

底缝对拱坝工作性态的影响^{*}

杜成斌 任青文

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 结合一试验拱坝用数值方法研究了底缝对拱坝的非线性影响. 坝体、坝基和接缝均考虑了材料的弹塑性, 坝体、地基材料用 Drucker-Prager 准则模拟, 接缝材料用 Mohr-Coulomb 准则模拟. 模拟了接缝的滑移、开裂等非线性行为. 计算结果和试验值一致性较好.

关键词 底缝拱坝 模型试验 拱应力 悬臂梁应力

中图号 TV131.6

拱坝线弹性和非线性分析均表明, 在常规荷载作用下拱坝在上游坝踵附近会出现较大的梁向拉应力, 对于河谷较宽, 接近 300 m 的特高拱坝来讲, 情形就更为严重. 我们近年来对小湾拱坝(292 m)的分析表明, 基本荷载作用下上游坝踵附近最大主拉应力达 5.0 MPa, 若再考虑地震荷载作用(顺河向 0.308 *g*, 竖向 0.205 *g*), 上游面坝踵附近最大主拉应力近 7.0 MPa. 显然, 在这么高的拉应力作用下这些部位肯定会开裂. 一旦开裂, 再在高压水作用下, 裂缝会进一步发展, 甚至破坏止水帷幕, 从而导致严重后果. 为了解决拱坝上游底部断裂问题, 人们提出了各种方法, 归纳起来有两种: 一种是从拱坝体型入手, 进一步优化体型, 严格控制施工温度, 适当加厚拱端^[1]; 一种是“以缝治缝”方法, 人为地在拱坝底部设置底缝或周边缝以释放其过大的拉应力, 同时设置有效止水装置. 本文结合浙江天台光明双曲底缝拱坝的模型试验, 用弹塑性有限元法详细分析了底缝对拱坝的非线性影响, 研究中考虑了坝体材料和接缝材料的弹塑性变形. 通过分析, 以期对底缝拱坝的结构受力性能、变形和工作机理等有较深入的了解.

1 底缝拱坝的结构形式

现有底缝拱坝的底缝大都采用直缝结构形式, 有水平方向的也有斜向的. 一般缝的位置离坝的建基面有一定距离, 有时也有直接设在坝基交界面处的. 缝的深度一般为 0.25 ~ 0.30*B* (*B* 为缝处坝厚). 缝的端部设有排水廊道, 用于排水, 同时也可防止裂缝进一步扩展. 设有此种缝型的底缝拱坝有: 瑞士于 1968 年修建的 Hongrin 拱坝^[2], 最大坝高 123 m, 南非 1972 年修建的 Verwoerd 拱坝和 Le Roux 拱坝, 以及正在施工的 Katze 拱坝. 该坝是一座高 185 m 的双曲拱坝, 拱圈最厚 60 m, 坝顶周长 710 m, 体积 230 万 m³. 为提高该坝的抗断裂能力, 设计者在诸多方案中选择了预留缝(Preformed bottom joint)方案. 图 1(a) (b)给出了这种底缝的结构形式.

除此之外, 底缝还有全截面贯通的, 缝面用沥青橡皮止水. 如赤峰市境内响水底缝拱坝, 浙江天台光明双曲底缝拱坝等. 光明拱坝原按浆砌块石重力拱坝设计, 从坝基 47.00 m 高程开始砌筑, 最大坝高 24 m, 坝基础顺河向宽 14.2 m, 底厚 2.0 m. 坝基部分早在 1966 年动工砌筑, 最高处已筑至高程 55.0 m 左右, 因工程量较大, 材料供应困难, 最后决定更改原设计方案, 即将原设计的重力拱坝修改为变中心变半径的双曲底缝混凝土薄拱坝, 已经砌筑的重力拱坝底层部分, 视作双曲拱坝基础. 在坝基与双曲拱坝连接处, 事先设置一道水平缝(图 1(c)), 用沥青贴橡皮止水. 双曲拱坝坝体采用 C20 混凝土. 由于坝底设置了水平缝, 削减了悬臂梁应力, 缩小了断面厚度, 工程量大为减少, 既降低了造价, 又加快了施工进度. 但底缝的存在改变了拱坝的受力和工作特性, 使应力场有所变化, 需要作进一步的研究分析.

收稿日期: 1998-10-13

第一作者简介: 杜成斌, 男, 副教授, 从事水工结构工程中力学问题研究.

^{*} 国家自然科学基金重点项目(59739180)和“九五”攻关资助项目(96-221-04-02-04(1)).

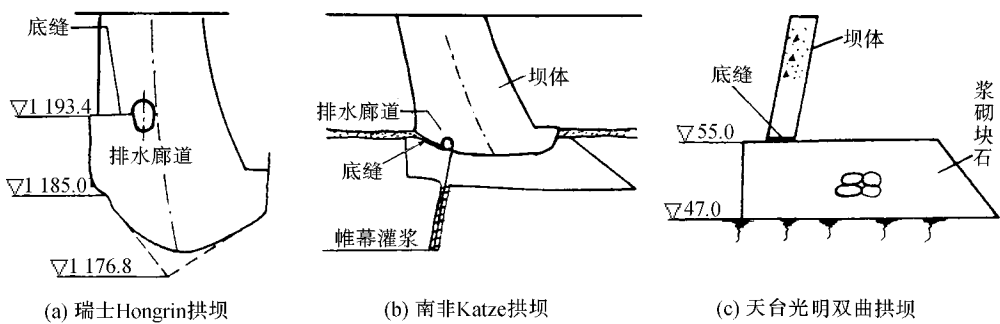


图 1 底缝的结构形式
Fig.1 Layouts of base joints

2 底缝拱坝的非线性分析模型

2.1 坝体、坝基材料的数学模型

坝体和坝基材料的屈服采用 Drucker-Prager 准则

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K \tag{1}$$

式中： I_1 ——应力张量第一不变量； J_2 ——应力偏量第二不变量；

$$\alpha = \frac{\tan \varphi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}} \quad K = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}}$$

其中 c 为凝聚力， φ 为摩擦角。

混凝土的开裂按最大主拉应力准则进行，当主拉应力大于混凝土材料的抗拉强度时，即认为与应力主向垂直的方向发生开裂，同时释放开裂面上的应力。

一旦混凝土进入塑性屈服阶段，即释放有关塑性应力。

$$\Delta \sigma_p = D_p \Delta \varepsilon \tag{2}$$

式中： D_p ——塑性矩阵； $\Delta \varepsilon$ ——应变增量。

2.2 接缝单元材料模型

接缝单元采用 Mohr-Coulomb 屈服准则，加载函数选用

$$F = \sqrt{\tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2} - c + \sigma_z \tan \varphi \tag{3}$$

式中： σ_z ——法向应力； τ_{zx} ， τ_{zy} ——缝面剪应力。

这种单元的非线性主要表现在沿缝面的开裂和错动。假定接缝无法向抗拉强度，则开裂时 $\sigma_z \geq 0$ ，滑动时 $F \geq 0$ 。

开裂之后，释放缝面应力。滑动时修正缝面剪应力。

一旦屈服进入塑性即按有关塑性力学理论计算 σ_p ，并释放之。在角点处用“削去”屈服面角点的方法进行简化处理。

2.3 非线性迭代格式

根据结点平衡得

$$K \Delta \delta_i = \Delta R_i + \Delta R_p + \bar{R} \tag{4}$$

式中： $\bar{R}$ ——失衡力； ΔR_i ——荷载增量； ΔR_p ——非线性等效荷载。

$$\Delta R_p = \sum_e \int_e C_e B^T \Delta \sigma_{pi=1} dv$$

$$\Delta \sigma_{pi=1} = \Delta D_p \Delta \varepsilon_{i=1}$$

将弹性解作为第一次近似值，则迭代格式为

$$\begin{aligned} K \Delta \delta_i^* &= \Delta R_i + \bar{R} \\ K \Delta \delta'_i &= \Delta R_p \quad i > 1 \\ \Delta \delta'_1 &= 0 \end{aligned}$$

$$\Delta \delta'_i = \Delta \delta_i^* + \Delta \delta'_i$$

当 $\frac{\|\Delta \delta'_{i>1}\|}{\|\Delta \delta_i\|} < \epsilon$ 时,迭代结束.

$$\Delta \delta_n = \Delta \delta_i$$

$$\sigma_n = \sigma_{n-1} + \Delta \sigma_n$$

$$\Delta \sigma_n = (D - rD_p)\Delta \epsilon_n$$

式中 D 为弹性矩阵, r 由单元所处的应力状态确定(弹性或塑性卸载 $r = 0$,塑性加载 $r = 1$,弹性向塑性过渡 $0 < r < 1$).

3 底缝拱坝的工作性态

3.1 坝体几何尺寸和有关材料参数

天台光明双曲底缝拱坝的坝址河谷较宽,呈梯形,底边弧长与高度之比值接近 2.3.河谷及两岸山坡岩石为侏罗纪凝灰熔岩.坝体有关几何尺寸见表 1.计算所采用的材料参数见表 2.

表 1 坝体几何参数

Table 1 Shape parameters of the arch dam

高程/m	半径/m	厚度/m	中心角/(°)
75.0	63.0	1.00	88
70.0	55.8	1.33	88
65.0	49.2	1.66	84
60.0	41.3	2.00	88
55.0	32.0	2.00	92

表 2 计算所采用的材料参数

Table 2 Material parameters adopted in the study

参数	弹性模量 /10 ⁴ MPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	重度 (10 ⁴ N·m ⁻³)	凝聚力 /MPa	内摩擦角 (°)	
坝体	2.90	0.2	2.0	2.40		56.3	
夹层	底缝	0.001	0.3	0.0	2.30	0.2	11.3
	常规	1.45	0.2	0.2	2.45	0.4	19.3
浆砌块石坝基	1.45	0.3	0.2	2.45	0.4	19.3	
地基	2.20	0.3	2.0	2.70		50.2	
坝肩	2.20	0.3	2.0	2.70		50.2	

本文采用三维非线性有限元对光明底缝拱坝进行数值分析.单元剖分时取拱坝的一半,在坝基交界面处设置缝单元.基础和上下游地基长度均为 1 倍坝高左右.图 2(a)为拱坝体系的俯视图,图 2(b)为拱冠 $x = 0$ 截面处单元剖分情况.

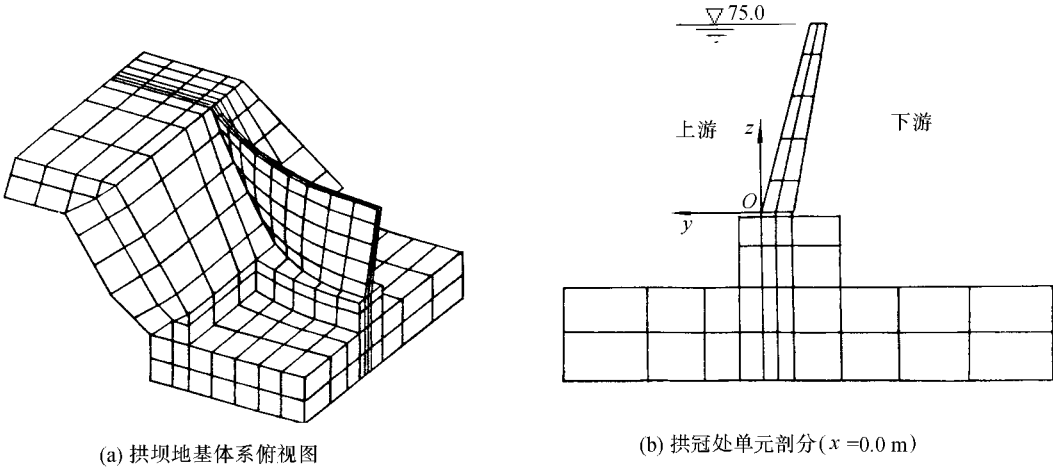


图 2 拱坝地基体系网格剖分

Fig.2 Meshes for the arch dam and the foundation system

3.2 底缝拱坝的模型试验简介*

浙江省水科所对光明底缝拱坝进行了模型试验.模型材料采用石膏,模型比例为 1:50,模型最大坝高 40 cm,坝顶厚度 2.0 cm,坝底厚度 4.0 cm.将人工搅拌均匀的石膏浆,在初凝前倒入模具中,一次浇满整个坝体.

* 浙江省水科所等.光明双曲底缝拱坝.1977

模型基础用预制石膏块,从底向上逐层拼装,其层间用环氧树脂加石膏粉胶结。

用水银模拟上游面的水压力,在模型拱坝上下游面的所有测点贴上应变片,用四台静态应变仪同时测量应变值,温度补偿应变片贴在与模型拱坝相同条件的另一个坝体上,由测得的应变求出模型上相应测点的应力,再由相似理论换算成原型拱坝应力。

3.3 计算成果分析

本文分别计算了光明双曲拱坝有底缝和无底缝情况下在自重、水荷载(▽75.0 m)作用下坝体的拱向、梁向应力及其变形,并与模型试验进行了对比。

图 3 为底缝拱坝上下游面的应力分布(计算、试验),并列出了无缝情况的线弹性成果。图中标出的数值为底缝拱坝计算值。

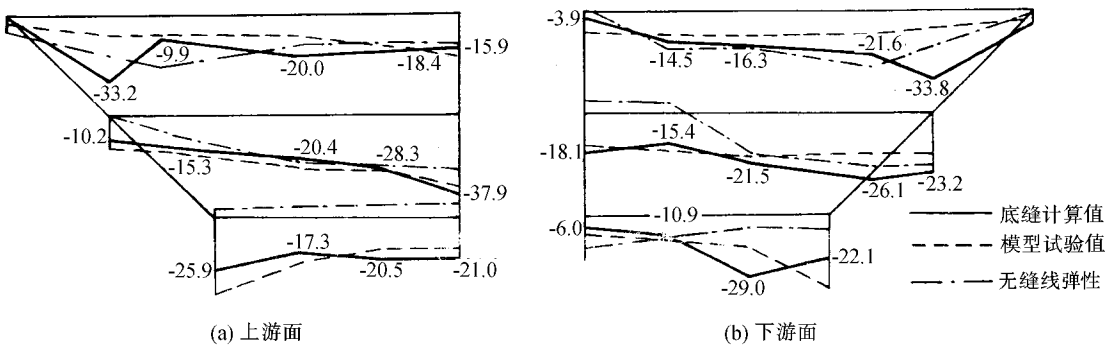


图 3 拱坝的拱向应力(0.1 MPa)

Fig.3 Arch stresses of the arch dam

从水平应力结果可看出,除了个别点(靠近坝肩或角点附近)计算结果和模型试验存在出入外,其它部位的拱向应力二者还是比较一致的。出入的原因一方面是角点应力集中,另一方面坝体与坝肩交界面本文用直线方法进行了简化,而实际的交界面为折线形状。计算表明,设置底缝后,拱坝中下部位拱向呈受压状态,上游面拱向压应力普遍增加,下游面中部甚至由受拉转为受压,而在拱顶附近变化不明显。实际上此时拱坝(设置底缝)类似于两端固定的单向拱受法向水荷载、自重共同作用的情形,由于拱跨(河谷)相对于高度较大,呈中间受压,从而导致拱向压应力增加。荷载原本由拱向、梁向二方向承担,设缝后主要由拱向承担。

图 4 为上、下游面的梁向应力比较。结果表明,本文的计算和模型试验值之间的变化规律是一致的。设置底缝后,由于释放了梁端约束,导致底部拉应力释放,拱冠梁上游面 σ_x 最大为 2.8 MPa。显然,混凝土和砌石接触面抗拉强度很难达到这么大数值,一般情况下会发生开裂,若事先无有效的止水措施则势必影响拱坝的正常使用。如赤峰市境内的响水底缝拱坝^[1],尽管设了底缝,但由于止水措施未跟上,导致使用期大量漏水,结果使用大量人力物力进行修补工作。同时还可看出,设缝以后上下游面的 σ_x 变化较缓。 σ_x 应力水平下降,这与其结构受力特点是一致的。

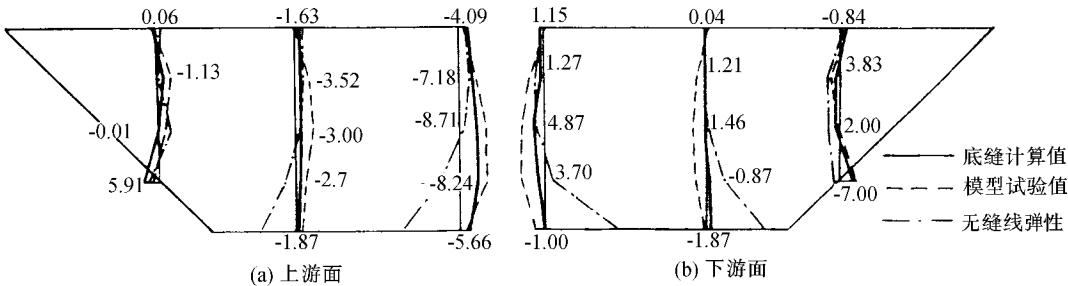


图 4 拱坝的梁向应力(0.1 MPa)

Fig.4 Cantilever stresses of the arch dam

图 5 为上、下游面的径向变位比较,从中可看出,影响最大的为靠近底缝的中下部位。例如上游面拱冠梁底部由 0.79 mm 增加到 6.68 mm,下游面由 0.76 mm 增加到 6.71 mm,中部上游面由 3.49 mm 增加到 7.44 mm,中部下游面 3.5 mm 增加到 7.48 mm。相对来讲,拱顶附近径向位移增加较小。

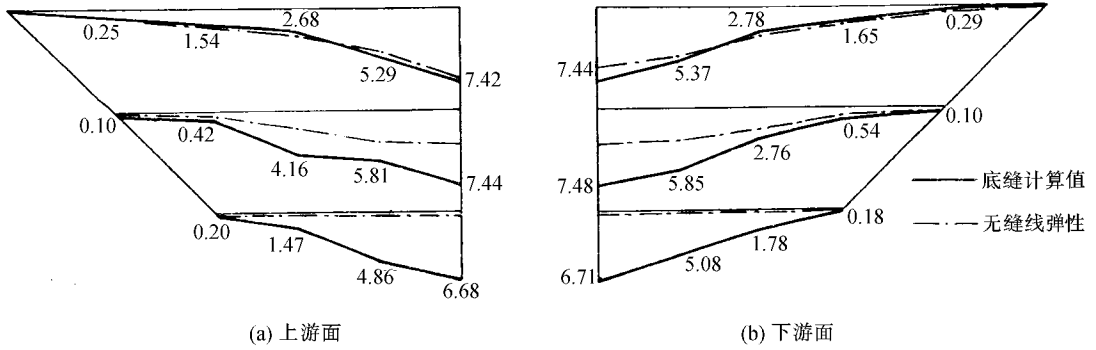


图5 拱坝的径向变位(mm)

Fig.5 Radial displacements of the arch dam

另外计算还发现,对于此小型拱坝,由于普遍应力水平较低,坝体均未进入塑性状态,只是缝单元有滑移和开裂等非线性现象.

4 结 论

a. 从本文计算结果和模型试验值吻合较好的情况表明,本文采用 Mohr-Coulomb 准则模拟接缝及采用的非线性迭代方法是可信的.

b. 设置底缝是消除宽河谷拱坝上游面底部梁向拉应力的有效措施,同时改善了坝体的应力状态,使拱的受压应力增大,梁向应力平缓,可以更加有效地发挥混凝土材料的抗压性能.

c. 设置底缝之后,拱坝中下部径向变位显著增加,对此应予足够的重视.应采取有效措施设置止水,防止拱坝漏水.

参 考 文 献

- 1 朱伯芳.从拱坝实际受力分析边缘缝的作用.水力发电,1997(2):59~66
- 2 Rescher O J. Arch dams with an upstream base joint. Water Power & Dam Construction, 1993(2):17~25

Effect of Base Joint on Performance of Arch Dam

Du Chengbin Ren Qingwen

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract The nonlinear effect of base joint on the performance of arch dams is studied with numerical method and model experiment in this paper. Elasticity and plasticity of the dam, the foundation and the joints are considered. The Drucker-Prager criterion is adopted for the dam and the foundation, and the Mohr-Coulomb criterion is adopted for the joints. Good agreements between calculated results and model experiment results are achieved.

Key words base joint arch dam; model experiment; arch stress; cantilever beam stress