

文章编号: 0451-0712(2006)05-0135-05

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

呷爬滑坡稳定性的 3D-Sigma 数值模拟分析

张雪东¹, 陈剑平², 黄润秋³, 郭大华¹

(1. 中交公路规划设计院 北京市 100010; 2. 吉林大学建设工程学院 长春市 130026; 3. 成都理工大学 成都市 610059)

摘 要: 首先简单介绍了呷爬滑坡概况、形成机制和 3D-Sigma 有限元软件, 然后利用 3D-Sigma 软件对天然条件下呷爬滑坡的稳定性进行数值模拟研究。建立数值计算模型, 选取合理的计算参数, 计算得出相应的应力场图形, 经分析, 天然条件下呷爬滑坡存在局部破坏, 但整体是稳定的。这为进一步进行蓄水条件下稳定性的有效评价提供了理论依据。

关键词: 呷爬滑坡; 形成机制; 3D-Sigma; 稳定性

呷爬滑坡位于锦屏一级水电站的近坝库岸工程区内, 滑坡面积约为 0.45 km^2 , 滑坡残体体积约为 $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。如此规模巨大的滑坡体, 一旦失稳下滑, 不仅可导致河道的阻塞, 而且其下滑产生的涌浪也极有可能威胁坝体的安全。因此, 对该滑坡稳定性进行分析评价具有重要意义。

1 呷爬滑坡概况^[1]

呷爬滑坡位于锦屏一级水电站三滩坝址上游 9.2 km , 雅砻江右岸。雅砻江在该处河道较为顺直, 河流流向为 $N12^\circ E$ 。河谷较为宽阔, 左岸平缓, 河漫滩、阶地发育; 右岸为反向坡, 岸坡相对较陡, 坡度为 35° 。呷爬滑坡处岸坡岩层产状为 $N20^\circ E, SE \angle 40^\circ$, 岩性为三叠系杂谷脑组深灰—灰黑色变质粉砂质板岩夹变质细砂岩 (T_3^{1-3z})。

滑坡平面展布呈箕形, 主滑方向为 $N62^\circ W$, 其圈谷地貌保存完好。剪出口高程为 1655 m , 与枯水期河水位持平, 后缘高程为 2120 m , 前后缘高差为 465 m 。滑坡纵长约 900 m , 平均宽约 500 m , 面积约 0.45 km^2 。据钻孔揭露, 滑体最厚达 $60 \sim 100 \text{ m}$, 平均厚度约 60 m , 滑坡残体体积约 $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

滑坡表面可见 3 级平台, 在 1 级、2 级平台中发育 2 条纵向冲沟。其中: 一条位于滑坡轴线的北侧, 该沟短而浅, 主要发育于第 1 级平台中 (这里称之为 1 号沟); 另一条位于滑坡轴线的南侧, 该沟深而长, 目前第 2 级平台因其切割而破坏严重 (这里称之为 2

号沟)。

根据地表调查以及钻探 ($G1, G2$ 号孔) 揭露, 滑体主要由块碎石土, 以及变形的、未完全解体的“假基岩”所组成, 物质分层较为明显。其中, 块碎石土层厚 $6 \sim 26 \text{ m}$, V_p 值介于 $500 \sim 650 \text{ m/s}$ 之间, 块碎石成分为变质粉砂质板岩、泥岩及砾岩; “假基岩”层厚 $35 \sim 100 \text{ m}$, V_p 值介于 $1700 \sim 2400 \text{ m/s}$ 之间, 岩性主要为变质粉砂质板岩及变质细砂岩、砾岩。在滑坡前缘至中部, 滑体表层组成物质主要为块碎石土; 在滑坡中部至后缘, 滑体表层组成物质主要为含孤石及块石较多的块碎石土、未完全解体的“假基岩”。

主滑带, 除钻探孔揭露外, 在滑坡前缘及滑体内纵向冲沟内也有出露。主滑带中下部倾角约 25° , 上部达 $40^\circ \sim 55^\circ$, 前缘剪出口呈反翘状 (产状为 $N15^\circ E, SE \angle 22^\circ$)。滑带物质主要为灰黑色泥夹碎石, 碎石成分为炭质板岩、变质细砂岩等, 带内夹有大量石英颗粒。滑带土干燥时极为坚硬, 遇水后松软。滑带厚 $1 \sim 3 \text{ m}$, 局部达 8 m 。

呷爬滑坡复活迹象明显。根据调查, 在 2 号沟北侧的平台上, 部分临沟的房屋出现开裂, 裂缝大体与纵向冲沟平行, 系冲沟两侧滑体向沟内“土滑”所致。滑坡前缘马帮道, 也常常在雨季因表部土滑而破坏。这些都是滑坡局部复活的证据。此外, 滑坡还似乎有整体复活的趋势。据访问知, 1989 年暴雨后, 第 2、3 级平台内部及后缘曾出现过 3 条走向与主滑轴线近于垂直、延伸 100 余 m 的裂缝。其中位于第 3 级平台

的裂缝,据称当时深约 1 m、宽达 30 cm。

2 呷爬滑坡的形成机制分析

该滑坡发育于雅砻江右岸反向坡,滑体下部基岩为深灰—灰黑色粉砂质板岩,岩石较软弱,正常岩体产状为 $N10^{\circ}\sim 30^{\circ}E, SE\angle 40^{\circ}$,地表岩体产状则为 $N15^{\circ}\sim 25^{\circ}E, NW\angle 20^{\circ}\sim 30^{\circ}$,表明岩体已产生强烈变形,岩体松弛。在谷坡岩体重力作用下,岩体向临空面方向易产生倾倒变形,板岩岩质较软,容易产生弯曲变形,岩体越向地表,弯曲变形越大,随着倾倒变形的加剧,在最大弯曲部位,产生楔形拉裂缝,发生弯曲—拉裂变形^[2,3]。由于河谷下切及河水对岸坡前缘的冲刷,弯曲—拉裂变形进一步加剧,当岩体弯曲折断被裂隙贯穿,就使滑带产生滑动。

3 呷爬滑坡的稳定性分析

本文采用 3D-Sigma 方法对呷爬滑坡天然条件下的稳定性进行了数值模拟研究。

3.1 3D-Sigma 软件简介^[4]

在求解小变形过程力学问题时一般采用有限单元法,本课题采用日本软件公司开发的 3D-Sigma 有限元软件进行天然条件下现阶段滑坡的数值模拟。二维有限元分析软件 2D-Sigma 和三维有限元分析软件 3D-Sigma,采用了既容易理解又容易操作的基本概念和方法,将有限元的快速建模、网格的自动生成、分析结果的可视化及可操作性有机地结合起来,实现了有限元分析的高度自动化,从而使用户很简单地就能对问题进行有限元分析计算,如图 1 所示。

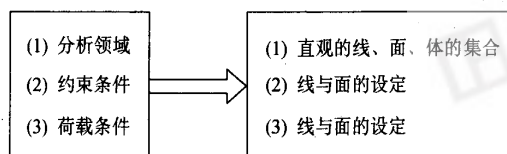


图 1 2D-Sigma、3D-Sigma 建模方法

3D-Sigma 主要分为前处理、计算和后处理 3 大功能块。

前处理通过定义点、线、面、体和群等对象来进行问题的几何模型定义,通过对分析区域的设定来进行材料参数和网格分割数的设定,设定约束条件和荷载条件,然后自动生成计算网格。该功能主要在二维窗口内完成,3D-Sigma 建模的思路是把三维问题转化为二维问题,即在二维窗口内定义问题的一

个剖面,然后把该剖面在第三维上进行拓展,从而建立三维模型。3D-Sigma 提供了新建群、编辑群 2 个二维窗口。二维窗口内提供了点、线、矩形、弧等图形元及其他一系列功能。由这些功能可以方便地定义出一个问题的二维剖面,编辑一个已经存在的剖面,并提供切换到三维窗口的功能。三维窗口提供了三维拓展、材料参数、荷载条件、边界条件设定等功能。在三维窗口中,提供了在三维水平上显示面、群、体的功能,以及显示、隐藏所选择体的功能,提供了切换到二维窗口的功能。3D-Sigma 提供了三维网格的自动生成功能。

3D-Sigma 的后处理除在二维水平上具有 2D-Sigma 的所有后处理功能外,还在三维水平上提供了这些功能。而且,还提供了只显示或隐藏所选择的体的部分结果的功能。

3D-Sigma 支持的材料模型主要有弹性、弹塑性 2 种。另外,系统也支持热应力分析和地震力分析模型。对于弹塑性模型,提供了 Tresc、Huber-Von Mises、Mohr-Coulomb、Druck-Prager 屈服准则。

3D-Sigma 提供了 20 节点六面体单元和 10 节点四面体单元、外壳单元、锚杆单元、梁单元等单元类型。

3D-Sigma 解方程组采用了先进行系数方阵预处理的 PCCG 法,使用 PC 机解大规模的课题成为可能,例如,曾用 3D-Sigma 在奔腾 233、128 M 内存的 PC 机解超过 40 000 节点的课题,时间只用了 20 多 min。

3.2 3D-Sigma 计算模型及参数

计算模型(图 2、图 3)范围,顺河方向(Z 轴方向,指向上游为正)宽为 950 m,即顺河方向包括整个滑坡的宽度;垂直河谷方向(X 轴方向,指向滑坡内为正)长为 1 040 m;模型最大高度(Y 轴方向,垂直向上为正)为 1 108 m(海拔为 2 308 m)。计算时仅考虑自重力的作用,不考虑构造应力场。因此,除坡面(临空面)外,将模型四周边界、底边界设置为单向约束边界^[5]。

在建立 3D-Sigma 计算模型时,根据呷爬滑坡地质结构、滑床和滑体岩土体的物理力学特性,将模型概化为 11 种材料,具体如下:滑床为三叠系杂谷组深灰—灰黑色的变质粉砂质板岩夹变质细砂岩(T_3^{2-3z});第四纪堆积物分为滑坡体 I(相对较老)、滑坡体 II(相对较新)、滑坡体 III(相对新),滑带 I(相对较老)、滑带 II(相对较新)、滑带 III(相对新),

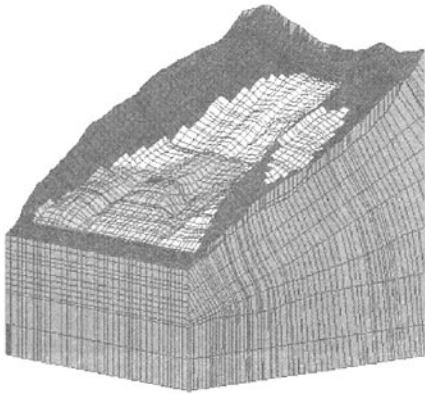


图2 呷爬滑坡 3D-Sigma 计算模型

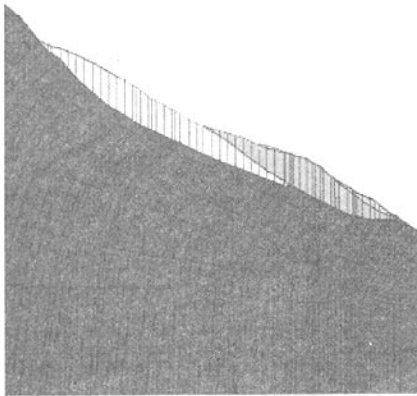


图3 呷爬滑坡 3D-Sigma 计算模型纵剖面

冲积物, 泥石流, 崩坡积物, 以及计算范围内的另一小滑坡体。滑床岩层产状, 滑坡体、滑带的形态及厚度均按勘测平、剖面图^[6]确定。

在 3D-Sigma 中, 上述各层所对应的组(Group)编号和各参数取值见表 1, 参数选取是依据《雅砻江锦屏一级水电站坝址选择研究报告》、《锦屏一级水电站预可行性研究报告》综合确定的^[1,2,7~11]。三维模型单元数为 27 900 个, 节点数为 123 018 个。

3.3 3D-Sigma 计算结果分析

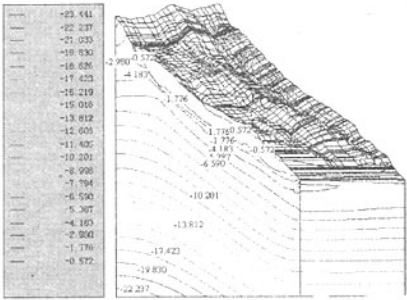
滑坡演化过程中, 认为滑床在顺河方向和横河方向无明显的水平运动(模型中即分别为 Z 轴和 X 轴方向), 计算仅考虑自重力作用, 因此除临空面外, 将模型底边界及 X 轴和 Z 轴方向边界均被约束^[12]。通过计算, 获得了与实际观测基本一致的结果。计算结果揭示, 呷爬滑坡在天然条件下应力分布有如下一些规律。

(1) 总体上, 滑体内的应力水平较低(图4、图5),

表1 计算模型中的各种介质力学参数

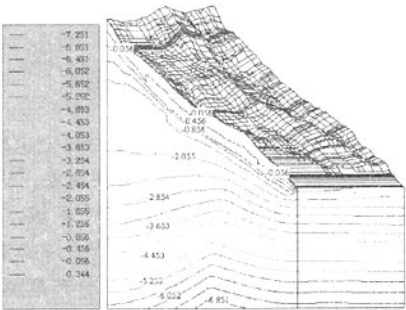
指标	E/MPa	μ	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{MN}/\text{m}^3)$	T/MPa
冲积物	1 200	0.32	0.04	30	0.022	0.04
T _{2-3s}	10 000	0.27	1	40	0.027	0.8
滑体 I	1 600	0.32	0.06	34	0.025	0.05
滑体 II	1 500	0.32	0.06	32	0.025	0.05
滑体 III	1 400	0.32	0.06	30	0.025	0.05
崩坡积	1 500	0.32	0.06	32	0.025	0.05
另一滑坡	1 600	0.32	0.06	34	0.025	0.05
滑带 I	700	0.35	0.005	26	0.020	0.005
滑带 II	600	0.35	0.005	24	0.020	0.005
滑带 III	500	0.35	0.005	22	0.020	0.005
泥石流	1200	0.32	0.04	30	0.022	0.04

最大主应力矢量近于直立。由坡面向深部, 主应力量值逐渐增大, 接近滑带处达到最大, 主应力等值线(面)大体与坡面平行。而且, 由于不同部位(除周边地带外)滑体厚度比较接近, 因此, 不同部位接近滑带处的主应力量值差异不大。值得注意的是, 在 3 个(滑坡)平台的后缘, σ_3 并未出现拉应力, 反映出滑坡在现状条件下整体基本是稳定的。



单位: MPa

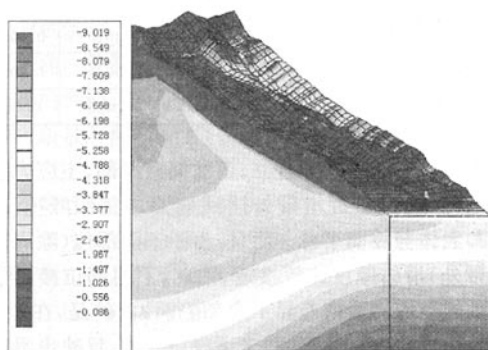
图4 I-I 纵剖面 σ_1 等值线



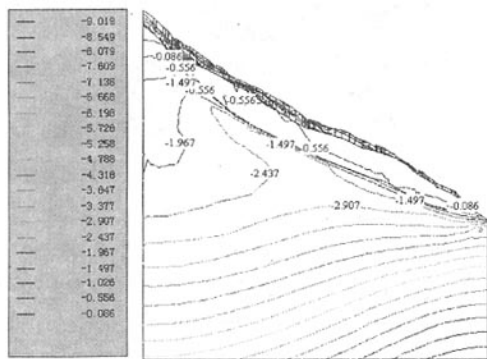
单位: MPa

图5 I-I 纵剖面 σ_3 等值线

(2)图6、图7为 σ_x 色标图、等值线图。总体上看,滑体内 σ_x 水平较低,但分布较不均匀。平面上,大体可以滑坡I后缘为界,该界线高程以下的滑体范围内, σ_x 表现出浅部低、深部高的特点;该界线高程以上(即第3级平台及其前缘斜坡所对应的)的滑体范围内,表现出后缘低(<0.55 MPa)、前缘高(0.55~1.03 MPa)的特点,这一范围内的剪应力分布也表现出类似的特征(见后),这可能与第3级平台后缘附近滑面较陡有关。



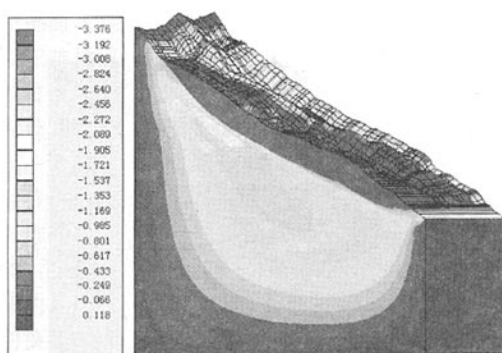
单位:MPa

图6 I—I纵剖面 σ_x 色标

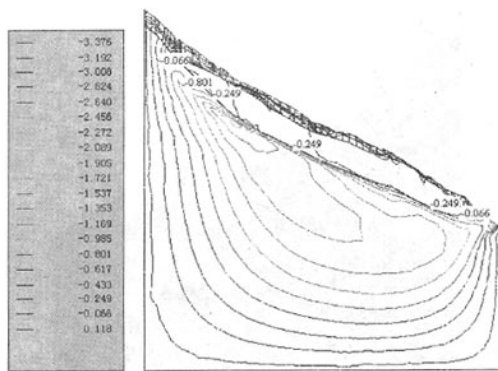
单位:MPa

图7 I—I纵剖面 σ_x 等值线

(3)滑体内的 τ_{xy} 水平也比较低,总体上也比较均匀,但也确实存在一定程度的 τ_{xy} 集中现象。从图8、图9可以看出, τ_{xy} 集中主要分布于2个区域:一是从第2级平台后缘到第3级平台中部所对应的滑体部分;二是滑坡前缘剪出口附近。前者分布范围较大,后者范围很小。在这2个范围内, $\tau_{xy}=0.249\sim 0.433$ MPa;这2个范围以外, $\tau_{xy}<0.249$ MPa。



单位:MPa

图8 I—I纵剖面 τ_{xy} 色标

单位:MPa

图9 I—I纵剖面 τ_{xy} 等值线

4 结语

综上所述,天然状态下滑坡应力场的模拟结果显示,天然条件下呷爬滑坡整体是稳定的。值得重视的是,滑体内局部出现了一定程度的剪应力集中现象,存在局部失稳破坏的可能。

在天然状态下,呷爬滑坡整体处于稳定状态,但在水库蓄水之后,由于滑体部分浸泡在库水中,将会恶化滑坡体的稳定条件,存在失稳下滑的可能性。一旦大范围失稳下滑,将对锦屏一级水电站构成巨大威胁。因此,对呷爬滑坡在水库大坝施工及运营期间的稳定性应引起足够重视。建议进一步做好蓄水条件下滑坡稳定性的研究工作,同时,要及时采取必要的防护措施,以解除对工程的危害。

参考文献:

- [1] 张雪东,等. 呷爬滑坡稳定性的FLAC-3D数值模拟

- 分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增1 刊).
- [2] 张倬元, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
- [3] 张雪东, 等. 用 FLAC-3D 分析岷江锦屏水电站重大工程地质问题的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1).
- [4] 张雪东. 岷江锦屏水电站重大工程地质问题的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [5] 黄润秋, 等. 地质灾害过程模拟和过程控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] 王士天, 等. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题的研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998.
- [7] 《工程地质手册》编写组. 工程地质手册[M]. 中国建筑出版社, 1992.
- [8] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [9] 李先炜. 岩体力学性质[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [10] 铁道部第一勘测设计院. 工程地质试验手册(修订版)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.
- [11] 水利电力部水利水电规划设计院, 等. 水利水电工程地质手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [12] 徐佩华. 锦屏 I 级水电站近坝高陡反倾岸坡稳定性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2003.

Numerical Simulation Analysis of Stability of Gapa Landslide Used by 3D-Sigma

ZHANG Xue-dong¹, CHEN Jian-ping², HUANG Run-qiu³, GUO Da-hua¹

(1. China Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, INC., Beijing 100010, China,

2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China,

3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In this paper, general situation of Xiapa landslide is introduced firstly and then its sliding mechanism analyzed. On the basis of the mentioned above, the stability of Xiapa landslide is studied by means of 3D-Sigma numerical simulation under natural situation. Building numerical calculation model and choosing rational calculation parameters, then figures of corresponding stress field are obtained through simulation. Furthermore, calculation production figures are synthetically analyzed, then the stability of landslide under natural situation is evaluated. At present, the results of analysis indicate that although there is local failure in Xiapa landslide, the whole slope is stable. Finally, an essential propose is given to effectively evaluate stability of the landslide under natural impounding conditions.

Key words: Xiapa landslide; mechanism; 3D-Sigma; stability