

太平湾大坝扬压力超限原因及对坝体稳定影响^①

②
4-7

梁希林

(太平湾水力发电厂 118216 辽宁丹东)

TV698.11
TV698.21

摘 要 对于坝高较小的混凝土重力坝,扬压力对坝体稳定影响极大。通过对太平湾大坝扬压力超限原因的分析,研究了影响扬压力的因素(坝体温度、坝体地质条件、坝体结构、基础防渗帷幕及固结灌浆、坝体排水等)。文章并提出了降低扬压力的措施。

关键词 扬压力 超限 坝体稳定 影响 大坝 观测系统

分类号 TV 698.1

0 工程概况

太平湾水力发电厂位于鸭绿江下游,是鸭绿江干流第4座梯级电站,距上游水丰水力发电站29 km,距下游丹东市40 km,电厂共装机4台,总容量为190 MW。电厂由中朝两国投资,中方负责设计、施工和运行管理,向中朝两国送电。

太平湾电厂为二等工程,大坝为Ⅱ级建筑物,设计洪水标准为500年一遇,洪峰流量 $5.61 \text{ m}^3/\text{s}$,校核洪水位33.20 m,相应库容 $2.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水库正常蓄水位29.50 m,死水位28.80 m。

大坝为混凝土重力坝,坝长1185 m,坝顶高程36.5 m,最大坝高31.5 m,共62个坝段(不包括厂房坝段),其中有28个溢流坝段。

大坝于1982年10月27日正式开工,1985年11月20日下闸蓄水,1985年12月27日第1台机组发电,1987年11月15日全部投产,1996年10月25日国内竣工验收移交。

太平湾大坝首次安全定期检查工作专家咨询组,对太平湾大坝设计、施工和运行等方面进行了详细的复查,一致评定太平湾大坝为正常坝,同时也指出了大坝部分坝段扬压力偏大问题。

1998-09-30 收稿,1998-10-19 改回。

①:参阅:

a. 大连理工大学,太平湾大坝扬压力超限情况下强度和抗滑稳定分析报告[科技报告],大连:大连理工大学,1996

b. 太平湾水力发电厂,水利部电力部东北勘测设计研究院,坝基扬压力综合分析[工作报告],1996

c. 水利部电力部东北勘测设计研究院,太平湾水力发电厂安全定检大坝稳定及应力复核[工作报告],长春:水利部电力部东北勘测设计研究院,1996

1 大坝基础及扬压力测值情况

1.1 大坝基础情况

太平湾大坝坝基有断层和破碎带上千条,但规模不大,其中宽度较大的陡倾角断层有5条,坝区尚有一些缓倾角断层,倾角一般 $20^\circ \sim 25^\circ$,个别 $10^\circ \sim 16^\circ$ 。根据野外岩石抗剪实验,大部分试件破坏由岩石内发生,说明滑裂面可能由浅层滑动控制。

由于坝基岩石破碎,完整性差,造成力学指标偏低,尤其抗剪指标 f' , c' 较低,降低了大坝抗滑力。另外,由于溢流坝底宽较大,渗透压力分布对大坝稳定反映比较敏感,因此在设计时,为解决大坝稳定问题,减少扬压力,在溢流段增设了排水廊道。

1.2 扬压力观测系统布置情况

太平湾电站扬压力观测设置两套系统,即在全坝段灌浆廊道及溢流坝段排水廊道内各设1套观测系统。扬压力观测孔设计成固定观测孔及活动观测孔两类。

固定观测孔沿坝的横剖面(垂直坝轴线)布置在坝段中部,选择有横廊的坝段和地质上有代表性的坝段,如1号、2号、7号、13号、18号、24号、31号、37号、38号、42号及50号坝段。其分布情况见表1。

表1 固定观测孔分布表

位置	坝段	测孔数	说 明
溢流坝段	7号	2	坝基有断层
	13号	2	坝基有缓倾角
	18号	2	坝基靠上游部分岩石较差
	24号	5	坝基下游有较大破碎带
	31号	2	坝基有缓倾角
挡水坝段	1号	2	岸坡坝段
	2号	2	缓倾角及石墨镜面基础
	37号	5	
	38号	6	有大断层通过
	42号	3	有倾向下游的缓倾角断层
	50号	2	

活动观测孔,即排水孔兼扬压力观测孔。凡有排水孔的坝段均设置这类观测孔。每个坝段一般为自左边横缝起第2个排水孔为活动观测孔。2号机组段自左边起每隔1孔设1个观测孔。

全坝共有扬压力观测孔123个,现可进行观测的107个。

表2 太平湾大坝实测扬压力系数 α 统计表(挡水坝段)¹⁾

坝段号	2	3	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$\alpha_{最大}$	0.57	0.51	0.38	0.24	0.29	0.19	0.15	0.38	0.38	0.25	0.19	0.18	0.35	0.36	0.34	0.45	0.37	0.52	0.40	0.56
发生时间(年、月)	92.9	93.7	95.8	95.4	95.8	93.8	93.11	95.8	95.8	95.8	95.8	93.6	93.9	94.12	93.3	93.6	93.7	92.2	93.7	94.8
$\alpha_{最小}$	0.23	0.14	0.12	0	0.03	0.01	-0.04	-0.01	0.03	0.11	0.11	0.11	0.30	0.21	0.28	0.34	0.38	0.32	0.33	0.29
发生时间(年、月)	94.5	94.5	94.11	92.10	92.10	92.9	95.8	92.10	92.12	92.11	92.12	92.11	92.11	95.9	95.10	95.9	95.6	95.3	95.3	95.5

1) 篇幅所限,表中“9×”年即为“199×”年。

表3 太平湾大坝实测扬压力系数 α 统计表(溢流坝段)

坝段号	$\alpha_{最大}$	发生时间(年、月)	$\alpha_{最小}$	发生时间(年、月)	$\alpha_{最大}$	发生时间(年、月)	$\alpha_{最小}$	发生时间(年、月)
1	0.44	1995.8	0.32	1992.11	0.42	1995.8	0.28	1992.9
5	0.47	1993.4	0.29	1992.9	1.08	1995.6	0.41	1992.9
6	0.27	1995.2	0.22	1992.9	1.29	1995.6	0.33	1993.9
7	0.43	1993.3	0.16	1994.2	0.97	1995.6	0.22	1992.3
8	0.55	1993.4	0.23	1994.9	0.93	1994.3	0.31	1992.9
9	0.54	1993.5	0.21	1993.10	0.99	1994.2	0.60	1992.9
10	0.64	1993.4	0.43	1995.10	0.89	1995.1	0.35	1992.9
11	0.52	1993.5	0.38	1993.10	0.86	1994.4	0.45	1993.11
12	0.38	1993.5	0.28	1994.7	0.89	1994.4	0.37	1992.9
13	0.39	1993.6	0.27	1992.10	0.71	1995.5	0.22	1992.9
14	0.48	1993.6	0.23	1994.7	0.69	1992.5	0.29	1992.9
15	0.66	1995.3	0.22	1994.7	0.57	1993.5	0.25	1992.9
16	0.62	1993.3	0.36	1994.11	0.83	1995.3	0.23	1992.9
17	0.36	1995.3	0.28	1992.10	0.73	1994.2	0.26	1992.10
18	1.48	1994.3	0.33	1992.10	1.43	1994.3	0.19	1992.9
19	0.48	1993.2	0.24	1993.6	0.92	1994.3	0.21	1992.9
20	0.62	1993.5	0.13	1995.1	2.36	1994.4	0.73	1992.10
21	0.50	1993.5	0.20	1992.10	1.27	1994.3	0.31	1992.11
22	0.47	1993.5	0.13	1995.10	0.98	1994.2	0.29	1992.9
23	0.49	1993.3	0.31	1992.10	0.84	1995.8	0.08	1992.11
24	0.47	1995.2	0.20	1994.9	0.66	1995.9	0.37	1994.9
25	0.36	1993.6	0.25	1992.9	0.94	1994.2	0.64	1992.11
26	0.46	1993.4	0.20	1992.10	0.93	1994.2	0.19	1993.9
27	0.47	1993.4	0.33	1992.11	0.71	1994.2	0.48	1993.10
28	0.49	1994.3	0.24	1992.10	1.11	1994.2	0.63	1995.7
29	0.26	1993.2	0.14	1994.6	1.23	1993.5	0.71	1993.11
30	0.53	1994.4	0.15	1995.10	2.20	1994.5	1.04	1992.9
31	0.39	1993.5	0.20	1993.7	1.65	1993.5	0.87	1994.10
32	0.42	1995.5	0.24	1992.12	1.16	1995.8	0.32	1994.7

从扬压力实际观测成果统计情况看,溢流坝段均有超过规定值现象,挡水坝段超过规定值的有13个坝段。

2 扬压力超限对坝体稳定影响分析

现以实测扬压力最大的47号挡水坝段和20号溢流坝段为代表坝段进行分析。

1.3 扬压力系数 α 取值规定及测值情况

按现行规定,设计 α 取值如下:

$\alpha=0.3$ (只设一道排水)

$\alpha_1=0.3$ (第1道排水)

$\alpha_2=0.5$ (第2道排水)

实测扬压力系数统计情况见表2、表3。

2.1 采用抗剪公式进行计算

计算时按基本荷载组合进行,即正常蓄水位29.5 m及下游尾水位14.5 m下的静水压力+自重+扬压力+泥沙压力,其中扬压力按原设计时的扬压力系数和实测最大值分别进行。

2.1.1 47号挡水坝段

采用抗剪断公式

$$K' = \frac{f \sum W + C' A}{P}$$

式中 K' 为坝体抗滑稳定安全系数; f 为坝体与基岩接触面摩擦系数;取 $f=0.55$; $\sum W$ 为坝体垂直力合力; C' 为坝体抗剪断指标,取 $C'=2.94 \text{ N/cm}^2$; A 为坝体与基岩接触面面积; P 为坝体水平力合力。

计算结果见表4。

表4 47号坝段基本荷载组合下稳定和应力计算表

计算工况	坝踵应力/MPa	坝趾应力/MPa	K'
α 为设计值0.3时	-0.59	-0.46	4.26
α 取实测最大值0.57时	-0.54	-0.43	4.10

从上述计算结果可知,两种情况下坝与基础接触面垂直正应力均为压应力,抗滑稳定安全系数均大于3.0,满足要求。

2.1.2 20号溢流坝段

计算采用抗剪断公式

$$K_i = \frac{f' \sum W + C' A}{P}$$

式中 K_i 为坝体抗滑稳定安全系数;其余符号意义同前。

取 $f'=0.7$, $C'=2.94 \text{ N/cm}^2$ (考虑温度应力影响,底面积乘0.65)。

计算结果见表5。

表5 20号坝段基本荷载组合下稳定和应力计算表¹⁾

工况	坝踵应力 σ_x /MPa				坝趾应力 σ_x /MPa				K_t
	1号闸墩侧	16	31	46号伸缩缝处	15号闸墩侧	30	45	60号伸缩缝处	
设计情况: $\alpha_1=0.3, \alpha_2=0.5$	-0.248	-0.224	-0.80	-0.152	-0.572	-0.426	-0.256	-0.196	3.37
实测最大值: $\alpha_1=0.62, \alpha_2=2.36$	-0.125	-0.125	-0.063	-0.038	-0.433	-0.295	-0.185	-0.075	3.12

1) 表中第2行的数字(1,16,31,……)系指坝体的不同位置。

抗滑稳定安全系数从上述计算结果知,采用原设计扬压力计算, $K'=3.37$; 采用实测扬压力计算, $K'=3.12$, 均大于3.0, 满足规范要求。

2.2 采用有限元法进行计算

计算采用标准SAP-5结构分析程序,进行三维有限元按块体单元计算。对上下游方向及基础深度方向取两倍坝高范围,上下游边界按垂直向自由(允许沉陷)和水平向约束处理,底部边界按固定端约束处理。整个结构共划分5236个结点,3272个8节

点块体元。根据对称性,取半个坝段进行三维有限元计算。

抗滑稳定安全按纯摩公式计算,大坝与基岩间摩擦系数取 $f=0.55$ 。

2.2.1 47号挡水坝段

计算结果见表6。

2.2.2 20号溢流坝段

计算结果见表7。

表6 47号坝段稳定和应力计算表(有限元法)

计算工况	坝顶变位/mm		坝踵应力/MPa			坝趾应力/MPa			K
	u	v	σ_x	σ_1	σ_2	σ_x	σ	σ_z	
基本荷载组合(设计 $\alpha=0.3$)	2.28	3.28	-0.59	+0.02	-0.13	-0.46	-0.23	-0.82	1.19
正常蓄水位(设计 $\alpha=0.3$) + 7°地震	2.76	3.10	-0.55	+0.06	-0.11	-0.48	-0.23	-0.86	1.12
基本荷载组合(实测 $\alpha=0.57$)	2.36	3.05	-0.54	-0.05	-0.12	-0.43	-0.22	-0.80	1.09
正常蓄水位($\alpha=0.57$) + 7°地震	2.81	3.03	-0.51	-0.09	-0.10	-0.43	-0.23	-0.81	1.03

表7 20号溢流坝段稳定和应力计算表(有限元法)¹⁾

计算工况	σ_x /MPa								σ_1 /MPa			K
	坝踵				坝趾				坝踵		坝趾	
	1	16	31	46	15	30	45	60	1	15		
基本荷载组合(设计扬压力下)	-0.25	-0.22	-0.18	-0.15	-0.57	-0.43	-0.26	-0.20	0.27	0.37	1.23	
设计扬压力下正常蓄水位+7°地震	-0.22	-0.20	-0.15	-0.13	-0.61	-0.45	-0.27	-0.21	0.34	0.37	1.11	
基本荷载组合(实测扬压力下)	-0.13	-0.13	-0.06	-0.04	-0.43	-0.30	-0.14	-0.08	0.10	0.25	0.79	
实测扬压力下正常蓄水位+7°地震	-0.11	-0.09	-0.05	-0.03	-0.36	-0.25	-0.11	-0.06	0.17	0.30	0.72	

2) 表中第3行的数字(1,16,31,……)系指坝体的不同位置。

2.3 坝体稳定分析

2.3.1 挡水坝段

从上述计算结果看,采用现行规范要求的抗剪公式计算,两种情况下,基础接触面垂直正应力均为压应力,抗滑稳定安全系数分别为4.26与4.10,均大于3.0,满足要求;采用有限元法计算,两种情况下,基础面垂直正应力均为压应力,抗滑稳定安全系数基本组合大于1.05,特殊组合大于1.0,有限元法计算结果作为参考,也说明挡水坝段是安全的。

2.3.2 溢流坝段

从上述计算结果看,采用现行规范规定的抗剪断公式计算,并在计算中考虑温度应力对底面积的影响,两种情况下坝基面垂直正应力均为压应力,抗滑稳定安全系数分别为3.37和3.12,均大于3.0,满足要求;采用有限元法计算,在各种计算类型和工

况下,基础接触面垂直正应力均为压应力,最不利的荷载组合为正常蓄水位 + 7°地震,此时按实测扬压力计算最大主拉应力为0.47 MPa,仍在混凝土允许抗拉强度之内。大坝抗滑安全系数,在原设计扬压力下两种荷载组合分别为1.23和1.11,而在实测扬压力下,两种荷载组合分别为0.79和0.72,安全系数偏低,表明对于太平湾大坝扬压力的超限现象(尤其是溢流坝段),应引起足够重视。

3 大坝扬压力超限原因分析

3.1 温度影响

通过对大坝观测资料的详细分析,发现溢流坝段灌浆廊道一部分测孔扬压力与大部分排水廊道测孔扬压力变化基本上是一致的,即在时间上有一定的规律性,一般在每年2月份左右达到最大值。

10月份左右出现最小值,而挡水坝段却无此规律。这表明扬压力可能与坝体结构及温度有关。大部分溢流坝段坝基面扬压力变化在时间上与护坦板间测缝计变化规律基本一致,两者最大与最小发生的时间基本一样,说明两者受同一因素影响。同时,伸缩缝变化与溢流坝段底部混凝土温度变化及扬压力变化基本相对应,如混凝土温度高时伸缩缝变小,扬压系数 α 也减小,混凝土温度低时伸缩缝张大, α 值也增大,说明扬压系数 α 值变化与温度有直接关系。挡水坝的扬压力变化受温度影响不明显可能与坝的结构形状有关,不是单纯的热胀冷缩。最可能的原因是溢流坝段因坝体温度分布不均匀而产生挠曲变形,即低温时上、下游坝基面受拉,扬压力增大,高温时上游坝基面受压,扬压力减小。

3.2 坝基地质条件的影响

由于坝基岩石破碎,断层有上千条,多数呈顺层挤压,平行和斜交坝轴线的断层占出露断层总数的2/5。由于断层内部有不同程度的夹泥,透水性差,从帷幕渗透来的水被阻止向下游排出,妨碍排水作用,而坝基下面有数量不等的断层通入水库,形成漏水通道,而漏过来的水又不能通畅地排向下游,灌浆帷幕及排水孔又不可能将每个断层都控制住,导致部分坝段扬压力增大。

另外,坝基下有平行坝轴线的断层切断排水通道,岩石本身透水性又小,也会产生第1道排水后扬压力升高的现象。

3.3 坝体结构的影响

溢流坝下游设有43 m长的护坦,相当增设了43 m长的渗透途径,对减小坝基渗压不利。

3.4 基础防渗帷幕及固结灌浆的影响

由于坝基岩石破碎,施工时做了固结灌浆,帷幕上游1排,排水廊道6 m以下做了3排固结,上下两排孔深7 m,其他两排为5 m,孔距及排距均为3 m,

上游1排对防渗有利,下游3排造成严重阻水,对减小扬压力非常不利。

另外,个别坝段防渗帷幕效果较差,对扬压力也会产生影响。

3.5 坝基排水的影响

太平湾电站自1985年蓄水至今,已运行了10余年,排水孔一直未进行清扫,实际运行中已发现有排水孔堵塞现象,严重影响了排水效果。这可能是部分坝段扬压力偏大的主要原因。从观测资料分析,坝基扬压力较大的原因,主要是排水效果不好,尤其是溢流坝段的排水廊道更为突出。

4 降低扬压力措施

从以上扬压力超限原因分析中可以看出,降低太平湾大坝扬压力,主要应采取以下措施。

a. 加强排水

首先应对排水孔进行全面清扫,使其达到正常排水效果。如果扫孔后某些坝段扬压力还达不到要求,应在原有排水孔间适当加密钻孔,尤其在断层破碎带部位应设置专门排水孔。对两道排水幕来说,做好第1道排水更重要,使其发挥作用,尽量减小渗透压力和避免漏水绕过第1道排水。

b. 适当进行防渗帷幕灌浆

对扬压力和漏水量较大或漏水量逐渐增加的挡水坝段,逐步进行补充帷幕灌浆。电厂现在正在做这项工作。从已灌浆的坝段看,48号~50号坝段,灌浆前扬压系数最大值均为0.56,1995年灌浆后,降为0.33。但也有几个坝段,灌浆前后扬压力值未发生变化,对这样的坝段应加强排水。

梁希林,男,1963年生,工程师,水工建筑专业,从事大坝安全监测工作。

ANALYSIS OF CAUSES OF OVERUPLIFT PRESSURE AND THE EFFECT ON DAM SAFETY

Liang Xilin (Taipingwan Hydroelectric Power Plant 118216, Dandong, Liaoning)

Abstract The uplift pressure has significant effect on the safety of low concrete gravity dam. Through analysis of the causes of over uplift pressure in Taipingwan Dam, the factors affecting uplift pressure are found out, such as dam temperature, dam foundation geologic conditions, dam construction, anti-seepage curtain and consolidation grouting, dam dewatering, etc. At the end, several methods are presented for lowering uplift pressure.

Keywords uplift pressure over limit dam safety effect

欢迎订阅《大坝观测与土工测试》

欢迎刊登广告

通信地址:南京 323 信箱(210003)

电话:(025)3429900-2051

传真:(025)3421949

网址 <http://www.nari-china.com/aeps.htm>

E-mail: AEPS@nari-china.com