

# 考虑水位变动影响的粘土质缓坡稳定性分析

肖国峰<sup>1</sup>, 陈从新<sup>1</sup>, 林 涛<sup>2</sup>, 刘才华<sup>1</sup>

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2.武汉市武昌区建设局, 湖北 武汉 430061)

**摘 要:** 介绍了镇江市黄山粘土质滑坡的工程地质特征及滑动过程; 分析了该滑坡的变形破坏机制; 运用基于强度折减技术的有限差分方法对该滑坡进行数值仿真模拟, 较好地模拟出现场实际的滑坡特征, 并分析了水位变动影响下的粘土质缓坡稳定性。研究表明, 采用降水措施可以显著提高粘土质缓坡的整体稳定性。

**关 键 词:** 工程地质; 边坡稳定性; 水位变动; 粘土质缓坡

**中图分类号:** TU 416.1<sup>+</sup>4      **文献标识码:** A

## Stability analysis of clayey gentle slopes considering variation of water level

XIAO Guo-feng<sup>1</sup>, CHEN Cong-xin<sup>1</sup>, LIN Tao<sup>2</sup>, LIU Cai-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Administrative Bureau of Wuchang District, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Firstly, the paper introduces engineering geological condition and process of sliding of clayey gentle slope of Huangshan in Zhengjiang. Secondly, deformation and sliding mechanism of the landslide are analyzed. Furthermore, numerical simulation by means of finite difference method and strength reduction technique is implemented; and the result corresponds exactly to the field properties of the landslide. The clayey gentle slope stability is also analyzed considering variation of water level. The result indicates that usage of water drainage measure can improve notably stability of the slope.

**Key words:** engineering geology; slope stability; variation of water level; clay-gentle slope

## 1 引 言

在实际工程的边坡设计过程中, 边坡稳定性分析均采用极限平衡法进行计算。极限平衡法的计算依赖于条分方法, 各种条分方法都对条块底法向力的作用点以及条间推力的方向或作用线作了不同的假定<sup>[1]</sup>。当考虑边坡中水的作用情况下进行支挡结构的推力计算时, 极限平衡法的计算误差较大, 该误差随坡体稳定系数的增大而减小, 随安全系数的增大而增大<sup>[2]</sup>。

与此相比, 数值分析方法具有许多独特的优势, 考虑了应力、变形、平衡及本构方程可以得到极限状态下的失效形式, 了解边坡强度的恶化而呈现出的渐进失稳过程, 以考虑不同处治措施对边坡最终安全度的影响等<sup>[3, 4]</sup>。Bowson, Roth<sup>[5]</sup>等利用强度折减技术进行边坡稳定性分析, 提供了一个安

全系数。文[6]应用强度折减技术研究开挖边坡稳定性, 指出此项技术的广泛的适用性及良好的应用前景。Itasca Consulting Group, Inc.把强度折减技术应用其有限差分程序中, 编制了FLAC/Slope软件, 计算边坡稳定性分析的安全系数。

文[7]基于临界状态土力学理论, 阐明了在水位变动情况下边坡失稳的主要原因是由于其内部超孔隙水压力增加, 土体有效应力(或抗剪强度)降低的结果。在固结作用下孔隙水压力的缓慢消散引起土体的变形, 此类行为包含了两种力学机制: 其一, 孔隙水压力的变动引起有效应力的变化, 有效应力的变化影响土体的响应, 例如有效应力的降低可能降低土体的塑性变形值; 其二, 伴随着孔隙水压力的变动, 流体的力学量会产生改变。

本文对镇江市黄山滑坡进行变形机理分析, 运

收稿日期: 2003-11-18      修改稿收到日期: 2004-06-14

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(No.50239070); 国家重点基础研究发展规划项目(No.2002CB412704); 中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基金(No.110217)。

作者简介: 肖国峰, 男, 1975年生, 助理研究员, 主要从事边坡, 勘察, 设计研究工作。E-mail: xiaoguofengcn@sina.com

用 FLAC/Slope 软件对镇江市黄山滑坡一典型剖面进行数值计算, 研究坡体中水位变动情况下的边坡稳定性, 得出了采用降水措施可以显著地提高边坡整体稳定性的结论。

## 2 工程概况及工程地质特征

黄山滑坡位于镇江市黄山北坡, 坡脚紧接南徐景观大道。在 2003 年 7 月 4 日至 6 日几场大雨过后坡体出现滑动。滑坡体上部、两侧、下部均出现高度不等的滑坡台坎, 并在水力作用下不时蠕动下滑, 对南徐大道的安全和景观影响极大。滑坡体的滑动方向垂直于南徐大道的轴线, 宽度为 480.0 m, 纵剖面最长达 95.8 m, 滑体厚为 1.6~4.2 m, 总方量约 5.6 万  $m^3$ ; 坡顶高程 16.7~22.0 m, 坡底高程 10.1 m, 总体坡角为  $11^\circ$ ; 坡体水位在坡脚处基本与地表齐平, 在坡体上部与地表距离约 1.5~2.0 m。土层分布及物理力学指标见表 1。

表 1 地层分布及物理力学指标表

Table 1 Strata distribution and their mechanical parameters

层号	岩土名称	含水量 $W$ / %	重度 $\gamma$ / $kN \cdot m^{-3}$	孔隙比 $e$	粘聚力 $c_k$ / MPa	内摩擦角 $\phi_k$ / ( $^\circ$ )
①	粉质粘土	25.9	19.3	0.787	37.3	14.4
②	碎石土	21.8	20.0	0.668	39.7	13.7
③	粉质粘土	22.5	19.9	0.676	59.5	14.1
④	泥质页岩		26.3		100.0	30.0

## 3 滑坡机制分析

### 3.1 滑面确定

地勘报告揭示, 滑体主要为粉质粘土层①, 滑面为该层与第②层的分层界面。在滑坡体前缘、后缘, 滑动破坏面发育层①土体内部。

### 3.2 斜坡变形破坏过程分析

黄山段滑坡为具胀缩性的粘土斜坡, 由于坡面覆盖层被清除, 且未采取保护措施, 发育深度不等的网状裂缝。降水沿之渗入土中, 基质吸力的下降使表层土崩解、软化而呈塑性, 顺坡向下缓慢蠕滑(俗称土爬)。随着蠕滑的发展, 坡面下沉, 拉裂面向深处扩展, 地表水沿拉裂面渗入坡体, 从而又促进蠕滑的发展, 削弱了土体的抗剪强度, 导致滑坡。

### 3.3 斜坡变形破坏的触发因素及触发机制

黄山段滑坡的触发因素为长时间的暴雨。水的入渗直接降低了土体的基质吸力, 导致土质抗剪强度降低; 再者, 暴雨引起坡体内孔隙水压力剧变, 使地下水位急剧升高, 土体中孔隙水压力猛增, 使

有效应力大幅下降。土体在后缘拉裂缝中充水的静水压力和沿滑移面孔隙水压力的联合作用下, 斜坡即沿该面下滑。基质吸力是土质边坡稳定性的决定因素, 有效应力降低的幅度是滑坡速度的决定性因素之一。

### 3.4 滑体安全系数的确定

边坡失稳后, 滑落体的运动过程是一个释能过程。随着滑体的解体, 孔隙水压力的消散, 抗滑能力回升而使滑体制动。依据工程类比经验, 黄山段滑坡残体也可具有较高的整体稳定性。如果不考虑降雨等因素影响, 现阶段其安全系数应在 1.10 左右。

## 4 滑坡发生后斜坡变形分析

滑坡发生后边坡变形主要蠕滑为主。在滑体中部及后缘, 地下水位距地表一般在 1.0 m 以内, 在滑体前缘及南徐大道人行道附近, 地下水位基本与地表齐平。说明现阶段滑坡体下部基本处于饱水状态, 表层土在地下水无法排泄的情况下继续呈现塑性流动, 顺坡向下缓慢滑动, 在坡脚处滑出。从而使工程人员在屡次清理坡角后, 仍然有土体滑出。

## 5 数值模拟

有限元法始终只能作为极限平衡法的补充和优化设计的手段而无法取而代之, 其根本在于有限元法本身也存在一定的局限性, 如岩土本构模型的复杂性、参数的不确定性、离散网格的近似性和实际操作的难度等<sup>[7]</sup>。所以本节在建模完成后, 将计算结果同现场实际情况进行对比, 验证了模型的合理性, 然后, 才对降水措施进行稳定性计算, 保证了计算结果的可信度。

### 5.1 计算模型

滑坡体物质均为第①层粉质粘土, 第②层碎石土虽在全剖面分布, 其厚度仅在 0.5~0.8 m 之间, 第③层粉质粘土则分布于边坡下缘, 厚度小于 0.5 m, 在边坡中部尖灭。由于其厚度极薄, 在网格剖分难度影响其合理性。本文在模型简化过程中将其并入第④层泥质页岩中(图 1)。

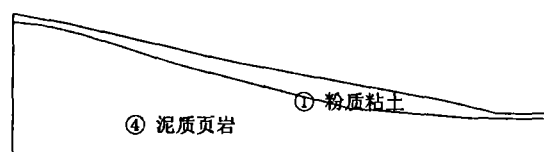


图 1 模型的土层概化

Fig.1 Stratum simplity of mdelling

采用 FLAC/Slope 程序自动进行网格划分, 横向单元数为 70 个, 保持第①层与第④层的层间界面不动(如图 2 示)。采用理想弹塑性体的本构模型, 满足 Mohr-Coulomb 屈服准则。参数选取见表 1。

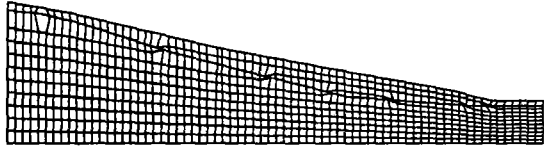


图 2 有限差分的网格划分  
Fig. 2 Mesh plotting for finite difference

表 2 岩土体的力学参数

层号	岩土名称	天然重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	饱和重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$c$ / $\text{kPa}$	$\phi$ / $(^\circ)$
①	粉质粘土	19.3	20.4	6.6	10
④	泥质页岩	26.3	26.5	100	30

## 5.2 计算工况

对边坡稳定性进行计算分 3 种情况(如图 3 所示), 工况 I: 正常水位情况下, 根据勘察时现场实测水位; 工况 II: 考虑暴雨情况下, 坡体基本饱水; 工况 III: 考虑在坡脚采用降水措施使坡脚水位降低 1~2 m。

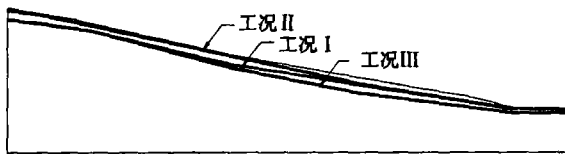


图 3 各计算工况的坡体水位图  
Fig. 3 Water levels of different working conditions

## 5.3 计算结果分析

计算结果(见图 4 所示)得出了 3 种工况条件下的安全系数及最大剪切应变率的等色图, 反映出边坡变形规律及剪切破坏面的发展规律:

(1) 以最大剪切应变率沿坡体的贯通面(带)来定义滑动破坏面(带), 从等色图中可以明确地确定滑面的位置。3 种工况计算的滑动破坏面基本相同, 且与现场实测相吻合。沿滑面的最大剪切应变率, 工况 II 最高, 工况 III 最低, 并直接决定了边坡的安全系数。

(2) 抛开剪切应变率的数值, 3 种工况的等色图存在相似性, 点 A, B, C 出现正向台坎, 而点 D, E, F 出现反向台坎。考虑到力学理论的变形协调方程, 在自然边坡体中土体的变形在点 A, B, C 处将产生拉张裂隙, 在点 D, E, F 处土体的变形将产生

挤压。这种变形反映到边坡表面则体现为坡面上部土体的拉张裂隙、塌陷台坎及坡面下部土体的上隆。黄山段滑坡在滑动过程中的实际变形特征与此相吻合。

(3) 与经验分析的结果相当, 工况 I 的安全系数为 1.08, 符合当前边坡稳定性的现状。工况 II 的安全系数为 0.96, 表明边坡在基本饱水状态下处于非稳定状态, 考虑一定外力的触发作用, 数值计算很好地模拟了边坡滑动破坏的发生。工况 III 的安全系数为 1.22, 说明在适当降低坡体水位情况下, 边坡稳定性得到了明显的加强。

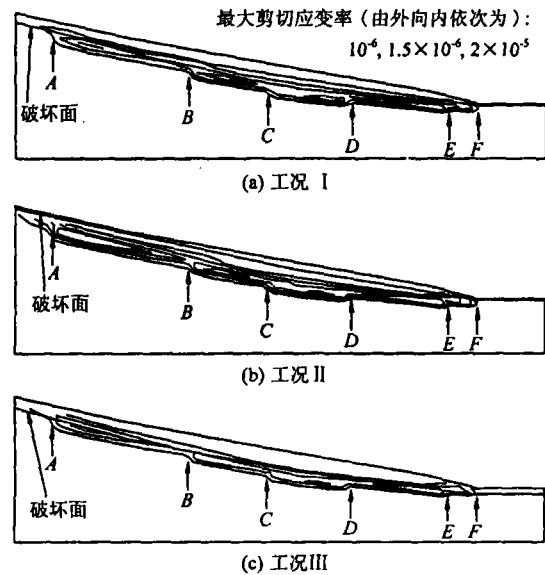


图 4 不同工况的计算结果图  
Fig. 4 Calculation result of different working conditions

## 6 结论

(1) 在现场工程地质特征、水文地质情况、地表变形基础上的机制分析法仍然是边坡稳定性评价的主要方法, 特别是在边坡岩土体参数不易确定的情况下。

(2) 采用强度折减技术, 用最大剪切应变率沿坡体的贯通面来定义滑动破坏面的有限差分法计算, 很好地模拟了镇江市黄山粘土质缓坡的变形破坏过程, 并得出合理的安全系数。

(3) 对于黄山段滑坡, 采用坡体降水措施可以明显提高边坡稳定安全系数, 是一种相当可行而且经济的边坡处治方案。

(4) 滑动破坏面的定义是目前的研究重点之一。本文采用最大剪切应变率沿坡体的贯通面来定义滑面, 模拟计算出黄山滑坡的变形规律与现场实际变形极其相符, 是一种有益的尝试。

### 3 结 语

根据非关联流动法则, 推导了考虑剪胀角的广义的 Mises 屈服准则, 在应用时, 给出了有限元的实施方案。分析了随着剪胀角的增大, 安全系数也逐渐增大, 说明了剪胀角对安全系数的影响。同时说明了屈服准则对计算结果的影响。因此在实际工程计算中, 不但要考虑剪胀角的影响, 而且还要考虑选用的材料屈服准则对计算结果的影响。

#### 参 考 文 献

- [1] Griffith D V, Lane P A . Slope stability analysis by finite element[J]. *Geotechnique*. 1999,49(3): 387—403.
- [2] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis, by strength reduction [J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835—840.
- [3] 徐干成, 郑颖人. 岩土工程中屈服准则应用的研究[J]. 岩土工程学报. 1990 12(2): 93—99.  
XU Gan-cheng, ZHENG Yin-ren. Study of application of the yield criterion to geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990 (2): 93—99.
- [4] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法 [J]. 岩土工程学报. 2002, 24(5): 626—628.

ZHENG Hong, LI Chun-guang, Lee C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2002, 24(5): 626—628.

- [5] 张鲁渝, 时卫民, 郑颖人. 平面应变条件下土坡稳定有限元分析[J]. 岩土工程学报. 2002, 24(4): 487—490.  
ZHANG Lu-yu, SHI Wei-men, ZHENG Yin-ren. The slope stability analysis by FEM under the plane strain condition[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(4): 487—490.
- [6] 张鲁渝, 刘东升, 时卫民. 扩展定义 Drucker-Prager 屈服准则在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土工程学报. 2003, 25(2): 216—219.  
ZHANG Lu-yu, LIU Dong-sheng, Shi Wei-men. Application of the extended general Drucker-prager yield criterion to slope stability analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2003, 25(2): 216—219.
- [7] Majid T. Mohamed A.Nour. Significance of soil dilatancy in slope analysis[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2000, 126(1):75—80.

上接第 1756 页

#### 参 考 文 献

- [1] Duncan J M. State of art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1996, 122(7): 577—596.
- [2] 时卫民, 郑颖人, 唐伯民. 滑坡稳定性评价方法的探讨 [J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 545—548.  
SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren, TANG Bo-ming. discussion on stability analysis method for landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 545—548.
- [3] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3):387—403
- [4] 郑宏, 刘德富, 罗先启. 基于变形分析的边坡潜在滑面的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 709—716.  
ZHENG Hong, LIU De-fu LUO Xian-qi. Determination

of potential slide line of slope based on deformation analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 709—716

- [5] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835—840.
- [6] 连镇营, 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):407—411.  
LIAN Zheng-ying, HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 407—411.
- [7] 彭良泉, 王钊. 对边坡稳定性分析中危险水力条件的研究[J]. 人民长江, 2003, 34(5): 39—41.