

# 石头河土石坝砂卵石抗剪强度<sup>①</sup>

孟宪麒 史彦文

(水利电力部西北水利科学研究所, 陕西武功)

## 提 要

本文结合石头河高土石坝的设计与施工,用自行设计制造的 $2 \times 2 \times 1 \text{ m}$ 双盒装配式大型直剪仪,对大粒径砂卵石坝壳材料抗剪强度的试验方法及试验成果进行了分析总结;并参考国外已建工程的研究成果,提出了选择大粒径砂卵石原型材料抗剪强度设计值的建议标准——“类比法”。据推荐的强度指标设计值,修改了原设计坝断面(上游坡由 $1:2.4$ 减为 $1:2.2$ ;下游坡由 $1:2$ 减为 $1:1.75$ )。不仅改善了枢纽布置条件,而且减少了坝体石方量,加快了工程进度。

## 一、概 述

石头河水利工程为陕西省关中西部一项以灌溉为主并结合发电的大型水利枢纽。大坝为粘土心墙与砂卵石坝壳组成之土石混合坝,坝高 $114 \text{ m}$ (从粘土填筑高程算起),其中土方 $183 \text{ 万 m}^3$ ,坝壳砂卵石 $614 \text{ 万 m}^3$ ,反滤料为 $38 \text{ 万 m}^3$ 。总库容 $1.47 \text{ 亿 m}^3$ ,为我国目前最高的土石坝。

近二十年来,随着以当地材料为主的高土石坝的飞速发展<sup>[1]</sup>,大粒径坝壳堆石材料抗剪强度的试验研究已成为筑坝技术的重大课题<sup>[2,3]</sup>。石头河土石坝建设初期,曾配合设计施工在 $50 \times 50 \times 40 \text{ cm}$ 中型直剪仪上进行了大量河床砂卵石的抗剪强度试验,其最大粒径限制为 $60 \text{ mm}$ 。鉴于原河床中漂石之最大粒径常达 $700 \sim 800 \text{ mm}$ ,小粒径小试样所提供之强度指标能否反映大粒径材料之实际情况,是涉及大坝安全与经济的重要问题。参照国外经验<sup>[4]</sup>,我们设计试制出目前国内最大的 $2 \times 2 \times 1 \text{ m}$ 双盒装配式大型直剪仪,试验用料之最大粒径达 $400 \text{ mm}$ (相当于料场平均级配曲线之 $d_{80}$ ),最大垂直荷重为 $4.0 \text{ kg/cm}^2$ 。经过鉴定与应用,仪器性能良好。利用该仪器对主料场之河床砂卵石进行了不同条件下抗剪强度试验。在试验中对用料的选择、抗剪特性、强度指标设计值的选择以及与一些特殊试验结果的对比分析,取得了一些成果。

## 二、试验用料与试验参数之确定

试验用料系河床洪积之推移质,母岩成分多为花岗岩、花岗闪长岩、石英片麻岩。质地坚硬,未风化,滚圆度较大,比重在 $2.69$ 左右,天然沉积密度达 $2.30 \sim 2.56 \text{ t/m}^3$ ,储量大,级配连续,含泥量极微,是建造当地材料坝的优良材料。试验组次之划分是以主料场(坝址上下游 $7 \text{ km}$ 范围内) $C_1$ 级储量勘探中九个试坑测定的级配包络线为基础<sup>②</sup>,按照仪器尺寸选择

①本项工作系由水电部西北水利科学研究所与陕西省水电工程局协作完成。参与本项工作的有陕西省水利机械修造厂、石头河工地试验室。

②石头河河床砂卵石第一料场 $C_1$ 级储量勘探报告,石头河水利工程指挥部地质组,1975年12月。

试验用料之最大粒径为  $400\text{mm}(d_{80})$ 。考虑到几何模型与结构模型的影响以及细粒含量偏小 ( $15.1\sim 26.3\%$ ) 的实际情况,对超径料采用全粒径区间加权替换后,选定粗、中、细三组(即  $No.1, No.2, No.3$ ) 级配,按不同密度共计九个亚组,在风干与饱和状态下进行大型直剪试验。其中  $No.2$  为九个试坑之平均级配曲线。此外,考虑到下游主料场筛分后纯大料 ( $d > 80\text{mm}$ ) 上坝之实际情况,又进行了三大组(九个亚组)特种级配下之大型直剪试验(即  $No.4, No.5, No.6$ ),上述各组试验用料之级配曲线,详见图 1。

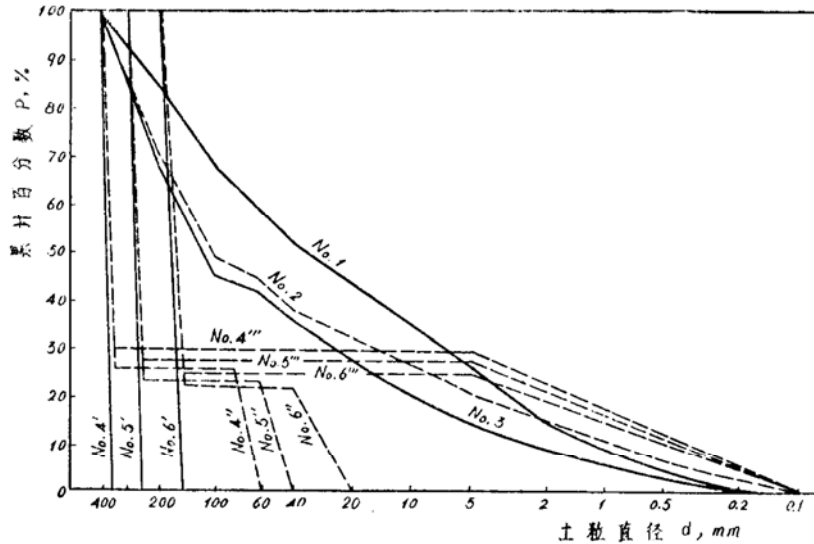


图1 不同试验组次之颗粒级配曲线

试验密度系根据对填筑砂卵石用振动碾压实试验之结果与在大型直剪仪中人工填料之实际情况,选定为  $2.13, 2.22, 2.30\text{t/m}^3$ ①。

根据文献[5]及研究资料的结论②,开缝尺寸选用  $10\text{cm}$ 。

### 三、试验装置和试验方法

#### (一)直剪仪平面尺寸的确定

根据附录 I 资料,选用仪器边长为最大粒径的五倍(即  $200\text{cm}$ )。

#### (二)仪器装置

整个仪器由上下剪力盒、垂直反力系统以及可在轻便铁轨上滚动的门式桁车组成(图 2)。  
①剪力盒分上盒与下盒,其长宽各为  $200\text{cm}$ ,高  $45\text{cm}$ ,由普通钢板组合焊接而成,填料时在上下盒之间置以高度为  $10\text{cm}$  之木开缝板条,试验时置换为直径  $10\text{cm}$  之滚柱;②垂直反力系统是由一组合焊接之钢板梁、底板与连接此两部件之拉杆和吊耳组成,此外还辅以加压盖、 $200\text{t}$  油压千斤顶和钢板箱式垫块;③水平反力系统由接连于仪器底板之水平反力顶托及一台  $320\text{t}$

①河床砂卵石振动碾碾压试验报告,石头河水利工程指挥部,1975年12月。

②纯砂卵石试验研究总结,石头河水利工程指挥部,陕西水科所,1977年4月。

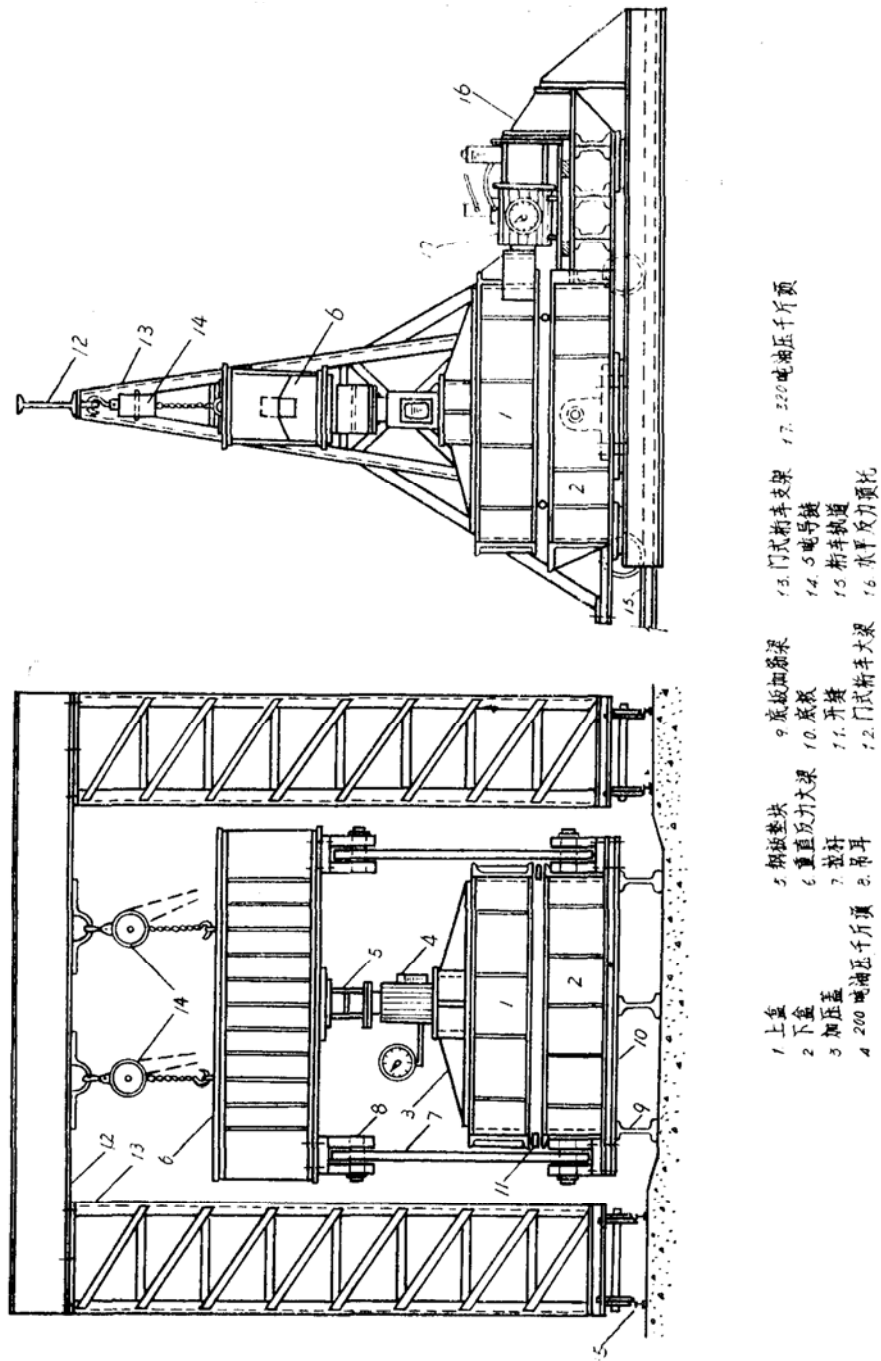


图2 2×2×1m大型直剪仪

油压千斤顶组成；④仪器各部件之吊装，系借助于铺设在门式桁车上之两个5t导链起吊。

**(三) 试验方法**

1. 将选定之试料拌匀后用层缝交错法按密度控制分三层填于盒内，用人工插捣法控制每层填料高度为33.3cm。试样总体积为4.0m<sup>3</sup>。对每组试验采用重复用料。

2. 填料时，在上下盒之间的开缝壁上，铺设油毛毡于四周，防止剪切过程中细料流出。

3. 试样饱和方式是采用一连续供水之潜水泵,分四个固定于加压盖上之岔管向试样注水。
4. 试验时垂直方向的接触荷重为额定荷重的1/50; 剪切速率为0.57cm/s。

**(四) 仪器鉴定**

曾采用小于2mm之渭河沙在等应变直剪仪( $\phi 65 \times 25\text{mm}$ )与大型直剪仪( $2 \times 2 \times 1\text{m}$ )中同时测定其抗剪强度(此时剪切盒开缝为5mm)。当控制相对密度为0.5, 试验密度选用 $1.66\text{t/m}^3$ 时, 所测定的强度包线见图3。结果表明, 两种仪器之内摩擦角十分接近。由于大型直剪仪

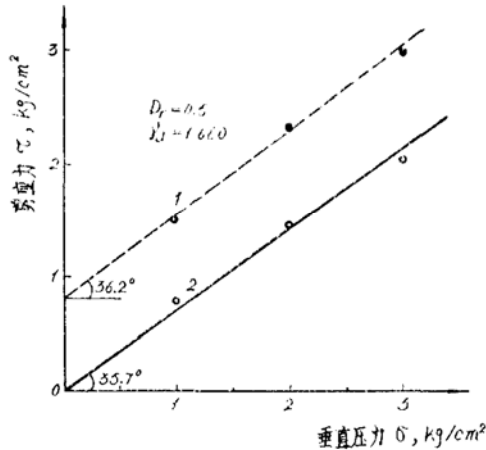


图3 渭河沙抗剪强度试验结果

1.  $2 \times 2 \times 1\text{mm}$ 大型直剪仪
2.  $\phi 64 \times 25\text{mm}$ 直剪仪

在上下盒翼缘间溢流沙子之摩擦力随法向荷载而变, 难以校正出准确数值, 所以 $c$ 值提高, 这并不意味沙子本身具有凝聚力 $c$ , 故可不考虑。但这并不影响大粒径砂卵石抗剪强度试验中 $c$ 值之正确性; 因为在整个砂卵石的抗剪试验中, 由于咬合力之效应使剪切过程中之实际开缝尺寸均大于10cm, 从而自动消除了开缝处摩擦力对强度值之影响。

**四、试验结果与分析**

**(一) 试验结果**

混合砂卵石抗剪强度之试验结果列示于表1与图4中。

表1 混合砂卵石抗剪强度试验成果总表

项 目		No.1			No.2			No.3				
		No.1'	No.1''	No.1'''	No.2'	No.2''	No.2'''	No.3'	No.3''	No.3'''		
试 验 参 数	试验干容重 $\gamma_d$ ( $\text{t/m}^3$ )	2.13	2.22	2.30	2.13	2.22	2.30	2.13	2.22	2.30		
	加权平均粒径 $d_0$ (mm)	85.7	85.7	85.7	126.2	126.2	126.2	137.7	137.7	137.7		
	砾石含量( $>5\text{mm}$ ) $P_g$ (%)	73.7	73.7	73.7	78.4	78.4	78.4	84.9	84.9	84.9		
	最大粒径 $d_{\text{max}}$ (mm)	400	400	400	400	400	400	400	400	400		
	不均匀系数 $C_u$	47.4	47.4	47.4	189	189	189	75	75	75		
抗 剪 强 度 指 标	层 缝 交 错	风干	$c$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.76	0.48	0.90	0.64	0.75	0.30	0.85	0.80	0.73
		快剪	$\phi$ ( $^\circ$ )	42.5	44.8	45.1	44.2	45.3	46.0	42.5	47.2	50.4
		饱和	$c'$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.70	0.48	0.90	0.57	0.80			0.80	0.95
	层 缝 重 合	快剪	$\phi'$ ( $^\circ$ )	42.0	44.8	45.1	44.4	44.0			47.2	48.3
		风干	$c_0$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.75			0.72			0.75		
		快剪	$\phi_0$ ( $^\circ$ )	41.2			41.0			40.8		

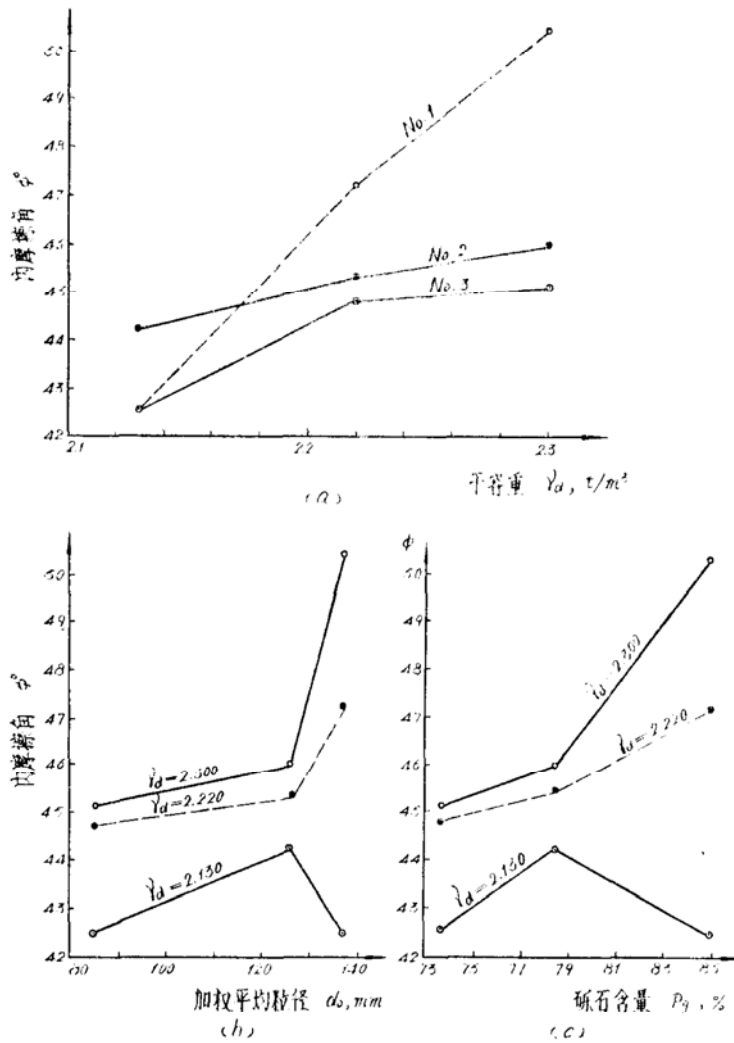


图4 混合砂卵石大型直剪试验结果

特种级配下堆石抗剪强度之试验结果示于表2与图5。

(二)抗剪特性分析

大粒径砂卵石的剪切变形规律既不同于一般粘性土料，也不同于一般风化砾石土<sup>[6]</sup>。

1.从剪应力 $\tau$ 与剪切变形 $\Delta L$ 的关系(图6)中No.2的典型资料可以看出，在 $\tau-\Delta L$ 关系曲线的起始段， $\tau$ 与 $\Delta L$ 成递增函数，但无直线比例段。峰值剪应力出现后， $\tau$ 随 $\Delta L$ 之增大而缓慢递减。随着法向应力 $\sigma$ 的不同， $\tau-\Delta L$ 曲线有的呈连续回落，有的沿某一稳定剪应力值上下波动。这一特征正反映出大粒径混合砂卵石在剪切位移过程中之咬合现象；同时还可以看出，剪应力增至一定数值后，变形即进入塑性阶段，随即出现强化现象，强化次数随着密度的降低和正应力之加大而增多。在不同密度下，当正应力为 $1\sim 4.0\text{kg/cm}^2$ 时，最多出现两次。这正反映了试样在剪切过程中，剪切破坏区域内之颗粒和密度的调整重新分配过程。

表2 特种级配下堆石抗剪强度试验成果总表

试验组次	试验用料	结构特征	粒径范围 $d$ (mm)	填石用量 $P_1$ (%)	填砾用量 $P_2$ (%)	填沙用量 $P_3$ (%)	加权平均粒径 $d_0$ (mm)	干容重 $\gamma^d$ ( $t/m^3$ )	开缝尺寸 $\delta$ (mm)	强度指标	
										$c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
No.4'	纯漂石	I	350~400	100.0			375	1.470	10	1.5	40.0
No.4''	漂石+砾	II	{ 350~400 60~80	74.4	25.6		297	1.946	10	2.3	45.5
No.4'''	漂石+沙	III	{ 350~400 <5	69.8		30.2	263	2.074	10	1.5	42.0
No.5'	纯漂石	I	250~300	100.0			275	1.541	10	0.7	49.6
No.5''	漂石+砾	II	{ 250~300 40~60	76.5	23.5		222	2.014	10	0.9	52.0
No.5'''	漂石+沙	III	{ 250~300 <5	72.1		27.9	199	2.138	10	1.4	41.2
No.6'	纯漂石	I	150~200	100.0			175	1.608	5	1.1	43.4
No.6''	漂石+砾	II	{ 150~200 20~40	77.7	22.3		142	2.070	5	1.2	46.3
No.6'''	漂石+沙	III	{ 150~200 <5	74.8		25.2	131	2.150	5	0.9	45.8

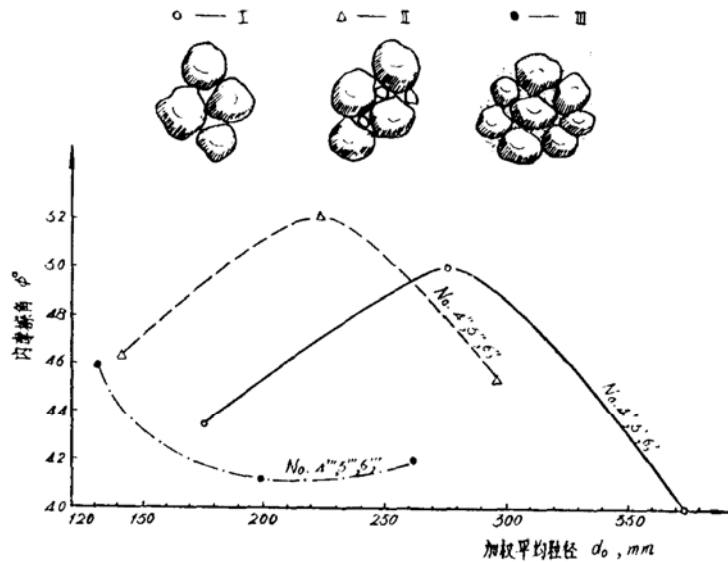


图5 特种级配下大型直剪试验结果

从以上分析还可看出，目前设计密度选用 $2.13t/m^3$ 是偏低一些，这一点除用现场碾压试验、坝体填筑之质量控制资料以及在大型直剪仪中填料之实际情况可以说明外，从图6(c)的强化次数亦可得到证实。这说明在低密度试样的剪切过程中存在超压密现象。

2. 根据图6中 $\tau-L$ 曲线特征，剪损取值标准采用塑性变形段之峰值强度比较合理。因为法向应力偏低，剪切过程中虽然有某些剪胀现象，并不是由于高密度作用所引起，而是大粒径砂卵石结构本身在剪切过程中变形特征的必然现象。同时选用峰值，不仅在应用上概念清晰；而且在试验中也易于掌握。

3. 该类试料具有较高的抗剪能力，咬合力很高，一般达 $1.0kg/cm^2$ 左右。

4. 在同一密度下，层缝交错与层缝重合之抗剪强度因砾石含量而异。二者之差值以最优砾石含量下为最大，一般在 $1.3\sim 3.2^\circ$ 之间变化。这主要是由于在固定剪切面上细料容易集中所致。

5. 由于在天然料场中砾石占主要地位，所以在风干与饱和试样间之强度指标相差甚微，一般在  $0 \sim 2.1^\circ$  内变化。

(三) 强度变化规律之综合评述

1. 国外研究概况

近期的试验研究表明，影响粗粒混合材料强度指标的主要因素有：颗粒特征（形状及自身的强度）、级配特征（以加权平均粒径或不均匀系数表示）、加权平均粒径与仪器最大尺寸的比值、法向应力的的大小、试样密度以及试验方法等。

亨内斯 (R. C. Hennes) 曾用最大粒径 ( $d_{max} = 20\text{cm}$ ) 相同而加权平均粒径  $d_0$  不同的三组粗粒材料，在同一相对密度下进行强度指标的测定。结果表明，内摩擦角  $\phi$  随  $d_0$  之增大而提高<sup>[6]</sup>。

尼契普罗维奇 (A. A. Ничпрович) 等采用不同级配之粗粒材料，在直剪仪上的试验结果表明，当密度不变时，内摩擦角随  $d_0$  之增大而提高<sup>[7]</sup>。

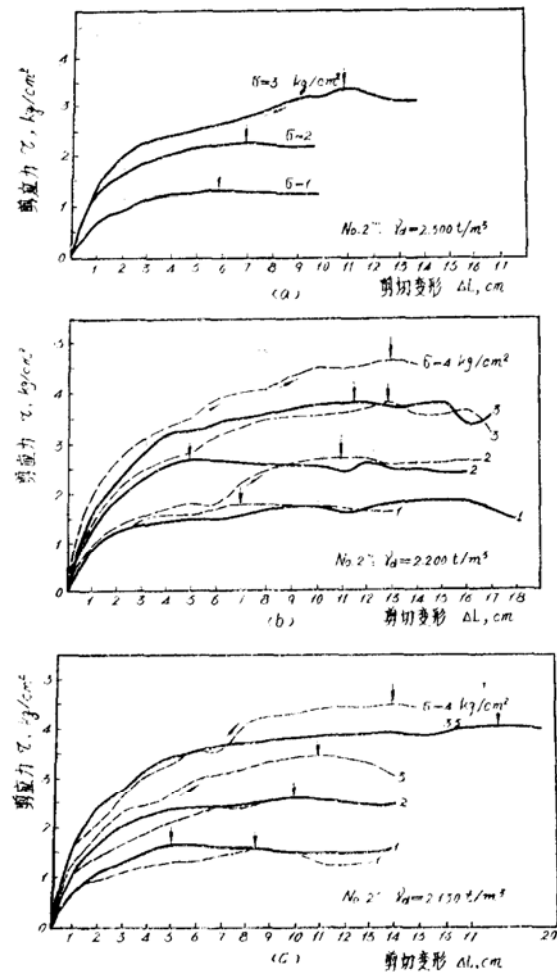
别特洛夫 (Г. Н. Петров) 专门研究了三组特殊级配下粗粒材料之内摩擦角与  $d_0$  之关系。结果表明，在同一砾石含量下，粒径的比值为  $4 : 2 : 1$  (如砾石含量为  $40\%$  时， $d_1 = 40\text{mm}$ ； $d_2 = 20\text{mm}$ ； $d_3 = 10\text{mm}$ ) 时， $\phi$  与  $d_0$  几乎成线性关系<sup>[8]</sup>。

莱普斯 (T. M. Lepc) 总结了西半球的堆石试验成果，所提供的内摩擦角、密度、法向应力方向的关系表明<sup>[9]</sup>  $\phi$  随密度之增大而提高，随法向应力之增大而降低。

马萨尔 (R. J. Marsal) 用大型三轴仪对墨西哥英费尔尼罗 (El Infernillo) 高土石坝堆石料的研究结果表明， $\phi$  随法向应力之增大而降低<sup>[10]</sup> (当周压力由  $4\text{kg/cm}^2$  增至  $25\text{kg/cm}^2$  时， $\phi$  值由  $50^\circ$  降至  $34^\circ$ )。并且指出，这主要是由于颗粒被压碎后细粒含量增大之影响所致。

至于在试验方法和试料级配相同时，密度对  $\phi$  值之影响是显而易见的。因为大的密度值可以增大颗粒间的接触点，从而增大了摩阻力，使强度提高。

关于不同仪器对强度参数之影响，日本学者岩片透结合日本高濑坝筑坝材料的试验研究，对  $10\text{cm}$  以下的圆砾、角砾，以不均匀系数为参数，曾用双盒大型直剪仪 ( $150 \times 150 \times 60\text{cm}$ )、标准直剪仪 ( $\phi 15 \times 6\text{cm}$ )、大型三轴仪 ( $\phi 30 \times 60\text{cm}$ )、标准三轴仪 ( $\phi 10 \times 25\text{cm}$ )、安息角测定仪 ( $200 \times 100 \times 30\text{cm}$ ) 等仪器进行了强度参数之测定。结果表明：①当法向荷重在  $8.0\text{kg/cm}^2$  以内变化时，在低荷部分 ( $0 \sim 2.0\text{kg/cm}^2$ ) 等压三轴与直剪的抗剪角大于安息角，而且直剪大于三轴结果；②在任何法向荷重下，以等体积三轴试验之抗剪角为最小；③当法向荷重在  $2 \sim 5\text{kg/cm}^2$  内变化时，以上各种方法测定的内摩擦角基本相同。他认为在相似级配条件



图例：  
—— 风干样； - - - - 饱和样。  
图6 剪应力与剪应变的关系

下, 试样大小对摩擦角之影响不大<sup>[11]</sup>。见图7。

### 2. 石头河坝壳砂卵石抗剪强度的变化规律

(1) 同一级配条件下, 内摩擦角随密度之增大而提高(图4(a))。

(2) 任一连续级配下, 必有一“临界密度”存在<sup>[12]</sup>。当试验密度大于临界密度时, 内摩擦角随平均粒径 $d_0$ (或砾石含量)之增大而提高; 反之亦然。

(3) 为了探讨一级代表性级配在不同砾石含量下, 当相对密度为定值时抗剪强度的变化规律, 曾在 $50 \times 50 \times 40\text{cm}$ 的中型直剪仪上进行了42组强度试验, 其结果示于图8。可以看出, 在同一相对密度下,  $\phi$ 与砾石含量之变化规律呈准抛物线函数; 而且普遍表现出在最优砾石含量下 $\phi$ 具有最大值<sup>①</sup>。

(4) 用 $\phi 30 \times 60\text{cm}$ 三轴仪对小于60mm砂卵石所作的强度试验结果表明, 当密度为 $2.14 \sim 2.24\text{t/m}^3$ 时, 固结排水剪之内摩擦角在 $43.3 \sim 46.3^\circ$ 之间变化。

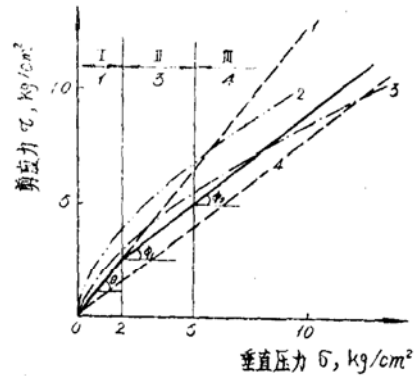


图7 不同试验方法下粗粒料的抗剪强度

1. 压实休止角 2. 大型直剪试验 3. 三轴等压试验 4. 三轴等体积试验 I—第一强度阶段 II—第二强度阶段 III—第三强度阶段

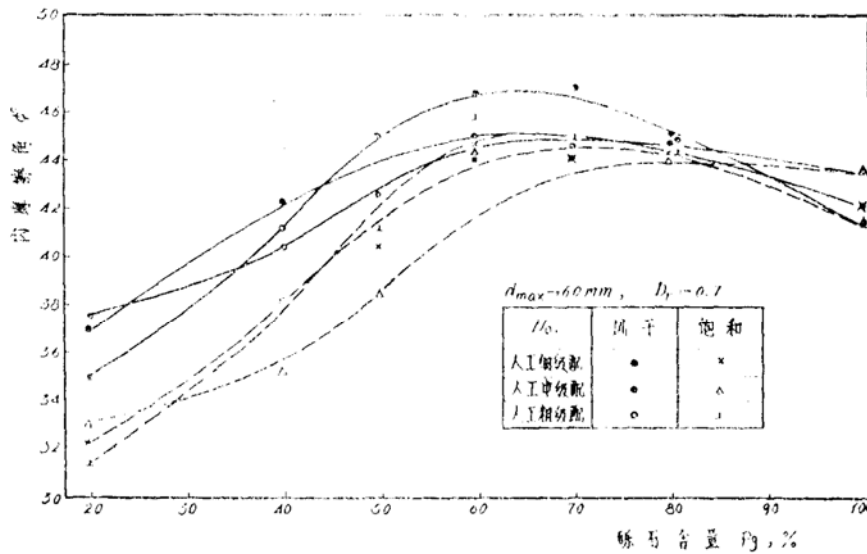


图8  $50 \times 50 \times 40\text{cm}$ 中型直剪仪强度试验结果

## 五、抗剪强度指标设计值的选择

### (一) 目前概况

大粒径粗粒填料强度指标设计值的选择, 既区别于均质土的小试样试验结果的选择方法(如数理统计法, 小值平均值法等), 也与砾石土强度指标的选择有所不同。考虑到该类材料

①纯砂卵石试验研究总结, 陕西省水利所、石头河水利工程指挥部, 1977年4月。



的无粘性与大粒径这两个特点,加之大型试验费事,组次不宜太多,因此特汇集一些类似于石头河筑坝材料的大型已建工程的强度指标试验值与设计值(附录II),作为选择石头河粗粒坝料强度指标设计值之参考。

### (二)石头河土石坝坝壳砂卵石强度指标设计值的选择原则

1.考虑到最大滑弧深度及研究资料<sup>[11]</sup>的试验结果,大型直剪试验时之法向应力虽然偏低一些,但其结果基本满足稳定分析之要求,而且试验结果处于“第二强度阶段”之中<sup>[11]</sup>。

2.同一密度下,小试样比大试样之 $\phi$ 值偏高,故以大型直剪试验结果作为选择设计值之依据。

3.采用“类比法”选择强度指标设计值。从附录II中可以给出如下四种标准:①以试验指标之最小值作为设计值;②取试验指标变化范围中之平均值或某一特定值作为设计指标;③设计值比试验指标最小值低 $1\sim 2^\circ$ ;④不考虑 $c$ 值<sup>[11]</sup>。实际上以第②,③两种情况较为普遍。

### (三)按上述标准选译强度指标设计值

根据表1资料,以No.1, No.2, No.3三组级配统一考虑时,无论对风干料或饱和料,当密度为 $2.13\text{t}/\text{m}^3$ 时, $\phi$ 值变化于 $40.8\sim 44.4^\circ$ 之间。

1.取强度试验指标之最小值为设计值时, $\phi' = 40.8^\circ$ 。

2.取强度指标变化范围之平均值为设计值时, $\phi'' = 42.55^\circ$ 。

3.取比最小强度指标低 $2^\circ$ 之结果为设计值时, $\phi''' = 38.8^\circ$ 。

4.考虑到 $50\times 50\times 40\text{cm}$ 中型直剪仪试验结果之规律性时(图8),取饱和条件下之强度指标比风干情况低 $2^\circ$ 。

因此,石头河上石坝坝壳砂卵石强度指标设计值最后选定为 $\phi_{\text{设(水上)}} = 38.8^\circ$ ;  $\phi_{\text{设(水下)}} = 36.8^\circ$ 。

## 六、结 论

1.通过对比鉴定试验,可以认为 $2\times 2\times 1\text{m}$ 大型直剪仪在结构形式与性能上,基本满足要求。

2.垂直荷重范围 $1\sim 4\text{kg}/\text{cm}^2$ ,基本是第二强度阶段取值条件。实践证明,重复用料对级配之影响甚微。

3.对粗粒坝料用“峰值”强度作为破坏标准,在概念上清晰,应用上可靠。

4.当设计密度为 $2.13\text{t}/\text{m}^3$ 时,本文建议的强度指标设计值对坝坡稳定而言,仍留有余地。

5.根据本文建议的设计强度指标所修改的坝坡,经过1981年多次水位骤降的考验(最大水深 $62.8\text{m}$ ),安然无恙。

6.考虑到施工中卵石局部集中的实际情况,特种级配下的试验结果表明,上述建议指标不会产生技术问题。

7.本文提供的典型大粒径砂卵石强度指标试验结果,可供类似工程设计施工之参考。

附录I 国内外大型直剪仪统计表

坝名或研究者	国别	直剪仪尺寸(长×宽×高)m	$L/d_{max}$	备注
石头河土石坝	中国	2×2×1; 0.5×0.5×0.4	≥5	
白龙江碧口坝	中国	φ0.5		
阿岗坝	中国	1.2×1.2×0.6	≥4	
清华大学	中国	0.5×0.5×0.4	≥4	
横山水库	中国	1.0×1.0×0.5	≥0~15	
А.А.Ничпрович	苏联		≥5	
J.Lowe	美国		≥4	
渥赫拉坝	西德	3×2×0.5		单盒
水洼坝	日本	2×2×0.5	≥10	单盒
东名高速铁路	日本	1.7×1.7×0.3		单盒
长野坝	日本	2×2×0.5		
新高野山	日本	1.5×1.5×0.9		
新冠坝	日本	0.8×0.8×0.3	≥4	
本泽坝	日本	2.4×2.4×0.6		
鱼梁濑坝	日本	2.5×2.5×0.6	≥10	
恰尔瓦克坝	苏联	1.5×1×0.4		
勒维氏—Smisss坝	美国	1.8×1.8×0.9		
土木研究所	日本	2.0×1.5×2.0		

注:  $L$ ——仪器边长,  $d_{max}$ ——最大粒径。

## 参 考 文 献

- [1] 国外高土石坝, 水利电力部实验工厂, 1971年8月。
- [2] Hirschfeld, R. C. and Poulos, S. J., 土石坝工程, 华东水利学院《土石坝工程》翻译组译, 水利电力出版社, 北京, 1978年9月。
- [3] New Earth Rockfill Dam Engineering, Hydraulic Electric Society of Japan, Tokyo, 1973.
- [4] Sower, G. F. and Gore, C. E., Large Scale Preconstruction Tests of Embankment Materials Earth-rockfill Dam, Proceedings of the Fifth International Conference on Soil mechanics and Foundation Engineering, Vol. II, 1961, pp. 717~720.
- [5] 风化砾石筑坝试验研究, 坝工建设技术经验汇编, 第一集, 水利电力出版社, 1975年9月, pp. 185~199.
- [6] Hannes, R. C., The Strength of Gravel Indirect Shear Testing of Soils, Материалы симпозиума по механика грунтов, 1953.
- [7] Ничпрович, А. А. и.т.д., Соппротивление крупнообломочных грунтов сдвигу,

附 录 II 国 内 外 高 土 石 坝 选 用 强 度 指 标 概 况

坝 名	国 名	坝 高 (m)	坝 型	修 建 年 月	坝外坡(1:m)石料颗粒组成(mm)					岩 性	地 震 烈 度	干 容 重 t/m <sup>3</sup>	内 摩 擦 角 $\phi$ (°)		备 注		
					上 游	下 游	$d_{max}$	$d_{80}$	$d_{60}$				$d_{10}$	比 重		$\rho_{max}$	$\rho_{设计}$
石 头 河	中 国	114	心 墙 堆 石	正 建	2.20	1.75	800	400	214	0.9	花 岗 片 麻 岩	8	2.55	2.13	40.76~ 44.36	水 上 38.5 水 下 36.0	大 型 直 剪 仪 200 × 200 × 100cm
白 龙 江	中 国	102	心 墙 堆 石	正 建	1.8~2.5	1.7~2.5						8	2.10		38.0		三 轴 $\phi$ 30 × 60cm, 50 × 50 × 40cm 小 型 直 剪 仪
横 山	中 国	48.6	心 墙 堆 石	1964~ 1966	2.0~2.1	1.18~1.9					砂 卵 石				40.1~ 41.1	38~39	大 型 直 剪 仪 100 × 100 × 50cm
努 列 克	苏 联	310.0	心 墙 土 石	1963~ 1973	2.25	2.20	300	150	70	0.4	砾 石				40~47.0	40.0	
卡 尔 瓦 克	苏 联	174.0	心 墙 堆 石	1966~ 1970	1.25~ 2.0	1.25~ 2.0	320	300	250	28	石 灰 石				41~49.0	45	
渥 洛 维 尔	美 国	224.0	斜 心 墙 土 石 坝	1964~ 1967	2.6	2.0	620	80	40	2	砂 卵 石			2.20		38.0	
摩 格 尔	美 国	158	斜 心 墙 土 石 坝	1959.7~ 1962.12	1.8	1.6	600	150	75	10	玄 武 石	7~8	1.89				
卡 特 尔	美 国	138.4	斜 心 墙 堆 石	1967~ 1969	1.9	1.8	500				花 岗 岩		1.81			39.5	
葛 兴 能 阿 尔 卑	瑞 士	155.0	心 墙 堆 石	1955~ 1961	2.0~3.0	1.4~2.0	1000	950	500	10	花 岗 片 麻 岩		2.20	2.16		40~45	
英 费 尔 尼 罗	墨 西 哥	148.8	心 墙 堆 石	1962.8~ 1962.12	1.75	1.75	600~ 760	200	88	7	砾 石	9~10			35~46	45.0	
大 白 川	日 本	95.0	心 墙 土 石	1964	2.7	2.0	1000	450	200	12	砂 卵 石						
喜 撰 山	日 本	95.0	心 墙 堆 石	1970	2.5	2.2	600	300	150	16				1.80 1.90	42.9 44.9	36.0 40.0	
下 小 鳥	日 本	119.0	心 墙 土 石	正 建	2.3~2.4	1.83~ 1.85	1000	800	500	120	片 麻 岩			1.9		40.0~ 41.0	
界 伯 奇 奥 地 利	地 利	153	心 墙 堆 石	1961.5~ 1964.12	1.5	1.5	1000	500	230	5	片 麻 岩		2.35	2.10		45.0	
岩 洞	日 本	40	斜 心 墙 堆 石	1961	2.5~4.0	平均 1.75										45.0	
本 泽	日 本	73	心 墙 堆 石	1965	3.5						粘 板 岩 砂 岩					45~35	大 型 直 剪 仪 240 × 240 × 60cm
水 洼	日 本	105	心 墙 堆 石	1967.10 ~1969.3	2.30~ 2.0	2.0	200	50	20	15	粘 板 岩 砂 岩	8~9	1.75		36.8~ 43.5	35~36.9	
阿 斯 旺	阿 联	111.0	心 墙 土 石													35.0	
菲 尔 泽 尼 亚	阿 尔 巴 尼 亚	160	心 墙 堆 石	正 建	2.0	2.0										37.0	

注：本表资料范围，仅考虑最大粒径与级配及母岩性质与石头河坝壳用料相近似的一些国外工程。

- Гидротехническое строительство, No. 8, 1969, стр.21~28.
- [ 8 ] Петров, Г. Н. Экспериментальные исследования сопротивления сдвигу крупно-обломочных грунтов Чарвакской плотины, Гидротехническое строительство, No. 9, 1970, стр. 5~8.
- [ 9 ] Leps, T. M., Reviews of Shearing Strength of Rockfill, Proc. ASCE, Vol. 96, No. SM 4, 1970, p. 1159.
- [10] Marsal, R. J., Large Scale Testing of Rockfill Materials, Proc. ASCE, Vol. 93, No. SM2, 1967, pp.27~42.
- [11] 岩片透, 粗粒材料のせん断試験の問題とその結果の適用性, 土と基礎, 182, Vol. 21, No. 4, 1973, pp. 41~48.
- [12] 高尔希金, М. Н., 土壤的力学性质, 人民交通出版社, 1954年, p. 181.
- [13] Becker, E., Chan, C.K. and Seed, H.B., Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials in Plane Strain and Triaxial Compression Tests, Report No. Te-72-3, Department of Civil Engineering of California Berkeley, California, 1972, pp. 19~37.

## Shear Strength of Sandy-gravels in Shitouhe River Dam

*Meng Xian-qi and Shi Yan-wen*

(The Northwest Hydrotechnical Science Research Institute, MWCEP, Wugong, Shanxi)

### Abstract

Integrating with the design and construction of the high earth and rockfill dam on Shitouhe River, the experiments on shear strength of big grain-size sandy-gravel, the cover material of the dam, were made with a  $2 \times 2 \times 1\text{m}$  large-scale double-box type direct shear apparatus. According to the analysis of the method and results of the test, the new criteria for selection of designed values of sandy gravels is recommended. By adopting it, the cross-sectional area of the dam may be greatly reduced as compared with the original design.