

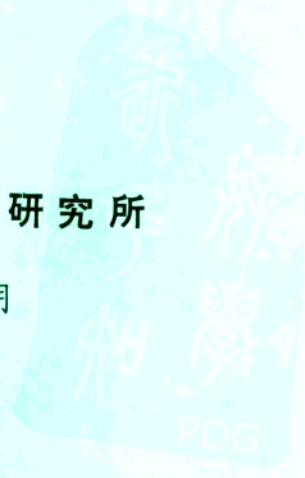
陕西省羊毛湾水库
大坝工程安全论证会
文 件 之 五

羊 毛 湾 水 库

大 坝 渗 透 变 形 试 验 报 告

水 电 部 西 北 省 水 利 科 学 研 究 所

一 九 八 七 年 七 月



土工研究室主任：李祯祥 唐 仑

报 告 编 写：孟凡君

参 加 试 验 者：孟凡君 李大可 郝君任

校 核 者：郝君任 李大可

审 核 者：吴培安

目 录

一、试验任务及目的要求	(1)
二、渗透变形试验	(1)
(一) 试验设备简介	(1)
(二) 试料的采取和控制指标的选择	(3)
(三) 试样制备	(5)
(四) 试验过程简述	(6)
三、试验成果的整理分析	(7)
(一) 试验成果的整理	(7)
(二) 土与砂卵石 (含粗级配) 接触流失试验分析	(7)
(三) 土与裂隙接触流失试验分析	(8)
(四) 砂卵石与裂隙接触流失试验分析	(8)
(五) 折减系数的选择	(9)
(六) 土与砂卵石接触冲刷试验分析	(9)
四、渗透破坏事故分析	(9)
五、结论	(13)
参考文献	

羊毛湾水库大坝渗透变形试验报告

一、试验任务及目的要求

羊毛湾水库位于陕西渭河支流漆水河中游。大坝为碾压式黄土均质坝，坝高47.6米，总库容1.2亿立方米。自1969年冬水库下闸蓄水以来，先后出现渗透破坏——“龙头”东侧塌坑、龙头前大坝迎水坡塌坑、输水洞前坝体击穿、输水洞前土坝塌坑和严重的龙头漏水等，这直接影响水库效益，危及大坝安全。水库枢纽布置及渗透破坏情况见图(1)。

通过对水库运行期间出现的问题分析，各地层之间的渗透变形是危及大坝安全的关键问题之一。羊毛湾水库主要地层由下至上是，寒武——奥陶系灰岩、第三系红土砾石层、第四系黄土层、砂卵石层、河漫滩地。灰岩裂隙发育，漏水严重，其上第三系红土砾石层，岩性紧密坚硬，渗透系数 0.22m/d ，为良好隔水层，水库座落其上，形成“悬库”。历年最高地下水位579.22米，见表(一)，库底高程599.0米，地下水位与库底相距19.78米，库水与地下水不连续。从1982年大坝裂缝调查和室内渗流试验结果来看，大坝浸润线呈垂直下降型，也说明它是一座“悬库”。由此可见，水库以垂直渗流为主，因此垂直渗透变形是渗透变形的主要问题，另一方面龙头部位曾发生严重漏水，因而水平渗透变形亦不可忽视。

经上述分析，并根据“羊毛湾水库‘渗透稳定分析报告’的工作要点”中第二、(3)项的要求，提出渗透变形试验的任务如下：

1. 天然黄土和坝体土分别与砂卵石接触的

①垂直向接触流失情况；

②水平向接触冲刷情况。

2. 天然黄土、坝体土、天然红土、砂卵石层分别与基岩裂隙的垂直向接触渗透破坏试验。

据此确定出渗透变形试验组次，见表(二)。

二、渗透变形试验

(一) 试验设备简介

试验设备(见照片(1))共分：稳压及压力控制系统、供水系统、抗渗仪及测压系统四部分。

1. 稳压及压力控制系统 气压由空压机提供，经电接点压力表、调压阀和气动定值器三级稳压控制，可产生多级稳定压力。最大压力 4.0kg/cm^2 ，精度 0.01kg/cm^2 ，小压力时，可用定水头渗透试验用恒压设备提供。

2. 供水系统 来自压力控制系统的稳定气压，进入供水罐中的橡皮气囊，将压力传给水源，把有压水输送到抗渗仪中的试样内，便可进行试验。

表(一)

羊毛湾水库石灰岩地下水位统计表

孔 号	地面高程 米	孔 深 米	灰 岩 顶板高程 米	水 位 高 程		备 注
				勘 探 期	1986年9月 下 旬	
59—31	598.84 (孔口高程)	125.12	586.19	518.49	/	坝下斜向截流槽孔
78—1(H ₁)	652.84 (孔口高程)	141.94			548.43	坝上游左岸
78—2(H ₁)	646.47 (孔口高程)	138.80			549.96	
82—9	610.45	120.00	598.97	574.98	未观测	
82—10(H ₁)	600.72	125.49	515.51	571.66	566.10	
82—11(H ₁)	630.96	150.45	530.81	536.93	堵 塞	坝下游右岸阶地
82—12(H ₁)	640.98	150.18	603.18	549.89	544.32	上游左岸
82—13(H ₁)	603.44	100.73	597.04	579.22	571.30	坝背水坡脚
86—1(H ₁)	648.25	119.60	640.65	565.65	559.70	左肩溢洪道南
86—2(H ₁)	605.29	76.41	583.50	566.29	566.29	坝下游羊毛湾学校
86—20(H ₁)	647.23	117.58	614.66	564.03		坝右端龙脖子上

表(二)

计 划 试 验 组 次

序 号	接 触 关 系	试 验 项 目		组 次	备 注
		水平接触冲刷	垂直接触流失		
1	天然黄土与砂卵石 (最大、最小容重)	2	2	4	龙脖子段
2	坝体土(两种容重)与 砂卵石(一种容重)	2	2	4	河 床 段
3	坝体土(三种容重)与 基岩(四种裂隙)		12	12	河 床 段
4	砂卵石(两种容重)与 基岩(四种裂隙)		8	8	河 床 段
共 计		4	24	28	

3. 抗渗仪

①垂直抗渗仪 它是由长50cm, 内径18cm的有机玻璃筒制成, 如照片(1)所示, 用来做垂直向接触流失试验。

②水平抗渗仪 与土工试验规程下册中所规定的相同, 其尺寸为 $90 \times 30 \times 30$ cm, 试样长30cm, 用来做接触冲刷试验。

4. 测压系统 它由三只精密压力表和测压管组成。压力表量程 4kg/cm^2 , 精度 0.01kg/cm^2 ; 测压管可读到1mm水头。

(二) 试料的采取和控制指标的选择

1. 土料的采取和控制指标的选择

筑坝土料来自1、2、3、4、5、6号土场(施工编号), 见图(2)。但以3、4、5、6号土场为主, 2号土场的土多用于坝基轴线以上部分。根据1966年“羊毛湾水库筑坝土料特性表”^[1]和1986年羊毛湾水库土料物理性质成果表, 见表(三), 对照比较, 六个土场土的物理性质都很接近, 勿须每个土场都取土。因此我们从位于坝两端的3、4、5、6号土场取得试验用土料, 等重量混合后使用, 其级配见表(三), 级配曲线见图(3)。

大坝设计干容重为 1.65g/cm^3 , 从筑坝时和以后的质量检查结果看出, 干容重范围为 $1.432 \sim 1.750\text{g/cm}^3$ 。因此试验中干容重选为1.40、1.50、1.60、 1.70g/cm^3 , 一方面模拟实际, 另一方面探求抗渗强度随干容重变化的规律。

大坝设计含水量为18~20%, 由1986年坝体质量检查资料^[2]可知: 南井(86-1°)、北井(86-2°)、下井(86-3°)的含水量平均值分别为20.97%、20.0%、17.09%, 据此, 试样含水量取为19%, 允许误差为 $\pm 0.5\%$ 。

2. 砂卵石料的采取和试样控制指标的选择

在河床段, 1966年直接在河床砂卵石上填土筑坝, 而对河床砂卵石能否起反滤作用, 是否发生接触冲刷的问题, 设计时均未研究^[3], 因此, 在坝下游河床取砂1、砂2, 在老河床上取砂3、砂4, 在1966年地质剖面V—V探槽下的探井中, 取砂5、砂6, 取样位置见图(2), 颗粒级配见表(四), 级配曲线见图(4)、图(5)。砂1、砂2级配比较接近; 砂3、砂4级配比较接近。为模拟实际, 将砂1、砂2混合, 作为土与砂卵石接触垂直流失试验用料; 按砂3、砂4粗外包线配料, 作为土与砂卵石粗级配接触流失试验用料; 将砂5、砂6混合, 作为土与砂卵石接触冲刷试验用料。

规程规定, 仪器内径与试验土样的最大粒径(或 d_{80})之比为4~6^[4], 垂直抗渗仪内径18cm, 因而接触垂直流失试验选择的砂卵石最大颗粒为40mm。水平抗渗仪横剖面为 30×30 cm, 参照此规定, 亦选择最大粒径为40mm, 对于超粒径部分, 采用等重量代替法处理, 处理后的级配曲线见图(6)。砂卵石的干容重分别按实测值 2.15g/cm^3 、 1.886g/cm^3 控制。

3. 岩石裂隙试样指标的选择

坝体土在左、右岸有两处与灰岩直接接触, 根据此两处灰岩裂隙统计, 裂隙宽度为0.1~0.2cm的占72.3%, 0.2~0.5cm的占15.2%, 0.5~1.0cm的占7.25%, 1.0~2.0cm的占3.08%^[5]。宽2.0cm以上的裂隙数量很少, 因此试验中选择0.1、0.2、0.5、1.0cm四种裂隙宽度。

表(三)

羊毛湾水库土料物理性质总表

试验室土样编号							
野外土样编号							
试验项目	符	单 位	3 *	4 *	5 *	6 *	3*~6*
比 重	G _s		土 场	土 场	土 场	土 场	混 合 土
颗 粒 组 成 %	D	毫 米	2.73	2.72	2.73	2.73	2.73
卵 >20							
砾 20~2							
砂 2~0.05			23.5	19.0	18.0	16.0	18.0
粉 0.05~0.005			52.5	55.2	59.5	50.0	56.0
粘 <0.005			24.0	25.8	22.5	34.0	26.0
限制粒径	D ₆₀	毫 米	0.0230	0.0198	0.0215	0.0157	0.0208
平均粒径	D ₅₀	毫 米	0.0153	0.0142	0.0155	0.0108	0.0146
有效粒径	D ₁₀	毫 米	0.00190	0.00140	0.00190	0.00085	0.00145
不均匀系数	C _u	米	12.1	14.1	11.3	18.5	14.3
土 壤 分 类			重粉质壤土	重粉质壤土	重粉质壤土	粉质粘土	重粉质壤土
稠 度	W _L	%	30.5	26.6	28.2	28.0	28.8
塑 限	W _p	%	17.5	15.8	16.4	16.4	17.6
塑性指数	I _p		13.0	10.8	11.8	11.6	11.2
土 壤 分 类			CI 壤土	CI 壤土	CI 壤土	CI 壤土	CI 壤土

表(四)

羊毛湾水库砂卵石颗粒组成表

试验室土样编号										
野外土样编号										
试验项目	符	单 位	砂1	砂2	砂3	砂4	砂5	砂6	砂5 砂6 混合	
比 重	G _s									
颗 粒 组 成 %	D	毫 米	42.2	40.5	57.6	52.1	46.33	21.5	37.9	
卵 >20										
砾 20~2			27.3	32.9	21.5	26.2	43.48	54.4	47.2	
砂 <2			30.5	26.6	20.9	21.7	10.19	24.1	14.9	
粉 0.05~0.005										
粘 <0.005										
限制粒径	D ₆₀	毫 米	23	21	36	39	24.0	12.5	19.0	
平均粒径	D ₅₀	毫 米	13.4	14.8	26.5	24.5	18.5	9.5	14.2	
有效粒径	D ₁₀	毫 米	0.24	0.44	0.57	0.50	2.0	0.3	0.6	
不均匀系数	C _u		95.8	44.7	63.2	78.0	12.0	41.7	31.7	
土 壤 分 类			粗砾	粗砾	卵石及碎石	卵石及碎石	粗砾	砾	粗砾	

4. 试验用水

库水与试验用水水质分析成果见表(五)。从表中可以看出,试验用水与库水相比, Na^+ 的含量比较接近,而 Ca^{++} 的含量为库水的两倍,由于 Na^+ 促使土料分散, Ca^{++} 抑制土料分散,故试验用水抑制土料分散。

5. 每级压力历时的确定

文献[5]中每级加压历时为20~30分钟,并做了长期渗流作用下,粘土与砂卵石接触流失试验,其结论是:时间对抗渗强度没有影响。江西省水利所做了每级压力历时50分钟、两小时、四小时的粘土流失往复加压对比试验。结果由于试验用水均含气体,每级压力历时越长,影响越大,因此,建议每级压力历时不宜拖长。他们采用的每级压力历时为60分钟。文献[6]每级压力历时为45分钟。

结合本试验具体情况,我们采用每级压力历时为50分钟。

(三) 试样制备

1. 土与砂卵石垂直接触流失试验的试样制备

将四个土场的土过2mm筛,以等重量混合,按19%的含水量配水,放置一昼夜备用。试样长度采用8cm,按控制干容重计算所需湿土重,分四层在压力机上压制。每层加1/4土重,压至2cm后,刨松土面,使上、下层土接触良好,同时击实周边,以防沿仪器壁渗漏。

倒置抗渗仪,按所需级配,配好砂卵石,装样至控制干容重 $2.15\text{g}/\text{cm}^3$,砂卵石样长10cm,为此,采用摆放大粒径和戳捣等措施,加底盖,正立。土样上面加装砾石至顶盖,以防止土样被冲刷和浸水膨胀。加顶盖,上紧拉杆,试样制成。

然后由下向上浸水自然饱和,饱和时间因试样干容重不同而不同,其范围是10~200小时。试验时水由上向下渗流,试样处于淹没状态。

2. 土与裂隙接触流失试验的试样制备

① 基岩裂隙的模拟

此项试验的目的是测求基岩裂隙宽度对粘土抗渗强度的影响。因此基岩裂隙模型只要求形成1、2、5、10mm四种裂隙宽度,而不考虑化学溶蚀及时间因素。这样我们制作了一个有机玻璃模型,调节中间夹板宽度,形成四种裂隙宽度。

② 制样

将裂隙模型装配成某一缝宽,放入抗渗仪,再将裂隙模型与抗渗仪接触处的缝隙用橡皮泥堵塞,以固定模型并防止周边漏水。制样时裂隙中插入插板,压制土样后拔出插板,土样上加防冲层,加上、下盖,上紧拉杆,试样制成。

为模拟羊毛湾水库垂直渗漏的实际情况,直接加水于试样上部,当底部出水时,开始测定。试验是在试样不被淹没的情况下进行的。

3. 砂卵石与基岩裂隙垂直接触流失的试样制备

按(三)2的方法,装配好裂隙模型,再将砂1、砂2按所需级配配好混合,砂样高20cm,分两层于振动台上加压振动密实。振动台的振动频率为2800次/分,振幅0.2~0.5mm,振动时间8~10分钟。砂样上面加防冲层至顶盖,抽出插板收集试验前漏砂量,加盖并上紧拉杆。

试样由下向上浸水饱和,以便排出砂样中的气体,试验时水由上向下渗流,试样处于不淹没状态。

表(五)

试验用水与河水水质分析成果表

项 目 \ 数 值 \ 水 样		河 水	试验用水	备 注
pH值		8.1	6.9	
总碱度(德国度)		23.8	13.74	
总硬度(德国度)		7.8	14.50	
阳离子	$K^+ + Na^+ (mg/L)$	139.13	152.58	
	$Ca^{++} (mg/L)$	29.82	58.11	
	$Mg^{++} (mg/L)$	15.76	28.14	
阴离子	$Cl^- (mg/L)$	5.9	228.67	
	$SO_4^{--} (mg/L)$	9.16	21.85	
	$HCO_3^- (mg/L)$	593.95	275.31	
	$CO_3^{--} (mg/L)$	7.68	/	
资 料 来 源		1958年地质报告	本所化学组	

4. 土与砂卵石接触冲刷试验的试样制备

(1) 土样位于砂卵石上部时, 用塑限附近的粘土泥团涂于仪器底及两侧壁填砂卵石部份, 厚约1cm, 以增加渗径防止试样沿仪器壁破坏, 砂卵石共厚15cm, 分两层装入, 防止砂卵石离析, 然后击实到所要求的干容重 $1.886g/cm^3$, 装好测压管测头, 再填土, 控制干容重 $1.50g/cm^3$, 分五层装入仪器, 每层厚3cm, 共15cm, 每层击实结束后再将两侧壁处进一步击实, 以防沿仪器壁破坏, 并将表面刨毛。最后在试样顶部铺一层厚2cm的海绵, 使试样与仪器盖接触良好且不漏水, 注水使试样饱和。

(2) 土样位于砂卵石下部时, 按上述方法先将土样分五层击入仪器, 在土样上面装好测压管的测头, 仍按前述方法在上部装砂卵石, 同样要在两壁涂粘土泥团, 最后在砂卵石顶上铺两层厚1cm的海绵。饱和方法同前。

试验都是在下游淹没的情况下进行的。

(四) 试验过程简述

1. 接触流失试验

空压机接通电源, 打开各阀门, 把稳定的有压水输送给抗渗仪, 进行试验。初始水压和每级压力增量, 按估计破坏坡降分10~15级加压。每级压力历时50分钟, 先稳定10分钟后测定流量, 每隔相同时间测量一次, 共测三次。同时, 计算渗透坡降(i)和渗透流速(v), 并绘制 $\log i \sim \log v$ 关系曲线。

2. 接触冲刷试验: 将饱和好的试样, 接通进水管, 打开上、下游上部排气孔, 并调整好测压管水位, 放水入仪器, 提升水平箱, 在不同的水头差下, 测定出水流量 Q , 并绘制 $\log i \sim \log Q$ 关系曲线, 当曲线发生转折时, 认为已破坏。试验结束后, 按相反手续拆开仪器, 切开试样观察冲刷情况并记录。

试验成果见表(六), 试验曲线见图(7)~图(14)。各项试验的破坏标准如下:

(1) 土与砂卵石接触流失试验的破坏标准:

① 坡降陡降, 流速激增; 或坡降上升缓慢, 流速增大很快。

② $\log i \sim \log v$ 曲线发生跳跃现象。

(2) 土与裂隙接触流失试验的破坏标准:

① 土与裂隙接触流失处, 有泥流出。

② 土样被突然击穿, 水流不断流出。

(3) 在砂卵石与裂隙接触流失试验中, 随着渗透坡降的增加, 渗透水流间断地将细砂带出, 在装样后抽出插板时, 沿裂隙也有漏砂, 其总漏砂量及级配见表(七)。

(4) 土与砂卵石接触冲刷试验的破坏标准为 $\log i \sim \log Q$ 关系曲线发生转折时定为破坏点。

三、试验成果的整理分析

(一) 试验成果的整理

根据以往粘土流失试验^{[5][6][7]}可知, 渗透破坏坡降 i_r 与干容重 γ_d 的关系呈双曲线。我们的试验点虽然比较少, 但也证实了这一点。其规律符合下列公式:

$$i_r = \frac{A \cdot \gamma_d}{1 - B \cdot \gamma_d}$$

化为线性关系: $i_r / \gamma_d = B i_r + A$

应用线性回归法, 求得 A、B 值如下表:

试验组次编号	试验次数	A	B	裂隙宽度 (mm)	备 注
土/砂- $\gamma_d-2.15$	4	3.388	0.593		$i_r = \frac{A \cdot \gamma_d}{1 - B \cdot \gamma_d}$
土/石-1- γ_d	7	6.871	0.572	1	
土/石-2- γ_d	4	3.433	0.565	2	
土/石-5- γ_d	7	1.626	0.582	5	
土/石-10- γ_d	5	1.232	0.579	10	
土/石-b-2.15	4				b 为裂隙宽度

(二) 土与砂卵石(含粗级配)接触流失试验分析

试验成果见表(六), $\log i - \log v$ 曲线见图(7)。在试验过程中达到某一渗透坡降后, 由于土的流失, 上、下游逐渐连通, 或比降迅速减小, 而流速激增, 表现为 $\log i - \log v$ 曲线突降, 见图(7) $\gamma_d = 1.456$ 的曲线; 或比降上升缓慢甚至不上升, 而流速增大很快, 表现为曲线上升平直延展, 见图(7) $\gamma_d = 1.503$ 的曲线。其原因: 前者干容重较小, 结构力低, 一旦发生流失, 破坏迅速, 上、下连通, 产生这种现象; 而后者干容重较大, 结构力增大, 流失逐渐进行, 因而曲线平缓。还有一种现象, 就是经坡降增加缓慢, 流速增加很小, 曲线平缓延展后, 向上陡折, 然后又平展。我们认为这是由于原来形成的渗流通道被土颗粒阻塞, 见图(7)

$\gamma_s = 1.624$ 的曲线。从图(7)的四条曲线来看,曲线起始段基本上呈直线延展,其后形态各异,表现出不同的破坏特征,反映了在相同物性指标下,破坏坡降随干容重的增大而增大的规律,这与前人的试验成果一致。但因砂卵石的试验容重小于实测容重,故结果偏于安全。图(7)中 $\gamma_s = 1.531$ (粗)及 $\gamma_s = 1.570$ (粗)两条曲线,是土与砂卵石粗级配接触流失试验曲线。由图看出:试验结果和土与砂卵石较细级配接触流失试验的规律相同。这可能是两种级配比较接近,等重量代替后级配也比较接近的缘故。

分析破坏坡降(i_r)与干容重(γ_s)的关系曲线(见图15),发现当干容重增大到某值 γ_s' 时,随 γ_s 增加, i_r 增加迅速。用渐近线法,求得本试验 $i_r-\gamma_s$ 曲线的 γ_s' 值为 1.59g/cm^3 。

(三) 土与裂隙接触流失试验分析

土与裂隙接触流失引起的渗透变形问题比较突出。为使成果更加可靠,除做了24组土与裂隙接触流失试验外,又增做了土与钻孔接触流失、延长每级压力历时的土与裂隙接触流失试验。试验成果见表(六),试验曲线见图(8)~图(11)。同时增做了2组土与裂隙、钻孔接触的渗流场电模拟试验。

分析全部试验曲线可见,除个别曲线外,基本上呈直线延展,在相同物性指标条件下,同一缝宽抗渗强度随干容重增大而增大;同一干容重,抗渗强度随缝宽增大而减小。缝宽在2mm以下时,试验均以流泥为破坏特征;缝宽为2mm,容重小时,试验以流泥为破坏特征;缝宽大于2mm时,试验均以击穿为破坏特征。土样击穿均呈不规则圆形洞,容重小的上大下小,而容重大的,则上小下大,见照片(2)、(3)。这可能是结构力随干容重增大而增大,抗渗强度也随之增大的缘故。

为说明压力历时对抗渗强度的影响,增加了在裂隙宽度为2mm,土样干容重为 1.638g/cm^3 条件下,每级压力历时为4小时的土与裂隙接触流失试验,求得破坏坡降为60.93,而在同样条件下,每级压力历时为50分钟时的破坏坡降为75.10,前者为后者的81%,试验曲线见图(9),说明选用每级压力历时为50分钟是可以的。

为了模拟实际工程中曾因钻孔未封堵而造成坝体被击穿的渗透破坏事故⁸,求其破坏坡降,增作了在钻孔直径为50mm,土样干容重为 1.634g/cm^3 条件下的接触流失试验。求得破坏坡降为17.2。具体分析见工程事故分析项中有关部分。

在土与裂隙或钻孔接触流失试验中,由于裂隙面积或钻孔面积与土样面积不相等,造成抗渗仪中等势线分布不均匀,各点的渗透坡降不同,而本报告中所给出的破坏坡降为平均值。为了求出渗流出口处(土与裂隙接触处)的坡降,又做了土与裂隙、钻孔接触时渗流场的电模拟试验,求得其中等势线分布情况,见图(18)、图(19)。试验结果表明,实际破坏坡降为平均破坏坡降的2倍,即平均值偏于安全。

分析土与裂隙接触流失试验的 $i_r-\gamma_s$ 曲线见(图16),发现当干容重增大到某值 γ_s' 时,渗透破坏坡降 i_r 随干容重增大而迅速增大。用渐近线法,求得1~10mm4种裂隙宽度的 $i_r-\gamma_s$ 曲线的特征值 γ_s' 分别为1.64、1.62、1.62、 1.62g/cm^3 。因此从抗渗强度要求来看,干容重应大于 1.62g/cm^3 。

(四) 砂卵石与裂隙接触流失试验分析

试验成果见表(六),试验曲线见图(12)。分析曲线可知,除因供水罐换水而引起曲线弯折外,曲线呈直线延伸。当压力达到一定程度时,曲线上折,随后又呈直线延伸。至于

曲线上折的原因,我们认为:砂卵石中的小颗粒被渗透水流带走,形成某一厚度相对稳定的“次生反滤层”,示意图见图(24)。当压力增大到某值时,打破原“次生反滤层”的稳定,使其向上扩展,而反滤层上部则因小颗粒运移聚集,渗透性降低,使曲线上折,压力不断增大,“次生反滤层”不断扩展,因而没有明显的破坏点。

(五) 折减系数的选择

粘土渗透变形试验结果的折减系数 η ,直接关系着大坝病害处理和大坝安全。折减系数过大,势必造成处理费用的浪费;折减系数偏低,则危及大坝安全。但是,折减系数如何选取至今尚无统一规定,如:达卫登柯夫建议 η 采用3,石头河水库 η 则采用20。而文献[5]对折减系数进行了比较深入的研究,即将施工含水量偏低,干容重低于设计干容重,渗流区饱和度低于100%,以及试验未考虑土与反滤或光面接触或反滤层的分离等四个不利因素共同组合起来,决定折减系数 η 采用6.5—12.5。我们依据羊毛湾水库的实际情况,考虑了这四个方面的因素后选择折减系数 η 为10。

(六) 土与砂卵石接触冲刷试验分析

1.当土样位于砂卵石上部时,由图(13)及试验结果描述可知:当渗透坡降 $i = 0.185$ 时, $\log i \sim \log Q$ 曲线即发生转折,说明整体试验首先从砂卵石内部破坏,细颗粒被带出,结构重新调整;当渗透坡降达到1.0时,虽然坡降增加较大,但渗流量却增加不多,曲线又向左转折。由试验后观察可知砂卵石中大部分细粒已被冲出,只有中心部分尚留有部分细粒。由此看来,土与砂卵石接触受水平冲刷时,其破坏首先是在砂卵石内部产生,沿接触面并不首先产生破坏。只有当渗透坡降很大,渗流量较大时才可能引起接触面的水平冲刷。由于受设备限制,未能再增大坡降与流量。

2.当土样位于砂卵石下部时,由图(14)及试验结果观察与描述可知:当渗透坡降 $i = 0.13$ 时, $\log i \sim \log Q$ 曲线稍有转折,再增大坡降,曲线又返回原曲线规律;当渗透坡降 $i = 3.1$ 时,渗流量迅速增大,试样破坏。观察其破坏情况(见图(14)中小图),在仪器一侧边壁砂卵石与土样接触处原涂粘土团已被冲掉。两侧及接触面处砂卵石中细粒部分已被冲掉,只剩下骨架部分。由此可见:这种情况下的破坏仍是首先在砂卵石内部产生,逐步扩大,只有当渗透坡降很大时,才能产生其他接触面的破坏,例如本组试验中粘土泥团部份被冲掉。

3.接触冲刷受试样原来组成条件影响很大,以上两组试验均系扰动后的砂卵石与土样,其结构与接触面很难模拟,所以试验结果仅供参考。

四、渗透破坏事故分析

(一) 龙头东侧塌坑

1968年8月1日,在大坝渡汛小断面施工至618米高程时,发生了一次洪水,库水位为611.0米,致使龙头东侧上游坡桩号0+675,距坝轴线86米,标高610米处产生一塌坑,直径5—6米,呈不规则圆形,深约1米。此处地层由上到下为砂质粘土、砂卵石、灰岩^[1],见图(20)。上层厚3.57米(表层为人工铺盖^[2],厚3米),砂卵石层厚5.02米。由水头差 $\Delta H = 7.57$ 米,渗径 $L = 6.57$ 米,计算出此塌坑的破坏坡降 $i_{\text{破坏}} = \frac{7.57}{6.57} = 1.15$ 。而这次室内

表(六)

渗透变形试验结果总表

序号	试验组次 编 号	实 测 指 标				渗水变化 情 况	渗透 破坏 形式	渗透破坏 坡降 i_F	备 注
		土	砂	缝 宽					
		γ_d (g/cm ³)	w(%)	γ_d (g/cm ³)	(mm)				
1	土/砂- γ_d	1.456	19.0	1.934				18.5	
2	"	1.593	19.0	1.968				56.50	
3	"	1.621	19.0	2.067				221.7	
4	"	1.670	19.0	2.159				425.0	
5	土/石-1- γ_d	1.389	18.5		1	清	流泥	65.2	
6	"	1.429	18.9		"	清→混	流泥	41.85	
7	"	1.597	18.5		"	清	流泥	88.30	
8	"	1.597	19.6		"	清→混	流泥	99.69	
9	"	1.616	18.6		"	清	流泥	84.93	
10	"	1.607	19.6		"	清→混	流泥	98.88	
11	"	1.694	19.6		"	清	流泥	380.73	
12	土/石-2- γ_d	1.398	18.5		2	清→微混	流泥	29.55	
13	"	1.456	18.5		"	清→混	流泥	33.28	
14	"	1.584	19.2		"	清→微混→混	击穿	48.83	
15	"	1.662	18.5		"	清→微混	击穿	93.74	
16	"	1.638	19.0		"	清	击穿	60.93	每级压力历时四小时
17	土/石-5- γ_d	1.401	18.9		5	清	击穿	8.06	$i = 9.19$ 时击穿
18	"	1.415	18.6		"	清	击穿	18.28	
19	"	1.513	18.6		"	清→混	击穿	17.62	
20	"	1.516	19.6		"	清→混	击穿	14.44	
21	"	1.613	19.6		"	清→混	击穿	58.36	
22	"	1.698	18.9		"	清	击穿	59.33	
23	"	1.696	19.6		"	清	击穿	192.17	突然破坏, 无 $i-v$ 曲线
24	土/石-10- γ_d	1.499	18.5		10	清→混	击穿	7.90	
25	"	1.512	18.5		"	清→微混→混	击穿	18.22	

续表(六)

序号	试验组次 编 号	实 测 指 标			渗水变化 情 况	渗透 破坏 形式	渗透破坏 坡降 i_F	备 注
		土		砂				
		γ_d (g/cm ³)	w(%)	γ_d (g/cm ³)	缝 宽 (mm)			
26	"	1.580	19.2		"	清	击穿	24.77
27	"	1.685	18.5		"	清→微混	击穿	64.05
28	"	1.709	19.2		"	清→混	击穿	221.10
29	土/石- $\phi 50 \pm \gamma_d$	1.634	19.0		钻孔 $\phi 50$	清	击穿	17.20
30	砂/石-b-2.15			2.094	1		未破坏	土与钻孔接触流失 漏砂(试验最大比降76.23)
31	"			2.141	2		未破坏	漏砂(试验最大比降77.37)
32	"			2.067	5		未破坏	
33	"			2.121	5		未破坏	漏砂(试验最大比降76.221)
34	"			2.136	10		未破坏	漏砂(试验最大比降79.94)
35	土/砂- γ_d -2.15	1.513	19.2	2.15				49.96
36	"	1.570	19.2	2.15				146.54
37	土/砂-1.50-1.886	1.508	18.9	1.886				0.185
38	砂/土-1.886-1.50	1.500	18.9	1.886				0.130

表(七)

砂卵石与裂隙接触流失试验漏砂量总表

数值 试验 组次	项 目 粒径(mm)		漏 砂 重 量 (g)								总漏砂量 (g)
	10~5	5~3	3~2	2~1.2	1.2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.12	0.12~0.075	0.075~0.045	<0.045	
砂/石-1-2.15	0	0	0	0	0.47	0.93	1.19	4.90			7.49
砂/石-2-2.15	0	0	0.145	0.20	13.53	11.92	3.85	17.14			45.89
砂/石-5-2.15	0	0.71	0.56	2.75	21.24	11.90	6.33	17.92			60.51
砂/石-10-2.15	1.60	2.305	1.735	6.86	27.24	17.29	5.31	19.57			81.82

试验当控制干容重 $\gamma_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ 时, 所得破坏坡降 $i_F = 20$, 允许坡降 $i_F = \frac{i_F}{\eta} = \frac{20}{10} = 2.0$,

由 $i_F > i_F$ 看出, 塌坑不是土与砂卵石接触流失引起的。

(二) 输水洞前坝体击穿

1973年8月,在输水洞前标高620米处,发现漩涡漏水点,该处已为坝体所覆盖。开挖后质量很好,但发现填土2.5米以下为灰岩,系1958年在漆惠渠旁搞地质勘探时的钻孔未封堵^[3],见图(21),由此处水头差 $\Delta H=18.4$ 米,渗径 $L=2.5$ 米,求得钻孔处的破坏坡降 $i_{F孔}=7.36$ 。这次试验求得 $\gamma_d=1.634\text{g/cm}^3$ 时,土与钻孔($\phi 50\text{mm}$)的接触流失试验的破坏坡降 $i_F=17.2$,允许坡降 $i_V=1.72$, $i_V < i_{F孔}$,所以发生土与钻孔接触流失,导致坝体击穿实属必然。

(三) 龙头前土坝迎水坡塌坑

1982年3月22日,库水位为633.46米,在迎水坡633米戗台上,桩号0+621.5,距坝轴线29.94米处,发现一个椭圆形塌坑,南北长2.9米,东西宽3.06米,深2.5米。此处地层由上至下是黄土、红土及红土砾石、灰岩^[3],见图(22)。原状黄土及坝体土厚17.6米。其水头差 $\Delta H=18.07$ 米,由此算得其破坏坡降 $i_{F坑}=\frac{18.07}{17.6}=1.03$ 。按不利条件用上与基岩裂隙接触流失试验结果与其比较。当试验干容重 $\gamma_d=1.50\text{g/cm}^3$ 时,其破坏坡降 $i_F=27.0$, $i_V=2.7$, $i_V > i_{F坑}$,而用上与钻孔的接触流失试验得出的破坏坡降 $i_F=17.2$ ($\gamma_d=1.634\text{g/cm}^3$), $i_V=1.72$,与破坏坡降 $i_{F坑}=1.03$ 比较接近。但地层中有红土及红土砾石层,发生接触流失的可能性不大,塌坑的产生当属他原因。

(四) 输水洞前土坝塌坑

1986年12月10日,冬灌结束,在水库左岸坡标高624.0米处,输水洞前发现一塌坑,呈不规则圆形。经开挖,1.5米深处为1958年所修输水洞,作废以后进行了回填封堵,但未填实,洞顶有空隙^[3],见图(23)。经查1986年最高库水位为630.12米,则水头差 $\Delta H=7.62$ 米,渗径 $L=1.5$ 米,由此算得破坏坡降 $i_{F坑}=5.08$ 。由土与裂隙接触流失试验结果可知: $\gamma_d=1.60\text{g/cm}^3$,缝宽为1、2、5mm时其破坏坡降 i_F 分别为91.5、58、38.5,允许坡降 i_V 分别为9.15、5.8和2.35。可见当裂隙宽度大于2mm时,就可能发生接触流失,产生塌坑。所以此塌坑可能是洞顶有空隙和缝所致。

(五) 龙头漏水

水库于1969年12月27日下闸蓄水,1970年10月2日当库水位在628.95米时,发现有坝肩龙头下游坡脚严重漏水,出水点有集中承压小孔涌流多处,其范围为:龙0+100~0+213,宽113米,标高602米,继而延伸到607米,见图(1)。总渗漏量100L/S,最大泉眼出流量15L/S。后在迎水坡水中倒土20万立方米,龙头下游坡脚设反滤坝,漏水中断^[3]。

右坝肩与龙脖子、龙头相接,其组成岩层有第四系砂卵石、原状黄土、第三系红土砾石层及寒武——奥陶系灰岩。桩号0+430~0+520之间,在高程604~614米以上为河床二级阶地沉积物——上部是风坡积黄土、古土壤和原状黄土,中部为河流冲积砂卵石与砂壤土,其下为灰岩。我们剖开1966年V—V剖面探槽,在坡脚打探井证实二级阶地上这层第四系砂卵石层的存在。此处砂卵石层恰为水平渗漏水集中点,桩号0+520以北至三级阶地,上部为原状黄土、古土壤层,中部为红粘土与粘土砾石层,下部为灰岩。从地层、地貌上看,红土砾石层和砂卵石层均上、下游贯通,可成为水平渗漏通道。据上游截流槽施工剖面看,右端已置于灰岩之上,切断了一级阶地,而二、三级阶地没有切断,因此水平渗漏是存在的。

第三系红粘土，连续性好，坚硬密实，为良好隔水层，第三系砂砾石一般充填有粘土或有些呈胶结状，不存在大量漏水问题。因此，推测龙头漏水主要通道是二级阶地的砂卵石层。

1970年在右坝肩迎水坡水中倒土堵漏处理，以龙头前为重点，倒土20万立方米，长403米，同时在背水坡脚增设反滤排水措施，使龙头漏水停止。我们认为这可能是倒土堵住了二级阶地砂卵石层的渗漏入口的结果。

五、结 论

通过对试验结果及工程事故的分析，我们认为：

1. 在河床段，坝体填土与砂卵石接触处，当填土干容重大于 1.6g/cm^3 时，其抗渗强度较高，一般不会引起渗透破坏。但若填土干容重较小时，水位再升高，也有可能发生渗透破坏。

2. 由砂卵石与裂隙接触流失试验看出，在这种情况下砂卵石无明显的破坏点。其原因是砂卵石形成“次生反滤层”，当压力不断提高时，“次生反滤层”不断扩大，故渗透破坏的可能性不大。

3. 土与裂隙接触时，其抗渗强度相对较低，其规律是裂隙宽度越大，抗渗强度越低。在大坝病害处理时，应给以足够重视。

4. 由土与砂卵石接触冲刷试验看出，首先从砂卵石内部破坏，细颗粒被带出，结构重新调整。当流速（或流量）很大时，将影响到土层的稳定。但由于室内很难模拟实际情况，所得数据仅供参考。

参 考 文 献

- (1) 羊毛湾水库工程地质勘察报告
陕西省水利电力土木建筑勘测设计院地质勘察总队
1987 年 3 月
- (2) 羊毛湾水库大坝施工概述(初稿)
咸阳市水利水保局
1987 年 4 月
- (3) 羊毛湾水库坝基处理与防渗工程
咸阳市水利水保局
1987 年 3 月
- (4) 土工试验规程 SDS 01-79 下册
中华人民共和国水利部、电力工业部 水利出版社
- (5) 石头河土石坝粘土心墙抗渗强度试验研究
西北水利科学研究所 孟宪祺
1981 年 5 月
陕西省水电工程局 韩荷文
- (6) 湖北钟祥温峡口水库大坝粘土心墙与基岩的接触冲刷试验报告
黎国凡 湖北省水利勘测设计院 1986 年 5 月
- (7) 一般粘性土的抗渗强度及其影响因素的试验研究
水利水电科学研究院 岩土(12)49 1983 年 5 月
- (8) 羊毛湾水库工程概述和大坝出现的问题
乾县羊毛湾灌溉管理局
1987 年 4 月
- (9) 粘性土水平渗透变形初步研究
江西省水利科学研究所
1983 年 9 月
- (10) 土坝心墙与基岩接触冲刷试验报告
河南省水利科学研究所
1981 年 7 月
- (11) 柴河土坝心墙渗透稳定性分析报告 岩土(6)56
水利水电科学研究院
1986 年 10 月
- (12) 渗流译文汇编第十辑
关于土石坝与裂隙基岩连接处的抗渗强度
水利部 交通部 南京水利科学研究所
1980 年