

# 九甸峡坝址区河床深厚覆盖层的试验研究

李长虹 刘洪平

(甘肃省水利水电勘测设计研究院第一分院, 甘肃张掖 734000)

**【摘要】** 通过大量的试验,如颗粒分析、渗透系数、干密度、相对密度、载荷、变形、旁压等,研究河床深厚覆盖层的物理力学性质、水文地质特性,提出其物理力学参数,为设计进行坝型确定和设计方案的选择提供可靠的依据

**【关键词】** 九甸峡;深厚覆盖层;承载力;密度

**【中图分类号】** P 642.1

## Experimental Study on the Deep Overburden of Jiudianxia Dam Site Riverbed

Li Changhong Liu Hongping

(Gansu Province Water Conservation Water and Electricity Survey Design  
Research Institute First Branch, Zhangye Gansu 734000 China)

**【Abstract】** Based on the massive experiments, such as the pellet analysis, the penetration coefficient, the dry density, the relative density, the load, the distortion, side presses and so on, the river bed deep overburden layer physics mechanical properties, the hydrology geology characteristic, its physical mechanics parameter is proposed. And the reliable basis for determination of the dam style and the design proposal choice is provided.

**【Key Words】** Jiudianxia; deep overburden layer; capacity; density

### 0 引言

设计原坝型为砼重力坝,该坝型要求将河床覆盖层全部挖除。由于河床窄而深(宽一般20~40 m,最宽50 m,槽深河水面以下40~50 m,最大深度54~56 m),坝基开挖难度极大。如果满足河床深厚覆盖层干密度值大于 $2.05 \text{ g/cm}^3$ ,相对密度大于0.75,透水性大于中等,承载力大于0.3 MPa,级配相对较好,大孤石含量较少,结构密实无架空现象,坝型可考虑为面板堆石坝,避免深槽开挖的巨大困难,并且大坝基础的建基高程也就确定了。

### 1 工程概况

九甸峡水利枢纽工程在甘肃省卓尼县与临潭县交界处的洮河干流上,规模属于大(2)型,工程等别为II等,坝型为混凝土面板堆石坝,坝高136.5 m。总库容为9.43亿 $\text{m}^3$ ,属完全年调节水库。电站总装机容量为300 MW,年发电总量为10.02亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。地震基本烈度为VII度,工程区岩性主要为角砾状灰岩。

### 2 深槽形态及河床覆盖层的物质组成<sup>①</sup>

据42个河床钻孔确认河床有一深槽分布,上游较宽(40~50m),下游较窄(20~30m),槽深河水

面以下40~50 m,最大深度54~56 m。一般平均纵坡降约3%~4%,其中在坝线40 m范围内,深槽由宽变窄,中心平均纵坡降达25%左右。

深槽形态在横剖面上变化较大,由宽阔的基本对称的“V”字型,变为左斜的不对称“V”字型,深槽左侧基岩边坡 $75^\circ\sim 80^\circ$ ,深槽右侧2 070~2 075 m高程以上为一缓坡台地,基岩边坡 $25^\circ\sim 35^\circ$ ,该台地凸向左岸,中间较宽,约20~30 m,向上、下游逐渐变窄。

按其颗粒组成和结构的不同,以及物理力学性质和工程特性的差异,基本可分为三层:上层为块石碎石土,定为I岩组;中层为块石砂砾卵石层,定为II岩组;下层为砂砾卵石层,定为III岩组。

#### 1) 崩坡积块石碎石土(I岩组)

分布于左岸坡角和河床上部,组成物为块石、碎石,成分均为灰岩,棱角状,大小混杂,块径一般8~20 cm,大者5~8 m,砂土含量较少,系两岸崩塌和人工开挖堆积于河床,局部掺杂有后期冲积的卵砾石和砂,结构松散,局部架空,无胶结,厚度自河水面以下6~17 m,坝段范围内上游较厚,向下围堰逐渐变薄,顺河方向层底高程2 073~2 083 m,横剖面上层底由中心

向两侧略有抬升。该层不宜作为大坝基础,须清除。

### 2) 冲积块石砂砾卵石层( II岩组)

分布于河床中部,组成物上部以块石碎石为主,向下卵砾石增多,局部有中粗砂、砂土透镜体分布。块石碎石成分均为灰岩,棱角状、块状,块径一般为0.5~3 m,大者5~8 m,最大达10多m;卵砾石成分主要为砂岩、灰岩、石英岩等,磨圆度较差,多呈棱角状;砂为中粗砂,其成分主要为长石、石英,次为岩屑和云母及泥质物。整层结构松散,无胶结,底部基本平坦,局部稍有起伏,厚度5~13 m,层底高程2 067.0~2 070.5 m。

### 3) 冲积砂砾卵石层( II岩组)

分布于河床底部,组成物主要为卵石和砾石,成分为砂岩、灰岩、石英岩等,磨圆度较好,多呈浑圆和次圆状;砂以中粗砂为主,局部呈透境状或鸡窝状富集,成份为长石、石英及少量云母和岩屑,局部有2~3 m的孤块石分布,均一性较差,横向厚度12~37 m,无胶结。

## 3 河床覆盖层试验研究<sup>①</sup>

上述三层中,第一层因不宜作为大坝基础,未进行试验研究。重点对第二、三层进行研究。

### 3.1 物理力学性质试验

#### 3.1.1 粒度成分及物理性质

根据孔内取样可知,第二层粒径大于150 mm的占22.0%,粒径150~80 mm占14.43%,80~5 mm占39.36%,5~0.15 mm的占15.43%,粒径小于0.15 mm占8.78%,干密度1.83~2.15 g/cm<sup>3</sup>,平均值2.03 g/cm<sup>3</sup>。第三层粒径大于150 mm的占14.74%,150~80 mm的占10.29%,80~5 mm的占46.71%,0.15~5 mm的占16.73%,粒径小于0.15 mm的占11.53%,泥含量较大。干密度为2.04~2.16 g/cm<sup>2</sup>,均值为2.15 g/cm<sup>3</sup>。

在围堰挡水的条件下,对II岩组的工程特性进行了进一步研究。在清除I岩组后,在II岩组的上部(高程2 083 m左右)做了9组干密度试验和9组颗粒分析试验。在II岩组的下部(2 073.5~2 074 m)做了14组干密度、4组相对密度试验和8组颗粒分析试验。现场所做的干密度值一般为2.11~2.16 g/cm<sup>3</sup>,平均2.14~2.15 g/cm<sup>3</sup>,与钻孔取样所做的值基本一致,但略为偏大,这与事实相符。因为钻孔样为扰动过的。相对密度为0.78~0.91,平均0.87。天然状态孔隙率21.0%~

22.1%,平均21.5%。从12组颗粒分析试验成果表上看,该层粗颗粒居多,粒度不均匀,不均匀系数平均13.93,属不良级配。这与钻孔取样描述一致。控制粒径66.24 mm,有效粒径4.755 mm,孤块石含量约10%,砾石含泥量4.13%,砂含泥量25.93%(平均值)。从试验成果可以看出,第II、III岩组具有较高的密度和较低的孔隙比,呈中密—密实状态。

#### 3.1.2 力学特征试验

由于块石砂砾卵石中块石含量较多,颗粒粗大,钻孔动力触探试验效果较差,故利用CSA24A地震仪采用单孔法和跨孔法在3对共6个钻孔内进行了剪切波的测试。两岩组所测得的值比较接近,II岩组单孔法测试的纵波速 $v_p=1\ 120\sim 1\ 370\text{ m/s}$ ,均值1 190 m/s,剪切波 $v_s=480\sim 520\text{ m/s}$ ,均值490 m/s,动剪切模量 $G_d=480\sim 525\text{ MPa}$ ,均值为500 MPa;跨孔法孔距3 m,测试的纵波速范围值 $v_p=860\sim 1\ 030\text{ m/s}$ ,均值为930 m/s,横波速范围值 $v_s=430\sim 460\text{ m/s}$ ,均值为440 m/s,动剪切模量 $G_d=388.3\sim 444.4\text{ MPa}$ ,均值406.9 MPa,动泊桑比 $u_d=0.33\sim 0.37$ ,均值为0.35。

III岩组单孔法测试的纵波速 $v_p=1\ 160\sim 1\ 450\text{ m/s}$ ,均值1 270 m/s,剪切波 $v_s=490\sim 610\text{ m/s}$ ,均值550 m/s,动剪切模量 $G_d=486\sim 781\text{ MPa}$ ,均值为626 MPa;跨孔法孔距3 m,测试的纵波速范围 $v_p=910\sim 1\ 300\text{ m/s}$ ,均值为1 060 m/s,横波速范围值 $v_s=410\sim 480\text{ m/s}$ ,均值为460 m/s,动剪切模量 $G_d=353\sim 483.3\text{ MPa}$ ,均值452.1 MPa。在2个钻孔7个位置做了旁压试验,测得旁压模量为12.81~121.3 MPa,变形模量为51.25~485.18 MPa。

为查明III岩组的力学特征,在不同钻孔内取了12组样进行室内抗剪强度试验,在饱和状态下,内摩擦角在24.08°~27.665°,均值为25.80°,咬合力为9~38 kPa,平均值为23 kPa。

#### 3.2 承载力和变形试验

在围堰挡水的条件下,对河床覆盖层进行了开挖,I岩组全部挖除。挖到2 083 m高程时,见河床冲积砂卵石,但块石、碎石和大孤石含量较高,约30%~35%,含泥量偏大,约15%。挖到2 075 m高程时,大孤石含量降到10%左右,冲积砂卵石占绝大多数,结构比较密实。待挖到2 074 m高程时,从开挖断面上观察,有少量块石、碎石和大孤石,

<sup>①</sup> 柳发桐,刘洪平. 洮河九甸峡水利枢纽工程初步设计阶段工程地质勘察报告,2006.

骨架颗粒呈交错排列,大部分接触,从开挖断面上取出大颗粒,能保持颗粒凹面形状,开挖断面可保持暂时稳定,局部有坍塌现象。锹镐可挖掘。块石、碎石呈次棱角状,岩块较新鲜。在 2 073.5 m 高程做了三组现场载荷试验。试验采用圆形刚性承压板法,承压板直径 100 cm,加压方法为逐级等量施加荷载,最大荷载力为 3.0 MPa。通过试验可知试件(II 岩组)在达到 3 MPa 压力下仍没有发生破坏,说明 II 岩组具有较高的承载力和抗变形能力。承载力最小为 1.5 MPa,类比其他工程该值有些偏高,但符合实际情况。变形模量最大为 431.4 MPa,最小为 126.9 MPa,经综合分析,以 70~90 MPa 作为该层的变形模量建议值。

在 11 个钻孔 II 岩组的不同高程做了 50 段重型动力触探试验,算得其允许承载力在 0.48~0.79 MPa 之间,平均 0.67 MPa。以上试验结果说明,砂砾卵石层有较高的承载能力和抗变形性能,同时也反映出其颗粒组成不均匀,试验的力学指标差异较大。

### 3.3 水文地质试验

在 II 岩组的上层做抽水试验测得其渗透系数为  $9.25 \times 10^{-2}$  cm/s,在钻孔内用 HM-100 钻孔水文地质综合测试仪测得中部块石砂砾卵石层(II 岩组)的渗透系数  $k$  为  $4.25 \times 10^{-2}$  cm/s,经现场钻孔抽水试验测得  $k$  为  $5.43 \times 10^{-2}$  cm/s(均值)。在 2 073.5 m 高程做了 3 组室内渗透试验, $k$  值在  $(5.7 \sim 8.1) \times 10^{-2}$  cm/s 之间,平均  $6.7 \times 10^{-2}$  cm/s,现场和室内测得的数值基本一致,均属强透水层。这与其颗粒粗大、级配不良的实际相符。

按《水利水电工程地质勘察规范》提出的方法判别和评价 II 岩组的渗透变形形式。

$$\text{流土: } P_c \geq 100/[4(1-n)] \quad (1)$$

$$\text{管涌: } P_c < 100/[4(1-n)] \quad (2)$$

式中: $P_c$  为细粒含量,%; $n$  为土的孔隙率,%。

用级配曲线上的有关数据及细粒含量  $P_c$ ,按公式(1)和(2)对其渗透变形形式的判别见表 1, $P_c$  值都小于  $100/[4(1-n)]$  所得的值,且细粒含量  $P_c$  多小于或接近 25%。因此 II 岩组的渗透变形破坏形

式为管涌型是符合工程实际的。水力坡度 0.48~0.62,平均 0.55。

表 1 II 岩组渗透变形形式判别

| 试样编号 | 孔隙率/% | $100/4(1-n)$ | $P_c$ /% | 渗透变形形式 |
|------|-------|--------------|----------|--------|
| B-15 | 21.7  | 31.9         | 17.5     | 管涌     |
| B-23 | 21.0  | 31.6         | 20.2     | 管涌     |
| B-24 | 22.4  | 32.2         | 22.8     | 管涌     |
| B-25 | 21.1  | 32.1         | 26.4     | 管涌     |
| B-26 | 21.3  | 31.8         | 23.4     | 管涌     |
| B-28 | 21.7  | 31.9         | 28.9     | 管涌     |

管涌型土的临界水力坡降按《水利水电工程地质勘察规范》提出的公式进行判别。<sup>[1]</sup>

$$J_{cr} = 2.2(G_s - 1)(1 - n)^2 d_5 / d_{20} \quad (3)$$

式中: $G_s$  为土的颗粒密度与水的密度之比; $n$  为土的孔隙率,%; $d_5$ 、 $d_{20}$  为分别占总土重的 5% 和 20% 的土粒粒径,mm。

II 岩组的临界水力坡降见表 2,在 0.07~0.25 之间,有些偏小。

表 2 II 岩组临界水力坡降判别表

| 试样   | 孔隙率 $n$ /% | 相对密度 $G_s$ | $d_5$ /mm | $d_{20}$ /mm | 临界水力坡降 $J_{cr}$ |
|------|------------|------------|-----------|--------------|-----------------|
| B-15 | 21.7       | 2.68       | 1.5       | 14           | 0.242           |
| B-23 | 21.0       | 2.68       | 1.0       | 10           | 0.23            |
| B-24 | 22.4       | 2.68       | 0.8       | 13           | 0.14            |
| B-25 | 21.1       | 2.68       | 0.6       | 18           | 0.07            |
| B-26 | 21.3       | 2.68       | 0.8       | 18           | 0.10            |
| B-28 | 1.7        | 2.68       | 0.4       | 10           | 0.09            |

钻孔抽水试验确定,II 岩组渗透系数为  $5.36 \times 10^{-2} \sim 5.5 \times 10^{-2}$  cm/s,平均值为  $5.43 \times 10^{-2}$  cm/s,室内渗透试验测定渗透系数为  $1.31 \times 10^{-3} \sim 4.51 \times 10^{-1}$  cm/s,均值为  $9.34 \times 10^{-2}$  cm/s,水力破坏坡降为 0.871~0.390,平均为 0.660。

### 4 物理力学参数建议值<sup>[3]</sup>

在上述覆盖层物理力学性质试验的基础上,通过分别整理室内、外不同试验方法下的物理力学指标试验值,分析试验边界条件,考虑覆盖层的组成、结构特征,并类比与本工程覆盖层组成、结构及工程特性相近的工程取值经验,最后给出冲积块石砂砾卵石层(II 岩组)和冲积砂砾卵石层(II 岩组)的物理力学指标建议值(见表 3)。

表 3 河床覆盖层物理力学性质建议指标

| 覆盖层  | 天然干密度 $\rho_d$ ( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 相对密度 | 剪切波速 $v_s$ ( $m \cdot s^{-1}$ ) | 剪切模量 /MPa | 承载力 /MPa | 内摩擦角 $\varphi$ ( $^\circ$ ) | 粘聚力 $c$ /kPa | 泊松比 $\mu$ | 渗透系数 $k$ ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ ) | 变形模量 /MPa |
|------|--------------------------------------|------|---------------------------------|-----------|----------|-----------------------------|--------------|-----------|----------------------------------|-----------|
| 块石   | 2.14                                 | 0.87 | 520                             | 525       | 0.6~0.8  | 33~35                       | 38           | 0.33~0.37 | 7.13                             | 70~90     |
| 砂砾卵石 | 2.15                                 | 0.85 | 610                             | 781       | 0.7~0.8  | 33~35                       | 38           | 0.38~0.39 | 5.43                             | 70~90     |

$z/b > 0.5$  考虑。试验研究证明: 当基底压力增加到一定值后, 传至软弱下卧层顶面的压力将随之迅速增加, 即  $\theta$  角迅速降低, 直到持力层剪切破坏时的  $\theta$  值为最小, 实际发生破坏时,  $\theta$  角一般为  $6^\circ \sim 25^\circ$ , 最大也不超过  $30^\circ$ , 所以计算时  $\theta$  取值一般不超过  $30^\circ$ <sup>[4]</sup>, 这个也是出于安全的考虑。当满足了软弱下卧层承载力的验算公式, 实际上也就保证了上覆持力层不会发生剪切破坏, 说明基础尺寸设计是合适的, 否则应考虑增大基础底面积, 或改变基础埋深, 甚至改用地基处理或深基础方案。

通过以上分析, 根据压缩模量比  $E_{s1}/E_{s2}$  与厚宽比  $z/b$  确定压力扩散角见表 1。

表 1 地基压力扩散角  $\theta$

| $E_{s1}/E_{s2}$ | $z/b$          |            |            |            |
|-----------------|----------------|------------|------------|------------|
|                 | $< 0.25$       | 0.25       | 0.50       | $> 0.50$   |
| $< 3$           | $0^\circ$ 或系数法 | 系数法        | 系数法        | 系数法        |
| 3               | $0^\circ$      | $6^\circ$  | $23^\circ$ | $23^\circ$ |
| 5               | $0^\circ$      | $10^\circ$ | $25^\circ$ | $25^\circ$ |
| 10              | $0^\circ$      | $20^\circ$ | $30^\circ$ | $30^\circ$ |
| $> 10$          | $0^\circ$      | $20^\circ$ | $30^\circ$ | $30^\circ$ |

注: 表中的系数法是指文献 [1] 中的附加应力系数法

(上接第 195 页)

## 5 结论

该工程自 1988 年开始勘测设计工作, 2004 年开工建设, 现在仍在施工。可行性研究阶段设计的坝型为混凝土重力坝, 并通过了水利部审查。随着勘测设计工作的逐步深入, 尤其对河床覆盖层的深入研究, 得出了如下结论: ①试验项目多、方法得当、相互印证, 资料可靠性强; ②深槽第 II、III 层具有结构紧密、承载力高、抗变形能力强、压缩性低、透水性强的特点, 地层总体较均匀, 不存在大的不均匀沉陷问题, 地基的压缩变形可能为局部的、瞬时的, 随着施工期的结束, 微弱沉降即可基本完成, 对建成后的坝体影响不大, 故修建砼面板堆石坝在技术上是完全可行的, 比砼重力坝优越, 将坝型由原来的砼重力坝调整为砼面板堆石坝是适宜的; ③设计原坝基高程为 2 070 m, 根据试验资料最后确定的实际坝基高程为坝轴线下游 2 083 m, 坝轴线上游为 2 073.5~2 074 m 是完全正确的; ④第 III 层中的

## 5 结论

地基受力层范围内有软弱下卧层的时候, 应验算软弱下卧层的强度, 当存在多层软弱下卧层的时候, 要逐层验算, 直到把整个软弱下卧层(压缩层范围内)验算结束。当用到扩散角查表的时候, 对于表格范围以外的情况要引起注意, 不能随便采用扩散角。另外要注意在求附加压力的时候, 不能只局限于规范中的扩散角表格, 被扩散角所束缚, 满足条件的时候要采用附加应力系数法来求附加压力。文献 [1] 扩散角的数值是通过理论分析和试验得到的。对于特殊情况, 有必要通过试验来确定扩散角。

## 参 考 文 献

- [1] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].
- [2] JGJ 84—92 建筑岩土工程勘察基本术语标准[S].
- [3] JGJ 72—2004 高层建筑岩土工程勘察规程[S].
- [4] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003.

收稿日期: 2007-03-30

粘土、砂土、砂层均为零星的透镜状或鸡窝装富集, 不存在震动液化的内在条件; 从颗粒级配资料可看出, 土的粒径大于 5 mm 颗粒含量的质量百分率均大于 70%, 可判为不液化; ⑤深槽第 II、III 层的渗透系数均较大, 属强透水层, 可能的渗透变形破坏形式为管涌型, 水库蓄水后, 在水头差作用下, 两层均存在较大的渗漏问题和渗透稳定性较差的问题, 故需采取防渗处理措施。

由此可见, 对河床深厚覆盖层进行试验研究, 使设计人员选择了经济合理的坝型, 抬高了坝基, 减少了施工的巨大困难, 缩短了工期, 大大提高了投资效益, 同时详尽的试验资料又为类同工程提供了借鉴, 意义深远。

## 参 考 文 献

- [1] GB 50287—99 水利水电工程地质勘察规范[S].
- [2] SL 237—1999 土工试验规程[S].

收稿日期: 2007-04-25