

# 论混凝土坝的几个重要问题

朱伯芳

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**[摘要]** 目前我国在建混凝土坝的高度、数量、规模均居世界第一位, 文章就混凝土坝技术的几个重要问题进行讨论: (1) 结束“无坝不裂”历史的关键技术; (2) 应用氧化镁混凝土筑坝的两种指导思想和两种实践结果; (3) 混凝土强度等级应用于混凝土坝欠妥, 坝工混凝土仍以采用混凝土标号为宜; (4) 我国特高拱坝的抗压安全系数偏低, 应当适当提高。(5) 拱坝有限元等效应力问题。

**[关键词]** 混凝土坝; 裂缝; 混凝土标号; 抗压安全系数; 有限元等效应力

**[中图分类号]** VT5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)07-0021-09

## 1 前言

我国已建成的混凝土坝数量早已居世界首位, 目前在建的混凝土坝的高度也已跃居世界首位, 如在建的小湾拱坝(高292 m)、溪落渡拱坝(高275 m)、筹建中的锦屏一级拱坝(高305 m), 其高度都超过了已建成的世界最高的英古里拱坝(高271.5 m); 在建的龙滩碾压混凝土重力坝(高192 m)将是世界最高的碾压混凝土重力坝。不久还将建设一大批世界水平的混凝土高坝, 这说明我国已进入了一个混凝土坝建设的黄金时期。我国的混凝土坝是自主进行设计、研究和施工的, 随着一大批世界水平混凝土高坝的顺利建成, 我国混凝土坝的设计、科研、施工水平也将进入世界先进行列。

笔者就我国当前混凝土坝建设中的几个重要问题进行讨论, 提出一些看法, 以就正于读者。

## 2 结束“无坝不裂”历史的关键技术

从20世纪30年代开始, 水利工程师已重视混凝土坝裂缝问题, 并做了大量工作, 也取得了不少成就, 但到目前为止, 国内外的混凝土坝几乎都出

现了不少裂缝, 即所谓“无坝不裂”。原因有二, 其一, 抗裂安全系数较低; 其二, 人们比较重视基础贯穿裂缝的防止, 而对于如何防止表面裂缝重视不够, 表面保护措施不够有力, 特别是对长期保温的必要性缺乏认识。

下面说明如何结束“无坝不裂”的筑坝历史。

### 2.1 严格控制基础温差

根据国内外经验, 我国重力坝和拱坝设计规范规定, 常态混凝土坝基础允许温差如表1所示, 30年来实践结果表明, 按此表控制温差是可以防止基础贯穿裂缝的<sup>[1-3]</sup>。混凝土重力坝设计规范 DL5108-1999还规定了碾压混凝土坝基础允许温差(见表2)<sup>[4]</sup>, 表2是根据两种混凝土的极限拉伸由表1换算而得, 是比较可靠的, 但近年不少碾压混凝土坝突破了表1的规定。由于碾压混凝土坝内无水管冷却, 坝体内部降至稳定温度需要几十年甚至更多时间, 短期内不易暴露问题, 因此决不能因为施工后数年内未出现基础裂缝就认为没有问题了。

在柱状浇筑的重力坝内, 上下层温差一般不起控制作用, 但对于通仓浇筑的常态和碾压混凝土重力坝, 上下层温差也应严格控制。

表 1 常态混凝土坝基础容许温差

Table 1 Allowable temperature difference near foundation for conventional concrete dams  $\Delta T/^\circ\text{C}$

距基础面 高度 $h/\text{m}$	浇筑块长边长度 $l/\text{m}$				
	< 17	17 ~ 21	21 ~ 30	30 ~ 40	40 至通仓
0 ~ 0.2l	26 ~ 24	24 ~ 22	22 ~ 19	19 ~ 16	16 ~ 14
0.2l ~ 0.4l	28 ~ 26	26 ~ 25	25 ~ 22	22 ~ 19	19 ~ 17

表 2 碾压混凝土坝基础容许温差

Table 2 Allowable temperature difference near foundation for roller-compacted-concrete dams  $\Delta T/^\circ\text{C}$

距基础面 高度 $h$	浇筑块长边长度 $l$		
	< 30 m	30 ~ 70 m	> 70 m
0 ~ 0.2l	18 ~ 15.5	14.5 ~ 12	12 ~ 10
0.2l ~ 0.4l	19 ~ 17	16.5 ~ 14.5	14.5 ~ 12

2.2 表面长期保温的必要性与可行性

2.2.1 混凝土表面养护 28 d 时间太短 《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 - 2001 规定“混凝土养护时间不宜少于 28 d”<sup>[4]</sup>，实践经验表明，如果在 28 d 以后停止养护的话，在半年甚至一年以后还会出现干缩裂缝，表面养护 28 d 是不够的。图 1 表示水泥与岩粉按 1:1 制成的水泥浆试件交替置于水中和相对湿度 50% 空气中的水份迁移，循环周期为 28 d<sup>[5]</sup>，由图 1 可见，即使在龄期 28 d 以后，试件置于水中即膨胀，试件置于空气中即收缩，龄期 2 年后仍然如此，虽然膨胀和收缩的变化幅度随着龄期的延长而逐渐减小。可见混凝土表面养护 28 d 是远远不够的。

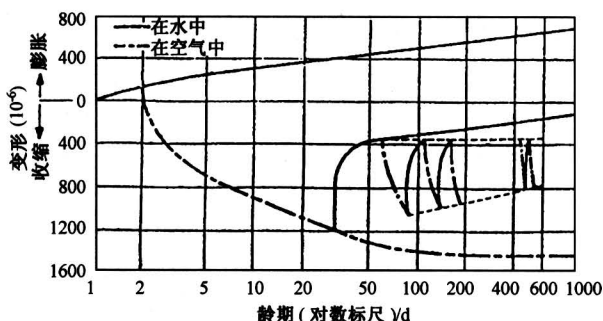


图 1 水泥与岩粉 1:1 混合物试件中的变形  
Fig.1 The deformation in specimens of cement mixed with rock powder by 1:1 ratio

2.2.2 混凝土表面保温 28 d 时间太短 《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 - 2001 规定“28 d 龄期内的混凝土，应在气温骤降前进行表面保护”<sup>[4]</sup>，这里给人一种错觉，似乎 28 d 龄期以后的混凝土，除了某些特殊情况外，一般不必进行表面保温了。实际情况并非如此。例如我国某重力坝施工过程中曾产生较多裂缝，其中绝大多数并不是在龄期 28 d 内产生的，而是在当年冬季、次年冬季甚至更晚的时候产生的，图 2 是该坝某坝段上游面裂缝情况。冬季遇到寒潮是大坝表面最易产生裂缝的时候，应是防止表面裂缝的重点，保温 28 d 是不够的。

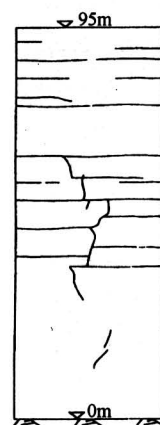


图 2 某重力坝上游面裂缝分布图

Fig.2 Distribution of cracks on the upstream face of a concrete gravity dam

2.2.3 上下游表面应长期保温 夏秋季节浇筑的混凝土，到了冬季，上下游表面温度大幅度下降，再加上寒潮，所产生的拉应力很大，往往引起裂缝，表 3 表示了华中地区某重力坝仿真计算结果<sup>[6]</sup>，如无保温措施，冬季最大水平拉应力达到 4.2 MPa，超过了混凝土抗拉强度；铅直拉应力虽由于自重作用而有所减少，但也超过了水平施工缝的抗拉强度，实际上出现了不少裂缝。考虑两种表面保温方案：

1) 5 cm + 2 cm 方案：上下游面用内贴 5 cm 聚苯乙烯泡沫塑料板长期保温，浇筑层水平面及侧面用 2 cm 聚乙烯泡沫塑料板保温。

2) 3 cm + 1 cm 方案：上下游面用内贴 3 cm 聚苯乙烯泡沫塑料板长期保温，浇筑层水平面及侧面用 1 cm 聚乙烯泡沫塑料板贴保温，计算结果见表 3。采用泡沫塑料板保温后，拉应力已大为减小，不致出现裂缝。实际工程采用 5 + 2 方案后施工 3

年来未出现一条裂缝。

表3 某重力坝上游面冬季最大拉应力

Table 3 The maximum tensile stress in the winter on the upstream face of a concrete gravity dam MPa

	水平应力	铅直应力
无保温措施	4.2	2.6
5 cm 苯板 + 2 cm 水平及侧面聚乙烯板	1.6	-0.1
3 cm 苯板 + 1 cm 水平及侧面聚乙烯板	1.9	0.1
允许拉应力 (后期)	2.2	1.33

2.2.4 重要部位应永久保温 某高拱坝施工结束时裂缝不多，但运行数年后，冬季遇到一次大寒潮，产生了数十条裂缝，深度约 4 m，对坝的安全性和耐久性可能带来相当影响。

目前拱坝设计中允许拉应力只有 1.2 MPa，计算温度荷载时只得忽略非线性温差，但非线性温差实际是存在的；因此，在拱坝下游表面及上游表面的水上部分，当设计荷载作用下存在着拉应力时，再叠加冬季遇寒潮时的非线性温差应力，很可能产生裂缝，这些部位只有进行永久保温才能防止裂缝。在寒冷地区，即使是中小型拱坝，上下游表面都应进行永久保温。表 4 给出了关于长期保温和永久保温部位的初步建议，当然实际工程中还应考虑工程的重要性而有所区别。另外，运行期永久保温与施工期长期保温应尽量结合起来。

表4 施工期长期保温与运行期永久保温的部位

Table 4 The position requiring long time thermal insulation in the construction period and permanent thermal insulation in the period of operation

	一般地区		寒冷地区	
	施工期 长期保温	运行期 永久保温	施工期 长期保温	运行期 永久保温
拱坝	上游面	全部	死水位以上拉应力区	全部
	下游面	全部	拉应力区	全部
重力坝	上游面	全部	死水位以上	死水位以上
	下游面	基础约束区	—	全部

2.3 结束“无坝不裂”历史的时机已经成熟

由于塑料工业的发展，用泡沫塑料板进行保温，施工方便，造价低廉，效果好，兼有长期保温和保湿功能。3 cm 厚聚苯乙烯泡沫塑料板的价格约为 20 (内贴法) ~ 38 (外贴法) 元/m<sup>2</sup>，平均长度 500 m 的 100 m 高重力坝，如上下游面全部采用

3 cm 聚苯乙烯板长期保温，全坝保温费不过 230 ~ 430 万元，对于一座百米高坝来说，这点材料费实在是微不足道，但它对大坝抗裂能力的提高却是非常显著的，如果不保温，出现裂缝后，裂缝处理费用将远远超过保温费用。

目前我国混凝土预冷技术也得到较好发展，盛夏期间，混凝土机口温度已可做到不超过 7℃，在不少工程中，已经防止了基础贯穿裂缝的出现。过去无坝不裂，主要是表面保温做得不好，尤其是缺乏长期保温，今后只要重视并做好表面保护，同时做好基础混凝土温度控制，完全可以防止混凝土坝的裂缝，彻底结束过去“无坝不裂”的筑坝历史。

3 应用氧化镁混凝土筑坝的两种指导思想 and 两种实践结果

3.1 氧化镁混凝土筑坝的两种指导思想

3.1.1 第一种指导思想 我国部分专家，对于应用氧化镁混凝土筑坝，持过分乐观的态度，他们主张：只要胶凝材料中含有 3.5% ~ 5.0% 氧化镁，它所产生的自生体积膨胀就可以充分地补偿混凝土坝中的温度拉应力，可以“替代传统的预冷、加冰、埋冷却水管及夏天高温停工的旧温控方法”，应用于混凝土拱坝，可以取消横缝、冷却水管和预冷骨料，全年通仓浇筑，不受地区限制，既适用于南方，也适用于北方；不受坝高限制，既适用于中低拱坝，也适用于高拱坝；“即使在北方极端严酷的气温条件下”，同样可修建不分横缝的氧化镁混凝土拱坝，甚至 100 m 以上的高拱坝。

3.1.2 第二种指导思想 我国另一些专家，赞成应用氧化镁混凝土，但对其作用，持较谨慎、较实际的态度，其指导思想如下<sup>[7]</sup>：

1) 氧化镁不能“包打天下”。胶凝材料中掺入 3.5% ~ 5.0% 氧化镁，其自生体积膨胀约相当于 6 ~ 8℃ 温升，可以适当简化混凝土坝的温控措施，但在大多情况下，不能因为用了氧化镁，就取消横缝和其他各种温控措施，氧化镁不能“包打天下”。

2) 应重视氧化镁混凝土的四大差别：a. 室内外差别，室内混凝土试件，经过湿筛，测得的膨胀变形偏大，约为原型混凝土的 1.5 (三级配) ~ 1.9 (四级配) 倍。b. 时间差别，沙老河拱坝 9 月份浇筑的混凝土，温度很高，到了 11 月份，温度急剧下降，而此时龄期尚早，氧化镁引起的膨胀变形还很少，以致产生了贯穿裂缝。c. 地区差别，北方

用氧化镁混凝土筑坝，温度控制的难度远大于南方。d. 坝型差别，氧化镁混凝土兴建重力坝时，温控的难度较小，而兴建拱坝时，温控的难度较大。

3) 取消横缝弊大而利小。

4) 应重视表面保护。氧化镁引起的膨胀变形内部大而外部小，在表面引起附加拉应力。更应重视表面保护。

### 3.2 氧化镁混凝土筑坝的两种实践结果

3.2.1 沙老河氧化镁混凝土拱坝 沙老河拱坝位于贵阳市郊区，坝高 62.4 m，在持第一种指导思想专家的指导下进行温控设计，取消横缝和一切温控措施，盛夏全坝通仓浇筑，只掺用 4.0%~5.5% 氧化镁，2001 年 3 月开始浇筑混凝土，9 月竣工，施工中也未进行表面保温。当年 11 月初发生了一次寒潮，寒潮后出现了 1#~4# 贯穿性裂缝，长度分别为 11.1 m, 22.2 m, 15.2 m, 23.8 m，最大缝宽 7~8 mm。2004 年 4 月对 4 条裂缝进行了接缝灌浆。到 2004 年 12 月底，已灌浆处理的 4 条裂缝重新被拉开，并又发现第 5#、6# 贯穿性裂缝，见图 3。1#~4# 已灌浆裂缝被拉开和出现 5#、6# 裂缝时，混凝土龄期已有 14~21 个月，氧化镁膨胀变形已基本结束，还不能阻止新裂缝的产生和已灌浆老裂缝的重新拉开。国内外混凝土坝温度裂缝的宽度大多不到 1 mm，最宽的也不过 2 mm 左右，该坝最大裂缝宽度达到 8 mm，实属罕见<sup>[8]</sup>。

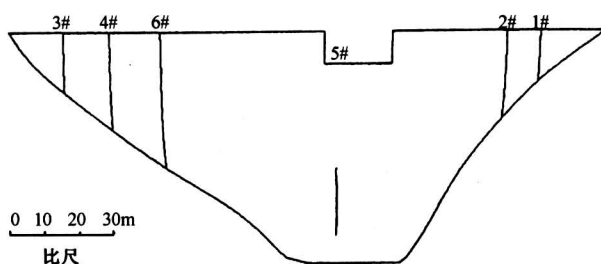


图3 沙老河氧化镁混凝土拱坝裂缝情况

Fig.3 The cracks in Shalaohe  
MgO concrete arch dam

当地年平均气温 15.3℃，气温年变幅 9.45℃，从全国来看，气候条件并不算太坏，虽不如广东，但比华北、东北要好得多。某些专家主张掺入 3.5%~5.0% 氧化镁后，可取消横缝全年施工，并可不受地区和坝高限制，显然是不符合实际的。

3.2.2 三江河氧化镁混凝土拱坝 三江河拱坝位

于贵阳市北郊，坝高 71.5 m，由贵州省水利水电设计院设计，由于沙老河拱坝产生了严重裂缝，贵州省设计院委托中国水利水电科学研究院承担三江河氧化镁拱坝的温度控制研究，采用第二种指导思想进行温控设计。

为了利用冬季低温的有利条件，在 2002 年 11 月中至次年 4 月底浇筑全部混凝土。首先假定不设横缝，全坝通仓浇筑，用三维有限元仿真程序计算，为了拉应力不超过允许值，要求氧化镁掺量为 3%~4% (坝高 0~30 m) 和 8%~10% (坝高 30 m 以上)。掺量 8%~10% 已大大超过了规范要求，因此放弃了无缝方案，决定设置两条诱导缝，如图 4 所示。经计算，应力满足要求，最后采用的温控措施如下：全坝掺 4.5% 氧化镁；设置两条诱导缝；全坝在低温季节浇筑（计划浇筑时间 2002 年 11 月~次年 4 月，实际浇筑时间为 2002 年 12 月~次年 5 月）；喷雾、洒水养护；坝高 25 m 以下堆砌保温，25m 以上低温季节挂泡沫塑料板保温。

该坝按照上述方案进行施工，竣工 2 年时，坝体只发现一条长约 1.5 m 极细的表面裂缝，如果表面保护做得更好些，这条表面裂缝也可避免；两条诱导缝都张开了，计算诱导缝最大张开度 5.8 mm，实测 5.6 mm。该坝是国内外裂缝最少的拱坝之一。

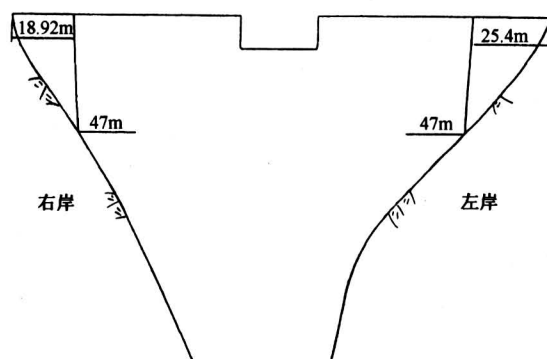


图4 三江河氧化镁拱坝诱导缝

Fig.4 The inducing joints in the  
Sanjianghe MgO concrete arch dam

## 4 混凝土标号与混凝土强度等级

过去我国混凝土坝一直采用基于 90 d 龄期的混凝土标号，《混凝土重力坝设计规范》DL 5108-1999 改用基于 28 d 龄期的混凝土强度等级，由于

水坝施工周期长达数年，笔者认为这一改变欠妥。

4.1 混凝土标号  $R$  与混凝土强度等级  $C$  的关系

混凝土标号  $R_\tau$ ，系指龄期  $\tau$ ，15 cm 立方体试件、保证率 80% 的抗压强度，由下式计算：

$$R_\tau = f_{cr}(1.0 - 0.842\delta_{cr}) \quad (1)$$

式中， $R_\tau$  为龄期  $\tau$  的混凝土标号， $f_{cr}$  为龄期  $\tau$  时 15 cm 立方体试件平均抗压强度； $\delta_{cr}$  为龄期  $\tau$  混凝土抗压强度的离差系数；系数 0.842 为保证率 80% 的概率度系数。

混凝土强度等级  $C$  系指 28 d 龄期、15 cm 立方体试件、保证率 95% 的抗压强度，由下式计算：

$$C = f_{c28}(1 - 1.645\delta_{c28}) \quad (2)$$

式中， $f_{c28}$  为 28 d 龄期 15 cm 立方体试件平均抗压强度； $\delta_{c28}$  为 28 d 龄期混凝土抗压强度离差系数；系数 1.645 为保证率 95% 的概率度系数。

混凝土标号  $R$  与强度等级  $C$  的比值  $R/C = 1.3 \sim 2.5$ ，相差较大，且与多种因素有关。

4.2 设计龄期问题

混凝土强度等级  $C$  应用于工业与民用建筑工程是合适的，一方面其施工期较短，另一方面，它们多采用普通硅酸盐水泥，龄期 28 d 以后混凝土强度增加不多。但混凝土强度等级  $C$  应用于水坝工程是不合适的。坝工混凝土强度等级  $C$  规定设计龄期为 28 d，这是完全脱离实际的，水坝的施工期往往长达数年，即使是一座 30 m 高的小型混凝土坝，也不可能在 28 d 内建成并蓄水至正常水位。在筑坝历史上曾采用过 4 种混凝土设计龄期：28 d，90 d，180 d，365 d；早期采用过 28 d 和 365 d，后期逐步趋向于采用 90 d（常态混凝土）和 180 d（碾压混凝土），不用 28 d 和 365 d；这是由于：**a.** 在 28 d 与 90 d 之间混凝土强度增长较多，而且与多种因素有关，在 180 d 以后强度增长不明显；**b.** 施工中按设计龄期检验设计强度合格率，如以 365 d 为设计龄期，发现问题为时已晚。

混凝土强度增长系数  $f_{cr}/f_{c28}$  的变化范围相当大，影响因素较多，如水泥品种、掺合料品种和掺量、外加剂品种和掺量等都有较大影响。简单的换算，难以反映实际情况。

4.3 安全系数问题

已建工程的实际经验是决定设计安全系数的重要依据，现有设计安全系数取值的基础是 90 d 龄期 80% 保证率，如改为 28 d 龄期 95% 保证率，安全系数必须修改，如何修改是一个较难课题，因为

过去很少混凝土坝是按 28 d 龄期 95% 保证率设计的。文献[2]虽然设计龄期采用 28 d，但安全系数仍然采用 90 d（常态混凝土）和 180 d（碾压混凝土），先由  $C_{28}$  换算成  $R_{90}$  和  $R_{180}$ ，再由  $R_{90}$  和  $R_{180}$  决定设计强度标准值，问题是比值  $R_{90}/C_{28}$  和  $R_{180}/C_{28}$  受到多种因素的影响，变化范围很大，图 5 中列出了  $R_{90}/C_{28}$  比值的变化，可看出，文献[2]采用了  $R_{90}/C_{28}$  的下包值，实际工程中  $R_{90}/C_{28}$  远远超过了此值。

例如，假定设计中采用强度等级  $C = 10$  MPa，由文献[2]查得  $R_{90} = 14.6$  MPa，由图 5 可知，几个实际工程相应的混凝土标号为：三峡坝配比 B， $R_{90} = 16.9$  MPa；五强溪坝  $R_{90} = 18.0$  MPa；漫湾坝配比 A， $R_{90} = 19.5$  MPa；二滩坝配比 C， $R_{90} = 21.2$  MPa。这些实际工程所达到的混凝土标号比文献[2]推荐值分别高出 16%、23%、33.6%、45.2%。实际的混凝土标号超出这么多，不但增加水泥用量造成严重的浪费，而且大幅度地增加了温度控制的难度。

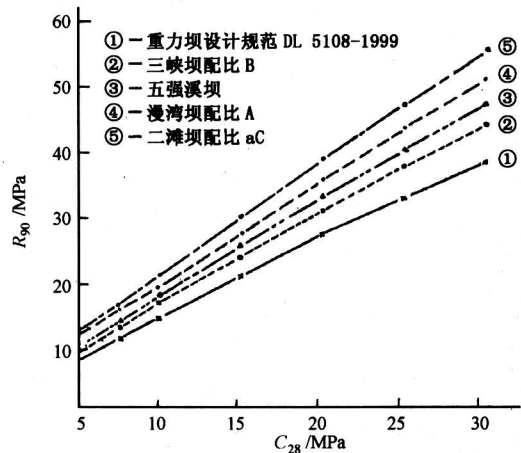


图 5 常态混凝土强度等级  $C_{28}$  与混凝土标号  $R_{90}$

Fig.5 The strength class  $C_{28}$  and the concrete mark  $R_{90}$  for the conventional concrete

4.4 工程施工质量验收问题

水工混凝土施工规范规定：“混凝土质量验收取用混凝土抗压强度的龄期应与设计龄期相一致”<sup>[4]</sup>，并规定在设计龄期每 1 000 m<sup>3</sup> 混凝土应成型一组试件用于质量评定。采用混凝土强度等级  $C$  后，设计龄期改为 28 d，工程施工中没有 90 d 和 180 d 龄期的试件，而设计中实际上又利用了 90 d（常态混凝土）和 180 d（碾压混凝土）的后期强



度,用28 d龄期的试验资料进行验收,难以保证90 d或180 d龄期混凝土在各种可能情况下都是合格的<sup>[9]</sup>。

综上所述,工业与民用建筑工程采用混凝土强度等级C是合理的,水坝工程采用混凝土强度等级C是不合理的,应该继续采用混凝土标号R。

目前正在编制中的水利行业《混凝土重力坝设计规范》和电力行业《混凝土拱坝设计规范》原稿均采用混凝土强度等级C,在笔者提出意见后,经专家会议审议,均已决定采用混凝土标号R。(但拟采用C<sub>90</sub>和C<sub>180</sub>符号)。

## 5 特高拱坝的抗压安全系数

我国混凝土拱坝设计规范要求90 d龄期混凝土抗压安全系数不小于4.0<sup>[3]</sup>,由于工程重要,特高拱坝安全系数本应适当提高,但实际情况正好相反,目前一些特高拱坝设计中,反而把抗压安全系数改为180 d龄期不小于4.0,如按90 d龄期核算,安全系数实际上已降低到3.5左右,欠妥<sup>[10]</sup>。

### 5.1 国内外拱坝抗压安全系数比较

由于各国拱坝设计中采用的设计龄期、试件形状、试件尺寸、试验方法(湿筛或全级配)不同,不能简单地把各国采用的安全系数拿来进行比较,必需考虑上述各种因素的影响进行分析。

坝体原型混凝土强度R<sub>c</sub>与室内试件混凝土强

度f<sub>c</sub>的关系,可表示如下:

$$R_c = f_c c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 \quad (3)$$

式中R<sub>c</sub>为坝体原型混凝土抗压强度,f<sub>c</sub>为室内15 cm立方体试件90 d龄期80%保证率的抗压强度,c<sub>1</sub>为试件形状系数,即长直强度与立方体强度之比;c<sub>2</sub>为尺寸系数,即大试件与15 cm立方体小试件强度比值;c<sub>3</sub>为湿筛系数,c<sub>4</sub>为实际使用龄期与90 d龄期抗压强度比值,c<sub>5</sub>为时间效应系数。根据大量实验资料,可知c<sub>1</sub>=0.84,c<sub>2</sub>=0.83,c<sub>3</sub>=0.87。

龄期τ的混凝土抗压强度f<sub>c</sub>(τ)可表示如下:

$$f_c(\tau) = f_c(28) \left[ 1 + m \ln \left( \frac{\tau}{28} \right) \right], 0 \leq \tau \leq 365 \quad (4)$$

系数m与水泥品种、粉煤灰掺量、外加剂掺量等有关,假定坝体承受全水头时最大应力部位混凝土龄期为365 d,于是

$$c_4 = \frac{f_c(365)}{f_c(90)} = \frac{1 + m \ln(365/28)}{1 + m \ln(90/28)} \quad (5)$$

通常室内混凝土强度试验,试件是在1~2 min内破坏的,实际工程的持荷时间长达数十年,远远超过1~2 min。荷载持续时间的长短对混凝土强度的影响见表5<sup>[5]</sup>。

表5 荷载持续时间对混凝土强度的影响

Table 5 The influence of duration of load on the strength of concrete

荷载持续时间	2 min	10 min	30 min	1 h	4 h	100 d	1 a	3 a	30 a
不同持荷时间强度/ 标准试验速度下强度	100%	95%	92%	90%	88%	78%	77%	73%	69%

对于拱坝,自重是恒定荷载,水位是在最高水位与最低水位之间变化,准稳定温度是反复变化的,初始温差是恒定的,情况比较复杂。综合考虑上述情况,建议取持荷时间效应系数c<sub>5</sub>=0.70。

兹定义三种抗压安全系数如下:

K<sub>1</sub>—设计安全系数(该工程设计标号除以最大主压应力);

K<sub>2</sub>—换算安全系数,即按我国标准试件及试验方法换算的安全系数(设计龄期90 d,15 cm立方体试件,湿筛);

K<sub>3</sub>—坝体原型安全系数(设计龄期365 d,长

直强度,原级配,大试件,考虑时间效应)。

三个系数之间存在如下关系:

$K_3 = K_2 c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 = K_1 c'_1 c'_2 c'_3 c'_4 c'_5$  (6)  
c<sub>1</sub>~c<sub>5</sub>定义见前,c'<sub>1</sub>~c'<sub>5</sub>是与各国混凝土试验方法相应的有系数,由于c<sub>5</sub>=c'<sub>5</sub>=0.70,故由式(6)有:

$$K_2 = \frac{c'_1 c'_2 c'_3 c'_4}{c_1 c_2 c_3 c_4} K_1 \quad (7)$$

由上式即可把各国拱坝抗压安全系数K<sub>1</sub>换算成我国标准的安全系数K<sub>2</sub>。

表6中列出了国内外一些混凝土拱坝实际采用

表6 国内外拱坝实际采用的抗压安全系数

Table 6 The factors of safety for compressive stress adopted in practical arch dams

国家	坝名	坝高 /m	设计安全系数 $K_1$						
			设计 龄期/d	试件形状、尺 寸/cm、方法	设计标号 /MPa	最大主压应力 /MPa	设计安全系数 $K_1$	换算成我国标 准安全系数 $K_2$	原型坝体 安全系数 $K_3$
中国	小湾	292	180	15 × 15 × 15	40.0	10.0	4.00	3.75	2.16
前苏联	英古里	271.5	180	15 × 15 × 45	35.0	9.40	3.72	3.90	2.13
意大利	Vajont	263.5	90	Φ25 × 25	35.0	7.00	5.00	5.26	2.88
瑞士	Mauvoisin	250.5	90	20 × 20 × 20	42.0	9.90	4.24	4.46	2.44
中国	二滩	240	180	20 × 20 × 20	35.0	8.40	4.17	3.64	2.10
瑞士	Contra	230	90	20 × 20 × 20	45.0	10.50	4.29	4.51	2.47
美国	Hoover	222	28	圆柱体大试件	17.5	4.30	4.07	8.67	4.75
日本	黑部第四	186	91	Φ15 × 30	43.0	9.98	4.31	5.13	2.81
美国	Mossyrock	185	365	圆柱体大试件	33.1	8.30	4.00	5.19	2.84
中国	东风	162	90	20 × 20 × 20	30.0	7.50	4.00	4.00	2.30
美国	Yellow Tail	160	365	圆柱体大试件	28.1	6.20	4.00	5.19	2.84
法国	Roselend	150	90	50 × 50 × 153 (全级配)	30.0	7.50	4.00	6.59	3.61
中国	白山	150	90	20 × 20 × 20	25.0	5.42	4.61	4.61	2.54
中国	江口	140	90	15 × 15 × 45	30.0	6.50	4.62	4.62	2.55
中国	陈村	76.3	90	20 × 20 × 20	20.0	1.62	12.34	12.34	6.29

注：(1) 在笔者提出建议后，昆明设计院决定将小湾拱坝高应力区混凝土标号从  $R_{180}400^*$  提高到  $R_{180}450^*$ ，相应地安全系数可提高 12.5%。(2) 小湾坝强度保证率为 90%。

的抗压安全系数。

## 5.2 适当提高特高拱坝安全系数的必要性

对国内外拱坝实际采用安全系数进行分析后，可得出以下几点结论：

1) 拱坝的实际安全系数并不高。过去有人以混凝土设计标号与模型试验结果对比，求得拱坝安全系数 6~10，得出拱坝安全系数很高的结论，这是一种虚假现象。首先，室内小试件快速试验得出的强度与坝体原型有重大差别，考虑这个因素，安全系数要减少近一半，另外，模型试验中没有考虑温度荷载和扬压力，也没有考虑横缝影响，得出破坏荷载偏高，从表 5 可知，考虑试件尺寸及时间效应后，除个别情况外，多数拱坝实际抗压安全系数只有 2.0~2.8 左右，数值并不很大。

2) 高拱坝安全系数低于低拱坝。一般说来，低拱坝抗压安全系数较大，而高拱坝抗压安全系数较小，这两方面的原因，一方面高拱坝应力水平高于低拱坝；另一方面，过去人们误认为拱坝抗压安全系数很高、有较多富裕，在高拱坝设计中没有采用足够大的安全系数。

3) 中国特高拱坝安全系数偏低。从表 6 可知，

换算成我国标准的拱坝抗压安全系数  $K_3$ ，国外高拱坝在 4.46—8.67 之间，绝大多数在 4.5—5.2 之间，没有 1 个小于 4.4 的；唯独前苏联和中国的 3 个特高拱坝安全系数最低；英古里 3.90，二滩坝 3.64，小湾坝 3.75。

4) 必需适当提高特高拱坝的抗压安全系数。特高拱坝，由于工程重要，其安全系数本应高于一般拱坝，但目前我国特高拱坝的安全系数不但低于国外水平，而且低于国内的一般拱坝，欠妥。

前苏联长期处于短缺经济状态，在结构设计中追求过度节省，安全系数低于世界平均水平，英古里拱坝设计即为一例。我国在改革开放以前，也存在着类似现象，二滩拱坝设计采用较低安全系数，也反映了这一情况。安全系数的降低，经济上的节省是很小的，但却给工程安全性带来不必要的危害，这种状态，应该予以改变。笔者的具体意见：特高拱坝的抗压安全系数按设计龄期 90 d，15 cm 立方体试件 80% 保证率考虑，最好取 4.50，至少不应低于 4.00，如设计龄期为 180 d，最好取 5.00，至少不应低于 4.50。

实际施工时强度可能超标，也可能不超标，设

计文件只能要求施工质量合格,不能要求超标,因此设计安全系数不能把超标作为安全系数的一部分。

小湾拱坝(高 292 m)是全世界最高拱坝,但原来采用的安全系数偏低,在笔者提出书面意见后,经专家委员会讨论,已决定把高应力区的混凝土标号从  $R_{180}400^*$  高到  $R_{180}450^*$ ,安全系数提高了 12.5%,投资只增加 200 万元,相当于总投资的万分之一。

## 6 拱坝有限元等效应力

有限元法有强大的计算功能,但因坝踵应力集中,未能用于拱坝设计。由于岩体存在裂隙,实际上应力集中不一定那么严重。我国学者朱伯芳、傅作新提出了有限元等效应力法<sup>[11,12]</sup>,笔者提出了相应的应力控制标准<sup>[13]</sup>,为新编拱坝设计规范所采纳<sup>[5]</sup>,从而为有限元法应用于拱坝开辟了道路。

用有限元法计算拱坝,得到整体坐标系( $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ )中的应力 $\{\sigma'\}$ ,在结点  $i$  取局部坐标系( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ),其中  $x$  轴平行于拱轴的切线方向, $y$  轴平行于半径方向, $z$  轴为铅直方向,局部坐标系中的应力 $\{\sigma\}$ 由下式求得<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{x'} \cos^2 \alpha + \sigma_{y'} \sin^2 \alpha + \tau_{x'y'} \sin 2\alpha \\ \sigma_y = \sigma_{x'} \sin^2 \alpha + \sigma_{y'} \cos^2 \alpha - \tau_{x'y'} \sin 2\alpha \\ \sigma_z = \sigma_{z'} \\ \tau_{xy} = (\sigma_{y'} - \sigma_{x'}) \sin \alpha \cos \alpha + \tau_{x'y'} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \\ \tau_{yz} = \tau_{y'z'} \cos \alpha - \tau_{z'x'} \sin \alpha \\ \tau_{zx} = \tau_{y'z'} \sin \alpha + \tau_{z'x'} \cos \alpha \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\alpha$ 为从 $x'$ 到 $x$ 的角度(逆时针为正); $z$ 与 $z'$ 同轴。

单位高度拱圈的径向截面,宽度为 1,沿厚度方向对拱应力及其矩进行积分,可得到拱的水平推力  $H_a$ 、弯矩  $M_a$  及径向剪力  $V_a$ ,例如

$$M_a = - \int_{-l/2}^{l/2} \sigma_x y dy \quad (9)$$

梁的水平截面在拱中心线上取单位宽度,在  $y$  点的宽度为  $1 + y/r$ , $r$ 为中心线半径,沿厚度方向对梁的应力及其矩进行积分,得到梁的竖向力  $W_b$ 、弯矩  $M_b$ 、切向剪力  $Q_b$ 、径向剪力  $V_b$ 、扭矩  $\overline{M}_b$ ,例如

$$W_b = - \int_{-l/2}^{l/2} \sigma_x \left(1 + \frac{y}{r}\right) dy \quad (10)$$

有了这 8 个内力,由平截面假定就可以计算坝体应力。

下面讨论拱坝有限元等效应力分析中的两个问题。

第一是内力计算问题,这本是一个比较简单的问题,用有限元法求出应力分布后,用数值积分法可直接计算拱梁的内力,但目前流行着一种算法,以二次曲线表示应力分布,即  $\sigma = a + bx + cx^2$ ,在坝体剖面上取三点的应力,决定系数  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,经积分得到拱与梁的内力。如图 6 (a) 所示,二次曲线是没有拐点的,拱坝是偏心受压结构,一个典型的应力分布如图 6 (b) 所示,一边受拉,一边受压,是一条有拐点的高次曲线,上述算法显然不符合实际,带来不必要的误差,宜用数值积分方法直接计算内力,既简单又准确。

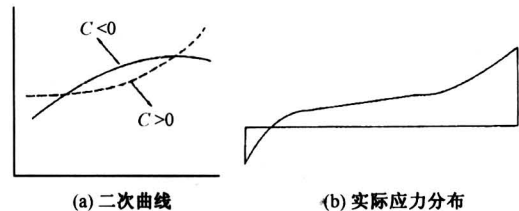


图 6 建基面上应力分布

Fig.6 Stress distribution on the surface of foundation

第二个问题是在计算中如何考虑坝体自重。有以下三种假定:第一种假定,坝体自重全部由梁承担,不参与拱梁分配;第二种假定:自重整体计算,在坝体竣工并形成整体后,自重一次性地施加于全坝,全部自重由拱梁共同承担;第三种假定,自重分步计算,考虑接缝灌浆过程。目前拱梁分载法多采用第一种假定,有限元计算中多采用第二种假定,但这种假定与实际情况相差太远,不宜采用,有限元计算以采用第三种假定为宜,也可采用第一种假定,与传统的拱梁分载法保持一致。

第三是应力控制标准问题,我们同时用有限元等效应力法和多拱梁法对国内外十几座拱坝进行了计算,发现两种方法算出的压应力数值相近,但有限元等效应力法的拉应力比多拱梁法约大 25%。因此采用有限元等效应力法时,允许压应力不变,允许拉应力可从 1.20 MPa 放宽到 1.50 MPa,这些研究成果已纳入新编拱坝设计规范<sup>[3]</sup>。

## 7 结论

1) 结束“无坝不裂”历史的时机已经成熟,



除了严格控制基础温差外, 需要加强表面保护, 在坝体上、下游表面, 可用聚苯乙烯泡沫板进行长期保温, 兼有保温功能, 施工方便(内贴法或外贴法), 造价低廉。在临时暴露表面, 可用聚乙烯泡沫软板保温。在重要部位, 如拱坝上下游水上表面的受拉区域及寒冷地区的重力坝, 建议进行永久保温。

2) 关于应用氧化镁混凝土筑坝, 目前存在着两种指导思想, 第一种指导思想是, 氧化镁可以“包打天下”, 采用氧化镁混凝土筑坝可以取消横缝和一切温控措施。第二种指导思想是, 氧化镁只能适当简化温控措施, 而不能“包打天下”。沙老河拱坝按第一种指导思想设计和施工, 结果产生了有史以来拱坝最严重的温度裂缝。三江河拱坝按第二种指导思想设计和施工, 只产生1条很短的表面裂缝。两种绝然不同的实践结果, 表明第一种指导思想是不符合实际的。

3) 基于28 d龄期的混凝土强度等级C用于工业与民用建筑是合适的, 用于混凝土坝是不合适的, 由于施工周期长达数年, 坝工混凝土仍以采用基于90 d(或180 d)龄期的混凝土标号为宜。

4) 特高拱坝, 由于工程重要, 其安全系数本应高于一般拱坝, 但目前我国特高拱坝的安全系数反而低于一般拱坝, 显然不合理, 应适当提高。

5) 有限元等效应力法为在拱坝设计中采用功能强大的有限元法开辟了道路。

#### 参考文献

- [1] 混凝土重力坝设计规范 SDJ21-78[S]. 北京: 水利电力出版社, 1979
- [2] 混凝土重力坝设计规范 DL 5108-1999[S]. 北京: 中国电力出版社, 2000
- [3] 混凝土拱坝设计规范 SL 282-2003[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003
- [4] 水工混凝土施工规范 DL/T 5144-2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002
- [5] Troxell G E, Davis H E. Composition and properties of concrete [M]. New York, Mc Graw-Hill, 1956
- [6] 朱伯芳, 许平. 加强混凝土坝表面保护, 尽快结束“无坝不裂”的筑坝历史[J]. 水力发电, 2004, (3)
- [7] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000, (3)
- [8] 朱伯芳, 张国新, 杨卫中, 等. 应用氧化镁混凝土筑坝的两种指导思想和两种实践结果[J]. 水利水电技术, 2005, (6)
- [9] 朱伯芳. 论坝工混凝土标号与强度等级[J]. 水利水电技术, 2004, (8)
- [10] 朱伯芳. 论特高混凝土拱坝的抗压安全系数[J]. 水力发电, 2005, (2)
- [11] 朱伯芳. 国际拱坝学术讨论会专题综述[J]. 混凝土坝技术, 1987, (2); 水力发电, 1988, (8)
- [12] 傅作新, 钱向东. 有限单元法在拱坝设计中的应用[J]. 河海大学学报, 1991, (2)
- [13] 朱伯芳. 拱坝应力控制标准研究[J]. 水力发电, 2000, (12)
- [14] 朱伯芳, 等. 拱坝设计与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

## On Some Important Problems About Concrete Dams

Zhu Bofang

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

[Abstract] The number, the height and the size of concrete dams under construction in China are the biggest ones in the world. Some important problems about concrete dams are discussed in this paper: (1) The key technique for terminating the history of “no dam without crack”. (2) Two kinds of guiding thoughts and two results of practical engineering for application of MgO concrete to dam. (3) Concrete mark based on 90 d or 180 d age is more appropriate for concrete dams than concrete class based on 28 d age. (4) The safety factor for compressive stress for the specially heigh concrete arch dam (higher than 200 m) is some what low in China (5) The equivalent stress in arch dams analysed by the finite element method.

[Key words] concrete dam; cracks; concrete mark; safety factor for compressive stress; equivalent stress for finite element method