

---

# 高拱坝坝踵应力实测与计算结果差异原因分析

张国新 周秋景

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 坝踵应力是关系到混凝土坝是否开裂和安全的一个重要指标, 不管是用结构力学法还是有限元法都能计算出坝踵有一定的拉应力, 但实际监测值很少出现拉应力, 主要原因应在于: 1) 坝踵位置的定义不同; 2) 目前的监测仪器和方法有局限性; 3) 计算过程中的不当简化。本文从定性和定量两个方面分析造成计算结果和实测结果差异的原因, 以小湾特高拱坝为例分析影响计算精度的各项主要因素, 在此基础上提出坝踵真实应力状态计算的仿真分析方法。改进后的仿真分析结果与监测结果规律吻合良好, 应力值接近, 说明该方法能够给出合理的坝踵应力变化规律和比较精确的应力范围。最后, 给出了坝踵应力监测仪器和方法的改进建议。

**关键词:** 高拱坝; 坝踵应力; 数值模拟方法; 监测方法

**Analysis of difference reason between monitoring and calculating dam heel stress of high arch dam**

**Abstract:** The stress value of a dam heel is a key indicator that is closely related to concrete cracks and dam safety. Tension stress is generally got in a dam heel by structure mechanics methods or finite element methods, while seldom be monitored with instruments. The reason may lie in the following three aspects: different dam heel definition between simulation and monitor, limitation of monitoring methods and instruments, improper simplification in simulation analysis. The reason for the difference between simulation and monitoring results is analyzed qualitatively and quantitatively. Main factors affecting simulation accuracy are studied with Xiaowan arch dam as an example, and an improved simulation method is proposed to give more real and accurate dam heel stress. The simulation results got with the improved simulation method are in good agreement with the monitoring results of Xiaowan arch dam. Therefore, reasonable stress variation and accurate stress range can be obtained with the improved simulation method. Finally, some suggestions for improvement of monitoring instruments and methods are given.

**Key words:** high arch dam, dam heel stress, simulation method, monitoring method

## 0 前言

拱坝设计中坝踵应力是一个关键控制指标, 如果坝踵拉应力超标会引起坝踵开裂, 严重时裂缝会损坏甚至破坏防渗帷幕, 危及大坝安全。国内外不乏因坝踵拉应力超标引起开裂, 影响大坝安全, 而不得不进行大修的例子。如奥地利的 Kolnbrein 拱坝, 初次蓄水过程中, 河床坝段坝踵和下游面底部均出现裂缝, 结构大量漏水, 扬压力增大至全水头, 采取了大量修补加固措施, 最终在大坝下游修建一座大体积拱形重力支撑坝才彻底解决问题<sup>[1]</sup>。奥地利的 Zillergrundl 拱坝在坝踵区预设了诱导缝来防止坝踵出现裂缝, 但效果不佳, 在其上部仍产生了一条水平接缝<sup>[2]</sup>。前苏联的 Sayano-Shushenskoe 重力拱坝蓄水运行时在上游面坝踵位置出现了位于不同高程的水平裂缝, 造成明显渗漏, 后期分三个阶段进行了灌浆修补加固<sup>[3]</sup>。我国石门拱坝在蓄水初期的低温高水位期间坝踵也出现开裂, 对大坝安全运行造成不利影响<sup>[4]</sup>。

完稿日期: 2012 年 12 月 15 日

设计阶段一般按照规范<sup>[5、6]</sup>要求采用拱梁分载法或有限元等效应力法进行应力分析,结果显示坝踵普遍存在一定大小的拉应力,如文[7]统计的小湾、二滩、拉西瓦、构皮滩、李家峡等高拱坝坝踵均为拉应力,且拉应力一般都在 0.8MPa 以上。采用线弹性有限元法计算大坝应力时,坝踵拉应力会随着计算单元的细化而增大,甚至会给出难以置信的结果,非线性分析也会在坝踵出现受拉屈服。为了防止坝踵开裂,我国拱坝设计规范<sup>[5、6]</sup>对坝体的容许拉应力进行了规定,并把坝踵应力作为大坝观测的一个重要指标进行监测。为改善坝踵应力状态,国内外工程中采用过多种减小坝踵拉应力的措施,如布置水平诱导缝<sup>[8]</sup>、坝踵前基础布置预置缝、设置坝踵块<sup>[9]</sup>以及布置贴脚等,典型的如小湾特高拱坝在坝踵处设置了一条横跨 11 个坝段的诱导缝<sup>[8]</sup>。

但是目前我国大量观测结果却不支持如上计算结论,如已运行了十几年二滩高拱坝的坝踵仍为 4MPa 以上的压应力<sup>[10]</sup>;小湾高拱坝已蓄水至正常蓄水位,目前未监测到拉应力,压应力在 1.5~4.0MPa;构皮滩拱坝也未监测到坝踵拉应力<sup>[11]</sup>;王志远<sup>[12]</sup>统计了 10 座重力坝的坝踵应力全部为压应力,平均压应力为 0.84MPa。为什么计算中普遍出现的坝踵拉应力在实测结果中未能见到?为什么实测坝踵普遍为较大的压应力?这是许多学者和工程师普遍关心的一个问题。

对拱坝坝踵的应力问题,国内外学者在多个方面都进行过大量研究工作,如计算网格和计算方法对坝踵应力精度的影响<sup>[13]</sup>,横缝布置等结构因素对坝踵应力的影响<sup>[14]</sup>,计算应力取值方法、坝踵应力集中的等效处理<sup>[15]</sup>,非线性分析中坝踵开裂的判断准则、坝踵开裂的塑性区大小危害性判断方法<sup>[16]</sup>,改善坝踵应力状态的措施如体型优化、设置周边缝和底缝等<sup>[8]</sup>,工程措施对坝踵应力和拱坝工作性态的影响<sup>[17]</sup>,坝踵开裂对坝体应力分布规律和大小的影响<sup>[18]</sup>等。以上对坝踵应力问题的广泛研究,给出了很多的有益研究成果和结论,但仍存在问题需要解答,其中很重要的一个问题是坝踵应力计算值和实测值存在差异。针对拱坝坝踵应力准确性问题,张国新等针对仿真计算影响因素进行过初步讨论<sup>[19]</sup>,王志远针对重力坝坝踵应力问题进行过定性讨论<sup>[12]</sup>,探讨了运行期温度应力、灌浆作用以及湿胀作用等。

本文从计算坝踵和观测坝踵的差别,观测仪器和方法的局限性,数值计算中模型和荷载的模拟方式的影响等几个方面分析高拱坝坝踵应力的计算结果和观测结果差别的原因,研究真实坝踵应力的计算分析和观测方法,提出了更精确的仿真分析方法和监测建议,并对小湾拱坝坝踵应力进行了分析。

## 1 实测坝踵应力的局限性

### 1.1 计算和监测应力坝踵位置不相同

在设计及数值计算中,坝踵一般定义为拱坝上游面和建基面交点,该点处于结构的几何突变位置,存在应力集中现象,结构和应力分布都非常复杂。有限元法计算时坝踵应力会极大地依赖于网格剖分,难以给出稳定的计算结果,因此规范要求采用等效应力的方式计算坝踵应力值。在实际监测中,坝踵应力监测仪器如压力计或多点应力计一般不会布置在这种几何突变位置,而是在离坝踵一定距离处。如图 1 为小湾高拱坝拱冠梁坝段建基面附近应力监测设备布置情况,该拱坝中应力监测仪器布置在实际坝踵下游处,距离上游面约 6.0m、建基面约 3m 处。应力应变测点这种布置方式,避开了坝踵复杂构造的影响,避免了应力集中带来的测值不稳定性。但是测值反映的不是真实的坝踵应力,与数值计算分析的坝踵位置有较大差别,这是造成计算坝踵应力与实测坝踵应力差别的原因之一。

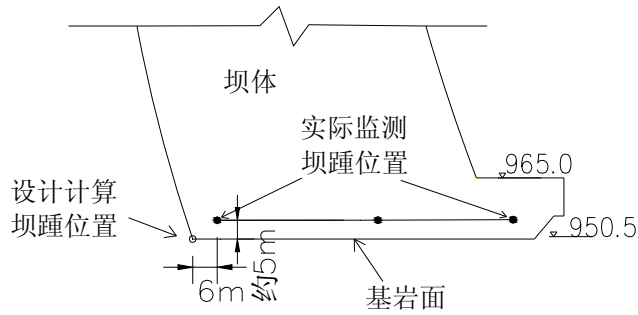


图 1 典型拱坝坝踵应力计布置示意图

### 1.2 坝踵应力监测设备和方法只能监测压应力

坝踵应力的监测，目前一般采用两种方法，一是在建基面混凝土与基岩的结合部位埋设压应力计，直接测量坝基的应力。第二种方法是埋设多项应变计，测量出各方向应变值，进一步计算应力。

#### (1) 坝基压应力计

图 2 是一个典型的坝踵应力计示意图。应力计距上游面一般 3 至 6m，测轴平行于建基面的法向，因此只能监测建基面的法向应力。建基面的应力由两部分组成：扬压力（或渗透压力）及岩石-混凝土之间的有效应力，而应力计测值为总应力，即：

$$\sigma_s = P_u + \sigma_r \quad (1)$$

式中  $\sigma_s$  为实测应力， $P_u$  为扬压力， $\sigma_r$  有效应力。

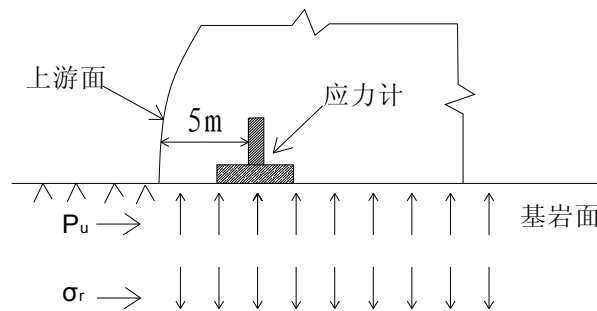


图 2 典型拱坝坝踵压应力计布置示意

大坝浇筑期间，有效应力  $\sigma_r$  随坝高的增加，压应力不断增大，蓄水后随水位不断抬升，压应力逐渐减小，一旦水压引起的拉应力增量大于浇筑期压应力贮备时，有效应力由压变为拉，但该部位最大拉应力不会大于基础岩体的抗拉强度。因此实测坝踵压应力不小于扬压力与岩体抗拉强度之差，即：

$$\sigma_s \geq P_u - f_{t1} \quad (2)$$

式中： $f_{t1}$  为基础岩体的抗拉强度。

众所周知，岩体普遍存在大量节理裂缝，是一种抗压不抗拉的材料，抗拉强度一般很低，尤其在存在裂隙和节理时，可能抗拉强度接近于 0。坝踵处的扬压力一般与上游水头相等，因此当上游水压产生的拉应力小于岩体的抗拉强度时，应力计可以测到坝基压应力；而当建基面的有效拉应力大于岩体的抗拉强度，使得建基面拉开，应力计的测值即转化为扬压力值。事实上，多座高坝的坝踵应力测值在水位达到一定高度时便与水位正相关变化，说明此处建

基面已开裂，应力计转变为渗压计。

### (2) 多向应变计组

坝踵多向应变计组均埋设于混凝土中，距上游面和建基面都有一定距离，如图 3 为小湾拱坝坝踵附近多向应变计组埋设示意图。

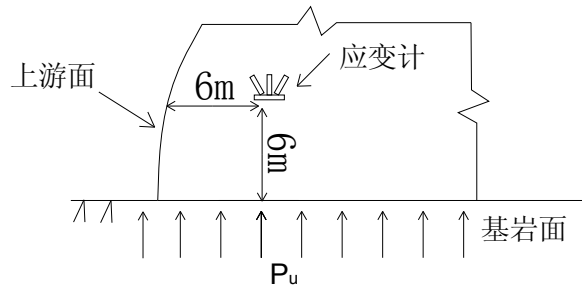


图 3 小湾拱坝坝踵多向应变计组埋设示意图

建基面处坝基岩体对坝踵混凝土的作用应力为：

$$\sigma_s = P_u + \sigma_x \quad (3)$$

取坝踵局部进行应力分析可知，坝体上游面为库水带来的压应力，下部建基面处为下部基岩渗流带来的压应力（扬压力作用），测点高程处的横向应力即拱向应力也为压应力，因此可知多向应变计组测点处为三向受压状态，因此埋设于坝踵附近混凝土中的多向应变计组只能监测到压应力。

由以上分析可见，对于高拱坝而言，采用目前的监测方法，不管坝踵压应力计还是坝踵多向应变计组，都只能监测到压应力，而不能监测到拉应力，这是目前坝踵应力监测方法和仪器的局限性，也可以部分解释目前为止未能观测到坝踵拉应力的原因。

## 2 模型和荷载简化对计算结果的影响

### 2.1 坝体自重和蓄水过程的影响

坝体自重是影响坝踵应力的重要因素。高拱坝的浇筑是分坝段进行，然后通过接缝灌浆逐步封拱而成，封拱高程以上部分单个梁（单坝段）独自承载混凝土自重，封拱高程以下部分则是以拱梁分载的方式由拱和梁共同承担上部混凝土自重。传统的自重模拟方式有两种，一是自重全部作用于整体拱坝，坝体自重由拱梁分载共同承担；另一种是自重全部作用于梁上，各梁自身的自重由本梁承担。这两种模拟方式都做了简化，均会带来一定的误差。第一种方式低估了自重引起的坝踵压应力，而第二种方式则高估了坝踵压应力。大量的对比分析表明<sup>[20]</sup>，自重施加和封拱按 11 次以上模拟时的坝踵应力即与全过程仿真结果相近，以小湾拱坝为例，仿真结果为 14.26MPa，自重作用于全坝和自重作用于梁上的坝踵有限元应力与全过程仿真有限元结果相比相差 2.39MPa 和 2.52MPa。

除坝体分期浇筑外，特高拱坝一般要分期蓄水，即大坝浇筑到一定高程，具备部分挡水能力时即开始蓄水以尽早发电，这种分期蓄水方式，使得每次蓄水时水压增量仅由已封拱部分的坝体承担，这种部分坝体（封拱高程以下）承担水压的方式与水压全部作用于整体大坝的水压施加方式在坝内引起的应力分布有一定差别，会使坝踵压应力有所减小，但鉴于初始蓄水水位较低，且蓄水时坝体封拱高程一般较高，这种影响相对较小。

### 2.2 温度荷载的影响

#### 1) 温度荷载对坝踵应力的贡献

拱坝的设计温度荷载分为温升荷载和温降荷载，具体算法都在规范中有所规定。温度荷载的计算起点是封拱温度，温升荷载为月平均最高气温对应的坝体准稳定温度与封拱温度之差，温降荷载为月平均最低气温对应的坝体准稳定温度与封拱温度之差。实际计算中，是将

整个温差作用于大坝整体，计算温度荷载。温升荷载会使大坝向上游变形，从而在坝踵部位引起压应力，温降荷载会使大坝向下游变形，在坝踵部位引起拉应力。因此特高拱坝为防止温降荷载带来的拉应力，一般采用低温封拱，封拱温度比坝体平均温度(稳定温度)低 1~3℃，结果会使温升荷载均值大于温降荷载均值。

实测结果表明，坝体高高程的混凝土在封拱之后，在混凝土的残余水化热和环境温度的影响下，大多在 3-6 个月内，出现较大幅度的温度回升，如小湾拱坝，封拱后的温度回升普遍在 5-6℃，局部可达到 9-12℃，图 4 和图 5 为小湾拱坝不同高程测点的温度过程曲线和 2012 年 7 月实测拱冠梁剖面的温度分布，考虑低、中、高三个不同高程分区的封拱温度分别约是 12℃、14℃和 16℃，可以算出各高程的温升值约 8-10℃。

事实上，实测的温度荷载与设计温度荷载存在两个差别，1) 实测温升值普遍大于设计温升值；2) 由于分期封拱，实际温升荷载只作用于已封拱的坝体部分，不影响未封拱部分。由于以上两个原因，致使按照设计温升荷载方法计算的坝踵设计压应力小于实际应力，即现行方法低估了温升荷载对坝踵压应力的贡献，仿真计算结果表明小湾拱坝温度回升荷载作用下的坝踵贴脚边缘压应力高达 6.5MPa，坝体上游面坝踵部位压应力也有 1.4MPa 以上。

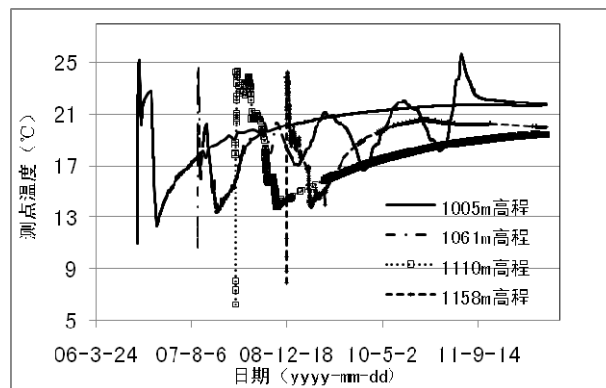


图 4 小湾拱坝拱冠梁坝段不同测点温度变化曲线

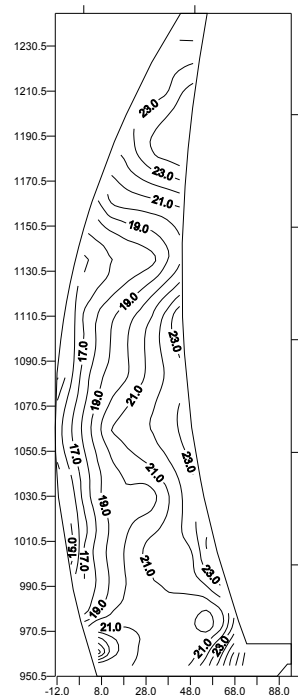


图 5 小湾拱坝 2012 年 7 月份拱冠梁剖面温度分布

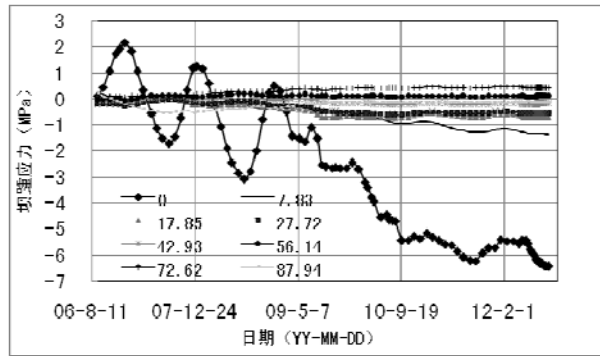


图 6 小湾拱冠梁底部各点应力随时间变化曲线

## 2) 库底堆渣高温的影响

水库水温决定了坝体上游坝面的温度边界条件，坝体前后库水温计算一般有两种方法，一是规范建议的估算方法，二是数值分析的计算方法。这两种方法计算的库水温分布规律是在库水表面以下 60~70m 范围内库水温随季节变化，温度变幅随水深增加逐步减小，60~70m 以下的温度基本保持不变。库底水温最低，基本为河流的最低月平均气温，如图 7 所示。实际工程中为了改善坝踵的温度条件和防渗条件，往往在坝前进行回填，围堰拆除后的围堰土料也会很快被水流冲至坝前，如小湾和溪洛渡拱坝，在初次蓄水时，坝前淤积料高度可达 50m 以上。淤积物表面高程以下的温度特性与基础相似，自该高程往下，深度越大温度越高，直至达到地温，如小湾在库底淤积高程表面即真正的水库底部实测温度为 12℃，与设计阶段的计算温度一致，但下部温度逐步升高，到设计库底高程即坝体坝踵部位温度升高到 20~21℃，与地温相近，比设计值高出 8~9℃。坝踵部位混凝土温度的提高会在坝踵引起压应力，计算结果表明采用实际库水温度的坝踵压应力会比设计库水温度高约 0.8MPa，贴脚边缘更是高达 2.2MPa。

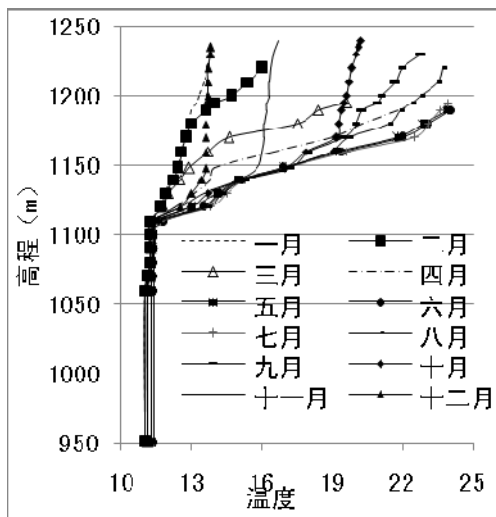


图 7 小湾拱坝设计库水温

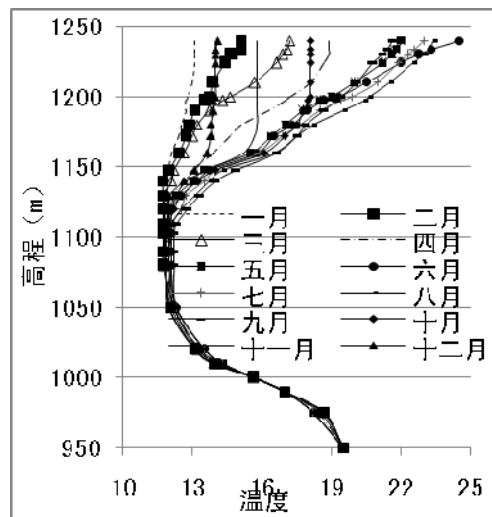


图 8 小湾拱坝实测库水温

## 2.3 库盆水压力及基础约束的影响

库水压力不仅仅作用于坝面，同时作用于库内的基岩内，此处称为库盆水压力，由于基岩一般具有一定的渗透性，作用于库内基础上的水压会在蓄水一定时间后形成渗流场，以渗透压力的形式作用于基础，大坝应力及变形计算时应该考虑这种库水压力的作用。拱梁分载法不考虑库盆水压力，有限元计算时一般分两种情况，一种是不考虑库盆水压力，另一种是考虑库盆水压力，将其作为面力作用于库盆表面。库盆水压力的不同考虑方式会对坝踵应力

计算结果产生影响, 不考虑库盆水压力忽略了水压作用于基础对坝体应力的影响, 以面力作用于库盆表面则夸大了库盆水压的影响。以小湾为例, 采用同一网格模型对不同库盆压力作用方式对坝踵应力影响进行了分析, 见图 9 分别是不计库盆水压力, 全水头作用于库盆岩面, 水压作用于帷幕和以渗透压力作用于基岩面。结果表明, 四者坝踵点拉应力结果分别是 5.50MPa、11.75MPa、3.28MPa、9.32MPa。可见库盆水压力对坝踵应力有较显著的影响, 按渗透压力考虑较好的反映了库盆水压力的影响。

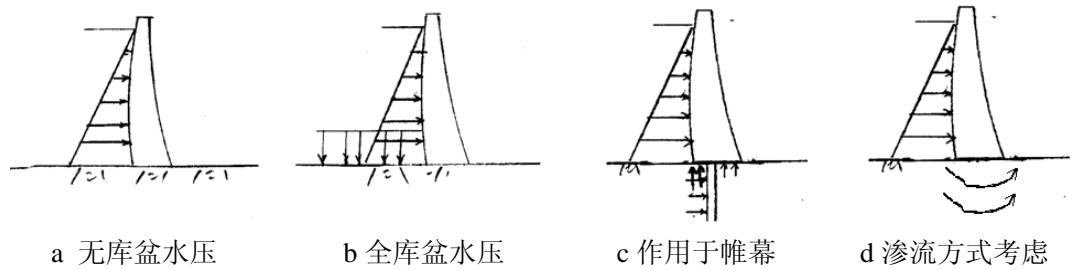


图 9 不同库盆水压考虑方式

影响上游水压对坝踵应力影响的另一个因素是基岩对坝体的约束, 在水压力作用下, 大坝整体有向下游变形的趋势, 在两岸拱座, 水的推力转化为拱的推力作用于坝肩基岩, 而在河床部位则是以剪力的方式作用于基础岩体, 结果会在坝踵上游的基岩内产生拉应力, 基础正是通过这种拉应力对坝体的下游变形提供约束, 基岩的这种引拉约束作用会增大坝踵的拉应力。如前所述, 岩体是一种抗压不抗拉的材料, 岩体抗拉强度是很有限的, 当大坝由于水压作用向下游变形, 在坝踵附近的基岩内产生拉应力后, 岩体的裂隙会张开, 从而使上述张拉作用消失, 最终降低坝踵的上下游方向的拉应力。

### 3 小湾特高拱坝坝踵应力分析

#### 3.1 工程概况

小湾水电站位于我国西南, 该拱坝底高程 950.5m, 坝顶高程 1245m, 最大坝高 294.5m, 坝顶弧长 892.8m, 最大底宽 73.12m, 是目前已建成的最高拱坝, 具有坝高弧长的特点。该坝共分 43 个坝段, 自右向左坝段号依次增加, 以 22#和 23#坝段中间横缝为对称点。图 10 为小湾拱坝上游展示图和拱冠梁坝段横剖面。该拱坝在上游坝踵附近布置有 10m 宽的诱导缝, 在 957.5m 高程, 坝踵应力监测上, 953m 高程布置有坝踵压应力计, 具体布置如图 1 所示, 诱导缝高程靠近上游面即前端和诱导缝后端布置有压应力计。

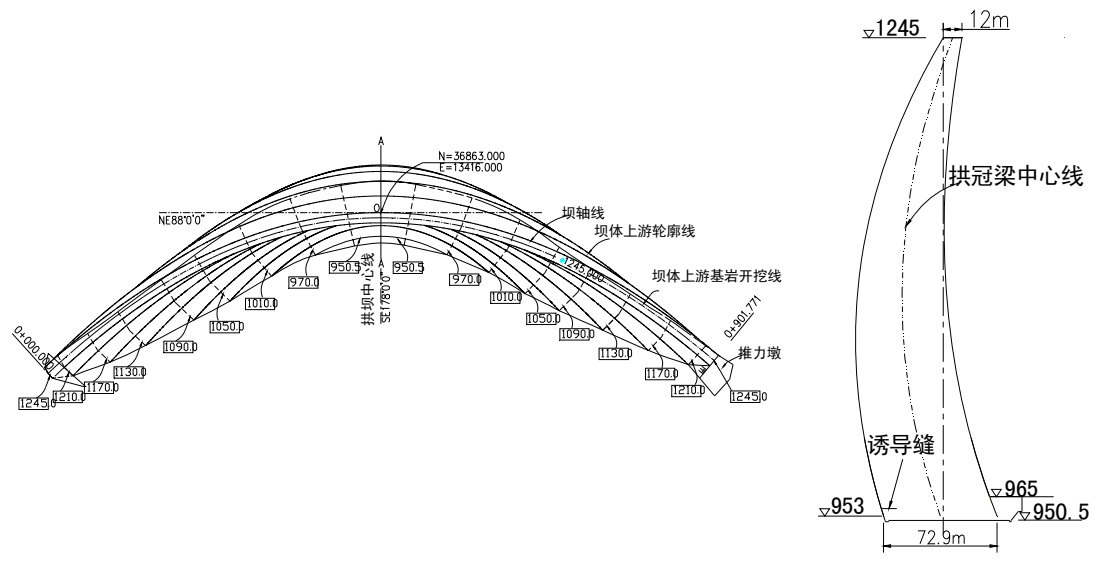


图 10 小湾拱坝上游展示和拱冠梁剖面图

### 3.2 监测坝踵应力分析

图 11 为拱坝拱冠梁 22#坝段坝踵点监测应力随时间和水位变化曲线。可以看到，前期浇筑阶段，随着坝体浇筑高程增加，22#拱冠梁坝段坝踵压应力逐渐增大，最大压应力实测值约 5.0MPa；在 07 年 11 月份-08 年 3 月份坝体浇筑期间，压应力出现反常减小现象，这一现象在其它坝段坝踵应力测量中没有出现，可能与监测仪器等因素有关；其后随着浇筑高程升高，压应力逐渐加大，一旦水库蓄水，坝踵应力随水位升高逐渐减小，后期随着水位波动而产生波动。坝踵诱导缝测点压应力变化规律与坝踵点应力变化规律一致，浇筑过程中压应力不断增大，最大压应力值达到 8.0MPa，其后随水位上升压应力不断减小。可知应力监测成果规律良好，但压应力值与诱导缝压应力相比明显偏小，且蓄水后压应力变幅也小，由于受到渗压作用、仪器埋设和仪器自身可靠性等影响，单个监测点数值可能并不能准确反映该处压应力实际状态，但通过不同监测成果相互校核，可以比较准确的判断坝踵应力变化规律和大致应力范围。

### 3.3 计算和监测坝踵应力比较

鉴于一般计算应力和实测坝踵应力存在较大差别，本文以小湾特高拱坝为例，采用改进的仿真模拟方法进行分析，得到计算坝踵应力结果，并与实测结果进行比较，判断该方法的合理性和有效性。本文分析方法中自重和水压采取分期方式施加，自重分 12 次，水压按照实测水位变化过程施加；温度荷载方面，根据实测混凝土温度变化情况和实测库水温度以及气温等边界条件，进行混凝土绝热温升的反演分析，得到混凝土绝热温升参数，以此为基础，结合实测温度边界条件，进行坝体温度场仿真分析；同时以渗流场方式考虑库盆水压影响。应力取值时计算坝踵位置与实测坝踵位置保持一致。

采用上述改进后的仿真分析方法，按照实际蓄水过程进行计算，得到坝踵计算应力。图 11 为计算坝踵应力与坝踵监测应力、诱导缝监测应力对比情况，可知除坝踵监测点在前期浇筑过程中有压应力异常减小现象外，三者变化规律保持一致。数值上，计算值处于坝踵监测值和诱导缝监测值中间，比较合理的给出了坝踵实际应力估计，即在水位达到 1219m 高程时，坝踵应力为压应力，且压应力值较大，约-4.0MPa。

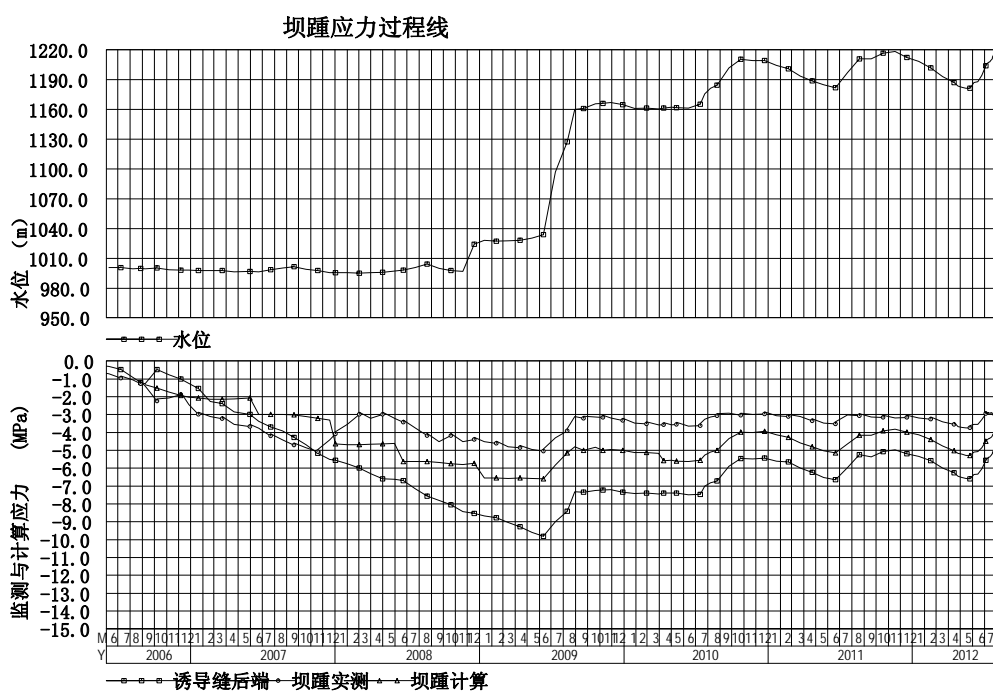


图 11 坝踵计算应力与监测应力对比曲线



## 4 结论与讨论

目前为止,多拱梁法及有限元法计算结果中,高拱坝在坝踵都有较大的拉应力,但大坝观测都未监测到这种现象,不管是重力坝还是拱坝的坝踵应力观测结果中几乎都为压应力,部分大坝的坝踵压应力值还较大。本文的分析结果表明,造成计算结果与实测结果差别的主要原因为:

1) 坝踵应力观测方法和设备的局限性。实测存在局限性,包括测点距计算坝踵有一定的距离,测值反映的不是真正坝踵的应力;观测结果中包含了渗透压力,由于实际基岩的抗拉能力差,当有效应力大于基岩抗拉强度时,测值即为测点的渗透压力等。

2) 施工期坝体的浇筑过程、封拱过程和分期蓄水对坝踵应力影响较大。整坝施加上述荷载低估了如上过程对坝踵压应力的贡献。

3) 传统计算中温度荷载的考虑方式与实际温度作用有差别,二冷之后的温度回升过程、库底淤积导致水温的提高都会在坝踵引起附加压应力增量,而传统的计算方法中这些因素考虑不够。

4) 模拟了大坝浇筑、封拱过程、蓄水过程及温度变化过程及渗流场形成过程的仿真分析方法可以较好地模拟各种因素,计算结果能够反映坝踵应力的真实情况,小湾拱坝坝踵应力计算结果与实测相近。

5) 另外有研究者认为实测坝踵应力为压的一个重要原因是混凝土的湿胀变形,但笔者认为,(1)坝踵浇筑完成后一般都浸泡于水中;(2)后期如出现湿胀,前期应发生过于干缩,监测资料未见这个过程;(3)建基面一般都能监测到一定的渗透压力,说明坝基混凝土基本都是饱和混凝土,如发生湿胀变形则整个断面均匀膨胀。因此湿胀即使带来坝踵附加压应力,量值也有限,具体影响情况,需要进一步研究。

6) 建议开发能够贯穿坝踵附近部分坝体和基岩的分布式应力、应变观测设备,用于坝踵应力观测,以反映渗压、温度及基岩局部损伤对坝踵应力的影响,正确监测坝踵的真实工作性态。

## 参考文献

- [1]Lombardi, G. (1991). 'Kolnbrein dam: an unusual solution for an unusual problem.' *Water Power & Dam Construction*, (6).
- [2]E.Wagner,H.Gaisbauer,H.P.Rossmannith.(1993). 'Effect of inclined planar fractures on borehole performance.' *Engineering fracture mechanics*.44(3):481-489.
- [3]E.K.Alekandrovskaya.(1995). 'State of the Sayano-Shushenskoe dam during four fold rise of the upper pool level to the elevation of the normal pool level .' *Hydrotechnical construction*,28(10):630-634.
- [4] Li Zan. (1999). "Study on cracks at the heel of the arch dam of Shimen project." *Journal of Hydraulic Engineering*, (11), 61-65.
- [5]SL282-2003,混凝土拱坝设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [6]DL/T5346-2006,混凝土拱坝设计规范[S].北京:中国电力出版社,2007.
- [7]柏宝忠,钟源清.混凝土拱坝设计应力控制标准的研究[J].人民长江,2003,34(11)12-13.
- [8]朱伯芳.从拱坝实际裂缝情况分析边缘缝和底缝的作用[J].水力发电学报,1997,(2):9-66.
- [9]厉易生,杨波,张国新.消除混凝土坝坝踵拉应力集中的一种结构措施-设置坝踵块[J].水力

---

发电,2008,(6):59-61.

[10]袁琼.二滩拱坝应力监测分析[J].水电站设计,1993,19(3):37-40.

[11]王志宏,胡清义,余昕卉,段国学.构皮滩水电站初期蓄水拱坝工作性态分析[J].人民长江,2010,41(22):29-31.

[12]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.

[13] 杨强,吴浩,周维垣.大坝有限元分析应力取值的研究[J].工程力学,2006,23(1):69-73.

[14]孙林松,王德信,谢能刚.横缝间隙对拱坝应力状态的影响分析[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(1):76-80.

[15]朱伯芳.论混凝土拱坝有限元等效应力[J].水利水电技术,2012,43(4):30-34.

[16]王修信,潘家铮,夏颂佑.坝踵断裂控制的塑性区尺寸因子法[J].河海大学学报,1992,20(4):40-46.

[17]田斌,夏颂佑.冰冻帷幕对高拱坝工作性态的影响[J].河海大学学报,1997,25(1):6-12.

[18]王永荣,陈玉夫.拱坝坝前断裂对坝体应力的影响[J].水力发电,1992,(6).

[19]朱伯芳,张超然,张国新,等.高拱坝结构安全关键技术研究[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[20]Zhang Guoxin,Liu Yi,Zhou Qiujing.Study on real working performance and overload safety of high arch dam[J].Science in China Series E-Technological Sciences,2008,51(supplement 2):48-59.

## 基金项目

国家自然科学基金(50909105, 51209235), 水利部公益性行业科研专项(201201050), 中国水科院科研专项(材集 1118、材集 1208、材集 1247、材集 1268)