

贵州构皮滩地区裂隙系统及其 对电站工程的影响研究

陈文理¹, 侯光久², 尹春明¹, 向能武¹, 王令占²

(1. 长江水利委员会, 湖北 武汉 430010; 2. 中国地质大学, 武汉 430074)

摘要: 大坝、隧道等大型工程中的裂隙构造, 由于关系到岩体的强度等工程安全问题, 因此历来倍受关注。贵州乌江构皮滩电站坝区主要发育碳酸盐岩及少量碎屑岩, 在其岩系中构造裂隙主要有 NNW 向、NWW 向、NEE 向和 NE 向, 其中约 80% 已被方解石脉先后分四期充填愈合, 大大降低了水的渗透, 提高了岩石的强度; 有少量裂隙没有被充填, 或是充填以后又裂开, 其中顺层滑动裂隙具有一定的贯通性, 工程上值得注意。

关键词: 裂隙构造; 愈合作用; 主应力; 乌江构皮滩

中图分类号: P584, TU452

文献标识码: A

裂隙是岩石中最常见的构造。裂隙(节理)的特性往往是决定岩体稳定及渗透变形的必备条件, 也是岩体渗透性能判断的主要依据, 节理裂隙的存在与否是岩石物理力学性质差别的根源所在^[1]。大坝、隧道等大型工程中的裂隙构造, 由于关系到岩体的强度等工程安全问题, 因此历来倍受关注。裂隙是流体的流动通道之一, 高或超高流体压力的出现, 降低了岩石抗剪强度及非均一性对破裂变形的影响^[2~4]。裂隙充填物及其中的流体包裹体为研究流体—岩石相互作用提供了重要信息^[5]。

1 地质背景

贵州乌江构皮滩水电站工程, 位于云贵高原东北部的乌江中游, 其大地构造位置处于扬子地台内鄂黔台褶带, 新华夏系第二隆起带上(图1)。出露地层是一套碳酸盐岩为主夹有碎屑岩的岩系, 主要有寒武系中上统娄山关群浅灰色薄层白云岩, 奥陶系下中统白云岩、碎屑岩夹灰岩、生物碎屑灰岩、泥灰岩等, 志留系下中统的碎屑岩、生物碎屑灰岩、泥灰岩、杂色粘土岩, 志留系与奥陶系呈平行不整合接触。二叠系梁山组页岩、粘土岩, 栖霞组厚—巨厚层疙瘩状生物碎屑灰岩夹中薄层灰岩, 茅口组生物碎屑灰岩、燧石结核硅质条带生屑灰岩, 吴家坪组中厚层生物碎屑灰岩夹含炭粘土质生物碎屑灰岩, 长兴组厚层细—微晶生物碎屑灰岩以及三叠系下统夜郎组灰绿色紫红色钙质页岩, 夹细砂岩、泥灰岩。其中缺失泥盆系

收稿日期: 2005-05-09

基金项目: 水利部长江水利委员会项目“乌江构皮滩水电站工程破裂系统及愈合行为研究”(编号: 101-056050)资助。

作者简介: 陈文理(1963-), 男, 高级工程师, 主要从事工程地质的勘察与设计工作。E-mail: hougj09@163.com

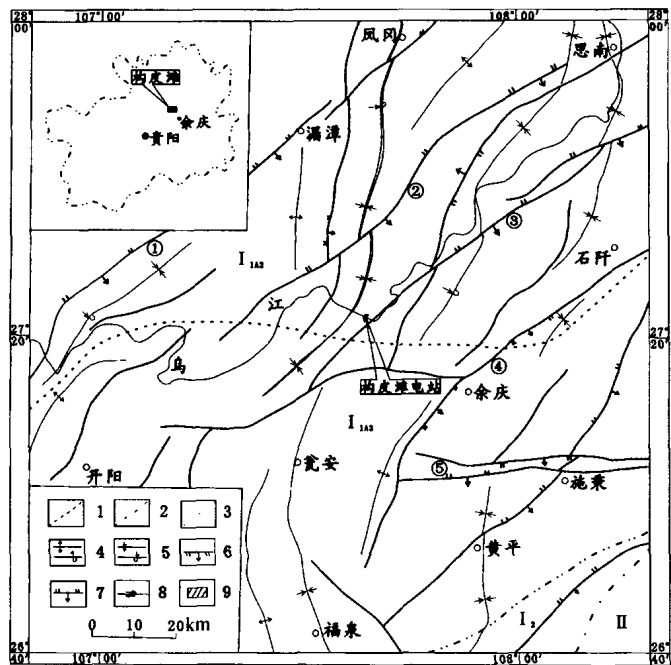


图 1 研究区构造位置图（据贵州省区域地质志地质构造图（1986）改编）

Fig.1 Tectonic location map of the study area

1. 一级构造单元界线；2. 二级构造单元界线；3. 四级构造单元界线；4. 背斜及倒转背斜；5. 向斜及倒转向斜；
6. 正断层；7. 逆断层；8. 平移断层；9. 研究区位置
大地构造单元：I. 扬子准地台；I₁. 黔北台隆；I₂. 黔南台隆；I_{1A}. 遵义断拱；I_{1A2}. 凤冈 NE 向构造变形区；
I_{1A3}. 贵阳复杂构造变形区；II. 华南褶皱带
主要断裂：①. 湄潭断裂；②. 思南—敖溪断裂；③. 本庄断裂；④. 石阡断裂；⑤. 施秉—玉屏断裂

和石炭系沉积，二叠系直接平行不整合盖在志留系或奥陶系之上。按区域构造活动方式与方向演变总的特点，贵州自晚先寒武纪梵净（四堡）以来，有地质记录可查的构造发展历史，可分为三个时期：先燕山期，燕山期和喜山期^[6]。

泥盆纪时期的加里东运动以及晚三叠世晚期的印支运动在构皮滩地区均表现为被抬升，并且印支运动结束海相地层的沉积历史。燕山时期构造活动以 SN 向左旋直扭运动为主，早期形成一系列轴向 NNE 的褶皱构造，后期形成一系列走向 NNE 或 NE 的压扭性断裂，并有走向 NEE 的泰山式断裂（或裂隙）和 NNW 向的大义山式断裂（或裂隙）相伴生，组成新华夏系多字型构造^[7]。由于应力场的转变，后又形成 SN 向构造和 EW 向构造。NE 向展布的新华夏系构造奠定了该地区的构造格架，SN 向构造和 EW 向构造相对较弱，表现为局部出露或部分复合改造 NE 向构造。这一格局对裂隙构造的形成有着明显的影响。

2 裂隙系统特征

岩石中的裂隙，除泥质岩（页岩）、粉砂岩中出现较少外，灰岩、白云岩中的裂隙构造则较为发育。

2.1 裂隙发育状况

通过对坝址及其附近岩石中的裂隙构造观察研究，从力学性质上看有剪（扭）性和张剪

性或张性,其中剪性裂隙居多,有切层裂隙和顺层裂隙,单条裂隙一般延长几米至十几米,少数大于 20m,多呈尖灭侧现或上灭下现式。数量上切层裂隙远远多于顺层裂隙,而规模上则顺层裂隙(包括顺层滑动)要大于切层裂隙,部分顺层滑动面是在水力破裂的基础上发展而成,多延展几十米至上百米,甚至更大。从发育裂隙的走向方位来看,几乎是各个方向都有。不过,就裂隙的优势方向而言,则主要有四组,坝区 529 条裂隙产状极密图反应清楚(图 2): (1) NNW/NEE (或 SWW) $\angle 80 \sim 86^\circ$; (2) NWW/NNE (或 SSW) $\angle 75 \sim 85^\circ$; (3) NEE/NWW (或 SSE) $\angle 75 \sim 85^\circ$; (4) NE/NW $\angle 50^\circ \pm$ 。其中第(1)组最为发育,其次是第(2)和第(3)组,第(4)组与岩层层面近一致,裂隙发育相对较少,但平行层面的滑动则是该地区较为醒目的地质构造现象。走向 NNW 的裂隙(1)以左行剪(扭)性为主兼有张性,走向 NEE 的裂隙(3)以右行剪(扭)性为主兼有压性,走向 NWW 的裂隙(2)以张性为主兼有左行剪(扭)性,走向 NE 的裂隙(4)为左行或右行剪(扭)性。较为明显的切割关系是第(1)、(2)、(3)组被第(4)组所切,第(1)、(3)组彼此切割,错动距离多为厘米级。其中第(1)和第(3)组为新华夏系构造的配套共轭裂隙系在该区的表现,SN 方向左旋直扭运动的结果;第(2)组是在新华夏系构造张性破裂面的基础上叠加有后期 EW 方向的挤压;第(4)组为 EW 方向或 SN 方向挤压而形成的斜向裂隙。而位于坝址下游奥陶系中的裂隙,据 D_{63} 平硐揭露,以 NEE 和 NW 向最为发育,NE 和 NWW 向次之(图 3)。发育程度的差别,可能与后者靠近 NE 向断裂带(将另文介绍)有关。

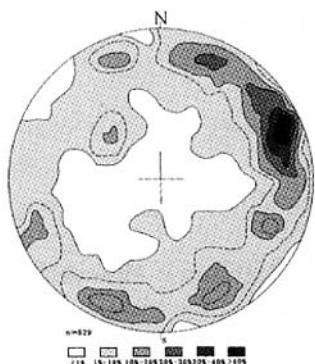


图 2 529 条裂隙等密图

Fig.2 Stereographic projection of 529 fractures

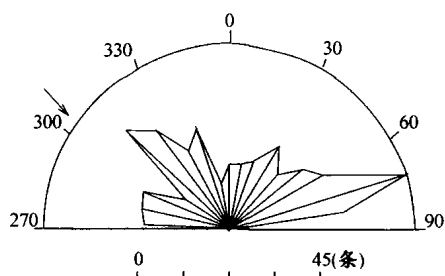


图 3 D_{63} 平硐裂隙走向玫瑰图

Fig.3 Rose diagram of fracture strikes in adit D_{63}

2.2 裂隙愈合—脉体充填特点

构皮滩电站坝区的裂隙系统, 80% 的已被方解石脉或角砾岩充填愈合, 即裂开的岩石又被焊接成一体。约 20% 的裂隙没有充填, 或被充填后再次裂开。沿裂隙充填的方解石脉体, 因裂隙性质不同而脉体特征各异, 总的特点是充填具有多期性。现以 ZB-b-1 为例描述如下:

宏观特征 方解石脉体充填于左坝肩二叠系栖霞组灰岩裂隙中, 裂隙产状为 $200^\circ \angle 45^\circ$, 斜切层理, 脉体厚 1 ~ 10cm, 裂隙中棱角状大小不等的角砾表现为脆性变形为主, 按 R. H. 西布森的断层岩分类, 其形成深度为 5km 左右, 温度为 150 ~ 250℃。角砾被方解石胶结, 局部见梳状或空洞生长晶体。从颜色和结构可将脉体分为“四层”, 由围岩向脉体的另一边依次为: ①乳白色, 中—粗粒结构, 砂物颗粒自由生长, 厚 0.3 ~ 0.8cm, 见包容有灰岩角砾; ②淡黄—土黄色, 隐晶质结构, 质地细腻, 略显平行于脉壁的纹理, 厚 0.4 ~ 0.8cm; ③粉红色、灰色, 中细粒 + 粗粒结构, 粗粒者为方解石单晶或晶簇呈“角砾状”产出, 粉红

色的中细粒“层”平行纹理明显，厚0.8~1.0cm；④黄灰色，粗粒结构，梳状构造，垂直脉壁生长，厚0.5~0.6cm。方解石脉与围岩或方解石脉与方解石脉之间为侵入接触关系，表明经历了至少四次裂开—愈合事件^[8]。

微观特征 方解石矿物中流体包裹体均一温度，不同类型方解石脉的丰值温度有所不同，坝区18个（点）薄片矿物包裹体测温结果表明，温度区间为30~336℃，多数集中在130~190℃区间，直方图（图4）反映出，脉体充填至少可分出四期（幕）活动，即温度 $\leq 30^\circ\text{C}$ 、150~230℃、250~270℃、290~330℃，其中150~230℃为该地区的主期流体活动。虽然方解石中流体包裹体的均一温度不能代表捕获温度，但可以视为岩石经历最大温度的有用记录。脉体方解石晶粒具溶蚀现象，Ⅱ型双晶纹发育，即双晶纹平直、规则，宽度为5~8μm，并见波状消光现象。e 双晶统计结果

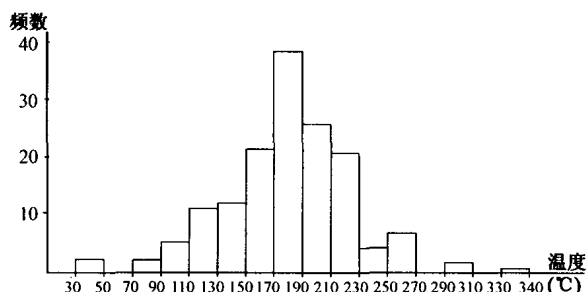


图4 方解石脉中流体包裹体均一温度直方图

Fig.4 Histogram of homogenization temperatures of fluid inclusions in calcite veins

测试单位：中国地质大学（武汉）资源学院流体包裹体实验室

表明^[9-10]，其中三期方解石脉差异应力值分别为：52.6~64.5MPa、52.6~61.3 MPa、166.7~208.3MPa。由此推测，裂隙形成大体处在地表以下小于5km的部位。绝大多数破裂系统都是在上地壳脆性域内通过碎裂作用或碎裂流作用形成的，孔隙流体压力在破裂的形成和发展过程中，起着重要的或决定性的作用^[2-3]。

3 构造主应力求解

通过节理裂隙的分期配套研究，用共轭节理产状极射赤平投影求解主应力轴，得出几组数据：（1） $\sigma_1 302^\circ \angle 18^\circ$ ， $\sigma_2 166^\circ \angle 66^\circ$ ， $\sigma_3 39^\circ \angle 15^\circ$ ；（2） $\sigma_1 89^\circ \angle 1^\circ$ ， $\sigma_2 350^\circ \angle 84^\circ$ ， $\sigma_3 176^\circ \angle 6^\circ$ ；（3） $\sigma_1 352^\circ \angle 39^\circ$ ， $\sigma_2 133^\circ \angle 43^\circ$ ， $\sigma_3 243^\circ \angle 20^\circ$ 。在右岸三叉口隧道口东二叠系茅口组含泥质灰岩层面上见发育一对共轭节理，岩层产状为 $320^\circ \angle 40^\circ$ ，节理产状分别为 $130^\circ \angle 46^\circ$ 和 $46^\circ \angle 85^\circ$ ，通过产状复原并求得主应力轴为 $\sigma_1 178^\circ \angle 1^\circ$ ， $\sigma_2 84^\circ \angle 83^\circ$ ， $\sigma_3 268^\circ \angle 6^\circ$ 。根据野外裂隙间的切割关系和脉体充填特点并结合区域上地质构造综合分析，可知该地区构造变形的相对先后顺序为，NE向构造在先，主压应力为NW-SE向；SN向构造次之，主压应力为近E-W向，EW向构造在后，主压应力为近S-N向。这反映的仅是主期构造，还有不少其它方向的裂隙发育，事实上，还可能存在更多期（幕）次的应力活动。

据对F₉₈小断裂和顺层滑动带（相当于本文中的第四组）中的方解石脉年龄测定，其年龄值为133~150万年，属中更新世，据此判断坝区断裂为不活动断裂^①。其它裂隙的破裂与愈合时期尚无年龄资料，有待进一步研究。

① 水利部长江水利委员会，乌江构皮滩水电站可行性研究报告，2001。

4 裂隙构造对电站工程的影响

构造裂隙的发育程度、愈合状况直接影响到岩体的强度, 破裂构造的发育会丧失岩体的完整性, 改变岩体的渗透性, 从而降低岩石的强度, 造成整体不稳定性。所以大型工程都选址在裂隙发育少、岩石强度高的地区。

乌江构皮滩电站工程坝区的裂隙构造, 前已述及, 主要有四组优势方向, 每一组都有可能密集发育成带。研究表明, 走向 NEE 的第(3)组, 由于其力学性质为扭兼压性, 裂隙紧闭, 加之角砾岩或方解石脉的充填, 沿此方向岩石破损不明显, 不会对工程造成多大影响; 走向 NNW 的第(1)组, 在某些地段最为发育, 其力学性质早期为扭(剪)兼张性, 后期 SN 向和 EW 向的复合利用, 剪切性是主要的, 裂隙紧闭性较好, 沿此方向岩石破损不太强烈, 对工程的影响不会太大; 走向 NWW 的第(2)组和走向 NE 的第(4)组, 工程上值得重视和采取必要措施。乌江河流在该地段正是呈 NWW 向展布, 在坝区, 该组裂隙多具开放性, 绝大多数均有不同程度的溶蚀, 有的形成溶蚀宽缝, 粘土夹碎石充填, 对岩体的工程地质特性影响最大, 必须清除溶蚀缝中的粘土和碎石, 并进行水泥浇注, 以防裂隙的进一步溶蚀和产生新的孔隙流体压力。第(4)组中, 基本顺层发育的水力破裂和顺层滑动面, 由于其规模相对较大, 愈合性较差, 是工程上必须采取措施的又一地质问题。

总的来看, 坝区的裂隙构造主要形成于燕山期及其以前, 少数裂隙在燕山期后(喜山期)生成, 其最新活动年代不会晚于早更新世的中晚期^[11~12]。节理裂隙常常被硅酸盐或碳酸盐脉充填, 表现为持续反复的裂开—愈合作用。构皮滩电站工程坝区裂隙中约 80% 以上的已被角砾岩或方解石充填愈合。岩石中裂隙构造的出现, 改变了内部的结构构造, 将会降低岩石的强度极限; 而由于方解石脉或角砾岩的充填愈合, 则提高了岩石的强度。正如许多有裂隙存在的大理岩, 由于有了方解石脉的焊接作用, 仍可用来作建筑或装饰材料。该区方解石脉先后至少有四期充填愈合作用, 脉体充填愈合作用将裂开的岩石重新焊接, 提高了岩石的强度, 增加了岩体的稳固性。另外, 虽然碳酸盐矿物本身并不太强, 但整体上没有更弱的成份被裂隙突破, 所以裂隙不容易扩展^[13]。

需要指出的是, 研究表明, 仍存在一部分裂隙没有充填方解石脉或其它脉体, 或是愈合后又被裂开, 部分裂隙顺层发育, 具有一定的贯通性; 还有一组临江发育的卸荷节理, NW 走向, 倾向江面, 显张性, 均值得重视。

5 结论与讨论

最主要的结论是, 绝大多数破裂系统都是在上地壳脆性域内通过碎裂作用或碎裂流作用形成的, 孔隙流体压力在破裂的形成和发展过程中, 起着重要的或决定性的作用。

(1) 构皮滩电站坝区二叠系-三叠系岩石中, 裂隙构造主要有四组优势方向, ① NNW/NEE (或 SWW) $\angle 80 \sim 86^\circ$; ② NWW/NNE (或 SSW) $\angle 75 \sim 85^\circ$; ③ NEE/NWW (或 SSE) $\angle 75 \sim 85^\circ$; ④ NE/NW $\angle 50^\circ \pm$ 。坝址下游的奥陶系岩石中, 以 NEE 和 NW 走向裂隙最为发育;

(2) 通过节理裂隙的分期配套及结合区域资料, 该地区构造变形的相对先后顺序为, NE 向构造在先, 主压应力为 NW-SE 向; SN 向构造次之, 主压应力为近 E-W 向, EW 向构造在后, 主压应力为近 S-N 向;

(3) 灰岩, 白云岩中的裂隙, 80%已被方解石脉或角砾岩充填愈合, 方解石矿物中流体包裹体均一法测温结果表明, 温度区间为 30~336℃, 多数集中在 130~190℃区间, 脉体充填至少可分出四期(幕)活动, 其中 150~230℃为该地区的主期流体活动。据 e 双晶统计, 推测裂隙形成大体处在地表以下小于 5km 的部位;

(4) 第(3)组和第(1)组裂隙紧闭性较好, 沿此方向岩石破损不太强烈, 对工程的影响不会太大; 第(2)组和第(4)组裂隙多具开放性, 有不同程度的溶蚀, 愈合性较差, 工程上需要采取措施。

构造上, 构皮滩电站工程坝区岩体虽已不是完整的, 因为内部已发育了复杂的破裂网络, 但是, 绝大部分破裂已被角砾岩及充填的脉体所愈合, 因而性状一般较好。顺层滑动面及层间软弱层(带), 在施工过程中都已进行了合理处置。因此, 整体而言, 坝基地壳稳定性是可靠的。不过由于建坝施工及库区蓄水之后坝区原有的地应力平衡状态必将丧失, 变形岩体内部各破裂系统, 尤其是顺层破裂、NWW 及 NNW 向裂隙的力学行为和应力调整状况还应密切关注并进行长期监测。部分没有脉体充填或充填后又被裂开的裂隙, 仍然占有一定比例, 并具有一定的贯通性, 工程上值得重视。

参 考 文 献

- [1] 谷德振. 岩体工程地质力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] 索书田, 侯光久, 石林, 等. 三峡坝区非对称共轭低缓角度剪破裂系 [J]. 地球科学, 2000, 25 (3): 283~289.
- [3] Richard H., R. H. Sibson. Structural Permeability of fluid-driven fault-fracture meshes [J]. J. Struct. Geol., 1996, 18 (8): 1031~1042.
- [4] 侯光久, 王生维, 张先进. 晋城成庄矿煤层中节理研究及其意义 [J]. 天然气工业, 2005, 25 (1): 41~43.
- [5] 刘立, 孙晓明, 董福湘, 马锋, 等. 大港滩海区沙一段下方解石脉的地球化学与包裹体特征——以港深 67 井为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34 (1): 49~54.
- [6] 贵州省地质局. 贵州主要构造体系(贵州省构造体系图说明书, 1:50 万) [M]. 地质出版社, 1980.
- [7] 李四光. 地质力学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- [8] Ramsay, J. G. 岩石变形的裂开一愈合作用 [A]. 见: 宋鸿林译. 基础地质译丛 [C]. 1985 (1).
- [9] Burruss R C, Diagenetic palaeotemperatures from aqueous fluid inclusions: reequilibration of inclusions in carbonate cements by burial heating [J]. Mineralogical Mag., 1987, 51: 477~481.
- [10] 侯光久, 索书田, 魏启荣, 郑贵洲. 湘西喜眉山逆冲—推覆构造的特征与变形环境 [J]. 中国区域地质, 1998, 17 (1): 39~43.
- [11] 秦守荣, 刘爱民. 论贵州喜山期的构造运动 [J]. 贵州地质, 1998, 15 (2): 105~114.
- [12] 陈文理, 向能武. 构皮滩水电站工程地质研究综述 [J]. 贵州水力发电, 2004, 18 (6): 8~11.
- [13] 刘瑞珣. 构造裂隙扩展条件的显微构造研究 [M]. 地质力学与地壳运动. 北京: 地震出版社, 1994. 141~144.

(下转第 159 页)

LANDSLIDE STABILITY ANALYSIS BY THE 3D ELASTIC-PLASTIC CONTACT FINITE ELEMENT ALGORITHM

XU Jian-cong¹, SHANG Yue-quan², TIAN Xiao-juan³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In order to evaluate accurately the stability of slopes of rock debris and soil, the integral stability coefficient of a debris and soil landslide was computed and its stability was analyzed through the data collection, arrangement and analysis, site engineering-geological investigation and exploration and indoor and outdoor physical mechanics tests and by adopting the 3D contact elastic-plastic FEM algorithm. When using the 3D elastic-plastic contact FEM strength reduction method to compute the stability coefficient of debris-soil landslides, the space effect of the sliding mass may be considered in order the calculation results to be more accurate. During the deformation, disintegration and failure of debris-soil landslides, in space the plastic strain of the sliding mass and shear strength of the rock or soil mass on a sliding plane are different. The method for computing the stability coefficient of the debris-soil landslide of a 2D section by extracting the contact frictional stress on the sliding surface on the basis of the computation result by the 3D elastic-plastic contact FEM algorithm is relatively suited to the stability analysis and evaluation of this type of landslide and can reflect the actual state of the landslide relatively objectively and accurately.

Key words: Geo-technical mechanics computation; landslide; elastic-plastic FEM; contact algorithm; stability analysis

(上接第 165 页)

FRACTURE SYSTEM AND ITS EFFECT ON THE HYDROPOWER PROJECT IN THE GOUPITAN AREA, GUIZHOU

CHEN Wen-li¹, HOU Guang-jiu², YIN Chun-ming¹, XIANG Neng-wu¹, WANG Ling-zhan²

(1. Yangtze River Water Conservancy Commission, Wuhan 430010, Hubei, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Fractures in large-scale engineering works such as dams and tunnels have long gained attention because they concern safety problems of engineering works such as the strength of rock masses. There mainly occur carbonate rocks with minor clastic rocks at the dam site of the Goupitan Hydropower Station, Wujiang, Guizhou, and the NE, NW, N—S and E—W sets of structural fractures may be recognized in the rock sequences. However, 80 percent of the fractures have been healed by three phases of calcite veins, thus greatly reducing water permeability and increasing the strength of rocks. Some fractures have not been filled or re-opened after filling, of which bedding-parallel slip fractures are throughgoing to a certain extent, to which attention should be paid in engineering works.

Key words: fracture; healing; principal stress; Goupitan, Wujiang