

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.01.015

茨哈峡水电站Ⅵ号变形体破坏机制及稳定性分析

宋彦辉¹,黄民奇²,陈新建¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054 ;
2. 中国水电顾问集团西北水电设计院工程地质研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要 :阐述茨哈峡水电站Ⅵ号变形体发育的地质环境,描述该变形体的主要特征:岩层倾角自岸坡水平向里由缓变陡,倾倒、弯曲、拉裂变形显著,弹性波速较低;变形体坡面岩体破碎并经常发生垮塌破坏现象;坡顶发育大型拉裂槽及多达几十条的反向错坎裂缝。根据这些特征,运用地质力学分析法及有限元概念模型阐明了变形体的形成机制。通过有限元对地质原型的模拟研究,进一步验证了该变形体的各种变形破坏现象。

关键词 :茨哈峡水电站;变形体;形成机制;有限元法

中图分类号 :P642.2 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)01-0057-04

Analysis of the mechanism of deformation , failure and stability of the Cihaxia Hydropower Station No. 6 deformed rock mass//SONG Yan-hui¹ ,HUANG Min-qi² ,CHEN Xin-jian¹(1. *Institute of Geology Engineering and Surveying , Chang 'an University , Xi 'an 710054 , China ;* 2. *Northwest Hydroelectric Investigation & Design Institute of China Hydropower Consulting Group , Lanzhou 730050 ,China*)

Abstract :The geological environment of the No. 6 deformed rock mass of the Cihaxia Hydropower Station is described. The main deformation behaviors are described , including the strata inclination that changes from gentle to steep in the horizontal direction from the bank slope to the inside of the deformation mass , the obvious toppling , the bending and tensile deformation , the low speed of elastic waves , the crushing and frequent collapse on the surface of the deformation mass , the appearance of a large trough due to tensile fracture , and the many inverse fissures of displacement on the top surface of the deformation mass. According to the above characteristics , the deformation mechanism of the rock mass is described using the geomechanics analytic method and the conceptual model of the finite element method(FEM). Various deformation and failure phenomena of the deformed rock mass are verified with the simulation of the geological model through FEM.

Key words :Cihaxia Hydropower Station ; deformed rock mass ; formation mechanism ; FEM

茨哈峡水电站是目前规划的黄河干流龙羊峡以上、海拔 3 000 m 以下河段最大的梯级电站。电站位于青海省兴海县与同德县交界处的茨哈峡谷内,初拟坝高 250 m 左右,正常蓄水位 2 980 m,装机容量 1 800 ~ 2 000 MW。水电站下坝址左岸为一变形体,该变形体目前在浅表部经常产生局部滑塌破坏,并在坡顶发育规模较大的拉裂沟槽和多达几十条的反向错坎裂缝。平硐揭示岩体产生了明显的弯曲-拉裂变形。为研究变形体对坝址选择的影响,围绕这一问题进行了一定的勘探、测试工作,并在此基础上对该变形体的形成机制进行深入的分析。

1 研究区地质条件

变形体位于黄河左岸、坝轴线下游约 1.1 ~

1.6 km 处。该段河道顺直,河床比降大,水流湍急,并直接对两岸岸坡进行强烈冲刷。平水期水位海拔约 2 740 m,河面宽度小于 30 m。河谷两岸岸坡基本对称,坡度为 40 ° ~ 50 °,基岩裸露,相对高差约 400 m。

组成岸坡的岩性主要为三迭系中统板岩夹砂岩(T_{2-SL}) 坡体上部发育有第三系上新统(N₂) 粉砂质泥岩及第四系上更新统洪冲积砂砾石层(Q_{3^{al+pl}-sgr}) 黄土状粉土(Q_{3^{al+pl}})。

Ⅵ号变形体所在岸坡无大的断裂构造,但层间断层较发育,主要由碎块岩、岩屑、岩粉及泥质物组成,产状基本与岩层产状一致,倾向坡内,倾角较陡。这些断层是岩层倾倒变形的重要地质分割面。

坡体主要发育 4 组节理,分别为:① 127 ° / 83 °

(陡倾坡外) ;② $318^{\circ}/10^{\circ}$ (缓倾坡内) ;③ $133^{\circ}/22^{\circ}$ (缓倾坡外) ;④ $97^{\circ}/35^{\circ}$ (倾向坡外) 。

岩体中板理产状为 $290^{\circ}\sim 340^{\circ}/60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,岸坡类型属典型反倾坡。

2 变形体工程地质特征

Ⅵ号变形体总体上坡体完整 ,并与邻近上、下游岸坡具有一致性。上、下游边界均由冲沟分割 ,沿河宽度约 500 m。目前在斜坡后缘出现 1 条弧形倾外的贯通性拉裂缝 (裂缝至坡缘水平距离约 300 m) ,并在岸坡顶部形成明显的槽状地形 ,槽型地宽约 10~15 m ,深 2~4 m ,最深处达 8 m ,局部地段明显将基岩岩体拉开 ,呈深大裂缝。在该条拉裂缝与坡缘之间尚发育多条未贯通的、长达几十米至上百米的次级裂缝 ,并在边坡后缘至中部区域范围内发育多条反向陡坎裂缝 (图 1) 。

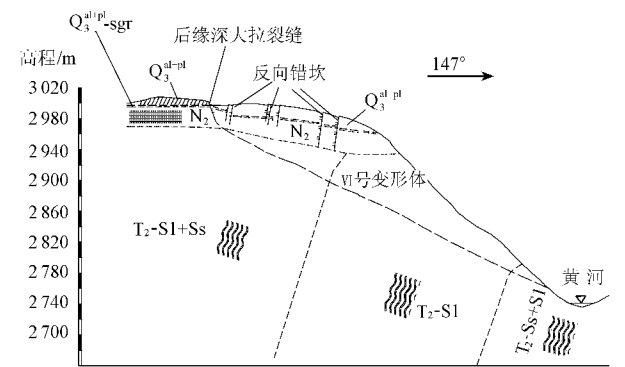


图 1 Ⅵ号变形体地质剖面

岸坡浅表部岩体弯曲变形明显。总体上 ,坡面岩体松动、破碎 ,坡缘部位目前仍在产生局部小范围的滑塌破坏。斜坡中部局部地段表层有鼓胀现象 ,是上部浅层岩体发生变形并挤压下部岩体造成的结果。坡脚部位的岩体表面也较为破碎 ,垮塌、掉块现象时有发生 ,尤其当坡缘处岩体产生滑塌时 ,其带来的振动和冲击往往会引起该带岩体一起产生垮塌破坏。

勘探揭露坡体内部岩体变形特征如下 :

- a. 岩体倾倒、拉裂及弯曲变形显著。总体上 ,变形程度随距岸坡距离增大而逐渐减小。表现在岩层倾角随硃深的增大而相应递增 (表 1) ,但不存在明显的弯曲折断界面。
- b. 岩体纵波波速较低 ,一般在 2 000 m/s 以下。尤其是浅表部强烈倾倒部分 ,波速值一般在 1 000 m/s 以下。总体上波速值的变化与岩体倾倒松动及变形程度相一致。即倾倒严重、拉裂缝及层间错动带发育段波速值明显较低 (图 2) 。

表 1 岸坡不同深度岩体倾倒变形特征

变形分区	距坡面水平距离/m	变形特征
强烈倾倒变形	0~35	岩体极破碎 ,倾倒后产状近水平 ,需支护
	35~52	倾倒后岩层倾角为 $24^{\circ}\sim 29^{\circ}$
	52~66	倾倒后岩层倾角为 $33^{\circ}\sim 38^{\circ}$
中等倾倒变形	66~100	主要为砂岩夹板岩 ,以拉裂、松动为主 ,发育多条拉裂缝
弱倾倒变形	100~125	以板岩为主 ,倾倒后岩层产状 $52^{\circ}\sim 56^{\circ}$

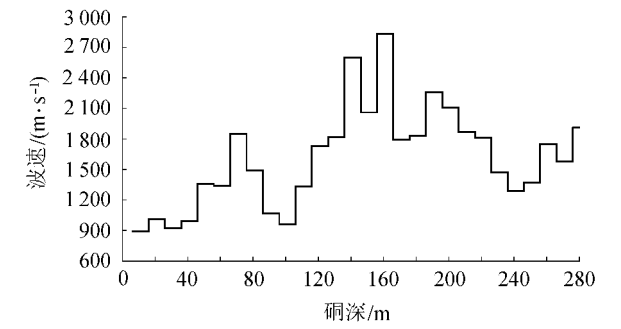


图 2 波速随硃深度变化曲线

3 变形体形成机制

已有研究资料及物理模拟试验结果表明^[1-6] ,反倾斜坡破坏演化过程中具有双重潜在滑移面特征 ,可分别形成表层滑塌和深部滑坡 ,与Ⅵ号变形体的变形破坏特征相吻合。其基本演化过程有以下几个方面 :

- a. 在岩体自重作用下 ,板岩沿板理面或陡倾结构面发生向坡面临空方向的弯曲变形。
- b. 弯曲变形的板梁间互相错动并产生拉裂缝 ,拉裂缝向深部扩展并向坡后推移 ,形成平行于岸坡走向的反坡台阶和槽沟 (图 1) ;由于斜坡较陡 ,故在坡缘部位不断产生局部垮塌破坏。
- c. 弯曲变形加剧 ,板岩在最大弯曲部位产生折断、压碎 ,浅表部岩体产生滑塌破坏 ,同时 ,受岩体自重作用影响及前缘岩体变形破坏的牵引 ,斜坡岩土体在后缘深部沿陡倾坡外的结构面 (产状 $127^{\circ}/83^{\circ}$) 和缓倾坡外 (内) 的结构面发生向临空方向的蠕滑-拉裂变形 ,在后缘形成弧形拉裂变形带。
- d. 随着坡体沿缓倾结构面的蠕滑变形 ,坡体后缘拉裂缝也不断向深部发展。滑移变形不断追踪缓倾坡外的一组结构面 ,并沿这组结构面产生剪切变形及应力集中 ,随剪切变形的不断发展 ,最终与上部拉裂缝贯通形成一连续的破裂面 ,并在条件具备时形成深部滑坡。

坡体的上述破坏演化过程反映出目前坡体浅表部的变形正发育在第二至第三阶段 ,从斜坡变形的

地质历史过程分析^[7],正处于一种不稳定的变形破坏期,但尚未发生最终的完全破坏;对于深部变形,目前仅处于后缘拉裂变形阶段,且拉裂变形深度不大,坡脚变形不甚明显。表明岸坡整体上还将在较长的时间内处于稳定状态,其后的发展演化过程受各种因素的影响,但最终趋势是产生滑坡,以达到新的平衡状态。

为进一步说明Ⅵ号变形体的变形机理,建立了如图3所示的有限元概念模型^[8],该模型用于模拟原始岸坡的变形机理,其中采用接触面单元模拟层间错动带(顺层断层),原始板理面倾角采用70°,模拟结果清晰地反映出反倾边坡的倾倒拉裂变形及岸坡岩体的变形趋势(图4)。模拟结果还表明,在基岩与上覆松散层的接触界面上存在张应力,这一应力是导致坡体后缘松散层中产生拉裂的原因之一。

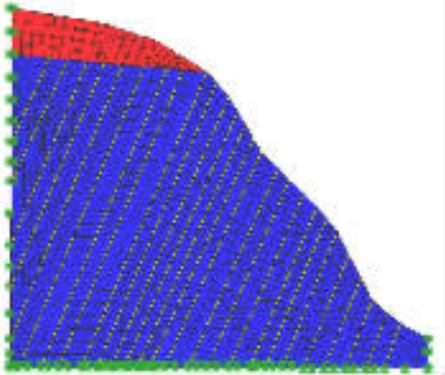


图3 变形机理有限元概念模型

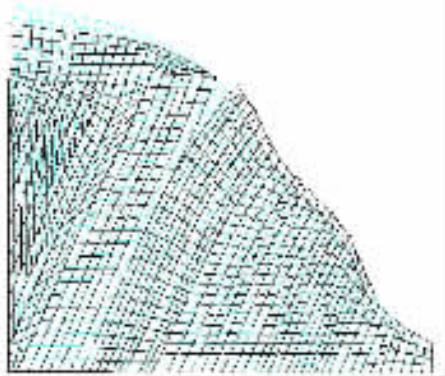


图4 变形示意图

4 VI号变形体有限元分析

为研究变形体的发展趋势,建立了如图5所示的有限元数值模型。

模型主要考虑自重应力场情况,除自由临空面外,其余边界均采用光滑位移约束。共划分780个单元,2385个节点。模型材料主要考虑了板岩(微新岩体、弱风化岩体及表部倾倒松动岩体)、第三系泥岩及第四系松散沉积物,同时采用接触面单元模拟后缘拉裂缝及倾倒体内的层间错动带。计算参数

见表2,模拟结果如图6~10所示。

表2 各类介质有限元计算参数

介质类型	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	内聚力 C/ MPa	残余内 摩擦角/ (°)	残余内 聚力 C _r / MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	抗拉 强度/ MPa
第四系粉土	20	0.34	20	0.015	10	0.01	1800	0
第三系泥岩	2500	0.29	35	0.6	26	0.15	2450	0.08
倾倒松动体	3000	0.30	40	0.2	35	0.10	2700	0.05
微新岩体	10000	0.24	46	1.5	39	0.3	2700	0.6
弱风化岩体	8000	0.25	42	1.0	37	0.2	2700	0.5
后缘拉裂缝			15	0.0	10			
层间错动带			24	0.02	18			

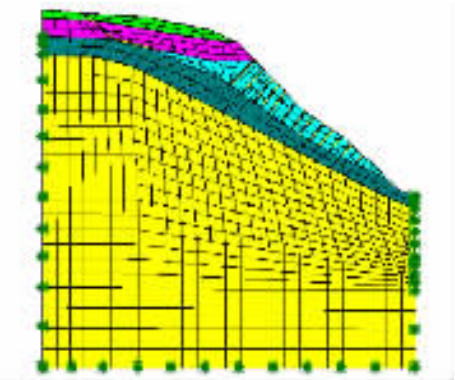
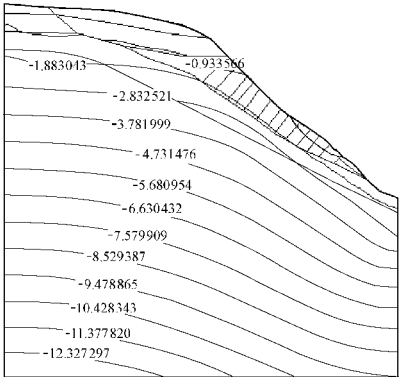
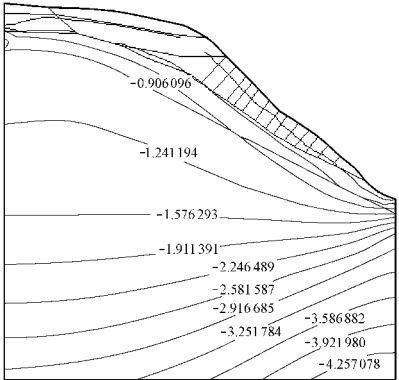


图5 有限元模拟模型



(压应力为负,拉应力为正)

图6 最大主应力等值线(单位:MPa)



(压应力为负,拉应力为正)

图7 最小主应力等值线(单位:MPa)

由图6~8可知,坡体最大主应力与最小主应力等值线形态与正常岸坡一致,无明显差别。剪应力

5 结 语

Ⅵ号变形体所在岸坡为倾内层状体斜坡,变形模式为典型的弯曲-拉裂变形(倾倒),其在演化过程中表现出了双重潜在破坏面的特征。其中浅层滑塌破坏主要与梁板弯曲、折裂及斜坡坡度较陡有关,而深层破坏是由最初的弯曲-拉裂变形转化为蠕滑-拉裂变形形成的,最终破坏方式为滑坡。根据该类变形破坏的地质历史过程分析,Ⅵ号变形体尚未进入后期的累进性破坏阶段,也即目前的变形破坏仅限于浅层滑塌,而深层潜在滑体仍将保持相当时间的稳定状态。

由于拟建电站规模为Ⅰ等大(1)型,Ⅵ号变形体的发展变化趋势对工程建设及工程竣工后的运行期影响较大,建议下一步对Ⅵ号变形体开展更深入的勘探研究,同时利用物理模拟手段进一步研究Ⅵ号变形体的成因机理及发展趋势,并开展变形体的应力应变监测工作。

参考文献:

- [1] 蔡国军,裴钻.反倾互层岩质边坡开挖物理模拟试验研究[J].水土保持研究,2007,14(5):121-128.
- [2] 左保成,陈从新,刘小巍,等.反倾岩质边坡破坏机理模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3505-3511.
- [3] 程东幸,刘大安,丁恩保,等.层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J].岩土工程学报,2005,27(11):1362-1366.
- [4] PRICHARD M A, SAVIGNY K W. Numerical modelling of toppling[J]. Can Geotech J, 1990, 27(6):823-834.
- [5] 汪小刚,张建红,赵毓芝,等.用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏[J].岩土工程学报,1996,18(5):14-21.
- [6] 宋彦辉,黄民奇,陈新建.班多水电站左岸Ⅰ号倾倒体破坏机制分析[J].水利水电科技进展,2007,27(5):50-52.
- [7] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.
- [8] 卢增木,左保成.反倾岩石边坡变形破坏试验及有限元分析[J].矿业研究与开发,2006,26(1):22-25.

(收稿日期:2008-04-01 编辑:方宇彤)

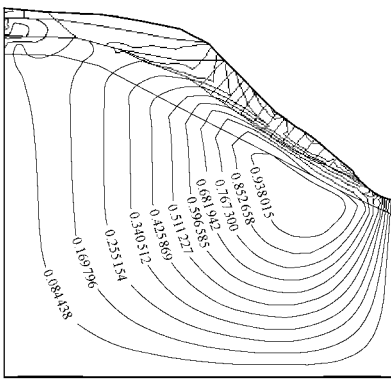
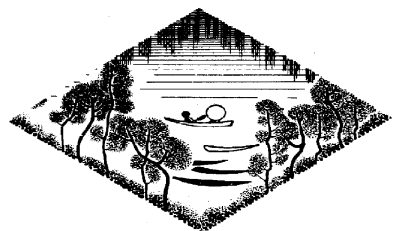


图8 剪应力等值线(单位:MPa)

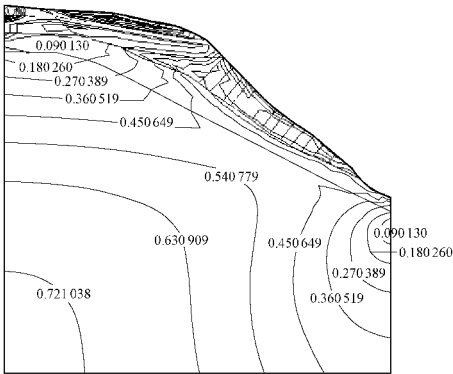


图9 破坏接近度等值线

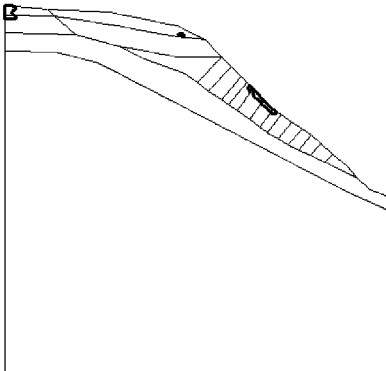


图10 破坏区域示意图

在倾倒松动体与正常弱风化岩体间及坡脚部位产生显著应力集中现象,量值在0.6~0.7MPa之间,但最大剪应力却出现在倾倒松动体以内的弱风化岩体内。

图9表明(计算应力与材料屈服强度的比值大于或等于1时发生破坏),岸坡表部破坏接近度较高,局部大于1,呈现破坏状态(图10表明了破坏的范围和位置),并且在倾倒松动体内,破坏接近度等值线基本与岸坡坡面平行,破坏接近度范围为0.7~1.0,表明岸坡倾倒松动岩体是潜在破坏的易发部位,而且越靠近坡体浅表部,破坏接近度越高,这也正是Ⅵ号变形体坡缘不断产生垮塌破坏的原因。