

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2021.03-06

# 寺坪水利枢纽砂砾石面板坝关键技术研究

周小文<sup>1</sup>, 付 军<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学, 广东 广州, 510640; 2. 葛洲坝电力投资有限公司, 湖北 宜昌, 430033)

**摘 要:** 湖北保康县寺坪水利枢纽大坝采用了大量使用河床砂砾石的面板坝方案, 在当时可供借鉴的工程经验严重缺乏. 为了能够在保障坝体安全的基础上充分利用天然砂砾石料和部分页岩料, 在填料渗透特性、过渡料选用、软岩料利用、坝体断面优化、深厚砂砾石覆盖层强夯加固处理等关键技术方面进行了较系统的研究, 取得了诸多新的认识. 据此设计出的坝体断面和采用的填筑工艺, 体现了砂砾石面板坝的先进设计理念与技术, 工程运行以来沉降很小. 本文简要介绍砂砾石面板坝的发展过程与寺坪砂砾石面板堆石坝关键技术的研究成果, 以供类似工程参考.

**关键词:** 寺坪水利枢纽; 砂砾石; 混凝土面板坝; 优化

**中图分类号:** TV641.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1004-4701(2021)03-0184-06

## 0 引 言

混凝土面板堆石坝是现代筑坝技术中发展最快的坝型, 和混凝土重力坝、拱坝一起成为当今三大主流坝型. 现代筑坝理念、试验技术、计算理论、施工技术、管理与智能化技术等方面的重大进展, 都在面板坝中得以体现. 湖北省保康县寺坪水利枢纽大坝最后采用的是大量利用河床砂砾石及部分软岩作为填料的面板坝, 在其建设年代具有很好的代表性. 该坝从科研、设计到施工的 10 余年历程, 正好蕴涵于我国面板坝的快速发展时期, 它的研究成果与成功建设也进一步促进了我国面板坝技术的发展.

湖北省保康县寺坪水利枢纽于 2002 年 1 月开工, 2007 年 6 月竣工, 至今已正常运行 14 年. 在可研阶段, 该枢纽大坝在经过心墙砂砾石坝与面板堆石坝的对比研究之后, 采用了面板堆石坝的坝型<sup>[1]</sup>. 该坝址河床砂砾石丰富, 如果能够用河床砂砾石作为主堆石料, 则可以大幅降低工程造价和缩短工期. 但是, 按照传统筑坝经验, 面板坝对于堆石体的变形及抗渗透变形的特性

要求较严格. 以相对易于变形和管涌的砂砾石料作为主堆石料, 存有一定的风险. 为了进行可靠的设计, 针对一些关键技术列了多个专题进行试验和计算分析研究. 这些研究的成果为寺坪坝的设计与施工发挥了巨大的作用. 本文简要回顾国内外砂砾石面板坝的发展历程, 介绍寺坪坝的关键技术研究成果, 以期为今后类似砂砾石面板坝工程的建设提供借鉴.

## 1 砂砾石面板坝的发展

面板堆石坝于 19 世纪中叶起源于美国, 起初采用抛填堆石加木面板防渗, 以后采用混凝土面板. 到 20 世纪 60 年代末引入振动碾压, 进行薄层碾压堆石施工, 使坝体密实而变形较小, 由此这种坝型才得以迅速发展. 其中, 塞沙那坝以其基本设计特征和最大坝高 110m 为现代混凝土面板堆石坝开创了先例, 显现了现代混凝土面板堆石坝的技术理念<sup>[2]</sup>. 迄今为止, 全世界已建和在建超过 100m 的有百余座, 面板坝坝高由最初的几十米到目前的三百米级, 坝体结构和诸多关键技术发生了许多的变化, 如在堆石分区、填料选择、止水

收稿日期: 2021-04-23

作者简介: 周小文(1965- ), 男, 博士, 教授.

结构、趾板面板连接方式、坝顶开敞式溢洪道,深厚覆盖层处理、多维动态高强度坝料填筑、混凝土面板施工综合防裂以及挤压边墙工艺等方面的技术都取得了重大进展。面板坝成功的关键是保障面板在巨大水压力作用下不产生过大的变形,从而可以维持薄面板不产生大量裂缝。因此,传统上修建面板堆石坝,主堆石皆要求采用新鲜的岩石。而软岩和砂砾石料分布较广,开采和碾压施工方便,可大幅降低造价和缩短工期。因此,随着筑坝技术的进步,面板堆石坝由最初的采用优质石料筑坝发展到采用软岩或砂砾石筑坝。可以认为,软岩面板坝和砂砾石面板坝是面板坝技术进步的两个标志性成果。

软岩面板坝典型案例有美国的贝雷坝(Bailey)、印尼的希拉塔坝(Cirata)、澳大利亚的小帕拉坝(Little Para)、温尼克坝(Winneke)和红树溪坝(Mangrove Creek)等以及国内的株树桥、天生桥一级、大坳、十三陵上池、盘石头、茄子山、鱼跳等坝<sup>[3,4,5]</sup>。这些软岩坝的成功经验表明,过去因抗压强度低、软化系数小而不被采用的软岩堆石料,经过专门设计,仍可作为堆石坝填料。

在砂砾石面板坝方面,国际上自1976年哥伦比亚建成130m高的格里拉斯(Gollilas)砂砾石面板坝以来,相继建成了一批百米以上的砂砾石面板坝。1985年哥伦比亚建成的萨尔瓦兴娜坝(Salvajina dam),采用砂砾石作为筑坝主体材料,坝高148m,坝基也是厚约30m的冲积层,坝体直接在冲积层上填筑,取得了技术上的突破。1994年墨西哥建成高187m阿瓜米尔帕(Aguamillipa)坝,为20世纪面板堆石坝高度之首。1995年竣工的智利圣胡安娜坝(Santa juana)最大坝高113.4m是第一个建于强震区深覆盖层上的高砂砾石面板坝。坝料取自上游瓦斯科河的砾石冲积层,为洁净砾石,粒径在7cm左右的占50%。该坝建在30m厚的砾石层上,设有混凝土板截水墙,与砾石层上的趾板柔性连接。我国于1985年建成的新疆柯柯亚坝为国内首座砂砾石面板坝,高度为42m。

天然砂砾石料由于其级配的离散性、间断性和碾压施工时粗细颗粒的易分离性等,导致其抗渗透破坏和抗冲蚀能力较差。1993年我国青海沟后砂砾石面板坝的溃决,曾经使人们对这一坝型的安全可靠性产生了怀疑<sup>[6]</sup>;但是,随着现代筑坝技术的发展,国内科研人员对砂砾石面板坝进行了深入探讨,对砂砾石料渗透

稳定性、周边缝止水结构、面板防裂技术、砂砾石填筑施工技术等关键技术进行了研究,砂砾石坝的优势越来越凸显,发展前景广阔<sup>[7]</sup>。国内近30余年来建设了30余座砂砾石面板坝,表1列举了其中部分典型的砂砾石面板坝。中国能建葛洲坝集团投资正在建设的新疆大石峡水利枢纽砂砾石面板坝高达247m,为当前世界最高的混凝土面板砂砾石坝。

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会、中国水利学会混凝土面板堆石坝专业委员会、湖北省水利学会、兴山县天星水电集团和葛洲坝集团施工科研所,于1998年10月18日~21日在古洞口水力发电工程所在地湖北省兴山县,联合召开了“全国混凝土面板砂砾石坝学术研讨会”。出席会议的有来自各地的27个单位,共计88位代表,提交专题报告20余篇进行了交流。该次会议对于推动我国砂砾石面板坝的发展具有重要作用。

## 2 寺坪大坝工程特点与难点

寺坪水利枢纽位于汉江中游右岸支流南河上段粉清河上,坝址在湖北省保康县寺坪镇肖家湾。工程以发电为主,兼有防洪、灌溉、水产养殖、库区航运等综合利用效益,为大(2)型水库。大坝为全断面砂砾石面板坝,最大坝高90.5m,坝顶宽8.0m,坝轴线长376.0m。面板厚0.3~0.6m。趾板宽4~8m,厚0.5~0.8m。大坝填筑量包括上游铺盖在内共206.52万m<sup>3</sup>。

寺坪大坝具有以下特点和难点:

(1)地质条件复杂。河床部位坝基趾板及趾板下游0~30m为志留系地层,趾板下游30m至下游坝坡脚由第四系河流冲积层(alQ<sub>4</sub><sup>2</sup>)和志留系地层组成。河床冲积层砂砾石一般厚10~15m。志留系基岩为页岩、砂质页岩,岩性软弱,岩体湿抗压强度10~15MPa,陡倾角裂隙发育,具中~弱透水性。

(2)全断面采用砂砾石料填筑。坝体基本结构除灰岩料排水体和坝后次堆石区利用了本工程溢洪道的开挖料(页岩)外,均为当地河床砂砾石料填筑。可利用的河床开挖的砂砾石料中,软弱颗粒含量3.9%~13.9%,针片状颗粒含量11%~32.8%,岩性相对软弱。

(3)渗控技术。根据初设阶段对天然砂砾石渗透特性的研究,以天然砂砾石作为垫层料的过渡层,存在诸多不确定因素:渗透变形的破坏型式属于管涌破坏,天

表1 我国部分砂砾石面板坝

坝名	地点	河流	坝高 /m	坡度		坝顶长 /m	建成年份
				上游	下游		
乌鲁瓦提	新疆和田	喀拉喀什	133	1:1.6	1:1.5	365	2001
鄂坪	湖北竹溪	汇湾河	125.6	1:1.4	1:1.46	295.25	2006
珊溪	浙江文成	飞云江	132.5	1:1.4	1:1.57	448	2001
黑泉	青海大通	宝库河	123.5	1:1.55	1:1.4	434	2001
古洞口	湖北兴山	古夫河	121	1:1.5	1:1.4	182.5	1999
那兰	云南金平	藤条江	109	1:1.5	1:1.27	332.96	2005
察汗乌苏	新疆巴音郭楞	开都河	107.6	1:1.5	1:1.25	347.36	2007
寺坪	湖北宝康	粉清河	90.5	1:1.6	1:1.6	376	2006
陡岭子	湖北郧西	夹河	88.5	1:1.5	1:1.3/1:1.2	342.2	2000
下天吉	新疆精河	精河	71.5	1:1.6	1:1.5/1:1.4	94	2004
沟后	青海共和	恰卜恰河	70(55.3)	1:1.6	1:1.5(1:1.7)	265	1989(2001 修复)
白杨河	新疆	白杨河	37	1:1.7	1:1.5	473	1994
小干沟	青海格尔木	格尔木河	55	1:1.55	1:1.60	104	1991
两岔河	贵州黄平	舞阳河	43	1:1.5	1:1.60	300	1998
柯柯亚	新疆鄯善	柯柯亚河	42	1:2/1:2.75	1:1.5/1:1.75	123	1985
丰宁	河北丰宁	滦河	39.8	1:1.6	1:1.60	272	2001
大石峡	新疆	库玛拉克河	247	1:1.6	1:1.4	606	2028

注: 标有“/”的为变坡, 下游若设有马道, 坡度为马道间的坡度。

然砂砾石属内部结构不稳定的填料。按照以往的研究, 内部结构不稳定的填料即使满足传统反滤准则, 也不一定满足渗透稳定要求。

(4) 施工强度高。寺坪水电站于 2004 年 11 月 8 日成功截流, 根据工程建设总体进度计划安排, 2005 年汛前(5 月)大坝须填筑至 295m 高程, 2005 年 11 月须填筑至 305m 高程, 以满足 2006 年 4 月工程下闸蓄水的要求, 相应的坝体填筑总量约 180 万  $m^3$ , 除去围堰闭气、抽排水、趾板和坝基开挖的时间, 按有效工作日计算的月平均填筑强度约 22 万  $m^3$ 。

### 3 寺坪大坝关键技术研究

针对寺坪水利枢纽大坝工程的上述特点与难点, 葛洲坝湖北寺坪水电开发有限公司与长江水利委员会

长江勘测规划设计研究院、长江科学院等联合开展了一系列的试验与数值模拟研究, 在填料渗透特性、基于过渡料级配突破利用的坝体断面优化、软岩利用料(3C 料)使用范围的扩大、坝体断面优化、深厚砂砾石覆盖层强夯加固处理、砂砾石面板坝快速施工、绿色筑坝技术等方面取得了一系列的创新, 前四方面的研究成果简述如下。

#### 3.1 大坝填料渗透特性研究

大坝的填料主要包括主堆石区填料、垫层区填料、过渡料和次堆石区填料。砂砾石料强度方面基本可满足要求, 问题主要在于其渗透稳定性。寺坪水利枢纽大坝拟全断面采用河床砂砾石(仅下游次堆石区采用了一定量的页岩), 但是, 不同区域对砂砾石的要求不同, 需要通过不同的改造(如优选、冲洗、配制、掺和等)使得砂砾石料可以用于不同的分区。通

过分区优化, 可实现既安全可靠又降低造价的效果。例如, 该河床的天然砂砾石作为过渡料时, 含泥量偏高。借鉴类似工程的成功经验, 提出过渡料采用冲洗砂砾石, 使其含泥量小于 4%, 并对过渡料采用的料场提出要求, 保证填筑料小于 5mm 的颗粒含量在 15%~30% 之间。过渡料的方量为 28 万  $m^3$ , 当时每  $m^3$  冲洗砂砾石的单价比天然砂砾石的单价高 20 元左右。为加快工程施工进度并节省工程投资, 寺坪水电开发有限公司提出了过渡料采用天然砂砾石直接上坝的方案。经专题研究, 包括料场详查、渗透特性试验、与同类工程类比和渗流计算分析论证, 提出了优化后的过渡料级配及坝体填筑断面。

填料渗透特性研究方面主要得出了以下认识:

(1) 天然砂砾石料在无保护条件下临界比降为 0.15~0.31, 破坏比降为 0.46~1.51, 特别是天然砂砾石下包线, 其渗透稳定性差, 易发生管涌破坏, 应对天然砂砾石的级配加以适当限制。

(2) 垫层料在无保护条件下临界比降为 0.15~0.51, 破坏比降为 1.0~3.01, 其渗透系数  $K_{20}$  为  $4.00 \times 10^{-4}$ ~ $7.28 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ , 天然砂砾石料中  $< 2\text{mm}$  的天然级配与垫层料设计级配差别较大, 小于 0.1mm 的料偏少, 必须人工配料才能满足设计级配和渗透性  $i \times 10^{-4} \text{cm/s}$  的要求。

(3) 垫层料与过渡料的组合渗透试验表明, 采用优选天然砂砾石作为过渡料是可行的。但天然砂砾石的级配范围很广, 保持其级配的连续性十分重要, 通过优选保持级配的连续性, 可同时满足垫层料和过渡料的层间反滤要求, 确保垫层料和过渡料的渗透稳定性。

(4) 过渡料和小粒径排水体的组合试验表明, 在后者有骨架支撑的条件下, 天然砂砾石过渡料和小粒径排水体的组合渗透试验中过渡料的最大比降为 5.11~8.35, 没有细颗粒的流失, 表明过渡料和小粒径排水体能满足渗透稳定性要求。

(5) 在过渡层与排水体间设置反滤层后, 优选后的天然料直接上坝作为过渡层的设计方案可满足水力过渡要求。

### 3.2 断面优化研究

招标设计阶段和优化设计后的大坝断面分别如图 1、图 2 所示, 主要的优化措施包括:

(1) 过渡料由冲洗砂砾石改为天然砂砾石后, 施工时必须在进行料场复查基础上, 做出详细的料源规划, 在合适的料场划定过渡料采区, 保证满足设计要求的合格的过渡料上坝。竖向排水体适当后移, 有利于降低过渡料的渗透比降, 并减少了排水体 (人工灰岩石渣料) 的工程量。

(2) 因取消了过渡层冲洗砂砾石的要求, 对排水体的要求相应提高, 按规范要求排水体前设小粒径排水体作为反滤层, 一定程度上增加了排水体的施工难度。

(3) 竖向排水体适当后移, 有利于降低过渡料的渗透比降, 并减少了排水体 (人工灰岩石渣料) 的工程量。

### 3.3 扩大软岩料 (3C 料) 使用范围

施工详设阶段 (已经是优化设计) 拟定的大坝下游堆石区 (3C) 页岩料范围为高程 256m 至 275m, 水平宽度 35m, 紧贴大坝临时挡水断面布置, 其填筑方量为

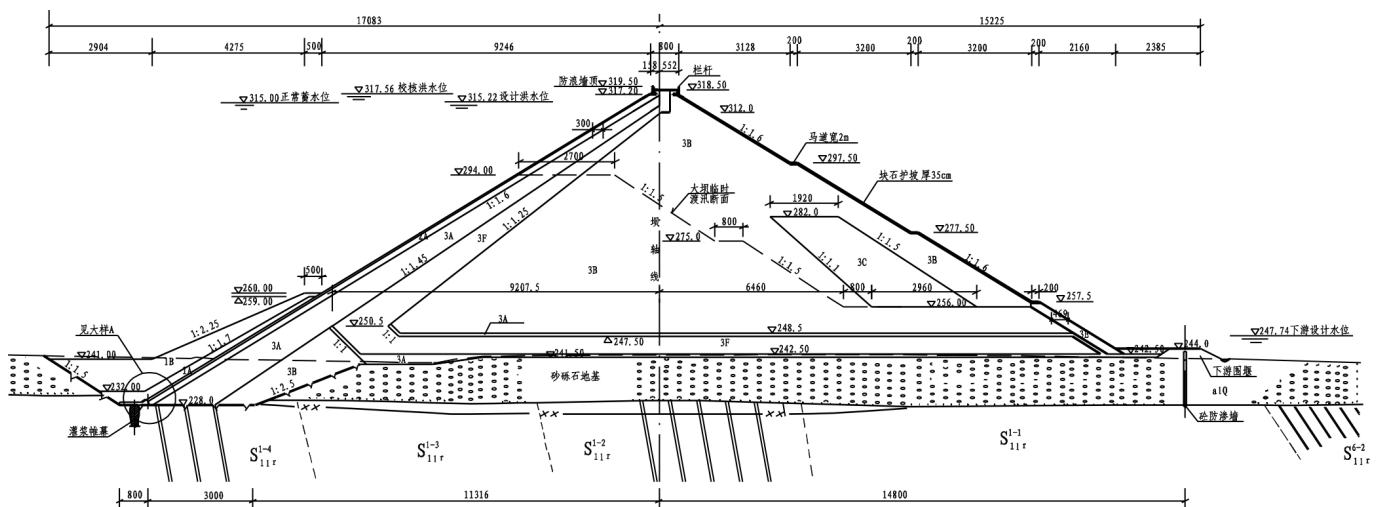
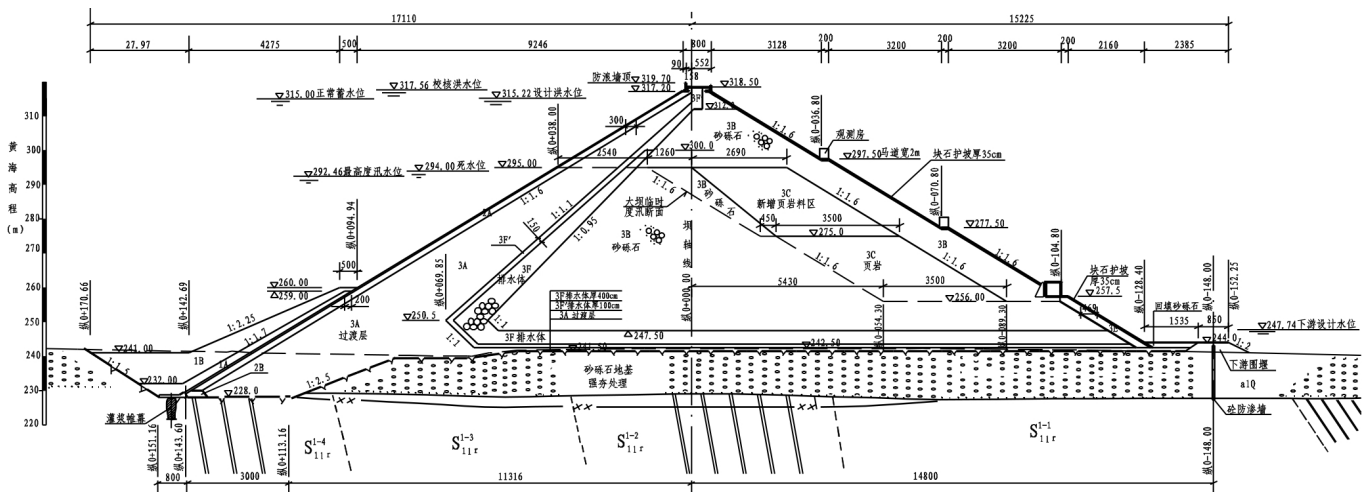


图 1 招标设计阶段面板堆石坝填料分区图



坝体填料分八个填筑区,从上游至下游分别为盖重区(1B)、粉细砂铺盖区(1A)、垫层区(2A)、过渡区(3A)、排水区(3F)、主堆石区(3B)、次堆石区(3C)和滤水坝趾区(3E)

图2 最终优化方案面板堆石坝填料分区图

11.8 万  $\text{m}^3$ , 要求采用微新或弱风化下部的页岩料直接上坝填筑。

大坝填筑施工到汛期时,汛期河床水位抬高,布置在河道里的砂砾石料场取料困难,而从开挖揭露出的地质条件看,弱风化下部顶板线有所抬高,可利用页岩料料源增加。为加快工程进度,确保工程工期,再次通过数值模拟计算研究,在坝体变形满足要求的前提下,确定了扩大下游堆石区页岩料填筑范围的再次优化方案,页岩料填筑高程升高到 295m,增加页岩利用料使用量 18.1 万  $\text{m}^3$ ,参见图 2。

### 3.4 河床厚砂砾石层强夯加固处理

坝基河床部位由第四系河流冲积层( $\text{alQ}_4^2$ )和志留系地层组成,冲积层为厚 10m~15m 的砂砾石层,不宜直接作为大坝地基。为加快施工进度、降低投资成本,对坝址河床的地质条件进行了专题论证,对厚砂砾石覆盖层河床基础的强夯处理技术进行了系统研究,确定的强夯工艺为:强夯锤重 23.10t,满夯锤重 16t,提升高度强夯为 13.00m,满夯 10m,夯击能为强夯 300t/m、满夯 160t/m,采取强夯一遍两序、推平夯坑再满夯。强夯加固处理后显著提高了坝基强度,可有效地减小坝基的沉降位移。

## 4 结语

寺坪坝关键技术研究主要得到以下认识:

(1)天然砂砾石料在无保护条件下临界比降为 0.15~0.31,破坏比降为 0.46~1.51,渗透稳定性差,易发生管涌破坏,应对天然砂砾石的级配加以适当限制。

(2)采用优选天然砂砾石作为过渡料是可行的,但天然砂砾石的级配范围很广,保持其级配的连续性十分重要。级配连续可同时满足垫层料和过渡料的层间反滤要求,确保垫层料和过渡料的渗透稳定性。

(3)对过渡层砂砾石取消冲洗的要求后,可大量降低造价和缩短工期,但是,对其后排水体的要求相应提高。为此,可在排水体前设置小粒径排水体作为反滤层以解决渗透稳定问题。

(4)竖向排水体适当后移,有利于降低过渡料的渗透比降,并减少排水体(人工灰岩石渣料)的工程量。

(5)在坝体变形满足要求的前提下,下游次堆石区的页岩料填筑范围可以显著扩大,进而可大量增加页岩利用料使用量,从而加快工程进度。

(6)坝基河床部位冲积层为厚 10~15m 的砂砾石层,不宜直接作为大坝地基。可采取强夯的办法对厚砂砾石覆盖层进行加固处理。强夯处理后显著提高了坝基强度,可有效地减小坝基的沉降位移。

寺坪坝的设计与施工正处于砂砾石面板兴起和探索发展的阶段,经过全面、系统的研究,确定的优化设计方案与施工工艺体现了诸多先进的理念与技术,进一步推动了我国砂砾石面板坝技术的发展。工程运行以来的监测数据表明:寺坪大坝工程的总沉降量为

0.32m、沉降率为0.35%，小于设计计算值的0.46m、0.51%，总体沉降值小于国内外同类型工程。

#### 参考文献:

- [1] 周小文,丁红顺. 寺坪坝坝体材料特性及坝型适应性研究[J]. 岩土工程学报, 2007(02): 299-303.
- [2] 沈长松. 现代坝工技术及其发展趋势(二)[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(6): 8-11.
- [3] 蒋涛,付军,周小文. 软岩筑面板堆石坝技术 [M]. 中国水利水电出版社, 2010.
- [4] 邹军贤. 大坳混凝土面板堆石坝工程设计及技术特点[J]. 江西水利科技, 2001(02): 94-98+104.
- [5] 梁必玦,杨阳. 大坳软岩面板堆石坝边坡稳定及应力变形分析[J]. 江西水利科技, 2004(S1): 43-45+50.
- [6] 水利部科学技术司. 沟后水库砂砾石面板坝——设计、施工、运行与失事[M]. 中国水利水电出版社, 1996.
- [7] 许百立, 王治明. 浅谈目前我国的高砂砾石面板坝设计[J]. 水力发电, 1998(12): 46-49.

编辑: 张绍付

## Research on key technologies of sand-gravel filled concrete face dam in Siping Hydropower project

ZHOU Xiaowen<sup>1</sup>, FU Jun<sup>2</sup>

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
2. Gezhouba Electric Power Investment Co.Ltd, Yichang 430033, China)

**Abstract:** Siping Hydropower Project Dam in Baokang County, Hubei Province is a face rockfill dam, where a large amount of riverbed sand and gravel are used as the main filling material. The available engineering experience for reference was in a large shortage at that time. In order to make full use of natural sand and gravel material and part of shale material and ensure the safety of the dam body, a systematic research was made on the key technologies such as the permeability characteristics of filling material, the selection of transition material, the utilization of soft rock material, the optimization of the dam body section, and the reinforcement of the deep sand and gravel overburden by dynamic compaction. These studies had achieved a lot of new insights. The successful construction of Siping dam embodies the advanced design concept and technology of sand and gravel filled concrete face dam. The settlement of the dam is very small since its operation. This paper briefly introduces the development process of sand-gravel filled concrete face dam and the key technologies of siping dam for reference of the possibly incoming similar projects in the future.

**Key words:** Siping Hydropower Project; Sand and gravel; Concrete face dam; Optimization

翻译: 周小文