

# 铜街子水电站左岸堆石坝平面有限元分析

黄其愚 刘吉祥 殷宗泽

(水电部成都勘测设计院) (河海大学)

## 提 要

铜街子水电站坝址左岸岸坡下埋藏一深达77米,宽30~40米的故河槽(以下简称左深槽),为适应该处复杂的地形、地质条件,其接头型式经最后审定采用沥青混凝土斜墙堆石坝。该方案利用导流明渠左挡墙为斜墙支承,深槽坝段以两道混凝土防渗墙支撑挡墙,使临时工程与永久工程、防渗与承重相结合。本文着重介绍了跨越深槽段坝体及挡墙下承重力防渗墙的平面有限元分析结果。

## 一、左深槽地质特征与堆石坝布置

### (一) 左深槽分布与地质特性

左深槽在坝轴线处呈南北向展布(图1),槽宽30~40米,槽深最大为77米,槽底高程363米,向下游逐渐抬升。

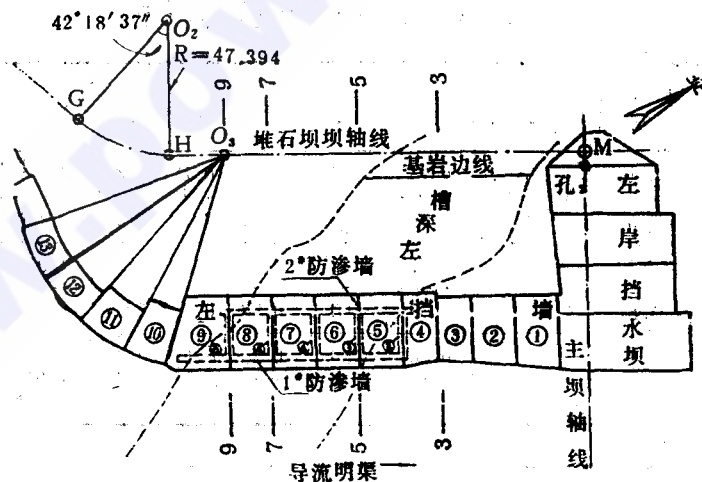


图1 左深槽堆石坝1# 2# 防渗墙布置

深槽两壁为玄武岩,壁面陡峭,右壁近倒悬状(图2)。深槽中为上更新世晚期和全新世堆积物覆盖,自下而上大致分为四层:(1)漂卵石夹砂与漂卵石夹块碎石,厚20~25米,局部有架空现象;(2)卵碎石夹砂或砂壤土,厚18~30米;(3)黄、灰色粉细砂层,厚约20米,间夹2~12米厚的卵砾石夹砂,分布高程多在400~425米之间;(4)漂卵石夹砂,厚5~15米,设计要求其表层碎石土大部分予以清除。除第(3)层的砂层夹层和第(1)层埋藏过深取样困难,采用地质类比的数据外,其它均开挖竖

并取样进行三轴试验。各层物理性质与非线性参数如表1。

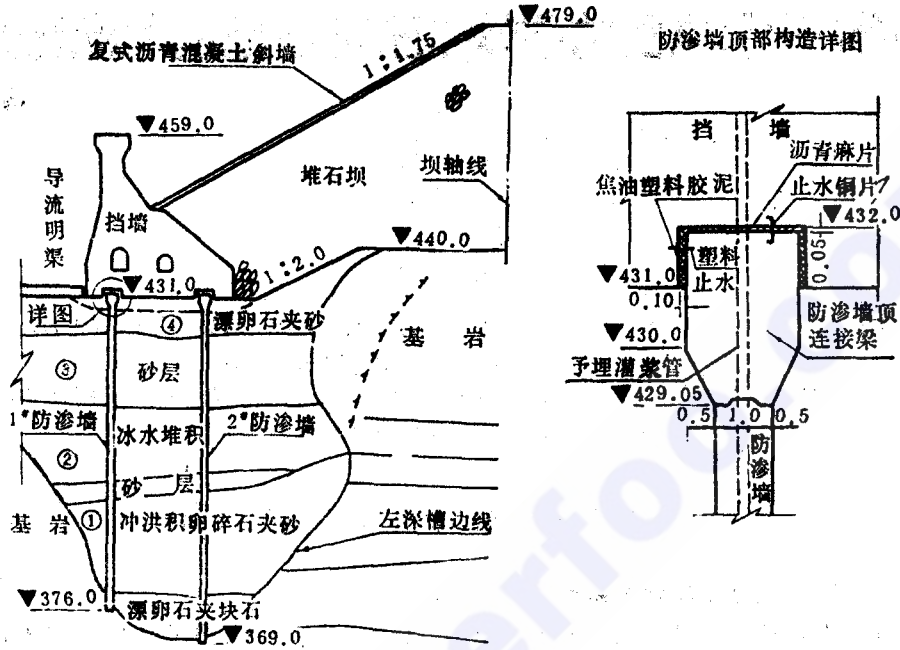


图2 堆石坝剖面结构布置图

表1 铜街子左深槽堆石坝非线性参数

1. 非线性参数

分 类	干容重 (吨/米 <sup>3</sup> )	孔 隙 比	R <sub>r</sub>	K	n	F	G	D	c	φ	备 注
alQ <sub>4</sub>	2.13	0.47	0.952	560	1.00	0.185	0.415	2.0	0	44.0°	漂卵石夹砂
fglQ <sub>3</sub> <sup>2-2</sup>	1.6	0.72	0.82	128	0.72	0.16	0.32	2.1	0	35.0°	黄色重砂壤土
al+plQ <sub>3</sub> <sup>2-1</sup>	2.12		0.963	333	0.73	0.13	0.43	1.0	0	38.2°	卵石夹砂
内过渡层	1.67		0.89	400	0.98	0.16	0.39	3.3	0	38.5°	
外过渡层	1.95		0.80	560	0.26	0.17	0.41	2.68	0	38.2°	
坝壳料											alQ <sub>4</sub> 代用

2. 接触面参数

部 位	容 重 吨/米 <sup>3</sup>	R <sub>r</sub>	K	n	F	G	D	c	δ	备 注
全新世冲积层~混凝土	2.10	0.72	4000	0.55				0	26.0°	
内过渡层~混凝土	1.6/2.4	0.85	6200	0.95				0	28.0°	
内过渡层~外过渡层	1.62/1.84	0.79	4300	0.80				0	24.0°	
外过渡层~坝壳	1.86/2.21	0.69	5800	0.50				0	34.0°	
混凝土~泥皮	2.4/0.98	0.62	1400	0.66				0	11.3°	

## (二) 斜墙堆石坝布置

沥青斜墙堆石坝全长 434.4 米, 坝高 48 米, 为该工程枢纽建筑物组成之一。

堆石坝上游面与施工导流明渠相交, 利用导流明渠左挡墙支撑堆石坝的沥青混凝土斜墙, 使永久建筑物与临时建筑物相结合。在建基面下 3~7 米处为厚 20 米的粉细砂层, 其承载力仅 0.2MPa, 地震时亦有液化的可能。鉴于深槽覆盖层的结构和力学特征, 故在挡墙基础下设置两道承重式混凝土防渗墙 (图 1, 2), 并在其间设五道横隔墙, 以构成基础下的防参与承重系统。同时对坝基下的砂层采用振冲加固, 以防液化并提高其承载力。

## 二、计算方法

为论证防渗墙承重结构的合理性和堆石坝跨深厚覆盖层的应力应变情况, 其基本假定与计算模型作如下处理。

(一) 坝体作为二维问题, 按平面应变计算。这在铜街子左深槽的特殊情况下, 是可以达到设计要求的。

(二) 按深槽覆盖层中土料的三轴试验结果, 其轴向应力及轴向应变之间的关系均接近双曲线, 故在计算中采用邓肯等人提出的双曲线应力~应变关系模型。其切线弹性模量、泊桑比分别为:

$$E_t = (1 - R_t S)^2 E_i$$

$$\gamma_t = \frac{G - F \log(\sigma_3 / P_a)}{\left[ 1 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) D}{(1 - R_t S) E_i} \right]^2}$$

其中, 初始切线模量与应力水平分别为:

$$E_i = K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

$$S = \frac{(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}$$

式中  $\phi$ 、 $c$ 、 $R_t$ 、 $K$ 、 $n$ 、 $G$ 、 $F$ 、 $D$  八个参数由三轴试验确定。

(三) 计算网格的划分, 考虑到四边形等参单元有较高的应力精度, 且能适应较复杂边界, 因此采用了四边形四结点等参单元。在边角处设过渡单元, 将四结点中的任两结点重合成三角形, 其计算仍按等参单元进行。

混凝土防渗墙属分析的重点部位, 故网格较密, 在一米厚度内设置了三排单元。

(四) 为了使地基也能承担部分荷载, 在混凝土防渗墙顶部设置沥青软垫层 (见图 2 中详图), 当上部荷载作用下, 防渗墙会进一步嵌入上部挡墙的接头槽中; 并且防渗墙施工过程中其底部尚有沉渣, 也会产生下陷。防渗墙与周围土体间附着薄层泥皮, 将有一定的相对位移, 为模拟其滑移情况, 在防渗墙与周围土体间设置一维接触面单元, 其剪切变形特性仍用双曲线模式来反映。切线劲度系数为:

$$K_{st} = \left( 1 - \frac{R_i' \tau}{c + \sigma_n \operatorname{tg} \delta} \right)^2 K' P_n \left( \frac{\sigma_n}{P_n} \right)^{n'}$$

式中  $c$ 、 $\delta$ 、 $K'$ 、 $R_i'$  和  $n'$  为接触面试验参数(表 1); 法向劲度系数  $K_n = 10^7$  吨/米<sup>3</sup>。

(五) 防渗墙顶部的沥青软垫层受荷后的压缩量, 参照砂层的承载能力估计为 2~3 厘米。计算时若在软接头部分设置小尺寸单元, 势必产生向周围大尺寸单元过渡的困难, 且过渡单元形态不规则又会引起应力失真。为了模拟软接头会出现较大的压缩性, 并使网格划分比较规律, 以保证周围单元的应力接近实际, 故将防渗墙顶部与其上的软接头结合成为一个单元, 并视其为混合材料, 再通过试算按规定压缩量来调整弹模的取值。防渗墙两侧接触单元的法向劲度适当降低, 允许部分楔入, 以模拟防渗墙的水平向位移。

防渗墙顶部软接头的计算处理, 从局部看较为粗糙。由于目前对确定承重式防渗墙顶部软接头的材料参数, 仅用试验确定尚有困难, 因此, 对选用的软垫层材料结合其计算的加载情况进行试验, 并调整其材料配方来满足设计的压缩量, 从整体上讲符合计算的应力状态, 防渗墙底沉渣层单元, 亦按类似方法处理。

(六) 非线性应力的调整, 按左挡墙先满足施工导流要求, 后作为斜墙支承成为堆石坝的组成部分, 其荷载反复变化。在模拟施工过程, 采用逐级(分七级)加荷增量法计算中, 某些单元内应力可能处于破坏状态。第一种情况: 单元出现的拉应力超过抗拉强度而导致拉裂; 第二种情况: 大小主应力差太大, 构成的摩尔圆超出强度包络线而出现剪坏。以上两种情况都进行了应力调整。

(七) 非线性应力应变分析时, 将非线性问题转化成一系列线性问题。计算采用切线模量法, 即以分段切线逼近非线性应力应变曲线。每个增量段的弹性模量取为常数。为提高计算精度, 逐级加荷中的各级荷载又分为两级增量, 按弹性力学有限元法用直接解进行计算。

(八) 由于基岩与覆盖层两者弹模相差较大, 计算分两种情况: 当挡墙位于深槽覆盖层上, 假定基岩无变位; 若挡墙处于基岩上, 假定基岩的有限深度内有变位。

(九) 本文计算采用河海大学农水系土力学教研室编制的 FED 程序。

### 三、计算剖面的选取

防渗墙横跨深槽长度为 77.5 米, 导流明渠左挡墙分五段, 每段 15 米。平面计算时, 选取四个有代表性的剖面(表 2)。

表 2 计算剖面特征表

剖面号	桩号	间距 (米)	导墙支承情况		深槽所处的部分
			上游侧	下游侧	
3	0-49	30	基岩	基岩	堆石坝轴线与导墙之间
5	0-79		基岩	2#防渗墙	坝轴线上游 10 米至导墙上游 5 米之间
7	0-101.5	22.5	1#防渗墙	2#防渗墙	导墙位于深槽中部
9	0-124		1#防渗墙	基岩	深槽在导墙中部以上, 坝体在基岩上

### 四、成果分析

#### 一、防渗墙最大主应力

防渗墙设计成承重式结构，其墙体应力状态尤为重要，决定此方案的可行性。经计算其最大主应力如表 3、图 3

表3 防渗墙最大应力情况表

剖面号	计算情况	墙号	最大应力 (MPa)				墙顶高程 (米)	最大主应力发生部位(高程)
			$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_1$	$\sigma_3$		
5	竣工	2	0.595	10.68	10.712	0.555	431.0	403.5~406.5 砂层
	蓄水	2	0.787	13.24	13.263	0.76	431.0	403.5~406.5 砂层
7	竣工	1	0.736	14.419	14.461	0.515	431.0	419.5~425.0 砂层
		2	0.528	14.062	14.063	0.528	431.0	408.5~413.5 卵石夹沙
	蓄水	1	0.625	15.225	15.275	0.585	431.0	419.5~425.0 砂层
		2	0.795	14.031	14.033	0.794	431.0	408.5~431.5 卵石夹沙
9	竣工	1	0.188	3.057	3.166	-0.139	431.0	421.0~425.0 沙层
	蓄水	1	0.78	3.037	3.156	-0.90	431.0	421.0~425.0 沙层

注：应力符号，压为正，拉为负。

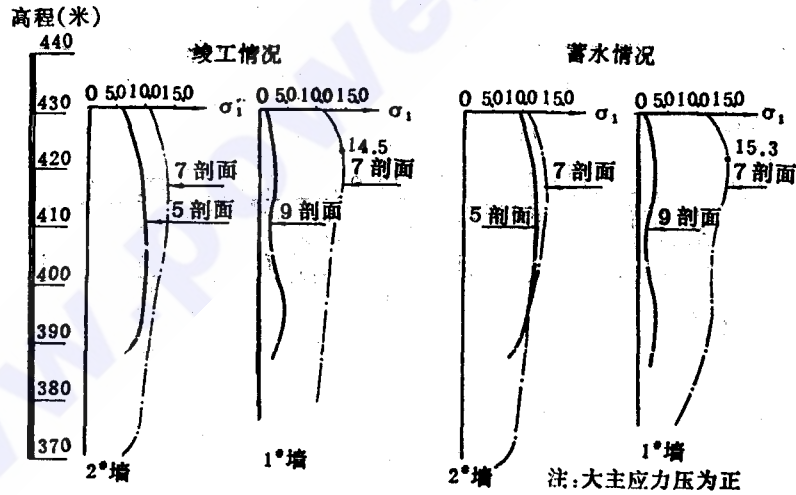


图3 防渗墙大主应力分布(单位: MPa)

从表 3、图 3 可以看出：(1) 墙体最大应力出现在深槽的中上部，一般处在上砂层及其上下层面附近，与计算持力层深度(上砂层底部)接近。当 1\*、2\* (图 2 中 7 剖面) 防渗墙同时承重时，最大压应力值为 15.3MPa，小于允许应力\*。若一道防渗墙和一部分基岩共同承重时，其压应力略小。说明在覆盖层上建坝，防渗墙可以充分发挥承重作用。(2) 1\* 防渗墙在 9 剖面的上砂层顶部附近，局部出现拉应力(0.9 MPa)，其原因主要是挡墙上游侧由 1\* 防渗墙支撑，下游侧位于基岩上，使挡墙向上游变位所造成、如考虑横隔墙的作用，主墙的拉应力将会减少。

\* 见《四川水力发电》1986.3. p22-31。

据此,若在深100米以内的覆盖层上建坝,防渗墙施工工艺能达到设计要求的条件下,作为堆石坝(心墙或斜墙)的承重式防渗墙,并在其持力层深度以上部位加配钢筋,可解决局部范围的拉应力问题。

## (二) 防渗墙的位置

防渗墙的位移与坝基在深槽段所处部位和挡墙的支撑条件有密切关系。其最大位移值示于表4、图4。

表4 防渗墙最大位移情况

剖面号	计算情况	墙号	最大位移(厘米)				墙顶高程 (米)	最大位移发生部位(高程)
			上游面		下游面			
			水平 $u_x$	垂直 $u_y$	水平 $u_x$	垂直 $u_y$		
5	竣工	2	0.62	-4.28	0.61	-4.36	431.0	$u_x$ : 砂层顶部 423.5 $u_y$ : 导墙底与防渗墙顶接触面上 431.0高程
	蓄水	2	0.81	-5.35	-0.82	-5.29	431.0	
7	竣工	1	9.57	-8.08	9.56	-7.28	431.0	
		2	9.62	-7.51	9.61	-7.07	431.0	
	蓄水	1	7.51	-8.17	7.50	-7.31	431.0	
		2	7.59	-7.43	7.59	-6.97	431.0	
9	竣工	1	0.50	-1.03	-0.50	-0.92	431.0	$u_x$ : 最大位于 425.0 砂层 $u_y$ : 最大位于 431.0
	蓄水	1	0.85	-0.86	-0.85	-0.74	431.0	

注: 水平位移 $u_x$ , 向上游为正, 向下游为负; 垂直位移 $u_y$ , 向上为正, 向下为负。

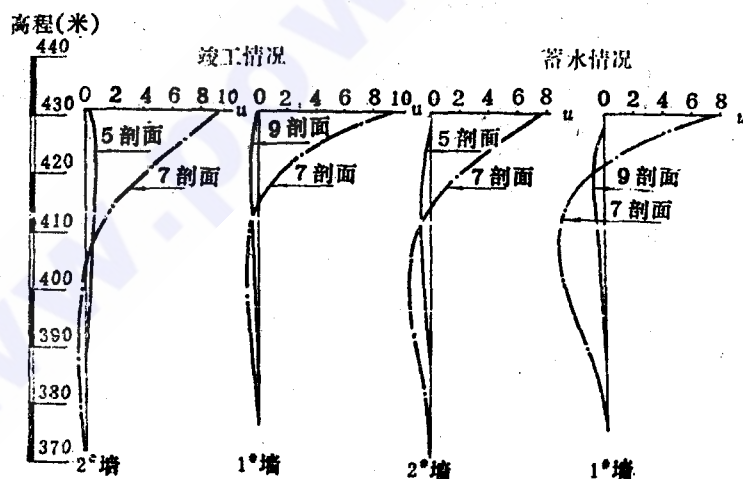


图4 防渗墙水平位移

从图4、表4可以看出,防渗墙的水平位移与覆盖层的颗粒组成和变形模量有关。由于墙顶设有软接头,其变形模量较墙体低,故水平位移多出现在墙顶高程处。又因覆盖层中各层的颗粒组成差异很大,变形模量有明显差别,在变形模量不同的层面附近会出现较大水平位移。蓄水情况较之竣工情况向下游的水平位移有增大趋势。

图4中水平变位呈扭曲现象,说明设置横隔墙的必要性,其形成的整体框架结构,可减少水平变位的扭曲程度。

值得注意的是蓄水期防渗墙上部(图4),9剖面的1\*防渗墙向下游变位,7剖面2\*防

渗墙则向上游变位。这种结果说明防渗墙下部没有完全形成框架结构。

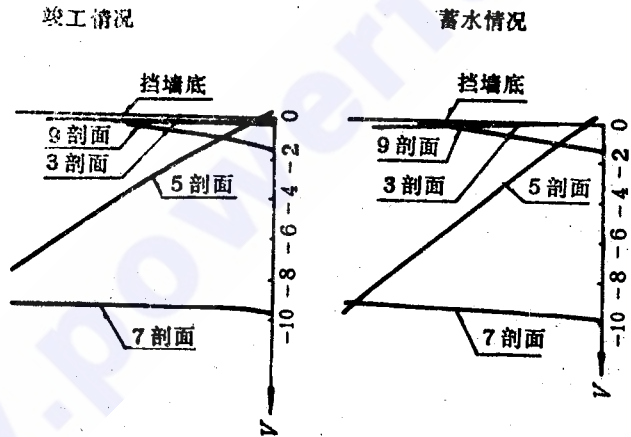
**(三) 明渠左挡墙应力**

挡墙底部基岩压应力最大为 4.22MPa, 小于基岩允许抗压强度(7.0MPa)。深槽覆盖层中的最大压应力(0.54MPa), 亦小于漂卵石夹砂层的允许承载力(0.8 MPa)。挡墙体内出现拉应力的部位有两处: 一处为墙背(高程 431.0~436.0 范围, 最大值 1.18 MPa, 其方向大致垂直下游面; 另一处为上游墙底部, 其最大值 1.51MPa, 方向与墙面垂直。设计时考虑到挡墙的复杂工作条件和可能出现的拉应力, 故挡墙采用了钢筋混凝土结构。

墙体内最大压应力为 4.1MPa。

**(四) 明渠左挡墙位移**

从计算成果中反映出挡墙位移与地基强度有关。在基岩上的挡墙变位小, 其底部最大垂直位移仅 0.37 厘米; 处于覆盖层上的挡墙变位则较大。挡墙上部兼受堆石坝部分荷载传递的影响, 其最大水平位移达 11 厘米, 墙底最大垂直位移 9.7 厘米。各剖面计算出挡墙顶底部相对位移都较大(图 5.6), 与实际情况可能有较大出入。因为挡墙按 15 米分段, 其结构刚度较大; 且防渗墙间横隔墙在上部的框架结构能起到调整作用。由此看来, 上述位移虽偏大, 但位移规律符合实际。



注: 垂直位移向上为正, 向下为负

图 5 挡墙底垂直位移(厘米)

**(五) 挡墙与防渗墙间相对变位**

挡墙与防渗墙之间的相对变位, 是对结构物细部构造合理与否的论证。它们的相对水平位移最大为 4 毫米, 说明两者变位基本一致。

防渗墙顶部 5 厘米厚的沥青麻片垫层, 与墙底沉渣压缩量见表 5。

表 5 防渗墙顶软接头及防渗墙底沉渣层压缩量

(单位: 厘米)

计算情况	防渗墙顶软接头垂直压缩				防渗墙底沉渣层垂直压缩				备 注
	1#防渗墙		2#防渗墙		1#防渗墙		2#防渗墙		
	上游面	下游面	上游面	下游面	上游面	下游面	上游面	下游面	
竣 工	1.4	2.19	1.72	2.14	0.14	0.16	0.3	0.31	防渗墙顶软接头假定 1 米混合材料, 防渗墙底沉渣层厚 0.5 米
蓄 水	1.5	2.26	1.73	2.14	0.14	0.21	0.3	0.3	

竣工情况

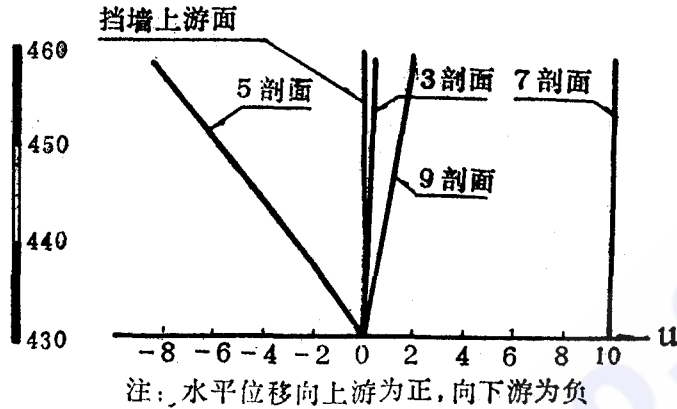


图6 挡墙上游面水平位移(厘米)

(六) 堆石坝坝体应力与变位

堆石坝坝体最大压应力(图7)都出现在坡度突变处形成的应力集中部位, 最大压应力达0.8~1.2MPa, 故此, 在坝基开挖时尽量减小起伏差, 以改善应力状况。

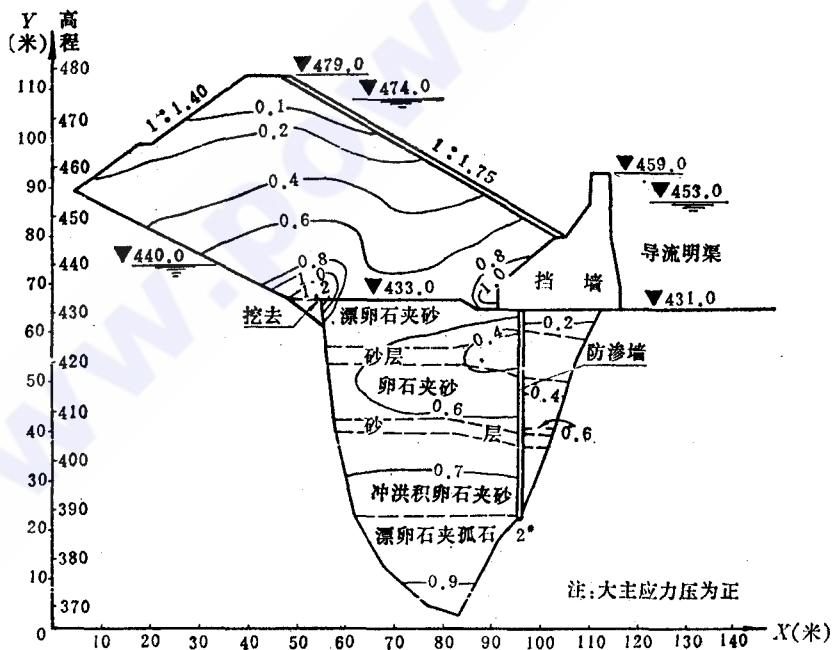


图7 5剖面大压应力等值线图(蓄水)  
(单位: MPa)

坝体水平位移(图8)最大值在竣工期, 为16厘米, 蓄水期18厘米; 垂直位移最大值在竣工期, 为70厘米, 蓄水期为75厘米(图9)。按照设计要求, 当明渠建成后, 随即进行堆石坝坝体堆筑, 分层碾压, 以满足导流期挡墙的稳定及其应力条件。



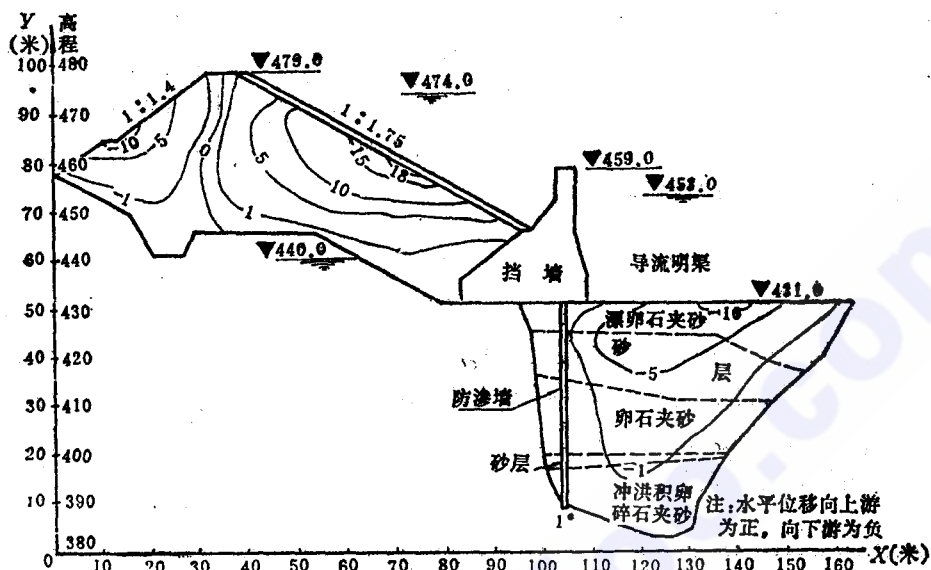


图8 9剖面水平位移等值线图(蓄水)  
(单位: cm)

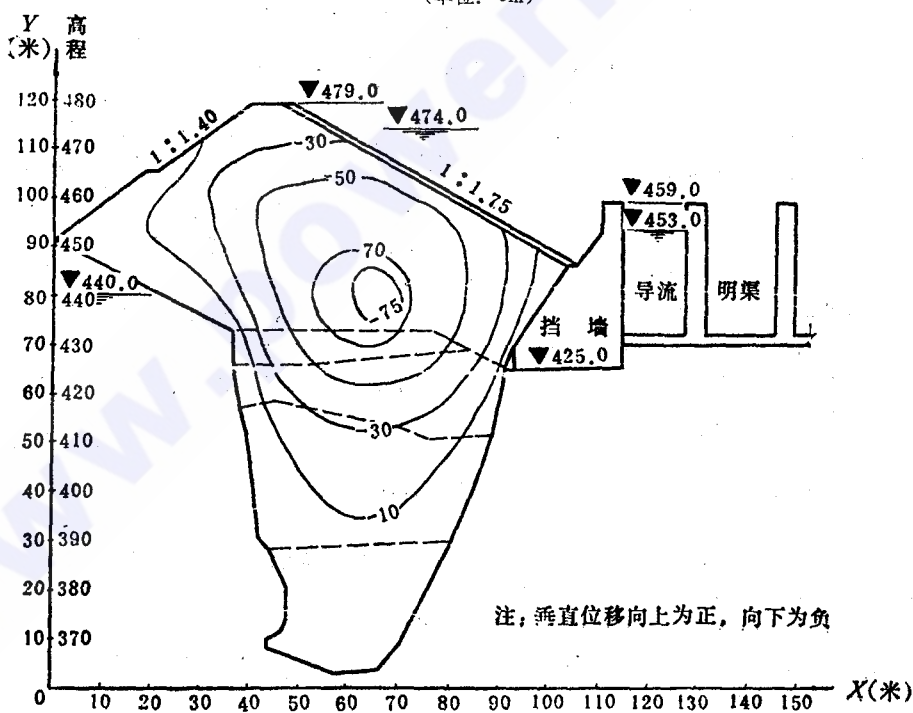


图9 3剖面垂直位移等值线(蓄水)  
(单位: cm)

(七) 坝基覆盖层的应力与应力水平

因覆盖层的各层颗粒组成以及所处深度不同, 故计算得出各层应力值大小各异。卵石夹砂层计算值一般为 0.3~0.8MPa, 在持力层范围内一般未超过允许承载力 (0.6~

0.8MPa)。粉细砂层计算应力值一般在0.3~0.6MPa之间,远大于它的允许承载力(0.2MPa)。尽管考虑承重防渗墙能分担部分荷载,若挡墙大部位于覆盖之上(见图7),坝体应力传递将使深槽上部的漂卵石夹层及砂层形成高应力区。为此,对持力层范围进行振冲加固,使砂层允许承载力提高到0.31~0.42MPa,进一步改善其应力条件。再鉴于深槽内覆盖层处于有侧限的状态,只要施工和基础处理按设计要求进行,其地基承载力与防止砂层液化都可得以解决。

## 五、结 语

左深槽段堆石坝平面非线性有限元计算,并配合模型试验等的论证,其计算成果符合实际,说明深厚覆盖上建坝,采用承重式防渗墙,其结构是合理的。虽然计算作了某些简化处理,位移偏大,但基本上满足了设计要求,为复杂地基上设计土石坝提供了新的认识和有价值的参考资料。

## 四川省水力发电工程学会第二次会员代表大会在蓉隆重召开

四川省水力发电工程学会第二次会员代表大会,于一九八六年十月十四日~十七日在成都召开,参加大会的代表107名,代表了1456名会员。特邀参加大会的有四川省科委、省科协、省计委,东北、广西、陕西、甘肃、广东、云南等省(区)水力发电工程学会;西南电力企业管理学会;四川省能源研究会和水利、地质、电机等学会的代表;以及在四川长期从事水电建设领导工作的老同志。四川省广播电台、西南电力报的同志也应邀出席了大会。

大会收到了中国水力发电工程学会等单位发来的贺电和贺信。

开幕式上,省水电学会第一届理事长陈刚同志致开幕词。他说:四川省委、省政府、省科协、中国水力发电工程学会和西南电管局对我会的大力支持和领导,是我会得以不断开拓前进的根本保证。这次代表大会的召开,对促进会建设,进一步发挥我会作用,繁荣我省水电科技事业,促进我省水电事业的发展,促进社会主义精神文明和物质文明建设,将会产生积极的作用。

省科协党组书记、副主席李昌泽同志在会上作了热情洋溢的讲话。他指出,学会应紧紧围绕党的总任务和政府对科技工作的部署开展活动。我们水电学会,要积极主动地为发展水电事业献计献策、当好助手,为领导部门科学决策提供依据。

西南电业管理局党组副书记、副局长何荣伙同志代表局党组和电管局向大会表示热烈的祝贺!对我会在促进我省水电建设事业的发展 and 科技咨询等方面作出的成绩给予了充分肯定。他指出,水电学会的工作,使我省水电事业的发展受益不浅,起到了我局行政上不能代替的促进和推动作用。并表示要进一步发挥学会的特点和作用,促进我省电力事业的腾飞和“四化”的实现。今后要进一步支持学会独立、主动地开展活动,努力为省水电学会的工作创造必要的条件,包括人力和财力上的支持。

第一届副理事长蔡家鲤同志代表第一届理事会作了工作报告。第一届常务理事长杨濯汶同志传达了省科协“二大”会议精神。秘书长黄敬信同志作了学会“二大”筹备工作报告。

提交大会的学术论文27篇,在会上进行交流。各专(工)委汇报了五年来的工作,并在会上交流了工作经验。

在分组讨论中,与会代表发言十分踊跃,一致同意蔡家鲤同志所作的工作报告;同意理事会修改的会章和理事会组织简则等文件。代表们以认真负责的态度,提出在理事候选人中,今后应逐步增加中、青和女同志的比重。对上述

(下转第21页)