



北京工业大学

“211工程”资助出版

# 高性能大坝混凝土的 强度与变形

邓宗才 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



北京工业大学

“211 工程”资助出版

# 高性能大坝混凝土的 强度与变形

邓宗才 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书对三峡、小湾高坝等重要工程所用混凝土力学性能进行了总结,同时分析了加载速率、骨料粒径等对大坝混凝土力学性能的影响。本书分为上、下篇,共16章。上篇主要内容有:人工骨料、天然骨料全级配与湿筛混凝土静态单轴的拉、压、劈拉和弯拉等性能,全级配混凝土与湿筛混凝土力学性能指标的相互关系,大坝混凝土弹性模量的预测,大坝混凝土静态性能的分析与比较,混凝土拉伸软化本构模型等。下篇主要内容有:大坝混凝土动态性能的研究进展,全级配混凝土的动态特性,钻芯取样大坝混凝土试件的动态性能,高强混凝土预反复荷载后的损伤演化规律,应变速率、水分含量和骨料粒径等对混凝土动态性能的影响等。

本书可供水利水电工程、材料工程专业的研究人员、工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高性能大坝混凝土的强度与变形/邓宗才著. —北京:科学出版社,2006  
ISBN 7-03-016749-X

I. 高… I. 邓… III. ①混凝土坝-强度-研究 ②混凝土坝-变形-研究  
N. TV642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 000498 号

责任编辑:童安齐 沈 建 / 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006年4月第一次印刷 印张:16

印数:1—3 000

字数:302 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026 (BA03)

## 总 序

“211 工程”是我国建国以来教育领域唯一的国家重点建设工程，以便我国面向 21 世纪重点建设一百所高水平大学，使其成为我国培养高层次人才，解决经济建设、社会发展和科技进步重大问题的基地，形成我国高等学校重点学科的整体优势，增强和完善国家科技创新体系，跟上和占领世界高层次人才培养和科技发展的制高点。

中国高等教育发展迅猛，尤其是 1400 所地方高校已经占全国高校总数的 90%，成为我国高等教育实现大众化的重要力量，成为区域经济和社会发展服务的重要生力军。“211 工程”建设对于我校实现跨越式发展、增强服务北京的能力起到了重大的推动作用。

在北京市委市政府的高度重视和大力支持下，1996 年 12 月我校通过了“211 工程”部门预审，成为北京市属高校唯一进入国家“211 工程”重点建设的百所大学之一，2001 年 6 月以优异成绩通过国家“211 工程”一期建设验收，2002 年 10 月顺利通过国家“211 工程”二期建设可行性论证。我校紧紧抓住这一难得的历史性发展机遇，根据首都经济和社会发展的需要，坚持“科学定位，找准目标，发挥优势，办出特色”的办学方针和“立足北京，融入北京，辐射全国，面向世界”的定位指导思想，以学科建设为龙头，师资队伍建设为关键，重点建设了电子信息、新材料、光机电一体化、城市建设与交通、生物医药、环境与能源、经济与管理类学科，积极发展了人文社会科学类学科，加强了基础类学科，形成了规模、层次及布局合理的学科体系，实现了从工科大学向以工为主，理、工、经、管、文、法相结合的多科性大学转变，从教学型大学向教学研究型大学的转变。

我校现有 9 个博士后科研流动站，6 个一级学科博士学位授权点，25 个二级学科博士学位授权点，55 个硕士学位授权点。教师中有院士 6 人，博士生导师 150 人，教授 230 人，专任教师中具有博士学位的教师比例达到 30%。我校年科研经费已达到 2.3 亿元，年获得国家自然科学基金资助项目近 40 项，材料学科获全国百篇优秀博士学位论文奖，抗震减灾学科与交通学科 2002 年分别获得国家科技进步二等奖，计算机学科 2003 年获得国家科技进步二等奖，光电子学科在新型高效高亮度半导体发光二极管、新医药与生物工程学科在国家 P3 实验室建设和抗 HIV 药物的研制、环境与能源工程学科在奥运绿色建筑标准与大气环境治理、光学学科在大功率激光器研制、管理科学与工程学科在国家中长期能源规划等方面均取得了特色鲜明的科研成果。

为了总结和交流北京工业大学“211工程”建设的科研成果，学校设立“211工程”专项资金资助出版系列学术专著，这些专著从一个侧面代表了我校教授、学者的学科方向、研究领域、学术成果和教学经验。

展望北京工业大学的未来，我们任重而道远。我坚信，只要我们珍惜“211工程”建设和奥运羽毛球馆建设这两大机遇，构建高层次学科体系，营造优美的大学校园，在把我校在建设成为国内一流大学的进程中就一定能够为“新北京、新奥运”的宏伟蓝图做出自己应有的贡献。

北京工业大学校长  
中国科协副主席  
中国工程院院士

左铁镛

2004年3月

## 前 言

积极发展水力发电,是我国能源战略的重要目标之一。我国西部具有丰富的水力资源,发展水力发电前景非常广阔,但西部处于高烈度地震区,因此对高拱坝的抗震性能提出了更高的要求。在西部建设龙滩、小湾、溪洛渡等一批世界级高坝,需要对大坝的抗震安全进行评价,对大坝混凝土动态性能及大坝地震响应的影响进行研究,并拟通过试验与理论研究,不断优化拱坝的材料,使所配混凝土具有良好的抗震承载力、变形性能和良好的耐久性,使所建高拱坝具有良好的抗震安全性和耐久性。

随着实验技术及计算机技术的发展,人们可以对全级配混凝土的静载、动载性能进行试验研究,为大坝的设计提供较可靠的材料参数。我国相继建设葛洲坝、三峡、二滩、五强溪、龙洋峡、溪洛渡和东江等一批大型水电站工程,积累了较丰富的设计、施工和原材料选用与高性能混凝土配制等经验,其中包括对大坝混凝土的性能获得了一批宝贵的数据,因此很有必要总结已有的成果,寻找规律性的结论,为大坝设计、材料的合理选用提供参考数据。由于大坝混凝土的试验难度大,需要花费大量的人力、物力和资金,对过去研究成果的总结,就更加显得重要和必要。作者及其他研究人员结合三峡、二滩、五强溪、龙洋峡、溪洛渡和东江等水电站工程,较系统地研究了大坝混凝土的强度和变形,获得了宝贵的数据。所采用的试验材料均是建设大坝实际使用的材料,混凝土的配合比是大坝工程中所采用的,因此书中介绍的试验内容具有较强的针对性,试验成果具有一定的参考价值。书中介绍的三峡大坝、小湾高拱坝、二滩高拱坝全级配混凝土性能研究成果已经应用于大坝的建设,取得了良好的社会及经济效益。书中介绍的国内外其他大坝混凝土性能的研究成果,大部分已被应用于工程实践,得到了实践的检验,有些数据来源于对已有大坝混凝土性能的研究。希望通过本书的介绍,为今后大坝设计提供参考数据,为研究大坝混凝土破坏机制、破坏准则等提供实测数据,为大坝静、动力分析和可靠性分析提供材料性能参数,也为研究混凝土动态性能及其对大坝地震响应的影响提供必要的数据。

书中主要内容立足于试验,希望通过试验数据来反映大坝混凝土的各种性能。本书也比较了不同试验方法对混凝土性能的影响。

断裂力学为研究混凝土的破坏机制、优化混凝土配合比等提供了有效的手段。用轴拉和弯拉等试验方法,研究了大坝混凝土的拉伸软化曲线、断裂能、特征长度等;研究了骨料粒径、骨料种类、级配等对断裂性能的影响,为科学选用材料

提供了依据。现代损伤力学为研究大坝混凝土的剩余强度和评价结构的可靠度提供了方法。大坝混凝土常受到反复荷载、水的冲刷等,这些都对大坝造成了各种损伤。本书介绍了用损伤力学研究已有大坝混凝土在反复荷载下的损伤程度的成果,为评估大坝的安全性和可靠性、预测大坝的使用寿命提供了数据。

本书分上、下两篇。上篇论述大坝混凝土在静力状态下的强度与变形。其中详细介绍了全级配混凝土、湿筛混凝土的压缩、拉伸、弯拉和劈拉等力学性能,研究了骨料的种类、骨料粒径、试件尺寸、养护龄期、养护方法等对混凝土性能的影响,分析、比较了国内外大坝混凝土静载力学性能的试验数据。下篇论述全级配混凝土在动载下的强度与变形。其中首先介绍了全级配混凝土的抗压、抗弯动载性能,包括美国垦务局等单位的最新研究成果、加载速率对混凝土拉伸与压缩性能影响等,然后介绍了加载历史对大坝混凝土性能的影响,干、湿混凝土动态性能,最后较完整地阐述了混凝土动态性能,这些试验数据及试验方法对研究撞击、爆炸等突发事件对大坝构成的危害具有积极的意义。

本书上篇第9章为浙江工业大学赵志方教授撰写,邀请中国水利水电科学院侯顺载教授撰写了下篇的第2章,在此对他们表示衷心地感谢。

在本书撰写过程中引用了部分国内外同行发表的研究成果和论著,在此对其作者深表谢意。

作者在完成“三峡大坝混凝土大试件性能试验研究”的课题中,得到了李庆斌教授、傅华教授的大力支持。在本书的撰写过程中得到了北京工业大学建筑工程学院霍达院长的热情帮助,研究生孙宏俊、刘春国、李建辉、牛坤和王现卫为书稿的整理做了大量的工作,在此对他们一并表示衷心地感谢。

由于大坝混凝土试验难度较大,而且试验研究的内容、方法和试验数据尚存在局限性,作者收集的文献有限,更限于作者的认识水平,书中有不完善之处,恳请读者不吝指正。

# 目 录

总序  
前言

## 上篇 大坝混凝土的静态力学性能

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                     | 3  |
| <b>第 2 章 人工骨料全级配混凝土的单轴拉伸与压缩性能</b> .....   | 5  |
| 2-1 概述 .....                              | 5  |
| 2-2 试件及试验方法 .....                         | 6  |
| 2-3 混凝土试件的开裂与破坏过程 .....                   | 8  |
| 2-3-1 拉伸试验试件的破坏形态 .....                   | 8  |
| 2-3-2 压缩试验试件的破坏形态 .....                   | 9  |
| 2-4 混凝土拉伸、压缩试验结果 .....                    | 10 |
| 2-5 龄期对全级配混凝土抗拉、抗压性能的影响 .....             | 12 |
| 2-5-1 龄期对抗拉性能的影响 .....                    | 12 |
| 2-5-2 龄期对抗压性能的影响 .....                    | 16 |
| 2-6 人工骨料全级配混凝土抗拉强度与抗压强度的关系 .....          | 20 |
| 2-7 结论 .....                              | 20 |
| 参考文献 .....                                | 21 |
| <b>第 3 章 人工骨料湿筛混凝土的单轴拉伸与压缩性能</b> .....    | 23 |
| 3-1 概述 .....                              | 23 |
| 3-2 试件及混凝土配合比 .....                       | 23 |
| 3-3 人工骨料湿筛混凝土的试验结果 .....                  | 24 |
| 3-4 试验结果的分析 .....                         | 30 |
| 3-4-1 轴心拉伸试验结果 .....                      | 30 |
| 3-4-2 抗压性能 .....                          | 36 |
| 3-4-3 养护条件对强度、弹性模量的影响 .....               | 40 |
| 3-5 结论 .....                              | 42 |
| 参考文献 .....                                | 42 |
| <b>第 4 章 人工骨料大坝混凝土与湿筛混凝土力学性能的关系</b> ..... | 44 |
| 4-1 概述 .....                              | 44 |

|            |                                  |           |
|------------|----------------------------------|-----------|
| 4-2        | 人工骨料全级配混凝土拉、压力学性能间的关系 .....      | 44        |
| 4-2-1      | 拉、压强度间的关系 .....                  | 44        |
| 4-2-2      | 拉、压弹性模量的比较 .....                 | 45        |
| 4-3        | 人工骨料全级配混凝土与湿筛混凝土抗拉性能间的关系 .....   | 46        |
| 4-3-1      | 抗拉强度 .....                       | 46        |
| 4-3-2      | 抗拉弹性模量间的关系 .....                 | 47        |
| 4-3-3      | 抗拉峰值应变间的关系 .....                 | 48        |
| 4-3-4      | 抗拉断裂能间的关系 .....                  | 48        |
| 4-3-5      | 特征长度间的关系 .....                   | 50        |
| 4-3-6      | 最大裂缝宽度间的关系 .....                 | 51        |
| 4-4        | 大坝混凝土与湿筛混凝土抗压性能间的关系 .....        | 52        |
| 4-4-1      | 抗压强度间的关系 .....                   | 52        |
| 4-4-2      | 抗压弹性模量 .....                     | 54        |
| 4-4-3      | 抗压峰值应变 .....                     | 54        |
| 4-5        | 全级配混凝土抗拉强度与湿筛混凝土抗压强度的关系 .....    | 55        |
| 4-6        | 湿筛混凝土抗拉与抗压强度间的关系 .....           | 55        |
| 4-7        | 比较全级配混凝土与湿筛混凝土相对应力-裂缝宽度曲线 .....  | 56        |
| 4-8        | 混凝土单轴压缩时相对应力-应变下降段形状的比较 .....    | 57        |
| 4-9        | 结论 .....                         | 57        |
|            | 参考文献 .....                       | 58        |
| <b>第5章</b> | <b>天然骨料混凝土的单轴拉伸与压缩试验研究 .....</b> | <b>59</b> |
| 5-1        | 概述 .....                         | 59        |
| 5-2        | 试验结果及分析 .....                    | 59        |
| 5-2-1      | 混凝土拉伸全曲线 .....                   | 59        |
| 5-2-2      | 混凝土拉伸与压缩试验结果 .....               | 59        |
| 5-3        | 龄期与大坝混凝土抗拉、压力学指标的关系 .....        | 62        |
| 5-4        | 龄期与湿筛混凝土抗拉、压力学指标的关系 .....        | 62        |
|            | 参考文献 .....                       | 63        |
| <b>第6章</b> | <b>不同骨料混凝土力学性能比较 .....</b>       | <b>64</b> |
| 6-1        | 足尺寸试件抗拉力学性能的比较 .....             | 64        |
| 6-1-1      | 抗拉强度 .....                       | 64        |
| 6-1-2      | 断裂能 .....                        | 64        |
| 6-1-3      | 拉伸峰值应变 .....                     | 65        |
| 6-1-4      | 最大裂缝宽度 .....                     | 66        |
| 6-1-5      | 弹性模量 .....                       | 66        |

|              |                                  |           |
|--------------|----------------------------------|-----------|
| 6-1-6        | 特征长度 .....                       | 66        |
| 6-2          | 足尺寸试件抗压力学性能的比较 .....             | 67        |
| 6-2-1        | 抗压强度 .....                       | 68        |
| 6-2-2        | 抗压弹性模量 .....                     | 68        |
| 6-3          | 湿筛混凝土试件抗拉力学性能的比较 .....           | 69        |
| 6-3-1        | 抗拉强度 .....                       | 69        |
| 6-3-2        | 弹性模量 .....                       | 69        |
| 6-3-3        | 峰值应变 .....                       | 70        |
| 6-3-4        | 特征长度 .....                       | 71        |
| 6-3-5        | 断裂能 .....                        | 71        |
| 6-3-6        | 裂缝张开位移 .....                     | 71        |
| 6-4          | 湿筛混凝土试件抗压力学性能的比较 .....           | 73        |
| 6-4-1        | 抗压强度 .....                       | 73        |
| 6-4-2        | 弹性模量 .....                       | 73        |
| 6-4-3        | 峰值应变 .....                       | 73        |
| 6-5          | 结论 .....                         | 75        |
| 6-5-1        | 人工骨料混凝土性能 .....                  | 75        |
| 6-5-2        | 天然骨料对混凝土性能的影响 .....              | 76        |
| 6-5-3        | 两种骨料对混凝土性能的影响规律 .....            | 76        |
|              | 参考文献 .....                       | 77        |
| <b>第 7 章</b> | <b>大坝全级配混凝土的弹性模量 .....</b>       | <b>79</b> |
| 7-1          | 概述 .....                         | 79        |
| 7-2          | 大坝混凝土弹性模量的试验研究 .....             | 79        |
| 7-3          | 大坝混凝土弹性模量的预测模型 .....             | 81        |
| 7-4          | 三峡大坝混凝土弹性模量的预测 .....             | 84        |
| 7-4-1        | 原材料及配合比 .....                    | 84        |
| 7-4-2        | 湿筛混凝土抗压弹性模量 <sup>[2]</sup> ..... | 85        |
| 7-4-3        | 大坝混凝土抗压弹性模量预测 .....              | 85        |
| 7-5          | 结论 .....                         | 86        |
|              | 参考文献 .....                       | 86        |
| <b>第 8 章</b> | <b>大坝混凝土静态力学性能的比较与分析 .....</b>   | <b>87</b> |
| 8-1          | 国内典型大坝工程的混凝土性能比较 .....           | 87        |
| 8-2          | 外加剂对大坝混凝土力学性能的影响 .....           | 92        |
| 8-3          | 高强混凝土轴拉性能对切口的敏感性 .....           | 96        |
| 8-3-1        | 切口敏感性系数 .....                    | 96        |

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| 8-3-2 断裂能与脆性 .....                                         | 97         |
| 8-4 高强混凝土轴拉强度与劈拉强度、弯拉强度的关系 .....                           | 97         |
| 8-4-1 试件尺寸及试验装置 .....                                      | 98         |
| 8-4-2 比较轴拉、弯拉及劈拉强度 .....                                   | 98         |
| 8-5 三峡泄洪坝混凝土轴拉强度与劈拉强度的比较 .....                             | 100        |
| 8-6 大坝混凝土的多轴力学性能研究 .....                                   | 101        |
| 8-6-1 试件 .....                                             | 101        |
| 8-6-2 破坏形态 .....                                           | 102        |
| 8-6-3 不连续点应力 .....                                         | 102        |
| 8-6-4 不连续(拐点)拉应变 .....                                     | 102        |
| 8-7 高抗裂高耐久大坝混凝土的性能 .....                                   | 104        |
| 8-8 混凝土等级对轴拉性能的影响 .....                                    | 107        |
| 8-8-1 试件及配合比 .....                                         | 107        |
| 8-8-2 试验结果 .....                                           | 108        |
| 8-8-3 分析及讨论 .....                                          | 108        |
| 参考文献 .....                                                 | 108        |
| <b>第9章 三峡泄洪坝混凝土拉伸软化本构模型</b> .....                          | <b>111</b> |
| 9-1 试验概况 .....                                             | 111        |
| 9-1-1 试件设计 .....                                           | 111        |
| 9-1-2 原材料及配合比 .....                                        | 112        |
| 9-1-3 试件制作 .....                                           | 112        |
| 9-1-4 轴拉试验 .....                                           | 113        |
| 9-1-5 三点弯曲梁试验 .....                                        | 113        |
| 9-2 轴拉试验确定的软化曲线 .....                                      | 116        |
| 9-2-1 轴拉应力-变形全曲线( $\sigma$ - $\delta$ 曲线) .....            | 117        |
| 9-2-2 轴拉应力-应变全曲线 .....                                     | 118        |
| 9-2-3 轴拉应力 $\sigma$ 和裂缝张开宽度 $w$ 的关系曲线 .....                | 118        |
| 9-2-4 相对轴拉应力和相对裂缝宽度的关系曲线( $\sigma/f_t$ - $w/w_0$ 曲线) ..... | 119        |
| 9-3 逆推法确定的软化曲线 .....                                       | 120        |
| 9-3-1 开裂强度 .....                                           | 120        |
| 9-3-2 逆推法 .....                                            | 120        |
| 9-4 轴拉试验和逆推法确定的软化曲线的对比和分析 .....                            | 128        |
| 9-5 结论 .....                                               | 129        |
| 参考文献 .....                                                 | 130        |

## 下篇 大坝混凝土的动态性能

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 大坝混凝土动态性能的研究进展</b> .....     | 133 |
| 1-1 概述 .....                          | 133 |
| 1-2 国内外研究现状 .....                     | 134 |
| 1-2-1 国外主要研究成果 .....                  | 134 |
| 1-2-2 国内研究现状 .....                    | 136 |
| 1-2-3 存在问题 .....                      | 136 |
| 参考文献 .....                            | 137 |
| <b>第 2 章 全级配混凝土抗压与抗弯拉动态特性</b> .....   | 139 |
| 2-1 概述 .....                          | 139 |
| 2-2 试验内容和试验方法 .....                   | 140 |
| 2-2-1 试验研究内容 .....                    | 140 |
| 2-2-2 试件尺寸 .....                      | 141 |
| 2-2-3 试件的配比和成型 .....                  | 141 |
| 2-3 抗压动态参数的试验研究 .....                 | 142 |
| 2-3-1 试验概况 .....                      | 142 |
| 2-3-2 抗压强度试验结果与分析 .....               | 142 |
| 2-3-3 抗压弹性模量与泊松比 .....                | 145 |
| 2-3-4 小结 .....                        | 147 |
| 2-4 弯拉动态参数的试验研究 .....                 | 149 |
| 2-4-1 试验概况 .....                      | 149 |
| 2-4-2 弯拉强度试验结果与分析 .....               | 149 |
| 2-4-3 弯拉弹性模量与泊松比 .....                | 152 |
| 2-4-4 初始静载对弯拉强度的影响 .....              | 155 |
| 2-4-5 小结 .....                        | 158 |
| 2-5 结论 .....                          | 158 |
| 参考文献 .....                            | 160 |
| <b>第 3 章 大坝混凝土钻芯取样试件的动态力学特性</b> ..... | 161 |
| 3-1 概述 .....                          | 161 |
| 3-2 试验结果与分析 .....                     | 161 |
| 3-3 结论 .....                          | 166 |
| 参考文献 .....                            | 167 |
| <b>第 4 章 反复加载历史对高强大坝混凝土的损伤</b> .....  | 168 |
| 4-1 概述 .....                          | 168 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 4-2 单轴预加载对混凝土的损伤 .....           | 169        |
| 4-2-1 试验过程及试验结果 .....            | 170        |
| 4-2-2 混凝土的一般力学指标 .....           | 171        |
| 4-2-3 单调加载对劈拉强度的影响 .....         | 171        |
| 4-2-4 循环加载对劈拉强度的影响 .....         | 173        |
| 4-2-5 小结 .....                   | 175        |
| 4-3 多轴预加载对混凝土的损伤 .....           | 175        |
| 参考文献 .....                       | 178        |
| <b>第5章 干、湿混凝土的动态性能 .....</b>     | <b>180</b> |
| 5-1 概述 .....                     | 180        |
| 5-2 试验结果 .....                   | 180        |
| 5-3 结论 .....                     | 185        |
| 参考文献 .....                       | 186        |
| <b>第6章 应变速率对混凝土抗拉性能的影响 .....</b> | <b>187</b> |
| 6-1 概述 .....                     | 187        |
| 6-2 欧洲规范中拉伸动力强度增大因子 .....        | 187        |
| 6-3 高应变速率下的试验数据 .....            | 188        |
| 6-4 对预测模型的分析 .....               | 190        |
| 6-4-1 准静态应变速率 .....              | 190        |
| 6-4-2 对 Ross 拉伸试验值的分析 .....      | 190        |
| 6-5 欧洲模型的形成 .....                | 190        |
| 6-6 改进的模型 .....                  | 192        |
| 6-7 骨料粒径对混凝土动态拉伸性能的影响 .....      | 193        |
| 6-7-1 材料 .....                   | 193        |
| 6-7-2 试件、试验方法 .....              | 193        |
| 6-7-3 加载速率及骨料粒径对混凝土性能的影响 .....   | 194        |
| 6-8 大坝混凝土抗拉强度的测定方法 .....         | 195        |
| 6-8-1 抗拉强度的测定 .....              | 196        |
| 6-8-2 劈拉强度试验 .....               | 197        |
| 6-8-3 弯拉强度试验 .....               | 197        |
| 6-8-4 动力荷载 .....                 | 198        |
| 6-8-5 抗拉强度用于结构分析 .....           | 198        |
| 6-8-6 小结 .....                   | 199        |
| 6-9 加载速率对断裂性能的影响 .....           | 200        |
| 参考文献 .....                       | 200        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第 7 章 应变速率对混凝土抗压性能的影响</b> ..... | 205 |
| 7-1 试验技术及其对试验结果的影响 .....           | 205 |
| 7-1-1 加载方法 .....                   | 205 |
| 7-1-2 加载速率的定义 .....                | 206 |
| 7-1-3 在高应变速率下的测量局限 .....           | 214 |
| 7-1-4 端部边界约束 .....                 | 217 |
| 7-1-5 测量与记录 .....                  | 217 |
| 7-1-6 结论 .....                     | 217 |
| 7-2 混凝土强度 .....                    | 218 |
| 7-2-1 混凝土的单轴抗压强度——应变速率的影响 .....    | 218 |
| 7-2-2 多轴加载时应变速率对强度的影响 .....        | 222 |
| 7-2-3 侧向惯性约束 .....                 | 222 |
| 7-2-4 结论 .....                     | 224 |
| 7-3 变形行为和耗能能力 .....                | 224 |
| 7-3-1 应变速率对弹性模量的影响 .....           | 225 |
| 7-3-2 应变速率对峰值应变的影响 .....           | 226 |
| 7-3-3 应变速率对泊松比的影响 .....            | 228 |
| 7-3-4 应变速率对耗能能力的影响 .....           | 229 |
| 7-3-5 结论 .....                     | 229 |
| 7-4 模拟地震加载速率对混凝土抗压性能的影响 .....      | 230 |
| 附录.....                            | 232 |
| 参考文献.....                          | 233 |

# 上篇 大坝混凝土的 静态力学性能



# 第1章 绪 论

## 1. 大坝混凝土

为了减少混凝土温度应力,确保大坝的安全可靠,必须降低混凝土水化热,严格控制混凝土内部温度升高值,防止产生温度裂缝等危害。

为了减少水化热,必须优化混凝土组分,在满足工作及强度性能的前提下,减少水泥用量,增加粗骨料的用量,实行四级配或三级配,即 5~20mm、20~40mm、40~80mm、80~150mm。本书所介绍的大坝混凝土指四级配混凝土或三级配混凝土。大坝混凝土中粗骨料的体积含量一般高达 60%~70%,而普通混凝土中粗骨料的含量仅 30%~40%。因此,大坝混凝土与建筑工程中采用的一级配混凝土的性能有较大的差异,有必要专门研究和论述。

在大坝混凝土中掺粉煤灰,是减少用水量、改善混凝土性能、提高大坝混凝土耐久性的有效方法。

## 2. 全级配混凝土与湿筛混凝土

大体积混凝土力学性能指标的合理确定,对于坝体的科学设计及建造安全可靠、经济的大坝非常重要。对于全级配混凝土,测试其力学性能常常受到试件尺寸、实验机、试验方法等的影响,难度很大。以往国内外普遍采用对标准尺寸试件的湿筛混凝土进行试验,把湿筛混凝土的力学性能指标看作大体积混凝土的性能指标。但是二者之间肯定存在差异,很有必要通过试验确定二者间的关系,用湿筛混凝土的性能指标推求全级配混凝土的性能指标,而不是直接的代替,从而使坝体这样关系重大的大体积混凝土结构的设计更加科学合理。

对于大坝混凝土,国际上比较普遍的做法是将拌和好的四级配或三级配混凝土用孔径为 40mm 的筛子将粒径大于 40mm 的粗骨料湿筛掉,将湿筛后的混凝土用标准试件成型,测定标准试件的动、静载性能。

由于湿筛,使混凝土的组分,特别是水泥砂浆与粗骨料的比例发生了明显的变化,这样用标准试件测定的混凝土性能,不能真实地反映大坝全级配混凝土的性能,从而给大坝的安全设计及可靠性评估带来了较大的影响。因此,美国从 20 世纪 40 年代开始,就进行了包含全部骨料的大坝混凝土性能的试验测试,开展了全级配混凝土与湿筛混凝土的对比性试验研究。20 世纪 70 年代初,美国垦务局制定的混凝土重力坝及拱坝的设计标准中指出:大坝混凝土的强度、弹性模量等性能的测定,用全级配混凝土,且试件的尺寸必须大于 3 倍的最大骨料粒径。前苏联在 20 世纪 80 年代开展全级配混凝土的研究,不仅进行足尺寸试件的试验,而且对混凝土大坝进行现场钻芯取样测定材性指标。美国垦务局历时 15 年,支持了 7 个专项研