

西南某水电站右坝肩开挖边坡稳定性三维有限元分析

唐 然¹, 汪家林¹, 范宣梅¹, 王义军²

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 成都市勘察测绘研究院, 成都 610057)

摘 要:正在建设中的西南某水电站, 在开挖过程中, 右坝肩岩体的不同部位出现了不同程度的变形破坏迹象, 局部出现了小规模跨塌现象。为了评价开挖对边坡的影响, 根据施工开挖的顺序, 应用三维弹塑性有限元数值法对坝肩边坡开挖后的变形、应力状况及破坏区分布进行模拟, 揭示边坡可能的失稳的部位, 并对边坡的支护方案提出建议。

关键词:开挖边坡; 三维有限元分析; 坝肩槽; 边坡稳定性

中图分类号:TV621; P642.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2007)03-0095-03

3-D Finite Element Analysis of the Right Abutment Solpe Stability at a Hydropower Station

TANG Ran¹, WANG Jia-lin¹, FAN Xuan-mei¹, WANG Yi-jun²

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2. Chengdu Institute of Exploration and Surveying, Chengdu 610057, China)

Abstract: Some evidences of failure by rupture appeared on the right dam abutment slope of a south western hydropower station during the excavation, and collapses took place in some local zones. In order to evaluate the effect of excavation, according to the order of the excavation, the method of 3-D elastoplastic finite element analysis is used to simulate the deformation, the distribution of stress and failure area, so the possible failure location of the slope can be revealed, moreover table a proposal about the support blue-print.

Key words: excavated slope; 3D finite element analysis; dam abutment; stability of slope

1 引 言

正在建设中的西南某水电站属于中型规模的水利水电枢纽工程。工程主要由拦河坝、电站厂房等组成。河床式电站厂房和安装间布置在右岸近岸侧, 采用混凝土坝与左右岸坡连接。在施工过程中将对右岸坝肩边坡及边坡下的电站厂房基础进行大方的开挖。根据监测资料和现场调研, 在开挖过程中, 右坝肩岩体的不同部位出现了不同程度的变形破坏迹象, 局部出现了小规模跨塌现象。为了评价开挖过程对边坡稳定性的影响, 本文在对坝肩开挖边坡的变形机制及地质破坏模型建立了一定认识的基础上, 根据施工开挖的顺序应用三维弹塑性有限元数值法对坝肩边坡开挖后的变形、应力状况及破坏区分布进行模拟, 以对变形破坏模式进行验证, 从而对边坡开挖完成后坡体的稳定性进行评价, 揭示边坡可能的失稳的部位, 并对边坡的支护方案提出建议。

2 工程地质条件

边坡的主要岩性为二叠系栖霞组砂质页岩、石英砂岩、石英粉细砂岩和炭质页岩。其中石英砂岩呈中厚层状结构, 岩体较完整, 强度较高; 石英粉细砂岩呈薄层状结构, 完整性相对尚好, 强度较高; 砂质页岩呈薄层状结构裂隙较发育, 岩

体完整性较差; 炭质页岩, 强度低, 易风化开裂, 裂隙及夹泥层的切割, 使得岩体呈薄层状结构。

从边坡的结构来看, 地层倾向坡内, 岩层的产出状况属于反倾向边坡(图 1), 岩层走向 $N10^\circ \sim 30^\circ W/SW \angle 45^\circ \sim 57^\circ$ 。岩体内结构面发育, 大致分为三组: (1) $N5^\circ \sim 40^\circ W/SW \angle 40^\circ \sim 59^\circ$, 层面及与层面近于平行的裂隙, 夹泥层比较发育, 厚度 1~3 cm, 多为碎屑夹泥型, 延伸长度大, 较为密集。(2) $N25^\circ \sim 40^\circ W/NE \angle 35^\circ \sim 47^\circ$, 呈陡倾角状切层发育, 结构面张开度 0.1~3 cm, 多为岩屑夹泥型。(3) $N62^\circ \sim 79^\circ E/SE \angle 70^\circ \sim 85^\circ$, 结构面张开度 0.2~1.5 cm, 充填物为岩屑夹泥。边坡岩体强风化带的铅直厚度为 40~50 m, 弱风化带为 10 m。岩体内没有发现顺坡向的长大缓倾角软弱结构面。总体上, 该边坡岩体抗滑、抗变形能力差, 坡体为中-强卸荷岩体, 裂隙发育, 表层风化严重, 工程地质条件差。

3 边坡的开挖情况及变形破坏形式

根据野外地质调查, 坝肩开挖的变形破坏模式受到岩性组成、分布的影响。在施工过程中对坝肩边坡将进行大量的开挖作业。坝肩边坡在开挖至 371.5 m 高程时, 边坡表层岩体的强风化、卸荷带由于施工放炮的影响, 石英砂岩发生向临空面发生少量的弯折变形。开挖至 343.0 m 高程时, 坡体

* 收稿日期: 2006-06-02

作者简介: 唐 然(1983-), 男, 地质工程专业硕士研究生, 研究方向: 岩土体稳定性。

出现了明显的变形特征。边坡上部的岩层倾角明显小于边坡下部的倾角,并且越接近坡体表面,岩层的倾角越小。343.0 m 及 371.5 m 高程之间的施工便道内侧由于表层风化严重,抗变形能力差,在上部岩层压力的作用下,发生了较大变形,岩层向临空面弯折较大角度,表层岩层弯折严重。371.5 m 高程处上部岩层与下部强风化岩层在风化面交界处产生了横向的线状拉裂缝,上下岩层的倾角有明显的差异。下部岩层弯折变形进一步加剧,岩层倾角变化至接近水平,343.0 m 及 371.5 m 高程之间局部地带顺坡向的一组结构面逐渐贯通,沿施工道内侧发生了小规模跨塌。

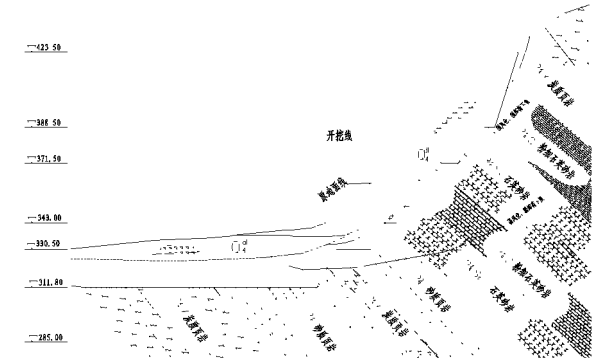


图 1 右坝肩开挖边坡工程地质纵剖面图

4 三维有限元模型的建立

根据坝肩边坡的规模和地质条件,建立概化模型如图 2 所示。 x 方向计算范围约 300 m, z 方向计算范围约 150 m,岩组对照表见表 1。模型边界在 z 方向(顺河方向)加约束边界, x 正方向临河方向为自由表面,河床以下为约束边界, x 负方向为约束边界;模型底部设为约束边界。模型单元采用六面体 20 节点等参单元,共划分 9 696 个单元与 44 003 个节点。工程区典型地质剖面图如图 1 所示。

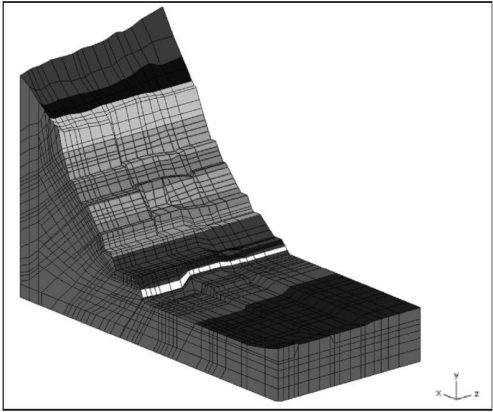


图 2 坝肩边坡开挖后的几何模型

根据模型所在地的地质结构特征及各结构的岩土体的物理力学参数性质和岩体开挖情况,把计算模型概化为 13 个岩组,不同岩性计算参数取值如下表 1。

5 计算结果及分析

5.1 坡体应力分析

从图 3 中可以看出,整个坡体的最大主应力大部分都处在压应力的状态下。在坡体下部的软岩部位、343 m 高程坝肩槽内侧出现压应力集中带。在坡体表面 343 m 高程施工道外侧部位出现了拉应力集中带,特别是坝肩槽上游坡(z 正方向为上游方向),拉应力值在 2.2 MPa 左右(负值为压

应力,正值为拉应力,图 3 中单位为 kPa)。最小主应力的分布规律与最大主应力类似,压应力集中带与拉应力集中带的分布范围相似。产生这种现象的原因是由于下部软岩产生压应力集中区域,将会受到上部岩体的压力作用而产生较大变形,给上覆岩层提供了向临空面变形的空间使上部岩层向坡外位移,从而产生较高的拉应力。

表 1 各岩组计算参数一览表

地层	弹性模量 /MPa	泊松 比	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内聚力/ MPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$	抗拉强度 /MPa
石英砂岩	4000	0.23	26.3	700	38.7	1.2
第四纪堆积物	300	0.41	16	100	13	0.35
粉细石英砂岩	3400	0.24	26.4	550	33	1.3
砂质页岩	3500	0.265	27.4	500	35	0.7
炭质页岩	500	0.29	22.7	150	19.3	0.5
石英砂岩(强风化)	500	0.285	23.1	100	19.3	0.7
粉细石英砂岩(强风化)	1000	0.31	22.3	130	21.8	0.75
砂质页岩(强风化)	1000	0.33	26.1	100	24.2	0.55
炭质页岩(强风化)	430	0.36	21.5	100	11.3	0.45
石英砂岩(弱风化)	2000	0.26	24.3	400	31	0.95
粉细石英砂岩(弱风化)	1200	0.27	24.5	230	26.6	1.0
砂质页岩(弱风化)	1300	0.285	26.4	200	28.8	0.6
炭质页岩(弱风化)	480	0.33	21	130	16.7	0.4

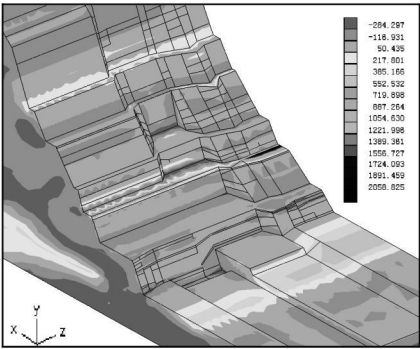


图 3 坡体最大主应力分区图

图 4 为坡体的剪应力 τ_{xy} 分布图。图中显示 388 m 高程坡体浅表层范围内、343 m 高程施工道内侧及坝肩槽内侧皆为压剪应力集中带。这是由于坡体开挖后,岩性的不同使不同岩层向临空面产生差异卸荷变形,并且坡体还将向临空面产生弯曲倾倒变形,岩层之间发生较大错动,致使施工道内侧产生应力集中带。压剪应力集中带分布在坡体内部 10~13 m 的范围内,从分布范围来看,有利于倾向于坡外的结构面的发展,使其可能沿 388 m 高程施工道内侧结构面向下发展,逐渐贯通,从下部剪应力集中带,343 m 高程施工道内侧或坝肩槽内侧剪出。监测资料也显示出坝肩槽部位坡体的内部大于 8 m 深度范围内处于不稳定状态。

5.2 坡体变形分析

从图 5 中可以看出边坡的位移在坡体的中下部较大,最大位移处沿着 x 负方向的位移量达到了 40 mm(图 5 中位移量的单位为 m,图 6 同)。产生最大位移量的坡体表面范围在 343.0 m 与 371.5 m 高程之间,从坡面向坡体内部位移量逐渐减小。从坡体表面中部向坡顶及坡脚位移量逐渐降低。坡顶的位移量较小,大部分低于 5 mm。坡体中上部的较大

变形是由于下部软岩产生的较大变形引起的,这与实际的施工的情况相符。产生最大位移量的范围与在施工过程中发生局部跨塌的范围基本相同。坝肩槽的上游坡表面的变形量大部分在 15 mm 以上,大于下游坡。

图 6 显示,垂直方向上的位移基本为正,这说明了边坡在开挖过程中产生了卸荷回弹。回弹量值不大,最大值在 18 mm 左右,产生最大值的部位是在坡体表面的中上部。从图 4 中还可看出坡体的下卧软岩虽然垂直位移在 0 mm 左右,但是在坡体的垂直方向上的变形起到了控制作用。在垂直方向上,下卧软岩产生了较大的压缩变形量。

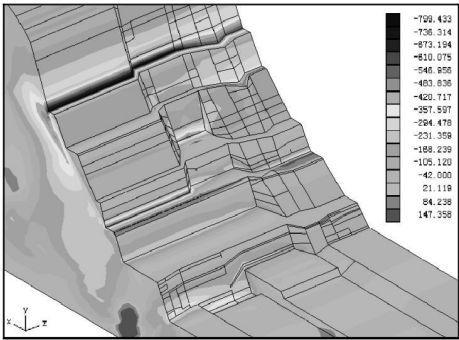


图 4 坡体剪应力 τ_{xy} 分色图

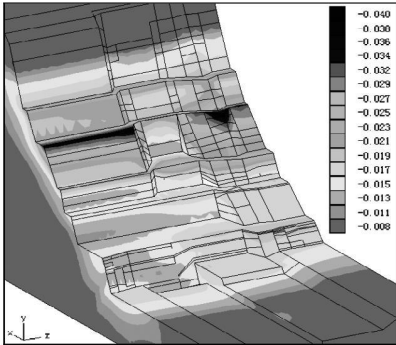


图 5 坡体在 x 方向的位移

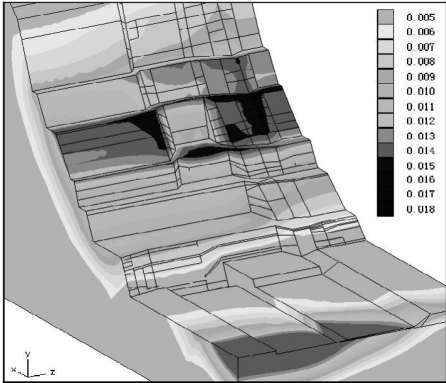


图 6 坡体在 y 方向的位移

5.3 坡体塑性破坏区特征

坡体的塑性破坏区主要分布在坡体表面的中上部。其中 388 m 高程施工道内侧、371 m 高程坝肩槽内侧和施工道内侧,破坏类型主要为压剪破坏。343 m 高程坝肩槽上游坡破坏类型主要为拉破坏。其他的塑性区主要分布在坡体的内部及下卧软岩开挖出的坡体临空面。

参考文献:

[1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理(第二版)[M]. 北京:地质出版社,1994.
[2] 黄润秋. 岩石高边坡的时效变形分析及其工程地质意义[J]. 工程地质学报,2000,8(2):148-153.
[3] 严明,黄润秋,许强,等. 某水电站左岸高边坡深裂缝工程适宜性的数值模拟分析[J]. 成都理工学院学报,2001,28(增刊):254-258.

根据坡体的变形规律,坡体产生较大变形的范围分布在坡体中上部。从坡体的应力分布规律来看,大部分坡体都处在压应力的状态,局部有拉应力集中区,坡体上部浅表层有剪应力集中区。这与塑性破坏区的分布规律有较好的一致性。

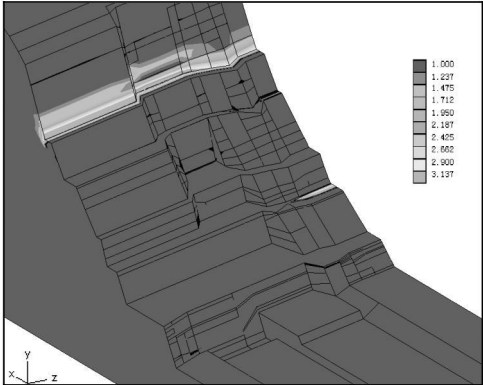


图 7 坡体塑性区分布

6 边坡稳定性评价

开挖以后边坡会向临空面产生较大的回弹卸荷变形。位移最大的部位在 388.5 m 高程至 343 m 高程之间的范围内,目前的监测资料与模拟状况相符。经过模拟开挖后发现坡体下部软岩开挖,会使边坡中部的位移继续增大。

边坡开挖以后大部分坡体都处在压应力的状态下,压应力集中带出现在下部软岩坡体内部,此部位将发生较大的压缩变形,对整个坡体的稳定性较为不利。拉应力集中带只出现在 343 m 高程坝肩槽上游坡,由于该部位岩性属于砂质页岩弱风化带,抗拉强度较低,发生拉破坏的可能性较大。压剪应力集中带出现在 388.5 m 高程施工道内侧,压剪应力集中带的分布规律对坡体的稳定性有较大影响,部分坡体存在沿着剪应力分布带失稳的隐患。

边坡塑性区的分布规律显示:拉破坏及剪破坏是在边坡开挖以后的主要破坏形式,在下部软岩开挖出临空面以后,分布范围及塑性程度同样会增大。

7 结 论

- (1) 该边坡的变形破坏模式属于典型的压缩-倾倒变形模式。下部的软岩的存在是产生该变形模式的促进条件。
- (2) 通过对开挖过程模拟,发现对坡体稳定性影响最大的一次开挖是对坡体下部软岩的开挖,即最后一次开挖。相对前几次开挖,最后一次开挖使上部岩层的应力集中程度、向临空面的位移都相应的增大。所以在对下部软岩开挖的过程中应当对下部的软岩进行治理,减小其向临空面的变形量及垂直方向上的压缩量,以减少对上部岩层的影响。
- (3) 应当对 343 m 高程坝肩槽上游坡进行锚固,防治其拉裂区产生过大变形。对 388.5 m 高程至 343 m 高程范围内的坡体,特别是坝肩槽一带,为了防治坡体内部沿剪应力集中带发生剪切破坏,坡体的锚固深度应当大于剪应力集中带分布的深度,即大于 13 m。