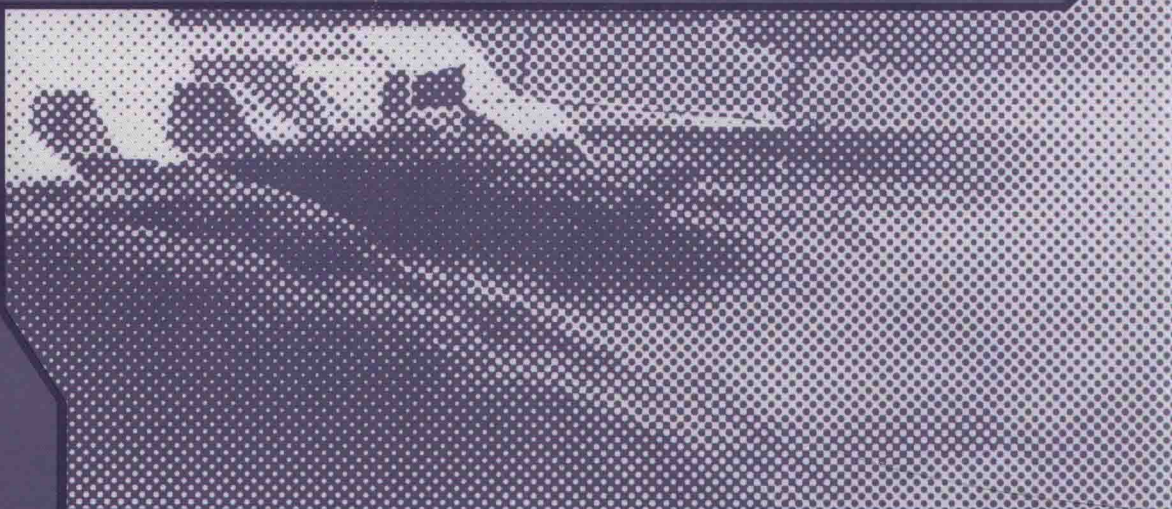


设计与
研究

深覆盖层上修建土石坝筑坝材料和 坝基处理研究

本书编委会 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

深覆盖层上修建土石坝筑坝材料和 坝基处理研究

本书编委会 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

在深覆盖层上修建土石坝工程很多,但在采用的筑坝材料以及对地基的处理方法各有千秋,对总体设计思路没有形成系统的模式。本书将带领读者一起探寻深覆盖层土石坝的筑坝材料和坝基处理设计历程思路和理念。本书共 24 章,内容包括:小浪底土石坝坝型比较、筑坝材料和坝基覆盖层处理设计特色;西霞院土石坝土工膜防渗材料研究、坝基砂砾石覆盖层处理特色;河口村大坝坝型比选、面板坝设计特点和坝基覆盖层处理及检测等。

本书可供从事坝工建设的勘测设计、施工、运行、科研、教学等科技人员阅读参考,也可作为相关领域大专院校师生的参考资料和工程案例读物。

图书在版编目(CIP)数据

深覆盖层上修建土石坝筑坝材料和坝基处理研究 /
《深覆盖层上修建土石坝筑坝材料和坝基处理研究》编委
会著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015.7
ISBN 978-7-5170-3527-5

I. ①深… II. ①深… III. ①土石坝—筑坝—建筑材
料—研究②土石坝—坝基—地基处理—研究 IV.
①TV641

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第190853号

书 名	深覆盖层上修建土石坝筑坝材料和坝基处理研究
作 者	本书编委会 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京美精达印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 17.75 印张 420 千字
版 次	2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	68.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《深覆盖层上修建土石坝筑坝材料

和坝基处理研究》

编写委员会

代巧枝 田华祥 肖 豫 刘许超 林 楠 李海晓
任松林 吴 昊 何蕴华 樊小发 姜苏阳

前 言

小浪底水利枢纽工程位于黄河中游最后一个峡谷的出口，上游距三门峡水利枢纽 130km，回水直至三门峡坝下。坝址以上控制流域面积 69.42 万 km^2 ，占黄河流域总面积的 92.2%；坝址处实测多年平均径流量 423.20 亿 m^3 ，多年平均输沙量 16 亿 t。工程的开发目标为“以防洪（包括防凌）、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电，蓄清排浑，综合利用，除害兴利”。

小浪底大坝为带内铺盖的壤土斜心墙堆石坝坝型，设计坝高 154m，施工最大坝高 160m，坝顶高程 281.00m，坝顶宽 15m，坝顶长 1667m，坝体总方量 5185 万 m^3 。

小浪底工程大坝坝基地质条件极为复杂，河床有厚约 80 余米的砂砾石覆盖层，坝基范围内出露的影响大坝设计的断层有数十条，均呈顺水流方向展布；左坝肩山体单薄，岩层内发育有连续性很好的泥化夹层；右坝肩有承压水；坝址位于高地震烈度区，基本地震烈度为 7 度。外国专家在了解到小浪底大坝的地形地质条件后，评论该坝是挑战性的工程，国内一些咨询专家认为该坝是“五毒俱全”，可见该坝的复杂性。

鉴于小浪底土石坝的技术复杂性和重要性，其筑坝材料及坝基处理设计和研究工作引起了国内坝工界的极大关注，有关专家组对此进行了长期咨询，各有关科研单位和高等院校也配合进行了大量的科研工作，因此书中的成果与国内外土石坝专家的指导及科研单位、高等院校的密切合作分不开的。在此谨表示衷心的感谢。

小浪底水利枢纽工程已于 1999 年 8 月顺利通过蓄水安全鉴定。2000 年 6 月大坝填筑至设计高程。目前大坝已经历了高程 235.00m 水位的考验，运行情况正常。

西霞院水利枢纽工程位于黄河干流中游河南省境内，距上游的小浪底水利枢纽工程 16km，为黄河小浪底水利枢纽的配套工程，是一座以反调节为主，结合发电，兼顾灌溉、供水等综合利用的大型水利枢纽工程。

西霞院水利枢纽工程大坝坝基地质条件相当复杂，河床有厚约 30 余米的砂砾石覆盖层，河床砂砾石层，渗透系数一般为 3~30m/d，属中等—强透水层。两岸滩地的土石坝段，坝基表部为砂壤土、砂层，厚 2~7m，0.25mm 以下颗粒含量达 80.6%，结构疏松，为中等压缩性土，天然状态下允许承载力

90~110kPa, 存在基础稳定性、地震液化和渗漏、渗透稳定等问题, 不宜直接作土石坝基础。坝基基岩为黏土岩、粉砂岩互层, 为弱透水层, 不存在岩体大量渗漏问题。

鉴于西霞院土石坝的技术复杂性和重要性, 其大坝土工膜设计和坝基处理研究工作各有关科研单位和高等院校配合进行了大量的科研工作, 因此本书中的成果与国内外土石坝专家的指导及科研单位、高等院校的密切合作分不开的。在此谨表示衷心的感谢。

建在深覆盖层上的河口村面板坝研究始于该工程项目建议书编报的 2002 年。因面板坝趾板修建在基岩面上的设计和施工国内外都有较成熟的经验, 技术成熟, 安全可靠, 故在项目建议书阶段 (2002—2005 年期间) 作为推荐方案。随着我国坝工技术水平的不断发展, 已有越来越多的混凝土面板坝工程将趾板建在深厚覆盖层上, 并且有了坝高在 100m 以上的工程实例。为此, 可行性研究和初步设计阶段对趾板修建在基岩上和趾板修建在深覆盖层上的面板堆石坝方案进行了同等深度的比选, 前者造价高约 18%, 增加工期 7 个月; 趾板建在深覆盖层上的面板坝因具有了坝基开挖量小、简化导流、缩短工期、降低造价等显著优点成为选定坝型, 坝高 122.5m。

现将河口村面板坝设计与坝基处理过程中对一些技术难题的研究过程及主要研究成果进行系统的介绍, 希望能对推动我国面板坝的发展尽绵薄之力。

本书由代巧枝编写了前言、第 10 章~第 12 章; 田华祥编写了第 1 章; 肖豫编写了内容提要、第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 16 章、参考文献; 刘许超编写了第 13 章~第 15 章、第 17 章; 林楠编写了第 4 章中的 4.1 节; 李海晓编写了第 8 章、第 9 章; 任松林编写了第 18 章、第 22 章; 吴昊编写了第 20 章、第 23 章、第 24 章; 何蕴华编写了第 4 章中的 4.2~4.4 节; 樊小发编写了第 6 章、第 7 章、第 19 章、第 21 章; 在编写过程中参与专题研究的其他设计人员参与了基础资料收集和子课题的部分编写, 不再一一列出, 全书由姜苏阳统稿。

本书引用了大量的设计科研成果和文献资料, 并得到了多家单位和多位专家的大力支持, 在此谨一并表示衷心的感谢! 由于本书涉及专业众多, 编写时间仓促, 错误和不当之处, 敬请同行专家和广大读者赐教指正。

谨以此书献给所有参与和关心小浪底、西霞院和河口村大坝研究、论证和建设的单位、专家、学者, 并向他们表示崇高的敬意与衷心的感谢!

编者

2015 年 6 月

目 录

前言

1 小浪底水利枢纽工程概述	1
1.1 土石坝概况	1
1.2 水文泥沙条件	1
1.3 地震设防标准	2
1.4 地质条件及主要工程地质问题	2
2 小浪底水利枢纽工程土石坝主要研究课题和研究方法	16
2.1 黄土类壤土填筑高坝问题	16
2.2 反滤料问题	16
2.3 开挖料利用问题	17
2.4 深覆盖层处理问题	17
2.5 泥沙问题	18
2.6 抗震问题	19
3 小浪底土石坝坝型比较	20
3.1 坝型比较主要研究的问题和基本思想	20
3.2 初步设计阶段的坝型比较研究	21
3.3 招标设计阶段及其以后的坝型优化	23
4 小浪底土石坝筑坝材料研究	30
4.1 防渗土料性能研究	30
4.2 反滤料研究	51
4.3 堆石料	59
4.4 枢纽建筑物开挖料利用研究	65
5 小浪底土石坝分区和结构研究	73
5.1 河床坝段	73
5.2 左岸山体坝段	85
6 小浪底土石坝坝基覆盖层处理措施研究	88
6.1 深覆盖层垂直防渗处理措施研究	88
6.2 左岸斜心墙下基岩陡坎处理措施研究	97
7 小浪底土石坝抗震液化分析及抗震措施研究	99
7.1 地震动工程参数及材料动参数	99
7.2 抗震设计原则和主要研究课题	102

7.3	经验法判别坝基覆盖层的抗液化性能	103
7.4	简化的剪应力对比法	106
7.5	动力分析	109
7.6	抗震结构和工程措施及抗震性能分析	111
8	小浪底土石坝数值计算分析	113
8.1	大坝稳定分析	113
8.2	左岸山体稳定分析	128
8.3	渗流计算	132
8.4	静力有限元计算	137
8.5	离心模型试验及结果分析	142
9	小浪底土石坝研究结论	144
9.1	研究的技术难度	144
9.2	结语	145
10	西霞院工程概述	147
10.1	土石坝概况	147
10.2	水文泥沙条件	147
10.3	地震设防标准	148
10.4	地质条件及主要工程地质问题	148
11	西霞院土石坝关键技术研究	151
11.1	黄河干流上修建土工膜防渗体坝的可行性研究	151
11.2	土工膜防渗体的选材研究	152
11.3	土工膜砂砾石坝与混凝土建筑物的连接问题研究	152
12	黄河干流上修建土工膜防渗体坝的可行性研究	153
12.1	坝型比选历程概述	153
12.2	壤土斜墙坝型方案比选	154
12.3	复合土工膜斜墙坝型方案比选	157
12.4	两种坝型方案比较	160
12.5	坝型进一步比较	162
13	复合土工膜防渗体的选材研究	169
13.1	土工膜在国内外的应用情况	169
13.2	复合土工膜选材	172
13.3	通过大坝三维有限元应力应变计算分析选材	173
13.4	复合土工膜选型	174
14	改善复合土工膜应力状态和延长其耐久性研究	180
14.1	复合土工膜拉伸试验及安全系数确定	180
14.2	复合土工膜厚度验算	182
14.3	复合土工膜施工要求	182
14.4	其他施工技术要求	185

14.5	复合土工膜质量控制	185
14.6	认识与体会	186
15	砂砾石坝土工膜防渗体与周边建筑物的连接问题研究	187
15.1	复合土工膜与坡脚基础防渗墙的连接	187
15.2	复合土工膜与防浪墙的连接	188
15.3	复合土工膜与上游左右导墙和左右门库的连接	190
16	西霞院土石坝坝基砂砾石覆盖层处理措施研究	192
16.1	坝基主要工程地质问题	192
16.2	两岸河漫滩表层砂壤土、砂层处理	192
16.3	砂砾石坝基防渗处理	193
17	土工膜缺陷渗漏量研究	194
17.1	坝体结构	194
17.2	筑坝材料	196
17.3	坝体计算	199
17.4	土石坝稳定分析	201
17.5	动力分析	202
18	河口村水库工程概述	206
18.1	工程概况与基本地质条件	206
18.2	深覆盖层修筑混凝土面板堆石坝技术现状	212
19	河口村面板坝坝基覆盖层工程地质条件及评价	214
19.1	砂卵石层	214
19.2	砂层透镜体	216
19.3	黏性土夹层	217
20	河口村面板坝推荐坝址上的坝型比选	220
20.1	面板坝与沥青心墙坝的比选	220
20.2	混凝土面板坝趾板基础坝型比较	225
21	河口村面板坝坝基覆盖层防渗设计方案比选	228
22	河口村面板坝设计	233
22.1	坝体轮廓设计	233
22.2	混凝土面板设计	234
22.3	趾板及连接板设计	235
22.4	分缝和止水设计	238
22.5	坝体分区、筑坝材料设计及填筑标准	240
22.6	坝基开挖及基础处理	244
22.7	混凝土防渗墙设计	245
22.8	灌浆设计	245
23	河口村面板坝坝基覆盖层处理措施方案研究	246
23.1	处理方案	246

23.2	处理方案比较	247
23.3	坝基处理应力变形敏感性分析	249
24	河口村面板坝河床坝基覆盖层处理及检测	253
24.1	检测介绍	253
24.2	旋喷桩施工工艺及参数	253
24.3	试验前检测	254
24.4	现场高压旋喷情况	264
24.5	成桩后检测	266
	参考文献	272

1 小浪底水利枢纽工程概述

1.1 土石坝概况

小浪底水利枢纽工程为一等工程，土石坝是其主要挡水建筑物，为 1 级建筑物。按千年一遇洪水设计，万年一遇洪水校核。坝型为与上游围堰相结合的带上爬内铺盖的壤土斜心墙土石坝，坝顶设计高程 281.00m，设计最大坝高 154m，施工最大坝高 160m。上游施工围堰为主坝的一部分，库容大于 4 亿 m^3 ，按百年一遇洪水设计，施工期随着坝体的升高，拦洪设计标准逐步提高到千年一遇。左岸山体加固与主坝连成一个整体，设计标准同主坝。

土石坝采用 17 种筑坝材料填筑，总填筑方量约 5185 万 m^3 ，是国内已建的坝高最高、体积最大、坝型最复杂的黄土类壤土斜心墙土石坝。坝基砂砾石覆盖层深超过 80m，坝基混凝土防渗墙混凝土设计 28d 强度 35MPa，是国内已建工程中墙深最大、混凝土强度最高的刚性混凝土防渗墙。

1.2 水文泥沙条件

1.2.1 水文条件

(1) 代表性流量和洪量见表 1.2-1。

表 1.2-1

代表性流量和洪量

序号	项 目	单 位	数 量	备 注
1	多年平均流量	m^3/s	1342	
2	实测最大流量	m^3/s	17000	
3	调查历史最大流量	m^3/s	36000	1843 年 8 月
4	设计洪水流量	m^3/s	40000	$p=0.1\%$
5	校核洪水流量	m^3/s	52300	$p=0.01\%$
6	围堰拦洪流量	m^3/s	18010	$p=1\%$
7	实测最大洪量	亿 m^3	91.9	12d, 1933 年洪水, 三门峡站
8	设计洪量	亿 m^3	139.0	12d
9	校核洪量	亿 m^3	127.0	12d

(2) 水库典型设计水位见表 1.2-2。

表 1.2-2

水库典型设计水位

序号	项目	单位	水位	备注
1	设计洪水位	m	274.00	$p=0.1\%$
2	校核洪水位	m	275.00	$p=0.01\%$
3	正常蓄水位	m	275.00	
4	正常死水位	m	230.00	

(3) 水库典型库容见表 1.2-3。

表 1.2-3

水库典型库容

序号	项目	单位	库容	备注
1	总库容	亿 m^3	126.5	水位 275.00m
2	防洪库容	亿 m^3	40.5	
3	调水调沙库容	亿 m^3	10.5	
4	有效淤沙库容	亿 m^3	75.5	

1.2.2 泥沙条件

水库泥沙情况见表 1.2-4。

表 1.2-4

水库泥沙情况

序号	项 目	单 位	沙 量	备 注
1	多年平均年输沙量	亿 t	13.51	1919 年 7 月至 1995 年 6 月
2	多年平均含沙量	kg/ m^3	36.9	1919~1960 年
3	实测最大含沙量	kg/ m^3	941.0	1977 年 8 月 7 日
4	设计水平年（2010 年）平均入库沙量	亿 t	13.2	
5	2000 水平年平均含沙量	kg/ m^3	42.5	

1.3 地震设防标准

坝址区地震基本烈度为Ⅶ度。根据《水工建筑抗震设计规范》（SL 203—97）的规定，将大坝的地震设计烈度定为Ⅶ度。

1.4 地质条件及主要工程地质问题

1.4.1 工程地质条件

(1) 地形地貌。坝址左岸山体临河山头高程 290.00~300.00m。向北约 2500m 范围内山脊高程一般在 290.00m 以上，仅在大坝桩号 D0+819.05~D0+989.5m 有一垭口，最低高程仅约 245.00m，需修建副坝。左岸山体由于受上游宣沟、风雨沟，下游翁沟、葱沟和西沟等切割，形成单薄山体，其中在高程 275.00m 有四处山体厚度仅为 80~100m。除坡脚有少量坡积物外，高程 275.00m 以下岩层基本裸露。

右岸 155m 以下为Ⅰ级阶地和漫滩，155m 以上为基岩谷坡。高程 260.00m 以下由于

受东坡东、西两冲沟切割，形成了三条平行的南北向小山梁，高程 260.00m 以上山体雄厚。

(2) 地层岩性。三叠系下统 (T_1) 岩组。其中 T_1^1 岩组为暗紫色粉细砂岩，夹薄层泥岩透镜体，厚 30m； T_1^2 岩组为紫红色钙质细砂岩，夹少量薄层泥质粉砂岩和钙质砾岩，厚 28~32m； T_1^{3-1} 为紫红色钙硅质石英砂岩夹薄层泥质粉砂岩与粉砂质页岩，厚 28~31m； T_1^{3-2} 岩层以紫红色泥钙质，泥钙质粉细砂岩为主夹钙质硅钙质细砂岩，厚 30m 左右； T_1^4 岩组紫红色硅质，钙硅质石英细砂岩，有少量钙质细砂岩，夹薄层泥质粉砂岩或粉砂质泥岩，总厚 58~66m； T_1^{5-1} 岩组为紫红色硅钙质细砂岩与钙泥质粉砂岩或粉砂质黏土岩互层，含软岩高达 40% 左右，多分布在下部，岩层总厚 10m 左右； T_1^{5-2} 岩组岩性与 T_1^4 相近，厚 20m 左右； T_1^{5-3} 岩组中上部以紫红色钙硅质细砂岩为主，夹薄层钙泥质粉砂岩，中下部以钙质、泥钙质粉细砂岩为主夹少量泥质粉砂岩，岩层厚 28~33m； T_1^{6-1} 岩组以泥质粉砂岩为主，厚 50~56m； T_1^{6-2} 岩组为钙质细砂岩夹少量泥质粉砂岩薄层，厚 7~9m； T_1^{6-3} 岩组中、下部以泥质，钙泥质粉细砂岩为主夹钙质细砂岩，上部为泥钙质砂岩与粉砂岩互层，厚 55~60m。

$T_1^1 \sim T_1^6$ 岩组主要分部在左岸及右岸高程 260.00m 以上，其中 T_1^1 、 T_1^2 岩组在河床两侧有部分分布。 T_1^6 岩组在左岸山头有少量分布，其余在泄水建筑物出口，已在坝体范围以外。

二叠系上统 (P_2) 岩层主要出露于右岸。 P_2^1 岩组为粉砂质页岩与泥质页岩， P_2^2 岩组主要为砂岩与细砂岩，夹砾质粗砂岩，厚 41.19~54.57m； P_2^3 岩组为砂质黏土岩与砂岩互层，其中 P_2^{3-1} 、 P_2^{3-3} 、 P_2^{3-5} 主要为黏土岩， P_2^{3-2} 、 P_2^{3-4} 、 P_2^{3-6} 主要为砂岩，分布于右岸高程 260.00m 以下，总厚 85.19~136.9m； P_2^4 岩组以砂粉质黏土岩为主夹薄层粉砂岩及细砂岩。

(3) 地质构造。

1) 断层。坝址区对大坝设计有影响且具有一定规模的断层及其特性见表 1.4-1。

F_1 断层是坝址区规模最大的一条，位于右岸坡脚处，走向 $285^\circ \sim 300^\circ$ ，基本与河道平行，倾角 $80^\circ \sim 85^\circ$ ，垂直断距 200m 左右。 F_1 断层宽度变化较大，在上游围堰轴线附近为 8~12m，灌浆帷幕轴线附近 1~10m，在下游坝脚附近的宽 10m，两侧影响带 10m。断层带充填物为泥所包括的角砾、岩块和岩粉。据压水试验和强力试验证明横穿断层带方向是一个隔水带。

表 1.4-1 坝 址 区 主 要 断 层 表

序号	断层编号	位置	产状			垂直断距	断层性质	断层带宽度	断层带物质组成及胶结情况
			走向/(°)	倾向	倾角/(°)				
1	F_1	右岸坝基	285~300		80~85	±220			断层泥及角砾，两壁为砂岩时为角砾、岩粉及泥，壁面上有小擦痕
2	F_{230}	右坝肩	近 EW	S	52~60	30~70	正	0.3	断层泥及角砾，在倾向方向有分支，局部破碎带较宽

续表

序号	断层编号	位置	产状			垂直 断距	断层 性质	断层带 宽度	断层带物质组成 及胶结情况
			走向/(°)	倾向	倾角/(°)				
3	F ₂₃₁	右岸坝基	290	NE	75~90	0~9	正	0.1	断层泥及角砾, 断层在上坡一带转变为破劈理发育带
4	F ₂₃₂	右岸坝基	277	SW	76	10~35	正	<0.3	断层泥及角砾, 断距向西递减
5	F ₂₃₃	右岸坝基	275	SW	65	17	正	<0.3	断层泥及角砾, 向西延至小清河边规模变小, 在猪娃崖南为几个小断层与 F ₁ 相交
6	F ₂₅₁	右岸滩地	272	SW	70~75	3	正	2.0	断层泥及角砾
7	F ₂₅₂	右岸滩地	283	NE	70	8~12	正	1.57	断层泥及角砾
8	F ₂₅₇	右岸滩地	275	SW	75	2~87	正		
9	F ₂₅₈	右岸滩地	275	SW	75	11~13	正		
10	F ₂₅₃	河床	79~近 EW	SE~S	75	4~10	正		
11	F ₂₅₅	滩地、河床	285	NE	75	2~5	正	0.2	岩块、岩屑及泥
12	F ₂₃₆	左岸	80~106	SE~SW	70~87	60~85	正	1.5	泥质胶结角砾岩
13	F ₂₃₈	左岸	80~106	SE~SW	85	12~30	逆	1.2	泥质胶结角砾岩
14	F ₂₄₀	左岸	81~105	SE~SW	85	12~15	逆	0.5	泥质胶结角砾岩

坝址区断层具有以下特点:

①断裂从走向可分为两组: 一组近东西; 另一组为北东向。且集中成束出现, 近东西向断层是坝基防渗处理的重点。②绝大多数都是高角度正断层。③分支断裂与主干断裂交汇的地带构造破碎严重。④断层带以断层泥与压碎岩块岩粉充填为主。⑤大断层走向有时变化很大。⑥断层带宽度变化受两侧岩性影响, 两侧软岩时宽度小, 坚硬岩石时宽度大。⑦断层地面宽度小, 地下深部有明显的扩大现象。

2) 节理。坝址区岩层中的节理主要发育在以坚硬砂岩为主的刘家沟 (T₁L) 地层中。节理按走向分组主要为 NWW、NNW、NE、NNE 四组节理, NNW 节理数量最多, 倾向稳定, 延展性和切层性较差, 一般只发育在单层内。NWW 组节理次之, 倾向以 SSW 为主, 倾角 80°, 少数倾向 NNE, 倾角 85°以上。节理发育有一个重要特性, 即在一个部位同时发育主要为两组 (一对 X 节理) 夹零星节理, 与层面组合将岩体切割成矩形的六面体。

节理发育多在单层内, 当软硬岩相间分布时节理发育在硬岩中。节理一般近于垂直层面, 统计表明倾角 80°以上占 91.6%, 倾角 75°~80°占 5.6%, 倾角 75°以下的节理仅占 2.8%, 节理间距一般在 0.3~1.5m 之间。

1.4.2 水文地质条件

(1) 水文地质分区。沿灌浆帷幕轴线可分为五个水文地质分区:

1) F_{461} 断层以北 (Ⅰ区)。本区主要分布三叠系和尚沟组 ($T_1^6 \sim T_1^7$) 地层, 节理裂隙发育程度较低。表层强风化卸荷影响造成的强透水带厚 8~20m, 绝大部分钻孔单位吸水率 $\omega_{cp} < 100\text{Lu}$ 。地下水位北高南低, 北部为 250~173m, 向南降至接近河水位。

2) F_{461} 断层至河北岸 (Ⅱ区)。本区含水地层主要为三叠系刘家沟组地层。受北侧 F_{461} , 西 F_{28} 断层阻水带影响地下水位较低, 变化于高程 136.00~139.00m。

3) 河床段 (Ⅲ区, 河北岸至 F_1 断层)。本区包括河槽及两岸漫滩和Ⅰ级阶地。本区主要为 P_2^4 地层, 河床中分布了一系列小断层, 但没有使 P_2^4 地层完全错开。 P_2^4 岩层及小断层透水性均不强 (见表 1.4-2), 可以作为一个完整的相对隔水层。

表 1.4-2 岩性对断层透水性影响统计

孔号	上盘地层岩性	下盘地层岩性	试段埋深/m	透水率/Lu	备注
T_{450}	P 灰石砾岩	P 粉细砂岩	27.35	22.2	只含上盘及断层带本身上盘地层断层及下盘地层及断层带
T_{544}	粉砂质黏土岩	粉砂质黏土岩	32.94	21.5	
T_{264}	粉砂质黏土岩	粉砂质黏土岩	52.56	7.3	
T_{458}	粉砂质黏土岩	粉砂质黏土岩	16.04	107.1	
T_{512}	砂质黏土岩	砂质黏土岩	0.28	1.1	
	粉砂质黏土岩	灰质砾岩	24.55	445	
T_{268}	细中砂岩	粉砂质黏土岩	46.86	0.5	
	粉砂质黏土岩	粉砂质黏土岩	13.7	0.97	
T_{237}	紫红色黏土岩	细砂岩夹少量中砂岩	111.96	0.2	
	粉细砂岩	粉细砂岩	6.39	24.2	
T_{236}	黏土岩	黏土岩	29.68	5.51	
T_{282}	紫红色黏土岩	紫红色黏土岩	27.87	0.41	
T_{214}	紫红色黏土岩	紫红色黏土岩	13.65	9.3	
	紫红色黏土岩	紫红色黏土岩	21.47	4.9	
T_{215}	粉砂岩夹砾岩薄层	粉砂岩	14.2	2.67	
	粉细砂岩	黏土岩	29.84	54.6	
T_{230}	粉砂岩夹砾岩薄层	粉砂岩	19.98	9.4	
T_{283}	粉细砂岩	粉细砂岩	41.93	8.9	
	黏土岩	黏土岩	67.76	17.4	
T_{294}	钙质细砂岩	钙质粉细砂岩	33.27	140	
T_{284}	砂质黏土岩	粉砂质黏土岩	39.85	0.6	
	黏土岩夹薄层砾岩	粉砂岩	50.72	0.4	
	黏土岩	黏土质粉砂岩	59.98	2.1	
	钙质细砂岩	粉砂质黏土岩	91.19	9	
	黏土岩含零星砾岩	青灰色细砂岩	99.37	0.5	

4) $F_1 \sim F_{230}$ 断层水文地质区 (Ⅳ)。本区内主要为巨厚层粉砂土岩与砂岩互层。黏土

岩裂隙不发育或呈紧闭状态，为不含水的相对隔水层。砂岩裂隙相对发展，形成层状含水层。含水层的水头高程为： P_2^{-1} 岩层为 147.20~142.60m， P_2^{-3} 岩层为 186.90~142.10m， P_2^{-2} 岩层为 211.50~142.70m， P_2^{-4} 岩层为 212.70~186.10。由于地层向东倾覆，各层地下水自西向东渐次由潜水变为承压水。

5) F230 断层以南水文地质区（V）。本区出露地层以刘家沟组为主，没有可靠的相对隔水层，可认为以砂岩为主的单一含水层。

（2）基岩透水性特点。坝址区基岩的透水性主要受岩性、断层和风化卸荷三大因素的影响。按岩体渗透性分布规律表现出层状、带状、壳状三种渗透结构。

由于砂岩层内裂隙较黏土岩、页岩发育，当岩层呈两者层状分布时，其透水性大小也呈层状分布，见表 1.4-3。

表 1.4-3 岩层透水性层状分布

岩组代号	透水性分类	砂岩含量/%	泥岩含量/%	顺层透水性/(m/d)	垂层透水性/(m/d)	各向异性度
T_1^5	砂泥岩类	71	29	0.6400	0.0061	104.1
T_1^4	砂岩类	95	5	0.6200	1.0400	0.6
T_1^{3-2}	泥岩类	43	57	0.0009	0.0015	0.5
T_1^{3-1}	砂岩类	90	10	0.4200	0.7100	0.6
T_1^{2-1}	砂泥岩类	52	49	0.0500	0.0049	10.2

由于受风化卸荷影响，岩层的透水性从岩层表面向下有明显减小，左岸岩层透水性随深度变化统计见表 1.4-4。

表 1.4-4 岩层透水性随深度变化统计

透水性分层	底面高程/m	厚度/m	ω_{ep}/Lu
强透水层	250.00~275.00	8~20	46
中等透水层	221.69~255.00	6~54	7
弱透水层	243.00~275.00	7~110	3

在较大的顺河向断层两侧影响带内裂隙宽度增大，对透水性有明显影响，形成带状渗透结构。在 F_{238} 、 F_{236} 及 F_1 断层两侧一定宽度内，中强透水带底界比两侧深得多，而小断层的影响不明显，在断层交汇带及走向发生转折的地方，中强透水带深度和宽度都大，透水性也大。从位于 F_1 断层附近的 T_{222} 钻孔可知，岩面以下 80m 以上的岩体具强—极强透水性。

1.4.3 主要工程地质问题

（1）坝基覆盖层。

1) 分布形状。坝址处河床宽度约 600m，左岸为一深槽深 80m 左右，右岸滩地覆盖层厚度一般 30~40m。在坝轴线附近，深槽较深，且右侧基岩陡坎坡度较陡，约为 1:0.4 左

右。向上游深槽逐渐变浅，基岩陡坎坡度变缓。

2) 分区与组成。坝基河床覆盖层包括冲积砂砾石层、砂层和岸边坡积层、沟口洪积层及冲、洪积交互层。其中坡积、洪积将在坝基开挖时基本已挖除，仅将冲积层分述如下。

①表部砂层：厚3~7m，层底高程130.00~135.00m。为极细砂、细砂层，底部有少量中砂、中粗砂层，属第四系全新统沉积物，呈疏松—中密状态。

②上部砂砾石层：顶面高程125.00~128.00m，厚30~45m。砾石成分主要为石英岩、石英岩，其次为玄武—安山岩类，夹少量当地砂岩孤石，含砂率一般20%~30%。颗粒组成见表1.4-5。

表 1.4-5 河床冲积砂卵石层颗粒组成成果汇总

序号	部位	取样孔 (井) 号	代表高程/m	颗粒级配/%									修正后 含砂率 (≤ 2) /%
				$>100\text{mm}$	$100\sim 80\text{mm}$	$80\sim 60\text{mm}$	$60\sim 40\text{mm}$	$40\sim 20\text{mm}$	$20\sim 10\text{mm}$	$10\sim 5\text{mm}$	$5\sim 2\text{mm}$	$\leq 2\text{mm}$	
1	右岸	竖井		16.25	9.66	12.19	13.19	14.59	6.90	3.32	1.01	22.89	
	滩地	浅井		22.63	22.63	12.65	16.39	15.01	4.60	2.46	1.11	25.15	
2	左岸高	G16,G19,G20	136.76~118.46	7.42	5.18	5.04	7.63	11.36	7.77	6.05	4.79	44.76	32.67
	含砂率	G24,T495	125.77~106.52	0.91	2.32	3.15	3.73	7.16	6.85	6.46	6.08	63.34	40.54
		G39-1/2	137.00~123.96	11.93	6.94	7.49	9.69	12.54	9.16	7.29	7.27	27.77	20.27
		T450	129.99~119.52	9.35	5.9	8.29	8.27	10.03	7.39	6.97	5.42	38.38	28.02
		T484	126.02~118.14	4.55	3.46	4.70	5.78	7.80	5.80	4.98	7.89	55.03	
			120.11~96.05	3.50	4.39	5.60	7.41	11.86	9.97	9.57	10.77	36.96	23.64
	河床		128.42~127.65	19.90	5.56	4.17	8.06	9.54	6.20	5.74	5.37	35.46	25.89
3	中部		127.65~121.72	1.78		2.44	4.49	5.95	4.82	4.60	4.98	70.94	
		G05	121.72~117.44	10.49	5.07	4.58	4.58	11.58	8.13	6.60	3.55	45.42	33.16
			117.44~96.64	5.87	3.48	5.77	7.65	13.69	10.85	9.43	9.30	34.06	21.80
		G12	129.32~107.53	13.15	5.88	6.97	10.27	15.11	9.22	8.38	7.27	23.75	17.34
		G21	107.53~97.67	2.32	4.14	4.27	8.67	11.40	11.37	12.37	12.75	32.71	20.93
		G06,G18	136.77~127.39	11.11	6.05	8.78	10.74	15.78	10.37	8.79	6.35	22.03	16.08
		G30,T452	134.76~121.87	6.20	3.41	5.29	6.34	9.16	6.12	5.65	6.10	51.81	
		T454,T456, T458	128.96~98.23	5.64	3.85	6.38	8.75	13.87	10.41	10.42	9.54	31.14	19.93
		G15	134.85~131.50	5.50	10.92	13.45	12.64	13.09	9.16	6.36	5.68	23.20	16.94
			131.50~122.05	2.20	1.30	6.77	10.05	17.16	12.05	6.91	5.73	37.83	27.62
			135.16~131.80	10.78	3.48	4.13	8.19	10.96	7.65	5.63	5.36	43.82	31.99
		G23	131.89~126.94	10.49	1.51	5.00	4.46	5.16	4.19	3.76	3.12	62.31	
			126.94~118.87	11.41	4.69	3.39	3.90	9.12	7.15	5.40	4.72	50.23	36.67
			131.78~127.03	27.45	8.95	12.53	13.96	8.35	5.37	3.34	3.22	16.83	12.29