

应用复合土工膜加固石砭峪沥青混凝土斜墙坝^①

顾淦臣, 沈长松, 吴江斌

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:介绍用复合土工膜加固石砭峪水库沥青混凝土斜墙坝的方案、技术路线和设计等.通过沥青混凝土斜墙现场取样和室内试验,得到石砭峪大坝沥青混凝土的强度,应用三维有限元法计算大坝在各运行水位作用下坝体各部位的应力应变,找出多年来大坝漏水的原因.决定采用充填灌浆和铺设复合土工膜相结合的处理措施,加固处理后的大坝经多次水位升降运行,性态正常,效果明显,渗流量仅40 L/s.

关键词:复合土工膜;斜墙堆石坝;有限元法;石砭峪水库

中图分类号:TV49

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2004)01-0010-05

石砭峪水库位于西安市长安县,供西安市用水,并安装3000 kW小型水力发电机组.坝高85 m,坝顶高程735 m,坝顶长265 m.1973年用定向爆破堆石筑坝至高程705 m,以上30 m是人工搬运坝体轮廓线外爆破块石堆筑的.到1980年初,完成沥青混凝土斜墙.沥青混凝土斜墙厚20 cm,坡率自下至上为1:2.25,1:6,1:4,1:2.25,1:1.8,见图1.1980年5月5日蓄水到718 m,靠近右岸高程670~679 m处沥青混凝土斜墙裂缝,漏水量0.43 m³/s;坝趾流出浑水.用嵌缝材料修补以后,漏水暂时不大.1992年9月30日蓄水至720 m,靠近右岸高程674~682 m处沥青混凝土斜墙裂缝26处,缝宽6 cm,漏水量1.18 m³/s.修补以后,暂时漏水减少.1993年7月27日蓄水至715.6 m,靠近右岸高程690~698 m处沥青混凝土斜墙塌坑长4.5 m,宽4 m,漏水量1.72 m³/s,冲走堆石体长8.5 m,宽5 m,出现塌坑(1号、2号).乃

补填块石修补斜墙^[1].以后逐年蓄水位控制在700 m以下,不敢蓄高,不能供给西安市用水,损失巨大.

1 试验研究

1.1 沥青混凝土力学性质试验

在石砭峪坝面凿取沥青混凝土样品,切成10 cm×10 cm×10 cm试件进行抗压试验,求抗压强度、泊松比、弹性模量.试验温度为9℃,4个试件的平均初始抗压强度为0.505 MPa,平均破坏抗压强度为1.12 MPa,抗压弹性模量取应力~应变曲线上应力水平为40%的割线模量,4个试件的平均值为126 MPa,泊松比为0.32.

吴立新^[2]曾进行沥青混凝土的抗拉试验和弯曲极限拉应变试验,抗拉试验用胜利沥青配制试件,加载速率5 mm/min,弯曲极限拉应变试验用克拉玛依100号沥青配制试件,加载速率50 mm/min,得到表1成果.

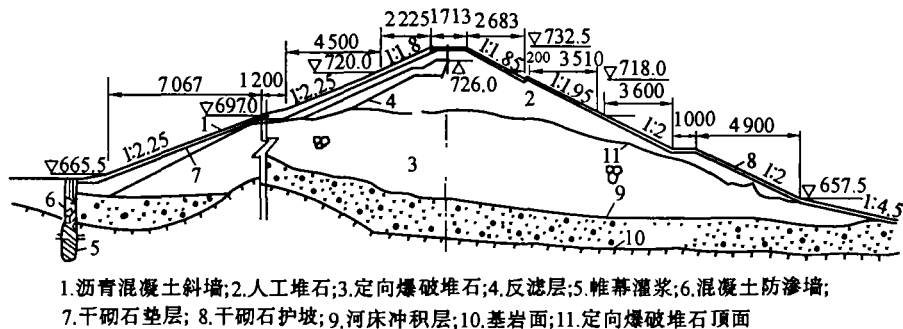


图1 石砭峪定向爆破堆石坝横剖面示意图(单位:高程 m,其余 cm)

作者简介:顾淦臣(1918—),男,江苏江阴人,教授,从事水工结构和岩土工程研究.

①参加研究工作的还有:沈洪俊高级工程师,周澄、武良金工程师等.

表1 沥青抗拉强度与极限拉应变试验值

试验温度/℃	抗拉强度/MPa	极限拉应变/%
10	0.75	1.890
5	1.02	0.720
0	1.28	0.270
-5	1.65	0.135
-10	1.95	0.112

石砭峪坝沥青混凝土试件有气孔,且运行 20 余年,已老化,拉伸试验极限拉应变小于弯曲极限拉应变,因此采用抗拉强度 0.35 MPa,低温极限拉应变 0.10%。

1.2 复合土工膜与沥青混凝土之间摩擦系数试验

试验用复合土工膜,两侧为单位质量 300 g/m² 的涤纶丙纶长丝针刺织物,中间热压厚 0.6 mm 的聚氯乙烯膜.复合土工膜置于磨光的沥青混凝土块下面,进行 2 种温度、4 种试件的直接剪切试验,成果为:试验温度 8℃时,平均摩擦系数为 0.73,平均粘聚力为 0.002 MPa;试验温度 18℃时,平均摩擦系数为 0.64,平均粘聚力为 0.003 MPa。

1.3 沥青混凝土-沥青-复合土工膜之间的粘聚力试验

将上述同型号的复合土工膜用熔化的沥青粘贴在沥青混凝土试件上面,冷却以后用直接剪切法试验复合土工膜与沥青间的粘聚力,沥青采用克拉玛依 AH-70 号,试验温度 12℃.快剪 4 个试件,加荷速率 1.5 kN/min,平均粘聚力为 0.32 MPa.慢剪 4 个试件,加荷速率 0.10 kN/min,平均粘聚力为 0.25 MPa。

1.4 复合土工膜的物理力学性质试验

为了比较各种型号复合土工膜的物理力学性质,对 7 种复合土工膜都测试了膜厚、抗拉强度、撕裂强度等 13 项常规项目,并由电子拉力机自动绘制其纵向和横向的单位宽度拉力与拉应变关系曲线($T \sim \epsilon$ 曲线).7 种复合土工膜是:350/0.4 塑膜/350, 200/0.5 塑膜/300, 450/1.0 塑膜/450, 500/1.0 塑膜/500, 450/1.0PE/450-1, 450/1.0PE/450-2, 500/1.0PE/500。

每种复合土工膜都作出经向(纵向)和纬向(横向)的 $T \sim \epsilon$ 曲线共 14 条(本文示出其中 1 条曲线,见图 2),以便计算复合土工膜与沥青混凝土斜墙共同作用时受水压力后发生的工作应变和工作应力(工作单宽拉力),计算应力安全系数 K_s 和应变安全系数 K_e 。

$$K_s = T_{\max}/T \quad (1)$$

$$K_e = \epsilon_{\max}/\epsilon \quad (2)$$

式中: $T_{\max}$ 为极限抗拉强度(极限单宽拉力), kN/m; T 为工作应力(工作单宽拉力), kN/m; $\epsilon_{\max}$ 为极限拉

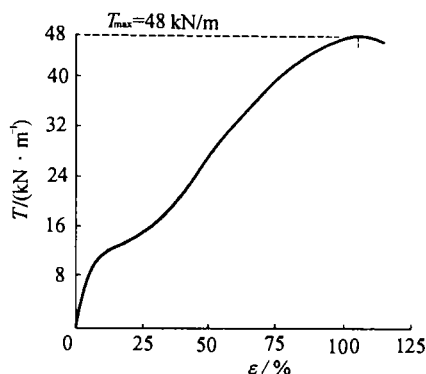


图2 450/1.0PE/450 复合土工膜纬向 $T \sim \epsilon$ 曲线

应变; ϵ 为工作拉应变.安全系数 K_s 和 K_e 都应大于 5.0,即应力水平和应变水平都在 20% 以下,使选择的土工膜使用寿命达到 100 年左右。

2 三维非线性有限元计算

为了求得石砭峪坝沥青混凝土斜墙受水压力后发生的应力、应变,进行了三维非线性有限元计算。

根据坝体纵剖面和 13 个横剖面划分单元,主要采用八结点六面体等参单元,边角部位为六结点三棱柱单元或四面体单元共 1830 个单元,接触面单元 175 个,接缝连接单元 124 个,总数 2 129 个.材料的 E-B 模型参数:坡积料、砂卵石冲积料参数是取样进行三轴试验得到的,沥青混凝土的抗压强度、弹性模量、泊松比、摩擦系数、粘聚力是在坝面斜墙凿取试样进行抗压和直剪试验得到的,堆石参数根据文献资料类比确定.各种参数见表 2。

表2 材料的 E-B 模型参数

材料	K	R_f	n	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	$\gamma_d / (g \cdot cm^{-3})$
人工堆石	500	0.72	0.25	250	0.0	1000	0.12	44	8	2.08
爆破堆石	700	0.79	0.30	350	0.0	1300	0.16	46	9	2.15
坡积料	104	0.70	0.60	64	0.4	210	0.30	36	0	1.74
冲积料	450	0.81	0.40	250	0.3	900	0.20	45	8	1.85
沥青混凝土	317	0.47	0.33	200	0.25	600	0.20	32	6	2.40

注:混凝土防渗墙 $E = 20\,000$ MPa, $\nu = 0.17$ 。

分六级加荷,第一级为坝基坡积土和砂卵石冲积层,第二级为爆破堆石,第三级为人工堆石,第四级为沥青混凝土斜墙并将水位加至 700 m,第五级将水位加至 720 m,第六级将水位加至 731 m。

3 沥青混凝土斜墙的变形和应变

用三维有限元法计算了沥青混凝土斜墙在库水位 700 m, 720 m, 731 m 作用下发生的变形和应变.本文示出水位 720 m 时沥青混凝土斜墙的垂直向变形等值线(图 3).最大变形发生在 700 m 高程反弧处,

为 0.73 m.从 1978 年 12 月至 1995 年 7 月监测,曾承受 1992 年 722.05 m 最高库水位,监测变形最大值为 0.57 m,1995 年以后还有增加.可见计算值与监测值相当一致,监测的沥青混凝土斜墙铅直变形等值线见图 4.将图 3 和图 4 对比,其分布规律也相当一致.由此可见,三维有限元计算采用的数学模型和材料参数是正确合理的.

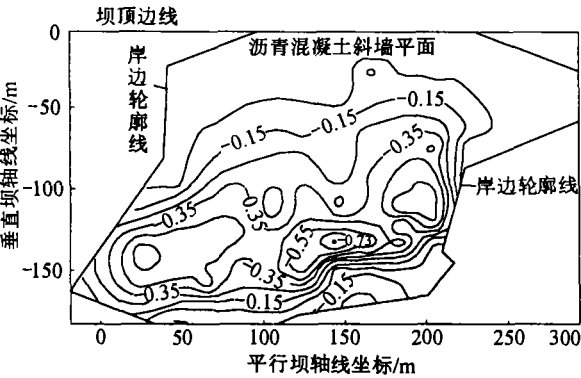


图 3 三维有限元计算的沥青混凝土斜墙铅直变形等值线(计算水位 720 m,单位:m)

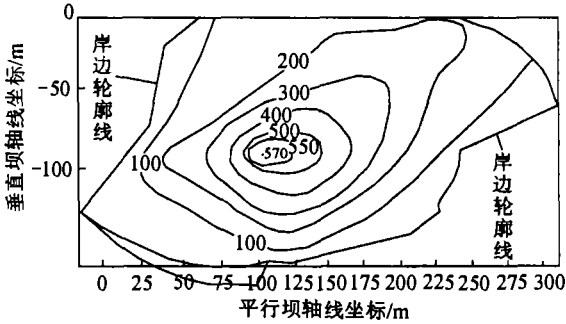


图 4 1978 年 12 月至 1995 年 7 月实测的沥青混凝土斜墙铅直变形等值线(单位:mm)

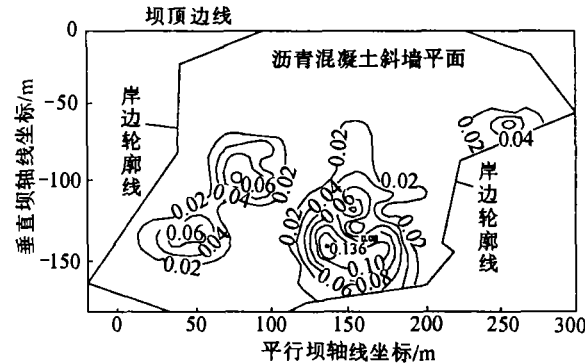


图 5 三维有限元计算的沥青混凝土斜墙拉应变等值线(计算水位 731 m)

三维有限元计算得到沥青混凝土斜墙在水位 700 m,720 m,731 m 的应变等值线.图 5 示出库水位为 731 m 的拉应变等值线,图上未画等值线的空白处为压应变区.由图 5 可见,最大拉应变为 0.136,已大于沥青混凝土的极限拉应变,无疑将产生裂缝.拉

应变等值线大于或等于 0.10 的范围较大,在此范围内也将产生裂缝.此裂缝区域与现场的 1 号沉陷坑、2 号塌坑的位置一致.

4 沥青混凝土斜墙的应力

用有限元法计算了沥青混凝土斜墙在库水位 700 m,720 m,731 m 的作用下发生的应力.图 6 为水位 720 m 时沥青混凝土斜墙的大主应力等值线和小主应力等值线,由图 6 可见,720 m 水位时,680 ~ 690 m 戕台右侧最大主应力为压应力 1.11 MPa,有很大面积压应力超过 0.50 MPa.小主应力的最大值为压应力 0.65 MPa,在戕台下方的反弧处(相当于现场的 1 号沉陷坑和 2 号塌坑的位置),小主应力的最小值为拉应力 1.17 MPa.对照试验研究成果初始抗压强度 0.505 MPa,故有很大面积已开始压坏,有较小面积压应力达到初始抗压强度的 2 倍,已完全压碎.试验抗拉强度为 0.35 MPa,拉应力已达到抗拉强度的 3.3 倍.可见,反弧处沥青混凝土斜墙已拉裂,成为漏水通道.拉裂以后,漏水经堆石漏到底部冲积层或坡积层,发生管涌冲刷,导致堆石塌落及沥青混凝土塌坑.

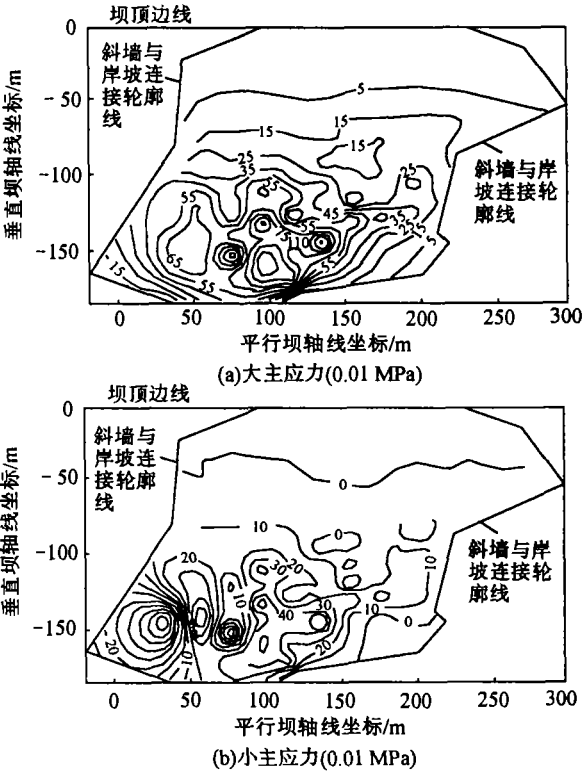


图 6 沥青混凝土斜墙应力等值线(720 m 水位)

若蓄水到正常高水位 731 m,则沥青混凝土斜墙将发生最大主应力为压应力 2.38 MPa,沥青混凝土将严重压碎.在反弧处出现的拉应力为 1.12 MPa,拉裂情况与 720 m 水位相同.

5 复合土工膜的工作应变、工作应力与安全系数

对复合土工膜与沥青混凝土斜墙之间的抗滑稳定进行计算,需要用沥青把复合土工膜粘贴在沥青混凝土斜墙面上才能维持稳定.这样,复合土工膜与沥青混凝土斜墙协同变形,两者应变值相同,复合土工膜的工作应变即沥青混凝土斜墙的应变,用沥青混凝土斜墙各部位的拉应变值在复合土工膜单宽拉力与拉应变关系曲线 $T \sim \epsilon$ 上就可查得各部位复合土工膜的工作应力(即单宽拉力).

按式(1)计算应力安全系数,按式(2)计算应变安全系数,计算结果见表 3.

根据上述计算可知,450/1.0 塑膜/450 复合土工膜在 720 m 水位时应力安全系数都满足要求,在 731 m 水位时,应变安全系数都满足要求,但应力安全系数经向不满足要求,纬向满足要求.因此,还应选用更厚的复合土工膜,使 731 m 水位时经向应力安全系数也满足要求.最后,沥青混凝土斜墙 703 m 高程以上选用 500/1.0 塑膜/500 复合土工膜,703 m 高程以下选用 700/1.0 塑膜/700 复合土工膜.再做单宽拉力~拉应变试验,并计算应力安全系数,各种水位经向、纬向都满足要求.

450/1.0PE/450 复合土工膜在各种水位下经向、纬向都不满足要求.其原因是单宽拉力~拉应变曲线有明显的屈服阶段,且初始模量较大,在工作应变范围内,应力(单宽拉力)较高.初始模量大的原因可能是由于这种复合土工膜制造时二次成型使材料变硬.

6 抗滑稳定

石砭峪堆石坝沥青混凝土斜墙的坡率在 720 m 戕台以下为 1:2.25,720 m 以上为 1:1.8,复合土工膜铺在沥青混凝土斜墙面上,表面再浇筑厚 15 cm 混凝土护坡.混凝土与复合土工膜表面的土工织物有较大的粘聚力,可达 1.0 MPa.因此现浇混凝土与复合土工膜之间不存在滑动问题.复合土工膜与沥青混凝土斜墙之间应计算施工期抗滑稳定.水库蓄水后,水压力作用在混凝土护坡和复合土工膜上,压力增大,导致复合土工膜与沥青混凝土斜墙抗滑力增

大,故不必计算抗滑稳定性.在水库水位降落时,如果复合土工膜与沥青混凝土斜墙之间存在雨水或渗漏水,则将对复合土工膜产生反压力,使之鼓破或滑落.已建议在沥青混凝土斜墙上钻排水孔,将可能存在的雨水或渗漏水排向堆石坝体.水库水位降落时复合土工膜与沥青混凝土斜墙之间的抗滑稳定性与施工期相同.

施工期抗滑稳定安全系数计算:

a. 复合土工膜与沥青混凝土斜墙之间不涂胶粘剂,只靠摩擦力维持稳定,则

$$K = \frac{W \cos \alpha \cdot f}{W \sin \alpha} = \frac{f}{\tan \alpha} \tag{3}$$

式中:W 为复合土工膜及其上部混凝土护坡的重量; α 为上游坡与水平面的夹角; f 为复合土工膜与沥青混凝土斜墙面的摩擦系数.

b. 复合土工膜与沥青混凝土斜墙之间涂刷胶粘剂,靠摩擦力和剪切力维持稳定,则

$$K = \frac{W \cos \alpha \cdot f + cL}{W \sin \alpha} = \frac{f}{\tan \alpha} + \frac{cL}{W \sin \alpha} \tag{4}$$

式中:c 为复合土工膜与涂胶粘剂沥青混凝土斜墙的粘聚力(单位面积的粘聚力);L 为上游坝坡的斜坡长度,即复合土工膜与沥青混凝土斜墙的胶粘长度;其他符号同前.

抗滑稳定计算采用温度为 18℃ 时的摩擦系数 $f = 0.64$ 及慢剪试验粘聚力的 1/5,即 $c = 50 \text{ kPa}$.

720 m 以下坝坡 1:2.25,抗滑稳定安全系数用式(3)计算,为 1.45,满足一级坝安全系数要求.

720 m 以上坝坡 1:1.8,如用式(3)计算抗滑稳定安全系数,为 1.14,不满足安全系数 1.20 的要求,需要在沥青混凝土面上涂刷粘结剂,将复合土工膜与之粘结.用式(4)计算,其中 $\sin \alpha = 0.49$.按 1 m² 面积计算,15 cm 厚混凝土护坡的重力为 3.53 kN,500/1.0 塑膜/500 复合土工膜为 0.02 kN,抗滑稳定安全系数 $K = 29.9$.只要沥青混凝土斜墙面上 5% 面积涂刷沥青粘结复合土工膜,即使不计摩擦力,已满足一级坝的抗滑稳定要求.

实际施工时,在沥青混凝土斜墙面上 50% 面积涂刷热沥青,然后铺复合土工膜,并用辊筒碾压使之密合,铺设时沥青温度不宜超过 130℃,以免锦纶或

表 3 复合土工膜应力与应变安全系数

复合土工膜	水位/m	$T_{max}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$		对应的拉力/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$		$\epsilon_{max}/\%$		安全系数	
		径向	纬向	径向	纬向	径向	纬向	径向	纬向
450/1.0 塑膜/450	720	46.0	44	8.6	5.2	80	93	5.3/9.3	8.5/10.8
450/1.0 塑膜/450	731	46.0	44	12.2	7.8	80	93	3.8/5.9	5.6/6.8
450/1.0PE/450	720	46.5	48	10.6	10.4	86	105	4.4/10.0	4.6/12.2
450/1.0PE/450	731	46.5	48	13.4	12.4	86	105	3.5/6.3	3.9/7.7

注:表中安全系数一项,斜杠前为应力安全系数,斜杠后为应变安全系数.

氯纶纤维烫坏变形.沥青是在坝面的上下方向成条涂刷,以便膜后渗入的雨水或渗漏水由不涂刷的条带向下排出.

7 施工简况^[3]及运行性态

石砭峪沥青混凝土斜墙堆石坝加固工程于2000年3月开工,先进行塌陷区堆石充填灌浆,灌好以后,斜墙上的钻孔用沥青封堵,然后清理平整沥青混凝土斜墙面.铺复合土工膜从坝底开始.厂家提供的复合土工膜幅宽2 m,长40 m,先将复合土工膜沿纵向铺设在混凝土防渗墙顶,两幅端头胶粘牢固,然后锚固于墙顶.坝坡最下面的1条复合土工膜与此膜幅边纵向胶粘,然后逐条从下到上铺设并胶粘.夏季白昼气温高于34℃时不利于胶粘,故在夜间胶粘.冬季气温低于0℃时也不宜胶粘,故冬季停工.2001年3月复工,9月竣工.共铺设复合土工膜41 000 m²,工程经费1 200万元.

2000年11月开始蓄水,2001年1月5日蓄到706.8 m,4月10日降到698.8 m,5月1日升到712.4 m,7月23日降到694 m,11月14日升到715 m,2002年2月26日降到700.3 m,2002年6月陕西大雨,水位升至723 m.在水位升降过程中,复合土工膜和混凝土护坡运行正常,性态稳定,706 m水位时下游坝脚渗流量40 L/s.

参考文献:

[1] 李新强.石砭峪水库大坝漏水分析与应急抢险工程措施[A].中国科学技术文库(建筑工程水利工程卷)[C].北京:科学技术文献出版社,1998.
[2] 吴立新.沥青混凝土在荷载作用下的破坏特性探讨[J].土石坝工程,2001(3,4):76~83.
[3] 屈华斌,孙晓范.复合土工膜在西安石砭峪水库除险加固工程中的应用[A].土工合成材料防渗反滤和排水技术的研究与实践[C].武汉:武汉出版社,2001.

(收稿日期:2002-01-28 编辑:傅伟群)

(上接第9页)游城陵矶一带的洪水水位仍然会高于1954年实际洪水水位.在不影响分蓄洪布局的情况下,需要适当抬高这一带包括洞庭湖在内的防洪控制水位,如将湖口莲花塘水位提高0.64 m.

表6 1954年洪水再现长江中游超额洪量 亿 m³

河 段	控制站	控制水位 /m	超额洪量/亿 m ³		
			现状莲花塘水位 35.8 m	三峡运行后莲花塘水位 34.4 m	三峡运行后莲花塘水位 35.04 m
荆江河段	沙 市	45.00	62	0	2
城陵矶附近	莲花塘	29.73	399	427	320
螺山河段	汉口	29.73	24	19	26
合 计			485	446	348

注:按照城陵矶附近规划的分蓄洪容积计算莲花塘控制水位.

5 结 论

整体上,长江中游防洪由堤防、防洪水库和分蓄洪区组成的格局已经基本形成.

a. 堤防设施已经构成体系.1998年洪水以后,城陵矶附近在设计水位不变的情况下,堤防额外增加了0.5 m的超高,所以将莲花塘水位由当前的34.4 m提高到35.04 m,相对抬高0.64 m,工程的影响范围可以不包括长江干堤,而超额分洪量也不会影响现有的分蓄洪布局.

b. 三峡水库正在兴建,洞庭湖支流水系也兴建了大量水库.虽然这些水库主要是错峰调度,对洞庭湖最大30 d洪量影响有限,对于四水尾间一带瞬时最高水位的作用是明显的.

c. 分蓄洪区布局已经完成.由于历史的原因和区域经济社会的特殊性,分蓄洪区巨大的人口压力成为分蓄洪最大的障碍,而其特定的地理位置和政策限制,致使其区域经济相对落后.这是本地区防洪的难点.

参考文献:

[1] 谢悦波,刘晓风,王平.加入古洪水资料后的设计洪水成果合理性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(4):8~12.
[2] 张真奇,夏自强.洪水预报水文水力学模型研究[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(5):83~86.
[3] 张天明,黄常斌.闽江上游建溪、富屯溪流域防洪水库作用分析及防洪对策[J].水利水电科技进展,2002,22(6):49~51.

(收稿日期:2003-09-02 编辑:傅伟群)

