

用平面有限元法计算坝内底孔应力

孙培烈 刘吉祥

(水电部成都勘测设计院)

提 要

用平面线弹性有限元法对某重力坝坝内底孔进行了应力计算,在横剖面计算中近似地采用了纵剖面的应力成果。计算结果与通常采用的两种手算方法作了对比。粗略地估算了永久运行期的温变应力,证明其数值不可忽视。

一、工 程 布 置

某工程底孔坝段位于溢流坝与厂房坝段之间,坝段宽20米,中设压力短管型底孔,孔口尺寸在压力段末端为 5×6 米(见图1)。坝体沿水流方向总长53.25米,其上、下游分别为长32米的铺盖及149.75米的泄水明槽。

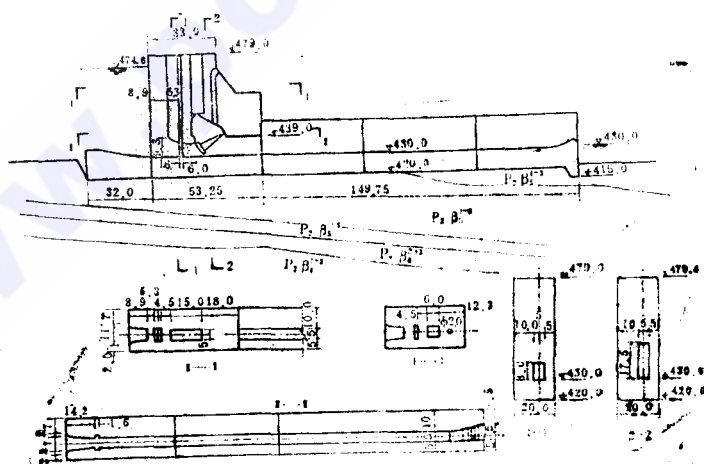


图1 底孔布置图

由于进口处临时围堰布置要求,底孔中心线不在坝段正中而偏向右岸2.5米,两侧呈不对称形,

二、计算方法和计算假定

底孔应力实属三向问题，但限于条件，仍作为线弹性平面问题计算。取横剖面（平行坝轴线方向切取）进行分析，也近似地考虑了纵向的影响。

（一）纵剖面计算

地基在上下游及深度方向各取60米（相当于1.02倍坝高或1.13倍坝底宽），在底部设置固定铰支座、在两侧设置水平连杆支座予以约束。

计算取单宽厚度，按平面应力问题分析，在孔洞通过处则按实体厚度折算。经简化后坝体取三种结构厚度，地基则按岩性区分为三种材料（表1）。

表1 坝体和地基岩体计算参数

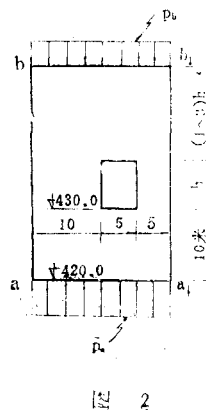
分区号	部 位	厚度 t (米)	容重 γ (吨/米 ³)	弹性模量 E (吨/米 ²)	泊松比 μ
1	检修门槽及孔口进口以前	0.65	2.45	2×10^6	0.17
2	高程430.0以上无孔口之坝体	1.0	2.45	2×10^6	0.17
3	所有孔口及闸门室操作室等	0.75	2.45	2×10^6	0.17
4	高程430.0以下坝体	1.0	*1.45	2×10^6	0.17
5	P ₂ β_5^{1-2} (细长柱玄武岩)	1.0	1.82	8×10^5	0.25
6	P ₂ β_5^{1-1} (灰绿色玄武岩) P ₂ β_4^{2-3} (凝灰岩与凝灰玄武岩)	1.0	1.5	1.5×10^5	0.3
7	P ₂ β_4^{1-3} (紫黑色杏仁状玄武岩)	1.0	1.82	5×10^5	0.27

*下游尾水位430.0米时。

计算荷载：自重、水压力（包括水库水重及尾水重）以及浮托力（在尾水位以下取浮容重），未计渗透压力及淤沙压力。工作弧门所受的水压力集中作用于支铰。坝体以外的铺盖及泄水槽，其重量作为外荷载作用于基岩表面。受计算机容量限制，坝体及地基共划分三角形单元518个，结点293个。最小单元边长1.0米。

（二）横剖面计算

沿底孔长度切取若干横剖面，取单宽厚度，按平面应变问题分析（图2）。（1）在平面 $a-a_1$ 上设置垂直连杆约束（两侧无约束）；（2）把由纵剖面算得的、相应于该横剖面上 $a-a_1$ 和 $b-b_1$ 处的坝体垂直应力 p_a 及 p_b ，作为外荷载移置于有关结点；（3）为了简化分析，假定剪应力在横剖面上均匀分布，并根据“脱离体” abb_1a_1 在 p_a 、 p_b 、孔内水压、坝体自重以及剪切力作用下垂直合力为零的原则，修正混凝土的容重以反映剪切力的影响。



在划分单元时,拉应力集中的孔顶、孔底中心线附近单元的最小边长为0.5米。

(三) 温变应力估算

为了初估运行期坝体温度变化所引起的应力,假设了一种温度分布状态,计算相应的坝体应力,其方法为:(1)取单宽横剖面(由坝顶到坝基的全断面);(2)在坝基设置垂直连杆约束(两侧无约束);(3)假定坝体温度自孔口向四周逐渐增高,其中孔内水温 7°C (水库水温),坝体稳定温度(包括地基表面温度) 17°C ,靠近坝顶及两侧横缝处为 22°C ,据此划分坝体温度分布(图3);(4)按坝体混凝土实际容重算出坝体自重,加上内水压力求出坝基反力,并假定其为均匀分布,移置于有关结点(即垂直连杆)上;(5)在自重、内水压力及地基反力的作用下,分别计算出“有温变”(坝体有四种温度)和“无温变”(坝体只有一种温度)两种情况下坝体各单元的应力。两者的应力差值,即是由温变所引起的“温变应力”。

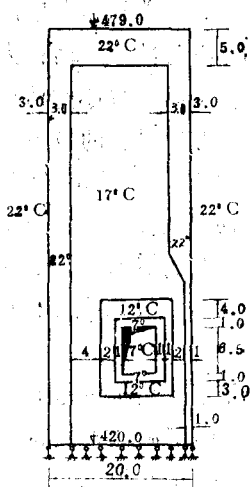


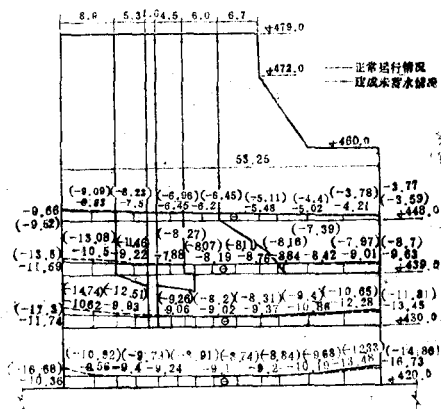
图3

三、计算情况

对于 (5.6×9.3) 和 (5×6.5) 米两个横剖面,分别考虑了两种计算情况:其一为“正常运行”(即上游库水位474.0米,下游尾水位430.0米);其二为施工完建尚未蓄水,此时靠近上游面的底孔附近,垂直正应力可能大于前一种两种情况,对孔口不利。

此外,在横剖面计算中,如何正确选定孔顶“保留厚度”(即前述 $b-b_1$ 平面的切取位置),还是一个难以解决的问题。为了比较不同孔顶厚度对应力的影响,对 5×6.5 米孔口进行了5米、10米和15米三种孔顶厚度的计算,分别求出了“正常运行”和“未蓄水”两种情况下的孔口应力。

四、计算成果

图4 正常运行及未蓄水时坝体垂直正应力 σ_y

1. 图4为“正常运行”及“未蓄水”两种情况下的纵剖面垂直正应力 σ_y 分布。高程448.0米及439.0米两个水平面上的 σ_y 基本呈直线分布,这说明虽有孔口,但因尺寸相对较小,对坝体 σ_y 分布影响不大;但基础面及其附近,由于地基弹模小于坝体,故坝踵及坝趾附近的 σ_y 增大。此外,未蓄水情况与正常运行相比, σ_y 在上游大而下游小,这

是符合一般规律的。还需说明,在弧形闸门支铰附近,由于巨大的集中力在计算中已分散平均施加,故局部的应力集中现象未能正确反映,需另作计算。

2. 5.6×9.3 米孔口的正应力分布,在正常运行时的拉应力 σ_x 比未蓄水时大,在孔顶中心线上最大为 12.46 公斤/厘米²,拉力区高度达 6.1 米。

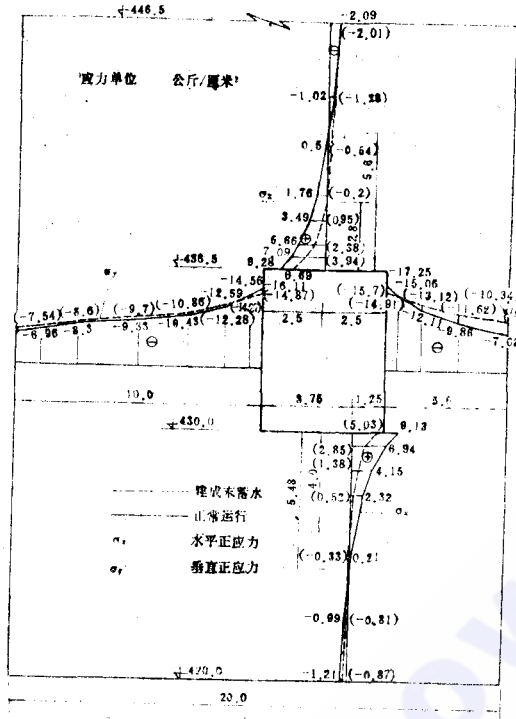


图5 5×6.5 米孔口两种情况的应力比较(孔顶厚10米)

3. 5×6.5 米孔口的应力分布见图5(孔顶厚度10米),三种孔顶厚度的孔底拉应力计算对比见表2、表3。随着孔顶厚度的增加,孔顶部分的孔边拉应力减小,而拉力区高度则增大,其总拉力反而有减小的情况(表2);但对于钢筋所承担的拉力,在 $\sigma_x > [R_L]$ 的部分($[R_L] = 4.92$ 公斤/厘米²),则仍是小孔顶厚度的最大。至于孔底部分,则随着孔顶厚度的增加,孔边拉应力以及拉力区高度皆减小,故总拉力和钢筋承担的拉力也都减小。

4. 5×6.5 米孔口温度变化所引起的应力分布(图6),由于孔内水温低,使得孔边产生相当大的拉应力,其中孔顶及孔底温变拉应力(σ_x)达 9.75 及 8.65 公斤/厘米²,孔侧温变拉应力(σ_y)达 23.47 及 20.71 公斤/厘米²。

表2 孔顶拉应力比较

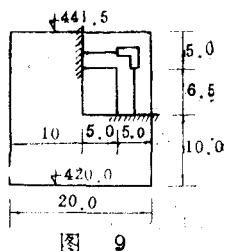
孔顶厚度(米)	5.0	10.0	15.0
孔边拉应力 σ_x (公斤/厘米 ²)	10.94	9.27	8.84
拉力区高度(米)	3.5	5.6	6.7
总拉力(吨)	149.2	168.8	167.6
相对百分比(%)	88.4	100	99.3
$\sigma_x > [R_L]$ 拉力(吨)	102.6	90.8	81.3
相对百分比(%)	113	100	89.5

表3 孔底拉应力比较

孔顶厚度(米)	5.0	10.0	15.0
孔边拉应力 σ_x (公斤/厘米 ²)	9.88	9.13	8.94
拉力区高度(米)	5.63	5.48	5.38
总拉力(吨)	177.1	160.2	155.5
相对百分比(%)	110.5	100	97.1
$\sigma_x > [R_L]$ 拉力(吨)	99.0	84.0	79.5
相对百分比(%)	117.9	100	94.7

五、两种手算法的计算成果

除有限元法外,还用两种手算方法计算了 5×6.5 米孔口的孔顶拉应力,成果见图7图8。



采用文献〔3〕中图表求得孔口“顶板”各断面的力矩,然后按直线分布求算孔边水平正应力 σ_x 。由于“杆件”的高跨比很大,计算时还考虑了由剪应力引起的剪切变形。

在正常运行情况下,力矩最大的断面孔边拉应力亦仅7.2公斤/厘米²,总拉力90吨,比其它方法都小。由于孔口相对较小,采用“杆件系统”计算实属勉强,故成果是不可靠的。

六、小结及问题讨论

1. 本阶段采用平面有限元法计算了两种运行情况下纵剖面 and 两个横剖面的正应力。计算中采用了一些假定会影响成果的精确性。但是总的看来,计算出的应力分布规律基本合理。可以认为,当三向光弹试验或三向有限元计算存在一定困难时,采用本法计算孔口应力,比之于一般手算方法仍具有优越性。例如按“无限域内矩形孔口”计算时,一般认为孔口形心距离边界应大于3倍孔口尺寸,计算成果才接近实际,但在实际工程中该距离常常仅有一倍多孔口尺寸,这样自然会有误差;又如该法所用的“均匀压力场 σ_y ”是指孔口中心处的应力,这对于小孔口来说是合理的,但当孔口较大时就不太合适了;此外,该法所用孔口中心应力是按重力法在纵剖面上求得的,但当底孔位置接近地基,特别是岩层弹性性质与坝体不同时,算得的孔口中心应力就会有较大的误差……,类似上述的问题,用有限元法计算都可得到一定程度的克服。

2. 用有限元法可较方便地求算坝体和孔口的温变应力。根据丹江口、三门峡和龚咀等工程的实际运行资料,温变应力在孔边应力中占有很大的比重,已引起人们愈来愈多的重视。从本底孔温变应力估算成果来看,孔顶温变拉应力可达10公斤/厘米²以上,温变总拉力达170吨,比自重及水压力所引起的总拉力还大,因此是不可忽视的。

3. 用平面有限元法计算底孔应力,存在的主要问题是横剖面计算中如何正确确定孔顶、孔底厚度。根据丹江口底孔设计总结,在作为框架计算时,孔顶、孔底厚度取为一倍孔宽。其根据是在光弹试验中,距孔边约一倍孔宽处可见85°等倾线,此时板内第一主应力方向基本上与外荷方向平行,孔口影响基本消失〔4〕。而在安康底孔计算中,采用的孔顶、孔底厚度一般在两倍孔宽以上〔5〕。结合本工程底孔的底板厚度约为1.8~2.0倍的孔宽,故孔底厚度算至坝基可能是合适的;至于孔顶厚度,为安全计以采用一倍孔宽较为妥当。

4. 用有限元法计算坝体应力时,成果的精确性主要取决于单元尺寸的大小,这对孔口应力计算来说尤为重要。在孔口周边、弧门支铰以及各类边界处(包括材料厚度或性质有变化处)都应尽量加大单元密度,减小单元尺寸。本计算在横剖面上孔边最小单元尺寸为0.5米,似已能满足要求。

5. 本阶段计算中粗略地假设一种温度分布情况,进行了温变应力的估算,以期获得一个概念性的认识。今后应根据不同季节的气温资料,求得坝体温度场后,才能合理

而精确地进行计算。在确定温度场时,孔内水温(即水库水温)以往一般认为接近4—6℃。但据陆水、柘溪等工程实测资料,此值随外界气温而变并远较4—6℃为高(安康底孔设计采用10℃)。至于外界气温,由于横剖面两侧系横缝,根据柘溪资料,缝内气温亦与外界气温有差别:一般为18~22℃,比较稳定,以上数据可供今后工作参考。

参 考 文 献

- [1] 潘家铮:《重力坝的设计和计算》,1965年
- [2] 林可冀:平板内矩形孔在孔边有均匀内压力作用下的周围应力,《水利水电技术》,1965年第5期
- [3] 武汉水利电力学院:《工程力学与工程结构》,1976年
- [4] 长办枢纽设计处:丹江口工程泄洪深孔的设计,《水利水电科技情报》,1975年第1期
- [5] 水电部十五局设计院:安康水电站底孔坝段结构设计的初步研究,1979年7月

来函照登

为“略谈地下洞室围岩分类”补充几点浅见

为繁荣刊物,活跃学术空气,促进岩石力学在地下工程中的应用,对“略谈地下洞室围岩分类”一文补充几点浅见,供使用时参考。

1. 在地下工程围岩分类方面,当前国外应用较广的是Q值及RMR分类方法,尤其是Q分类法。而RSR方法(即Wickham分类法)主要是在总结美国隧洞支护设计经验的基础上提出来的,应用不如前两类广泛。

2. 1984年12月,Q—系统分类法的主要创始人,挪威岩土工程研究所巴顿(N. Barton)博士专程来我国云南讲授过Q分类法,并与中国专家就此进行了座谈讨论。该分类法在鲁布革水电站地下工程应用中已取得经济效益。

3. Q系分类法,实际上是考虑了岩石强度,当对应力折减系数SRF(stress reduction factor)进行评价时,对于存在地应力的完整岩体,应考虑 σ_c/σ_1 , σ_t/σ_1 两比值。

式中 σ_c ——岩石单轴抗压强度; σ_t ——抗拉强度; σ_1 ——最大主应力。

4. 太沙基(Terzaghi)方法是1946年首先在美国提出的,主要用于钢支衬设计,对于近代广泛应用的喷锚支护不太合适。劳弗尔(Lauffer)方法是1958年首先在奥地利提出的,偏于保守。因此从目前的观点讲,上述两法并非有实用价值。

5. 值得一提的是,日本中尾等学者在国际第五届岩石力学大会上(1983年在墨尔本召开)提出的,在日本应用Q—系统, RMR, 及RSR分类法决定地下工程初期支护措施时,发现的一些问题。他们认为,以上三种分类方法是基于地质条件较好的坚硬岩体而提出的,而在日本,大量分布的是断裂极为发育而强度甚低的软岩,对于这类软岩,上述方法并不很适用。他们根据日本已建隧洞的工程实例,进行了统计分析,力求提出适用于本国情况的地下工程岩体分类方法。这一动向值得注意。

(傅冰骏)