



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Hydro Projects—Article

## 高土石坝安全建设重大技术问题

马洪琪, 迟福东

Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 15 March 2016

Revised 29 June 2016

Accepted 24 August 2016

Available online 14 October 2016

#### 关键词

高土石坝  
安全建设  
重大技术问题

### 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,解决了250 m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300 m级高土石坝建设提供参考和重要的技术支持。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

中国西部地区水能资源丰富,但由于地处高山峡谷,地形地质条件复杂,交通不便,而土石坝因对地基基础条件具有良好的适应性、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,是坝工建设中非常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160 m。2009年建成大渡河瀑布沟砾石土心墙堆石坝,最大坝高186 m。2012年年底建成澜沧江糯扎渡砾石土心墙堆石坝,最大坝高261.5 m,在同类坝型中居中国第一、世界第三;填筑方量为 $3.432 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,电站装机容量为 $5.85 \times 10^6 \text{ kW}$ ,年平均发电量为 $2.39 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,总库容为 $2.37 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,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。目前正在建设的大渡河长河坝砾石土心墙堆石坝最大坝高为240 m,总填筑量为 $3.457 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,心墙部位坝基覆盖层厚达50 m,是当前中国正在建设的较为复杂的土石坝工程之一,截至2016年4月,已完成总填筑量的92%。随着西部地区水能资源开发的深入,大渡河双江口(坝高314 m)、雅砻江两河口(坝高295 m)、西藏澜沧江如美(坝高315 m)等高坝已逐渐提上建设日程,对300 m级超高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研究成果和基本结论,为300 m级高土石坝建设提供了重要技术支持。

\* Corresponding author.

E-mail address: [fudch@163.com](mailto:fudch@163.com)

## 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。高土石坝的变形稳定控制涉及的关键技术包括:筑坝材料特性试验技术、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. 筑坝材料特性试验技术

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结果误差关系的研究,建议了各项试验一般应完成的试验组数(见图1)。

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

为满足心墙防渗、变形和强度的要求,高土石坝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50%~65%的连续级配砾石土)与部分偏细料( $P_5$ 含量<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200~300 m级高土石坝,心墙土料合适的 $P_5$ 含量宜为30%~50%[1]。

糯扎渡心墙掺砾土料 $P_5$ 设计值为35%,碾压过程三阶段现场检测 $P_5$ 平均值分别为36.1%、36.2%和34.1%。长河坝心墙土料现场检测结果表明, $P_5$ 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KG、沈珠江双屈服面弹塑性模型等常用的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,使计算结果更为可靠(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。结合国内多座高土石坝的实践经验,建议将邓肯-张E-B模型作为大坝应力变形计算的基本模型,同时采用一两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[1]。

鉴于目前堆石料本构模型的局限和坝料参数的不准确,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

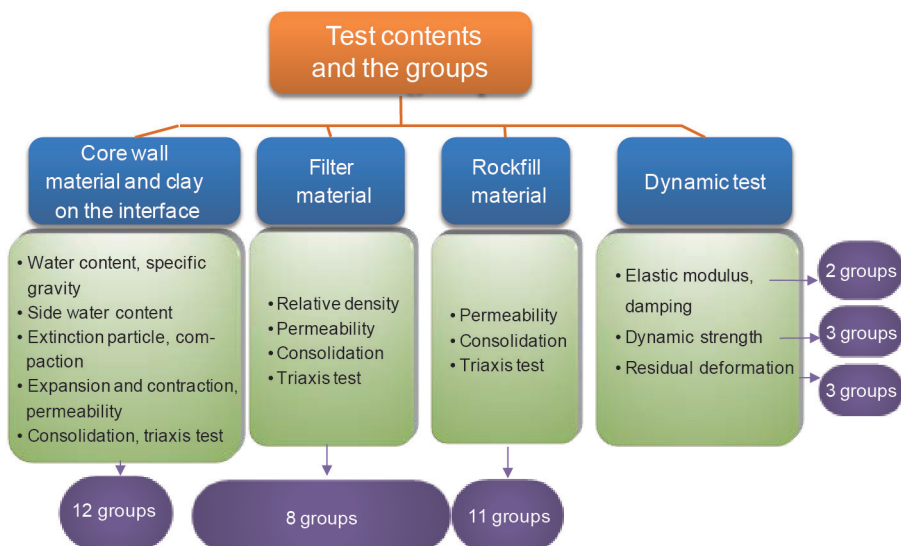


图1. 高心墙堆石坝筑坝材料试验项目及组数建议。

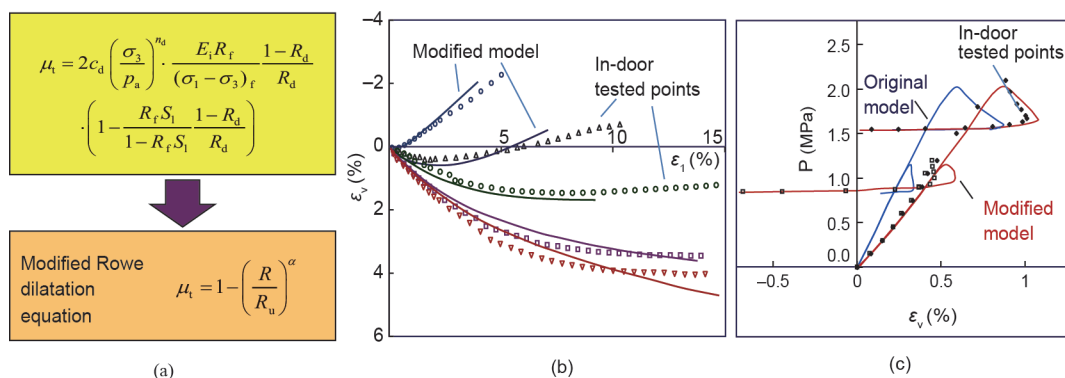


图2. 修正的沈珠江双屈服面弹塑性模型。(a) 对剪胀方程的修正；(b) 与糯扎渡主堆石料试验结果对比；(c) 对复杂应力路径的描述。

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)。

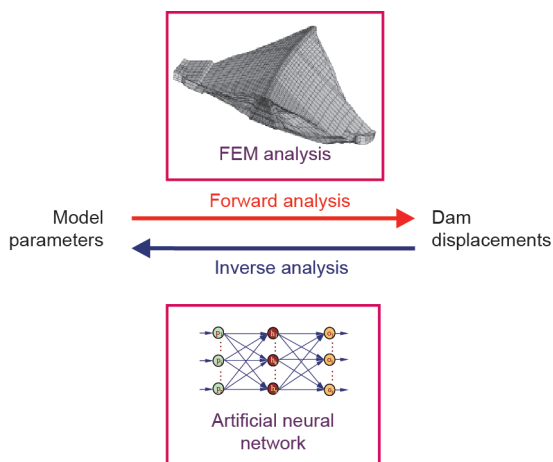


图3. 土石坝变形反演分析流程。

#### 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，多数200 m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200 m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)采用斜心墙[1]。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，抗震安全性更好。国外200 m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200 m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261.5 m，坝顶宽度为18 m，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。采用直心墙型式，心墙顶宽为10 m，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内采用部分软岩堆石料是可行的(实际填筑 $4.78 \times 10^6 \text{ m}^3$ )，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。

长河坝心墙堆石坝最大坝高为240 m，坝顶宽度为16 m，上、下游坝坡坡度均为1:2.0。采用直心墙型式，心墙顶宽为6 m，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50 m深的覆盖层，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1 m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1 m的反滤层[2]。

#### 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% [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) [1]。

### 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

收集整理了国内外58座土石坝的渗流控制资料[1]，总结推荐各分区的渗流控制关键指标如下：

心墙作为防渗主体，渗透系数宜控制在 $10^{-6} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 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 $\leq 3 \text{ Lu}$ ，灌浆岩体的抗渗强度建议在30左右。反滤层作为安全关键防

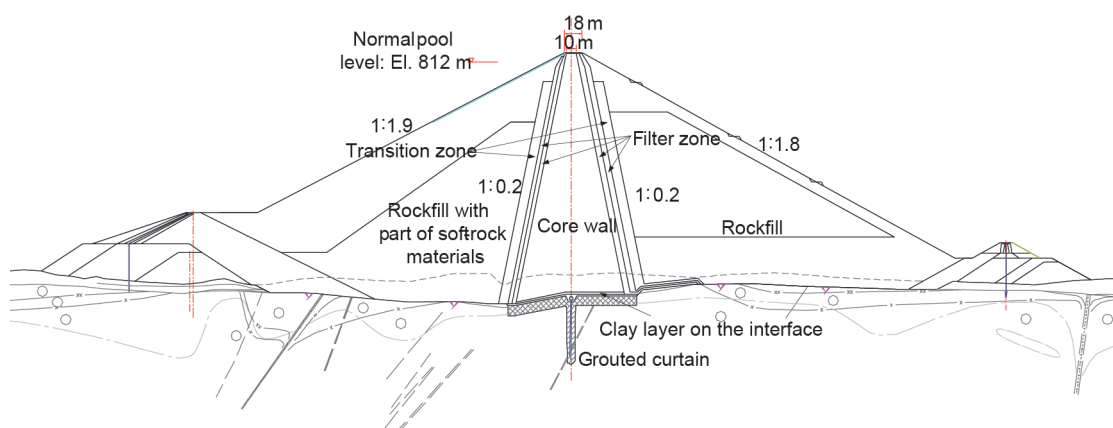


图4. 糯扎渡心墙坝最大横剖面。

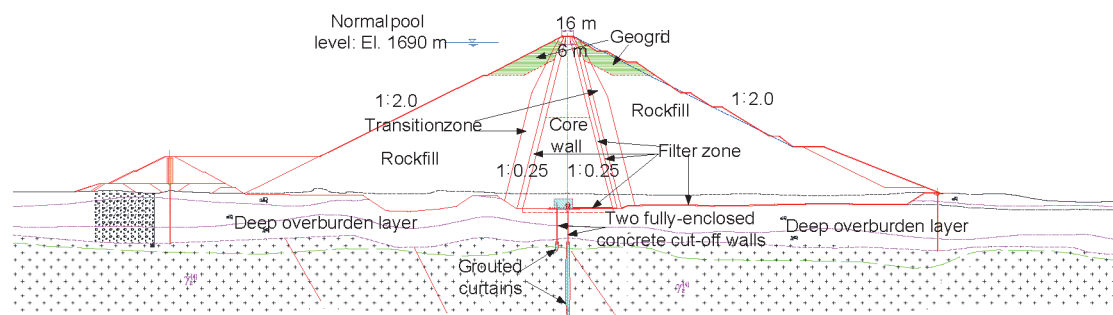


图5. 长河坝心墙坝典型横剖面。

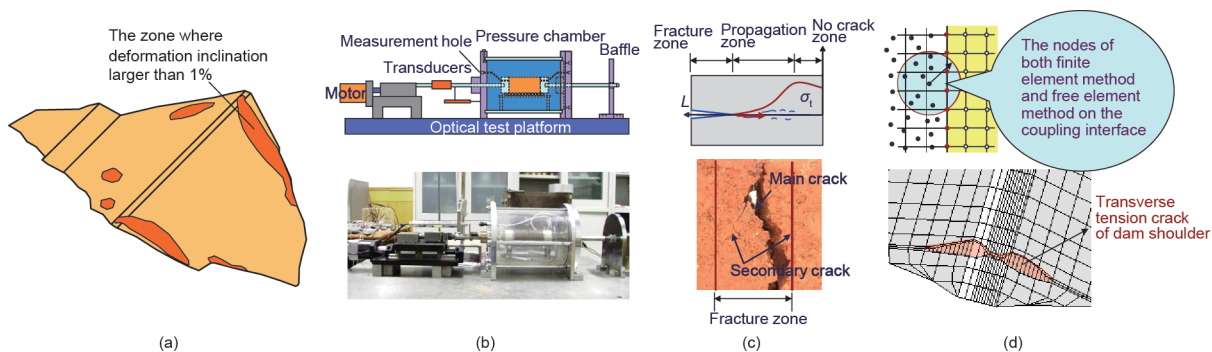


图6. 土石坝裂缝计算分析及判别。(a) 变形倾度有限元法；(b) 三轴拉伸仪；(c) 断裂机理；(d) 模拟计算系统。



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范围还应进一步扩大。过渡区要求级配连续, 最大粒径不宜超过300 mm, 顶部宽度不宜小于3 m, 渗透系数一般应大于 $1\times 10^{-3}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。堆石区渗透系数不宜小于最外一层反滤或过渡层的渗透系数, 一般大于 $1\times 10^{-2}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 以保证浸润线快速下降。排水区宜用强度高、抗风化的中到大块石为主的石料填筑, 在各分区中渗透系数最大, 要求在 $1\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 附近。上游护坡既要能防止库水掏蚀, 又要能快速排水; 下游护坡要能防止雨水冲刷。

糯扎渡心墙土料碾压过程中进行现场原位渗透试验, 渗透系数处于 $2.02\times 10^{-7}\sim 8.47\times 10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 平均值为 $4.05\times 10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

长河坝心墙土料原位渗透试验结果表明: 心墙土料渗透系数平均值为 $2.07\times 10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最小值为 $1.54\times 10^{-7}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最大值为 $8.8\times 10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 破坏坡降平均值为7.22, 最小值为2.71, 最大值为9.90。

### 3.2. 心墙水力劈裂机理及数值仿真方法

针对心墙拱效应和水力劈裂机理认识不深入的问题, 结合糯扎渡工程, 研究提出了渗水弱面是心墙水力劈裂发生的主要条件, 揭示了心墙水力劈裂机理。将弥散裂缝理论与比奥固结理论相结合, 建立了心墙水力劈裂计算模型及扩展过程有限元算法(见图7) [1]。

### 3.3. 深厚覆盖层区域坝基防渗技术

长河坝工程研究了深厚覆盖层上高土石坝坝基防渗技术。主要包括: 心墙下坝基覆盖层采用两道全封闭混凝土防渗墙防渗, 两岸及防渗墙底强透水基岩采用灌浆帷幕防渗; 心墙下游过渡区及堆石区与河床覆盖层之间

全部设置反滤层, 以加强对覆盖层渗透破坏的保护。

长河坝防渗墙及防渗帷幕主要技术参数为: 以大坝轴线及主防渗墙所在平面构成主防渗面, 主防渗面上以基岩透水性 $\leq 3\text{ Lu}$ 作为相对不透水层界限, 灌浆帷幕深入相对不透水层5 m。主防渗帷幕采用两排, 孔距为2 m, 主防渗墙下通过墙内埋管灌浆的排距为1 m, 在两岸排距为1.5 m。副防渗墙位于主防渗墙前, 两墙净距为14 m。为减小两岸绕渗, 提高副防渗墙承担水头的比例, 对副防渗墙所在平面内强透水岩体进行了帷幕灌浆(深度约为30 m), 并且在两道防渗墙之间设置连接帷幕(深度约为40 m), 帷幕灌浆为两排, 孔距为2 m。

## 4. 高土石坝坝坡抗滑稳定及抗震技术

土石坝由于采用散粒体材料, 坝坡失稳在坝体失事占有较大的比例, 研究土石坝的坝坡稳定特别是地震作用下的坝坡稳定具有重要意义。高土石坝坝坡抗滑稳定及抗震的关键技术问题主要包括: 坝坡稳定安全系数标准、堆石料非线性强度指标的合理性及适用性、坝坡稳定关键——动力抗滑稳定分析方法、地震永久变形安全控制标准、抗震加固措施等。

### 4.1. 坝坡稳定安全系数标准

中国现行的土石坝规范规定1级土石坝坝坡抗滑稳定安全系数为1.5, 相应的目标可靠指标为4.2(失效概率为 $1.33\times 10^{-5}$ ), 但同时明确该标准适用于200 m以下的土石坝。文献[3,4]通过对已建和规划建设高度大于200 m的工程进行分析论证, 建议对于正常工况, 200~250 m高土石坝坝坡目标可靠指标取4.45(相应失效概率为 $5\times 10^{-6}$ ), 250 m以上的高土石坝取4.7(相应失效概率为 $1\times 10^{-6}$ ), 可以与坝坡抗滑稳定最小安全系数1.6和1.7处于同一风险控制标准。

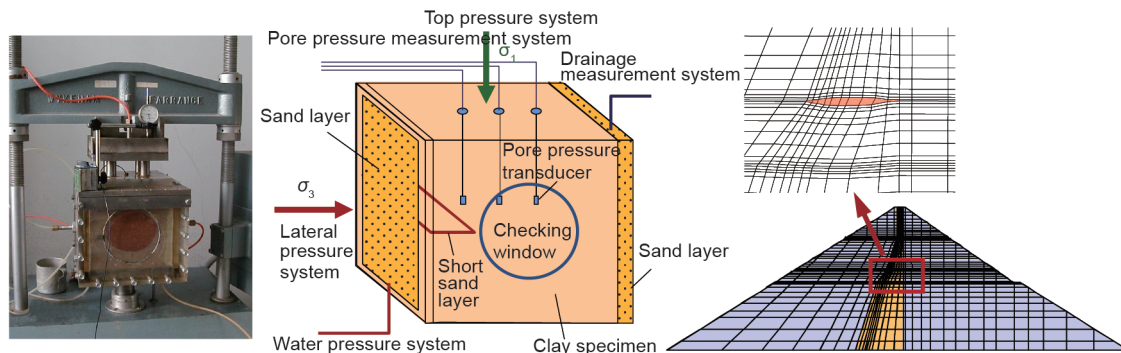


图7. 水力劈裂模型试验及数值模拟。

#### 4.2. 堆石料非线性强度指标的合理性与适用性

大量试验表明,堆石等粗粒料随着围压的升高会发生颗粒破碎现象,内摩擦角降低,摩尔强度包线向下弯曲(见图8)。同时在坝坡稳定分析中,线性指标无法找到具有实际物理意义的临界滑裂面,而非线性指标可更合理地反映坝坡的实际滑动和安全状态。因此建议采用非线性强度指标进行土石坝的坝坡稳定分析。非线性指标应采用规定组数的小值平均值,在此情况下,现行土石坝规范中对坝坡稳定允许安全系数规定的标准可以直接使用,不需要调整。

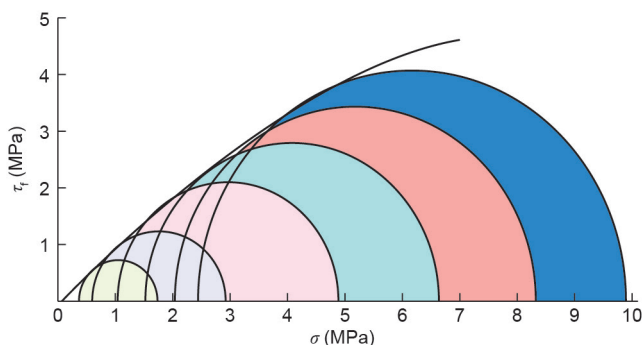


图8. 实验测定的堆石料摩尔强度包线。

#### 4.3. 坝坡稳定关键——动力抗滑稳定

坝坡稳定关键是地震作用下动力抗滑稳定。4种常用的动力抗滑稳定分析方法中,拟静力法应用范围最广,积累了丰富的工程经验,是目前进行土石坝工程抗震稳定分析的主要算法;有限元法、强度折减法、Newmark滑体变形法概念较为先进,但目前尚缺少相应的安全控制标准。

高土石坝坝坡动力稳定宜采用多种方法进行综合分析。例如,糯扎渡高心墙坝分别采用了拟静力法、考虑不同加速度分布系数的拟静力法、可靠度方法、强度折减有限元法、有限元法、Newmark滑体变形法、基于变分原理的稳定分析法等多种方法进行了坝坡动力抗滑稳定分析。结果表明,静力、设计地震工况满足规范要求且具有较高的安全储备。校核地震,安全系数接近规范允许值,安全性尚有保障。

#### 4.4. 地震永久变形安全控制标准

土石坝震害的常见表现形式是坝体裂缝,坝体出现裂缝,若继续加剧则会演化成滑坡。土石坝地震永久变形标准对应于避免土石坝地震过程中出现的潜在的可能发展为滑坡的裂缝。建议200 m级以上高土石坝的地震永久变形控制标准,以坝体上部的地震变形占该部分坝

高的比值进行控制,即以上部1/2(或1/3)坝高的坝体为研究对象,若这部分坝体的震陷率小于1.5%,则认为坝体可以承受。同时建议控制坝体不均匀震陷的倾度斜率在1.2%以内。

#### 4.5. 抗震稳定工程加固措施

坝体中上部位的加固是高土石坝抗震加固的重点。一般采用土工格栅、混凝土板梁、预制混凝土框格梁、抗震钢筋等措施。土工格栅便于施工,可在一定程度上提高坝体整体性和坝顶抗震稳定性,在瀑布沟等工程中已采用。努列克工程采用的混凝土板梁抗震结构,施工很不方便,两河口工程拟采用预制混凝土框格梁抗震结构。在综合研究对比传统抗震措施的基础上,糯扎渡工程研发应用了适用于9度设防的高心墙堆石坝的抗震措施(见图9):坝体内部不锈钢筋与坝体表面不锈钢扁钢网格组合,坝顶上、下游坝面浆砌块石护坡等。研究表明,上述措施可提高坝顶部位的整体性和抗震稳定性,减小坝坡面的浅层(表层)滑动破坏概率。

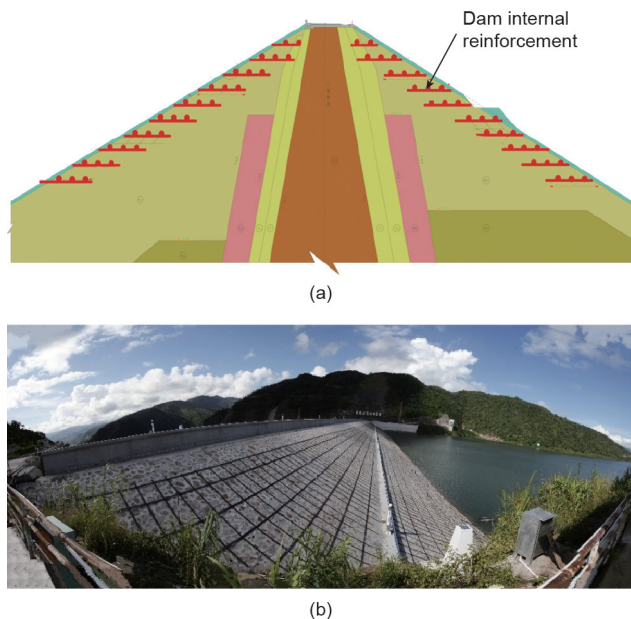


图9. 糯扎渡高心墙堆石坝新型抗震措施。

对建在深厚覆盖层上的高土石坝,还要考虑坝基抗震,如长河坝工程对下游坝基可能液化砂层以及上游坝基局部分布的砂层透镜体予以挖除处理。

## 5. 高土石坝泄洪安全及控制技术

在众多的土石坝事故原因中,由于泄水建筑物问题



特别是泄洪能力不足而造成的枢纽事故约占44%，需要引起高度重视。高土石坝的泄洪安全涉及的关键技术问题包括：防洪标准、泄洪建筑物布置、消能防冲、掺气减蚀、泄洪雾化等。

### 5.1. 防洪标准

针对高土石坝的洪水标准，在选择时一般取规范上限值，采用可能最大洪水。建议以坝体超高和泄水建筑物超泄能力相结合的原则制定泄洪建筑物安全控制标准，将部分泄水建筑物的泄水能力作为安全储备，确保各种工况下大坝不漫顶，同时应设置放空设施。

### 5.2. 泄洪建筑物布置原则

泄洪建筑物布置应结合地形地质条件、枢纽整体布置，综合考虑合适的体型和下游水流衔接要求，并经过整体水工模型试验验证。建筑物轴线在平面上应尽量选择直线，同时考虑泄洪雾化等因素。建议泄洪建筑物应以超泄能力强的溢洪道(洞)为主，泄洪隧洞为辅，尽量提高表孔的泄洪能力。

糯扎渡泄洪设施由左岸开敞式溢洪道，左、右岸各一条泄洪洞(兼具放空功能)构成。长河坝工程在河道右岸布置了两条溢洪道、一条深孔泄洪洞和一条放空洞(见图10)。

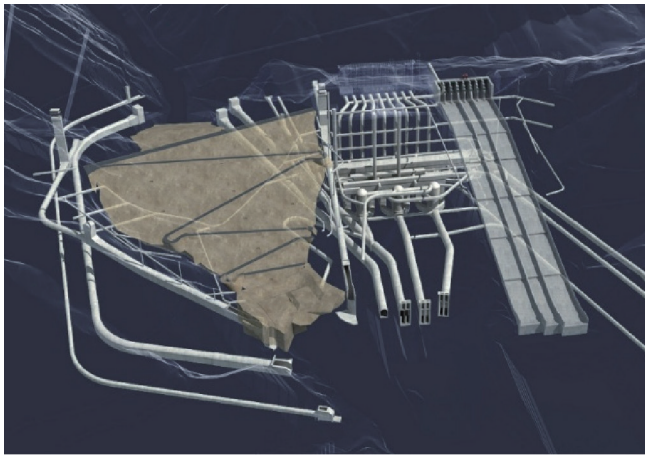


图10. 糯扎渡水电站枢纽布置图。

### 5.3. 消能防冲

高土石坝一般采用挑流消能，挑流鼻坎可采用大差动挑坎、窄缝式挑坎、挑流水股碰撞等型式，在横向或纵向上分散入水水舌，分散入水能量。防冲设计根据基岩允许抗冲流速，通过开挖消力塘加大水垫深度，并增设河岸防护结构，提高河岸防冲刷的抗力。在适量深挖

及拓宽消力塘尺寸的情况下，可采用护岸不护底的防护型式。

### 5.4. 泄洪建筑物掺气减蚀

高坝泄洪建筑物由于流量大、流速高，掺气减蚀非常重要。可在经验设计体型基础上，先采用数值模拟优化体型，得到合理的体型后，再进行物理模型试验验证。工程措施以流道体型控制为主，抗冲耐磨材料为辅。流速大于 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时应布置掺气减蚀设施；掺气设施以底部强行掺气为主，可采用挑坎式或槽式掺气。为保证泄洪隧洞通气充分，无压隧洞洞顶余幅应不小于30%，沿程洞顶需布置通气井；有压流、无压流过渡段可采用突扩跌型式布置，通过侧空腔及底空腔同时掺气。

### 5.5. 泄洪雾化

泄洪雾化是比较复杂的现象(见图11)，目前尚无成熟的研究手段，只能通过原型观测、数值模拟、理论分析等手段综合分析评价。降低泄洪雾化危害的措施主要在建筑物布置及雾化区边坡防护等方面，对雾化影响较敏感的建筑物尽量远离雾化区，雾化区边坡应同时从边坡表面及内部加强排水，以保证边坡稳定。



图11. 糯扎渡水电站泄洪。

## 6. 高土石坝安全建设及质量控制技术

有效控制坝体施工质量是高土石坝安全的关键问题。结合糯扎渡、瀑布沟、长河坝等工程，总结提出了高土石坝安全建设及质量控制关键技术，主要包括：心墙土料改性施工工艺、土石坝工程建设质量监控“数字大坝”技术、土料压实填筑控制标准及填筑质量快速检测方法等。

### 6.1. 心墙土料改性施工工艺

结合糯扎渡大坝人工掺砾改性的要求, 提出人工碎石掺砾土料成套施工工艺(见图12): 天然土料立采(高度为5~8 m)、自卸汽车运输至掺合料场; 天然土料与人工碎石水平互层铺料, 土料单层厚1.03 m, 砾石单层厚0.5 m, 推土机平料, 如此相间铺料3层, 总高控制在5 m以内; 以挖掘机立采方式使土料和碎石料得到混合, 掺混3次后装20 t自卸汽车运输至坝面; 在坝面采用后退法卸料, 平路机平料, 铺层厚度为25~30 cm, 20 t自行式振动凸块碾(激振力大于400 kN)震压8遍、行车速度 $\leq 3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  [5]。

瀑布沟工程结合心墙土料改性要求, 提出二次筛分改性工艺, 减少了筛分弃料。筛分流程为: 自卸汽车运输; 条筛一次筛分剔除大于250 mm的砾石; 方孔振动筛二次筛分剔除60~80 mm以上的砾石; 皮带机运输; 堆料场堆料; 自卸车运输上坝[6]。

长河坝工程采用了粗、细土料的掺配改性工艺措施: 用平铺立采方式进行, 粗料摊铺厚度为0.5 m, 根据现场对每层土料松铺干密度进行检测确定细料摊铺厚度; 第一层铺粗料, 第二层铺细料, 第三层铺粗料, 第四层铺细料, 如此相间铺料, 使铺料高度达到满足掺配机械工作条件; 由正铲挖掘机立采, 挖掘机斗举空中将料自然抛落, 重复3~6次, 达到充分掺合的效果。

### 6.2. 高土石坝建设质量监控“数字大坝”系统

依托糯扎渡工程, 开发了高土石坝建设质量监控“数字大坝”系统。该系统利用GPS、PDA和信息技术, 对坝料的调运、筑坝参数、试验结果和监测数据进行实时监控和信息反馈, 为大坝建设过程的质量控制与坝体安全诊断提供信息应用和支撑平台(见图13); 对振动碾的行车速度、碾压遍数、激振力和碾压轨迹进行实时监控, 确保碾压填筑质量满足要求(见图14); 利用车载

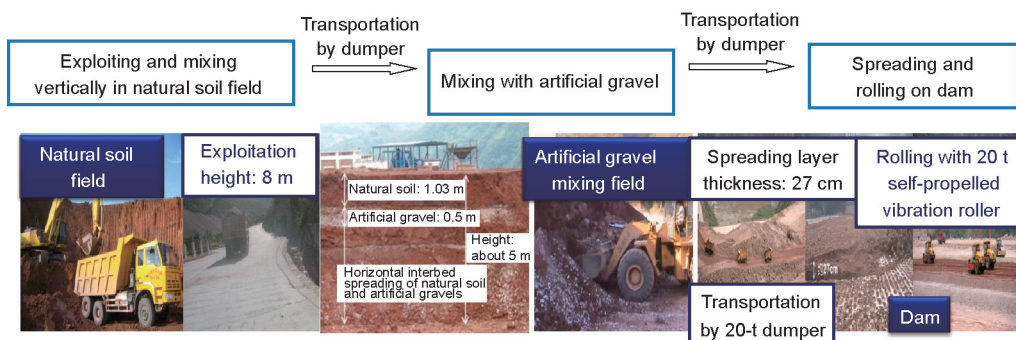


图12. 糯扎渡心墙坝人工碎石掺砾土料施工工艺流程。

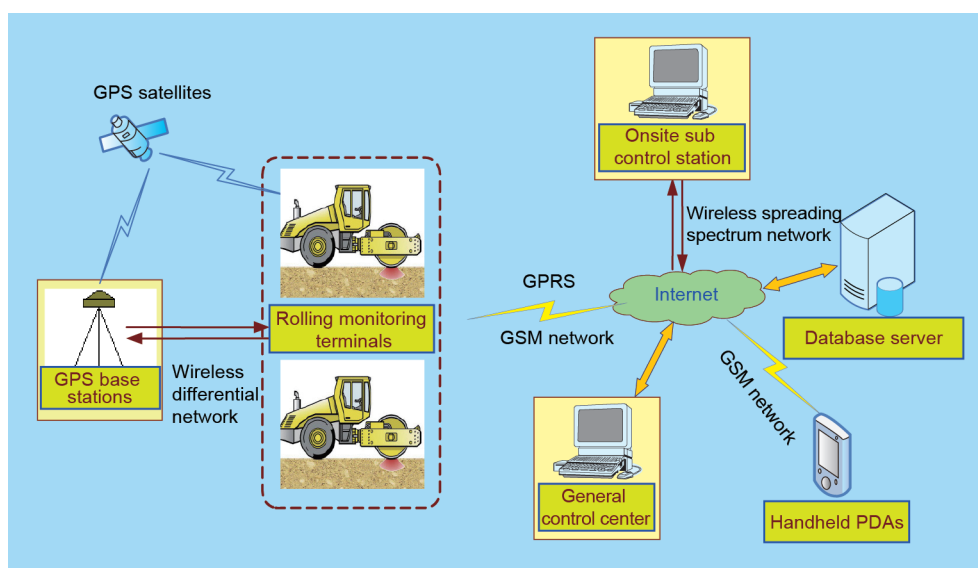


图13. “数字大坝”填筑质量实时监控原理图。



GPS定位设备，实现上坝运输车辆从料场到坝面填筑现场的全程监控，为确保坝料上坝卸料的准确性及运输车辆优化调度提供了依据[7]。

“数字大坝”系统有效提高了糯扎渡大坝施工质量监控的水平和效率，确保大坝施工质量始终处于受控状态，为高土石坝施工质量的高标准控制开辟了一条新的途径。2009—2011年，糯扎渡大坝年均填筑 $9.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，提前一年建成，“数字大坝”系统发挥了重要的支撑作用。长河坝等后续多个高土石坝工程推广应用了该系统。

### 6.3. 土料压实填筑控制标准及土料压实度快速检测方法

建议采用较大击实功能，提高填筑密实度、抗渗性和变形稳定性。糯扎渡工程土料最大粒径为120 mm，

为此专门研制出 $\phi 600 \text{ mm}$ 超大型击实仪，以研究掺砾土料的击实特性。研究表明：掺砾量50%以下时采用替代法大型击实成果代替原级配超大型击实成果对掺砾土全料进行质量控制是可行的[见图15(a)]；全料 $2690 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 功能、压实度95%时，可以达到全料 $595 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 功能、压实度100%的要求[见图15(b)]。

在掺砾土料填筑质量快速检测方法方面，对比分析了全料压实度控制法、全料压实度预控线法和细料压实度控制法。全料压实度现场检测方法试验工作量大、费时长，细料压实度现场检测方法击实功能降低，工作量大幅减少，可以满足施工进度要求，推荐采用细料 $595 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 击实功能的三点快速击实方法进行现场检测控制，并采用一定比例大型击实仪在试验室进行全料压

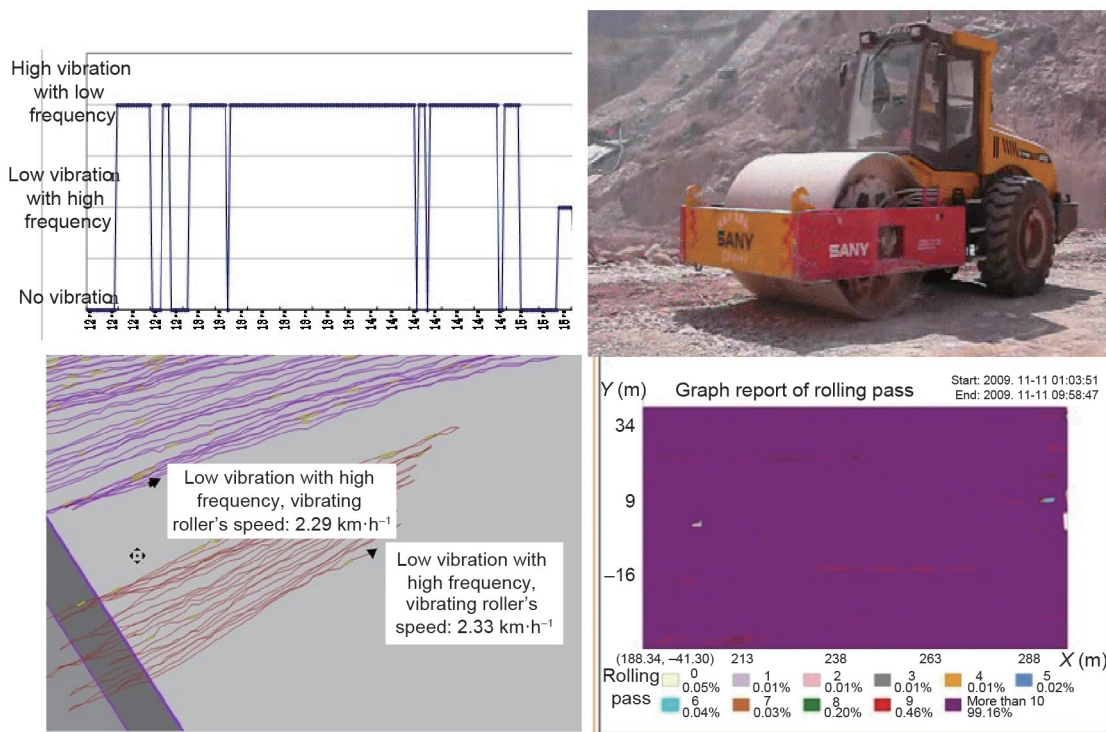


图14. 糯扎渡心墙坝填筑质量实时监控。

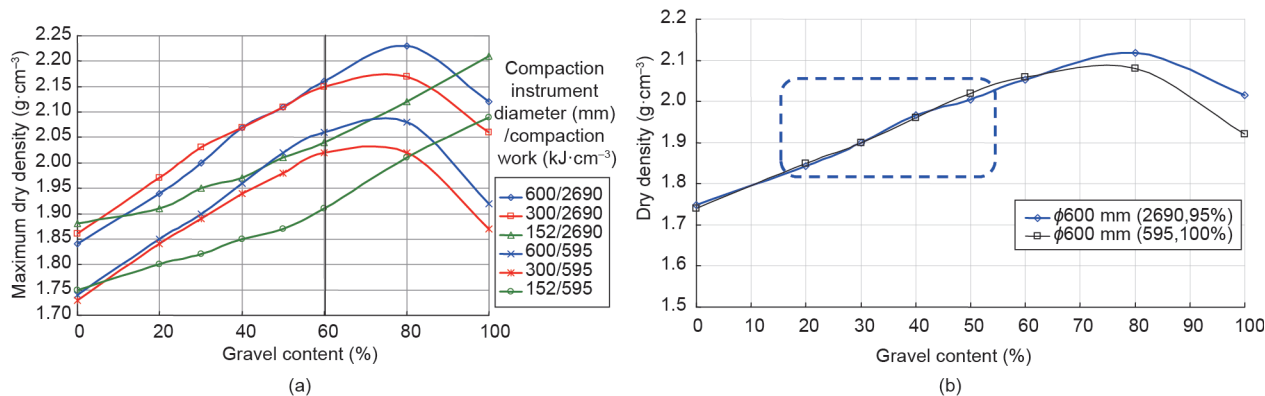


图15. 糯扎渡心墙堆石坝土料压实填筑控制标准试验研究。(a) 不同击实功能及击实仪直径下最大干密度对比；(b) 不同击实功能及压实度下全料干密度对比。

实度复核。依托糯扎渡工程还研发了填筑密实度检测的“附加质量法”，该方法工作快速、无破坏性、可大幅加快检测进度，建议在后续工程推广应用。

## 7. 高土石坝安全评价及预警管理信息系统

基于现场监测数据及先进的信息技术，建立土石坝工程安全评价及预警信息系统，对大坝安全建设、蓄水验收及全生命周期安全运行具有重要意义。

### 7.1. 大坝安全评价与预警管理信息系统

结合糯扎渡工程下闸蓄水的实际需要，研发了基于Internet远程监控的超高心墙堆石坝安全评价与预警管理信息系统(见图16)。系统集成监测数据采集与分析管理、大坝数值计算与反演分析、安全综合评价指标体系及预警系统、巡视记录与文档管理于一体，对大坝的监测信息管理、性态分析、安全评价及预警发挥了重要作用。

### 7.2. 安全评价指标体系

糯扎渡工程结合大坝安全评价与预警管理信息系统的研发，针对库水位、渗透稳定、结构稳定、坝坡稳定及坝体裂缝等问题，提出了高心墙堆石坝整体和分项两级大坝安全监控指标，为大坝安全评估和预警提供了支撑。其中，大坝整体安全性的指标主要有大坝渗流量、坝体最大沉降、坝顶最大沉降、上游坝坡变形、下游坝

坡变形、坝顶裂缝等；大坝分项安全指标主要包括大坝顺河向水平位移、坝体沉降、渗流量、渗压、土压力、裂缝等。

### 7.3. 新型安全监测设备

依托糯扎渡工程研发了新型分层式沉降仪、新型压力式水管沉降仪、四管式水管式沉降仪、电测式横梁式沉降仪和弦式沉降仪、剪变形计、500 mm超大量程电位器式位移计、六向土压力计组等，可实现上游堆石体内部沉降、心墙内部沉降、心墙与反滤及混凝土垫层之间的相对变形、心墙的空间应力监测。系统集成测量机器人、GNSS变形监测系统、内外观自动化系统，实现了复杂条件下高精度监测与实时在线监测数据补偿。

长河坝大坝沉降监测采用了弦式沉降仪、智能沉降仪以及电位器式位移计三种新技术手段。就目前监测成果来看，以电位器式位移计最为成功。覆盖层沉降监测采用最大量程达1200 mm的电位器式位移计，可满足长河坝深厚覆盖层沉降监测的需要。

为满足300 m级高土石坝安全监测的需要，最近还对InSAR变形监测技术、管道机器人、柔性测斜仪、土石坝监测廊道等最新技术的可行性进行了研究。

## 8. 糯扎渡心墙堆石坝安全监测资料分析及工作性态评价

糯扎渡水电站2011年11月下闸蓄水，2012年9月首

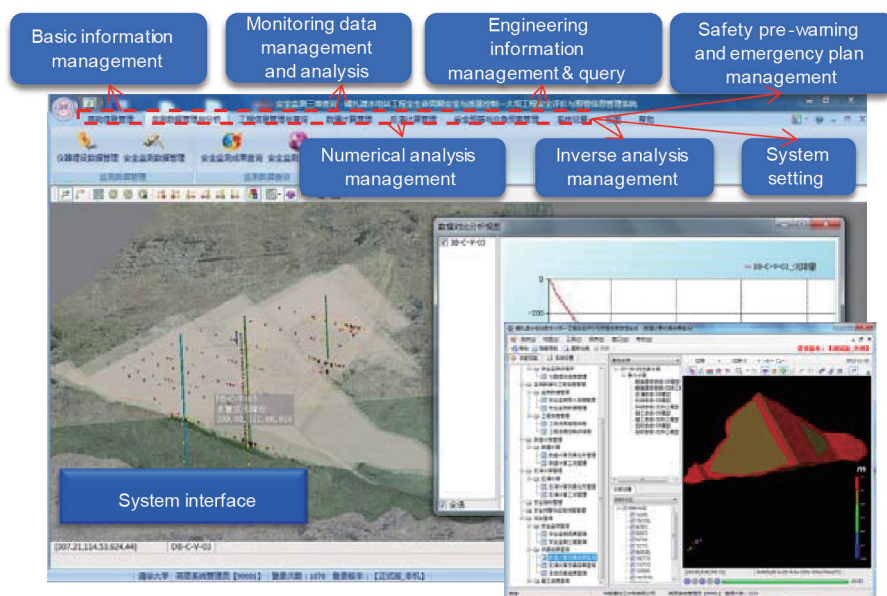


图16. 糯扎渡大坝安全评价与预警管理信息系统。



台机组发电, 2013年、2014年分别蓄水至正常水位, 挡水水头为252 m(图17)。



图17. 建成投运的糯扎渡水电站。

截至2015年年底, 大坝变形分布符合高心墙堆石坝的一般规律。坝顶沉降最大实测值为790.67 mm, 占最大坝高的0.30%, 小于竣工后坝顶沉降率0.5%的参考指标。坝体最大累计沉降量为4305 mm, 约为最大坝高的1.65%, 小于沉降率3%的参考指标。坝体表面未发现明显裂缝。心墙与反滤间的剪变形计绝大部分处于受压状态, 实测最大相对变形为-103.82 mm, 发生在心墙最大沉降带, 反滤部位沉降小于心墙沉降。坝基混凝土垫层测缝计实测位移为-19.7~2.74 mm, 大部分断面开合度不大。蓄水对上游堆石体产生一定的湿陷, 但未对心墙变形产生显著影响, 心墙无明显向下游水平位移的趋势。

上游堆石体内水位与库水位基本一致, 心墙内存在超孔隙水压力, 心墙后水位则比较低, 表明心墙、垫层及防渗帷幕的防渗体效果较好。坝基廊道内测压管实测水头为-1.93~127.95 m。坝基廊道内大部分量水堰渗流量较稳定, 总渗流量为 $4.14 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 坝后梯形量水堰渗流量为 $5.42 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 综合坝基廊道内渗流量与坝后量水堰实测流量, 得出目前大坝总渗流量为 $9.56 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

心墙和上、下游堆石体的应力分布符合高心墙堆石坝的一般规律, 心墙孔隙水压力正缓慢消散。

以上安全监测资料表明, 糯扎渡心墙堆石坝变形、渗流、渗压、应力状态稳定, 变形和渗流关键指标远小于国内外已建同类工程, 大坝运行状态良好(见图17)。

## 9. 结语

糯扎渡等心墙堆石坝从变形稳定、渗流稳定和坝坡

抗滑稳定三大稳定入手, 系统研究了高土石坝安全建设中的重大技术问题。提出了以心墙变形控制为重点并与坝壳料变形相协调的原则, 改进了计算模型参数。提出了防渗、反滤、排水“三位一体、有机结合、优化配置”的渗流控制原则和渗控标准。研究指出渗水弱面是心墙水力劈裂发生的主要条件, 更新了对水力劈裂机理的认识。比较了坝坡动力抗滑稳定四种分析方法, 得出宜采用多种方法进行综合分析评价, 提出了中国常用的抗震措施。糯扎渡大坝首次利用GPS、PDA信息技术, 对坝料调运、筑坝参数、试验成果和监测数据进行实时监控和信息反馈, 是大坝施工质量控制的重大创新。以上重大技术的突破, 为后续高土石坝安全建设提供了重要的参考和技术支撑。

## 致谢

本研究得到中国工程院咨询研究项目(2013-xy-11)及国家科技支撑计划(2013BAB06B01)资助, 特此致谢!

## Compliance with ethics guidelines

Hongqi Ma and Fudong Chi declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Consulting and Research Project of Chinese Academy of Engineering “Key Technical Issues for Construction Safety for Ultra-high Earth-rockfill dam” Project Team. Research report of key technical issues for construction safety for ultra-high earth-rockfill dam. 2014. Chinese.
- [2] Zhang D, He SB, Wu XY. Design of gravel soil core wall rockfill dam of the Long River dam hydropower project. *Sichuan Water Power* 2016;35(1):11-4. Chinese.
- [3] Zhou JP, Wang H, Chen ZY, Zhou XB, Li B. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part I: fundamentals and criteria. *J Hydraul Eng* 2015;46(5):505-14.
- [4] Du XH, Li B, Chen ZY, Wang YJ, Sun P. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part II: slope stability of embankment dams. *J Hydraul Eng* 2015;46(6):640-9.
- [5] Zhang ZL, Feng YL, Xiang B, Yuan YR. Design, researches and practices of impervious materials for core wall of Nuozhadu hydropower station. *Chinese J Geotech Eng* 2013;35(7):1323-7.
- [6] Peng GY. Core-wall gravel soil construction of Pubugou hydropower dam. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Rock-fill Dam*; 2009 Oct 18-20; Chengdu, China; 2009. p. 478-81.
- [7] Ma HQ. Development and innovation of dam construction technology in China. *J Hydroelectr Eng* 2014;33(6):1-10. Chinese.