

# 三峡高重力坝技术实践综述

钮新强<sup>1,2</sup>

(1. 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010; 2. 国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 三峡工程重力坝最大高度 181 m, 目前已蓄水至设计水位。大坝设计和施工过程中, 通过特殊地质勘探、多种稳定计算方法对比分析、综合工程措施解决左岸坝段深层抗滑稳定问题; 布置多层大孔口解决大流量、多任务的泄洪要求, 运用钢筋混凝土有限元方法计算孔口配筋; 运用二次风冷骨料、个性化动态通水、表面保温等技术进行温控防裂; 采用富浆混凝土防渗、预埋冷却水管等技术进行碾压混凝土施工; 采用封闭抽排方案、无盖重固结灌浆技术进行坝基处理。分析了大坝运行过程中纵缝开度变化、水位影响下坝踵应力变化的规律, 提出了高重力坝在纵缝结构整体性、坝踵应力与应力控制标准、强震作用下大坝破坏机理及抗震措施等方面有待进一步研究的问题。

**关键词:** 高重力坝; 抗滑稳定; 大孔口; 温度控制; 碾压混凝土; 纵缝; 坝踵应力

**中图分类号:** TV642.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2013)03-0442-07

与其他坝型相比, 重力坝的优越性除抵御超标准洪水和滑坡、泥石流涌浪能力更强外, 其枢纽布置的最大优点是可利用坝体设置各类孔口, 解决泄洪、排沙、引水发电及施工导流问题。三峡工程坝址洪水流量巨大, 设计最大洪水流量达 12.43 万  $\text{m}^3/\text{s}$ 。根据水库调控洪水要求, 在防洪限制水位下最大泄洪流量达 5.67 万  $\text{m}^3/\text{s}$ 。此外, 还需要满足排沙、战时降低水位, 施工导流、初期运行等特殊要求。因此, 三峡工程在坝型比较中选择了适合泄洪消能建筑物布置的混凝土重力坝。

针对高重力坝的关键技术问题, 在工程设计与施工过程中都会开展相关的研究与试验, 如: 坝基抗滑稳定<sup>[1]</sup>、泄洪孔口布置<sup>[2]</sup>、混凝土温控防裂<sup>[3]</sup>、碾压混凝土层面处理<sup>[4]</sup>、坝基渗流控制与灌浆<sup>[6]</sup>等。三峡工程的设计与建设过程中, 通过综合研究试验、方案比选确定了具体的技术措施, 这些措施已成功实施。工程运行中, 发现坝体纵缝仍然存在开合变化、坝踵应力监测值与设计量值不符等现象, 对此也进行了初步分析, 并提出了进一步深入研究的方向。

## 1 三峡工程高重力坝筑坝技术成就

### 1.1 大坝深层抗滑稳定技术

坝基中存在的缓倾角长裂隙结构面或软弱夹层等不良地质缺陷可能影响大坝的稳定安全。中国已建的葛洲坝、安康、大化、三峡、万家寨、百色、沙坡头以及在建的亭子口、向家坝、金安桥、武都等大中型工程都存在坝基深层抗滑问题。

三峡左岸厂房 1~5 号坝段坝基为坚硬完整的花岗岩, 但坝基岩体内存在较发育的、倾向下游的缓倾角节理。大坝建基面高程 90.0 m, 坝后厂房最低建基高程 22.2 m, 大坝建基岩面形成坡度约 54°、临时坡高

收稿日期: 2012-09-03; 网络出版时间: 2013-03-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130327.1513.008.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(200701043)

作者简介: 钮新强(1962-), 男, 浙江湖州人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水利水电工程设计。

E-mail: niuxinjiang@cjwsjy.com.cn

67.8 m 的高陡边坡，近百米高的重力坝坐落在坡顶，岩体中倾向下游的缓倾角结构节理面构成极不利的滑动面，对坝基稳定极为不利，成为大坝设计中的重大技术问题之一。

对解决此类问题首先应查明地质条件，然后论证大坝稳定性，最终采取有效的处理措施，才能确保大坝的抗滑稳定安全。

(1) 采用系统、精细的特殊地质勘探与综合资料分析方法，查明坝基长大缓倾角结构面或软弱夹层确切位置、产状、性状、展布范围与组合关系。主要方法如下：改进钻进设备与工艺(双管单动、低转速、小进尺等)；改进完善钻孔彩电录像与解译设备；用剖面投影法和网络模型法综合分析，总结长大缓倾角结构面判据；采用 15~20 m 密集孔距勘探；对比钻孔彩电录像与岩芯鉴定记录；进行现场原位抗剪断试验。

(2) 多种稳定分析方法并举，论证大坝深层抗滑稳定性。

① 刚体极限平衡法。以等 K 法为主，同时用 Sarma 法等不同方法进行验证。

经研究选择缓倾角结构面最不利、连通率最高的左厂 3 号坝段为典型坝段，并提出了两种滑动模式：沿实际结构面折线滑动的确定性滑动模式和沿假想的结构面直线滑动的设想极端滑动模式，前者基本荷载组合下按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数  $K' \geq 3.0$ ；特殊荷载组合下安全系数  $K' \geq 2.3 \sim 2.5$ 。后者基本荷载组合下要求  $K' \geq 2.3 \sim 2.5$ 。对特殊荷载组合下的安全系数不作要求。

刚体极限平衡计算成果。确定性滑动模式，厂坝联合作用  $K' = 4.26$ ，大坝单独作用  $K' = 3.26$ ，均能满足  $K' \geq 3.0$  的要求。设想极端滑动模式，假定连通率 100%， $K' = 2.75$ ，满足  $K' \geq 2.3 \sim 2.5$  的要求。

② 强度折减弹塑性有限元法，以滑动路径塑性区贯通或特征点位移突变作为失稳临界判据。计算分析结果表明：正常荷载下，缓倾角结构面对坝体、坝基的应力、变形影响不大；平面弹塑性方法计算的稳定安全系数为 3.2；三维弹塑性方法计算的稳定安全系数为 3.5。

③ 地质力学模型方法。左厂 3 号平面模型，超载系数为 3.5；左厂 2~4 号三维模型，超载系数大于 4.2。

不同方法的对比分析论证表明：三峡左厂 1~5 号坝段刚体极限平衡法与降强法弹塑数值分析结果基本一致，相互验证性较好；极端滑动模式  $K' \geq 2.3 \sim 2.5$ ，能满足大坝抗滑稳定安全要求，可以突破现行规范规定。

(3) 解决深层抗滑稳定问题的综合加固措施如下：基础固结灌浆；厂坝联合受力；坝踵设齿槽；帷幕排水前移；封闭抽排，基础深层排水；设置预应力锚索；相邻坝段横缝灌浆；预留检查、维护、锚索加固廊道。

## 1.2 多层大孔口结构技术

三峡大坝在泄水前缘长 483 m 的泄洪坝段上布置了 23 个泄洪深孔、22 个泄洪表孔和 22 个导流底孔，宽高尺寸分别为 7 m × 9 m、8 m × 17 m 和 6 m × 8.5 m。坝段开孔率：平面 33%，立面约 32%，坝段体积约 31%。多层大孔口结构技术成为研究的重点，主要研究内容和采取的措施如下：

(1) 多层大孔口结构工程技术 主要包括：孔口相间布置，在平面和高程上错开，孔道跨缝布置，横缝止水后移，横缝灌浆并缝。

表孔和底孔跨横缝布置，表孔采用堰面整体浇筑后切缝，底孔采用后浇跨缝板技术，成功解决高速水流空蚀问题。

采用止水后移孔口平压、横缝灌浆并缝措施可减少孔口拉应力 30%~40%，同时增加坝体侧向刚度，提高大坝整体抗震性能。

(2) 大孔口应力分析与配筋技术 大坝孔口属于非杆系混凝土结构，其配筋设计方法目前有“应力图形法”和“钢筋混凝土有限元方法”两种。对于重要的水利工程，常将两种方法结合，即先按“应力图形法”初步得到钢筋用量，然后采用“钢筋混凝土有限元方法”计算裂缝宽度，根据裂缝宽度计算值来调整钢筋的布置(直径、间距、排数与位置)，以满足最大允许裂缝宽度的要求。

三峡工程应用“钢筋混凝土有限元方法”进行配筋，该方法模拟了混凝土本构关系、钢筋与混凝土粘结

滑移关系,可以求得结构裂缝开展过程和钢筋的实际应力值,能分析混凝土开裂后结构的应力重分布,是一种有效的分析方法。

(3) 高性能防裂混凝土材料的研究与应用 纤维混凝土等新型材料可提高混凝土材料的抗拉强度及极限拉伸值,以减少孔口出现裂缝的风险。三峡临时船闸坝段门槽部位采用钢纤维混凝土,达到较好的防裂效果。

### 1.3 大坝温控防裂技术

裂缝是长期困扰混凝土坝的难题,因而坝工界有句话叫“无坝不裂”。混凝土坝筑坝 100 多年来,迄今还未出现过无裂缝的大坝。如何控制混凝土温度变化,少产生甚至不产生温度裂缝,是坝工界的难题,而温控防裂主要从提高混凝土自身抗裂能力及控制混凝土温度应力两方面进行。三峡工程建设期间采取的主要温控措施如下<sup>[6]</sup>:

(1) 采用优质混凝土,提高混凝土自身抗裂能力。

通过控制水泥中 MgO 含量(3%~5%)、采用线膨胀系数小的骨料、优化混凝土配合比等措施可配制出具有微膨胀性能、线膨胀系数小、极限拉伸值高的优质混凝土,有效提高混凝土自身抗裂能力。

(2) 采取各种温控措施,减少温度应力。

① 首创二次风冷骨料技术,实现了稳定生产出机口 7℃ 制冷混凝土。“二次风冷骨料技术”<sup>[7]</sup>,首先利用地面二次筛分所设骨料仓兼作一次冷却仓,将传统的水冷骨料改为风冷骨料;其次通过上料胶带机将一次风冷后的骨料直接送入二次风冷仓,保证连续生产和连续冷却;最后加入片冰拌和混凝土,预冷混凝土温度可稳定地达到 7℃。

② 采用个性化动态通水降温技术。建立混凝土温度实时监测系统,分部位、分时段动态调整冷却水管的通水流量、通水时长和通水水温。采用三期通水冷却,即初期通 6~8℃ 制冷水 15d 左右削减混凝土温度峰值 2~4℃,中期越冬前通河水 1~2 个月降低混凝土温度至 18~20℃ 控制内外温差,后期通河水或制冷水至坝体接缝灌浆温度并控制上下层灌区间温差。

③ 表面保温技术。表面保温可降低混凝土内外温差,特别是控制混凝土表面温度梯度,达到防止混凝土表面裂缝的目的。一般工程均提出了保温措施,但因未能紧贴混凝土表面致使效果不佳。三峡三期大坝上、下游永久暴露面分别采用厚 5 cm、3 cm 聚苯乙烯泡沫板进行保温,在模板拆除后粘贴在混凝土面上;临时暴露面采用聚乙烯塑料卷材外套彩条布保温,对孔口异型部位采用喷聚氨脂保温。

④ 控制浇筑程序,减少约束应力。在基础约束区,严格控制大坝起始浇筑时间,避开高温时段浇筑,薄层连续短间歇浇筑上升,减低基岩对混凝土的约束应力。在脱离基础约束区,严格控制浇筑程序,采用均匀连续浇筑上升,避免长间歇,采用 3 m 层厚浇筑,并埋设水管通水冷却,以控制最高温度在设计允许范围之内。采用合理的分缝分块,以减少混凝土层间的约束。

实践表明,三峡右岸厂房坝段共计浇筑 400 余万 m<sup>3</sup> 混凝土,经现场检查,未发现一条温度裂缝。

### 1.4 碾压混凝土筑坝关键技术

碾压混凝土坝由于采用逐层碾压的施工方式,致使坝身存在施工层面的层间结合及渗漏问题。碾压混凝土一般采用通仓连续薄层浇筑,不设纵缝,添加大量粉煤灰,水化发热延迟,后期升温较大,温控问题比较突出。

(1) 层间结合问题 碾压混凝土层间结合面是碾压混凝土坝的薄弱环节,薄层碾压上升时,虽然采用高效缓凝剂可将碾压混凝土初凝时间延长至 8~12 h,但碾压混凝土一般不设纵缝通仓浇筑,且多个坝段大仓面浇筑上升,压实层厚 30 cm,受拌和系统、运输设备等施工设备生产率限制,层间间歇时间较长,若无有效的控制措施,可能超过混凝土层间允许间歇时间,出现漏水及水平裂缝等质量问题。

三期碾压混凝土围堰采用合理的拌合物工作度  $V_c$  值控制标准,高温时段控制 3~5 s,低温时段控制 4~7 s,以碾压不陷碾为原则,并有一定弹塑性。实践证明,上述标准对提高碾压混凝土抗分离性和可碾压性是极其有利的,保证了碾压混凝土的层间结合质量。

(2) 坝体防渗 在坝体上下游面, 采用二级配富浆碾压混凝土自身防渗, 必要时, 表面涂刷渗透性防水材料作为辅助防渗措施。对于碾压混凝土长间歇层面, 采取清除表面乳皮、凿毛铺筑砂浆或细骨料混凝土等措施。

上下游采用变态混凝土, 在碾压混凝土摊铺后铺洒灰浆振捣密实而成, 减少了对碾压混凝土快速施工的干扰, 有效地促进了全断面碾压混凝土快速浇筑, 同时也可提高坝体防渗性能。

(3) 温度控制 碾压混凝土坝由于大量掺用粉煤灰, 水化发热延迟, 且采用薄层连续浇筑的施工方式, 上升速度较快, 施工过程中层面的散热不够, 坝体内部温度较高, 温控问题也十分突出。

三峡工程围堰碾压混凝土, 首次采用了埋冷却水管通水降温。浇筑层间埋设塑料水管进行通水冷却, 控制坝体早期最高温度, 同时, 高温时段及时对仓面进行喷雾保湿。

三峡三期围堰碾压混凝土重力式围堰, 坝高 115 m, 2002 年 2 月 16 日~2003 年 4 月 16 日浇筑完成, 仅用 4 个月浇筑完成了 110 万  $\text{m}^3$  混凝土。实现了最大日浇筑强度 2.1 万  $\text{m}^3$ , 最大月浇筑强度 47.6 万  $\text{m}^3$ , 最大日上升高度 1.2 m, 最大月上升高度 28.2 m, 创造了混凝土坝筑坝史上浇筑强度最高、月上升速度最快的记录。

## 1.5 大坝基础处理技术

(1) 坝基封闭抽排渗流控制方法 坝基扬压力是重力坝设计的主要荷载之一, 如何有效降低扬压力关系到大坝设计的安全性和经济性。坝基封闭抽排渗流控制方法在坝基范围设置环形封闭的灌浆帷幕, 在帷幕围封区域内钻设纵横交叉的多排基岩排水孔, 孔口渗水经过集水管道和廊道汇流至集水井, 再经水泵抽排至坝外。三峡工程研究采用了封闭抽排渗流控制方法, 在河床坝段解决了高尾水位带来的高浮托力问题, 在岸坡坝段解决了坝基内长大缓倾裂隙结构面的扬压力问题。

(2) 基岩无盖重固结灌浆技术 固结灌浆是坝基加固处理主要措施之一, 常规方法是在坝基面浇筑一定厚度混凝土后, 在混凝土的压重下进行固结灌浆。而无盖重固结灌浆技术则是在坝基面开挖清理完成后, 只对表面进行缝隙封闭处理后即开始灌浆施工。三峡等工程研究试验了填坑封闭、凿槽嵌缝、喷混凝土、喷砂浆、浇筑 10~15 cm 厚找平混凝土、涂抹水泥基系防水料等封闭方式下的灌浆工艺, 取得了一系列理论与实践经验, 对缓解混凝土浇筑与基岩灌浆间的相互干扰、减少混凝土因长间歇裂缝起到了重要作用, 已成为基岩固结灌浆的一种新兴手段。

## 2 有待进一步重点研究的问题

### 2.1 纵缝与整体性

混凝土重力坝作为典型的大体积混凝土结构, 为了防止坝体混凝土开裂, 并顾及混凝土浇筑强度和施工的均衡性, 除了设置横缝外, 每个坝段还设置若干条纵缝。纵缝灌浆通常安排在冬春季节, 通过后期通水冷却将坝体温度降至稳定温度后施工。龚嘴大坝、潘家口宽缝重力坝、日本一库坝等多个工程的监测资料反映, 坝体纵缝在完成接缝灌浆之后, 还会继续张开, 开度呈年度周期性变化。丹江口大坝加高工程, 通过大量的论证分析和新老混凝土结合试验研究表明, 由于季节性气温影响, 不能保证新老混凝土始终结合在一起。

三峡二期工程在蓄水 135 m 前的安全监测资料分析中, 发现泄洪坝段、厂房坝段的纵缝灌浆后实测张开度均大于灌浆时张开度, 即存在不同程度的增开现象, 其中, 泄 2 号坝段的最大增开度为 1.48 mm, 泄 18 号坝段的最大增开度为 2.33 mm, 左厂 14 号坝段的最大增开度为 2.27 mm。

三峡泄洪坝段仿真分析成果表明, 纵缝在接缝灌浆以后开度变化的主要影响因素为外界气温, 总体呈现夏季大、冬季小的变化规律。水库逐级蓄水后增开度依次减小, 仍随气温年变化, 特定高程以下变为夏季张开、冬季闭合。监测资料所反映的纵缝张开度和增开度情况与仿真分析成果相吻合。坝体钻孔检查验证了测缝计所表明缝面张开度情况。

为了评估纵缝增开对大坝运行安全的影响,通过模拟泄洪坝段纵缝实测开度,对各种工况下坝体的应力和变形、地震作用动力响应进行了有限元分析。分析成果表明,在实测最大增开缝宽条件下,水库蓄水至 175 m 后,坝踵存在小范围的拉应力区,计入扬压力后的拉应力范围未超过规范允许值;地震工况下纵缝不同增开度情况与整体坝的大坝动位移接近、坝顶加速度放大系数接近,坝踵拉应力范围未超过规范规定的允许值。灌浆后再张开的纵缝不影响大坝运行的安全。

上述现象和研究成果表明,重力坝建成后实际运行过程中的结构和受力状态,与传统材料力学方法的设计假定存在差异。也可以说,大坝的整体性是相对的,若能满足坝块间传力和整体受力要求,则可认为大坝是完整的。对大坝的整体性要求,可以理解为:断面设计中应保证结构能有效的传力,同时满足坝体变形协调要求,不致局部应力过大造成结构裂缝和破坏或局部变形过大影响设备运用。

重力坝设置纵缝带来的对大坝整体性的影响,国内外的工程进行过一些研究。三峡工程具有系统、连续的监测资料和完备的施工过程记录,并据此进行了较其他工程更为全面的研究。针对此问题,今后重力坝建设实践中,应开展如下方面的深入研究:监测和计算分析相结合,研究纵缝开合现象的普遍性和规律性;通过施工和运行过程的仿真分析,研究缝面接触状态与坝块间传力形式;研究纵缝的张开过程与形态,选择合理的灌浆时机;考虑缝面接触状态的非连续性和非一致性,研究合适的并缝措施加以控制。

## 2.2 坝踵应力与应力控制标准

重力坝的应力计算是坝体设计的重要内容之一,而坝踵和坝趾应力是设计大坝断面的控制性参数,因此,坝踵应力与应力控制标准是高重力坝设计技术研究重点。

(1) 坝踵应力实测值与计算值的差异 根据文献[8]中对国内外高重力坝坝踵部位混凝土应力观测成果分析,大坝的实测应力和设计应力之间存在较大差异,坝踵应力及其变化规律性和设计概念也存在差异。潘家口、黄龙滩、五强溪和湖南镇等重力坝的监测资料表明,运行期坝踵垂直正应力均为压应力,在  $-1.0 \text{ MPa} \sim -2.3 \text{ MPa}$  之间,较蓄水前压应力变化不大。三峡坝踵应力观测结果表明:坝踵压应力的增加主要发生在施工期,从 2003 年开始蓄水至 2011 年,坝踵应力在  $-5 \text{ MPa} \sim -6 \text{ MPa}$  之间变化,在各年蓄水前后,实测坝踵铅直向压应力值有所减小,变化量约在  $1 \text{ MPa}$  以内,坝踵应力变化均比材料力学法和有限元法计算的应力变化量要小。上述实例说明已建重力坝的实测坝踵应力与设计计算应力均存在差异。

总之,蓄水以后重力坝坝踵垂直方向的压应力不是增加了就是维持原状,迄今为止尚未发现因库水位上升导致坝踵应力如设计所预期的那样压应力迅速减少的实例,蓄水后水压对坝踵应力的影响甚微,坝踵仍处于受压状态,形成的主要原因可能是蓄水后混凝土上游面湿度增加、坝体降温及基础灌浆等综合作用所致,目前对影响重力坝坝踵应力的影响因素及机理尚缺乏深入研究。

(2) 坝踵应力控制标准的探究 现行规范规定坝踵不允许出现拉应力是针对材料力学计算方法而言的,但在建基面上由于几何边界和材料均一性的原因,实际应力分布已不符合上述假定。因此,建基面上的应力计算值仅仅是用来复核控制断面设计的理论值,不宜用来与实测值作比较。有限元法可以解决建基面几何形态不规则和复杂地基岩体不均一性问题,但也存在坝踵应力集中和材料非线性问题,从而规范规定了控制上游拉应力区范围宜小于坝底宽的 0.07 倍或坝踵至帷幕中心线的距离。

实际工程中如何监测验证设计结果是否满足规范规定确是一个难题,特别是建基面上坝踵垂直向应力,有的是利用距建基面较近的坝体应力测量值近似代表坝踵应力,有的是在建基面上埋设钢筋计测坝踵应力。重力坝坝体混凝土作为一种人工合成的多相介质材料,其力学特性受到多种复杂因素的影响,受重力坝坝体自重、温度变化、坝体分缝、混凝土体积变形和坝基变形等因素影响,高重力坝的坝踵应力应变关系是非线性的,而现有重力坝应力计算分析方法,由于设计采用的基本假定、边界条件、各种参数和实际情况之间存在差异,致使计算的重力坝坝踵应力和原型观测应力数值间存在较大差异,坝踵应力及其变化规律性和传统设计概念存在一定的差异。

总之,目前对坝踵压应力增加的原因还缺乏系统的研究,重力坝坝踵应力的控制标准也有待进一步深入研究。通过高重力坝坝基及坝体变形、渗流、渗压、应力应变及温度的原型观测,研究坝踵应力监测值与设

计值不符的原因、机理；通过反演分析弄清坝踵应力异常的力学机理、条件，验证重力坝设计方法及坝踵应力控制标准的合理性；研究更切合实际的坝踵应力监测方法，进一步完善混凝土重力坝设计理论。

### 2.3 强震作用下大坝破坏机理及抗震措施

强地震作用下，混凝土重力坝难免发生局部开裂损伤。计入混凝土开裂的非线性动力分析是准确把握混凝土重力坝地震响应及极限抗震能力的关键。其中，混凝土受拉开裂损伤后的应力应变关系是目前研究关注的重点。大坝混凝土的受拉开裂应力应变关系只能通过全级配混凝土轴向拉压循环加卸载试验获得，并在试验数据的基础上提出能够有效反映这一复杂关系的数学模型。陈厚群院士近期提出的考虑残余应变的混凝土损伤模型有效地应用于重力坝地震响应分析，与实际混凝土重力坝震害一致。

重力坝抗震措施主要包括提高重力坝整体动力稳定性及避免或限制坝体薄弱部位在地震过程中开裂。主要有通过设置键槽、横缝灌浆等措施提高坝段间的连接性以提高大坝整体性降低坝体地震响应。减少坝体过渡部位的刚度突变以减少应力集中可以有效减低坝体地震时开裂风险。此外，在坝体地震动应力响应较大部位，如坝踵、上部折坡附近、孔口等，采用提高混凝土标号及布设抗震钢筋以避免坝体开裂或限制混凝土开裂深度。

## 3 结 语

(1) 左岸厂房1~5号坝段通过特殊地质勘探、多种稳定计算方法对比分析研究深层抗滑稳定问题，并据此采取了综合工程措施。蓄水后根据变形、渗流监测资料对坝基岩体的渗透特性、力学参数进行的反演分析表明，设计采用的滑移模式和参数是合理的，复核的深层抗滑稳定安全系数较原设计值大，变形、渗流未见危害工程安全的异常测值，工程措施达到了预期的效果。

(2) 针对坝身大孔口采用的“钢筋混凝土有限元方法”，模拟了混凝土本构关系、钢筋与混凝土粘结滑移关系，可以求得结构裂缝开展过程和钢筋的实际应力值，能分析混凝土开裂后结构的应力重分布，是一种有效的分析方法。

(3) 优选原材料、优化配合比提高混凝土抗裂性能、采用二次风冷骨料工艺降低出机口温度、“个性化”通水控制内部温升、采用新型保温材料控制内外温差的综合技术措施，使大坝混凝土裂缝得到有效控制，一、二期工程施工的大坝混凝土浅表层裂缝0.032条/万 $m^3$ ，无贯穿性裂缝；三期工程施工大坝混凝土396.5万 $m^3$ ，未发现1条裂缝。

(4) 采用薄层碾压连续浇筑、富浆碾压混凝土防渗、埋冷却水管通水降温等技术实现了三期碾压混凝土围堰的快速施工，连续上升高度达37.5m，最大月上升高度28.2m。

(5) 采用了封闭抽排渗流控制方法，在河床坝段解决了高尾水位带来的高浮托力问题，在岸坡坝段解决了坝基内长大缓倾裂隙结构面的扬压力问题。采用基岩无盖重固结灌浆技术对缓解混凝土浇筑与基岩灌浆间的相互干扰、减少混凝土因长间歇裂缝起到了重要作用。

(6) 三峡大坝发现的坝体纵缝仍然存在开合变化、坝踵应力监测值与设计量值不符等现象，其他一些高重力坝也曾发现。这些问题和强震作用下大坝破坏机理及抗震措施，有待深入研究，并藉此进一步完善混凝土重力坝设计理论。

### 参考文献：

- [1] 段斌,张林,陈媛,等.复杂岩基上重力坝坝基稳定模型试验与有限元分析[J].四川大学学报:工程科学版,2011,43(5):77-82. (DUAN Bin, ZHANG Lin, CHEN Yuan, et al. Geomechanical model test and FEM analysis of stability of gravity dam on complex rock foundation[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(5): 77-82. (in Chinese))
- [2] 刘会娟,张建海,陆民安,等.3B坝段坝身孔洞周应力应变分析[J].广西水利水电,2004,5:14-17. (LIU Huijuan, ZHANG Jianhai, LU Min'an. Analysis on stress and strain around holes or caverns in 3B dam block[J]. Guangxi Water Resources & Hydro-

- power Engineering, 2004,5:14-17. (in Chinese))
- [3] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望[J]. 水利学报, 2006, 37(12):1424-1432. (ZHU Bofang. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12):1424-1432. (in Chinese))
- [4] 吴剑疆. 碾压混凝土坝防渗结构型式述评[J]. 水利技术监督, 2005, 1:52-55. (WU Jianjiang. Review on upstream impervious structures of the roller compacted concrete dam[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2005, 1:52-55. (in Chinese))
- [5] 柴军瑞, 李守义. 坝基设封闭灌浆帷幕和抽排系统时的渗流分析[J]. 水电能源科学, 2003, 21(2): 4-6. (CHAI Junrui, LI Shouyi. Analysis of seepage through dam foundation with closed system of grouting curtain, drainage and pumping measures [J]. Water Resources and Power, 2003, 21(2): 4-6. (in Chinese))
- [6] 范五一, 简兴昌. 三峡二期工程大坝混凝土温度控制设计[J]. 人民长江, 2001, 32(10):18-19. (FAN Wuyi, JIAN Xingchang. Dam concrete temperature control for TGP's stage II works[J]. Yangtze River, 2001, 32(10): 18-19. (in Chinese))
- [7] 龙慧文, 罗清. 两次风冷骨料新技术在三峡工程中的应用[J]. 水利水电快报, 2001, 22(5):6-10. (LONG Huiwen, LUO Qing. Aggregate secondary-cooling application of new technology in the Three Gorges Project[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2001, 22(5):6-10. (in Chinese))
- [8] 王志远. 重力坝的实测坝踵应力及原因分析[J]. 大坝观测与土工测试, 2000, 24(6):14-17. (WANG Zhiyuan. Observed stresses in dam heel and analyses of causes[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2000, 24(6):14-17. (in Chinese))

## Technology practice summary of the Three Gorges high gravity dam\*

NIU Xinqiang<sup>1,2</sup>

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research of CWRC, Wuhan 430010, China;

2. National Dam Safety Engineering Research Centre, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The Three Gorges Project, with maximum dam height of 181m, has been designed for water level storage. During the design and construction period of the dam: ① Distinctive geological exploration, a variety of stability calculation method of comparative analysis and comprehensive engineering measures have been applied to solve the left bank dam stability against deep sliding; ② Arranging multilayer outlets to satisfy flood discharge of large flow with multiple tasks, orifice reinforcement is based on FEM; ③ Aggregate secondary-cooling, individual water filling system and surface heat preservation are adopted for temperature control and crack prevention of the dam; ④ Rich slurry concrete permeability control and embedded cooling pipe are used in the construction of roller compacted concrete; and, ⑤ Closed pump drainage and no cover load consolidation grouting are used for foundation treatment. We put forward the relevant problems needed to be further studied on the aspects of longitudinal joint structural integrity of the high gravity dam, dam heel stress and stress control criterion of dam, seismic damage mechanism by intensive earthquake and anti-seismic measures, etc. by analysis of longitudinal joint opening variation and the change rule of the dam heel stress due to the water level variation.

**Key words:** high gravity dam; anti-sliding stability; large orifice; temperature control; roller compacted concrete; longitudinal joint; dam heel stress

\* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. 200701043).