

应力指数法在拱坝主应力满应力设计中的应用

黎展眉

(贵州省水利厅, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 阐述用应力指数法实现拱坝主应力满应力设计的思路和方法要点, 介绍等截面圆弧拱坝及变截面抛物线拱坝两种算例成果。算例表明, 应力指数 β_i 相对固定的应力指数法是适应拱坝主应力满应力优化的有效、可行的方法, 只需在原有的拱坝应力分析程序的基础上稍加扩充即可实现。对于初始方案基本合理的拱坝, 一般迭代 5~8 次, 优化后坝体方量可节省 12%~20%。

关键词: 拱坝; 应力指数法; 主应力; 满应力设计

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)04-0001-03

1 适应拱坝主应力满应力设计的方法

拱坝满应力设计通常可采用两种方法: 一种为冻结内力法; 另一种为浮动应力指数法^[1]。冻结内力法较能适应拱坝正应力的满应力设计。浮动应力指数法则可用于拱坝主应力的满应力设计。该法假定前后两次分析拱坝所得坝体某点 i 的主应力 σ_i, σ_i' 及坝厚 t_i, t_i' 之间存在如下关系:

$$\frac{t_i'}{t_i} = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i'} \right)^{\beta_i} \quad (1)$$

式中: β_i 为应力指数, 在内力不变的情况下, 对于轴力杆件, $\beta_i = 1.0$, 对于纯弯矩形杆件, $\beta_i = 0.5$ 。在拱坝这种复杂受力结构中, β_i 不再是常数, 其值常在 0.5~3.0 甚至更大范围内变化。对式(1)取对数, 可得

$$\beta_i = \frac{\log(t_i'/t_i)}{\log(\sigma_i/\sigma_i')} \quad (2)$$

在式(1)中以允许应力 $[\sigma]$ 代替 σ_i' , 可得到计算临界厚度的公式:

$$t_i' = t_i \left(\frac{\sigma_i}{[\sigma]} \right)^{\beta_i} \quad (3)$$

在迭代过程中, 由于内力和坝体尺寸不断改变, β_i 也在不断改变, 故称之为浮动应力指数法。

但是, 笔者在具体计算中, 发现应用浮动应力指数法困难较大, 主要是式(2)所示的两次应力分析所得应力指数 β_i 规律性较差, 浮动范围大。如某例题第一次迭代后各层 β_i 为 0.096~3.409, 可以说比较分散。并且两次分析中控制性的应力不一定是发生在同一点或同一种情况, 即使是同一截面, 也有两

种工况、上下游面、第一第二主应力的 8 种情况, 所得的 β_i 不一定有代表性。同时指数范围变幅大, 往往收敛慢, 甚至不能收敛。

有鉴于此, 笔者提出了 β_i 相对固定的应力指数法, 应用于拱坝主应力的满应力设计, 取得成功。该法的主要思路是: 如上所述, 式(2)中 β_i 不大稳定; 而式(3)中的 t_i 与 $[\sigma]$ 都是确定的, 对于各层拱圈的控制性应力 σ_i 来说, $\sigma_i/[\sigma]$ 是有一定规律的。随着迭代次数的增加, β_i 值变动范围越来越小, 因总的调整幅度不大, 不难凭经验合理给出 β_i 值。当 $\sigma_i/[\sigma] < 1$ 时, 取 $\beta_i = 0.65 \sim 0.85$ 为宜, 当 $\sigma_i/[\sigma] \geq 1$ 时, 可取 $\beta_i = 0.5$ 。

2 方法要点

a. 本法的应用主要应在 $\sigma_i/[\sigma] < 1$ 的情况下进行, 当 $\sigma_i/[\sigma] > 1$ 时, 大于 1 的数的若干次方 (如 0.5 次方) 仍大于 1, 该断面将越来越厚, 故不宜多次迭代。

b. β_i 值的适宜范围。据对已有的优化成果分析, 当 $\sigma_i/[\sigma] < 1$ 时, β_i 取 0.7 左右为宜; 当 $\sigma_i/[\sigma] > 1$ 时, β_i 取 0.5 为宜。

c. 计算中适当调整允许应力 $[\sigma]$ 的值, 有时可避免局部点应力超限或可加速收敛。拱坝是高度超静定结构, 按式(3)迭代的下一次结果, 不一定恰好达到 $\sigma_i' = [\sigma]$, 往往出现 $\sigma_i' > [\sigma]$ 或 $\sigma_i' < [\sigma]$ 的情况。如 $\sigma_i' > [\sigma]$, 再迭代下去, 又将面临断面不断增大的问题。为了避免出现这一情况, 可使计算中的 $[\sigma]'$ 略小于实际的 $[\sigma]$, 即用一个小于 1 的系数乘以

$[\sigma]$,如取 $[\sigma]' = 0.95[\sigma]$ 等.还有一种情况,拱坝某些层次的应力在迭代过程中总是偏小,与其他层的应力水平不同步,为了加速收敛,也可将这些层次的 $[\sigma]'$ 适当放大,如令 $[\sigma]' = 1.05[\sigma]$ 等.另外,为了使计算主要在 $\sigma_i/[\sigma]' < 1$ 的情况下进行, $[\sigma]'/[\sigma]$ 的值可采取逐渐增大的方式,如三次迭代依次采用0.9,0.95,1.0等.再有,调整 $[\sigma]'$ 比调整 β_i 更为灵活,特别适用于微调阶段.

d. 重视拱层之间刚度比的影响,合理调整拱层间刚度的关系,特别是上下层之间刚度的关系.由于拱坝高度超静定的特性,某层拱梁荷载的分配往往不完全由该层的厚度所决定,而由它与其他层拱厚的综合关系所决定.某层应力超标,单纯增厚该层不一定奏效,而应综合考虑邻近层厚关系的影响.

e. 为了使成果能满足不同的工况,每次迭代中应包括该考虑的不同工况下的应力,不能一个一个工况各自迭代.

3 算 例

对比计算了同一坝址的混凝土双曲拱坝的两种体形方案.一是水平拱圈为等截面圆弧拱方案,另一是水平拱圈为变截面抛物线拱方案.最大坝高120 m,河谷宽度顶部283 m,底部87 m.坝体与基础弹模均为20 GPa,坝体密度24 kN/m³,坝体热胀系数 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.圆弧拱坝初始方案主要几何参数及水荷载如表1所示,初始方案坝体方量626 052 m³.抛物线拱坝初始方案主要几何参数如表2所示,初始方案坝体方量636 087 m³.应力分析采用多拱梁法三向调整程序.满应力设计允许主压应力50 MPa,允许主拉应力1.5 MPa,要求坝顶厚度不小于5 m.满应力设计包括正常水位加温降、校核水位加温升两种工况,并假定校核水位与正常水位相同.温度荷载采用规范公式计算^[2].

表1 圆弧拱坝初始方案

拱层号	假定高程/m	拱厚/m	中心半径/m	半中心角/(°)	中心距/m	上游坝面水压力/(10 ⁴ Pa)	下游坝面水压力/(10 ⁴ Pa)
0	120	6.466	176.36	53.40	0	0	0
1	100	13.335	167.47	55.17	12.106	20	0
2	80	19.246	156.17	55.66	25.200	40	0
3	60	24.200	142.47	55.16	39.260	60	0
4	40	28.197	126.35	52.45	54.334	80	0
5	20	31.237	107.83	47.51	70.374	100	5
6	0	33.320	86.90	29.89	87.403	120	15

注:①左右拱均对称;②正常水位、校核水位均为120 m高程.

圆弧拱坝优化成果列于表3,表中列出了 $\sigma_i/[\sigma]' < 1$ 时对应于不同的 β_i (0.6~0.9)的优化结果,对于每一 β_i ,还计算了固定取 $[\sigma]' = 0.95[\sigma]$ 以及 $[\sigma]'$ 各迭代次数各层不一定相同的两类情况.由表

3可看出: $[\sigma]'$ 取定值的成果比不取定值的成果差,坝体方量约大1.6~3.8万 m³,约大于后者的3%~7%.由此可见, $[\sigma]'$ 在各次迭代中甚至各层中不取定值效果是显著的,特别是迭代后期阶段,起到了有效的微调作用.不难看出,对于不同的 β_i 值,在本例中,以 $\beta_i = 0.7$,迭代5次,坝体方量548 781 m³为最小,也就是最终采用的优化成果.另外还可看出, $\beta_i = 0.7, 0.8, 0.9$ 的两类 $[\sigma]'$ 取值的成果都很接近,可视为在计算误差之内,因此在计算中取 $\beta_i = 0.7 \sim 0.9$,估计都是可以的.

表2 抛物线拱坝初始方案

拱层号	假定高程/m	拱冠厚/m	拱端厚/m	拱冠曲率中心半径/m	中心半角/(°)	中心距/m
0	120	6.466	8.466	140	45.32	0
1	100	13.335	15.335	132	46.16	12.2
2	80	19.246	21.246	128	45.21	25.0
3	60	24.200	26.200	120	44.26	37.5
4	40	28.197	30.197	110	42.32	49.5
5	20	31.237	33.237	90	41.46	66.8
6	0	33.320	35.320	75	30.00	77.4

注:①左右拱均对称;②正常水位、校核水位均为120 m高程.

表3 圆弧拱坝优化结果

$\frac{\sigma_i}{[\sigma]}' < 1$ 时的 β_i	$[\sigma]' = 0.95[\sigma]$		$[\sigma]'$ 各迭代次数各层不一定相同	
	迭代次数/次	坝体方量/m ³	迭代次数/次	坝体方量/m ³
0.6	1	566 646	5	550 325
0.7	6	586 031	5	548 781
0.8	6	587 004	2	549 236
0.9	6	587 515	2	549 032

注:① $\sigma_i/[\sigma]' \geq 1$ 时, $\beta_i = 0.5$;②初始方案坝体方量626 053 m³.

表4 抛物线拱坝优化结果

$\frac{\sigma_i}{[\sigma]}' < 1$ 时的 β_i	迭代3次		迭代5次	
	坝体方量 V/m ³	最大主压应力 σ_m /MPa	坝体方量 V/m ³	最大主压应力 σ_m /MPa
0.6	521 142	5.21	519 043	5.29
0.65	515 163	5.24	526 897	5.05
0.7	515 910	5.26	528 953	5.06
0.75	513 712	5.29	529 714	5.08
0.8	511 712	5.34	517 471	5.16
0.85	511 510	5.45	533 136	5.09
0.9	511 388	5.48	538 633	5.05

注:① $\sigma_i/[\sigma]' \geq 1$ 时, $\beta_i = 0.5$;② $[\sigma]'$ 各迭代次数各层不一定相同;③ $\beta_i = 0.65$,迭代次数为5时最大主拉应力>1.5 MPa;④初始方案坝体方量636 087 m³.

抛物线拱坝优化成果列于表4,表中主要列出了 $\sigma_i/[\sigma]' < 1$ 时, $\beta_i = 0.6, 0.65, \dots, 0.9$,分别迭代3次及5次的成果, $[\sigma]'$ 各迭代次数或各层不一定相同.从表中可看出,最终优化成果为 $\beta_i = 0.7$,迭代5次,坝体方量528 953 m³.另外还可看出,如将允许主压应力放宽5%,则 $\beta_i = 0.65$ 迭代3次,坝体方量515 163 m³可作为优化方案;如放宽6%,则 $\beta_i = 0.75$,迭代3次,坝体方量513 712 m³可作为优化方

案,较前述 $\beta_i = 0.7$ 迭代 5 次的优化成果坝体方量将减少 1.5 万 m^3 ,相当可观.两种迭代次数中, β_i 的取值仍以 0.7 为佳,如适当放宽允许主压应力(如 3%~6%),则 $\beta_i = 0.65, 0.7, 0.75, 0.8$ 都是适宜的.

表 5 两种体形拱坝优化结果比较

层号及 方案	圆弧拱坝		抛物线拱坝		
	拱厚 /m	坝体方量 / m^3	拱冠厚 /m	拱端厚 /m	坝体方量 / m^3
0	5.59	—	10.508	10.508	—
1	12.315	—	12.158	12.518	—
2	18.116	—	12.515	16.417	—
3	22.881	—	19.324	25.008	—
4	22.881	—	19.324	29.896	—
5	22.881	—	19.324	26.566	—
6	25.549	—	25.072	25.075	—
初始方案	—	626052	—	—	636087
优化方案	—	548781	—	—	528953
优化方案节省	—	12.34%	—	—	16.84%

注:① $\sigma_i/[\sigma] < 1$ 时, $\beta_i = 0.7$; $\sigma_i/[\sigma] \geq 1$ 时, $\beta_i = 0.5$; ② $[\sigma]$ 各迭代次数各层不一定相同; ③迭代次数 5.

两种体形拱坝优化结果比较如表 5 所示.从坝体方量来看,抛物线拱坝优于圆弧拱坝,优化方案较圆弧拱坝约小 2 万 m^3 ,约比圆弧拱坝优化方案坝体方量节省 3.61%.但从应力变化及分布情况来看,抛物线拱坝体形似不如圆弧拱坝体形稳定和合理.这主要表现在以下两方面:

a. 圆弧拱坝优化在迭代过程中是逐渐变化的,通常是第一次迭代的满应力步,将有个别点主压应力超限稍多,随着迭代次数的增加,应力逐渐减小,偶尔有稍许波动,但总的趋势是逐渐调向最优.而抛物线拱坝优化过程中远不如圆弧拱坝稳定,如第一次迭代的满应力步,个别点主压应力可以在 11 MPa 以上,随着迭代次数的增加,往往不出现逐渐调向最优的现象,而是似乎满应力步与射线步交替出现的

情况,在似乎满应力步中应力较前次变幅很大,而在下一步中又很快削减.如在迭代次数为 2,4,6 时,某些边梁底主拉应力在 3 MPa 以上,主压应力在 6 MPa 以上,而在迭代次数 3,5 时这些高应力又不存在了.

b. 一般而言,从拱冠到拱端,圆弧拱坝应力是单调变化的,而非圆弧拱坝则不一定如此.在优化中也反映出两种曲线体形的差别.如圆弧拱坝最大主压应力都发生在温降组合下第三或第二层拱冠上游面,而抛物线拱坝最大主压应力则都发生在温降组合下靠近拱冠梁的左、右第一根边梁第二层上游面,因对称关系,两者数值相等.由此推知,对于抛物线拱坝,某些拱层应力分布存在至少两个极值点,从拱冠到拱端应力不是单调变化,这可能是某些点应力变化很不连续的原因之一.

4 结 语

由上可知, β_i 相对固定的应力指数法,是适应拱坝主应力满应力优化的有效、可行的方法,它具有程序简单、收敛迅速、优化效果显著等优点.只需在原有的拱坝应力分析程序的基础上稍加扩充即可实现,一般迭代 5~8 次即可得到满意的结果,对于初始方案基本合理的拱坝,优化后坝体方量约可节省 12%~20%.该法应用于非圆弧拱坝同样方便和有效.

参考文献:

- [1] 朱伯芳,黎展眉.拱坝的满应力设计[A].水利水电科学院科学研究论文集(第 9 集)[C].水利电力出版社,1982. 38~42.
- [2] SD145—85,混凝土拱坝设计规范[S].

(收稿日期:2002-06-03 编辑:马敏峰)

·简讯·

黄河首次调水调沙试验成功启动

2002 年 7 月 4 日 9 时,随着黄河首次调水调沙试验总指挥、黄河水利委员会主任李国英一声令下,黄河小浪底水库 11 孔闸门依次徐徐开启(其中 5 孔供发电用),泄洪工程出水口,3 条排沙洞和 3 条明流洞喷涌而出的 6 股巨大的射流,如黄龙腾空,如玉龙天降,咆哮着直向黄河下游冲去(参见本期封一、封四图片),从而拉开了世界水利史上最大规模人工调水调沙原型试验的序幕.

所谓调水调沙,就是在充分考虑黄河下游河道输沙能力的前提下,利用水库的调节库容,对水沙进行有效的控制和调节,使之形成便于输沙入海的水沙比例,从而减轻下游河道的淤积,达到冲刷或不淤积的效果,实现下游河床不抬高的目的.这次调水调沙试验就是通过调节小浪底水库的下泄流量,以“人造洪峰”的方式寻找黄河下游不淤积的临界流量和临界时间,达到对下游河床冲刷减淤、输沙入海的目的.从 7 月 4 日开始,小浪底水库按照试验要求“制造”一次流量在 2600~3100 m^3/s 之间变化的、含沙量小于 20 kg/m^3 的洪峰,10d 的连续试验,至少下泄水量 14 亿 m^3 .

这次调水调沙充分体现了人与自然和谐共处的思想,是治水新思路在治黄工作中的具体实践,是传统治黄向现代治黄转变的一座里程碑,意义重大而深远.黄河首次调水调沙试验已经完成,目前正在进行分析 and 总结.我们期待着实验结果,期待着这一伟大实践的成功.

(刘凤翔供稿)