

铜街子水电站左深槽覆盖层 建堆石坝离心模型试验研究

刘麟德 唐剑虹

(水电部成都勘测研究所)

一、概 述

铜街子电站左岸堆石坝基础深槽覆盖层厚达70余米,为解决深槽段堆石坝的基础防渗与承重问题,设计采用两道承重式防渗墙,其受力条件非常复杂(详见本刊1986年第三、四期)。

土工建筑物的应力和变形是土体自身重量所引起,用原型尺寸进行试验,难以实现,故采用离心模型,利用离心力加大材料的自重,使小的物理模型能模拟原型的应力、变形等性状。

为论证堆石坝施工完建、蓄水等不同情况下,坝体、坝基、混凝土防渗墙和挡墙等各部位的应力、变形、边坡稳定等,特借助核工业部九院四所的巨型离心机进行离心模型试验研究。该设备总重1148 kN/(117.1 t),有效半径为10.8 m,模型箱、反光镜架及试料重21.2 kN/(2.16 t),有效离心力为2120 kN/(216.18 t)——离心加速度(即 $K_N=g$),总功率大于1000 MW、集流环为160测点。

该攻关项目始于1983年初,1984~1985年完成模型箱、反光镜、照像、摄像、测试自控、微机采集与处理系统的试验研究工作。这项试验系国内首次应用于大型水电工程并与有限元计算及混凝土结构模型试验结果对比分析,取得了满意的成果。

二、离心模型试验设备及量测系统

(一) 离心模型试验箱及其附件

1. 离心模型试验箱 尺寸为 $970 \times 670 \times 300$ mm,采用内衬铝合金板并抛光,光洁度为 $\nabla 6$ (见图1)。

2. 反光镜 系刨磨成5.5 mm厚的铜板,镀铬后抛光成镜面 $\nabla 13$,装在助型垫底的支架上。

3. 有机玻璃盖板 系无色一级料,抛光后厚75 mm,能承受模型料在100g运转时不开裂。

(二) 照像、摄像自动控制

* 袁光国、王建洪、雷泽宏、吕翎等同志参加试验方案讨论与试验;刘吉祥、胡薇提供有限元计算资料;核工业部九院四所刘凯利、赵世珍、郭怀智、李经泽等参加测试。

在离心机轴心转盘上固定照像、摄像支架，自动卷片的照像机及摄像机，对准反光镜拍摄不同离心加速度下银头塑料针的变位。摄像及照像线路系统见图2~3。

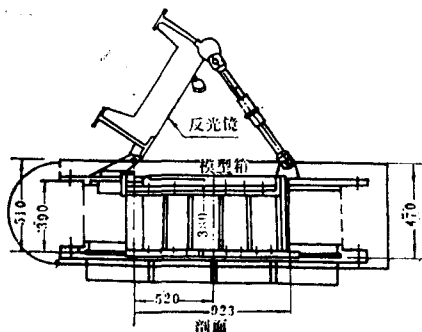


图1 离心模型试验箱及反光镜设计总装图

(四) 模型制备和安装

堆石坝及覆盖层坝基料系用等量代替法，按原型颗粒级配曲线制备的，坝基用原型料小于 $\phi 2\text{ mm}$ ，但坝体料则以 $2\sim 1\text{ mm}$ 代替、沥青混凝土斜墙采用物理性能指标接近的材料模拟。

模型装入模型箱，置于离心机臂端的吊篮上部，下部加配重调整重心，在相反方向的短臂端也加配重，以取得平衡。

三、堆石坝离心模型试验的相似条件

离心模型试验是用离心力模拟重力，提高土工模型的自重(G)。即用离心力将模型重量增大 n 倍，使模型与原型在相应点的应力相等。

$$\text{即} \quad \sigma_p = \sigma_m \quad (1)$$

$$\text{则} \quad a = n \cdot G \quad (2)$$

由于模型尺寸比原型缩小 n 倍，超孔隙压力坡降比原型中坡降大 n 倍。渗透途径应

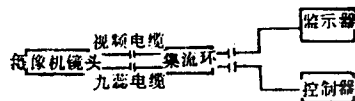


图2 照像自动拍摄系统图

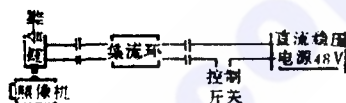


图3 摄像线路系统图

(三) 量测系统

一次仪表采用应变片式土应力传感器，量程为 $0\sim 2943\text{ kPa}$ ，重复性 $< 0.6\%$ ，回零 $< 0.3\%$ 。并在混凝土防渗墙、挡墙及基岩($P_2\beta_5^{1-2}$)部位贴应变片。二次仪表采用YJS-14型电阻应变仪。

以上仪表线路通过集流环接入控制室(详图4)。

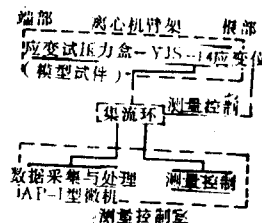


图4 离心模型试验测试系统框图

缩短 n 倍。因此在模型中发生的渗流固结过程, 比原型加快 n^2 。从太沙基固结理论分析, 原型固结时间为 t_p 与模型固结时间 t_m 的关系式为

$$t_p = n^2 t_m \quad (3)$$

其主要物理量及相似比参看表 1。

表 1 主要物理量及其相似比

项 目 原型、模型比	尺 度	加 速 度	应 力	应 变	时 间	材 料 特 性
原型(如堆石坝)	1	1	1	1	1	1
离心模型	1/n	n	1	1	1/n ²	1
有关物理量	长、宽、高		应力荷载, 孔隙压力	线性变型、 体形变型	固结、沉降、渗流	密度、摩擦力等

四、离心模型试验及资料分析

(一) 试料的物理力学性能

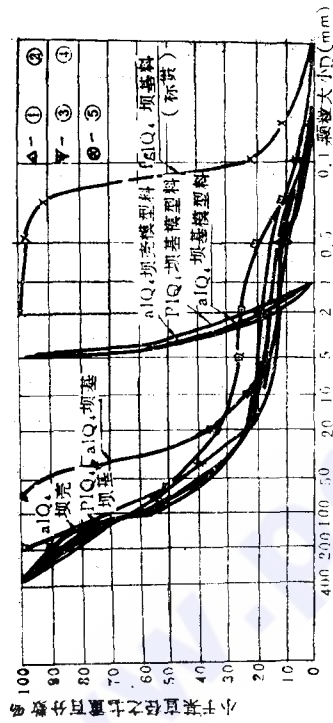
对坝体、坝基的原型和模型料进行容重、颗粒大小分析、比重、相对密度、压缩和抗剪强度试验外, 还测出部分试料的渗透变形指标。对混凝土防渗墙、挡墙及模拟 P_2 、 β_5^{1-2} 基岩的混凝土原型及模型料分别进行了抗压、抗拉及弹性模量试验项目, 试验结果见图 5 及表 2~5。

表 2 堆石坝离心模型试料非线性应力应变参数采用值

试 验 部 位	土 的 分 类	湿 容 重	干 容 重	凝 聚 力	摩 擦 角	K	n	R _f	D	G	F	备 注
		γ	γ_d	C	ϕ							
		kN/m ²	kN/m ²	kPa	度	—	—	—	—	—	—	
堆石坝料	粗砂	18.34	17.46	2.9	41	574	0.62	0.66	6.3	0.16	0.20	注
坝基覆盖层料	中砂	17.85	16.97	2.75	39.3	175	0.24	0.69	6.7	0.39	0.35	

表 3 左深槽覆盖层堆石坝料物理试验成果表

试样编号	土 的 分 类		天 然 状 态				比 重 G _s	相 对 密 度 Dr
	按 土 工 规 程 及 地 质 定 名	按 地 质 层 次	含 水 量 ω %	湿 容 重 γ kN/m ³	干 容 重 γ_d kN/m ³	孔 隙 比 e		
昆 II	漂卵石夹砂	坝基alC4	4	23.0	22.1	0.25	2.82	
铜 I	砂卵石		4	21.6	20.8	0.33	2.82	
昆 I	漂卵石夹砂		4	17.1	16.4	0.65	2.75	
内	砂砾石	内过渡层	4	19.9	19.1	0.41	2.75	
外	砂砾石	外过渡层	4					
铜 3	漂卵石夹砂	坝体填料						
标贯 1	细 砂	坝基fglQ ₃ ²⁻²	22.2	18.0	14.7	0.83	2.74	0.57
钻孔 399	重砂壤土	坝基fglQ ₃ ²⁻²	6.0	16.3	15.4	0.70	2.67	



试 样 编 号	图 示	湿容重 (kN/m^2)	颗 粒 组 成 (%)										D60 (mm)	D50 (mm)	D10 (mm)	(D10) ² $D_{10} \times D_{60}$	Γ_{60} D_{10}	土 的 分 类 及 部 位			
			200- 400	100- 200	80- 100	60- 80	40- 60	20- 40	10- 20	5- 10	2-5 2-10	0.5- 0.1									
3组 平均	△	23.7	23.0	14.3	25.42	9.7	8.1	9.7	9.9	4.2	2.5	1.8	2.1	8.339	8	100	0.32	45.1	312.5	漂卵石夹砂 (alQ ₄)坝基	
18组 平均	+	22.6	21.7	14.6	23.3	13.5	7.9	17.2	1.5	3.18	3.42	3.7	6.3	2.4	92	64	0.80	12.2	11.5	漂卵石夹砂 (alQ ₄)坝壳	
21组 平均	▽	20.6					25.22	38.83	2.47	7.48	2.61	2.9	7.33	19	35	30	0.47	13.7	75.5	砂卵石 (alQ ₄)坝基	
坝基 模型料												86.61	2.9	7.33	19	4.4	4	0.47	4.95	9.4	细砾 (alQ ₄)坝基
坝基 模型料												86.61	3.39	—	—	4.4	4	1.80	1.14	2.44	细砾 (alQ ₄)坝基
坝壳 模型料												87.6	3.7	6.2	2.4	4.4	4	0.80	2.56	5.5	细砾 (alQ ₄)坝壳
坝壳 模型料		18.3	17.5									87.6	2.4	—	—	4.4	4	1.70	1.37	2.59	细砾 (alQ ₄)坝壳
坝基料	■					49			17.5	8		1.90	1.6	20.0	2.0	78	5.2	0.22	11.42	354.5	卵石土 (plQ ₄)坝基
坝基 模型料												76.4	1.6	20.0	0.2	14.0	3.5	0.22	6.55	18.2	细砾 (plQ ₄)坝基
坝基 模型料		17.9	17.0									76.4	23.4	—	—	4.0	3.5	1.50	1.04	2.67	细砾 (plQ ₄)坝基
坝基 (标准1)	×											1.0	2.0	75.5	21.5	0.154	0.046	1.9%	3.48	细砂 fg:C ₃₂ -2 坝基	

图 5 左槽深覆盖层及坝壳料模型料颗粒大小分析曲线

续表 3

试样 编号	颗 粒 组 成										有效 粒径 d ₁₀ mm	平均 粒径 d ₁₀ mm	不均匀 系数 c _u
	400~ 200 mm %	200~ 60 mm %	60~ 20 mm %	20~ 5 mm %	5~ 2 mm %	2~ 0.25 mm %	0.25~ 0.10 mm %	0.10~ 0.005 mm %	0.005~ 0.0005 mm %	0.0005~ 0.0001 mm %			
昆 II			18	3				32			0.17	50	447
铜 I			64.05	19.95	2.61	10.2					0.47	28	74.5
昆 I		38.5	16.0	7.5	19	38					0.044	32.5	1318.2
内													
外													
铜 3	1.46	36.8	16.0	32.0	20.5	31.5							
标贯 1			25.1	7.68	3.42	6.54	3.46	2.32	0.08				
钻孔 399					1	4.2	73.3	21.3	0.20		0.046	0.15	3.48
					2	56.0		33.5	8.5				

表 4 左深槽覆盖层及堆石坝料应力应变和接触面非线性参数

试 样 编 号	γ	c	ϕ	K	n	R_f	D	G	F	备 注
	kN/m ²	kPa	度	—	—	—	—	—	—	
昆 II	23.0	0	44 (37.4)	560	1.0	0.95	2	0.415	0.185	E- μ 模型
铜 I	21.6	0	38.2 (32.5)	333	0.73	0.96	1.0	0.43	0.13	E- μ 模型
昆 I										
内	17.4	0	38.5 (32.7)	400	0.98	0.89	3.3	0.39	0.16	E- μ 模型
外	19.9	0	38.2 (32.5)	560	0.26	0.80	2.68	0.41	0.17	E- μ 模型
标贯 1	18.0	0	38.2 (32.5)	208	0.49	0.86	3.40	0.35	0.14	E- μ 模型
钻孔 399	16.3	0	35.0 (30)	128	0.72	0.82	2.10	0.32	0.16	E- μ 模型
试验条件	γ	c	δ	K_1	n	R_f				接触面五个参数
	kN/m ²	kPa	度	—	—	—				
混凝土/漂卵石 夹砂	24.0 23.0	24.5	25	4500	0.75	0.91				接触面五个参数
混凝土/过渡层	24.0 17.1	11.8	28	6200	0.95	0.85				接触面五个参数
内过渡/外过渡	17.1 19.9	24.5	24	4300	0.80	0.79				接触面五个参数
混凝土/泥浆	24.0 15.2	0	11.3	1400	0.66	0.62				接触面五个参数

表 5 原型模型防渗墙, 挡墙, 岩基混凝土配合比及有关参数

编 号 及 部 位	骨 料 种 类 cm	水 灰 比	级 配	配合比			抗压强度		抗拉 强度 28 天	弹性模量		抗剪断		备 注
				水 泥 (525 标号)	砾石 (小于 20 及 40 cm)	砂	28 天	91 天		28 天	91 天	咬 合 力	摩 擦 角 度	
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	度							
2-1 a ₀ 防渗墙 挡墙 岩基	<40	0.6	2	1	1	3.35	27960		1340	2.84×10 ⁷	3.33×10 ⁷	3040	43	原型 模型 模型 模型 模型
	<20	0.7	1	1	2.55	4.19	20310	22860	2420	2.88×10 ⁷				
	<5	5.0	1	1	2.5		38260		3140	2.47×10 ⁷				
	<5	0.55	1	1	3.3		30900		1860	2.33×10 ⁷				
	<5	0.55	1	1	0.5		3530		1180	6.28×10 ⁶				

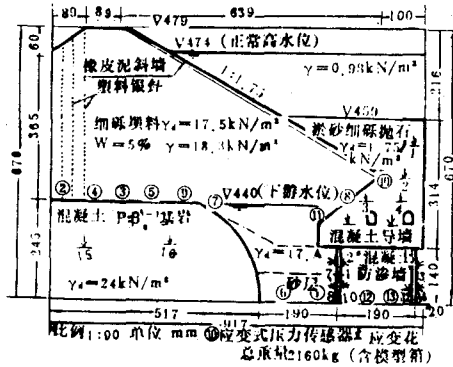


图6 左深槽堆石坝离心模型
(有混凝土防渗墙)试验平面布置图

(二) 堆石坝体及坝基离心模型试验

根据模型箱尺寸及核工业部九院四所离心机使用的最大离心加速度, 确定模型比为 1:90。按设计提供的剖面, 坝基分有、无混凝土防渗墙两种情况, 按施工完建及蓄水至正常高水位且下游水位为 440 米高程等设计条件, 根据 (3) 式计算离心加速度为 90g 时, 堆石坝完建期及蓄水后离心模型运转加载时间 t_m 值。试验时加载按 0~90g 各级离心加速度, 分别测出离心模型各部位预埋的土应力传感器、应变花及变形等指标, 通过微机采集、处理并打印出测试数据。

离心模型试验土应力传感器的埋设及应变花贴片部位可参看图 6。

混凝土挡墙及防渗墙各部位的应变值测出后, 按 (4)~(10) 式分别算出正应力、剪应力、原型大小主应力及其方向角。

$$\text{水平向正应力: } \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_{90^\circ} + \mu \epsilon_{135^\circ}) \quad (4)$$

$$\text{垂直向正应力: } \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_{45^\circ} + \mu \epsilon_{135^\circ}) \quad (5)$$

$$\text{剪应变: } \gamma_{xy} = \epsilon_{45^\circ} - \epsilon_{135^\circ} \quad (6)$$

$$\text{剪应力: } \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xy} \quad (7)$$

$$\text{原型大主应力: } \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

$$\text{原型小主应力: } \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (9)$$

$$\text{主应力方向: } \tan 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (10)$$

式中 ϵ ——平差调整后的电阻应变值, 系 $0^\circ \sim 135^\circ$ 方向;

E ——混凝土的弹性模量, kPa;

μ ——混凝土的泊桑比;

α ——主应力方向角, 度。

以上 (4)~(10) 诸式编成计算程序输入微机, 进行数据处理, 并打印不同设计情况下 1、2 号混凝土防渗墙及挡墙各个部位的 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 、 σ_1 、 σ_3 、 α 等值。

承重式混凝土防渗墙和挡墙在不同设计情况下的应力实测值见表 6。

表6 堆石坝及防渗墙施工完建及蓄水后离心模型试验测试结果

设计情况	试验项目	测试部位	离心加速度	最大主应力	最小主应力	水平向正应力	垂直向正应力	剪应力	垂直变位	备注
				σ_1 kPa	σ_3 kPa	σ_x kPa	σ_y kPa	τ_{xy} kPa	u_p cm	
施工完建	1号混凝土防渗墙	上游	90g	16170	3870	14030	10530	-3480	-1.17	表中 σ_1 、 σ_3 系指测试段内的最大值及最小值， u_p 值向上为正
	2号混凝土防渗墙	下游	90g	6160	3870	5520	5760	-785		
	混凝土挡墙	上游	90g	19010	-2540	17640	2640	-5200	-1.01	
	混凝土挡墙	下游	90g	14630	3520	8210	11230	4620		
	混凝土挡墙	上游	90g					530	-1.72	
蓄水至正常高水位	1号混凝土防渗墙	上游	90g		9480		9840	-2040		
	2号混凝土防渗墙	下游	90g	16400	6490	16260	6640	-1190	-2.42	
	混凝土挡墙	上游	90g		-942	-903		981		
	混凝土挡墙	下游	90g	15260					-3.31	
	混凝土挡墙	上游	90g		1270			-2230		
	混凝土挡墙	下游	90g		-1970			1760	-3.01	

(三) 资料分析

1. 堆石坝及坝基混凝土防渗墙施工期离心模型试验结果 在离心加速度90g时坝体及左深槽实测最大应力为736~952 kPa，其峰值偏向上游（图7），这与堆石坝垂直变形倾向上游一致。蓄水至正常水位后，实测出最大应力为775~932 kPa，其最大值发生在坝轴线附近的坝基及挡墙背后部位（图8）。

2. 堆石坝施工期 在90g时，

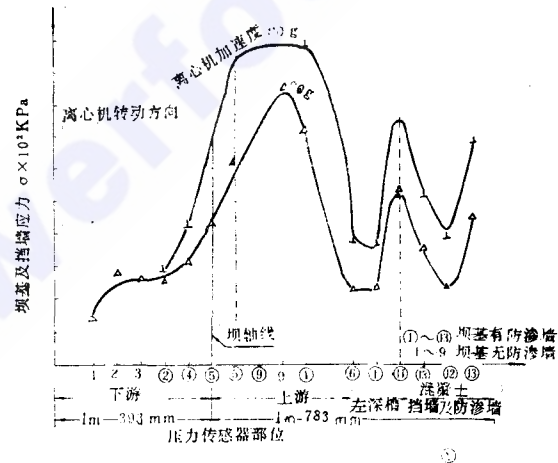


图7 堆石坝及混凝土防渗墙施工期不同离心加速度下坝基及挡墙应力实测值分布图

变形大多发生在左深槽及坝坡部位，垂直变位 (S_p) 一般为16~48 cm，倾向上游，水平变位为12~48 cm，上游面较大（图9），蓄水至正常高水位时，垂直变位为18~40 cm，由于水压力和泥砂压力影响，变形倾向下游，水平变位一般为18~48 cm，仍发生在深槽及坝坡部位（图10）。实测结果得知：垂直变位值为坝高的1.3%，稍大于计算值，但与国外盐泉、勃曼等低于100 m高的堆石坝原型观测沉降量为坝

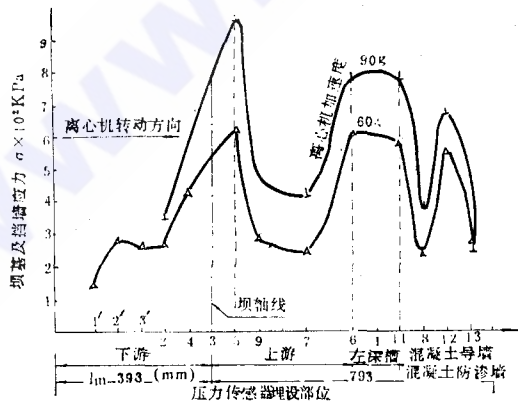


图8 堆石坝混凝土防渗墙蓄水后不同离心加速度下坝基及挡墙应力实测值分布图

注1. 实线示试验前线段；2. 虚线示变形后实测线段；3. 变形单位为厘米；已换算成原型值 (S_p)；4. 图的比例为1:360 单位：厘米。

高 1.1~1.33 % 接近。至于挡墙下面砂卵石层,因防渗墙承受挡墙荷载,故变形量很小。

3. 试验结果 施工完建期试验成果见表 6,离心模型试验测得: 1 号混凝土防渗墙上部三分之一部位的大主应力最大值 (σ_1) 在 90g 时为 6161~16187 kPa, 结构模型试验时, σ_1 为 8908 kPa。2 号防渗墙上部位大主应力最大值为 14627~19012 kPa。结构模型试验, σ_1 为 7740 kPa。蓄水后 1 号防渗墙下游面 σ_1 为 16402 kPa。结构模型试验为 15549 kPa, 2 号防渗墙上游面 σ_1 为 15264 kPa, 结构模型试验为 15755 kPa。

离心模型试验测出数值表明: 混凝土防渗墙以承受压应力为主, 这与有限元计算和防渗墙静力模型试验实测结果一致。也与国内碧口水电站土石坝防渗墙及葛洲坝大江围堰防渗墙原型观测结果一致。

(四) 离心模型试验实测值与有限元计算对比分析

为了进一步分析离心模型试验实测防渗墙的大主应力 σ_1 及垂直变位 u_p 指标, 特根据模型边界条件, 采用模型试料测出非线性应力

应变八个参数, 进行有限元计算, 蓄水至正常高位后的垂直和水平变位值参见图 11~12。同时还将离心模型试验实测的应力应变值与有限元计算值列入表 7。

表 7 结果表明, 防渗墙实测的 σ_1 值与有限元计算值接近。而垂直和水平变形计算值均小于试验实测值, 但试验实测值与混凝土防渗墙三维计算值接近。对比分析结果还表明, 采用 E— μ 模型及非线性应力应变参数计算堆石坝体及覆盖层坝基防渗墙的应力和变形是可行的。

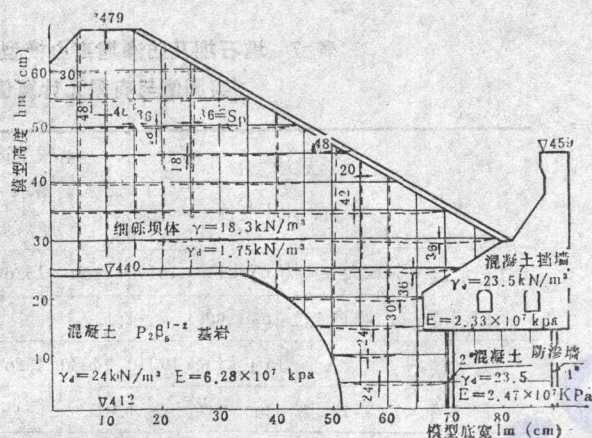


图9 堆石坝及混凝土防渗墙施工完后在离心加速度90g时坝体变形实测图

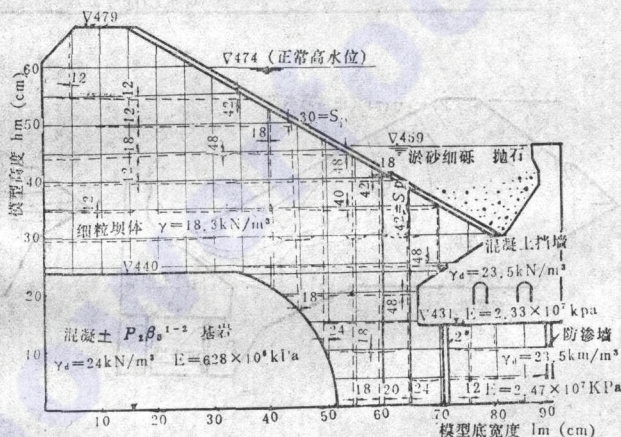


图10 堆石坝及混凝土防渗墙蓄水至正常高水位在离心加速度90g时坝体变形实测图

注: 1. 实线示试验前线段; 2. 虚线示变形后实测线段; 3. 变形单位为厘米已换算成原型值;

4. 图的比例为 1:360 单位: 厘米。

五、结 论

1. 通过巨型离心模型试验进一步论证了铜街子左深槽覆盖层堆石坝基础采用承重式混凝土防渗墙是可行的。并与防渗墙室内静力模型试验实测值、有限元计算值以及碧口

表 7 堆石坝及防渗墙离心模型试验应力变形
实测值与有限元计算值对比表

项 目	最大主应力 及 垂直、水平变位	离心模型试验				有限元计算	
		施工完建 上游/下游 90g		蓄水至正常高水位 上游/下游 90g		按离心模型边界条件 施工完建	蓄水至正 常高水位
1号混凝土 防渗墙	最大主应力 σ_1 kPa	16190	6160	15260	13610	10710	15951
	垂直变位 u_p cm	-1.17		-2.42		-1.16	-0.47
2号混凝土 防渗墙	最大主应力 σ_1 kPa	19010	14630	15260		13160	17470
	垂直变位 u_p cm	-1.01		-3.31		-0.70	-0.28
堆石坝体	最大主应力 σ_1 kPa	960		810		618	736
	垂直变位 u_p cm	-16~-43 (向上为正)		-18~-40 (向上为正)		-26.2	-28.7
	水平变位 v_p cm	12~43 (向上游为正)		18~40 (向上游为正)		52.6	28.7

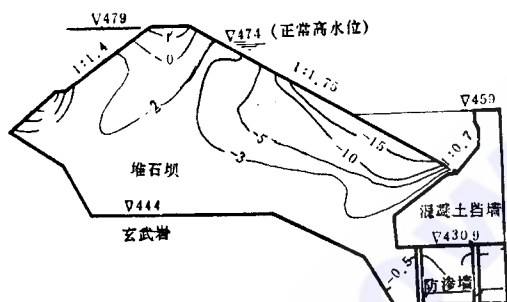


图11 左深槽覆盖层堆石坝及防渗墙蓄水至正常高水位的垂直变形等值线计算图

注：图中变形单位为厘米向下为负。

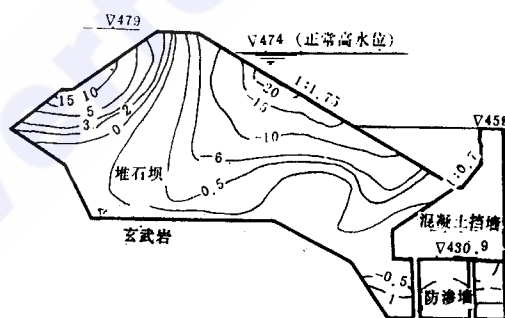


图12 左深槽覆盖层堆石坝及防渗墙蓄水至正常高水位的水平变形等值线计算图

注：图中变形单位为厘米向下为负。

防渗墙原型观测资料对比分析，得到该防渗墙以受压应力为主。

2. 离心模型试验实测混凝土防渗墙上部的大主应力 σ_1 等指标与有限元计算值接近，堆石坝体实测的压力值及变形值也与有限元计算结果较接近。对比分析结果表明，采用 E- μ 模型及非线性应力应变参数计算堆石坝体和防渗墙的应力和变形是可行的。通过离心模型、室内防渗墙结构模型以及有限元计算分析，进一步验证了设计方案技术上可行性和经济上的合理性，效益显著。

3. 这系国内首次结合大型土石坝工程进行的巨型离心模型试验，试验过程中，照像、摄像自动控制；微机采集和处理数据等填补了国内空白，处于先进的技术水平。

4. 我院研制的模型箱和量测系统已为西南交通大学土木系的挡土墙墙后填土的应力变形离心模型试验所采用，在其他类似领域，也具有较大的发展前景。