

Research on Engineering Geological Characteristics of Dam Foundation Fault of a Reservoir

Wenshuai Fu

Xinjiang Corps Survey and Design Institute (Group) Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830002, China

Abstract

In order to study the influence of a reservoir dam foundation fault on the project, surface exposure, drilling, in situ test, indoor test and other methods are used to provide reasonable recommended value of geological parameters. The possible engineering geological problems are analyzed one by one to provide reasonable treatment measures for the reservoir construction.

Keywords

fault; gypsum; seepage proof wall; dam foundation treatment

某水库坝基断层工程地质特性研究

付文帅

新疆兵团勘测设计院(集团)有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830002

摘 要

为研究某水库坝基断层对工程的影响, 采用地表揭露、钻探、原位测试、室内试验等方法综合分析评价, 提供合理的地质参数建议值。对其可能存在的工程地质问题逐一分析, 为水库建设提供合理的处理建议措施。

关键词

断层; 石膏; 防渗墙; 坝基处理

1 引言

滇西南地区构造背景复杂, 断层在地壳浅层中广泛发育, 其存在破坏了岩体的连续性、完整性, 影响、控制着岩体的力学和渗流特性^[1]。断层带内岩体在物理力学特性上与正常围岩有显著差异^[2]。断层破碎带及影响带内岩体具有强度低、变形大、透水性强等特征, 其作为水工建筑物基础需进行工程处理, 在地下洞室、隧道等项目施工过程中存在难支护、多事故的特点^[3,4], 该地段的存在给水库、大坝等地下工程带来重大安全隐患。此类项目中即要确保工程建设安全, 又不能过度设计、造成资金浪费, 因此多方位查明断层的性质、物理力学参数、合理评价断层对工程的影响、提供合理的处理措施尤为重要。

2 工程地质概况

某水库地处中国云南省永德县境内, 所处河流为怒江二级支流, 河段长约 11km, 坝址区多年平均年径流量

1873 万 m³。拟建水库最大坝高 65m, 库容大于 1000 万方, 规模为中型。

2.1 地形地貌

坝址区属侵蚀构造中山区河谷地貌, 地势西南高东北低, 两岸山势陡峻, 山顶与谷底相对高差 210~310m, 河谷狭窄, 谷底宽 20~30m, 呈“V”型河谷, 两岸多为耕地及林地, 发育多条小规模冲沟, 延伸长度 200~1400m, 切割深度多为 5~20m。

2.2 地层岩性

坝址区出露地层主要为三叠系和第四系, 由老到新分述如下。

2.2.1 三叠系

①三叠系中统河湾街组(T_{2h}): 为浅海—滨海相碳酸盐建造, 岩性以白云岩为主, 局部为泥质白云岩、白云质灰岩, 浅灰色~灰白色, 细晶粒结构, 中厚层~厚层状构造, 节理裂隙较发育。岩层产状 30°~50° SE ∠ 50°~85°, 局部向 NW 倾。该地层分布于坝址区左岸山体上半部及山顶, 该层与大水塘组上段(T_{3d}²)灰岩相接, 呈平行不整合接触。

②上统大水塘组下段(T_{3d}¹): 为火成岩, 岩性为灰紫

【作者简介】付文帅(1988—), 男, 中国河南洛阳人, 工程师, 从事工程地质勘察研究。

褐色杏仁状橄榄石玄武岩、安山玄武岩，底部为紫红色铁铝质页岩，细粒结构，具杏仁构造，局部夹灰岩捕虏体。该层分布在库坝区左岸，呈北东向条带状展布。该层与上覆大水塘组 (T_3d^2) 呈整合接触，与下伏河湾街组白云岩 (T_2h) 呈假整合接触。

③上统大水塘组上段 (T_3d^2)：为浅海相碳酸盐建造，岩性为灰岩，浅灰色~深灰色，细晶粒结构，中厚层~厚层状构造，岩层产状 $50^\circ \text{ SE } \angle 72^\circ$ 。该层分布于坝址区左岸岸坡之间，呈北东向条带状展布，与上覆南梳坝组 (T_{3nn}) 和下伏大水塘组 (T_3d^2) 均呈整合接触。

④上统南梳坝组 (T_{3nn})：为浅海相碎屑建造，上部岩性为粉砂岩，灰黄色~杂色，细粒结构，薄层状构造，厚约 10.5~35m；下部为泥灰岩，灰黑色~深黑色，细粒结构，薄层~中厚层状构造。受断层影响，岩体节理极发育，粉砂岩多出现揉皱、褶曲现象，泥灰岩则片理化严重，裂面多有镜面和擦痕。该层产状变化较大，左岸整体产状以 $40^\circ \sim 45^\circ \text{ SE } \angle 55^\circ \sim 80^\circ$ 为主，右岸整体以 $18^\circ \sim 55^\circ \text{ NW } \angle 40^\circ \sim 67^\circ$ 为主。该层分布于右岸山体、河床及左岸坡脚，为坝址区的主要地层。

该层与下伏大水塘组上段 (T_3d^2) 呈整合接触，与上覆第四系呈不整合接触。

2.2.2 第四系

①冲洪积层 (Q_4^{al})：分布在现代河床及右岸冲沟内，其中河床上部为淤泥质粘土，层厚 0.5~2.6m，棕褐~灰褐色，湿~饱和，可塑~软塑状；下部级配不良砾，埋深 0.5~2.6m，层厚 3.0~6.0m，青灰色，饱水，松散~稍密，局部含漂石，具架空结构。右岸冲沟内岩性为块石和粗砂混杂，湿~饱和，松散，层厚 3.4~5.3m。

②崩坡积层 (Q_4^{col+dl})：巨粒、粗粒、细粒混杂，整体表现为上部颗粒细小，下部颗粒粗大的特征，该层具架空及斜层理结构，主要分布于左岸部分岸坡，层厚 2.0~10.0m。

③残坡积层 (Q_4^{eld})：岩性以土黄色高液限粘土为主，局部夹块石和角砾，稍湿，松散，主要分布于两岸岸坡及坡脚处，层厚多在 1~3.0m，最大可达 8.8m。

2.3 地质构造

坝址区主要构造为 F39 断层及规模较小的 f1 断层和节理裂隙。

2.3.1 F39 断层

F39 断层呈北东 46° 方向延伸，斜穿坝址区河床及右岸半坡段，倾向南东，倾角 84° ，破碎带宽约 30~80m，全长约 40km。断层破碎带内多以碎裂岩为主。

2.3.2 f1 断层

位于坝址区左岸山坡，属逆断层，延伸长度约 1km，

产状 $40^\circ \sim 50^\circ \text{ NW } \angle 80^\circ \sim 85^\circ$ ，发育在三叠系上统大水塘组 (T_3d^2) 灰岩条带中。断层带宽 2.0~3.0m，断层破碎带以碎裂岩为主。

2.3.3 节理和裂隙

坝址区左岸主要节理裂隙发育两组：①岩层面，产状 $45^\circ \sim 55^\circ \text{ SE } \angle 60^\circ \sim 80^\circ$ 。②节理裂隙，产状 $165^\circ \text{ NW } \angle 60^\circ \sim 80^\circ$ ，延展长度大于 3m，裂隙发育间距 2~4cm，极发育。强风化岩体中，裂隙多微张~张开，裂面平直粗糙，多为泥、钙、铁锈色等物质局部或半充填；弱风化岩体内裂隙多闭合~微张，裂面平直光滑，裂隙多为泥膜全充填或无充填。

2.4 水文地质条件

坝址区水文地质条件较复杂，地下水主要有孔隙潜水、裂隙水及岩溶水三类。

①孔隙潜水：赋存于现代河床及两岸冲沟第四系覆盖层中，两岸受大气降水补给，水平径流为主，向河谷及河流下游排泄，水量小；河漫滩中孔隙潜水主要受河水及两岸裂隙水补给，水位略高于河水，河漫滩中孔隙潜水与河水水力联系密切。

②裂隙水：赋存于南梳坝组 (T_{3nn}) 砂岩~泥灰岩、大水塘组上段 (T_3d^1) 玄武岩~安山玄武岩等基岩裂隙中，受大气降水及孔隙潜水补给，向沟谷排泄，水量不大。

③岩溶水：赋存于大水塘组上段灰岩 (T_3d^2) 和河湾街组白云岩 (T_2h) 岩体内。岩溶水补给源为：大气降雨入渗；雨季坡面汇流通过落水洞、溶缝等岩溶通道进入岩体内部，将地表水转化为岩溶水。岩溶水沿岩溶通道向低势能处运移，在下游以泉水形式出露。

2.5 物理地质现象

坝址区属侵蚀构造中山区河谷型地貌，物理地质现象主要表现为岩体风化、岩体溶蚀风化、滑坡及小规模崩塌。

3 F39 断层工程地质特性及分析

F39 断层全长达 40km，规模为 I 级，以小角度斜交地层走向，呈北东 45° 延伸，倾向 SE，倾角 $80^\circ \sim 84^\circ$ ，坝址区宽度约 80~90m，为压扭性逆断层。地表多被第四系覆盖层所覆盖，局部出露地表，断层带内岩性为灰黑色碎裂岩、糜棱角砾岩及断层泥组成，零星夹含石膏。

3.1 物理力学性质分析与评价

3.1.1 颗粒组成及界线含水率

在断层中共取 12 组样进行室内试验：断层破碎带内岩体粒径组成：60~2mm 砾石含量 3.2%~41.5%，粒径 2~0.075mm 砂含量 22.3%~65.8%，0.075~0.005mm 粉粒含量 14.2%~30.4%，< 0.005mm 粘粒含量（含胶粒）9.8%~29.8%，比重 2.7~2.95，液限 16.9%~29.1%，塑限 9.0%~14.3%。

3.1.2 原位测试

在钻孔内采用连续贯入方法进行重型动力触探试验，最大统计深度为 14.2m。断层破碎带内岩体修正后动探击数 2.9~36.6 击，呈松散~密实状，算术平均值 14.06 击，标准差 6.81，变异系数 0.48。

分析原位测试结果断层破碎带密实程度的离散性较大，规律为 4.0m 之内呈松散~稍密状为主，4.0m 以下整体以中密~密实状为主，局部依然有稍密状甚至松散状岩体，这与断层破碎带中夹含断层泥有关，也说明断层泥分布的无规律性。

3.1.3 室内试验物理力学指标

断层破碎带中 6 组原状样进行室内试验，断层破碎带内岩体天然密度 2.31~2.61g/cm³，含水率 4.8%~8.5%，干密度 2.14~2.49g/cm³，孔隙比 0.183~0.276，渗透系数 1.61×10⁻⁶~5.30×10⁻⁶cm/s；饱和固结直剪试验抗剪指标：粘聚力 13.5~75.9kPa，内摩擦角 16.8°~28.6°。固结压缩试验获得压缩指标为：压缩系数 a_{1.2} 为 0.07~0.128MPa⁻¹，压缩模量 E₁₋₂ 为 10.02~16.89MPa，为低压缩~中压缩性土。其粘聚力试验指标离散性较大，这与破碎带内岩体特点有关，与动探成果反映的岩体特点有一致性。

3.1.4 旁压试验力学指标

受限于缩孔及孔壁稳定性，最大试验深度为 22.8m，试验点间距按 2.0m 控制，累计进行 10 点次。将各点试验结果与岩性匹配后发现，岩体中断层泥的含量对力学指标有控制性影响，其次随深度变化上覆土体自重对试验点力学指标也有较大影响。旁压试验结果按两层评价：6.0m 以上断层破碎带力学指标：旁压模量 E_m 为 6.7~9.8MPa，剪切模量为 G_m 为 2.5~3.9MPa，压缩模量 E_s 为 7.6MPa，变形模量 E₀ 为 9.7~19.7MPa，侧向基床系数 K_{h1} 为 40323~62141kN/m³，承载力为 200~209kPa。6.0m 以下断层破碎带力学指标：旁压模量 E_m 为 15.8~55.3MPa，剪切模量为 G_m 为 6.3~22.1MPa，压缩模量 E_s 为 63.2~221.4MPa，变形模量 E₀ 为 31.6~110.7MPa，侧向基床系数 K_{h1} 为 100355~351678kN/m³，承载力为 321~925kPa。

3.2 工程地质问题分析与评价

3.2.1 压缩变形和抗滑评价

第一，破碎带岩体特点。

根据地质测绘及钻探成果，坝基下部 F39 断层破碎带内碎裂岩有两个特点：①内部结构均一性差：破碎带内颗粒粗细不均，碎裂岩以块状、角砾状为主、断层泥以粘粒为主，组成物质的强度、粒径大小差异性大。②层次复杂：碎裂岩和断层泥分布不均，整体以碎裂岩为主，断层泥以透镜体状夹含其中，厚度 0.2~0.5m，且断层泥的分布在平面及垂向

上无规律可循、零星夹含石膏。碎裂岩的母岩为南梳坝组（T_{3nn}）泥灰岩，受构造挤压后岩体破碎、片理化严重，多已丧失原岩结构和原岩强度，呈碎裂状，断层泥粘粒集中后，导致碎裂岩中岩块的骨架作用不明显，因此其承载力和变形不均匀。

第二，力学指标评价。

断层破碎带内物质组成为碎裂岩和断层泥的混合物，且断层泥对岩体的压缩剪切指标有控制性作用，采用工程地质类比法，综合建议断层破碎带 6m 以上建议承载力为 200kPa，变形模量为 15MPa，6m 以下建议承载力为 350kPa，变形模量为 45MPa。饱和固结直剪试验获得抗剪指标为：粘聚力为 13.5~75.9kPa，内摩擦角为 16.8°~28.6°。其粘聚力试验指标离散性较大，这与前文论述的岩体特点有关，即存在沿软弱土体面发生剪切破坏。需采取抗滑处理措施。

第三，综合评价及建议。

F39 断层内岩体结构不均、层次复杂，导致其力学指标差，无法满足坝体承载力、变形、抗滑条件，需采取工程处理措施。建议对坝基下部断层带进行一定厚度的混凝土塞置换后进行固结灌浆。

3.2.2 破碎带中石膏的评价

第一，石膏的平面分布。

根据地质测绘及钻探成果，在库坝区内共四处出露或揭露到石膏，零星分布于 F39 断层破碎带内，与其伴生，分布高程在 1586.5~1706.0m，统计汇总见表 1。

表 1 工程区已揭露石膏统计表

编号	位置	距坝轴线距离	分布高程（m）	揭露方式
SG1	库尾后右岸	距坝轴线约 3.1km	1664.0~1706.0	天然露头
SG2	库尾前右岸	距坝轴线约 2.1km	1673.0~1694.0	天然露头 + 剥土
SG3	库中河床内	距坝轴线约 1.9km	1626.0~1634.0	天然露头 + 剥土
SG4	坝前河床内	距坝轴线约 160m	1586.5~1591.5	钻孔 ZK27

第二，石膏在岩体中的存在形式。

库坝区发现的石膏均为原生石膏层，即与岩石同时形成的化学沉积矿物。存在的形式有以下几种类型：①薄层状~层状石膏：石膏呈白色针状集合体，厚度 5~40cm 的层

状分布于岩体中，多为不连续的透镜体。②团块状石膏：石膏集合体呈不规则的团块散布于岩体中，团块直径一般5~10mm，最大达25mm，断续分布。③胶结物状石膏：石膏与粘土矿物、游离氧化物及碎裂岩相混杂，充填在岩石碎屑颗粒间孔隙内，成为碎裂岩颗粒胶结物存在于岩体中。多存在于层状石膏和碎裂岩接触带位置，零星分布。

第三，石膏的溶蚀。

石膏为CaSO₄的水合物，是单斜晶系矿物，遇水后部分或全部溶解。石膏溶蚀对工程的危害有两个方面：①岩体结构遭到破坏，使之变得松散软弱，降低地基岩体的强度，对水工建筑物的地基岩体变形、抗滑稳定性能等均有较大的影响；②大幅度增加水中硫酸根离子含量，从而对混凝土具有硫酸盐腐蚀性。据勘探和测绘研究库坝区发现的石膏，大部分保存完整，仅局部表层10cm内有微弱溶蚀，形成0.2~1.0mm的针孔状溶孔。易于溶蚀的石膏之所以能在河床下部被完整地保存下来，环境的相互作用是决定石膏层会否溶蚀的重要因素，分析其原因：断层破碎带包裹石膏，破碎带内岩体透水性微弱，环境水很难渗入岩体内部，石膏在岩体中形成封闭、独立的密闭空间，与周围环境交互作用差，溶蚀现象并不显著。

第四，石膏层岩土体和环境水的腐蚀性。

本次勘察在含石膏的岩土体中取化分样3组，水样3组，其腐蚀性评价结果为：土体对混凝土具强腐蚀，对混凝土结构中钢筋具弱腐蚀。地下水对混凝土具强腐蚀，对混凝土结构中钢筋具弱腐蚀。

第五，建议处理措施。

建议对石膏层处理原则为：不破坏现有的封闭条件或防渗处理后能够达到现有的封闭条件。建议处理措施：①坝基开挖中应严防石膏层暴露，一旦挖到石膏应立即清除，并在回填过程中用防腐材料进行严格封闭；②与断层破碎带接触的混凝土以及灌浆水泥应采用抗硫酸盐腐蚀的水泥。

3.2.3 透水性评价

勘察期在断层破碎带内累计进行注水试验15段，渗透系数为0.02×10⁻⁶~0.75×10⁻⁶cm/s；压水试验24段，透水率为0.05~26.46Lu，为方便统计，统一将渗透系数折算为透水率，统计结果：断层破碎带内0~3Lu占比87.18%，3~5Lu占比0%，5~10Lu占比2.56%，10~100Lu占比10.26%。透水率大于10Lu最大埋深为30.2m。

根据统计结果分析，断层破碎带岩体整体以微透土层为主，部分为中等透水，少量为弱透水（见表2）。

断层破碎带渗透性总体规律为：①透水性不均一：整体为弱透水~微透土层，但其中夹杂中等透土层。②钻孔透水率整体呈现深度越大，透水率越低的规律。

表2 断层破碎带岩体透水率统计表

吕荣值范围（Lu）	0~3	3~5	5~10	10~100
段数（共39段）	34	0	1	4
试验深度（m）	18.4~78.8	/	35.2~40.2	15.2~30.2
各段占比	87.18%	0.00%	2.56%	10.26%

3.2.4 渗透变形评价

水库蓄水后，坝基下部断层破碎带在高水头压力下，使破碎带内软弱土体颗粒发生移动，从而使得破碎带的结构、颗粒发生变化，可能发生渗透破坏，现对断层破碎带渗透变形评价如下：

第一，渗透变形判别。

依据GB 50487—2008《水利水电工程地质勘察规范》，粗、细颗粒的区分粒径d计算为：

$$d=\sqrt{d_{10}\times d_{40}}=\sqrt{0.86\times 0.0026}=0.047\text{mm}$$

细粒含量P=31.5%。

对于不均匀系数大于5的土采用下列判别：

流土P≥35%。

过渡型：25%≤P<35%。

管涌：P<25%。

其中，P为土中的细颗粒含量，以质量百分率计（%）。

经计算，断层破碎带的区分粒径为0.047mm，对应细粒含量P为31.5%，判定断层破碎带渗透破坏形式为过渡型。

第二，临界水力坡降（J_{cr}）的确定。

管涌型采用下式计算：

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

其中，J_{cr}为土的临界水力坡降；G_s为土的比重；n为土的孔隙率；d₅、d₂₀分别为占总土重5%和20%的土粒粒径。

计算结果：

$$J_{cr}=2.2\times\left(2.77-1\right)\times\left(1-0.188\right)^2\times 0.0005/0.0026=0.49$$

第三，允许水力比降（J_{允许}）的确定。

允许水力比降为临界水力比降除以安全系数（安全系数取2.0），则坝基断层破碎带的允许水力比降取0.25。

3.2.5 可灌比评价

断层带的可灌性按可灌比M进行判别，可灌比根据下式计算：

$$M=D_{15}/D_{85}$$

其中，D₁₅为地层中小于某粒径的土体质量占总质量的15%，mm，根据平均级配曲线，取值0.0026mm。D₈₅为灌浆材料中小于某粒径的颗粒质量占总质量的15%，mm。普通浆液水泥D₈₅约为0.05mm。

当M>15时，认为地层可灌性比较好，而工程区内，

可灌比 M 为 0.05, 可灌性极差, 如采用传统灌浆方法, 普通水泥无法灌入该地层, 会出现过水不过浆, 仅在表面形成滤饼, 无法达到加固和防渗目的。若采用超细水泥, 因水泥颗粒变小、比表面积增大、温度升高, 易出现颗粒抱团现象, 现场施工的操作性和可控性较差。

建议采用高压劈裂灌浆或采用槽孔混凝土墙。

4 综合评价及建议处理措施

通过以上论述可知, 断层破碎带作为坝基存在坝体沉降、抗滑稳定、渗漏、石膏溶蚀和渗透破坏等问题。该断层为陡倾大深度断层, 无法采取全部清除措施, 因此必须对断层破碎带进行地基加固和防渗处理。考虑其可灌性差和硫酸盐腐蚀性问题, 综合建议处理措施如下:

①建议置换+加固措施为: 断层带上部采用混凝土塞, 下部采用高压劈裂固结灌浆, 混凝土塞和固结灌浆的深度应满足坝体沉降变形验算;

②建议防渗措施为: 方案一采用槽孔混凝土防渗墙;

方案二采用高压劈裂帷幕灌浆, 共布置 3 排, 排距 1m, 孔距 1.5m, 采用梅花形布置。防渗深度按照 1 倍坝高考虑, 即防渗深度为 65m;

③灌浆材料的选择: 与断层破碎带接触的混凝土以及灌浆水泥应采用抗硫酸盐腐蚀的水泥;

④建议施工灌浆前进行灌浆试验验证。

参考文献

- [1] 戴俊生,张继标,冯建伟,等.高邮凹陷真武断裂带西部低级序断层发育规律预测[J].地质力学学报,2012,18(1):11-21.
- [2] 李生杰,谢永利,朱小明.高速公路乌鞘岭隧道穿越F4断层破碎带涌水塌方工程对策研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3602-3609.
- [3] 李晓昭,张国永,罗国煜.地下工程中由控稳到控水的断裂屏障机制[J].岩土力学,2003,24(2):220-224.
- [4] 杨会军,胡春林,谌文武,等.断层及其破碎带隧道信息化施工[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3917-3922.