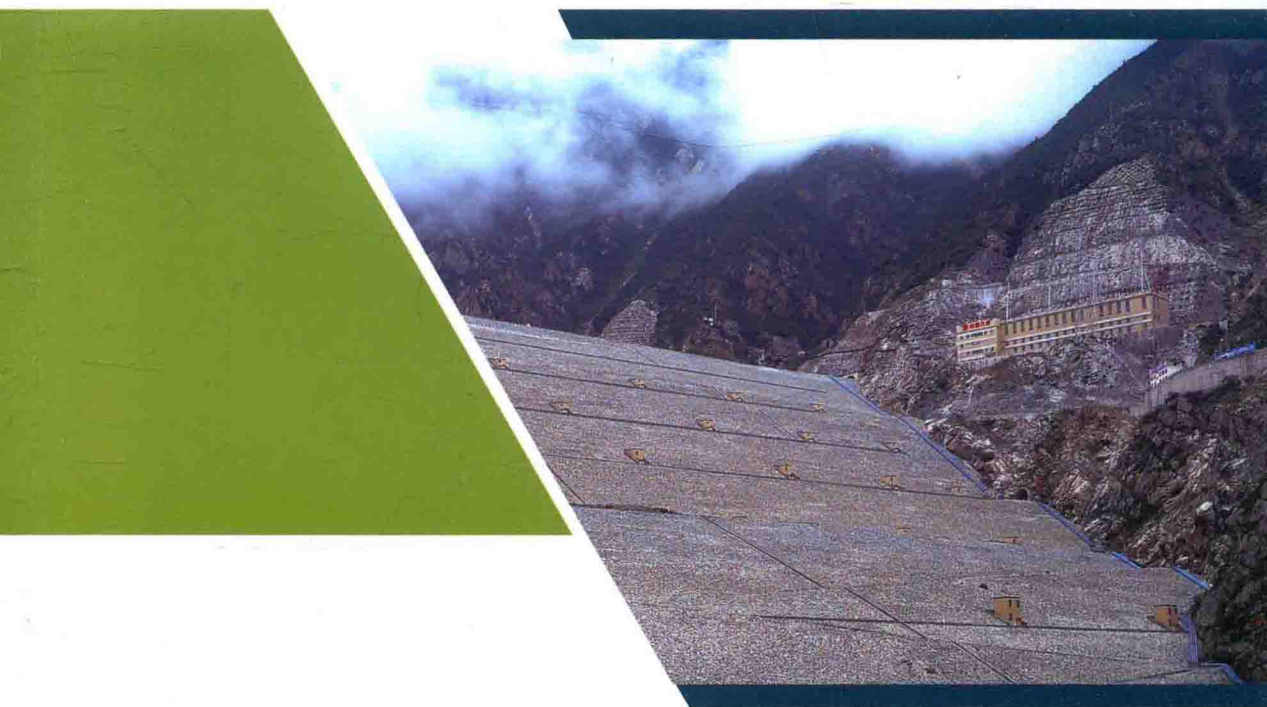


# 深厚覆盖层上超高土石坝筑坝 关键技术研讨会 论文集

中国水力发电工程学会  
中国大唐集团有限公司 编  
中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 深厚覆盖层上超高土石坝筑坝 关键技术研讨会 论文集

中国水力发电工程学会  
中国大唐集团有限公司 编  
中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

·北京·

## 内 容 提 要

本书共收录文章 57 篇, 其中综述性文章 6 篇, 涉及建设管理、特点难点和关键技术等内容; 坝料与试验类文章 8 篇, 涉及土料场复查, 心墙土料、接触土料、反滤料和堆石料的特性、试验和填筑等内容; 设计与计算类文章 14 篇, 涉及防渗体、堆石体、坝基廊道的结构设计和渗流计算、数值模拟、水力劈裂及抗震安全等计算分析等内容; 施工与管理类文章 21 篇, 涉及坝料制备、道路规划、上坝运输、填筑技术、工艺优化、实时监控、数字大坝等内容; 检测与监测类文章 8 篇, 涉及填筑质量、快速检测、移动试验等质量检测技术和监测设计、信息管理、资料分析等安全监测技术等内容。

本书可供科研设计、施工及管理等部门的学生、专家和工程技术人员阅读, 也可供大专院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

深厚覆盖层上超高土石坝筑坝关键技术研讨会论文集/  
中国水力发电工程学会, 中国大唐集团有限公司, 中国水  
力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会编. — 北  
京: 中国水利水电出版社, 2018. 8  
ISBN 978-7-5170-6997-3

I. ①深… II. ①中… ②中… ③中… III. ①高坝—  
土石坝—学术会议—文集 IV. ①TV641.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第232323号

书 名	深厚覆盖层上超高土石坝筑坝关键技术研讨会论文集 SHENHOU FUGAICENG SHANG CHAOGAO TUSHIBA ZHUBA GUANJIAN JISHU YANTAOHUI LUNWENJI
作 者	中国水力发电工程学会 中国大唐集团有限公司 编 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 29.75印张 705千字
版 次	2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	135.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 《深厚覆盖层上超高土石坝筑坝关键技术研讨会论文集》

## 编 委 会

顾 问：马洪琪

主 任：杨泽艳

副 主 任：李文谱 陈东平 李世东 熊 雄 吴高见  
余 挺

委 员（按姓氏笔画排序）：

王亚文 王君利 王富强 付 强 冯业林  
朱 晟 朱永国 孙来成 吴晓铭 吴毅瑾  
何顺宾 张 丹 张小春 张俊侦 张喜英  
陈正文 周 浪 胡金山 姜长飞 徐泽平  
湛正刚 熊泽斌 樊 鹏

编 辑（按姓氏笔画排序）：

王立涛 王富强 邓山翔 任 磊 刘 军  
孙 卓 吴毅瑾

# 序

我国西部地区在建和拟建的一批高坝均位于高海拔地区，地质条件复杂，地震烈度高，自然环境恶劣，交通不便。土石坝对地基的适应能力强，抗震能力高，造价低，是最具竞争力的坝型。

在我国已建的约 9.8 万座大坝中，土石坝约占 90%，但大多是中低坝。2000 年建成的小浪底斜心墙堆石坝是新中国成立后建成的首座超过百米的高坝。2013 年建成的糯扎渡心墙堆石坝坝高 261.5m，在小浪底的基础上跨越了 100m 台阶，是世界第三高坝。在变形稳定与协调、渗流控制、高坝抗震安全方面解决了许多重大技术问题，而且首次采用数字大坝技术控制施工质量，在我国高土石坝建设史上具有里程碑意义，其经验为其后建设和将要建设的 300m 级高土石坝提供了有益的借鉴。

长河坝水电站心墙堆石坝坝高 240m，建造在 50m 深厚覆盖层上，属于 300m 级高坝。长河坝建设的亮点，除完善了数字大坝技术以外，还研发了土石坝精细化施工的系列机械，如大坝垫层混凝土浇筑及基面泥浆喷涂专用设备、界面双料摊铺器（实现了心墙和反滤料的精确摊铺）、坝料智能加水系统和无人驾驶振动碾等。此外还研发了基于信息技术的质量检测新方法，如数字图像级配快速检测法和三维扫描填筑压实度检测技术等，为改变传统的土石坝质量检测技术提供了新途径。

以上两座典型大坝的建设经验，为正在建设的两河口（坝高 295m）和双江口（坝高 312m）心墙堆石坝积累了丰富的经验，将为我国高土石坝的安全建设起到积极的推动作用。

中国水力发电工程学会和中国大唐集团有限公司依托长河坝的建设经验，组织召开全国高土石坝关键筑坝技术研讨会，并编纂了论文集，供从事土石坝设计、科研、施工和教学的科技工作者参考，很有裨益，故乐以作序。

中国工程院院士：马洪琪

2018 年 1 月 22 日

# 前 言

## FOREWORD

继小浪底、瀑布沟等坝高 160m 以上的高土心墙堆石坝成功建设后，超高土心墙堆石坝建设又取得喜人成就，先后有糯扎渡和长河坝 240m 以上超高土心墙堆石坝建成投运，两河口和双江口 300m 级特高土心墙堆石坝开工建设。长河坝水电站工程总库容近 11 亿  $\text{m}^3$ ，装机容量为 2600MW，高度 240m 的砾石土心墙堆石坝整体建在深约 50m 的覆盖层上，为国内外深厚覆盖层上最高的土石坝，建设技术难度极大。工程施工期建设各方针对关键技术开展了大量创新研究和工程应用工作，为工程顺利建设提供了强有力的技术支持。工程初期运行表明，大坝性态良好。

为及时总结和交流深厚覆盖层上超高土石坝设计、施工、研究和管理等建设经验，中国水力发电工程学会与大唐国际发电股份有限公司决定以长河坝深厚覆盖层上超高土石坝建设工程为背景，联合组织召开了全国高土石坝关键筑坝技术研讨会，会议由四川大唐国际甘孜水电开发有限公司和中国水利水电第五工程局有限公司承办、中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会协办。会议主题为“深厚覆盖层上超高土石坝筑坝关键技术研究与应用”，据此征集论文，出版论文集。会议第一轮通知发出后，得到长河坝参建单位和业界同行的热烈响应与大力支持。会议共收到论文 57 篇，其中涉及长河坝大坝工程的有 49 篇，涉及两河口、双江口、苗尾、斜卡及秘鲁查格亚等土石坝工程的有 8 篇。

论文集收录综述性文章 6 篇，涉及建设管理、特点难点和关键技术等内容；坝料与试验类文章 8 篇，涉及土料场复查，心墙土料、接触土料、反滤料和堆石料的特性、试验和填筑等内容；设计与计算类文章 14 篇，涉及防渗体、堆石体、坝基廊道的结构设计和渗流计算、数值模拟、水力劈裂及抗震安全等计算分析等内容；施工与管理类文章 21 篇，涉及坝料制备、道路规划、上坝运输、填筑技术、工艺优化、实时监控、数字大坝等内容；检测与监测类

文章 8 篇，涉及填筑质量、快速检测、移动试验等质量检测技术和监测设计、信息管理、资料分析等安全监测技术等内容。

上述文章以长河坝特高土心墙堆石坝工程建设关键技术为主，还包括其他土心墙堆石坝和混凝土面板堆石坝工程技术。文集内容丰富，经验可贵，基本反映了长河坝等超高土石坝工程关键技术研究与应用的最新成果，参考价值极高，是难得的超高土石坝工程技术资料。期待这本论文集能够给全国土石坝工程技术人员提供最新的资讯，激发创造力，推动我国水利水电工程技术进步和健康发展。借此，也向论文作者、审查专家表示衷心感谢！

编者

2018 年 1 月

# C ONTENTS

# 目录

## 序 前言

### ► 综述

- 高土石坝安全建设重大技术问题 ..... 马洪琪 迟福东 (3)
- 长河坝水电站大坝工程建设管理综述 ..... 熊 雄 (18)
- 长河坝水电站深厚覆盖层超高砾石土心墙堆石坝关键筑坝技术应用 ..... 张小春 (24)
- 300m 级高心墙堆石坝施工关键技术研究与应用 ..... 吴高见 樊 鹏 韩 兴 (30)
- 强震区深厚覆盖层长河坝水电站砾石土心墙堆石坝关键施工技术创新综述  
..... 由广昊 (37)
- 长河坝大坝工程特点难点及应对措施综述 ..... 孙周辉 樊 鹏 (43)

### ► 坝料与试验

- 长河坝水电站土料场施工复查 ..... 刘 军 (53)
- 长河坝水电站砾石土心墙料强度与变形特性试验研究  
..... 左永振 潘家军 赵 娜 (58)
- 长河坝水电站大坝心墙高塑性黏土填筑质量检测 and 成果分析  
..... 保华富 李伟杰 王 磊 庞 桂 (66)
- 长河坝水电站心墙料与反滤料组合渗透试验研究  
..... 李 玫 赵 娜 左永振 定培中 (74)
- 长河坝水电站大坝堆石料及过渡料填筑质量检测 and 成果分析  
..... 庞 桂 保华富 李伟杰 杨 萍 (84)
- 粗粒料变形特性尺寸效应与长河坝堆石料现场变形参数研究  
..... 汪小刚 温彦锋 邓 刚 于 沫 陈 兵 张延亿 张幸幸 张茵琪 (94)
- 备料措施在长河坝水电站大坝工程中的应用 ..... 由广昊 杨 伟 (105)
- 长河坝水电站大坝反滤料填筑质量检测 and 成果分析  
..... 保华富 杨 萍 庞 桂 胡 鹏 (110)

## ►设计与计算

超高土石坝天然宽级配砾石土料勘察——以长河坝水电站汤坝料场为例

- ..... 胡金山 黄润太 张安川 凡 亚 刘永波 闵勇章 曹建平 (123)
- 长河坝砾石土心墙堆石坝三维地震反应分析 ..... 杨 星 张 丹 李红军 (131)
- 长河坝水电站深厚覆盖层上超高心墙堆石坝设计研究 ... 张 丹 何顺宾 伍小玉 (136)
- 长河坝大坝施工期位移反分析 ..... 周正军 索慧敏 何顺宾 张 丹 (144)
- 长河坝水电站渗流控制与渗流计算分析 ..... 吴梦喜 伍小玉 张 丹 (152)
- 高堆石坝细观分析方法研究进展 ..... 周 伟 王 叶 徐 琨 常晓林 (163)
- 高心墙堆石坝水力劈裂风险分析 ..... 吴梦喜 韦 巍 何蕃民 伍小玉 (175)
- 高心墙堆石坝三维耦合模型渗流边界处理方法探讨 ..... 杨连枝 伍小玉 吴梦喜 (185)
- 超高心墙堆石坝及地下厂房渗流分析与控制  
..... 段 斌 李善平 肖培伟 唐茂颖 李永红 (193)
- 基于子模型法的高堆石坝坝基廊道抗震安全性研究  
..... 曹学兴 何蕴龙 张 丹 熊 堃 (205)
- 聚脲喷涂材料在长河坝水电站防渗体系中的应用 ..... 张 鹏 姚 娇 (218)
- 查格亚面板堆石坝稳定性分析 ..... 何燕云 朱爱莉 (225)
- 斜卡面板堆石坝防渗系统的三维辅助设计 ..... 周 涛 柴 瑞 (231)
- 斜卡水电站大坝混凝土面板裂缝处理 ..... 柴 瑞 周 涛 张秋红 (238)

## ►施工与管理

- 强震区深厚覆盖层 300m 级长河坝水电站大坝快速施工方法探讨 ..... 由广昊 (247)
- 长河坝水电站心墙堆石坝坝料上坝运输过程实时监控应用与分析  
..... 王佳俊 肖楚璐 由广昊 刘建坤 马鹏奎 (253)
- 长河坝水电站大坝坝料运输跨心墙技术 ..... 杨 伟 (259)
- 长河坝水电站心墙堆石坝砾石土超径剔除工艺 ..... 薛 凯 刘鑫升 姚科伟 (264)
- 长河坝水电站大坝智能施工信息管理系统的开发与应用  
..... 周广稳 韩 兴 侯成林 (272)
- 长河坝水电站坝料跨心墙运输技术 ..... 薛 凯 芦亚涛 汪 海 (280)
- 反轨液压滑模在长河坝水电站的应用 ..... 陈 曦 韩 兴 黄 哲 董 武 (289)
- 长河坝水电站大坝度汛填筑施工综述 ..... 薛 凯 (296)
- 振动碾无人驾驶技术的研发与工程应用 ..... 韩 兴 朱 剑 (309)
- 土石坝心墙分界面双料摊铺器的研制与应用 ..... 周广稳 韩 兴 刘东方 (319)
- 浅谈长河坝水电站大坝填筑施工质量控制 ..... 裴 伟 韩 兴 杨培青 孙国兴 (325)
- 长河坝水电站大坝砾石土心墙料含水率调整工艺及设备选择  
..... 熊 亮 杨培青 陈 曦 (332)

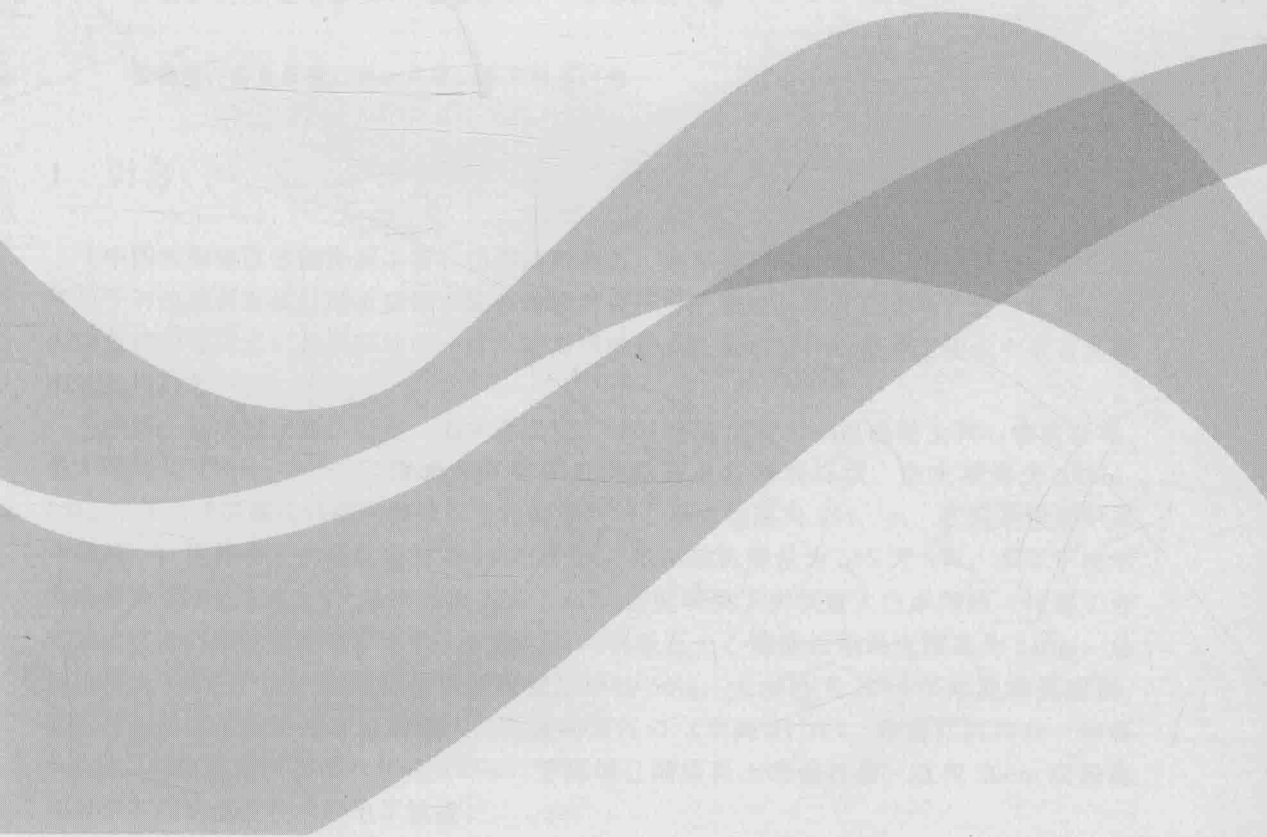
微电脑控制反滤料精确掺配生产技术实践 .....	任俊友	周北北	罗强	(338)
LNG 环保自卸汽车在长河坝工程中的推广应用 .....	陈曦	黄哲		(344)
无线数据传输车载加油机在长河坝水电站大坝施工中的应用 .....	张建栋	付火龙		(349)
GPS 数字化监控在长河坝水电站中的应用 .....	孙国兴	韩兴	张鹏	裴伟 (355)
长河坝水电站数字化信息管理系统的建设与应用 .....	王洋	曹海君	韩兴	张建栋 (361)
谈长河坝电站大坝施工安全管理对策 .....				侯成林 (368)
两河口大坝工程掺砾土料“平铺立采”工艺参数敏感性分析与技术控制措施 .....			熊亮	杨金平 (376)
双江口 300m 级砾石土心墙堆石坝施工阶段填筑道路规划 .....			刘经彪	(383)
长河坝水电站大坝心墙区分区流水作业 .....	由广昊	杨伟		(393)

## ► 检测与监测

长河坝水电站大坝砾石土心墙填筑质量检测 and 成果分析 .....	保华富	李伟杰	庞桂	(401)	
长河坝水电站砾石土心墙料压实度现场检测指标选择 .....			田中涛	(411)	
快速检测方法在大坝砾石土心墙填筑中的应用 .....	江万红	车维斌	陈世文	陈希 (418)	
大坝土料填筑快速检测移动试验室的研制与应用 .....	车维斌	江万红	郭林平	王福托 (426)	
长河坝特高土石坝安全监测设计 .....	伍文锋	税思梅		(433)	
长河坝特高土石坝首次蓄水期安全监测资料分析 .....	伍文锋	税思梅		(441)	
长河坝水电工程中大坝安全监测信息的动态管理 .....	王振	吕明明	刘军	冯玉峰	李元元 (450)
高混凝土面板堆石坝安全监测若干问题的讨论 .....			谭恺炎	胡迪忠 (456)	

# 深厚覆盖层上超高土石坝筑坝关键技术研讨会 论文集

综述





# 高土石坝安全建设重大技术问题

马洪琪 迟福东

(华能澜沧江水电股份有限公司, 云南昆明 650214)

## 摘要

土石坝由于对地基具有良好的适应性、能就地取材及充分利用建筑物开挖渣料、造价较低、水泥用量较少等优点,是西部地区一批拟建高坝的重点比选坝型。糯扎渡高心墙堆石坝的成功建设,研究解决了250m级土石坝重大关键技术难题。本文通过系统总结已建成的糯扎渡等高心墙堆石坝建设的经验,凝练高土石坝建设面临的变形控制、渗流控制、坝坡抗滑稳定、泄洪安全及控制、大坝安全建设与质量控制、安全评价及预警等关键科学技术问题,全面深入论述了已有的研究成果和基本结论,为未来300m级高土石坝建设提供参考和重要技术支持。

关键词: 高土石坝; 安全建设; 重大技术问题

## 1 引言

中国西部地区水能资源丰富,但多高山峡谷,地形地质条件复杂,交通不便,而土石坝由于对地基具有良好的适应性、能就地取材及充分利用建筑物开挖渣料、造价较低、水泥用量较少等优点,是西部地区一批拟建高坝的重点比选坝型,也是坝工建设中最有发展前景的坝型之一。

中国土石坝建设起步较晚,但发展很快。2001年建成黄河小浪底黏土斜心墙堆石坝,最大坝高为160m。2009年建成大渡河瀑布沟砾石土心墙堆石坝,最大坝高为186m。2012年年底建成澜沧江糯扎渡砾石土心墙堆石坝,最大坝高为261.5m,在同类坝型中居中国第一、世界第三;填筑方量为3432万 $m^3$ ,电站装机容量为585万kW,多年平均年发电量为239亿 $kW \cdot h$ ,总库容为237亿 $m^3$ ,研究解决了多项重大技术问题,代表了近年来中国土石坝的最高建设水平。大渡河长河坝砾石土心墙堆石坝最大坝高为240m,总填筑量为3457万 $m^3$ ,心墙部位坝基覆盖层厚达50m,大坝已于2016年年底填筑到顶。随着西部地区水能资源开发的深入,大渡河双江口(坝高312m)、雅砻江两河口(坝高295m)、西藏澜沧江如美(坝高315m)等高坝已陆续提上建设日程。这些300m级超高坝对土石坝的建设技术提出了挑战。

本文系统总结了糯扎渡等典型高土石坝建设的成功经验,凝练出高土石坝建设面临的

变形控制、渗流控制、坝坡抗滑稳定、泄洪安全及控制、大坝安全建设与质量控制、安全评价及预警等重大技术问题，全面深入论述了已有的研究成果和基本结论，为未来 300m 级高土石坝建设提供参考和重要技术支持。

## 2 高土石坝变形稳定及控制技术

变形稳定及控制是高土石坝建设的核心问题。从已建的几座高土石坝的运行状况看，变形问题及其导致的防渗体裂缝和大坝渗漏等是影响高土石坝安全运行的最重要因素。高土石坝变形稳定控制涉及的关键技术有筑坝材料特性试验、心墙土料改性、堆石料本构模型及大坝变形计算、坝体结构与分区、裂缝计算分析与控制等。

### 2.1 筑坝材料特性试验

通过糯扎渡水电工程筑坝材料的室内、现场及数值试验研究，明确了高心墙堆石坝筑坝材料必须开展的试验研究项目，并通过试验组数与试验成果误差关系的研究，建议了各项试验一般应完成的试验组数，见图 1。

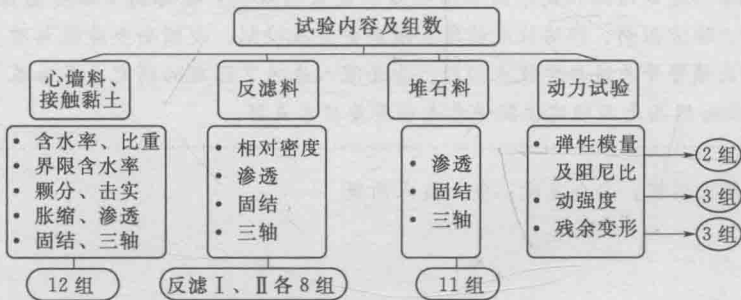


图 1 高心墙堆石坝筑坝材料试验项目及组数建议

近年来，许多研究者利用颗粒体离散元等数值方法，从细观层次上开展模拟堆石颗粒组构的数值试验。数值试验能够方便快捷地进行大量的敏感性分析，观测堆石料细观组构的演化过程，为研究堆石料细观力学行为及缩尺效应提供了有效手段。

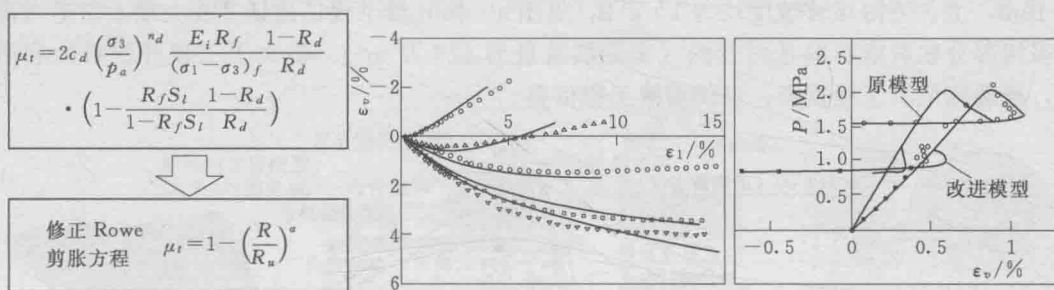
### 2.2 心墙土料改性

高土石坝为满足心墙防渗、变形和强度的要求，一般都需要对天然防渗土料进行改性。主要有两类改性方式：一类是针对颗粒偏细、黏粒含量偏高、力学性能低的情况，采用人工掺砾进行改性，如糯扎渡、双江口、两河口等工程；另一类是针对细粒少、砾石多、含水率偏低的情况，采用人工剔除超径砾石并加水改性，如长河坝、瀑布沟、如美等工程。结合天然土料场的实际特性，还可通过不同土料之间掺配的方式进行改性，如长河坝将部分偏粗料（ $P_5$  含量为 50%~65% 的连续级配砾石土）与部分偏细料（ $P_5$  含量小于 35% 的连续级配砾石土）按一定比例掺配改性，既充分利用了质量尚可的天然土料，又简化了改性工艺。无论采取哪种改性方式，都应使心墙土料具有良好的级配关系曲线和合适的砾石含量。结合糯扎渡、长河坝等工程的大量试验研究和工程实践，建议对于 200~300m 级高土石坝，心墙土料合适的  $P_5$  含量范围宜为 30%~50%。

糯扎渡心墙掺砾土料  $P_5$  含量设计值为 35%，碾压过程三阶段现场检测  $P_5$  含量平均值分别为 36.1%、36.2%、34.1%。长河坝心墙土料现场检测结果表明， $P_5$  含量平均值为 44.4%，最大值为 56.1%，最小值为 32.2%。

### 2.3 堆石料本构模型及大坝变形计算

对邓肯-张 E-B、清华 K-G、沈珠江双屈服面弹塑性模型等常用本构模型进行分析对比，提出堆石体修正 Rowe 剪胀方程，改进了沈珠江双屈服面模型，使计算成果更为可靠，见图 2；采用直接定义塑性流动方向、加载方向和塑性模量的方法，构建了适用于静动力分析的堆石料广义塑性本构模型。结合国内多个高土石坝的实践经验，建议邓肯-张 E-B 模型作为大坝应力变形计算的基本模型，同时采用 1~2 个其他模型进行对比验证，推荐改进的沈珠江双屈服面弹塑性模型。



(a) 对剪胀方程的修正

(b) 与糯扎渡主堆石料试验成果对比

(c) 对复杂应力路径的描述

图 2 修正的沈珠江双屈服面弹塑性模型

鉴于目前堆石料本构模型的局限和坝料参数不准确，可通过反演分析修正计算模型及参数。依托糯扎渡工程，结合人工神经网络模型及有限元方法建立了高土石坝变形反演分析系统，可以反演坝料的邓肯-张 E-B 模型参数、坝料流变参数和湿化变形参数等，并按反演参数进行大坝变形的计算分析及预测，见图 3。

### 2.4 高土石坝变形控制原则

近年国内外高土石坝工程实践表明，大多 200m 级高土石坝的实测沉降变形超过了最大坝高的 1%。结合工程实际，心墙堆石坝变形控制应遵循总量控制及心墙与坝壳料变形协调相结合的原则。建议通过适当提高心墙土料的变形模量以控制心墙土料和坝体堆石体的模量差，降低坝壳堆石料对心墙的拱效应。结合糯扎渡等工程的实践经验，一般情况下应控制心墙土料邓

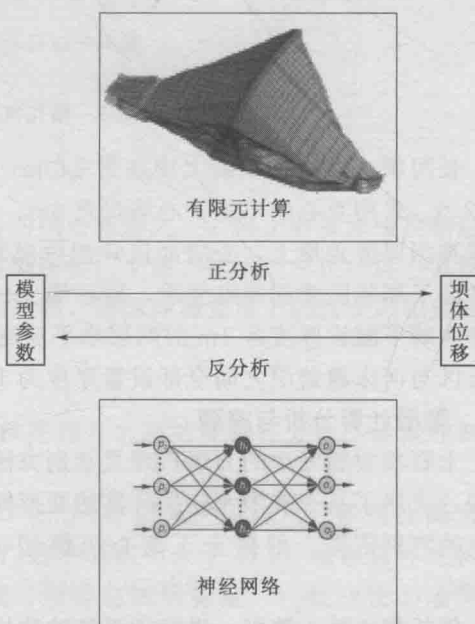


图 3 土石坝变形反演分析流程

肯-张 E-B 模型参数  $K$  的中值平均值大于 350。

## 2.5 坝体结构

国内外已建坝高 200m 以上的心墙堆石坝中,有 6 座采用直心墙,5 座(含因故未建成的罗贡大坝)采用斜心墙。斜心墙有利于降低心墙拱效应,但施工难度大,造价高。建议根据地形地质条件,在条件许可时采用直心墙,因其施工方便且更经济,同时抗震安全性更好。国外 200m 以上心墙坝坝坡坡度一般上游为 1:2.2~1:2.6、下游为 1:2.0~1:2.2;国内外 200m 以上心墙坝,除糯扎渡外,上游坝壳内均不采用含软岩的堆石料;除长河坝外,均修建在基岩上。

糯扎渡心墙堆石坝最大坝高为 261.5m,坝顶宽度为 18m,经研究论证,大坝上游坝坡坡度为 1:1.9、下游坝坡坡度为 1:1.8,提高了经济性。采用直心墙形式,心墙顶宽为 10m,上、下游坝坡坡度均为 1:0.2,见图 4。糯扎渡工程还论证了在大坝上游适当范围采用部分软岩堆石料是可行的(实际填筑量为 478 万  $\text{m}^3$ ),扩大了工程开挖料的利用率,显著降低了工程投资,可供后续工程借鉴。

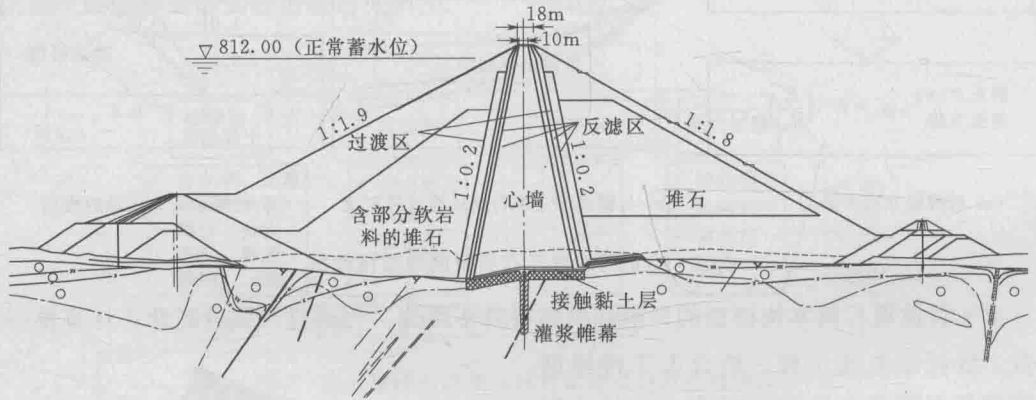


图 4 糯扎渡心墙坝最大横剖面

长河坝心墙堆石坝最大坝高为 240m,坝顶宽度为 16.00m,上、下游坝坡坡度均为 1:2.0。采用直心墙形式,心墙顶宽 6m,上、下游坝坡坡度均为 1:0.25,见图 5。长河坝建在深厚覆盖层上,心墙部位开挖后尚有约 50m 厚的覆盖层,因此大坝的结构分区充分考虑了坝基防渗的特殊要求,除心墙上、下游侧设反滤层的常规措施外,心墙底部在坝基防渗墙下游设厚度各 1m 的两层水平反滤层与心墙下游反滤层相接,心墙下游过渡区及堆石区与河床覆盖层之间全部设置厚度为 1m 的反滤层。

## 2.6 裂缝计算分析与控制

土石坝裂缝发生的力学机理及判别方法是土石坝设计科研中的一个难题。结合糯扎渡工程,发展了基于有限元变形计算的变形倾度有限元法,可采用变形倾度作为土石坝裂缝发生的判别依据。根据土工离心机模型试验结果,证明土石坝工程中临界倾度值约为 1%。

依托糯扎渡心墙坝,进行了系统的抗拉特性试验,探讨了心墙土料的抗拉断裂特性和机理,提出了心墙黏土的拉压联合强度准则和本构模型;提出了心墙黏土基于无单元法的

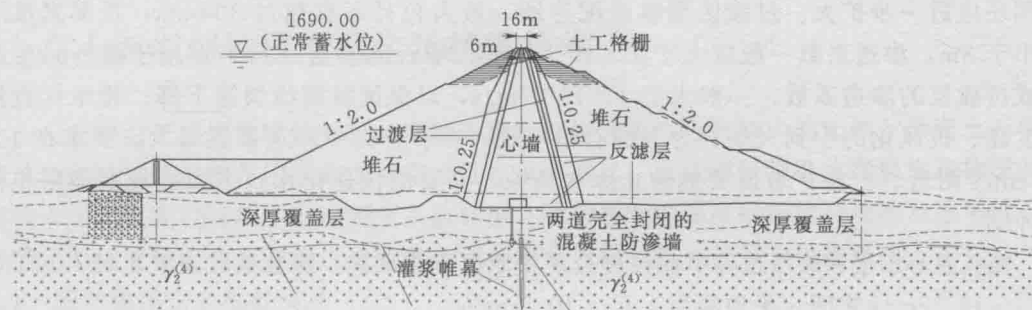


图5 长河坝心墙坝典型横剖面

弥散裂缝模型，发展了基于无单元-有限元耦合方法的土石坝张拉裂缝三维仿真计算程序系统，见图6。

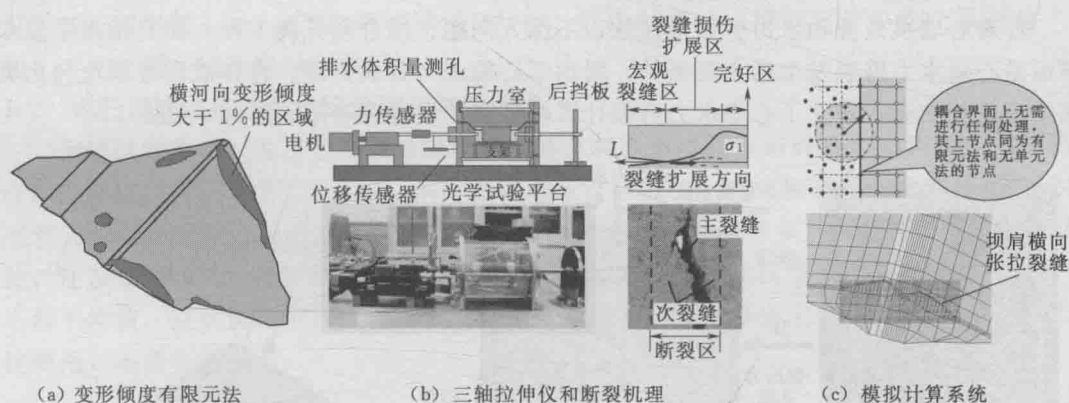


图6 土石坝裂缝计算分析及判别

### 3 高土石坝渗流控制技术

渗流稳定及控制是高土石坝安全建设和运行的核心问题之一。高土石坝渗流控制应在深入开展工程地质及水文地质勘察的基础上，遵循防渗、反滤、排水“三位一体、有机结合、优化配置”的原则，做好各区域渗透指标的控制，对深厚覆盖层上的高土石坝还需对坝基防渗做专门研究和处理。

#### 3.1 高土石坝渗流控制关键技术指标

在收集整理国内外 58 座土石坝渗流控制资料基础上，总结推荐各分区的渗流控制关键技术指标如下：

心墙作为防渗主体，渗透系数宜控制在  $10^{-6}$  cm/s 数量级，平均允许渗透比降宜控制在 2.5 左右。帷幕作为坝基与岸坡防渗关键，透水率宜不大于 3Lu，灌浆岩体的抗渗强度建议为 30 左右。反滤层作为安全关键防线，须经过试验验证，一般应使心墙抗渗坡降提高至 100 以上，并能使心墙裂缝自愈；反滤对坝基覆盖保护范围宜为  $0.33H$  (水头)，对断层及软弱岩带地基保护范围为  $0.5H \sim 1.0H$ ，对深厚覆盖层地基的保护