

反拱水垫塘衬砌结构整体稳定性研究

杨敏, 刘鹏

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 本文针对拉西瓦水电站的水垫塘的反拱式底板, 通过数值计算, 研究了正向荷载和反向荷载作用下的锚固钢筋水平、基岩弹性模量、静水压力和板块分块数量对反拱水垫塘底板整体稳定性的影响, 论证了底板的稳定性。

关键词: 反拱水垫塘; 拱座; 整体稳定性

中图分类号: TV653 **文献标识码:** A

反拱水垫塘是利用天然河床的形状, 将底板做成反拱形, 利用拱结构的力学特性, 将射流冲击荷载传递到两岸山体或拱座, 充分发挥混凝土的抗压特性和拱结构的超载能力, 提高底板的整体和局部稳定性。目前, 工程界一直担心反拱底板在反向荷载作用下容易拉裂, 形成裂缝, 不能形成“拱”的作用, 反拱优势不能很好的体现。基于此, 本文以拉西瓦拱坝坝后反拱水垫塘为研究背景, 通过数值模拟分析其衬砌结构在反向荷载和正向荷载作用下的整体稳定性, 并研究钢筋锚固水平、基岩弹性模量、静水压力以及分块数量对反拱底板整体稳定性的影响。

1 反拱水垫塘有限元模型的建立

1.1 工程概况 拉西瓦双曲拱坝最大坝高250m, 电站装机容量 6×700 MW, 为 I 等大(1)型工程。坝址区为高山峡谷地貌, 两岸坡陡峻, 高差近700m。坝后主要消能建筑物为水垫塘和二道坝。反拱水垫塘长度约218.30m, 横剖面按圆弧设计, 从上游到下游等宽布置, 沿水流向15m为一段分永久缝。底板最低点高程2215.0m, 衬砌厚度3m, 反拱中心角 73.74° 。每个拱圈内将底板均匀分成5块, 每块平均宽15.83m。消力塘与拱坝、二道坝之间设伸缩缝, 其施工缝和永久缝均设止水。消力塘底板全断面布设锚筋并设有抽、排水设施。反拱水垫塘横断面见图1, 图中高程以m计, 其他单位为cm。

1.2 模型简介 反拱水垫塘衬砌结构有限元模型如图2。基岩宽75m, 厚30m, 板块、基岩、拱座、边坡间允许发生滑动变形, 按接触分析。板块间摩擦系数0.5, 基岩与板块间摩擦系数0.55。材料参数如下: (1)基岩。弹性材料, 弹模12GPa, 泊松比0.2, $\rho = 2750 \text{kg/m}^3$; (2)底板、边坡。弹性材料, 弹模18GPa, 泊松比0.167, $\rho = 2400 \text{kg/m}^3$; (3)拱座。弹性材料, 弹模20GPa, 泊松比0.167, $\rho = 2400 \text{kg/m}^3$; (4)锚筋。塑性材料, 屈服强度310MPa, 屈服前弹模200GPa, 屈服后弹模20GPa, 泊松比0.25, $\rho = 7800 \text{kg/m}^3$ 。岩体采用六面体单元, 锚筋采用REBAR单元。模型共50616个3D单元, 3434个锚筋单元, 节点总数为55059个。

1.3 接触理论

收稿日期: 2005-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379033)

作者简介: 杨敏(1956-), 吉林长春人, 博士, 教授, 主要从事水工水力学研究。E-mail: minyang2000@163.com

1.3.1 接触约束条件 法向接触条件包括不可贯入性条件和法向接触力条件。不可贯入性条件，是指物体A和物体B的位移 V^A 和 V^B 在运动的过程中不允许相互贯穿(侵入或覆盖)，接触时以接触力为压力控制条件。切向接触条件为允许发生相对滑移变形。

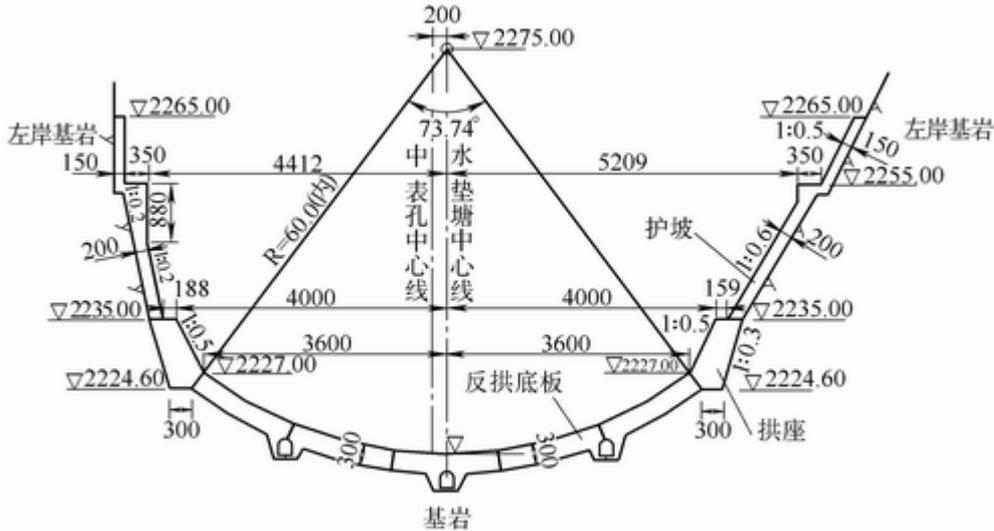


图1 反拱水垫塘横断面

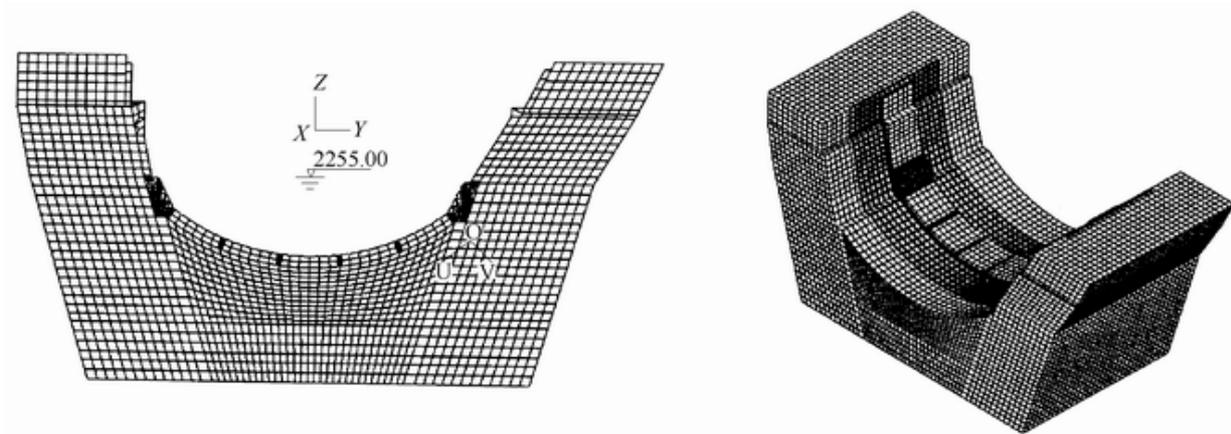


图2 反拱水垫塘衬砌结构有限元模型

1.3.2 有限元离散化接触系统平衡方程 有增量法求解接触问题时，在时间 $t+\Delta t$ 位形内与平衡条件等效的虚位移原理表示为

$$\int_{t+\Delta t, V} {}^{t+\Delta t} \tau_{ij} \delta_{t+\Delta t} e_{ij} {}^{t+\Delta t} dV - {}^{t+\Delta t} W_L - {}^{t+\Delta t} W_I - {}^{t+\Delta t} W_c$$

$$= \sum_{r=A, B} \left[\int_{t+\Delta t, V^r} {}^{t+\Delta t} \tau_{ij}^r \delta_{t+\Delta t} e_{ij}^r {}^{t+\Delta t} dV - {}^{t+\Delta t} W_L^r - {}^{t+\Delta t} W_I^r - {}^{t+\Delta t} W_c^r \right] = 0 \quad (1)$$

其中A、B为两个求解区域， ${}^{t+\Delta t}W_L$ 是作用于 $t+\Delta t$ 时刻位形上外荷载的虚功， ${}^{t+\Delta t}W_I$ 是作用于 $t+\Delta t$ 时刻位形上惯性力的虚功，如果惯性力的影响可以忽略，则 ${}^{t+\Delta t}W_I=0$ ，问题变成静态接触问题， ${}^{t+\Delta t}W_c$ 是作用于 $t+\Delta t$ 时刻接触面上接触力的虚功。本文采用完全拉格朗日乘子法求解此增量格式(简称T. L. 格式)。T. L.

格式中所有变量以时间0的位形作为参考位形。将式(1)增量格式用完全拉格朗日乘法求解,则

$$M^{t+\Delta t} \ddot{u} + ({}^t_0 K_L + {}^t_0 K_{NL}) u - {}^{t+\Delta t} Q = {}^{t+\Delta t} Q - {}^t_0 F \quad (2)$$

具体接触理论和参数意义参见文献[1]。

1.4 钢筋联结 钢筋单元(Rebar element)在程序运行时产生,并产生约束函数(Constraint equation)实现钢筋与混凝土板块、基岩的连接,如图3。

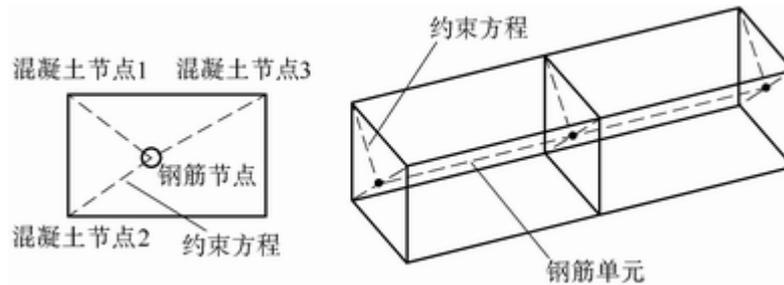


图3 钢筋单元示意

具体形式为: $U_k = \sum_j \beta_j U_j$, $\sum_j \beta_j = 1$, U_k 为钢筋单元节点的位移, U_j 为板块、基岩节点的位移。

2 计算工况及结果

根据《SL253—2000溢洪道设计规范》,水垫塘底板的稳定性一般考虑两种不利工况:(1)正常运行工况;(2)检修放空工况。在正常运行工况下,假设底板止水完好,抽排水设施正常,底板上表面受动水压力的作用,此种工况对应的是反向荷载的作用,在此以静水压力代替,计算其拱端裂缝、错位、拱座位移以及基岩弹模、锚固钢筋和底板分块数量对拱端裂缝的影响;检修放空工况对应的是正向荷载(扬压力)的作用,计算拱端推力、拱座位移以及不同分块数量、不同锚固水平对拱端推力的影响。

2.1 反向荷载作用下的拱端裂缝计算

2.1.1 主要计算荷载 基岩由于多年沉积,自重作用下的变形已经完成,所以这里不考虑基岩的自重。底板、拱座和边坡等衬砌结构均考虑自重和静水压力的作用。温度荷载与静水压力相比起次要地位,这里不予考虑。

2.1.2 计算结果 模型计算结果无应力集中现象,有限元网格划分对结果影响不大。反向荷载(静水压力)作用下,经过计算得到拱端、拱座的切向(U向)位移和径向(V向)位移(U, V),则拱端与拱座的U向位移之差即是拱端裂缝, V向位移之差即是拱端错位。拱端拱座位置如图7。各种水位下的拱端裂缝、错位计算结果见表1及图4;水位2255.00m时底板不同分块数量下拱端裂缝错位见图5,不同基岩弹性模量下的结果见表2及图6。其中有锚筋情况下各部位锚固量分别为底板 $7.6\text{t}/\text{m}^2$,拱座 $7.6\text{t}/\text{m}^2$,边坡 $5\text{t}/\text{m}^2$ ($1\text{t}/\text{m}^2=9.8\text{kN}/\text{m}^2$) (如无特别说明,以下同)。

表1 不同水位下拱端裂缝和错位计算结果

水位/m	拱端 U 位移/mm		拱座 U 位移/mm		拱端 V 位移/mm		拱座 V 位移/mm		拱端裂缝/mm		拱端错位/mm	
	无 锚筋	有 锚筋	无 锚筋	有 锚筋	无 锚筋	有 锚筋	无 锚筋	有 锚筋	无 锚筋	有 锚筋	无 锚筋	有 锚筋
2215.0	0.362	0.308	0.326	0.285	0.118	0.116	-0.048	-0.017	0.036	0.023	0.166	0.133
2219.4	0.366	0.311	0.328	0.286	0.118	0.115	-0.047	-0.017	0.038	0.025	0.166	0.132
2227.0	0.354	0.298	0.334	0.284	0.130	0.127	-0.030	0.007	0.02	0.013	0.160	0.119
2231.0	0.345	0.276	0.282	0.242	0.160	0.157	0.058	0.088	0.063	0.034	0.102	0.069
2235.0	0.334	0.265	0.196	0.182	0.196	0.191	0.185	0.186	0.138	0.083	0.011	0.004
2246.2	0.319	0.250	0.189	0.164	0.302	0.291	0.315	0.306	0.130	0.086	-0.012	-0.014
2255.0	0.313	0.245	0.178	0.143	0.379	0.363	0.397	0.385	0.135	0.101	-0.018	-0.022
2265.0	0.310	0.243	0.160	0.124	0.465	0.450	0.489	0.478	0.150	0.119	-0.023	-0.028
2285.0	0.313	0.246	0.141	0.093	0.647	0.631	0.681	0.672	0.172	0.153	-0.034	-0.040

表2 水位2255.00m时不同基岩弹模下计算结果(有锚筋)

基岩弹模 /GPa	拱端U位移 /mm	拱座U位移 /mm	拱端V位移 /mm	拱座V位移 /mm	拱端裂缝 /mm	拱端错位 /m
8	0.337	0.200	0.532	0.561	0.137	-0.029
12	0.245	0.143	0.363	0.385	0.101	-0.022
20	0.169	0.095	0.227	0.243	0.074	-0.016
28	0.137	0.075	0.168	0.182	0.062	-0.014
36	0.119	0.063	0.135	0.148	0.056	-0.013
50	0.101	0.050	0.103	0.114	0.051	-0.011

3.2 正向荷载作用下的拱端推力计算

3.2.1 主要计算荷载 检修放空工况(无静水压力)下的最不利荷载组合包括重力和扬压力。

(1) 自重。与计算反向荷载作用下拱端裂缝、错位时考虑的情况相同, 这里不再重述。

(2) 扬压力。板块下的扬压力 F_u 包括渗透压力 F_a 和浮托力 F_b (排水正常时很小, 可以忽略), 即

$$F_u = F_a + F_b \quad (3)$$

其中, 渗透压力 F_a 由水垫塘底板块下的渗流计算获得, 初估时, 可由下式给出

$$F_a = \alpha \Delta H \gamma A \quad (4)$$

式中: ΔH 为上下游水位差; α 为渗流折减系数, 它与水垫塘底板下基岩的地质条件、防渗帷幕和排水设施的布置形式有关。考虑到坝体上游面设有防渗帷幕和排水孔幕, α 位于0.2~0.3之间; 水垫塘底板下, 如果取防渗帷幕后的平均值, α 值近似位于0.1~0.15之间; 如果底板下排水良好, 那么 α 值就非常小, 位于0~0.1之间^[2], 这里扬压力分别取150($\alpha=0.077$)、125($\alpha=0.063$)和100kPa($\alpha=0.05$)进行计算。

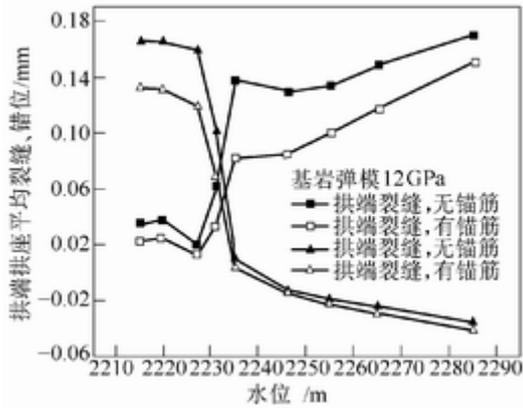


图4 不同水位下拱端裂缝、错位

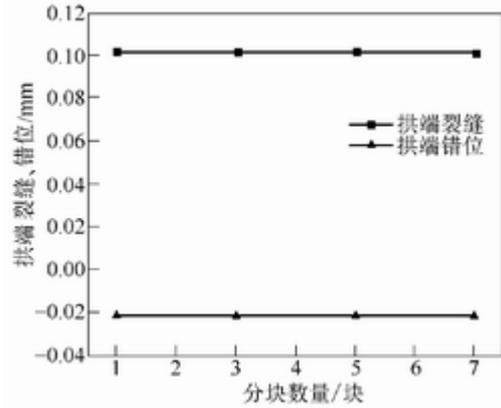


图5 不同分块数量下拱端裂缝、错位

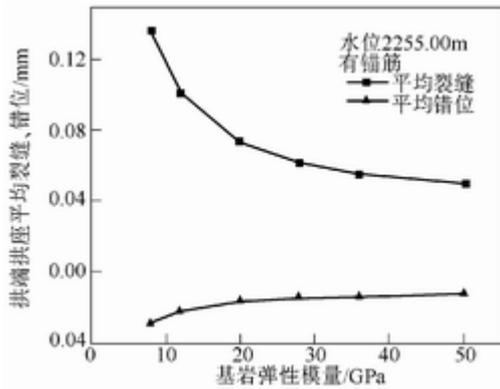


图6 不同基岩弹模下的拱端裂缝、错位

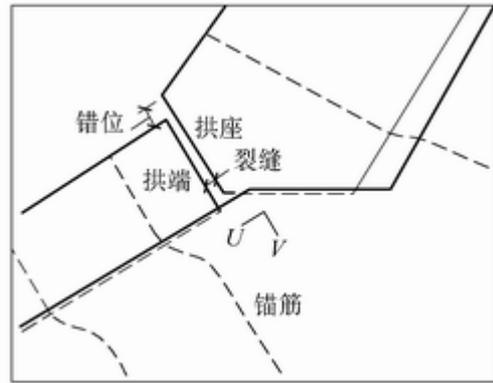


图7 拱端、拱座位移示意图

2.2.2 计算结果 模型计算结果在拱端处无明显应力集中现象，有限元网格划分对结果影响不大，计算结果能反映实际受力状态。正向荷载(扬压力)作用下的拱端推力、拱座位移、板块最大位移见表3及图8、图9；扬压力150kPa时底板不同分块数量下的拱端推力计算结果如图10，不同锚固水平下的拱端推力如图11。

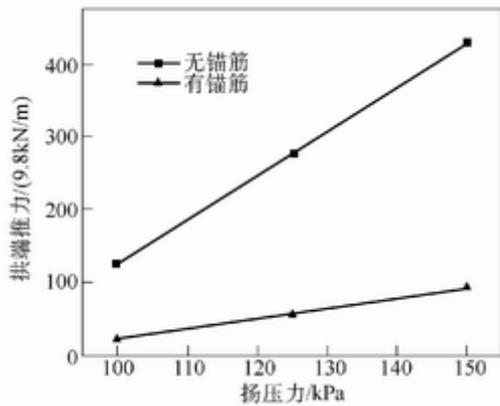


图8 拱端推力

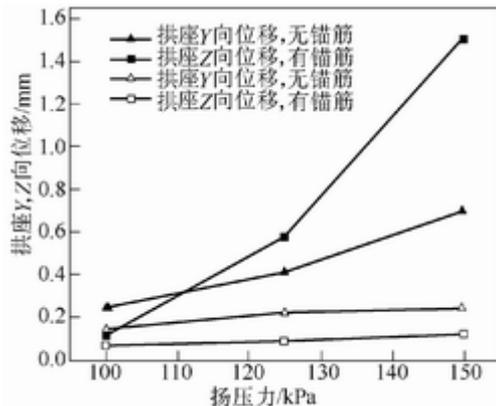


图9 拱座位移

表 3 扬压力作用下拱端推力计算结果

扬压力 /kPa	拱端推力/(9.8kN/m)		右拱座位移/mm				板块最大位移/mm	
	无锚筋	有锚筋	无锚筋		有锚筋		无锚筋	有锚筋
			Y	Z	Y	Z		
100	124.3	22.0	0.242	0.118	0.139	0.065	2.54	1.25
125	276.9	56.8	0.412	0.578	0.219	0.085	6.28	1.69
150	430.5	93.3	0.702	1.508	0.246	0.125	10.52	2.30

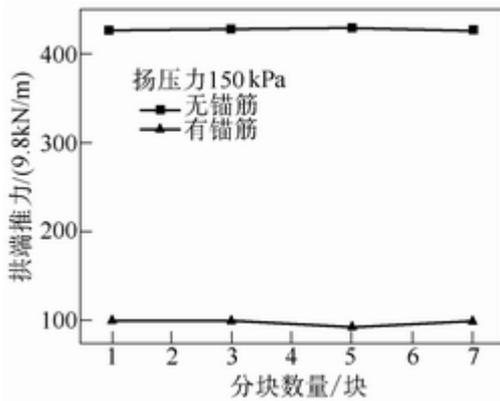


图10 底板不同分块数量下的拱端推力

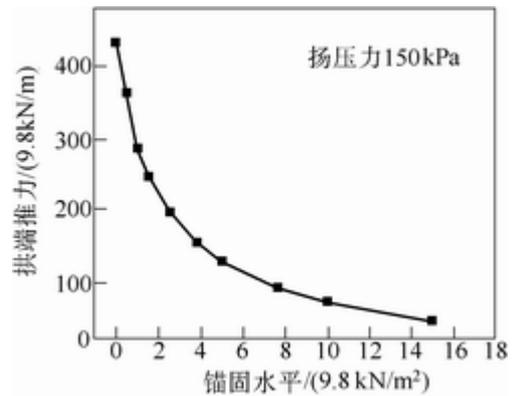


图11 不同锚固水平下的拱端推力

3 结果分析

反拱水垫塘衬砌结构的整体稳定性除了与结构本身的特性(衬砌厚度、反拱中心角等)有关外,还与锚固钢筋水平、基岩弹性模量、静水压力和板块分块数量有关,具体分析如下:(1)锚固钢筋对整体稳定性的影响,反向荷载作用下,由于锚固钢筋的抗剪作用,锚筋可起到减小拱端裂缝的作用。水位2246.2m时,锚固钢筋前后拱端裂缝减小约34%。正向荷载(扬压力)作用下,锚固钢筋会大大减小拱端推力。扬压力150kPa时,无锚固时拱端推力为430.7t/m²,而底板锚固7.6t/m²后拱端推力减小为93.3t/m²。(2)基岩弹性模量对整体稳定性的影响。基岩弹性模量对反向荷载作用下的拱端裂缝和错位影响较大,对正向荷载作用下的拱端推力一般没有影响。当基岩完整、弹模较高时,拱端变形主要是板块在基岩上的滑移变形,地基的弹性变形处于次要地位。此时水位越高,静水压力作用下的拱端裂缝就越小,拱端错位也因弹性变形占次要地位而越小。反之,基岩破碎,弹模较低,此时拱端变形由滑移变形和地基弹性变形共同组成,拱端裂缝和错位随水位变化趋势如图4。此外,由表2及图6可以看出,水位一定时,基岩弹模越大,拱端裂缝就越小,拱端错位也越小。(3)静水压力对整体稳定性的影响。静水压力对拱端裂缝和拱端推力均有影响。反向荷载作用下,由图4可以看出,基岩弹模、锚固量一定情况下,水位在2227.00m时,也就是与拱座底面水平时,拱端裂缝出现极小值。而在2235.00m时,也即与拱座上表面水平时,拱端裂缝出现极大值。正向荷载作用下,锚固量一定时,拱端推力与扬压力成线性关系增长(图8)。因此,要确保抽排设施正常运行,应设法减小扬压力。(4)分块数量对整体稳定性的影响。由图5及图10可以看出,反拱水垫塘底板分块数量对反向荷载作用下的拱端裂缝、错位以及正向荷载作用下的拱端推力影响不大。因为,在反向荷载作用下,板块间没有缝隙,在正向均布荷载作用下,板块已表现出“拱”的作用,二者均已使板块形成整体,所以整体稳定性与板块分块数量无关。

4 结语

反拱水垫塘衬砌结构的整体稳定性除了与自身的特性有关外,主要取决于锚固钢筋量、基岩性质和底板上下表面水压力,而底板分块数量则对其影响不大。研究表明,无论是在正常运行工况下,还是在检修放空工况下,拉西瓦反拱水垫塘衬砌结构的整体稳定都是有保障的。

参考文献:

- [1] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].第2版,北京:中国水利水电出版社,1998.
- [2] 刘沛清.高拱坝下游水垫塘底板块稳定性设计[J].水利学报,1999,(2):5-12.
- [3] Gao Jizhang, et al. A study of hydrodynamic loads on concrete slab of plunge pool[A]. Int. Symp. on Hydraulic Research in Nature and Laboratory[C]. Wuhan, China, 1992.
- [4] 崔广涛,彭新民,杨敏.反拱型水垫塘—窄河谷大流量高坝泄洪消能工的合理选择[J].水利水电技术,2001,32(12):1-3.

Study on integral stability of slab in inverted-arch type plunge pool

YANG Min, LIU Peng

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The stability of the inverted-arch type plunge pool slab in Laxiwa Project is analyzed numerically. The effects of anchoring enforcement amount, elastic modulus of foundation, static water pressure and amount of lining slab on integral stability of lining structure under the action of positive or negative direction forces are studied. It is concluded that the designed lining structure is stable.

Key words: inverted-arch plunge pool; arch support; integral stability; lining structure

(责任编辑:李福田)