

坪溪水库坝体填土渗透稳定评价及处理建议^{*}

李 帆, 白海山

(广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510170)

摘 要:坪溪水库坝体为填土坝, 坝基未处理, 填土均放在强风化和全风化粗粒花岗岩上, 填土以全风化和强风化花岗岩为主, 局部夹有坡积土和砂岩全风化土, 由碾压法和水坠法筑成, 透水性不均匀且较大, 本文通过分析填体填土的质量、渗透稳定性并提出处理建议。

关键词:坪溪水库坝体; 坝体填土渗透稳定; 处理建议

中图分类号: P642 2 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2005) S1-0331-05

1 工程概况

坪溪水库正常蓄水位 361 m, 相应库容 1 090 万 m^3 。水库于 1977 年 10 月动工兴建, 1981 年 3 月竣工, 工程等别为 3 等。主坝为均质土坝, 坝顶长度 269 m, 坝顶高程 366.5 m, 最大坝高 55 m, 坝顶宽 8 m。

2 坝址工程地质条件

坝基全部为燕山三期粗粒黑云母花岗岩, 以全风化岩为主 (呈砾质土或含粘质土砂砾, 稍湿—湿, 硬塑—坚硬), 局部为强风化岩 (岩芯呈块状和短柱状, 夹有全风化薄层和弱风化岩, 裂隙发育, 完整性很差, $\text{RQD}=0\sim 8\%$, 岩质软弱)。坝基中部原为一条形山, 山顶高程 333.09 m, 条形山两侧各有一条小河, 两条小河在坝基中下部汇成一条河。右岸为一较雄厚条形山, 山顶高程 432.3 m; 左岸山体雄厚, 山顶高程 500 m 以上。

坝基构造较发育。右坝肩裂隙发育, 产状为 $\text{N}20\sim 35^\circ\text{W}/\text{SW}\angle 50\sim 55^\circ$ 、 $\text{SN}/\text{E}\angle 75\sim 80^\circ$ 和 $\text{N}80^\circ\text{E}/\text{SE}\angle 80^\circ$ 三组裂隙, 每组 2~3 条/m, 岩体完整性差; 在左坝肩亦有三组裂隙, 产状为 $\text{N}30^\circ\text{W}/\text{NE}\angle 60^\circ$ 、 $\text{N}50^\circ\text{E}/\text{NW}\angle 70^\circ$ 和 $\text{EW}/\text{S}\angle 45\sim 55^\circ$, 每组 1~2 条/m。

3 坝填土物理力学性质及取值

土坝填筑土料均就地取材, 在坝址附近 1 km 范围内取表层土, 大部分由全风化粗粒黑云母花岗岩组成 (呈粘土质砂砾和粉土质砂砾), 夹有少量坡积层和全风化粉砂岩。填筑用水坠法和碾压法完

成 (先用碾压法在坝体底部及表层形成一个包围体, 在包围体内用水坠法分层、分块填筑, 厚度随位置不同变化较大, 一般坝中间厚, 四周薄; 坝体表层和底部均由碾压法填筑坝)。

①—1 上部碾压法坝填土: 取样做固结不排水剪和按水电常规做饱和快剪试验, 其物理力学性质指标为: 天然含水量 $W=23.8\%$, 密度 $\rho=1.83\text{ g}/\text{cm}^3$, 干密度 $\rho_d=1.48\text{ g}/\text{cm}^3$, 孔隙比 $e=0.776$; 压缩系数 $a_v=0.40\text{ MPa}^{-1}$, 为中—高压缩性土。饱和快剪 (修正值, 砂土样试验成果其物理指标用平均值, 力学指标用修正值, 下同): 摩擦力 $C_q=8.5\text{ kPa}$, 摩擦角 $\varphi_q=27.6^\circ$; 固结不排水抗剪强度: $C_{cu}=10.0\text{ kPa}$, $\varphi_{cu}=20.5^\circ$; $C_{cu}'=14.0\text{ kPa}$, $\varphi_{cu}'=26.3^\circ$; 渗透系数 k_{20} (最大) $=8.74\times 10^{-4}\text{ cm}/\text{s}$, k_{20} (平均) $=4.09\times 10^{-4}\text{ cm}/\text{s}$ 。做标准贯入试验平均值 $N=14$ 击, 小值平均值 $N=8$ 击。

①—2 中部水坠法坝填土: 水坠法坝填土均在坝体的中间部, 被碾压法填土包围, 取样做固结不排水剪和水电常规做饱和快剪试验, 其物理力学性质指标为: $W=21.4\%$, $\rho=1.93\text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_d=1.59\text{ g}/\text{cm}^3$, $e=0.659$, $a_v=0.26\text{ MPa}^{-1}$, 为中—低压缩性土。饱和快剪: $C_q=28.1\text{ kPa}$, $\varphi_q=26.5^\circ$; 固结不排水抗剪强度: $C_{cu}=14.9\text{ kPa}$, $\varphi_{cu}=21.4^\circ$; $C_{cu}'=12.4\text{ kPa}$, $\varphi_{cu}'=27.8^\circ$; k_{20} (最大) $=9.84\times 10^{-4}\text{ cm}/\text{s}$, k_{20} 大值平均值 $=7.85\times 10^{-4}\text{ cm}/\text{s}$, k_{20} (平均) $=4.59\times 10^{-4}\text{ cm}/\text{s}$ 。标准贯入试验平均值 $N=19.0$ 击, 击数为 6~50 击, 一般为 10~25 击, 小值平均值 $N=14.5$ 击。

①—3 下部碾压法坝填土: 取样做固结不排水

^{*} 收稿日期: 2005—02—02

作者简介: 李 帆 (1971 年生), 男, 工程师; E-mail: gpdipy1974@21cn.com

剪主按水电常规做饱和快剪试验, 其物理力学性质指标为: $W=22.6\%$, $\rho=1.98\text{ g/cm}^3$, $\rho_d=1.61\text{ g/cm}^3$, $e=0.635$, $a_v=0.27\text{ MPa}^{-1}$, 为中压缩性土。饱和快剪: $C_q=35.6\text{ kPa}$, $\varphi_q=29.6^\circ$; 固结不排水

抗剪强度: $C_{cu}=13.0\text{ kPa}$, $\varphi_{cu}=24.3^\circ$; $C_{cu}'=12.0\text{ kPa}$, $\varphi_{cu}'=29.9^\circ$; $k_{20(\text{最大})}=2.52\times 10^{-4}\text{ cm/s}$, $k_{20(\text{平均})}=1.96\times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 。标准贯入试验平均值 $N=21.2$ 击, 小值平均值 $N=19.0$ 击。

表 1 坝填土地质参数取值
Tab 1 Geological parameter of the earth fill of the dam

项 目	干密度	天然含水量	总应力/kPa		有效应力/kPa		渗透系数
	($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	(%)	C_{cu}'	(φ_{cu}')	C_{cu}'	(φ_{cu}')	($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
上部碾压填土	1.48	23.8	10~12	20~22	10~14	25~28	4.0×10^{-4}
中部水坠填土	1.59	21.4	10~15	20~23	10~15	27~30	8.0×10^{-4}
下部碾压填土	1.61	22.6	10~13	20~24	10~14	25~30	2.0×10^{-4}

4 坝填土颗分成果

根据勘探资料, 坝填土主要为粘质土砂或粉质土砂。而①—2层中经常可以碰到砂砾聚集的情况出现, 粘性土含量较少, 芯样呈砂砾状, 取样较困难, 本层取到的原状土样多为粘质土砂砾, 并且粘性土含量稍高, 与实际情况有出入。取样做室内颗分试验: ①—1层大于 0.075 mm 含量为 52.4%~68.4%, 平均值 64.4%; ①—2层大于 0.075 mm 含量为 52.6%~76.8%, 平均值 64.8%; ①—3层大于 0.075 mm 含量为 55.6%~61.8%, 平均值 58.7% (坝填土室内颗分试验成果表见表 2)。根据颗分成果, 填筑土为粘质土砂或粉质土砂, 级配较均匀, 小于 0.075 mm 的细粒土含量多大于 35%~40%, 根据现场钻探情况, 除水坠法填筑时局部层段产生砂砾聚集情况外, 其它各处细粒土均匀分布, 充填在粗粒土间, 有粘性, 防渗性能较好 (图 1)。

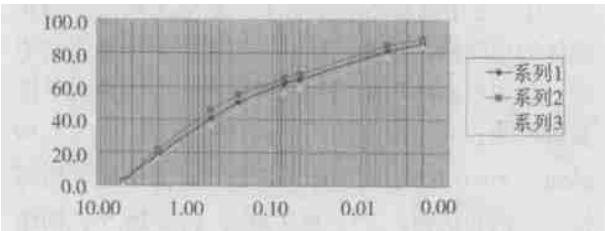


图 1 坝体填土各层颗分平均值曲线

Fig 1 Grading curves of the earth fill of the dam

注: 系列 1—①—1 层颗分曲线; 系列 2—①—2 层颗分曲线; 系列 3—①—3 层颗分曲线。

5 渗透变形

根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287—99) 土的渗透变形判别方法, 先判别土的渗透变形类型, 最后确定临界水力比降和允许水力比降。

根据颗分曲线, 坝填土抵细粒的区分粒径 $d_f\cong 0.27\text{ mm}$, 对应的细颗粒含量 $P_c\cong 48\%$ 。

根据公式 $P_c\geq$ 或 $<[1/4(1-n)]\times 100$ n —土的孔隙率%, 填土 $n=1/(1+e)=0.592$ 判别填筑土为管涌型、过渡型和流土型。

$P_c(<48\%)<[1/4(1-n)]\times 100=61.3\%$, 属管涌型。

管涌型临界水力比降

$J_{cr}=[2.2(Gs-1)(1-n)^2]\times d_5/d_{20}$ Gs —土颗粒密度与水密度之比, d_5 、 d_{20} —分别占总土重的 5%和 20%的土粒粒径 mm。 $Gs=2.63$, $n=0.592$, $d_5=4\text{ mm}$, $d_{20}=2\text{ mm}$ 。计算所得 $J_{cr}=1.19$ 。取安全系数为 2, 则允许水力比降 $J_{\text{允许}}=0.59$ 。

6 坝体填土透水性

坝填筑土料均就地取材, 在坝址附近 1 km 范围内取表层土, 土料绝大部分为燕山期粗粒黑云母花岗岩风化土 (呈粘土质砂砾和粉土质砂砾)。大坝施工过程中, 用水坠法和碾压法完成, 完成方法: 先用碾压法在坝体底部及表层形成一个包围体, 在包围体内用水坠法分层、分块填筑。根据安全鉴定和本次勘察主坝取土样统计, 上部碾压法填土干密度平均值为 1.48 g/cm, 呈松散—稍密状; 中部水坠法填土干密度为 1.59 g/cm, 呈稍密状; 下部碾压法填土干密度平均值为 1.61 g/cm, 呈稍密—中密状。水坠法填筑土会出现粗粒料、粘性土料相对集中现象, 易产生层状渗漏, 在本次勘察过程中, 个别钻孔出现无迴水、透水性大的现象就多由这种原因造成 (钻孔无迴水段见表 3)。钻孔资料表明: 漏水点为含粘性土砂砾, 粘性土含量少, 以砂砾为主, 透水性较大, 而钻孔无迴水说明在漏水位置有渗漏通道。

表 2 坝填土室内颗分试验成果表

Tab 2 Grain analysis results of the earth-fill

颗粒组成(累计百分含量)/(%)										土名及符号 (SL237— 1999)	
> 60	> 20	> 5	> 2	> 0. 5	> 0. 25	> 0. 075	> 0. 05	> . 005	> 0. 002		
①— 1	0. 0	0. 0	1. 8	18. 4	41. 8	51. 9	63. 3	65. 3	81. 3	84. 3	粉土质砂 SM
		0. 0	1. 6	12. 7	31. 0	41. 5	57. 2	59. 8	81. 4	86. 2	粘土质砂 SC
		0. 0	1. 9	20. 6	51. 0	60. 0	68. 2	68. 9	82. 0	84. 9	粘土质砂 SC
		0. 0	1. 6	15. 5	27. 1	37. 2	52. 4	58. 3	80. 5	87. 3	粘土质砂 SC
		0. 0	3. 6	22. 7	44. 1	54. 7	67. 8	72. 3	90. 2	92. 7	粘土质砂 SC
		0. 0	1. 7	3. 9	21. 1	48. 7	58. 7	68. 4	69. 0	82. 0	粘土质砂 SC
		0. 0	1. 1	18. 5	40. 0	47. 6	55. 7	57. 0	72. 9	77. 7	粉土质砂 SM
组数		7	7	7	7	7	7	7	7	7	
平均值		0. 2	2. 2	18. 5	40. 5	50. 2	61. 9	64. 4	81. 5	85. 4	
①— 2			3. 2	23. 8	46. 9	54. 3	63. 2	66. 3	83. 7	89. 1	粉土质砂 SM
			1. 6	16. 3	34. 2	42. 8	52. 6	55. 9	76. 4	82. 4	粉土质砂 SM
			0. 4	15. 1	39. 7	49. 3	58. 1	60. 9	77. 6	82. 3	粉土质砂 SM
			2. 0	21. 4	50. 2	59. 1	67. 2	69. 5	87. 4	90. 2	粘土质砂 SC
			3. 7	31. 1	58. 7	67. 4	76. 8	80. 1	91. 4	93. 1	粘土质砂 SC
			1. 9	24. 3	45. 5	53. 0	64. 4	66. 6	87. 7	90. 7	粉土质砂 SM
			7. 1	34. 7	58. 0	65. 2	73. 2	74. 4	88. 4	91. 1	粉土质砂 SM
			4. 6	30. 8	58. 7	66. 3	73. 5	75. 1	88. 8	91. 9	粘土质砂 SC
			2. 3	17. 4	48. 0	57. 9	68. 6	70. 4	86. 7	89. 6	粉土质砂 SM
			1. 5	11. 3	29. 6	42. 1	55. 7	59. 1	79. 5	84. 0	粘土质砂 SC
			2. 5	14. 5	35. 1	47. 0	59. 8	63. 5	86. 1	90. 3	粘土质砂 SC
组数			11	11	11	11	11	11	11	11	
平均值			2. 8	21. 9	45. 9	54. 9	64. 8	67. 4	84. 9	88. 6	
①— 3		0. 0	2. 4	17. 0	35. 3	47. 7	61. 8	64. 7	81. 0	86. 4	粘土质砂 SC
		1. 5	2. 0	10. 6	34. 5	49. 7	55. 6	61. 9	80. 9	87. 0	粘土质砂 SC
组数		2	2	2	2	2	2	2	2	2	
平均值		0. 7	2. 2	13. 8	34. 9	48. 7	58. 7	63. 3	81. 0	86. 7	

表 3 钻探过程中钻孔无迴水段统计表

Tab 3 Statistics of segments of the boreholes without return water in drilling

孔号	钻孔位置	漏水点顶板	漏水点底板
		孔深/ 高程	孔深/ 高程
ZK8	坝顶中部	4. 7/ 359. 57	13. 6/ 350. 67
ZK13	坝上游坡	13. 9/ 328. 4	20. 7/ 321. 6
ZK14	坝下游坡	3. 0/ 346. 91	8. 0/ 341. 91
ZK15	坝下游坡	3. 0/ 349. 21	11. 8/ 340. 31

在水库运行期间, 在背水坡标高 336. 5~338. 5 m 在 1984 年发现渗漏, 最大渗流量 426 L/h, 后经在漏水处灌浆处理, 至 1997 年该高程仍然有渗漏现象。本次在漏水处布置钻孔 1 个 (由于漏水点正好处于引水管线上部, 故布置钻孔时向漏水点左侧偏移 5 m), 根据钻孔资料, 本段填土呈粉土质砂砾和粘土质砂砾, 干密度 $\rho_d=1. 49\sim 1. 60\text{ g/cm}^3$, 标准贯入试验击数 $N=16, 8, 14$ 击, 呈稍密状, 注水试验所取得的渗透系数 $k=1. 23\times 10^{-4}\sim 5. 37\times$

10^{-4} cm/s , 属中等透水性。钻孔资料表明: 漏水点为含粘性土砂砾, 粘性土含量少, 以砂砾为主, 透水性较大, 而钻孔无迴水说明在漏水位置有渗漏通道。

根据注水试验成果, 坝填土渗透系数平均值 $k=1. 23\times 10^{-4}\text{ cm/s}$, 属中等—弱透水性。室内渗透试验 $k_{20}=9. 84\times 10^{-4}\sim 6. 28\times 10^{-7}\text{ cm/s}$ 。现场注水试验与室内渗透性试验成果基本一致, 均属中等透水 and 弱透水。各层渗透系数见表 1。

对应填筑方法分层, ①—1 上部碾压法填筑土填土较均匀, 属中等透水性, 本层渗透系数建议采用 $k_{20}=4. 0\times 10^{-4}\text{ cm/s}$; ①—2 中部水坠法填筑土由于常见砂砾集中现象, 渗透系数变化大, 填筑均匀性较差, 透水性因填土的位置不同而变化较大, 也从另一方面说明水坠法填筑土的不均匀性, 本层大值平均值 $k_{20}=6. 58\times 10^{-4}\text{ cm/s}$, 建议采用 $k_{20}=8. 0\times 10^{-4}\text{ cm/s}$; ①—3 下部碾压法填筑土, 土质较均匀, 建议采用 $k_{20}=2. 0\times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 。

总体分析, 坝体填土属中等—弱透水性。

7 计算分析成果与观测资料对比

根据勘探资料, 水库蓄水位为 322.79 m, 主坝轴线坝顶钻孔水位 ZK7、ZK8 孔分别为 323.82 m 和 325.27 m, 坝前坡 ZK11 孔水位 336.78 m, 坝后坡 ZK12、ZK13 钻孔水位分别为 331.51 m 和 314.50 m (图 2)。

在坝体外坡右侧已布置两排测压管, 每排 4 个孔, 其中第一排测压管与勘探剖面相近, 用相隔 10

天的两次测量记录平均值与钻孔稳定水位对比 (见表 4)。水库水位为 322.787 m 时, 主坝轴线坝顶观测孔 I-1 水位 319.185 m, I-2 水位 314.513 m、I-3 水位 315.571 m、I-4 水位 319.222 m, 坝体浸润线平缓, 在坝后坡水位上挑, 主要受原地面线较高影响。测压管水位的变化趋势和库水位变化基本一致, 浸润线正常。浸润线水力坡降为 $J=0.1$, 远远小于允许水力坡降 $J_{允许}=0.59$, 坝填土不会产生渗透破坏。

表 4 坪溪水库测压管水位观测记录表

Tab 4 Water table observational data of the piezometers of Pingxi Reservoir

测压管编号	管口高程/m	管口至水面距离/m			管中水位高程/m	钻孔水位高程/m
		5 月 30 日	6 月 10 日	平均		
I ~1	363.695	43.85	45.17	44.51	319.185	321.82(ZK7)
I ~2	354.493	40.53	39.42	39.98	314.513	315.51(ZK12)
I ~3	344.841	29.30	29.25	29.27	315.571	314.50(ZK13)
I ~4	335.742	16.45	16.60	16.52	319.222	

注: 库水位: 5 月 30 日为 321.767m, 6 月 10 日为 322.787m

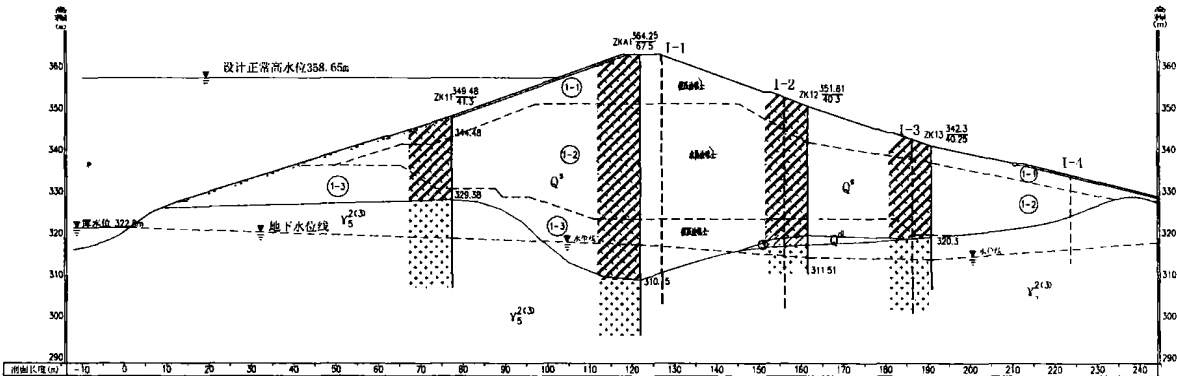


图 2 坪溪水库坝址工程地质纵剖面图

Fig. 2 Engineering geological longitudinal section of the earth dam at Pingxi Reservoir

8 结论及处理建议

(1) 根据勘察和试验成果, 坪溪水库坝填土不会产生渗透破坏, 填土属中等—弱透水性, 工程地质条件良好。

(2) 坝体渗水段渗漏的外界条件是在短时间内降雨量较大, 降雨时间必须在 3 天以上, 鉴于这两个外因, 初步分析, 这个位置渗漏主要有以下几个原因: ①坝体透水性较大, 在坝体填土中有层状出现的粘土质砂砾层 (每一层用水坠法填筑的表层经常会出现); ②此渗漏点位于一山坡上, 由水坠法形成的粘土质砂砾与地表全风化和强风化岩结合较差, 降雨形成的地表水沿结合面渗入, 在粘土质砂

砾层中聚集, 使得地下水位上升; ③填土不均匀, 密实度较差, 出现砂与粘性土分离现象; ④在水坠法填筑坝体时, 在坝体中先形成一砂柱以利排水, 这些砂柱互相之间不连通, 为独立体, 此砂柱具强透水性。

(3) 坝体为均质土坝, 分别用碾压法和水坠法填筑, 填土质量总体较均匀, 但由于水坠法经常会出现泥层和砂层集中现象, 并且在水坠法填筑过程中便于排水而设置的砂柱均有较大的透水性。

(4) 在引水管线偏左背水坡标高 336.5~338.5 m 在 1984 年发现渗漏, 除了与填坝土渗透系数较大、砂层集中、有砂柱分布等因素外, 大坝从修建运行至今, 未做过系统的灌浆处理也是透水性重要因素。

(5) 水坠法填筑土坝是在特定历史条件下进行的，特点是用人多、工作面大、速度较快，主要适合于以人力资源为主、取料主要在坝肩的土坝填筑中，但由于经常出现砂层、泥层聚集现象，密实度和均匀性均较差，已不适合当前机械化的工作方式，建议土坝填筑中尽量不要采用此种工作方法。

(6) 土坝填土与坝基有渗漏通道，建议用帷幕

灌浆的方法进行处理（填土具中等~弱透水性，灌浆是可行的），在先期局部段已做过处理，效果较理想，根据灌浆过程中所记载的资料，渗透系数有较大的减小，由 10^{-4} m/s 降到 10^{-5} m/s，尤其是基础与填土之间，强风化岩与填土不易形成一个整体，有顺层漏水的可能性，建议灌浆深度入弱风化岩 3 m。

Pingxi Reservoir Dam Sappage Stability Evaluation and Treatment Suggestion

Li Fan, Bai Hai shan

(Guangdong Provincial Investigation, Design and Research Institute of
Water Conservancy and Electrical Power, Guangzhou 510170, China)

Abstract: The dam of Pingxi Reservoir is a rolled earth filled dam. Its foundation is formed completely and highly by weathered coarse grained granite without treatment. The earth fill's quality and seepage stability are examined by engineering geological exploration. The result shows that the earth dam has a good engineering geological performance without seepage failure.

Key words: Pingxi Reservoir earth dam; earth dam sappage stability; treatment suggestion