

# 小浪底大坝坝基工程地质特性及问题

梁会圃<sup>1</sup> 葛 勇<sup>2</sup>

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第一水文地质工程地质队, 河南新乡 453002; 2. 黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 河南郑州 450003)

**摘 要** 由于坝基存在工程地质问题, 为防止坝建成蓄水后可能出现失稳状况, 本文着重论述坝基工程地质特征及主要工程地质问题, 对坝基处理设计及大坝稳定安全运行有重大意义。

**关键词** 河床覆盖层; 地震液化; 泥化夹层;  $F_1$  断层

**中图法分类号:** P642 **文献标识码:** B **文章编号:** 1004-3152(2002)03-0037-04

小浪底水利枢纽为带内铺盖的斜心墙堆石坝, 坝高 154m, 坝顶长 1667m, 顶宽 15m, 坝体填筑工程量 5185 万  $m^3$ 。坝址区属峡谷型河道, 河谷宽 500~700m, 两岸基岩坡度  $30^\circ \sim 40^\circ$ , 相对高差 150~200m, 河岸两侧发育有三级阶地。河床底宽 300~500mm, 高程 126~129m, 发育深厚河床覆盖层, 厚度一般 30~40m, 并存在河床深槽, 最深处达 70~80m。河床深槽右侧发育有高 45m 的基岩陡坎, 陡坎坡度  $1:0.5 \sim 1:0.6$ 。上述深厚的河床覆盖层及河床深槽右侧的基岩陡坎等条件是影响坝址选择和基础处理方案选择的主导因素。

## 1 坝基深厚覆盖层的工程地质特征及工程地质问题

### 1.1 坝基深厚覆盖层的物质组成及分布特征

河床覆盖层是上更新统( $Q_3$ )以来形成的, 除河床冲积砂砾层、砂层外, 还分布有岸边坡积层、沟口洪积层以及冲—洪积交互层。上更新统( $Q_3$ )与全新统( $Q_4$ )堆积物的分界高程大致为 130m, 河槽部位受洪水期揭底影响, 可降至 125m 左右,  $Q_3$  堆积物经受过土和砂砾石荷重长期压密作用。

#### (1) 河床冲积砂砾石层

分布于河床中部, 主要成份为砂砾石, 其次为砂层。地层结构上, 在坝基部位自上而下依次为表部砂层、上部砂砾石层、夹砂层、底砂层及其底部砂砾石层。表部砂层厚 3~7m, 疏松—中密; 上部砂砾

石层, 厚度 30~45m, 夹砂层分布在上部砂砾石层中间, 厚度一般为 1.0~10m; 底砂层在河床深槽内呈条带状分布, 厚度 20~25m; 底部砂砾石层分布在深槽最底部, 厚 5~10m。

#### (2) 坡积、洪积层

①右岸岸边坡积层: 厚度 10~23m, 上部 4~10m 为壤土, 中部为土夹块石层, 底部为块石层; ②东坡洪积扇分布于坝线以下右岸原东坡村前, 顺河长约 230m, 宽 90m。上部为冲积砂壤土和坡积、冲积壤土夹块石层。下部为洪积堆积物和岸边塌滑物, 厚度 8~12m。位于洪积扇前沿的冲—洪积带, 宽约 50m, 顺河向呈带状分布, 以冲积砂卵石层中夹有洪积层或混杂有较多的洪积物为特征, 厚度 2~7m; ③左岸岸边坡积层: 分布于主坝轴线附近及其下游岸边, 在坝轴线附近最大宽度 100m, 坡积物成份主要为中壤土夹碎石块, 厚 4~14m。坝轴线下游一般宽 20m 左右, 厚 3~5m。坡积碎石土以下为冲积砂砾石层, 局部为坡积碎石土与砂卵石混合堆积; ④左岸岸边冲积—坡积交互层及高含砂率区: 分布于岸边坡积层以外, 该区砂卵石中含砂率普遍较高, 一部分在 50% 以上, 其中泥质(粉粒和粘粒)含量一般在 10%~15%, 最高达 30% 以上。

### 1.2 物理力学性质及渗透性

(1) 地层密度: 一般是含砂量高或洪积物成份多的层位密度低, 反之密度高, 见表 1 所示。

相对密度: 上部砂卵石层的相对密度, 当含砂率小于 30% 时为 0.77~0.796, 呈密实状态; 当含砂率

大于 30% 时为 0.60~0.63, 呈中等密实状态。

(2) 压缩性: 河床冲积砂卵石层的压缩系数为  $1.7 \sim 4.1 \times 10^{-8} \text{Pa}^{-1}$ , 上部砂卵石层的夹砂层压缩系数为  $1.4 \times 10^{-7} \text{Pa}^{-1}$ , 均属低压缩性地层。

(3) 渗透性: 上部砂卵石层因受洪积物夹层及含砂率变化影响, 渗透性极不均一, 这种不均一性主要表现在河床中部冲—洪积分布区。抽水试验资料表明, 当含砂率大于 30% 时, 渗透系数一般在 10.0m/

d 左右, 而局部洪积物含泥量很高时, 渗透系数在 1.0m/d 左右, 此外, 还存在低含砂率的“架空”层, 属极强透水层, 其渗透系数可高达 200m/d 以上, 上部砂卵石层平均渗透系数为 50m/d。

(4) 抗剪强度: 根据试验资料, 结合坝基覆盖层各层位的颗粒级配、层位结构、天然密度并参考其它工程经验, 其建议值指标见表 1。

表 1 坝基覆盖层抗剪强度建议指标表

序号	代表地段	含砂率 (%)	容重 $t/m^3$	内摩擦角 ( $^\circ$ )	备 注
1	河漫滩表砂层	100	1.35~1.45	22	
2	夹砂层	100	1.55~1.65	28	
3	底砂层	100	1.60~1.85	30	建议指标均不考虑
4	左岸边高含砂率区	>50	1.90~2.10	30	砂层、砂卵石层的内
5	河床中部冲—洪积层	30~40	2.10~2.20	33	聚力
6	河床冲积砂卵石层	<30	2.20~2.35	36	

### 1.3 坝基覆盖层的工程地质问题

#### (1) 坝基沉陷变形

坝基覆盖层的压缩性取决于物质成份特征及密度大小, 并受河床古地形条件控制。表部砂层、岸边坡洪积层、河床两侧高含砂率层及河床中部冲—洪积夹层、透镜体等易于产生压缩变形。此外, 坝轴线附近存在河床深槽, 且深槽两侧岩石边坡高陡, 易于造成较大沉陷差, 产生不均匀沉陷问题。

#### (2) 坝基抗滑稳定性

根据试验资料, 表砂层、夹砂层和冲洪积夹层的抗剪强度较低, 因此, 控制坝基覆盖层抗滑稳定的层位, 主要是表砂层、夹砂层和冲洪积夹层可能出现的组合面。

#### (3) 坝基震动液化

坝基覆盖层的液化问题关键是河床覆盖层的上部, 河床表层堆积的粉细砂、壤土及砂砾层顶部的一部分, 属于全新统堆积物, 结构疏松, 其中粉细砂的天然干容重为  $1.34 \sim 1.52 t/m^3$ , 应属液化层。而底砂层及底砂砾石层分布高程在 110m 以下, 上覆有 20m 以上的砂砾石层, 只要上覆砂砾石层不液化, 无液化可能。

#### (4) 坝基渗透稳定性

据覆盖层的层位结构及分布特点, 可能产生的渗透破坏, 一是砾卵石间细颗粒被涌出, 即管涌或流土破坏; 二是局部架空层与临近间的接触冲刷造成的破坏。河床左右两侧高含砂率带渗透破坏形式应

以流土为主, 坝基其它部位及坝体以外属管涌破坏。根据室内试验研究, 坝基砂卵石层的允许坡降建议值为 0.1~0.2。由于砂卵石层允许渗透比降较小, 且存在局部架空集中渗漏问题, 为减少渗漏防止渗透破坏及接触冲刷, 贯穿覆盖层的防渗处理问题非常重要。

## 2 坝基右岸和左岸岩体工程地质特性

### 2.1 坝基右岸岩体工程地质特性

MR12~F<sub>1</sub> 和 F<sub>1</sub>~F<sub>230</sub> 断层揭露岩体为三迭系岩组和二迭系岩组。岩层产状:  $50^\circ \sim 75^\circ \angle 7^\circ \sim 9^\circ$  F<sub>230</sub> 断层以南坝基岩层产状:  $90^\circ \sim 120^\circ \angle 5^\circ \sim 8^\circ$ 。

右岸坝基开挖揭露的规模较大断层, 见表 2。以上 4 条断层均贯穿坝基, 与坝轴线近直交。其中 F<sub>1</sub> 断层规模最大。

右岸坝基发育 3 组节理: ①走向  $10^\circ \sim 30^\circ$ , 倾向 NW/SE, 倾角  $80^\circ \sim 87^\circ$ ; ②走向  $270^\circ \sim 290^\circ$ , 倾向 NE/SW, 倾角  $77^\circ \sim 85^\circ$ ; ③走向  $335^\circ \sim 350^\circ$ , 倾向 SW/NE, 倾角  $78^\circ \sim 88^\circ$ 。从坝基岩体节理统计结果来看, 砂岩地层中节理裂隙发育, 二迭系砂岩地层中节理密度一般为 3~4 条/m, 三迭系砂岩地层中节理密度 2~3 条/m, 受构造作用影响, 局部形成节理密集带。粘土岩地层中节理不发育, 节理密度一般在 0.3~1 条/m, 但部分节理倾角较平缓, 为  $20^\circ \sim 60^\circ$ 。节理面大多平直粗糙, 宽度一般在 0.2~2mm, 充填钙质薄膜。

表2 右岸坝基心墙区揭露主要断层汇总表

断层 编号	位置 (坝轴线桩号)	产状		垂直断距 (m)	坝基下分布长度 (m)	断层带宽度*		断层带物质
		走向 (°)	倾向 (°)			强破影响带宽度 (m)	14~20	
F <sub>1</sub>	DO+700	118	NE	83	220	750	0.9~1.5*	断层泥夹角砾、岩屑。强破影响带
F <sub>233</sub>	D0+884.84	102	SW	68	15~17	420	0.5~1.7	为碎块岩。
F <sub>231</sub>	D0+976.34	103	NE	82~85	4	350	1~1.5	断层泥夹少量角砾。
F <sub>230</sub>	D1+218.34	100	SW	73	50~70	210	0.5~0.8	断层泥夹岩屑。

右岸坝基在 P<sub>2</sub><sup>3-2</sup> 岩组地层底部揭露一层泥化夹层,连续率可达 100%。该层夹泥母岩为泥质页岩,厚 6~10cm,泥化厚度 3~5cm,为全泥型(a)及泥夹碎屑型(b)。

右岸坝基建基面大多干燥,局部仅有零星泉水出露,且大多在断层带附近,出水量一般在 0.01~0.02L/s。据施工期右岸坝基埋设的渗压计所监测地下水位资料:F<sub>233</sub>~F<sub>231</sub>断层间,心墙区 R5~R6 间 P<sub>2</sub><sup>3-2</sup> 岩组含水层地下水位为 150~170m;F<sub>1</sub> 断层南侧至 F<sub>233</sub>断层间,坝轴线上、下游 P<sub>2</sub><sup>3</sup> 岩组含水层地下水位为 135~141m。

2.2 坝基左岸岩体工程地质特性

左岸坝肩自上而下开挖揭露 T<sub>1</sub><sup>6-1</sup>~T<sub>1</sub><sup>3-1</sup> 岩组地层。地层产状:50°~60°∠8°~9°。

左岸心墙区 L5 以南开挖揭露的规模较大断层

(见表 3),断层均与坝轴线近直交。二断层带间岩体较破碎,完整性差,发育十几条次生小断层,部分岩体形成褶皱,对坝基岩体稳定及渗漏有较大影响。

左岸心墙区主要发育走向 NNE、NW 和 NNW3 组节理,各岩组节理发育情况不一样。T<sub>1</sub><sup>6-1</sup> 岩组岩体受风化卸荷影响,节理裂隙密集。T<sub>1</sub><sup>5-3</sup> 岩组上部 8~9m 厚岩层,节理发育,NNE 组节理大多切层,延伸较大,在心墙区内发育多条宽大张开裂缝,最宽可达 20~30cm。T<sub>1</sub><sup>4</sup> 岩组发育十几条走向 NW 贯穿性节理,在切层方向延伸长度均大于 10m。T<sub>1</sub><sup>5-2</sup>、T<sub>1</sub><sup>4</sup>、T<sub>1</sub><sup>3-1</sup> 硬岩组份含量较高的岩组节理发育程度较高,节理密度一般 2~3 条/m。T<sub>1</sub><sup>5-2</sup>、T<sub>1</sub><sup>5-1</sup>、T<sub>1</sub><sup>3-2</sup> 岩组节理密度一般在 1~2 条/m。节理面大多平直粗糙,宽度一般在 0.5~1.5mm,充填钙质薄膜。左岸心墙区揭露泥夹层见表 4。

表3 左岸心墙区揭露断层汇总表

断层 编号	位置	产状		垂直断距 (m)	断层带宽度*		墙区分布长度	断层带物质
		走向 (°)	倾向 (°)		强破影响带宽度 (m)	1~2		
F240	L5~L6	105	SW	85	12~15	0.5*	28	泥夹角砾
F238	L13 北侧	105	NE	87	15	0.8*	30	泥夹角砾
F236	L16~L17	100	SW	80	65	2~3 3*	28	泥夹角砾
						6.5		

表4 左岸心墙区揭露泥化夹层汇总表

序号	岩组	位置	高程 (m)	延伸长度 (m)	厚度 (mm)	类型	夹泥特性
①	T <sub>1</sub> <sup>3-3</sup>	NL8 南侧	244.2~243.3	50.6	1~4	a	连续性较好
②	T <sub>1</sub> <sup>5-2</sup>	ML9~ML10	235.7~229.9	59.1	1~5	a	呈断续状
③	T <sub>1</sub> <sup>4</sup>	M12~M13	206.7~202.6	26.6	2~6	s	连续性较好
④	T <sub>1</sub> <sup>4</sup>	ML13~ML14	203.4~194.4	60.5	8~10	s	连续性较好
⑤	T <sub>1</sub> <sup>4</sup>	ML14~ML15	187.8~182.2	20.7	5~8	s.d	连续性较好
⑥	T <sub>1</sub> <sup>4</sup>	ML15 附近	180.8~176.2	27.5	3~14	s	连续性较好
⑦	T <sub>1</sub> <sup>4</sup>	ML15~ML16	170.5~168.9	15	3~4	a	连续性较好

3 坝基右岸和左岸岩体工程地质问题

3.1 右岸坝基粘土岩地层快速风化问题

右岸坝基二迭系各岩组粘土岩地层,强度较低,力学试验结果表明,饱和极限抗压强度最低值仅为 3.72~3.92MPa,平均值为 9.5MPa,相应的软化系数为 0.41,且具有膨胀性、崩解性等特点。开挖暴

露后若不采取工程防护措施加以防护,特别是在干湿交替条件下,表层约 0.3~0.5m 厚的岩体在短时间内即崩解风化,呈松散碎屑状。由于粘土风化崩解速度快,心墙区在进行基岩处理前,绝大部分粘土岩地层需要预留保护层进行二次开挖。原设计对粘土层表层喷护一层混凝土方案,由于不能及时喷护,且由于粘土岩干缩、崩解影响,防护效果较差,大部分改为浇筑混凝土盖板。

### 3.2 右岸坝基岩体风化卸荷问题

右岸坝基岩体大多为砂岩与粘土岩、泥质页岩互层地层。从风化情况看,由于岩性不同,影响程度不一致,软弱的页岩、粘土层类受风化后,物理力学性质有较大变化能进行全、强、弱等分化程度的分带,但风化不很深。坚硬的砂岩类,受风化后,物理力学性质变化很小。从卸荷松弛情况看,不论是砂岩或粘土岩类,都有较大程度的变化,主要表现在裂隙数量增多,裂隙宽度增大,透水性增强,弹性波波速变小等特点,并随岩性分布和地形的变化而表现出不同程度的风化卸荷作用。另外,在右岸坝基开挖范围内,有多处岸坡发生了变形破坏,这些变形破坏体对边坡稳定性和坝基开挖处理有很大影响。

### 3.3 右岸坝基 $F_1$ 断层带防渗问题

$F_1$  断层位于右岸坡脚下,走向与坝轴线近似垂直,断层产状:  $287^\circ \sim 297^\circ / NE \angle 82^\circ \sim 86^\circ$ , 断距达 200m。断层带宽 0.9~2m, 充填紫红色塑性粘泥夹角砾、岩屑, 挤压紧密, 透水性差, 据勘探阶段试验资料, 透水率小于 1Lu, 断层带物质渗透系数  $K < 10^{-9}$  cm/s, 具有隔水性。断层两侧强破影响带, 由构造片状岩, 碎块岩组成, 岩体较破坏, 透水性大, 是渗流主要通道。帷幕轴线处断层强破影响带宽 14~20m, 坝基内最宽处可达 30~40m。因此,  $F_1$  断层

的处理在坝基处理设计中占有很重要的地位, 处理的好坏将直接影响到大坝的安全。

### 3.4 左岸“老虎嘴”的工程地质问题

在 1993 年 4 月大坝帷幕线北段勘探中, T656 号钻孔进入基岩之后, 在 104.13~102.06m 高程发现了 2.07m 的含砾砂层, 据此判定 T656 与 T657 钻孔之间(孔距为 14m)基岩陡坎下有一冲蚀穴(一般称为“老虎嘴”)。为查明“老虎嘴”在防渗墙处的分布与形态, 确定开挖设计方案, 于 1996 年 11~12 月对“老虎嘴”进行了补充勘探。钻孔资料表明, 大坝防渗墙北端覆盖层掩埋的所谓“老虎嘴”, 实际上是一处基岩反坡, 顺河延伸长度不大。

### 3.5 左岸山体稳定性问题

小浪底斜心墙堆石坝左坝肩为一南北向山岭, 长约 2km。其中南段(即近河段)1.5km, 山体相对比较单薄。附近有一垭口, 基岩面高程不到 240m, 需设副坝。

左岸山体上部主要出露三迭系下统( $T_1^f$ )和( $T_1^g$ )岩组。其中以  $T_1^f$  岩层为主, 且在沟内大部分断脚,  $T_1^f$  岩组为厚层钙、硅质砂岩与粉砂质粘土岩互层, 层间发育泥化夹层。查明有 15 层, 其中有些夹层的连续性较好, 连续长度可达 200~400m, 夹泥层综合(考虑夹泥类型、连续率等)内摩擦系数  $f = 0.26 \sim 0.29$ , 凝聚力  $c = 4.9$  kPa。并且泥化夹层在上、下游坡临空出露或埋深较浅, 对上部岩体的稳定十分不利。另外, 三条近于平行的大断层(表 3)横切山体, 其一与左岸山体山脊走向成约  $30^\circ$  角斜切山体, 可失稳破坏。水库蓄水后, 山体的水文地质条件将发生改变, 特别是遭遇地震时, 上述问题将更为突出。

## The Engineering Geological Characteristics of the Subgrade of Xiaolangde Dam

Liang Huipu Ge Yong

(1. 1st. Hydrogeological & Eng. Geological team, Henan geol & mining Investigation & Dev. Bur. 453002; 2. Inst. of Investigation plan & Design, Huanghe Water Conserancy, Zhengzhou 450003)

**Abstract** Due to the existance of defects in the base of the dam in order to avoid instability after the dam was build and water was stored, engineering geological chazacteristics and key problems of engineering geology are emplasized in this paper.

**Key words** overlying stratum of river bed, seismic liquefaction, siltized intercation, fault