25 |
| 第 2 章 裂面绿泥石化岩体作为高混凝土坝坝基的适应性研究 | 29 |
| 2.1 裂面绿泥石化岩体开挖方式..... | 29 |
| 2.2 坝基裂面绿泥石化岩体的结构特征..... | 31 |
| 2.2.1 坝基裂面绿泥石化岩体结构类型划分 | 31 |
| 2.2.2 金安桥坝基裂面绿泥石化“原位镶嵌碎裂岩体”的基本特征 | 39 |
| 2.2.3 金安桥坝基裂面绿泥石化岩体的结构划分..... | 41 |
| 2.3 坝基不同部位岩体结构评价..... | 42 |
| 2.4 坝基裂面绿泥石化岩体质量分级及判定标准..... | 53 |
| 2.5 坝基建基岩体力学参数复核..... | 58 |
| 2.5.1 坝基开挖后裂面绿泥石化岩体变形模量现场检验 | 58 |

| | | |
|------------|---------------------------|-----------|
| 2.5.2 | 裂面绿泥石化岩体变形模量可靠性分析及取值 | 65 |
| 2.5.3 | 裂面绿泥石化岩体承载力 | 67 |
| 2.5.4 | 裂面绿泥石化岩体强度参数 | 69 |
| 2.6 | 坝基裂面绿泥石化岩体处置措施效果分析 | 71 |
| 2.7 | 坝基裂面绿泥石化岩体作为高混凝土重力坝建基岩体评价 | 75 |
| 第3章 | 高碾压混凝土重力坝工程抗震措施方案 | 76 |
| 3.1 | 高碾压混凝土重力坝坝体分缝分块方案 | 76 |
| 3.1.1 | 碾压混凝土坝一般分缝分块方案 | 76 |
| 3.1.2 | 金安桥大坝坝体分缝分块方案 | 76 |
| 3.2 | 高碾压混凝土重力坝坝体间断式横缝设置方案 | 78 |
| 3.2.1 | 碾压混凝土坝横缝设计 | 78 |
| 3.2.2 | 金安桥大坝横缝的创新性设计方案 | 79 |
| 3.3 | 碾压混凝土重力坝抗震钢筋设计与配置方案 | 80 |
| 3.3.1 | 抗震钢筋配置原则 | 80 |
| 3.3.2 | 金安桥大坝抗震钢筋布置方案 | 81 |
| 3.4 | 大坝抗震测试设计方案 | 82 |
| 3.4.1 | 强震监测 | 82 |
| 3.4.2 | 坝身地震响应动态监测 | 82 |
| 第4章 | 高碾压混凝土重力坝抗震分析理论模型 | 84 |
| 4.1 | 碾压混凝土重力坝横缝设计及其对大坝地震响应的影响 | 84 |
| 4.1.1 | 横缝的动接触模型研制 | 84 |
| 4.1.2 | 考虑横缝的有限元数值模型 | 85 |
| 4.1.3 | 计算结果及分析 | 87 |
| 4.2 | 大体积混凝土抗震钢筋配置原则与动力计算模型 | 99 |
| 4.2.1 | 整体式钢筋混凝土动力本构模型 | 99 |
| 4.2.2 | 混凝土塑性损伤模型 | 101 |
| 4.2.3 | 金安桥重力坝抗震钢筋配置优化研究 | 105 |
| 4.3 | 重力坝-地基系统辐射阻尼影响分析 | 112 |
| 4.3.1 | 地震动输入方法 | 112 |
| 4.3.2 | 工程应用 | 118 |
| 4.4 | 考虑设计地震动的斜入射波动输入方法研究 | 122 |
| 4.4.1 | 斜入射波场的确定 | 122 |
| 4.4.2 | 数值验证 | 125 |
| 4.4.3 | 工程应用 | 127 |

| | | |
|------------|-------------------------------|------------|
| 4.5 | 高碾压混凝土重力坝层面抗滑稳定 | 130 |
| 4.5.1 | 碾压混凝土层面原位抗剪断试验 | 130 |
| 4.5.2 | 内聚力本构模型 | 134 |
| 4.5.3 | 模型参数校准 | 136 |
| 4.5.4 | 重力坝层面抗滑稳定 | 137 |
| 4.6 | 有损坝体的极限抗震能力及抗震加固措施 | 142 |
| 4.6.1 | 计算模型 | 142 |
| 4.6.2 | 数值模型验证 | 145 |
| 4.6.3 | 坝体极限抗震能力研究 | 146 |
| 第5章 | 碾压混凝土重力坝抗震动力模型试验 | 153 |
| 5.1 | 金安桥碾压混凝土重力坝断面模型试验 | 153 |
| 5.1.1 | 挡水坝段动力破坏试验 | 153 |
| 5.1.2 | 排沙坝段动力破坏试验 | 159 |
| 5.1.3 | 厂房坝段动力破坏试验 | 165 |
| 5.1.4 | 溢流坝段动力破坏试验 | 167 |
| 5.1.5 | 断面模型试验总结 | 178 |
| 5.1.6 | 抗震措施仿真材料施加位置 | 178 |
| 5.2 | 金安桥大坝抗震措施模型试验研究 | 179 |
| 5.2.1 | 仿真混凝土在模型试验中的模拟方法 | 179 |
| 5.2.2 | 配筋混凝土的断面模型试验 | 180 |
| 5.2.3 | 钢纤维混凝土的断面模型试验 | 191 |
| 5.3 | 典型碾压层的模拟及断面模型试验研究 | 202 |
| 5.3.1 | 试验原理 | 202 |
| 5.3.2 | 双面直剪试验 | 203 |
| 5.3.3 | 模拟碾压层的模型试验研究 | 205 |
| 第6章 | 碾压混凝土重力坝监测安全评价 | 211 |
| 6.1 | 坝基及坝体变形监测 | 211 |
| 6.1.1 | 坝基变形监测 | 211 |
| 6.1.2 | 坝体变形监测 | 212 |
| 6.1.3 | 变形监测结果 | 215 |
| 6.2 | 渗流监测 | 216 |
| 6.2.1 | 坝基渗流监测 | 216 |
| 6.2.2 | 坝体渗流监测 | 216 |
| 6.2.3 | 绕坝渗流监测 | 216 |

| | |
|----------------------|------------|
| 6.2.4 渗流监测结果 | 217 |
| 6.3 应力应变监测 | 217 |
| 6.3.1 坝基应力应变监测 | 217 |
| 6.3.2 坝体应力应变监测 | 217 |
| 6.3.4 应力应变监测结果 | 219 |
| 参考文献 | 220 |

第 1 章 大坝混凝土基本力学特性研究

1.1 大坝混凝土设计参数研究

碾压混凝土重力坝安全分析的基础资料主要涉及混凝土的压实密度、抗压强度、抗拉强度、坝体层面的抗剪断峰值强度以及静、动弹模等设计参数。金安桥碾压混凝土坝在可行性研究阶段,设计参数均按规范和类比工程经验取值。众所周知,规范主要是依据工程经验和相关研究成果制定的,对一些特殊的工程不一定完全符合工程实际。此外,影响碾压混凝土设计参数取值的因素很多,每个工程都有各自的特点,还存在工程环境、施工工艺及施工质量控制等差异。为了使大坝抗震安全复核成果更接近金安桥工程实际,对金安桥大坝的碾压混凝土设计参数进行了复核性取值研究,研究成果可供类似工程借鉴。

1.1.1 碾压混凝土压实密度

碾压混凝土压实密度与采用的砂石骨料及级配有关,一旦确定了砂石骨料,就主要取决于施工工艺和施工质量的控制。金安桥大坝碾压混凝土砂石骨料采用致密玄武岩,岩块容重达 $26\sim 28\text{ kN/m}^3$ 。根据施工仓面对碾压混凝土压实度及表观密度 2379 组检测,压实度达 $98.5\%\sim 99.9\%$,表观密度最小值为 2593 kg/m^3 ,最大值为 2623 kg/m^3 ,平均值为 2601 kg/m^3 。说明金安桥碾压混凝土的实际容重远大于一般工程采用的混凝土容重 (24 kN/m^3),比常规取值增加了 8.3% ,对大坝抗震安全分析成果有一定影响,因此,大坝的抗震安全分析宜采用混凝土的容重为 26 kN/m^3 。

1.1.2 碾压混凝土强度及弹性模量

碾压混凝土的抗压强度、抗拉强度及弹性模量等设计参数与混凝土强度等级、水泥强度、水灰比、骨料状况、混凝土的硬化时间、温度、湿度、施工条件有关,这些因素确定后,还与施工工艺及施工质量关系密切。金安桥大坝的抗震安全分析,利用现场拌和楼出口机口及浇筑仓面的混凝土取样的强度试验成果进行统计分析,还进行了混凝土钻孔岩心的抗拉强度试验成果的合理性分析。出口机口碾压混凝土: $C_{90}20W6F100$ 抗压强度取样 1629 组,90 天龄期抗压强度最大值为

38.7 MPa, 最小值为 17.5 MPa, 平均值为 25.3 MPa, 标准差为 3.52 MPa, 保证率为 93.1%; 劈拉强度取样 35 组, 最大值为 2.95 MPa, 最小值为 1.48 MPa, 平均值为 2.18 MPa; 静力抗压弹性模量, 取样 74 组, 最大值为 35.8 GPa, 最小值为 30 GPa, 平均值为 32 GPa。仓面取样检测: $C_{90}20W6F100$ 抗压强度 145 组, 最大值为 36.7 MPa, 最小值为 20.1 MPa, 平均值为 25.4 MPa, 标准差为 3.38 MPa; 劈拉强度取样 211 组, 最大值为 3.31 MPa, 最小值为 1.46 MPa, 平均值为 2.14 MPa。根据大量的成果分析, 二级配 $C_{90}20W8F100$ 碾压混凝土的抗压强度高于三级配 $C_{90}20W6F100$ 碾压混凝土的抗压强度, 心样试验也反映了这一特点。原因可能是三级配碾压混凝土相对二级配碾压混凝土的浇筑质量难以控制, 更主要原因是玄武岩大石骨料中仍含少量隐微裂隙所致。

对碾压混凝土心样试验成果也进行了分析, 取 $C_{90}20W6F100$ 三级配碾压混凝土心样抗压强度 20 组, 最大值为 38.6 MPa, 最小值为 17.5 MPa, 平均值为 24.1 MPa; 静力抗压弹模取样 8 组, 最大值为 42.4 GPa, 最小值为 24.2 GPa, 平均值为 29.5 GPa。抗压强度与拌和楼出机口取样试验值非常接近, 静力抗压弹模比拌和楼出机口取样试验值大, 说明在施工质量控制较好的情况下, 碾压混凝土的抗压强度和弹模试验值受钻孔取心及试件加工扰动影响较小。此外, 对 $C_{90}20W6F100$ 三级配碾压混凝土心样抗压强度取 14 组, 轴心抗拉强度平均值为 1.12 MPa, 最大值为 1.52 MPa, 最小值为 0.92 MPa。通过深入分析认为, 由于钻孔取心及试件加工的扰动对混凝土心样的抗拉强度的影响比抗压强度影响大, 如利用混凝土心样的抗拉试验成果, 应采用更有效地保护岩心的钻具及试件加工工艺, 否则获得的抗拉强度与实际出入较大, 同时也说明碾压混凝土冷升层或施工间歇层面对抗拉强度有影响。因此, 对抗震要求较高的碾压混凝土重力坝的碾压混凝土层面的抗拉强度如何采取措施以满足设计要求应引起高度重视, 尤其是冷升层面或施工间歇层面的存在, 对碾压混凝土的抗拉强度影响明显。如碾压混凝土坝完全采用心样的抗拉强度试验成果可能不满足抗震强度要求, 应研究提高碾压混凝土层面的抗拉强度的工程措施。从这一角度出发, 针对具有成层性质的碾压混凝土坝的抗震措施, 采用在表面配置一定的抗震钢筋是有益的。

金安桥大坝 $C_{90}20W6F100$ 碾压混凝土 90 天龄期设计参数: 抗压强度设计值为 14.5 MPa, 抗拉强度设计值为 1.45 MPa, 混凝土弹性模量为 30 GPa (有限元计算采用永久弹模)。抗震分析采用 180 天龄期强度, 混凝土抗压强度、抗拉强度及弹性模量的动态设计值较静态设计值均考虑提高 30%。

1.1.3 碾压混凝土层面抗剪强度

在大坝填筑上升过程中, 碾压混凝土层面的抗剪强度随层面覆盖间隔的延长

而降低,在初凝时间内铺摊混凝土并及时碾压时,层面混凝土的抗剪断强度与层内混凝土的抗剪强度相差不大;当超过混凝土初凝时间而对层面进行处理时,层面混凝土的抗剪强度比层内混凝土的抗剪强度明显降低,降低程度与处理措施有关。金安桥大坝现场进行了碾压混凝土层面的原位抗剪试验和混凝土心样抗剪室内试验,分别获得混凝土冷升层和热升层的抗剪断峰值强度。热升层抗剪断峰值强度: $C_{90}20W6F100$ 三级配碾压混凝土 $f'_{\max}=1.32$, $f'_{\min}=1.24$, $f'_{\text{均值}}=1.28$; $c'_{\max}=1.73$ MPa, $c'_{\min}=1.51$ MPa, $c'_{\text{均值}}=1.63$ MPa。 $C_{90}15W6F100$ 三级配碾压混凝土 $f'_{\max}=1.21$, $f'_{\min}=1.20$, $f'_{\text{均值}}=1.20$; $c'_{\max}=1.87$ MPa, $c'_{\min}=1.71$ MPa, $c'_{\text{均值}}=1.79$ MPa。冷升层抗剪断峰值强度: $C_{90}20W6F100$ 三级配碾压混凝土 $f'_{\max}=1.27$, $f'_{\min}=1.16$, $f'_{\text{均值}}=1.23$; $c'_{\max}=1.68$ MPa, $c'_{\min}=1.54$ MPa, $c'_{\text{均值}}=1.62$ MPa。 $C_{90}15W6F100$ 三级配碾压混凝土 $f'_{\max}=1.15$, $f'_{\min}=1.10$, $f'_{\text{均值}}=1.13$; $c'_{\max}=1.52$ MPa, $c'_{\min}=1.38$ MPa, $c'_{\text{均值}}=1.47$ MPa。层间内部混凝土 $C_{90}20W6F100$ 三级配碾压混凝土 $f'=1.30$, $c'=1.80$ MPa; $C_{90}15W6F100$ 三级配碾压混凝土 $f'=1.32$, $c'=1.83$ MPa。经过分析表明,热升层的抗剪断峰值强度稍高于冷升层的抗剪断峰值强度,热升层的抗剪断峰值强度与层间内部混凝土的抗剪断峰值强度相差不大,当提高混凝土强度等级时抗剪断峰值强度也有所提高。经过统计分析及类比其他已建工程取值,金安桥大坝碾压混凝土层面的抗剪断强度峰值设计参数: $C_{90}20W6F100$ 三级配碾压混凝土 $f'=1.10$, $c'=1.35$ MPa; $C_{90}15W6F100$ 三级配碾压混凝土 $f'=1.00$, $c'=1.25$ MPa。通过大坝碾压混凝土层面的抗滑稳定复核及相关结构分析,只要严格控制碾压混凝土填筑质量,碾压混凝土层面的抗滑稳定已成为不太突出的工程问题。

1.2 混凝土静、动力试验研究

混凝土是高碾压混凝土重力坝的主要筑坝材料,基于试验的方法,研究混凝土在不同受力条件下的破坏形态、动强度提高机制,可为高坝的抗震安全评价工作奠定坚实的基础。本部分主要研究了混凝土在不同应变率下的受压破坏形态,进行了8根混凝土梁的轴压试验,观察其受压破坏形态;并进行了18根湿筛混凝土试件和12根全级配混凝土试件在不同加载速率下的弯拉破坏试验。

1.2.1 不同应变率下混凝土受压的破坏形态

共进行了4组有效试验(共8个试验块,4个用于准静态压缩实验,4个用于动态压缩实验),试件尺寸为 $150\text{ mm}\times 130\text{ mm}\times 275\text{ mm}$ 。为了研究混凝土

材料在动、静载荷压缩破坏过程中裂纹的形态,将试验块表面层进行切割,暴露出材料细观形貌。采用高速摄像系统进行表面裂纹观察与记录,以获得在压缩破坏过程中细观层次的材料破坏和裂纹发展特征。

实验用的加载系统为瑞格尔 (Reger) 公司的 600 kN 液压万能试验机。图像采集系统使用 AOS 公司的分辨率为 800×600 像素的 S-MOTION 高速摄像系统。试验过程中采用 LED 直流光源进行补光。整个试验系统如图 1-1 所示。

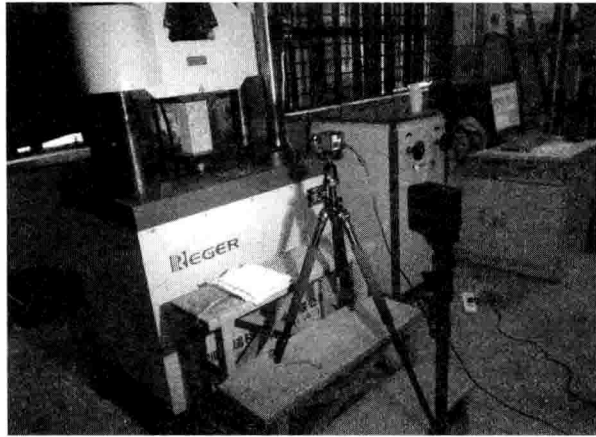


图 1-1 试验加载测试系统

由于试验机加载条件的限制,本次试验的加载速率最小为 $1.09 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (准静态),而试验机达到最大加载能力时,对于混凝土材料平均应变率可以达到 $5.38 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$,提高了 500 倍左右,近似地震作用下的应变率范围(地震作用下混凝土材料应变率在 10^{-1} s^{-1} 到 10^{-2} s^{-1})。在一定程度上,可以用于地震作用下混凝土静态和动态性能的对比。

实验研究得到以下几个结论:

(1) 通过两种应变率下的压缩弹模和破坏强度的比较,混凝土材料在动载作用下,其压缩弹性模量和抗压强度均有相应的提高,平均弹性模量从静载的 28.00 GPa 提高到动载的 31.58 GPa,提高了 12.80%;平均抗压强度从静载的 23.54 MPa 提高到动载的 28.85 MPa,提高了 22.60%。

(2) 动载作用下的应变明显小于静载作用下的应变响应,存在应变滞后效应,并且随着应力水平的增大,应变滞后越发明显,最大的滞后应变基本发生在静载峰值应力水平处。平均最大滞后应变为 $500 \mu\epsilon$ 左右,而动、静载破坏应变的差值为 $200 \mu\epsilon$ 左右,动、静载最大滞后应变远大于破坏应变的差值。说明在动载作用下,当载荷达到破坏静载的时候,相应的应变并没有达到破坏静应变的

水平, 因此载荷需要进一步提高, 使得应变接近破坏静应变时才发生失效破坏, 从而得到的动强度会偏大。

(3) 从细观破坏裂纹发展形态来看, 静载作用下裂纹基本上是沿骨料-砂浆的界面发展的, 几乎没有发现裂纹穿越骨料的现象; 但是在动载作用下, 普遍存在一部分裂纹穿越骨料发展的现象。这是因为在静载作用下, 材料首先在最薄弱的部位发生破坏, 即产生微裂纹。微裂纹进一步扩展时, 有足够的时间来自主选择其周围局部下一个最薄弱部位继续扩展, 一般情况下, 骨料-砂浆界面的强度相对骨料较低, 破坏界面发展需要的能量相对更低, 因此裂纹一般选择从骨料-砂浆的界面发展, 这就是材料破坏过程的最小耗能原理。

但在动载作用时, 微裂纹扩展过程中可能没有足够的时间来进行自主选择 (一般来说沿骨料-砂浆的界面扩展的路径相对较长, 需要的扩展时间相对较多), 其扩展路径就不能遵循最小耗能原理, 因此就出现部分裂纹直接穿越骨料尖端继续发展, 从而使得破坏所需要的能量增加, 即破坏强度提高。

图 1-2、图 1-3 分别为静载和动载时截面破坏的裂纹最终分布图。

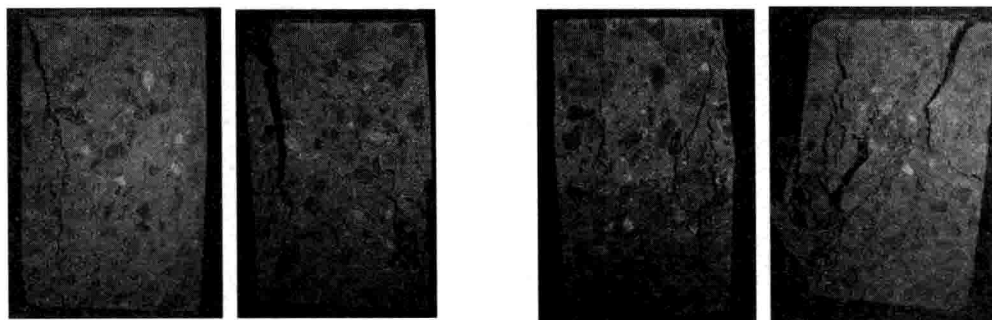


图 1-2 静载压缩破坏形态

图 1-3 动载压缩破坏形态

1.2.2 湿筛混凝土梁弯拉破坏试验

试验共分 6 组, 每组 3 根试件, 加载方式分 6 种, 分别先预加载至最大破坏荷载的 30%、60%, 然后以 100 mm/min、300 mm/min、600 mm/min 三种速度加载直至破坏。图 1-4 为试验简图, 图 1-5 为试验加载图, 图 1-6~图 1-9 为部分试验结果。

试验初步得到: 混凝土材料在相同初始静载下, 随着加载速率的提高, 破坏荷载呈提高趋势, 见图 1-6~图 1-8; 在 100 mm/min 到 300 mm/min 区间提高明显, 在 300 mm/min 到 600 mm/min 提高趋缓, 甚至有下降趋势。总体趋势

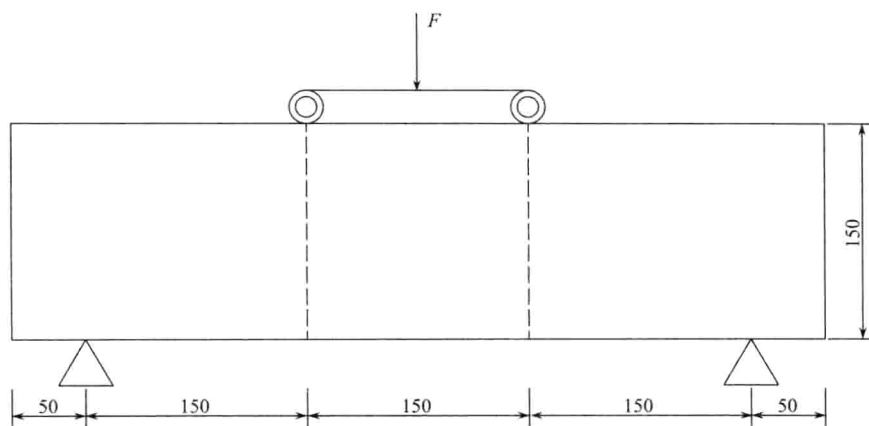


图 1-4 湿筛试件弯拉试验简图 (单位: mm)

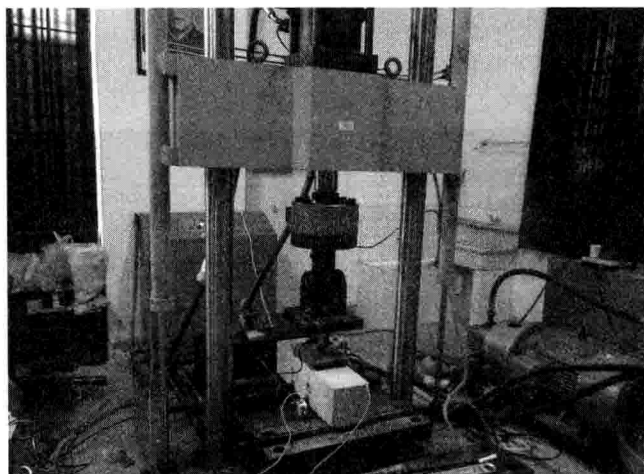


图 1-5 湿筛试件弯拉试验装置

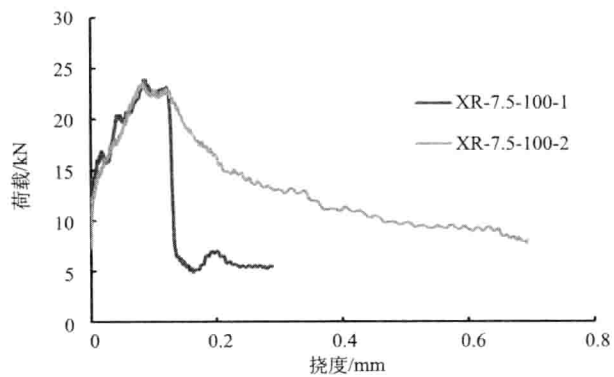


图 1-6 30% 初始静载 100 mm/min 下荷载-挠度曲线

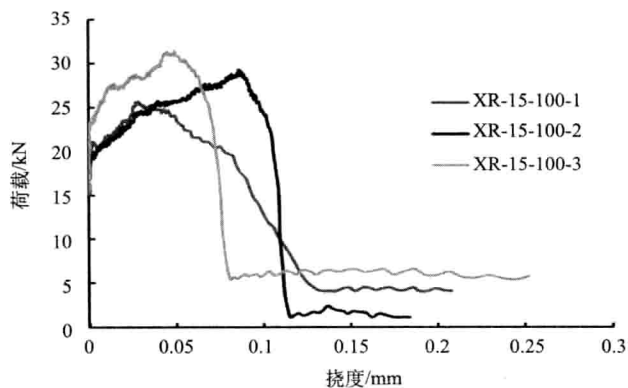


图 1-7 60%初始静载 100 mm/min 下荷载-挠度曲线

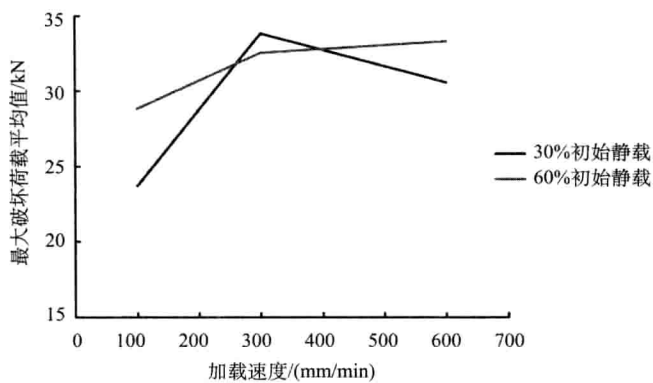


图 1-8 最大荷载平均值-加载速度曲线

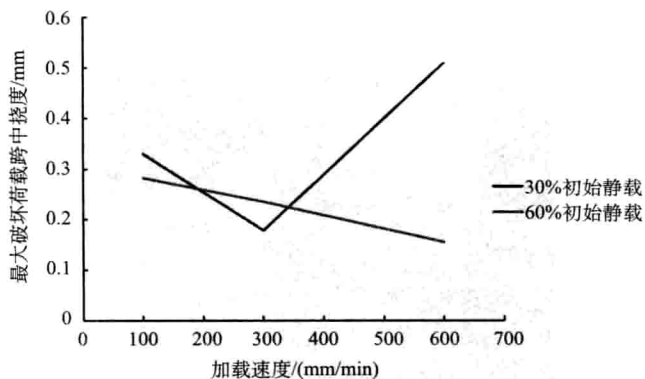


图 1-9 最大荷载时跨中挠度-加载速度曲线