

涪陵区植物油厂滑坡有限元强度折减分析*

安光明^{1,2}, 刘大安^{1,2}, 郑书彦³, 李滨³

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院 工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 3. 长安大学 地测学院, 西安 710054)

摘要:从滑坡变形监测规律出发结合有限元强度折减法,对重庆市涪陵区植物油厂滑坡建立了一种有限元特征点位移监测分析法,研究该滑坡的变形破坏过程。结果表明,植物油厂滑坡属于牵引式滑坡,处于顺层蠕滑初始阶段,滑坡中前部变形比较强烈;从位移与折减系数的关系曲线得出滑坡在达到极限平衡状态之前,存在一个明显的变形加速过程;通过有限元强度折减法和不平衡推力法的综合分析,得滑坡整体稳定系数 $F=1.15$,中后部局部剪出体稳定系数为 $F_r=1.20$,滑坡安全储备不足。

关键词:破坏机制;数值模拟;有限元强度折减法;稳定系数

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)01-0175-04

Analysis on Stability of Vegetable Oil Plant Landslide by FEM Strength Reduction Method

AN Guang-ming^{1,2}, LIU Da-an^{1,2}, ZHENG Shu-yan³, LI Bin³

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, CAS, Beijing 100029, China; 3. College of Geology Engineering and Geometrics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to landslide deformation rule and strength reduction method, a finite element feature point analysis method is built. Using this method to study vegetable oil plant landslide deformation and damage process, the conclusions are reached as follow: Vegetable oil plant landslide belonging to Traction landslide, in the initial stage of bedding slipping; the front part of landslide deformation relatively large; the landslide reached the limits of balance. From the curve of $\Delta X / \Delta F_{sr}$ by strength reduction method, there is a significant deformation accelerated process, the safety factor of the overall landslide is $F=1.15$, the safety factor of dangerous rear local landslide is $F_r=1.20$.

Key words: formation mechanics; numerical simulation; Finite Element Method strength reduction method; safety factor

在三峡库区滑坡是主要的地质灾害之一,库区自然地质条件复杂,暴雨、洪水频繁,是我国地质灾害的多发区和重灾区^[1]。重庆市植物油厂滑坡位于三峡库区长江支流阁水溪右岸斜坡上,滑坡中前部已有较强烈变形,存在的安全隐患严重。本文在研究植物油厂滑坡的破坏特征和影响因素基础上^[2],采用有限元强度折减法对滑坡进行了稳定性分析。有限元法强度折减法随着计算机技术的发展和有限元算法的改进,正成为边坡稳定分析研究的新趋势^[3-6],国内外的许多专家学者等都对此做了详细的研究,尽管方法的

具体细节各有不同,但是结果均表明,强度折减有限元法能得到与极限平衡法非常接近的安全系数,并且具有取得滑坡内部应力应变状态和模拟滑坡的失稳过程及其滑移面形状的优点,为滑坡发展趋势预测和工程治理提供了更为科学合理的依据。本次计算采用大型有限元软件 ADINA 8.5,对植物油厂滑坡进行了非线性有限元数值分析。

1 滑坡工程地质特征

植物油厂滑坡位于阁水溪右岸斜坡,为土质斜

* 收稿日期:2008-07-25

基金项目:国家自然科学基金重大项目(90714007);国家自然科学基金(40472145)

作者简介:安光明(1981-),男,山东人,博士生,主要从事地质工程数值模拟与三维建模方面的工作。E-mail:anguangming81@163.com

坡,斜坡总体坡向北。该滑坡北侧坡脚原始地貌因修建阁水溪排洪暗渠而改变,对原沟谷已进行了部分回填,在斜坡前缘坡脚存在宽 10 m,深 4 m 的沟槽。斜坡中上部地形较陡坡角为 15°~ 22°,斜坡下部地形平缓坡角 5°~ 7°,剖面图见图 1。

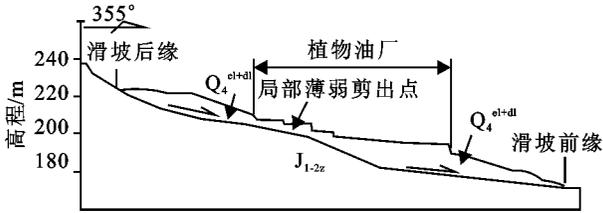


图 1 植物油厂滑坡结构剖面图

1.1 地层岩性

该滑坡地层从上到下依次为: (1) 第四系全新统滑坡堆积层为粉质黏土,褐黄色,可塑-硬塑状,厚约 2~ 9 m; (2) 第四系全新统残坡积层为粉质黏土,褐黄色,可塑-硬塑状,厚约 2~ 4 m; (3) 侏罗系中下统泥岩,紫红色,泥质结构,薄层-中厚层状构造,局部夹砂质条带,强风化层岩芯破碎,厚约 1 m,中风化层岩体较完整,岩体中裂隙较发育; (4) 侏罗纪下统砂岩,灰绿色,一般为粉砂岩或细砂岩,薄-中厚层状,钻孔中揭露的强风化带,岩芯破碎,岩体中裂隙较发育,少许呈短柱状。

1.2 滑坡变形特征

经现场调研发现,该滑坡具有以下几个明显的变形破坏特征: (1) 滑坡以中前部变形破坏最为明显,滑坡变形破坏现象主要表现为植物油厂厂房开裂,厂房内部抗滑桩附近地面出现鼓丘和厂区重力挡墙沿主滑方向推移。(2) 裂缝的发展具有规律性。从地面裂缝可以发现各裂缝走向相互间基本平行,并与滑坡主滑方向垂直。

1.3 滑坡稳定性影响因素与破坏机制分析

大气降水是诱发滑坡形成的主要因素之一。5-6月降雨量最多,长期强降雨,造成滑体容重增加和地下水位上升,地下水的存在可对边坡产生静水压力和动水压力。

人类工程活动是本区滑坡产生的主要诱发因素,其表现在如下几个方面: 开挖斜坡岩土体产生临空面。滑坡前缘修建排洪暗渠时开挖坡脚,形成 5~ 8 m 的临空面,从而致使滑坡中前部强烈变形; 城市改造和道路修建加大了阁水溪地表汇流量,加速了坡前沟谷的下切; 周围地区劈山爆破引起的震动效应促进了滑坡的蠕变。

根据上述岩土体结构及稳定性影响因素分析,认为该滑坡处于顺层蠕变的初始阶段。滑坡在自重和坡前阁水溪临空面的影响下,滑坡表层残破积土

体将沿下层泥岩向坡前阁水溪产生滑移,目前滑坡变形以中部地面和房屋拉张裂,重力挡墙向下滑移和中前缘土体的蠕滑为主。从现场调查和分析判断该滑坡破坏模式为牵引式滑坡。

2 滑坡变形破坏机制的有限元折减法分析

2.1 有限元折减法和折减法判据的选择

采用有限元强度折减法分析边坡稳定性时所得到的安全系数在一定程度上依赖于所采用的失稳评判标准,判断边坡失稳破坏的判据通常有 3 种^[7],从边(滑)坡的位移监测最可靠和最直观的监测方法的成功经验出发,本文采用边坡特征点的位移与折减系数的关系曲线的突变^[8]作为植物油厂滑坡失稳的判据。

2.2 有限元计算模型的建立

本次计算采用的软件大型商业有限元软件 ADINA 8.5 版,按照平面应变问题建立模型,岩土材料采用二维实体平面九节点高阶四边形单元进行模拟。计算取滑坡主剖面作为计算剖面,模型是建立在 Y-Z 平面里,模型上部为自由边界,左右两侧水平约束,底边固定约束;单元网格按照估计出现高应力梯度的滑带附近采用细网格,而对于低应力梯度和离滑体较远的地方应用粗网格,相应的网格及相关约束条件如图 2 所示。

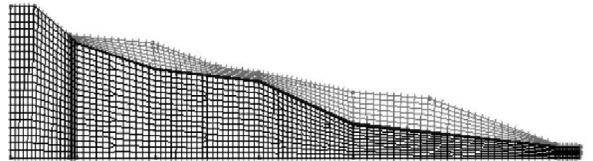


图 2 网格划分图

数值计算材料采用莫尔-库仑理想弹塑性模型材料,屈服准则为广义米塞斯准则,由于莫尔-库仑材料模型是理想弹塑性模型,容易发生塑性流动,在数值计算时存在不容易收敛的特性,所以在数值模拟中采用位移的范数作为收敛条件,收敛容许误差为 0.01。非线性分析采用 Full Newton-Raphson 方法对该滑坡进行大位移非线性分析。

滑坡计算参数取值如下所示:

滑坡部位	黏聚力 C/ kPa	摩擦角 φ/(°)	重度 γ/ (kN · m ⁻³)
滑体	29.5	17.8	20.2
滑带	19.4	10.4	19.8
滑床	500.0	35.0	24.0

2.3 有限元数值模拟分析

在总结前人监测经验的基础上,以位移监测是

最可靠的变形监测方法为出发点, 本文建立有限元特征点位移监测分析法, 其具体过程如下: 首先从滑坡变形监测规律出发, 在滑坡位移云中找出滑坡的变形特征点并进行位移监测, 特征点一般选取位移最大节点和位移突变点附近; 然后对特征点采用水平(垂直)位移增量和强度折减系数增量之比 $\Delta X / \Delta F_{sr}$ 与强度折减系数 ΔF_{sr} 间的变化趋势作为判断边坡破坏的标准, 进行边坡有限元折减分析, 最终求出边坡的稳定系数。

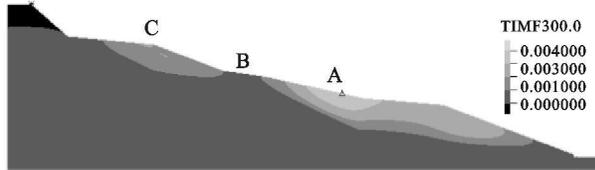


图 3 滑坡水平位移云图

图 3 为植物油厂滑坡水平位移图, 因为数值模型是建立在 $Y-Z$ 平面里, 所以 $Y-DISPLACEMENT$ 指的是水平方向位移的大小。从水平位移图中可以看到: 在滑坡中前部产生的水平位移最大, 然而中前部是植物油厂厂房分布的密集区, 此存在部分厂房开裂和地面破裂现象, 现实变形现象与数值模拟结果十分吻合。

本文选择的折减判据为: 以边坡特征点的位移与折减系数的关系曲线的突变为边坡失稳判据, 特征点的选取要能够明确表达出位移的变化, 所以在中前部选择最大位移附近的节点 $NODE=6235$ 点记为点 A, 作为中前部滑坡的特征点, 监测滑坡中前部在不同折减系数下的变形趋势。为防止滑坡后部从局部薄弱带 B 点剪出, 在后部最大位移点附近选择 $NODE=5705$ 记为点 C (图 3), 作为滑坡后部的监测点, 监测滑坡后部在不同折减系数下的变形趋势。

在分析水平位移图位移变化规律和选择特征点的基础上, 对天然工况下的植物油厂滑坡在进行有限元折减分析, 求得滑坡的塑性区发展变化趋势图(图 4)。根据数值模拟结果可知, 在 $F_{sr}=1.00$ 时, 滑坡中部滑带已经开始有塑性区的扩张趋势, 中前部部分滑带土体出现了破坏状态。随着折减系数的增大, 当 $F_{sr}=1.15$ 时, 可以看到滑带的应力基本都达到了 M-C 屈服状态, 滑坡已处平衡极限状态。当 $F_{sr}=1.40$ 时, 滑坡中前部滑带和部分滑体土内应力达到 M-C 屈服应力, 滑坡塑性区连通, 滑坡已经破坏。

从特征点的位移与折减系数的关系曲线可以看出, 滑坡中前部监测点 A (图 3) 的位移变化见图 5-(a), 当折减系数 $F_{sr} \leq 1.05$ 时, 滑坡保持基本稳定状态, 变形速率很小且保持稳定; 当折减系数 $F_{sr} =$

$1.05 \rightarrow F_{sr} = 1.15$ 区间时, 滑坡中前部位移变化速率跳跃了一个小台阶, 变化速率变化仍然不是很快, 但是变形速率明显快于 $F_{sr} = 1.05$ 之前, 此阶段为滑坡变形的加速阶段, 稳定性明显下降, 安全隐患增加; 当折减系数 $F_{sr} \geq 1.15$ 时, 滑坡位移速率开始急剧增加, 塑性区贯通, 滑坡失稳破坏。从监测点 A 的位移与折减系数的关系曲线可以明显的看出 $F_{sr} = 1.15$ 是中前部滑坡破坏的临界状态, 即 $F_{sr} = 1.15$ 是滑坡中前部的稳定系数。从图 5(b) 可以得到植物油厂上级滑坡的稳定系数 $F_{sr} = 1.20$, 即当折减系数 $F_{sr} \geq 1.20$ 时, 上级滑坡位移速率急剧增加, 滑坡失稳破坏。

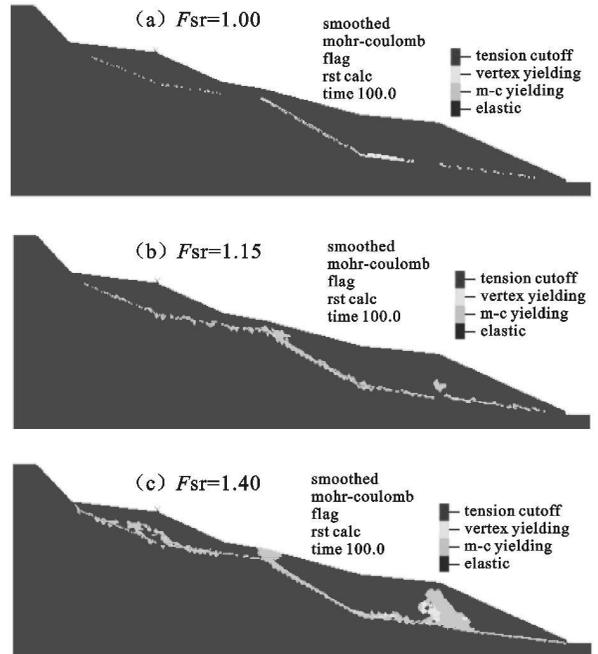


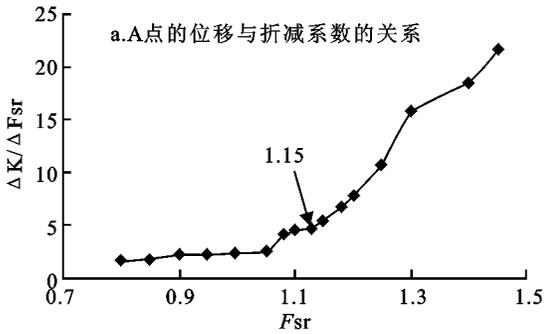
图 4 不同折减系数下的塑性区的破坏状态

本文也采用极限平衡法中的不平衡推力法对该滑坡的稳定系数进行了计算, 所采用的材料参数值与有限元分析的材料参数完全相同, 所得稳定系数为 $F = 1.151$, 上部薄弱带稳定系数为 $F_{\pm} = 1.154$, 与有限元折减法计算结果 $F_{sr} = 1.15$, $F_{sr} = 1.20$ 比较吻合, 误差分别为 0.9% 和 3.3%。但是有限元折减法提供了滑坡的应力、应变、位移以及塑性区分布等, 为滑坡发展趋势预测和工程治理提供了更为科学合理的依据。

3 结论与讨论

重庆市涪陵区植物油厂滑坡是土质滑坡, 中后部存在局部剪出带, 破坏机制为顺层滑动的牵引式滑坡, 破坏变形特征主要以地面开裂和房屋厂房拉裂破坏为主。以重庆植物油厂滑坡为实例, 建立了有限元特征点位移监测分析法并得出以下结论: 有

限元计算位移图和特征点的位移与折减系数的关系曲线可以看出, 滑坡首先是中前部产生大尺度位移, 随强度折减系数的增大在存在 $F_{sr}=1.05 \rightarrow F_{sr}=$



1.15 区间存在明显的变形加速阶段, 当 $F_{sr}=1.15$ 时滑坡处于极限平衡状态, 当 $F_{sr} \geq 1.15$ 时滑坡中前部率先进入失稳破坏状态。

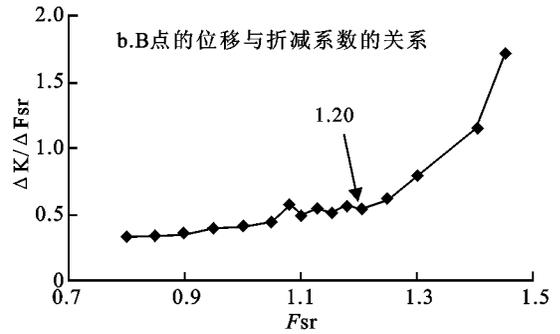


图 5 位移与折减系数的关系曲线

通过比较, 有限元折减系数法和不平衡推力法的计算结果十分相近, 两者误差仅为 0.9% 和 3.3%, 但是有限元强度折减法提供了滑坡的应力、应变、位移以及塑性区分布等, 为滑坡发展趋势预测和工程治理提供了更为科学合理的依据。

参考文献:

[1] 殷跃平. 三峡地质灾害与防治[J]. 科学中国人, 2002 (2): 37-39.
 [2] 安光明, 毛彦龙, 李滨, 等. 重庆市涪陵区植物油厂滑坡成因机制分析与稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 593-598.

[3] Griffith D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
 [4] 连锁营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 408-412.
 [5] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57-61.
 [6] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
 [7] 李红, 宫必宁, 陈琰. 有限元强度折减法边坡失稳判据[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(1): 79-82.
 [8] 徐卫亚, 肖武. 基于强度折减和重度增加的边坡破坏判据研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 505-511.

(上接第 174 页)

(5) 压力饱水带。位于地下水排泄口以下, 当地主要河流排泄基准面影响带以上的含水层。受当地主要河流侵蚀基准面控制的岩溶水循环带, 岩溶发育不如浅饱水带, 但沿构造破碎带和各种结构面(包括古风化壳, 古岩溶等), 岩溶发育较深较强, 由于水头高, 压力大, 对隧道涌水威胁仍然很大。河谷地段岩溶地下水水力坡度很大, 水化学类型为 HCO_3-Ca 型淡水或 SO_4-Ca 型微盐水。

(6) 深部缓流带。隧道平面以下地下热水埋藏带为深部缓流带。因隧道开拓减压, 而由下至上涌入隧道。如果不是隧道的开拓, 该处地下水近于静止。因此, 虽在隧洞中揭露地下热水, 但在该区就近地表未发现地下热水。

参考文献:

[1] 陈绍林, 李茂竹, 陈忠恕, 等. 四川广(安)-渝(重庆)高

速公路华蓥山隧道岩溶突水的研究与整治[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1344-1349.

[2] 邓英尔, 刘慈群, 黄润秋, 等. 高等渗流理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 [3] 王大纯, 张人权, 史毅红, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
 [4] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
 [5] 李海华, 程温莹, 罗丽, 等. 水化学分析方法在水电站调压室渗水途径调查中的应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 259-262.
 [6] 沈照理, 朱宛华. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
 [7] 史维浚, 孙占学. 应用水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.
 [8] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 213-218.