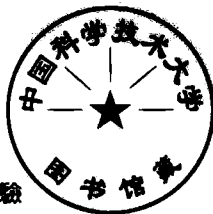


桓仁水电站 水工設計技術經驗

——重力撐牆壩的設計——

水利电力部東北勘测設計院著

水利电力出版社



桓仁水电站水工設計技术經驗
(重力攪墙坝的设计)

水利电力部东北勘测设计院著

*

1857S542

水利电力出版社出版 (北京内务部科学路二里樓)

北京市書刊出版業營業許可証出字第106号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 开本 * 2 $\frac{1}{4}$ 印張 * 57千字

1959年1月北京第1版

1959年1月北京第1次印刷(0001—3,600册)

統一書号: 15143·1461 定价(第9类)0.49元

目 录

第一章 桓仁水电站水工設計概要.....	2
一、流域概況及梯級规划(2) 二、桓仁电站的任务及經濟指标(5) 三、水力樞紐布置(6) 四、水工設計中的一些問題(8)	
第二章 桓仁水电站的坝型选择.....	15
第三章 桓仁水电站重力撑墙坝剖面型式选择.....	18
一、坝段长度选择(19) 二、上下游坡度选择(20) 三、单、双墩选择(27) 四、悬臂头尺寸选择(28)	
第四章 重力撑墙坝横向地震力及变形计算.....	30
一、概述(30) 二、自振频率计算(31) 三、地震力计算(35) 四、地震作用下的坝体变形(38) 五、实例(38)	
第五章 桓仁水电站重力撑墙坝坝体应力分析.....	45
一、概述(45) 二、基本计算公式(46) 三、计算方法的討論(50) 四、目前采用的应力分析方法——混合法介紹(52)	
第六章 桓仁重力撑墙坝悬臂头的格网法应力分析.....	57
一、概述(57) 二、基本公式(57) 三、应力计算(64) 四、计算步骤(64) 五、几点体会(67)	
第七章 桓仁重力撑墙坝的观测设备.....	68
一、概述(68) 二、布置(70)	
第八章 桓仁水电站坚硬岩石摩擦系数的試驗及确定.....	74
一、大坝基础的岩石特性(75) 二、第十一层岩石与混凝土及第十一层岩石本身的抗剪試驗(76) 三、摩擦系数的确定(83) 四、結語(85)	

第一章 桓仁水电站水工設計概要

一、流域概況及梯級規劃

地形 渾江位于东北南部，为鴨綠江一大支流(图1)，发源于长白山系龍崗山脉的老岭，自北向南流經吉林，辽宁两省，在渾江口注入鴨綠江。全长約430公里，平均坡降为一千二百分之一，流域面积15,000平方公里，占鴨綠江流域面积的四分之一。較大的支流有哈泥河、喇嘛河、大带沙

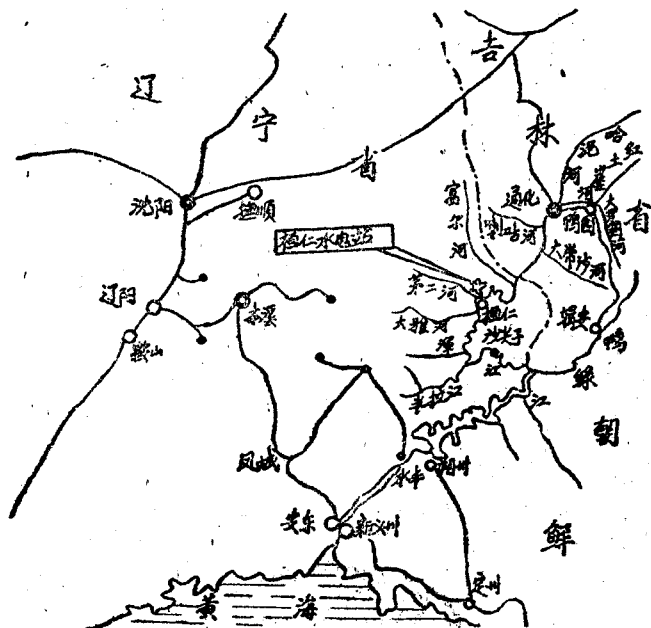


图1 渾江流域及桓仁水电站位置

河、富尔江河及半拉江等，境内山岳连绵，大部山脉海拔高600~1,000公尺。

桓仁电站位于浑江中游，在辽宁省南部桓仁县城上游4公里之牯牛哨村，控制流域面积10,240平方公里，约全流域的三分之二。坝址区为一不对称的U形峡谷，峡谷长约500公尺，枯水水面宽约360公尺。

气候与水文 浑江流域属温带季风型大陆性气候，冬季寒冷而干燥，夏季炎热而多雨。多年平均气温为 6.1°C ，多年平均降水量为876公厘。降水多集中在夏秋季节，在每年的7、8月间集中而强烈的暴雨，能引起陡涨陡落的洪峰。河流封冻日期由11月末开始，约长110~130天，最大冰厚达0.9公尺。

桓仁多年平均气温为 6.3°C ，多年平均降水量为858.3公厘，大部分集中在6~9月，占多年平均降水总量的70%以上。多年平均流量为149.3秒公方。

地质 浑江流域在大地构造方面，属中朝陆台的一部分，基础为前震旦纪古老结晶变质岩系，以后受燕山运动的影响，发生了广泛的火山活动，喷发了大片的火山岩流和形成了巨量的火山碎屑堆积，为凝灰岩及凝灰集块岩等。地区的地震烈度根据中国科学院地球物理研究所提供的资料定为6度。

桓仁电站坝址附近地层为白垩系安山凝灰岩和安山凝灰集块岩互层，共出现16层，坝基位于第9层灰绿色安山凝灰集块岩及第11层深灰色安山凝灰集块岩上，其平均饱和抗压强度分别为每平方公分1,109公斤及763公斤，坝基下第10层安山凝灰岩厚0.6~6公尺，中间夹有三层粘土夹泥层，摩擦系数仅为0.27，需加以处理。

坝址地层是单斜构造，走向北东 $12\sim 15^\circ$ ，倾向北西，倾角 $15\sim 20^\circ$ ，向下游右岸倾斜。由于左岸山体下存在有第10层安山凝灰岩中的夹泥层，因此在陡壁边缘约 $15\sim 30$ 公尺范围内，水库蓄水后岩体有滑动可能，必须加以处理。

坝址区内有一較大的断层，斜交河谷，貫穿部分坝基，垂直断距5~15公尺，水平断距20~25公尺，近地表处断层破碎带总寬度为9~19公尺，裂隙中有方解石充填，为一死断层。

梯級规划 渾江流域分为上、中、下游三段，通化以上为上游，通化至桓仁为中游，桓仁以下为下游，，上中游均为二級开发，下游为一級开发(图2)。总装机容量約 128 万千瓦，年发电量 28.63 亿度。

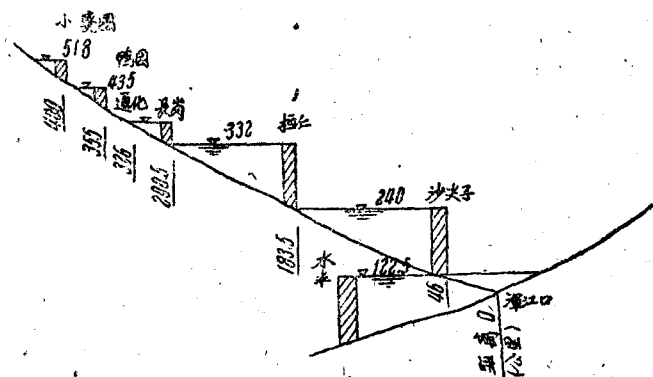


图2 渾江流域梯級开发

上游河段流量小，出力不大，河谷較寬，工程數量較大，而且有許多煤礦、鐵礦和鐵路不能淹沒。長崗子水力樞紐的庫容和發電量均很小，不能滿足用電的需要，因此選定桓仁段至沙尖子水力樞紐間為第一期工程。并考慮到桓仁水

电站距田师傅、通化等铁路车站较近，材料场、坝址也近得多，且敌伪时已修建有右岸圈堰可以利用，为使提前发电计，故先修建桓仁水电站。

桓仁电站1958年开工，1960年投入运转；沙尖子电站1959年开工，1961年投入运转。

二、桓仁电站的任务及经济指标

桓仁电站的主要任务是发电，以满足东北南部地区日益增长的电力负荷要求，其次是防洪、灌溉及渔业，但比重不大。电站建成后，将参加东北南部超高压电力网运行，距系统负荷中心抚顺、本溪、鞍山、沈阳等主要工业城市仅二百余公里，地位优越，供电便利。

水库正常高水位332.0公尺，死水位300.0公尺，正常高水位时的总库容为83.2亿公方，有效库容59.2亿公方。

电站装有6台7.5万瓩的轴向辐流水轮发电机，总装机容量45万瓩，保证出力8.70万瓩，多年平均年发电量8.11亿度（未包括增加水丰电站的保证出力5.5万瓩，年发电量2.7亿度的效益在内），年工作小时为1,800小时。

由于水力枢纽各方面的优越条件，桓仁电站的造价颇为低廉，初设时每单位瓩投资为756元，但思想大跃进后，在党的领导下，全体工作同志提出了许多合理化建议，采取了一系列的新的技术措施，总投资已大大降低，每单位瓩投资仅390元，单位电能投资为每度0.22元，单位电能成本为每度0.53分。桓仁电站投入生产后，非但每年可节省标准煤45万吨，而且可以降低系统电力成本，降低电价，给东北地区许多耗电量巨大的工业发展创造了有利条件。

三、水力樞紐布置(图3)

桓仁坝址区坝段仅长500公尺, 由于地形的限制, 能作为坝轴线的范围仅100公尺左右, 地质变化不大。另外, 虽在现有坝址上下游进行踏勘, 未发现更好的地形地质条件可作为比较坝段, 因此桓仁水力枢纽未进行坝段选择, 坝轴线选择亦无多大实际意义。最后考虑利用日伪时已建成的圈堰选定了坝轴线, 方向为北 $17^{\circ}32'15''$ 西。

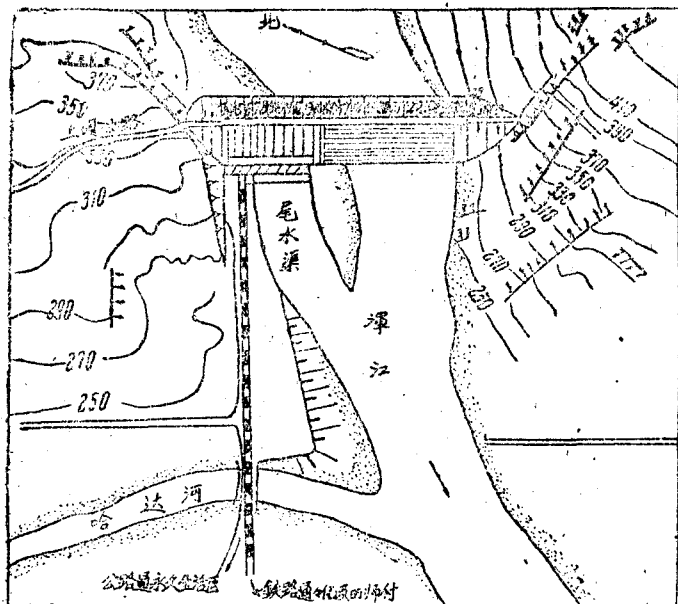


图3 桓仁水电站水力枢纽布置

经过坝型比较, 最后确定采用混凝土重力撑墙坝, 最大坝高100公尺, 全长576.5公尺, 除右岸38公尺及左岸34.5公尺为重力坝段外, 其余坝长共分为31个重力撑墙坝坝段: 从

右岸开始第1~4, 第11及第27~31坝段为挡水坝段, 坝段长16公尺, 墩厚6公尺; 第5~10为厂房坝段, 坝段长17.33公尺, 墩厚7.33公尺, 钢管四周扩大墩厚为11公尺; 第12~26为溢流段(因溢流口中心位于两坝段的分缝上, 故实际上第12及第26两坝段均为半个挡水坝段、半个溢流坝段), 坝段长16公尺, 墩厚6公尺, 坝顶高程334.0公尺, 高出万年洪水位0.1公尺; 上下游坡度均采用1:0.4及1:0.55, 最大坝基底宽厂房坝段为86.4公尺, 其余坝段为89.3公尺。在坝基高程234.0公尺至238.0公尺嵌入岩石部分坝墩, 为了加强嵌固作用, 将基础放大。

溢洪道位于河中偏左岸, 共有 7.5×12 公尺溢流孔口14个, 溢流堰顶高程在322.50公尺, 设有工作闸门一道, 并有110吨门式起重机两台。千年洪水位332.6公尺(考虑洪水预报), 经水库调节后的泄流量为11,900秒公方, 单宽流量53秒公方; 万年洪水位333.9公尺, 泄流量为13,500秒公方(不考虑加保证值), 单宽流量60秒公方, 而在溢流孔口处的单宽流量已达80秒公方。消能方式采用连续式鼻坎挑流, 鼻坎高程265.0公尺, 高出地面17公尺, 射角为20度。

厂房位于右岸河床内, 为坝后式露天厂房, 装置有PO-662-BM-410/150水轮机6台, 单位机组容量75,000瓩, 总容量45万瓩, 厂房包括安装间及副厂房总长135公尺, 宽17公尺, 机组间距17.33公尺, 导水叶中心高程240.5公尺, 最低尾水位239.0公尺, 正常尾水位241.1公尺, 千年尾水位248.7公尺。

进水口中心高程292.0公尺, 设有 4×6 公尺的工作闸门槽及检修闸门槽各一道, 取消了快速闸门, 工作闸门及检修闸门均利用溢洪道门式起重机启闭。进口设有拦污栅, 但无

清理設備。引水鋼管在壩墩內通過，直徑5.0公尺，鋼管通過處將壩墩局部加厚，以改善壩體應力。

電氣主結綫採用擴大單位結綫方式，每2台發電機共同與一組 $3 \times 0.4\pi-60,000$ 千伏安/220千伏變壓器（布置在壩與厂房之間）連接成為單位組合的方式，高壓側直接與系統連接。

厂房設有400/100/30噸門式起重機一台，並有鐵路直接通入安裝間。

大壩總混凝土量（包括壩基斷層處理及夾層處理）145萬公方，因壩體內取消了全部結構鋼筋，而應力鋼筋僅在閘墩、進水口、溢流面板、鋼管四周及灌漿廊道四周等處放置，共約1,500噸，折合每公方混凝土內鋼筋含量僅1.03公斤，與一般重力壩相同，壩基石方開挖總量（包括兩岸削坡及左岸山体不穩定部分的開挖）共40萬公方。

根據壩體各部分不同的要求，採用了各種不同標號的混凝土，共有五種如圖4所示。

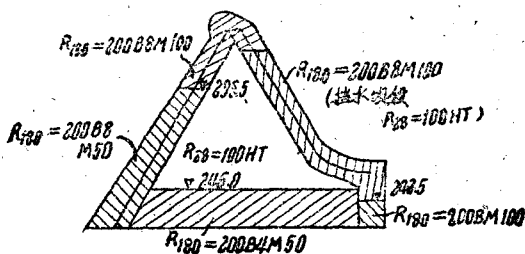


圖4 混凝土標號分布

四、水工設計中的一些問題

由於桓仁水電站某些地形地質條件，以及全國大躍進中

采取了一系列新的建筑物型式及新的措施，就不可避免地要带来许多新的特殊问题急待解决，除其中有一些问题如：坝体剖面型式选择，单、双墩的选择，地震应力与共振问题，悬臂头型式选择与应力计算以及坝体应力计算方法等已有专文介绍不再赘述外，还有以下一些问题：

1. 抗滑稳定系数及坝基应力 在初步设计时，考虑到坝基的粘着力和嵌固作用，在利用不考虑粘着力的公式校核抗滑稳定时，采用了 $K_c \geq 1.0$ (任何情况)，并以考虑粘着力的公式及谢尔卡洛夫公式进行了校核，均能满足要求，但在初审时，许多同志提出：桓仁重力撑墙坝很高，虽然坝基采用槽挖，可是基坑宽 7 公尺，深仅 4 公尺，而且开挖掉的全是风化岩层，因此嵌固作用很小，不能象其他支墩坝一样采用 $K_c = 1.0$ 甚至 $K_c < 1.0$ 。必须作为重力坝来要求：满足 $K_c \geq 1.05$ (正常情况)； $K_c \geq 1.0$ (特殊情况)。但在全国大跃进中，我们针对这一问题，又进行了一次专题辩论，一致认为不考虑粘着力来校核抗滑稳定，本身就存在着一定的安全因素。而且重力撑墙坝与重力坝不同，它有着一定程度的嵌固作用。最后经总局审查，仍认为不能考虑嵌固作用，但根据大跃进的精神，同意将 K_c 降低，即特殊情况时 $K_c \geq 1.0$ ，正常情况时不作规定。这样就节省了混凝土 2.5 万公方。

对于坝基应力，在特殊情况下(主要是横向地震作用)下是否允许产生拉应力这一问题，一开始就存在着不同意见。初设时，虽规定了在任何情况不允许产生拉应力，审查时，经过反复讨论，才规定在特殊情况下坝重一点允许承受每平方公分 2 公斤的瞬时拉应力，节省了混凝土约 2 万公方，但这里应该说明：坝基有瞬时拉应力，只是在考虑 7 度地震

(橫向地震)时才存在, 如不考虑一級建筑物需提高地震等級的規定, 按 6 度地震計算时, 坝基就不存在瞬时拉应力。

2. 坝体收縮縫, 混凝土澆筑分层及坝体内結構鋼筋 为了施工澆筑混凝土方便, 以及防止混凝土凝結收縮引起裂縫等不良現象, 坝体常設置有收縮縫。縫的形式有: 沿第一(或第二)主应力方向的傾斜縫(图 5a 及 b); 齿牙形(齿牙两边为第一、二主应力方向)的鉛直縫(图 5c)。前者应力情况較好, 但施工比較困难, 同时影响蓄水時間(图 5a), 且使上游悬臂头內止水布置复杂。后者施工比較方便, 为了爭取恒仁水电站在 1960 年发电, 而且利用坝墩作施工棧桥, 所以除了在上下游悬臂头沿轉折处設置有傾斜的收縮縫外, 我們在坝墩內布置了两条鉛直縫(图 5c), 在縫中布置有灌浆管, 当混凝土充分收縮后, 在縫內进行灌浆。

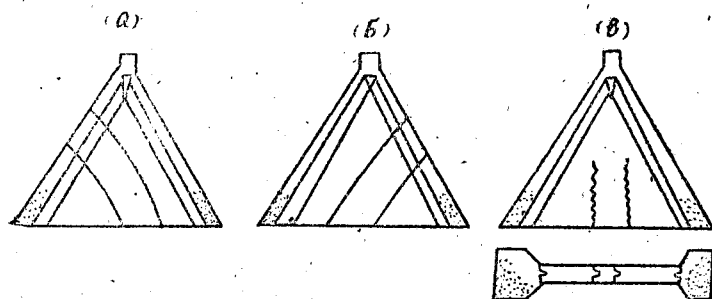


图 5 坝体收縮縫布置

对于混凝土澆筑分层高度, 我們进行了施工温度应力計算。为了避免采用昂貴的而且增加施工复杂性的冷却設備, 我們考虑了以下一些措施: 1) 全部采用矿渣水泥, 降低水泥水化热(經試驗証明, 采用矿渣水泥完全能滿足混凝土强度, 抗冻及防滲的要求)。2) 减少水泥用量。3) 加填大块石 20%。

4)基础部分避免在气温較高的時間內施工。5)根据以上一些措施，規定澆筑分层高度：基础部分为1.5公尺；其余悬臂头部分为4公尺；坝墩部分6公尺。在两分层之間設置鍵槽，并将悬臂头与坝墩的水平縫錯开，以增加抗滑稳定。

坝体内鋼筋用量，初設时考虑每公方混凝土內鋼筋含量为4公斤，这是考虑在坝体悬臂头部分及坝墩表面全部布置有鋼筋的。在全国大跃进中，首先提出取消坝墩(基础部分除外)及擋水坝下游悬臂头內的結構鋼筋，以后进一步研究，認為坝基部分坝体受到基础的束縛，在混凝土收縮时可能产生的裂縫可用其他措施消除，而且即使放置鋼筋后，也并不能防止混凝土开裂而只能防止裂縫的扩展而已。在上游悬臂头部分，只要适当选择悬臂头型式，使得上游面不产生拉应力，同样可以不放置鋼筋，因此桓仁重力撐墙坝坝体内，除了必要的受力鋼筋如閘墩、溢流面板、灌漿廊道等部分外，全部取消了过去認為必需的結構鋼筋，大大地减少了鋼材用量，并在目前說来，有着特別重要的意义。

3. 坝基处理 桓仁坝基地質方面，主要有以下三个缺陷：1)如前所述有一与坝軸綫約成 30° 斜交的大断层。2)在第十层安山凝灰岩中有三层夹泥层，总厚約10~30公分，虽然岩层向下游傾斜，夹层已插入基岩較深，不致引起坝体滑动，但压缩系数較大， $\alpha=0.019$ 平方公分/公斤，有因压缩沉陷而引起坝体裂縫的危險。3)左岸山坡，由于以上所說的夹层存在蓄水后，在陡坡15~30公尺範圍內，有向下游河床滑动的可能(夹层摩擦系数 $f=0.27$)。

以上三个缺点都必須加以慎重处理，处理的办法是：在断层通过的坝基部分挖除破碎带，填以楔形混凝土基，它的厚度是考虑了岩石的彈性抗力系数，由計算决定。并在断层

带加深灌浆。

对于坝基下夹层，进行了近似的沉陷计算，计算表明：除右岸重力坝段以及第1、第2两坝段以下夹层由于埋藏较深（距坝基30公尺以上），因而无沉陷或沉陷极小，可以不加处理外，其余部分均必须加以处理。曾研究了三种处理方法：

1)用高压水冲洗粘土夹层，再进行回填灌浆；2)在坝基范围内鑽大直径孔至第十一层安山凝灰岩，然后浇筑混凝土成混凝土桩基；3)将坝基下第十层安山凝灰岩全部挖除。在这三种处理方案中，以第三方案为最经济，最可靠。在夹层埋藏浅处（第10至第15坝段）采用明挖，在埋藏较深处（第3至第9坝段）则采用洞挖。不论明挖或洞挖，只是在坝墩及悬臂头以下进行，而在两坝墩之间夹层露头处加以封闭堵塞。

对左岸滑坡处理，考虑了五个方案：1)将坝轴线向上游移动。2)将坝轴线转一角度，即将左岸坝头向上游移动。3)坝轴线不变，将左岸坝段向上游转弯。4)将滑坡范围内的夹层挖除，再以混凝土填塞。5)将可能滑动部分山体全部挖除，前三个方案，都企图把第十层凝灰岩露头放在正常高水位之上的避开可能滑动的山坡，但增加了坝长，因此造价加大很多，不能采用。第四方案造价最低，但施工困难，第五方案施工方便，也是最彻底的处理办法，但造价较贵，最后经过深入一步的地质工作，认为陡坡边缘15公尺范围内，存在有很多、很大的风化裂隙（最大的宽达1公尺），容易崩塌，必须挖好，所以对于左岸滑坡处理的最后方案是：先明挖15公尺，如内部岩石较完整，则其余15公尺采用洞挖夹层后填塞混凝土，否则继续明挖至30公尺。

坝基只槽挖到新鲜岩石为止，无锯齿形及上游齿墙。

固结灌浆仅在坝基下进行，孔距3公尺，一般孔深5公

尺，每一填墩下有三排，排距2.5公尺。

恒仁坝基岩石較好，透水性很小，大部分吸水率 $w < 0.01$ 公斤/分。因此采用帷幕灌浆深度約 $\frac{1}{2}$ 水头，仅在断层部分加深至 $\frac{1}{2}$ 水头，两岸伸入坝头約 $\frac{2}{3}$ 水头，采用两排：主帷幕深25~30公尺，間距2公尺；輔助帷幕20公尺，間距与前者相同。

由于岩石吸水率較小，而且有两排帷幕灌浆孔，所以在設計时，对于渗透水压力是这样考虑的：上游坝踵处为上下游水头差，然后依直綫递减，主帷幕灌浆中心处为20%上下游水头差，在坝墩轉折处或悬臂头下游面处則为零。

浮托力作用面积系数仍考虑为100%。

4. 縱向曲折稳定 一般支墩坝都由于坝墩較薄，都必須驗算縱向曲折稳定，計算方法有近似的欧拉法及較精确的能量法，我們同时采用了两种方法驗算，但要求不同的安全系数：

$$\frac{\sigma_{kp}}{\sigma_1} = \eta \geq K \cdot \beta \quad (1)$$

式中 σ_{kp} ——临界应力；

σ_1 ——計算柱条坝基处的第一主应力；

η ——安全系数；

K ——混凝土弯曲受压时的安全系数，一級建筑物正常情况时采用 $K=2.5$ ；

β ——考虑計算方法而采用的系数，对于欧拉法 $\beta=0.5$ ；对于能量法 $\beta=1.1$ 。

計算时是平行下游面在坝墩部取1公尺单寬斜柱，假定頂端自由，底部嵌入岩石处为固定，又因頂端悬臂头的剛度較坝墩大很多，不可能与坝墩一样产生曲折，故假定悬臂头

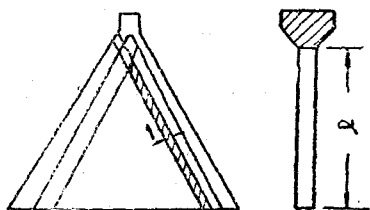


图 6

自重为一外荷载，而仅将坝墩部分作为斜柱计算高度（图 6）。

这里，主要提出以下几个问题：1) 将顶端悬臂头部分假定为外荷载，缩短了斜柱计算长度是否合理；2) 假

定底部绝对嵌固是否合理；3) 采用双墩时，如何验算纵向曲折稳定？对于前二个假定，可能是偏于不安全的，但必须指出：当我们取 1 公尺单宽斜柱计算，而不考虑左右柱体影响，尤其是具有很大刚度的下游面板的影响时，实际上已存在有很大的安全因数，对于最后一个问题，有部分同志认为可以考虑双墩联合作用，这样考虑，当然完全能满足纵向曲折稳定要求；但我们认为在坝较高而坝墩较薄，两墩之间又无任何联系时，这样考虑可能不够安全，如象单墩一样计算，则又显然不能满足要求。在初步设计阶段计算双墩方案时，我们曾作了这样假定：因顶端悬臂头刚度较坝墩大很多，故假定双墩顶端有一刚度为无穷大的杆连结，在纵向曲折时有转折点存在，因此在用能量法计算时，不考虑 $m=1$ 的情况，即采用 $m=3$ 。这样假定是否合理，提出来希望共同研究。

5. 露天厂房 这是比较新的一个尝试，也是一个良好的开端，刚提出露天厂房方案时，有一部分同志存在着一定程度的思想顾虑：如东北天气冷，不适宜用露天厂房；运转检修不方便，运转人员还有意见等等。最后由院召开了二次辩论会，才一致同意采用露天厂房，总局也批准同意在桓仁进行试验，作为今后的经验。这样，非但在经济上节省了十多万元，而且使今后大胆地采用新技术创造了有利的条件。

第二章 桓仁水电站的壩型选择

壩型选择时，按筑壩材料可分成三类——混凝土壩（混凝土重力壩、混凝土重力撐墙壩）、鋼筋混凝土壩（平板壩、連拱壩）及堆石壩；按构造特征可分成二类——重力壩（混凝土重力壩、堆石壩）及支墩壩（平板壩、連拱壩、重力撐墙壩）。

当选择壩型时，首先必須考虑采用当地材料。桓仁壩址附近，有大量質量优良的岩石可以开采，故选用堆石壩是完全有可能的，尤其目前我国水泥、鋼材供应紧张，有时虽然采用当地材料要增加少許造价，也应该采用，以便将水泥、鋼材应用到其他更重要的工业建設上去，但桓仁水电站壩很高（达 100 余公尺），增加堆石量很大，同时东北人工較貴，因此总造价比重力壩貴一倍左右，而且施工時間也要比重力壩多二年，所以即使能利用当地材料，也不得不加以放弃。

鋼筋混凝土壩——平板壩及拱壩，一般的說，是比較經濟的，但考虑到东北气候寒冷，温度变化較大，尤其是冬季的冰冻作用，容易引起平板壩和連拱壩的面板及壩墩发生裂縫而逐漸破坏，假如要防止这种恶化情况，則必須增加造价昂貴的防寒設備，因此也决定不予采用。

余下的两个壩型——混凝土重力壩及混凝土重力撐墙壩各具不同的优点和缺点，所以在选择壩型时，爭論較多。有些同志認為：重力壩比較簡單，施工有把握，不需要象重力撐墙壩一样对施工質量要严格控制；节省鋼材；壩体内可以填充大量块石以节省水泥。即使这样，仍一致認為重力撐