

文章编号: 1000-7598 (2009) 04-1023-06

锦屏一级水电站左岸 IV#~VI#山梁稳定性分析

徐佩华^{1,2}, 黄润秋², 陈剑平¹, 严 明², 龚满福³, 周江平⁴

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 2. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 130026;
3. 中国水电顾问工程集团成都勘测设计院, 成都 610072; 4. 二滩水电开发公司锦屏工程管理局, 成都 610021)

摘 要: 锦屏 I 级水电站左岸 IV#~VI#山梁发育较多的深裂缝, 分布有断层 F2、F5、F9, 这些断层、深裂缝在空间上交切组合形成了巨大的潜在不稳定块体, 其在开挖及泄洪雨雾条件下的稳定性问题备受关注。在大量野外地质调查的基础上, 总结了岩体裂隙分布特征及其对稳定性的影响, 分析了 IV#~VI#山梁在泄洪雨雾条件下整体及浅表部的变形失稳模式。在此基础上, 运用三维数值模拟方法, 分析 IV#~VI#山梁在边坡开挖过程中地应力的变化情况, 尤其是拉应力的分布范围, 以此分析开挖对边坡稳定性的影响, 可见开挖对山梁整体的应力分布未见明显影响, 对边坡整体稳定性影响不大。运用 FLAC3D 软件模拟泄洪雨雾时水文地质条件改变情况下的 IV#~VI#山梁变形情况, 并进行了参数变化及地下水位变化的敏感性分析。参数变化分析结果表明, 与地下水位变化相比较, 前者边坡稳定性的影响更明显。

关 键 词: 深裂缝; 泄洪雨雾; 变形失稳模式; 数值模拟

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of the stability analysis and three dimensional numerical simulation of #IV-#VI ridges in left bank at Jingping First Hydropower Station

XU Pei-hua^{1,2}, HUANG Run-qi², CHEN Jian-ping¹, YAN Ming², GONG Mang-fu³, ZHOU Jiang-ping⁴

(1. National Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Jilin 130026, China; 3. Chinese Hydropower Engineering Consulting Group Co., Chengdu Institute of Investigation and Design, Chengdu 610072, China; 4. Ertan Hydropower Development Company Ltd., Chengdu 610021, China)

Abstract: At #IV-#VI ridges in the left bank slope of Jingping First Hydropower Station, there are numbers of deep cracks and faults, such as F2, F5 and F9, which result in huge latent instable block in this area. So the stability of huge block becomes an important problem under the conditions of excavation and flood discharge. The cracks' distribution character and the influence on slope's stability are summarized; and the deformation model of #IV-#VI ridges under the condition of flood discharge is analyzed based on plentiful geologic investigation data. Additionally, the change of stress, especially the zone of tension stress is analyzed at the course of excavation by means of three-dimensional numerical simulation, in which the influence of excavation on slope stability is studied. It is the conclusion that there is no evidence difference to stress and whole stability of the ridges after excavation. On the other hand, the deformation of #IV-#VI ridges is analyzed and computed under the changed hydrogeological geology condition by FLAC3D. The calculation based on parameter and water table sensitivity indicates that the whole slope's stability is more sensitive to rock mass parameters than different water table.

Key words: deep cracks; atomization by flood discharge; deformation failure mechanism; numerical simulation

1 前 言

在建的锦屏 I 级水电站位于青藏高原东部边缘的高山峡谷地带, 河床高程为 1 625~1 640 m, 河

流坡降 3 %左右, 沿河两岸山势巍峨, 高差悬殊, 呈典型高山峡谷地貌景观。枢纽区边坡最典型、最突出的地质缺陷是深裂缝发育^[1-5], 主要分布于左岸 II#、V#、VI#、IV# 梁 1 650 m 高程以上的坡体内

收稿日期: 2007-09-11

基金资助: 国家自然科学基金(雅砻江水电开发联合研究基金重点项目)(No. 50539050); 国家自然科学基金项目(No. 40472136)和中国博士后基金项目(No. 20070411147)联合资助。

第一作者简介: 徐佩华, 女, 1979 年生, 讲师, 在站博士后, 主要从事地质工程、岩土工程教学与科研工作; E-mail: xph1217@126.com

(图 1), 形成一系列的变形拉裂岩体。关于泄洪雾化下边坡失稳机制的认识目前还不十分明晰, 但泄洪雨雾对边坡稳定性的影响是不容忽视的。从以往水电站的泄洪雾化区边坡的失稳实例可以得到一些启示: 泄洪产生的雨雾范围、雨强较大, 雨雾对坝下游一定范围岸坡的水文地质条件改变较大; 泄洪雾化对边坡影响的基本途径是, 在坡体内产生附加渗透力(孔隙水压力)及对岩体力学特性的软化作用; 泄洪雾化条件下边坡失稳的规模明显受到坡体结构的控制^[6]。从这些启示可看出, 泄洪雾化会对边坡稳定性产生多方面极为不利的影响。而 IV#~VI#山梁不仅是在泄洪雨雾的影响区内, 左岸导流洞也从此处经过, 且出口边坡就在附近的 A#梁处开挖。同时, 该山梁深裂缝较发育, 与断层 F2、F5、F9 在空间上交切组合形成了巨大潜在不稳定块体, 从地质条件上判断, 自然状态下该块体安全裕度不高。因此 IV#~VI#山梁在开挖、泄洪条件下的稳定性问题备受关注。本文在大量野外实际调查资料的基础上, 详细分析边坡地质条件、边坡可能的失稳模式, 将其进行概化, 运用地质分析与数值模拟相结合的手段分析其在各种工况下的稳定性。

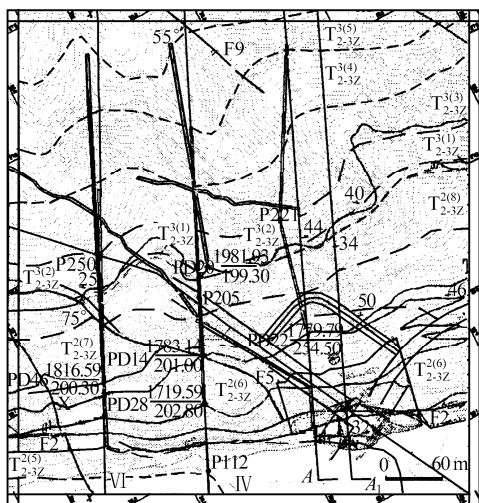


图1 左岸V#梁下游工程地质平面图

Fig.1 Geological map of the left bank #V ridge downstream

2 IV#~VI#山梁的工程地质概况

边坡在 1 920 m 高程以下坡度约为 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 1 920 m 高程以上坡度约为 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$, 左岸 IV#~VI# 梁工程地质平面图如图 1 所示。边坡主要由 2(6)、2(7)、2(8)层大理岩和第 3 段砂板岩组成, 岩层产状为 $N10^{\circ} \sim 35^{\circ} E/NW \angle 30^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 反向坡。

岸坡内规模相对较大的断层主要有: F2、F5、

F9 断层, 下部 2(6)层薄~中厚层大理岩的顺层挤压错动带较发育, 平均间距为 5~7 m。该部位岸坡岩体中主要发育 4 组裂隙, ① $N20^{\circ} \sim 30^{\circ} E/NW \angle 30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ (层面裂隙)、② $N50^{\circ} \sim 70^{\circ} E/SE \angle 60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 、③ $N20^{\circ} \sim 35^{\circ} E/SE \angle 70^{\circ} \sim 85^{\circ}$ (顺坡裂隙)及④ $N70^{\circ} \sim 80^{\circ} W/SW \angle 75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ VI#、IV# 梁浅表卸荷水平深度一般为 20~60 m, 深部裂缝发育。

对边坡稳定性影响较大的第 3 组顺坡裂隙发育, 具有如下特点:

(1) 由坡面向坡内, 顺坡裂隙发育程度表现出水平分带性。在强卸荷表层, 顺坡裂隙延伸较长、贯通程度高, 使坡体结构呈现“似板状”的顺向坡结构; 向里延伸短小、贯通程度低(如 IV#梁, 见图 2)。

(2) 坡体表部, 顺坡裂隙发育还随高程表现出一定的垂直分带性, 即在坡脚部位, 顺坡节理延伸短、贯通程度差, 以上边坡的表层顺坡裂隙延伸长、贯通程度较高(如 IV#梁, 见图 2);

(3) 顺坡裂隙倾角一般较陡 ($65^{\circ} \sim 75^{\circ}$), 局部可见中缓倾角裂隙 ($35^{\circ} \sim 45^{\circ}$), 这种中缓顺坡节理对强卸荷表层局部块体稳定具有控制意义。

左岸导流洞经过 VI#、IV# 梁, 其出口位于 A 线下游约 20 m, 处于 IV 线山脊变形破裂岩体坡脚处, 导流洞出口底板高程为 1 631.0 m (图 1)。边坡强卸荷水平深度为 10~15 m, 弱卸荷水平深度为 40~50 m。出口区及其上部岸坡为 IV 线山梁变形拉裂岩体, 岸坡内深部裂缝发育, PD22 (高程 1 777 m) 平洞揭示, 洞深 50~80 m 及 135~150 m 岩体呈碎裂结构, 岩体强烈松弛, 宽张的 I、II 级深部裂缝发育, 局部地方形成塌顶, 深卸荷水平深度大于 200 m。



图 2 IV# 梁顺坡裂隙的垂直分带性

Fig.2 The band of cracks paralleled slope at #IV ridge

3 泄洪雾化下左岸 IV#~VI#山梁变形失稳模式

3.1 泄洪雾化下左岸 IV#~VI#山梁整体变形失稳模式及边界条件分析

在泄洪雾化下, 左岸 IV#~VI# 梁整体上可能的变形失稳模式是“滑移-拉裂”: 中上部高程沿已有结构面滑移, 坡脚部位岩体剪断, 但不能确定潜在失稳的边界条件、失稳范围以及泄洪雨雾对整体稳定性如何影响、影响程度如何, 而这些正是进行稳定性计算评价的基础。

(1) 关于中上部高程的(后缘)边界条件

中上部高程, 大理岩中发育规模较大的深部裂缝, 砂板岩浅表部倾倒变形强烈, 顺坡的卸荷裂隙(带)发育, 因此 VI#~IV# 梁中上部高程的后缘切割边界, 是基本具备的。

(2) 关于坡脚部位阻抗段的剪切(断)条件

这里所指“坡脚部位阻抗段”是指从“深部裂缝”的下端到江边的这部分岩体, 这部分岩体对维持整个山体的稳定具有至关重要的作用。根据这部分岩体的特征, 可以得出以下认识: (1) “坡脚部位阻抗段”岩体从 VI 剖面至 IV、A 剖面逐渐变薄, 因此 VI 剖面至 IV(图 3)、A 剖面稳定性逐渐降低;

(2) 由于坡脚部位无特定的、起控制作用的结构面存在, 因此其潜在破坏将是剪断岩体, 而且剪断面应按圆弧面考虑; (3) 潜在破坏的剪出口, 在 VI、A 剖面位置较高, 在 IV 剖面位置可能较低。

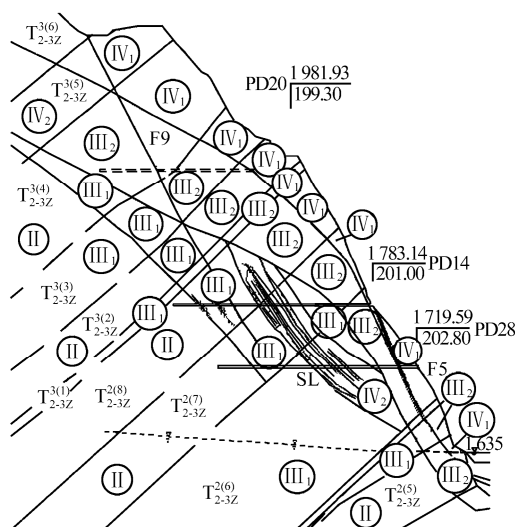


图3 左岸 IV-IV 剖面

Fig.3 Geological section of the right bank slope

(3) 关于侧向切割边界条件: 整个 VI#~IV# 梁没有侧向切割边界。

根据上述, VI#~IV# 梁整体上属一种相对稳定的结构, 但坡脚阻抗段相对单薄(尤其是 IV 线、A 线), 岩体质量并不是很好, 因此其现状整体稳定, 但安全裕度不高。

3.2 泄洪雾化下左岸 IV#~VI#山梁浅表部失稳模式

左岸泄洪雾化区边坡浅表部主要失稳模式: ① 倾倒-滑塌: 主要在 IV#~A 线之间 F2 上方、F5 外侧的强卸荷岩体, 有一定的规模。② 滑移-拉裂: 中陡倾角顺坡裂隙(65~75°) 与中缓倾角顺坡裂隙(45~50°) 控制形成的滑移-拉裂, 规模较小, 主要限于强卸荷表层, 也是左导出口开挖边坡主要变形失稳模式。

4 左岸山梁稳定性三维数值模拟分析

4.1 计算模型

在左岸导流洞出口部位, 根据综合工程平面地质图, 利用 I-I、VI-VI、IV-IV、A-A、III-III 地质剖面图及各个高程地质平切图, 结合野外现场调查与上文的地质判断, 对左岸导流洞出口部位地质条件进行概化, 建立了三维计算模型。

模型范围: 顺河方向从上游的 I-I 地质剖面到下游的 III-III 剖面, 长度为 500 m; 在横河方向自谷底向左岸边坡取 641 m; 模型底边界高程为 1300 m, 模型中最高高程为 2250 m, 高差 950 m。模型坐标 X 轴正方向为 S68° E; Z 坐标正方向指向河流上游; Y 轴正方向为高程, 模型侧边界和底边界均为单向约束。

模型共剖分了 61 623 个单元、260 234 个节点(图 4 和图 5), 计算软件为 3D-σ 和 Flac3D。

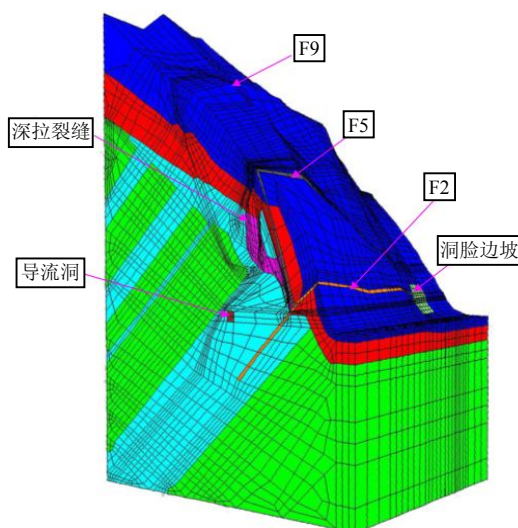


图4 三维数值分析计算网格图

Fig.4 Geological mechanical model

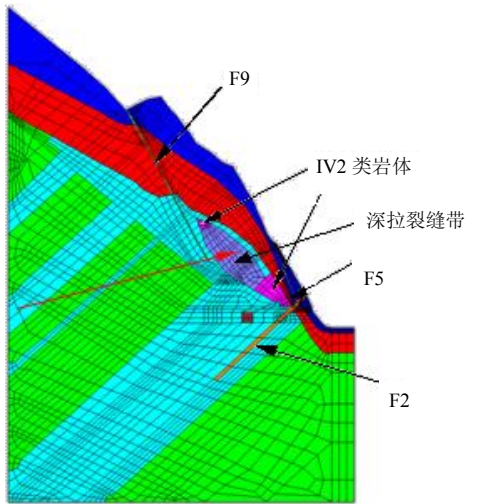


图5 IV-IV剖面网格映射图

Fig.5 Grid mapping map of IV-IV geological section

地质条件的概化：模型构建过程中，考虑了2(4)~2(8)层大理岩，3(1)~3(6)层砂板岩；考虑了强风化带、弱风化带和深部卸荷带；断层主要有F2、F5、F9。其中F5被F2在地下深部错断，在VI-VI剖面较明显，而在IV-IV剖面F5在F2断层下面的部分尖灭消失。由于F5在F2断层下面的部分离导流洞相对较远，而且深埋较大，所以模型中只考虑了F5在F2以上的部分。左岸坡体IV#、VI#山梁深部存在相当数量的深拉裂缝，考虑到其一般成带出现，故在模型中将深拉裂缝集中发育特征概化为强度较低的岩性带。

算参数的选取：计算模型中各种岩体按照岩级进行归类，各级岩体及断层破碎带参数确定主要参照成勘院《可行性研究报告》，见表1。

表1 计算模型材料参数表

Table 1 The mechanics parameters of rock formations

岩级 断层	变形模量 E /MPa	泊松比 μ	密度 ρ /(g/cm ³)	抗剪断强度		拉伸强度 σ_t /MPa	备注
				c /MPa	φ /(°)		
II	26 000	0.25	2.76	2.00	53.47	2.00	
III1	11 500	0.25	2.73	1.50	46.94	1.50	
III2	6 500	0.30	2.70	1.02	45.57	1.02	
IV1	3 000	0.35	2.67	0.80	38.66	0.80	
IV2	2 000	0.35	2.64	0.50	33.02	0.50	
F2	500	0.35	2.00	0.10	26.00	0.10	参照V1 类岩体
F5	375	0.35	2.00	0.02	16.70	0.02	
F9	375	0.35	2.00	0.02	16.70	0.02	
SL	1 250	0.35	2.32	0.40	25.00	0.40	

4.2 初始应力场模拟分析

由于坡面附近构造应力基本释放，模拟计算只考虑了自重应力的情况。经过3D- σ 计算可知，边坡初始应力场分布符合河谷边坡应力场分布的一般规律。拉应力主要分布在深拉裂缝两端的IV2类岩

体、F2断层、强风化带内和坡表凸出部位，量值一般小于0.5 MPa，在F2断层深部尖灭处拉应力集中，最大量值在1.5 MPa左右。在A1剖面强风化带内拉应力区相对分布较多，但量值较小，小于0.5 MPa，拉应力分布深度一般在距坡表15 m左右（图6），这个分布深度与坡体强卸荷深度基本一致，可见采用自重应力场进行分析，对于边坡上部一定深度范围内的工程分析是可以满足要求的。

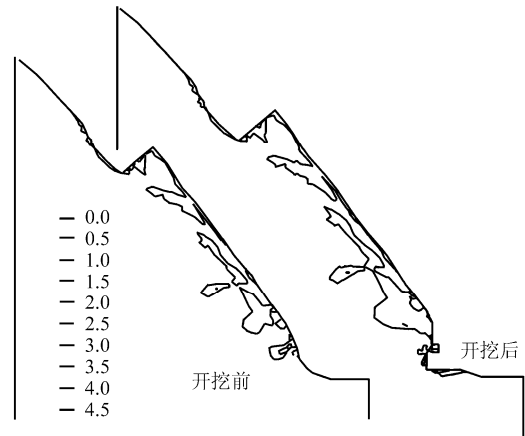
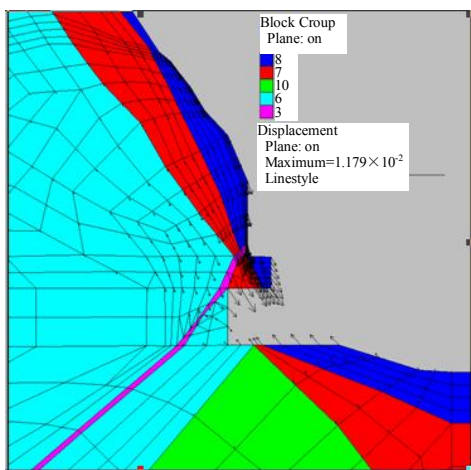
图6 A1剖面 σ_3 拉应力分布图(开挖前、导流洞+洞脸边坡开挖后)(单位: MPa)

Fig.6 The contour map of minimal primary stress of A1 geological section at native state or after excavation (unit: MPa)

4.3 导流洞及洞脸边坡开挖对边坡应力场及变形的影响分析

开挖过程分2步完成：第1步为导流洞开挖，第2步为洞脸边坡开挖，开挖坡高60 m。导流洞开挖，应力变化较显著的范围在隧洞周围40~50 m左右。洞脸边坡开挖后，开挖处出现局部拉应力集中，最大量值为1 MPa左右。在A1剖面上洞脸边坡开口线附近60 m左右的范围内，拉应力分布范围有所扩大，量值上没有太大变化，小于0.5 MPa（图6）。洞脸边坡开挖对IV-IV、VI-VI剖面应力分布未见明显影响。

导流洞及洞脸边坡开挖后，坡体位移量值相对较小，一般在毫米级，如图7所示，变形较大部位主要集中在导流洞出口与F2断层斜交的顶板部位，该处岩体最大位移近5 cm。洞脸边坡的开挖，变形的影响范围在开口线以上60 m左右，大致在高程1 750 m处，影响深度主要在强卸荷表部，变形值为毫米级。导流洞及洞脸边坡为向下、向山外变形；坡脚表现为垂向卸荷回弹。导流洞及洞脸边坡在深拉裂缝带处引起的位移很小，量值为1 mm左右。从位移的角度分析，开挖对坡体整体稳定影响不大。

图 7 开挖后 A_1 剖面位移矢量图 (单位: m)Fig.7 The displacement vectogram of A_1 geological section after excavation (unit: m)

4.4 泄洪雾化下 IV#~VI#梁变形稳定性的数值分析

泄洪雨雾条件下, 左岸 VI#~IV#梁稳定性将面临两个方面的不利影响: ①因坡体内深裂缝充水而导致荷载增加(孔隙水压力); ②坡脚阻抗岩体相对较单薄(其高度约占整个坡高的 1/4), 且其浅表部在雨雾下极有可能发生一定程度的劣化。因此, 在泄洪雨雾下, 迭加上述两方面的影响后, VI#~IV#梁边坡局部稳定问题较为突出, 整体稳定性极有可能恶化而达不到安全要求。

根据 MOLDFLOW 的计算结果^[7], 在水库蓄水产生的绕坝渗流稳定且泄洪雨雾渗流亦稳定后, IV#、VI#山梁处的地下水位将抬升至 1720 m。同时, 考虑到地下水对岩体的弱化作用, 将地下水位以下的岩体参数有所折减, 折减后的参数见表 2。

表 2 地下水位以下的岩体参数

Table 2 The mechanics parameters of rock formations under water level

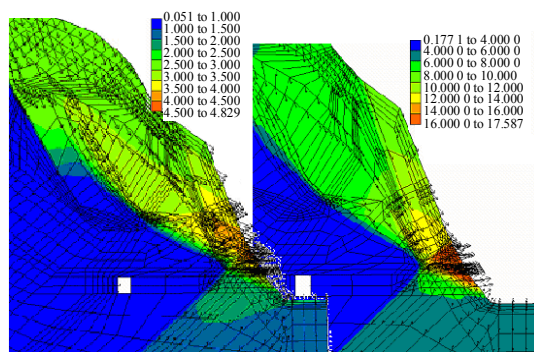
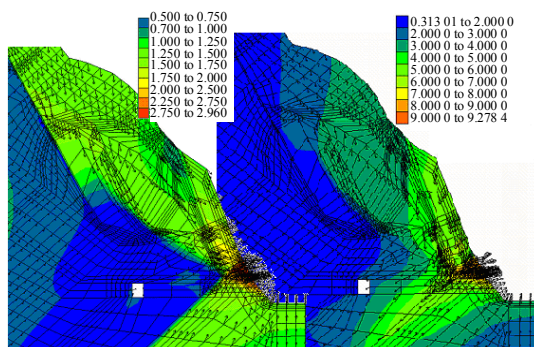
岩级 断层	刚度模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	抗剪断强度 c/MPa $\varphi/(\text{^\circ})$		拉伸强度 σ_t/MPa	备注
II	138.64	832	1.600	42.776	1.60	
III1	613.6	368	1.200	37.552	1.20	
III2	433.6	2 000	0.816	36.456	0.81	
IV1	266.4	888	0.640	30.928	0.64	
IV2	177.6	592	0.400	26.420	0.40	
F2	448	152	0.081	20.800	0.00	参照 V1 类岩体
F5	336	112	0.016	13.360	0.00	
F9	336	112	0.016	13.360	0.00	
SL	111.2	368	0.240	20.000	0.10	

分析计算结果可以得到以下主要认识:

(1) 如图 8 所示, 在泄洪雨雾下边坡总体的变形方式是: 中上部以垂直下沉变形为主, 坡脚部位以水平向外的挤出变形为主, 这种挤出变形在 F2 下盘附近最为明显。尽管上述变形量值不大, 但趋势明显, 说明坡脚部位的挤压带, 由于厚度较小,

靠自身压缩而加剧上部变形的作用较微弱, 主要是在上部巨大山体作用下, 向外的侧向挤出, 这与地质分析一致, 而在 F5 断层以内部位变形很小, 基本不受地下水位上升影响。地下水位抬升至 1720 m 后, 边坡位移并不很大, 最大位移只有 5.239 cm, 边坡总体上仍稳定。

(2) 为分析地下水位变化和岩体参数变化对边坡的稳定性影响情况, 计算几种不同条件下的边坡变形: 1720 m 水位时参数未折减, 1680 m 水位时参数折减, 1680 m 水位时参数未折减, 计算结果如图 8、9 所示。对比各图可知, 在以上各种条件下边坡的变形方式都相同, 所不同的只是位移量值。地下水位以下岩体参数大小对变形有着较大影响, 如在地下水位以下岩体参数不变的情况下, 地下水位从 1680 m 升到 1720 m 时, 位移只增加了 0.83 cm, 而在地下水位以下岩体参数有折减的情况下, 地下水位从 1680 m 升到 1720 m 时, 位移增加了 1.867 cm, 可见地下水位以下岩体参数折减与否, 比地下水位高程变化对变形的影响更为明显。

图 8 1720 m 水位时 VI 剖面总位移矢量图 (单位: 10^{-2} m)
(参数折减后、前)Fig.8 The total displacement vectogram of VI geological section at 1720 m water level (reduction parameter or not) (unit: 10^{-2} m)图 9 1680 m 水位时 VI 剖面总位移矢量图 (单位: 10^{-2} m)
(参数折减后、前)Fig.9 The total displacement vectogram of VI geological section at 1680 m water level (reduction parameter or not) (unit: 10^{-2} m)

5 结 论

通过野外地质条件调查和室内数值模拟分析,可以得出如下几点结论:

(1) 通过大量野外调查可知, IV#~VI#山梁在自然状态下边坡总体稳定, 但安全裕度不高.

(2) 泄洪雾化下左岸IV#~VI#山梁整体上可能的变形失稳模式是滑移-拉裂, 浅表部主要失稳模式是倾倒-滑塌和滑移-拉裂.

(3) 导流洞及洞脸边坡开挖对IV#~VI#山梁整体的应力分布未见明显影响, 对边坡整体稳定性影响不大.

(4) 泄洪雨雾条件下边坡总体的变形方式是: 中上部以垂直下沉变形为主, 坡脚部位以水平向外挤出变形为主, 这种挤出变形在 F_2 下盘附近最为明显. 地下水位变化对变形影响不是很明显, 坡脚阻抗岩体遇水弱化程度对变形影响很敏感.

参 考 文 献

- [1] 王士天, 黄润秋, 李渝生, 等. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998.
- [2] 黄润秋, 严明, 陈龙生, 等. 复杂反倾向岩质高边坡深部裂缝形成机理分析[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(增): 321—327.
HUANG Run-qiu, YAN Ming, CHEN Long-sheng, et al. Mechanism of deep cracks in complex ant-dip rock high slope[J]. *Chinese Journal of Chengdu College of Technology*, 2001, 28(Supp.): 321—327.
- [3] 祁生文, 伍法权, 兰恒星. 锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂缝成因的工程地质分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 596—599.
QI Sheng-wen, WU Fa-quan, LAN Heng-xing. Study of the mechanism of the deep fractures of the left abutment slope at the Jingping first stage hydropower station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24 (5): 596—599.
- [4] 祁生文, 伍法权. 锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂缝变形模式[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 817—820.
QI Sheng-wen, WU Fa-quan. Deep fracture deformation models of Pusiluogou left abutment slope at Jingping first stage hydropower station[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 817—820.
- [5] 祁生文, 伍法权, 丁振明, 等. 从工程地质类比的角度看锦屏一级水电站左岸深部裂缝的形成[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1380—1384.
QI Sheng-wen, WU Fa-quan, DING Zhen-ming, et al. Study of mechanism of deep fractures of Jingping first stage hydropower station by engineering geology analogy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1380—1384.
- [6] 薛玺成, 刘家才, 孙涓. 雾化雨诱发岩质边坡失稳的机理[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 207—212.
XUE Xi-cheng, LIU Jia-cai, SUN Mei. Mechanism for instability of rock slope induced by atomized rain[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1999, 7(3): 207—212.
- [7] 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家实验室. 锦屏一级工程高边坡稳定性及加固处理专题研究[R]. 成都: 成都理工大学, 2005.

滑坡模型试验理论及其应用

著译者: 罗先启, 葛修润 出版社: 中国水利水电出版社 出版日期: 2008-12-01 书号: ISBN 978-7-5084-6062-8

规格: 平装 16 开 页码: 162 页 定价: ¥25.00 元

【内容简介】本书在阐述与回顾经典的量纲分析与相似定理的基础上, 结合滑坡模型试验自身的特点, 阐述了滑坡模型试验相似理论和相似判据的确定方法, 并提出了滑坡模型畸变修正方法与畸变模型设计理论; 研究并开发了考虑水库水位变化和大气降雨作用下的滑坡物理模型试验系统, 该系统包括模型试验平台起降、室内人工降雨、水库水位变化控制、多物理量测试、非接触位移光学测试和 r 射线透射法土壤水分测试六大系统, 具有自动化程度与测试精度高等特点; 在滑坡相似材料配制和评价方面提出并建立了基于模糊评判理论的滑坡模型试验相似材料择优方法, 使相似材料的选择和配制更加快捷、准确; 利用滑坡模型试验理论和研发的滑坡物理试验系统对三峡库区千将坪滑坡形成机制进行深入研究, 获得了部分具有一定理论与应用价值的研究成果, 进而揭示三峡库区滑坡在降雨与库水耦合作用下的形成机制. 本书的内容既有理论研究, 又有实践应用, 对滑坡模型试验理论的完善与试验技术的发展具有重要意义, 对滑坡机理研究及滑坡治理工程具有较高的参考价值和指导作用.

【目 录】序 前言 1 绪论 2 滑坡模型试验理论 3 滑坡模型试验系统 4 滑坡模型试验相似材料 5 滑坡模型试验相似环境 6 千将坪滑坡模型试验研究 7 结论与展望 参考文献

【读者对象】本书可供从事边坡工程、滑坡治理工程的广大工程技术人员借鉴, 也可供相关大专院校师生和科研院所的研究人员参考.

(信息来源: 工成网)