

# 高拱坝坝基排水问题

张文倬

(国家电力公司昆明勘测设计研究院, 昆明, 650051)

**摘要** 从工程事故实例启示和学习卡氏理论研究后,对高拱坝坝基排水目的、布置原则、排水方式及其技术参数拟设等进行浅析。其中技术参数指标,目前难于数理定量,特搜集国内外部分工程数据进行初拟,最后得到初步认识并提出建议,以供讨论。

**关键词** 拱坝 坝基 排水 渗透压力 灌浆

## 1 问题的提出

据工程事故实例,如美国莫伊埃河拱坝,高度为 16.6 m,因左岸山脊薄及岩层向下游倾斜并有软弱夹层,受渗流浸蚀而沿软弱夹层滑动失去支承;美国拉尼湖拱坝,高 20.5 m,因勘探草率,坝肩置于周围为泥土碎屑堆石的、直径约 42 m 的大孤石上,受渗流浸蚀引起大孤石松动而破坏;法国马尔巴塞 (Malpasset) 拱坝,高 66.5 m,坝底厚 6.91 m,坝顶厚 1.5 m,坝顶长 222.66 m,坝基岩性为片麻岩,左岸岩石夹有绢云母页岩。该坝于 1959 年 12 月 2 日溃坝,这是拱坝建筑史上的大事。经法国组织调查委员会等反复调查鉴定,并引起世界各国专家、学者的关注和讨论,最终认为溃坝主要原因是坝荷载平行压缩片麻岩层,受渗流潜蚀与渗透压力作用,致使坝基沿岩层裂隙滑移而造成溃坝,见图 1;秘鲁弗莱瑞双曲拱坝,高 74 m,坝基岩性为安山岩,事故原因是

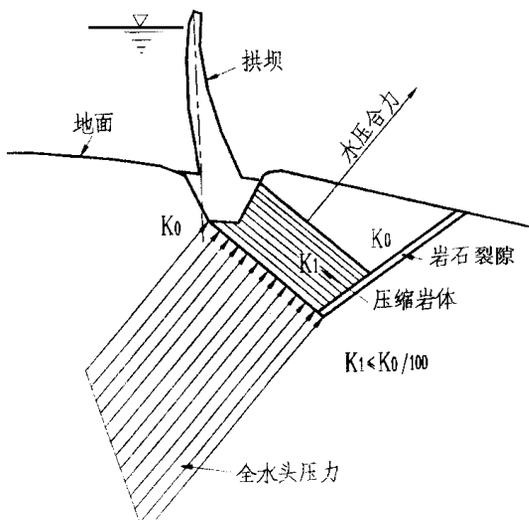


图 1 马尔巴塞拱坝破坏时渗透压力情况示意图  
地震力使拱座下游出现垂直裂缝和位移,见图 2,以及左拱座下游存在岩体崩坍体 3.6 万 m<sup>3</sup>,岩石走向与坝肩裂隙平行,渗透压力造成岩石破坏所致。在

后来的加固项目中增设了岩石排水系统。

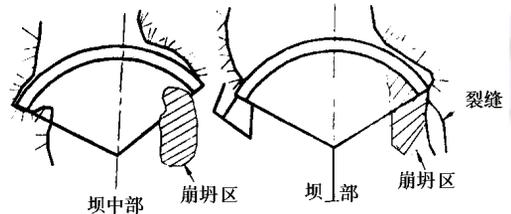


图 2 弗莱瑞双曲拱坝破坏情况平面示意图

我国梅山连拱坝,高 88.24 m,坝基岩性为花岗岩,蓄水 6 年后右岸坝基裂隙大漏水,在未封堵灌浆孔时喷水高达 31 m,射程 11 m,13 号垛位移 43.61 mm,垛拱出现裂缝及 15 号、16 号拱前岩石裂缝宽 5~17 mm。事故分析主要原因为右岸坝基山脊单薄临空、断层裂隙切割、邻垛高差大及防渗排水不足。后期的加固项目包括增设排水系统。

从 50 年代原苏联教科书或美国垦务局设计准则中都认为,一般拱坝特别是薄拱坝基础渗流对坝体和坝基并不是重要的。因而,在拱坝基础中一般都不设置排水系统。但从上述拱坝事故实例启示,拱坝基础受渗流浸蚀与渗透压力作用,对坝基稳定产生了极不利的影 响,甚至酿成事故,从而也引起了工程界对拱坝渗流研究和处理措施的重视,其中排水效应具有重要意义。

## 2 排水效应的理论研究

### 2.1 卡氏理论研究简述

著名学者 A 卡色格兰德 (A Casagrande) 教授于 1961 年以《坝基和坝座的渗流控制》为题作了演讲,现将其分项内容简述如下:

- (1) 首先在前言中依据一座坝的观测资料,利用灌浆与排水的各自效应阐述岩石渗流控制情况;
- (2) 排水分析。依据不同部位设置排水而得到渗透压力理论值;假定岩石各向同性并为半无限体,

在符合达西定律情况下,利用渗流理论,得到排水孔下游无渗流或高于和等于下游尾水位时的理论解;

(3) 不完全截水分析。以截水比例值,利用单排帷幕灌浆与钢板桩存在窄缝情况,表明了防渗截水效应;

(4) 假设例子讨论。假设 8 种不同防渗截流与排水情况的图例,得出坝基和坝座存在渗透压力需要量测预报及设置排水孔孔深的建议;

(5) 田纳西局和垦务局所属坝的渗透压力观测。依据实际渗透压力观测资料表明,帷幕灌浆作用小而排水作用大,并存在排水设置不足和孔深较浅等问题。

(6) 帷幕灌浆及薄拱坝坝座渗流控制。实例表

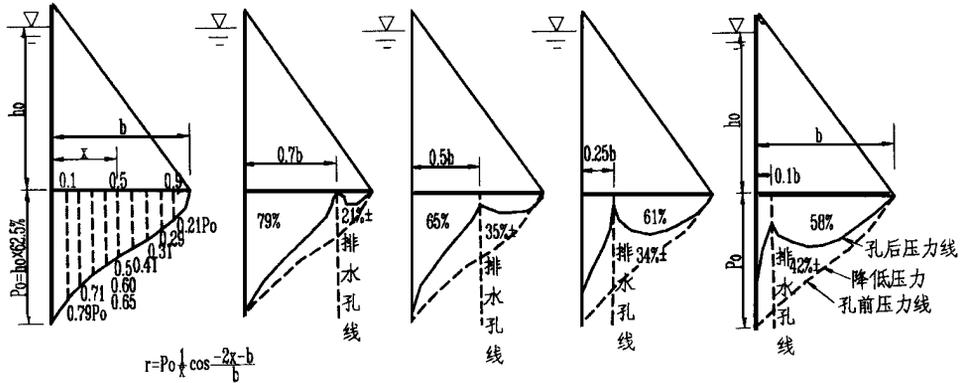


图 3 坝基排水系统降低渗透压力理论情况示意图

## 2.2 排水效应实例

同样,从我国石门拱坝对有无帷幕渗透压力观测结果表明,见图 4,在 1978 年 5 月前有帷幕坝段渗透压力高于设计值,其原因是排水孔孔深不够、孔距大且靠近帷幕,后来将排水孔加深并超过帷幕深度,加密孔距,从而使渗透压力低于设计值。在无帷幕灌浆坝段,低水位时渗透压力较小,高水位时渗透压力稍超过设计值,分析其主要原因是由于坝基前缘开裂造成的,但对坝体稳定影响较小。该拱坝实测也证明了卡氏理论研究所得排水效应的正确性。

从上述理论分析与实例观测表明,解决拱坝基础渗流问题,主要是采取“前堵后排”方式,其中降低渗透压力的有效途径是必须设置合理的排水系统。

## 3 拱坝基础排水原则

### 3.1 设置排水的目的

依据拱坝事故实例和卡氏理论研究成果,笔者认为,采用设置排水系统的方法控制拱坝基础渗流问题的主要目的是:

(1) 降低渗流压力(包括渗透压力和下游尾水浮

明,帷幕灌浆主要目的是降低渗漏,对降低渗透压力作用不大;由于薄拱坝拱座岩石陡峻,难于灌浆与保证岩石不变形,建议使用隧洞或竖井排水;

(7) 结论和建议。最终得到主要结论为:

a. 渗流对坝基和坝座的影响,采用综合排水能有效控制,对重力坝和重力拱坝可用浅孔排水,当遇不良地质情况时,加深排水孔能有效控制渗透压力;

b. 降低坝基渗透压力的主要措施是设置排水,见图 3,帷幕灌浆的主要作用是减少渗流量,对降低渗透压力效果不大;

c. 坝座处陡峻岩石处理的问题主要是爆破和灌浆作业难于保证岩石不变形,建议采用隧洞或竖井排水来解决坝座渗流问题。

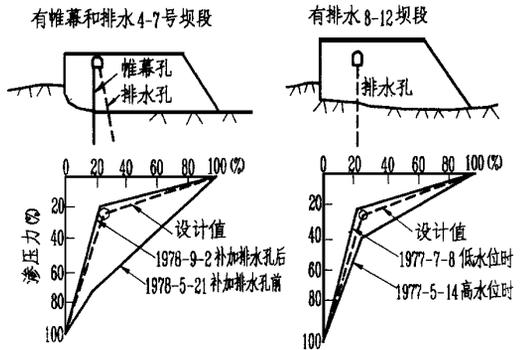


图 4 石门双曲拱坝基础渗透压力实测示意图

托力);

(2) 改善渗流对岩石性质的影响;

(3) 提高坝基岩石渗透稳定性。

### 3.2 排水布置原则

依据工程实践经验,在一般情况下,排水系统的布置应遵循如下设计原则:

(1) 符合前堵(防渗体)与后排(排水系统)的基本原理;

(2) 防渗体(包括帷幕灌浆、截水墙、齿墙、铺盖及其它)与排水系统(包括排水井、排水孔、排水洞及其它)相匹配;

(3) 排水系统能有效控制拱坝基础的渗流压力;

(4) 排水系统必须满足防渗体与基础岩石的允许渗流梯度;

(5) 排水系统尽可能地达到技术先进、经济合理及施工简便的原则。

### 3.3 排水方式

由于拱坝、尤其是薄拱坝结构特性与坝基和拱座岩石性质的复杂性,考虑到坝体与基础接触部位情况和受力状态,目前拱坝基础采用的排水方式主要分为两种类别:

(1) 河床坝段基础排水方式。

一般在坝体底部设置一道或多道排水廊道与灌浆、观测、交通等廊道相结合,廊道断面尺寸一般为  $3.0\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 。在廊道中钻设排水孔,由排水沟或排水井集中渗流后,采用抽水或自流排出坝体下游的排水方式。

(2) 两岸拱座基础排水方式。

一般在拱坝两岸拱座岩体中,设置一层或多层排水隧洞与灌浆、观测、交通等隧洞相结合,隧洞内径  $3.0 \sim 4.0\text{ m}$ ,在隧洞周边钻设孔距为  $2.5 \sim 3.5\text{ m}$  的排水孔,在洞底两侧或一侧设排水沟自流排出坝体下游的排水方式。

## 4 拱坝坝基排水参数选择

### 4.1 某些国家取得的经验

由于拱坝基岩性质极其复杂,特别是拱坝型式和结构特征的差异,迄今为止,对拱坝基础排水技术参数,即孔深、孔距、孔径、排数、排距……等,尚未制定统一量计算准则。为此,现将一些国家规定或工程经验所建议的拟设范围搜集列出,见表 1,以供初步拟设时参考。

表 1 一些国家排水孔技术参数表

编号	规范或经验	国家	孔深 / m	孔距 / m	孔径 / mm	排数 / 个	排距 / m	排水孔与防渗帷幕间距 / m
1	混凝土拱坝设计规范 SD145-85	中国	河岸 $(0.4 \sim 0.75) d$ 河床 $< 0.6 d$ , 大于固结灌浆的深度	主 3 辅 3-6	150	主 1 辅 2		不小于离防渗帷幕孔中心距 1~2 倍, 不得小于 2~4 m。
2	水工设计手册, 1987 年 12 月	中国	$(0.15 \sim 0.25) h$ $(0.4 \sim 0.6) d$	2~3	$> 110$	主 1 辅 1~3 岸设排水洞		不小于 2 m。
3	水利水电工程勘测设计专业综述( ), 1993 年 7 月	中国	$> (0.4 \sim 0.7) d$	3	100~150			由允许渗流梯度控制。
4	混凝土和钢筋混凝土设计规范 -54-77	前苏联	$(0.2 \sim 0.35) h$ $(0.5 \sim 0.75) d$	2~3				不得小于防渗帷幕孔距 2 倍, 并不得小于 4 m。
5	日本大坝委员会著. 坝工设计规范, 1978 年 7 月	日本	视岩基情况拟设				5~10	不靠近防渗帷幕, 避免渗流梯度过大。
6	美国垦务局著, 拱坝设计, 1976 年, 中译本	美国	$(0.2 \sim 0.4) h$ $(0.35 \sim 0.75) d$		75	1 排或多排		
7	美国陆军工程师团设计规范	美国	$(0.3 \sim 0.5) d$	1.5~4.5	75	1 排或多排		
8	A·R·高尔泽等著. 坝工手册, 1990 年中译本	美国	$(0.2 \sim 0.4) h$ $(0.35 \sim 0.7) d$	3	100	1 排或多排		

注:表中  $h$ ——水头或坝高(m),  $d$ ——幕深(m)。

### 4.2 排水孔与帷幕灌浆的关系

从上述粗略分析与一些国家经验(见表 1)说明,国内外对拱坝基础排水技术参数拟设范围变化较大,拟设时难度较大。众所周知,防渗帷幕与排水系统是处理拱坝基础的一对伙伴,缺一不可,针对排水技术参数拟设经验范围较大的特点,特将部分国内外拱坝工程设计施工的帷幕灌浆与排水系统技术参数实例搜集列出,见表 2,一方面可以反映二者之间的关系,同时,亦可供初步拟设排水系统技术参数作参考。

总之,由于排水参数涉及因素多,尤其是排水孔孔深又与岩石情况有关,而岩性又极其复杂,故只能依据部分国家和工程经验,列出排水孔深度经验估算式为:

(1) 排水孔深度  $S$  与帷幕深度  $d$  的关系式:

$$S = Ad \quad (1)$$

式中 系数  $A = 0.17 \sim 0.75$ , 常取  $A = 0.5$ 。

(2) 排水孔深度  $S$  与坝高  $h$  的关系式:

$$S = Bd \quad (2)$$

式中 系数  $B = 0.11 \sim 0.5$ , 常取  $B = 0.25$ 。

表 2 国内外一些拱坝基础排水系统主要参数表

编号	工程名称	国家	坝型	坝高 /m	坝基岩石	帷幕灌浆			排水系统				排水孔与帷幕间距 /m	排水孔深 /%	排水孔深 /%
						排数 /排	孔深 /m	孔距 /m	排数 /排	孔深 /m	孔距 /m	孔径 /mm			
1	小湾	中国	双曲拱坝	292	角闪斜长片麻岩、黑云母花岗岩片麻岩	2	主付 120 72	3	2	主付 60 30	3	150	12	21	50
2	拉瓦西	中国	双曲拱坝	245	花岗岩	2	主付 130 555	2	2	50	3	130~150	10~13	21	38
3	二滩	中国	双曲拱坝	240	正长岩、玄武岩	1	105	2	2	60	3~5	100~140	10	25	57
4	龙羊峡	中国	重力拱坝	178	花岗岩长岩	3	80	2.5	5	50	3	150	13.75 ~14.75	28	63
5	乌江渡	中国	拱形重力坝	165	石灰岩	3	80 局部 260	2	4	15~40	2~3			24	50
6	东江	中国	双曲拱坝	157	花岗岩	2	50~75	1.5	1	30	3			19	40~60
7	白山	中国	重力拱坝	149.5	混合岩、片麻岩	2	55	2	2	35	3	108~127		23	64
8	隔河岩	中国	重力拱坝	120	灰岩	3	120~130	2~2.5	4	40~65	3~4	75~91		54	30~50
9	紧水滩	中国	双曲拱坝	102	花岗岩	2	30~47	2	1	20~28	3	100	2	27	56~60
10	石门	中国	双曲拱坝	88	石英岩、云母石英片岩、云母石英钙质片岩	1	17	2~4	1	10	2~4	150	3	11	59
11	响洪甸	中国	重力拱坝	87.5	凝灰岩、角砾岩	1	50	3	1	35	3.5		8	40	70
12	陈村	中国	重力拱坝	76.3	石英砂岩和页岩互层	3	60	1.5	2	25	3			33	42
13	英古里	前苏联	双曲拱坝	272	石灰岩、白云质灰岩、白云岩	2	120	3		70				26	58
14	萨阳舒申斯克	前苏联	重力拱坝	242	变质结晶片岩	2	100	2~3		51~56				23	51~56
15	鲍尔德	美国	重力拱坝	221	安山岩、角砾岩	2	110~130	1.5	1	55~65	3	75	2	29	50
16	格林峡	美国	重力拱坝	216	砂岩	2	30~76	3	2	26	3	130	2	12	40
17	巴列维	伊朗	双曲拱坝	203	钙质砾岩	2	68	1.8~4		45				22	66
18	罗斯兰	法国	双曲拱坝	150	结晶板岩		130			35		100		23	27
19	摩罗波恩特	美国	双曲拱坝	143	云母石英岩、片麻岩		60			12~18	3			13	20~30
20	圣十字	法国	双曲拱坝	95	石灰岩		42			29			10	31	69

隙中的渗流压力考虑进去。即

$$c + (-U) \text{tg} \quad (3)$$

## 5 初步认识和讨论

据上述浅析和实例工程数据搜集后,归纳起来可以得到一些初步认识并讨论如下。

(1) 拱坝基础渗流问题的解决,设置排水系统是很必要的。因为它不仅比防渗体减压效果可靠,而且对改善岩石性质(强度、摩擦角)也有明显效应,尤其是对拱座支承岩体与透水性弱而有裂隙存在的岩体,更需要设置排水系统,从而提高坝基和拱座岩体的抗滑稳定性。

(2) 据工程实例统计,在排水系统主要技术参数中,排水孔孔深范围为坝高的 11%~45%,平均值为 25%;帷幕灌浆深度的 17%~70%,平均值为 50%。孔距范围为 2~7 m,平均值为 3.4 m。孔径范围为 75~150 mm,常采用大于 100 mm 的孔径。排数范围为 1~5 排,常取 2~3 排。排水孔与防渗帷幕间距范围为 2~14.75 m,常取用不小于 2 m。两岸拱座岩体排水洞范围为 1~4 层,一般取 2 层。

(3) 在拱坝坝肩部位所设置的排水系统应布置在岩体受压区域内。因为,在岩体受拉区内,岩体裂隙张开,易形成渗流通道而加大渗透压力。为此,在拱坝分析中,需要特别关注两岸拱座岩体裂隙中的渗流问题。当估算拱座岩体剪切时,必须将岩石裂

式中 ——岩石抗剪应力;

$c$  ——岩石凝聚力;

——坝基应力;

$U$  ——岩石裂隙渗流压力;

——岩石内摩擦角。

(4) 帷幕灌浆孔的布置原则上以多穿岩石裂隙、受力条件有利及方便施工来确定,故在设计中一般多采用倾斜上游或垂直布孔。如美国鲍尔德拱坝倾斜上游布孔的最大角度达 75°;又如我国龙羊峡重力拱坝右岸一段帷幕灌浆孔的布设采用 L·穆勒(L·Mullee)建议,倾向上游。

对于排水孔孔向的设计应以在满足防渗体和岩石允许渗流梯度情况下,贯穿岩石裂隙渗流压水带及方便施工来控制,一般排水孔孔向多布置为倾向下游或垂直布孔。

(5) 为了防止所设排水孔失效,按日本国工程试验资料,建议在排水孔或排水井内填充透水性大于岩层 100 倍的碎石(2~15 mm)滤水料,可防止细颗粒淤塞而导致的排水孔或排水井失效。有的工程对排水孔采用棕树皮包护花管,在管周围填滤水料也较有效。如我国陈村拱坝基础处理时,在所埋排水花管周围填滤水料,获得有效排水。

(6) 在拱坝坝体与基础连接中,一种为直接相连;另一种为增设垫座。后者虽可降低坝踵拉应力,但垫座却增加了一条施工缝弱面,加大了施工的复

(下转第 58 页)

不改变原机组各种定位、相关几何尺寸前提下进行改进,设计了如图2所示方案,改进的设计措施有:

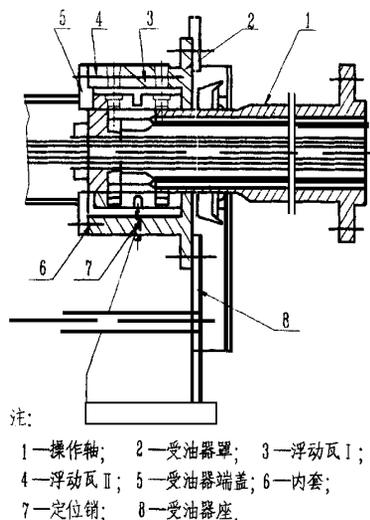


图2 改进受油器设计方案图

(a) 增加项6内套,改进浮动瓦进排油口密封,使浮动瓦(项3、项4)没有约束,能自由浮动,成为名副其实浮动瓦。

(b) 减轻浮动瓦重量,浮动瓦从原来的100多kg降为每块瓦重仅27kg,给瓦的浮动创造自身有利条件。

(c) 将一个浮动瓦长度方向分为二块浮动瓦,在同样操作轴摆动情况下,浮动瓦的随动性将大大增加,改善浮动瓦的运行环境。

## 5 安装测量

1996年11月下旬,机组受油器再次烧损,机组无法运行。电厂决定安装东方电机厂设计制造的受油器,并对受油器进行了预装,重点测量了浮动瓦端面间隙及浮动瓦与操作轴的配合间隙,最终安装测

量值如下,见表2。

表2 安装测量值表

测量项目	浮动瓦端面	浮动瓦与轴颈	受油器座绝缘
	间隙/mm	间隙/mm	电阻/M
测量值	0.33	0.12	20

## 6 运行情况

受油器装复后,结合机组修复进行了盘车,起先盘车受油器浮动瓦与轴稍紧,后因修整调圆转轮进行了频繁盘车,受油器浮动瓦与轴转动轴承逐渐灵活,稳定运行后,漏油泵的启动间隙时间为1h 8min,优于机组设计要求。从1997年3月21日正式投入运行至今,再没有出现受油器烧损的情况,得到了电厂的好评。

## 7 结束语

改革开放以来,我国水电工程引进机组越来越多,在消化吸收国外技术的基础上,结合我国实际情况改进运行中出现的问题,一方面可以替代进口,提高我国水电建设的技术水平,另一方面可以缩短问题处理时间,为电站创造更好的经济效益。这次改造,基于困扰马回电厂的问题,吸取南津渡受油器烧损及马迹塘运行的经验,做到了一次设计制造运行成功。

在受油器改造设计过程中,马回电力公司、马迹塘水电厂的一些同志提出了很多宝贵意见,为东方电机厂设计制造的受油器等作了很多细致的工作,在此也一并表示衷心感谢!

### 作者简介

曹大伟 男 东方电机股份有限公司 高级工程师  
尹国军 男 东方电机股份有限公司科长 高级工程师  
周继开 男 东方电机股份有限公司 高级工程师

(收稿日期:1997-11-05)

(上接第42页)

杂性,对坝体稳定不利。对前者,若将拱坝坝体底部断面适当加厚,既可降低或避免坝踵拉应力,又能对防渗体和排水系统的设置创造有利条件。例如,奥地利柯恩布赖茵双曲拱坝,高200m,基岩为完整的片麻岩,水库蓄水后,在荷载作用下,该坝除因高宽比失当,产生剪切破坏等原因外,在拱坝上游区域实测渗透压力很大,曾使岩石抬高28mm,也是危及坝体安全的因素之一,在后来的重新加固项目中,特将坝体上、下游底部断面扩大作为加固措施之一。为此建议,当坝体与基础直接相连时,适当加厚坝体底部断面是合理的。

## 参 考 文 献

- 1 刘贻约、汝效禹编译. 水工建筑物的破坏及其原因分析. 北京:中国工业出版社,1965年7月
- 2 日本大坝委员会编、钱志春译. 坝工设计规范. 北京:水利出版社,1981年7月
- 3 美国垦务局著、拱坝翻译组译. 拱坝设计. 北京:水利电力出版社,1984年6月
- 4 水利电力部颁标准. 混凝土拱坝设计规范(SD145-85). 北京:水利电力出版社,1985年3月
- 5 水利水电规划设计总院编. 水利水电勘测设计专业综述( ). 成都:电子科技大学出版社. 1993年7月
- 6 [美]A. Casagrande. Control of seepage through Foundation and Abutments of Dam, Geotechnique, vol. 11, No. 3, 1961

### 作者简介

张文倬 男 电力工业部昆明勘测设计研究院 高级工程师

(收稿日期:1997-11-23)

## **Design of Impervious and Drainage Systems for Underground Powerhouse at Ertan Hydropower Station**

Fan Xiangrong

(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Research Institute ,State Power Company ,Chengdu ,610072)

**Abstract** Design of impervious and drainage systems for underground powerhouse at Ertan hydropower station is presented. The underground powerhouse complex is a gigantic project ,powerhouse is immediately adjacent to reservoir and seepage flow conditions are complex. Therefore , it is essential to take seepage control measures for cavern rock stability and safe operation of the power station.

**Key words** Ertan hydropower station ,underground powerhouse ,seepage control and drainage ,curtain

## **Deformation and Supporting of Surrounding Rock in Caverns of Underground Powerhouse complex at Ertan Hydropower Station**

Li Zhenggang

(Ertan Engineering Corporation ,Panzihua ,Sichuan ,617000)

**Abstract** Caverns in underground powerhouse complex at Ertan is of a massive scale with the longest span and length in the world. Due to high in situ stress in the powerhouse area ,important deformation of local surrounding rock ,rock burst ,shotcrete spalling occur during excavation. Systematic rock bolt support and shotcrete were carried out for the surrounding rock and reinforcement was done locally for rock stability. Supporting force for surrounding rock is determined by Q value of rock quality. It is an example for design of supporting strength.

**Key words** Ertan hydropower station ,underground powerhouse ,high in situ stress ,deformation of surrounding rock ,rock bolt support and shotcrete ,support strength

## **Tension Test and Result Analysis on 3000 kN Anchorage Cable on Upstream Slope of Stilling Basin at Xiaolangdi Waterconservancy Project**

Li Xiangdong Ma Bangkai

(The 7<sup>th</sup> Construction Bureau of Water Conservancy and Hydropower Engineering of China ,Pixian ,Sichuan ,611730)

**Abstract** Installation of anchorage cable on upstream slope of stilling basin at Xiaolangdi project was carried out under difficult geological conditions. Insitu tension test was conducted first to ensure anchorage meeting design requirements. From test ,the relationship of cable free end , anchor pier ,foundation deformation and cable creep with load is revealed and rational design force for anchorage cable is proved.

**Key words** rock anchor with prestress without bond ,tension test ,creep degree

## **Problem of Drainage in Dam Foundation of High Arch Dam**

Zhang Wenzhuo

(Kunming Hydroelectric Investigation and Design Research Institute ,State Power Company ,Kunming ,650051)

**Abstract** By analysis on example of project defeats and on the Casagrande Theory ,a elementary introduction on purpose ,arrangement ,mode and parameters for drainage in dam foundation of high arch dam is presented. The drainage parameters are so difficult to be determined that data from some projects in China and abroad are analyzed. Preliminary knowledge is gained finally and suggestions are proposed.

**Key words** arch dam ,dam foundation ,drainage ,seepage pressure ,grout

## **Long - term Study on Autogenous Deformation of Concrete Added with MgO**

Li Chengmu

(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Research Institute ,State Power Company ,Chengdu ,610072)

**Abstract** Test and experiment for autogenous deformation of concrete added with lightly burnt MgO and inside MgO observed for 10 years and 20 years are provided. Test of mechanical and deformation properties during 12 years proves that long - term mechanical property for concrete with MgO is stable and not so much effected by slight expansion.

**Key words** added MgO ,inside MgO ,autogenous deformation ,concrete with MgO ,deformation by expansion