

土质边坡稳定性极限分析

赵志星¹, 严明¹, 王宝国²

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 山东胶州市环境保护局, 山东 胶州 266300)

摘 要: 极限平衡方法是土质边坡稳定性分析中最常用的方法, 然而极限平衡方法的结果并不精确。因为其静止或机动容许条件不能使人信服。极限分析理论采用塑性上、下限定理为稳定性的真解提供了限界。阐述极限分析理论并解释其过程, 最后选择例子用极限平衡方法和极限分析理论来进行分析, 对两种原理所得出的安全系数进行比较。

关键词: 稳定性分析; 边坡; 极限分析

中图分类号: P642. 2 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2005)03-0187-03

Stability Analysis of Soil Slopes Using Limilt Analysis

ZHAO Zhi-xing¹, YAN Ming¹, WANG Bao-guo²

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Jiaozhou Institute of Environment Protection, Jiaozhou, Shandong 266300, China)

Abstract: The limit equilibrium method is commonly used for slope stability analysis. Limit equilibrium method however is not rigorous because neither static nor kinematical admissibility conditions are satisfied. Limit analysis takes advantage of the lower-and upper-bound theorems of plasticity theory to provide bounds on the true solution of a stability. The theoretical basis and procedure for slope limit analysis is presented. Example of slope is selected from the literature and analyzed using both limit equilibrium and limit analysis. Factors of safety from limit equilibrium and limit analysis are compared.

Key words: stability analysis; slope; limit analysis

边坡稳定性分析在岩土工程中一直占据着重要的位置, 提出了各种不同的分析方法以获得更为精确的结果。在这些方法中, 大体分为三类: 极限平衡法, 有限单元法和极限分析法。

极限平衡法是边坡稳定计算中最广泛采用的方法, 该法的一个主要优点是它能方便地处理复杂的土质剖面、渗流和外荷载条件等, 它假定土体破坏时服从理想塑性摩尔库仑定理。很多著名学者提出的方法如简化 Bishop 法, Janbu 法, Spencer 法, MorRensten 和 Price 法。他们之间关于安全系数的误差一般不超过 5%。但极限平衡方法所求得解并不精确, 其原因是静力容许条件和机动容许条件不能令人信服。极限分析法是边坡稳定性分析中广泛采用的又一种方法。它已经用上限法(机动法)得到了许多有用的解, 而下限法则应用较少。其主要原因是建立静力许可场要比建立运动许可场难得多, 最好是对某问题同时求得上限解和下限解, 而真实解将位于其间, 大多数情况下, 下限解是便于工程应用的, 因为它的解是偏于安全的。虽然以前利用极限分析方法分析简单边坡取得一定成效, 但是对复杂边坡(多层、多土质、多几何侧面等)各种影响状况的分析并不充分。

边坡稳定性有着大量、不同分析方式, 这些方式都是建立在塑性平衡概念基础上。极限分析法是最常用的方法, 主要是极限分析方法简单性及其在工程实践中的广泛认可, 但用极限分析方法不能得到精确解。尽管极限分析方法具有严格性, 但并没有得到充分应用, 主要是构建一个恰当的内力场和速度场以得到理想结果(较高的下限和较低的上限)很困难。若再考虑到地下水和边坡的复杂性, 计算起来就更加困难。本文中详细探讨了边坡极限分析方法及其应用, 并选择实例进行了极限平衡分析和极限分析, 比较了两种分析方法所得安全系数。

1 基本原理

1.1 虚功原理

在荷载作用下处于平衡的变形体, 若给定一微小的虚变形(或位移), 则由于外力(或荷载)所做的虚功必等于内力(或应力合力)所做的虚功。即:

$$\sum_v F_i V_i^* dt + \sum_{s_T} T_i^0 V_i^* ds = \sum_v \sigma_j^0 \epsilon_j^* dv \tag{1}$$

① 收稿日期: 2004-04-07
作者简介: 赵志星(1970-), 男, 工程师, 成都理工大学硕士在读, 主要从事岩土勘察、施工等方面的工作。

式中: F_i ——体积力; T_i^o ——面力。

1.2 上限定理

结构物有多种破坏形式, 这些破坏形式都能满足破坏机构条件, 就是说机动容许位移场有多个, 每个机动容许位移场对应着一个外荷载。上限定理是在所有的与机动容许位移场对应的荷载中, 最小的荷载为极限荷载, 与极限荷载相应的机动容许位移场为破坏机构。公式可写成:

$$\begin{aligned} \int_V T_i^L V_i ds + \int_V X_i^U V_i dV &= \int_V \sigma_{ij} \epsilon_{ij}^U dV \\ &= \int_V D(\epsilon_j^U) dV = \int_V \sigma_{ij} \epsilon_j^U dV \end{aligned} \tag{2}$$

1.3 下限定理

结构物有多种静力容许应力状态, 就是说静力容许应力场有多个, 每个静力容许应力场对应着一个外荷载。下限定理是: 在所有的与静力容许应力场对应的荷载中, 最大的荷载为极限荷载, 与极限荷载相应的静力容许应力场为结构极限状态的应力场。公式可写成:

$$\begin{aligned} \int_V T_i^L V_i ds + \int_V X_i^U V_i dV &= \int_V \sigma_{ij} \epsilon_{ij}^U dV \\ \int_V D(\epsilon_j^U) dV &= \int_V \sigma_{ij} \epsilon_j^U dV \end{aligned} \tag{3}$$

上面两式存在不等式的原因是最大功率耗散原理, 在方程式中的应力部分表现比较显著。由于功率耗散仅仅是通过土体骨架完成的, 所以(2)式和(3)式是用有效应力来衡量的。

2 优化上、下限解

塑性力学上限定理指出, 通过外力功和内能耗散相等计算获得的外荷载一定比真实的临界荷载大或与其相等。在求解边坡稳定问题时, 由虚功方程计算确定的安全系数将比真实解大或与其相等。因此, 从数学角度看, 边坡稳定问题的上限分析可以视为一个确定安全系数的极小值问题。从实用角度来看, 则需要用从最优化原理发展的数值计算方法来确定最小安全系数。而下限定理指出, 建立静力容许的应力场, 即取足平衡条件且不违背屈服(极限)条件的应力(内力场)。下限分析是工程偏于安全性的分析, 计算确定的安全系数比真实解小。从实用角度来看, 则需要确定最大安全系数。

在极限分析中, 主要是分析最大下限解和最小上限解。在一个半无限土质边坡, 对其进行有限元极限分析, 土体单元与单元依据本身位置变化而容重不同。因为最佳解取决于土质的平均容重。

假定任意取一土质的平均容重值 γ , γ 为所有单元容重的最大公约数, 任意单元可表示为: $\gamma^u = \alpha\gamma$; 在极限分析中, 最佳下限解是在静力容许条件下减少所涉及土质的容重。对于上限解; 机动容许速度场可作为节点速度和减少塑性变化率的功能。可写成公式为:

$$\begin{aligned} P &= W^u + W^s = W^g + \int_A v dW \\ &= W^u + \int_A \gamma^u v dA = W^u + \int_A \alpha\gamma v dA \end{aligned} \tag{4}$$

式中: P ——全部内力功率耗散; W^u ——孔隙水外功率; W^g ——重力外功率; γ^u ——土体内部点容重= $\alpha\gamma$; v ——垂直速度; dW ——无穷小土质自重。

等式(3)表示倒塌引起容重可写成:

$$\gamma = \frac{P - W^u}{\alpha \int_A v dA} \tag{5}$$

3 孔隙水压力

孔隙水压力是边坡稳定性分析中需要考虑的一个重要因素。Miler 和 Hamilton 把孔隙水压力当作内力处理, 研究了剪切变形的破坏模式下的边坡稳定性。尽管他们所采用的方法获得了正确的数值解, 但是孔隙水压力导致系统内能耗散减少的物理意义值得商酌。Michalowski 则将孔隙水压力作为外力做功出现在能量平衡方程中, 求解边坡稳定的上限解。众所周知, 土的抗剪强度与土体内的孔隙水压力密切相关。而确定孔隙水压力又是一个十分困难的问题。当水平面确定, 边坡孔隙水压力就能根据所划的流线确定下来。Achilleos 提出一种常用的近似方法如图 1。图 1 所示 A-B 为一个已经确定的水平面, 压力头点 O 通过等势线于 AB 交 E(E-O)。在 Achilleos 近似方法中, 压力头点 O 的值由两个近似压力头作为判断的依据。即垂直向上的压力头和垂直 AB 的压力头。垂直向上的压力头 h_{pv} 是地下水压计算基础, 点 O 垂直向上于 AB 交 V。垂直 AB 压力头 h_{pp} 垂直交 AB 于 P。点 O 由 h_{pp} 判断所得一个保守值(较高于真实值), 而 h_{pv} 是一个不保守的判断值(低于真实值)。保守程度由 h_{pp} 和 h_{pv} 平均值所控制, 这平均值仍是保守的。

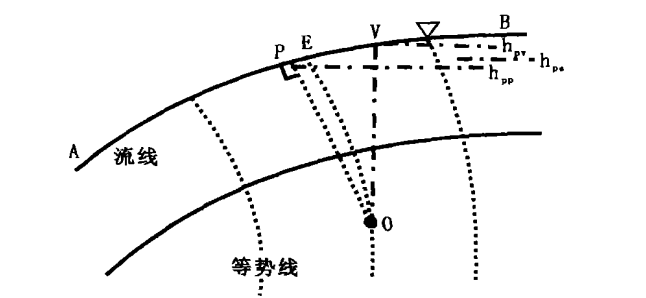


图 1 流线中判断孔隙水压力

4 安全系数

边坡稳定性分析问题实质上是极限分析问题。边坡在外载和重力的作用下, 其某些部位的破坏并不意味着边坡的总体破坏。这时它仍然具有承载能力。只有当这些破坏部位进一步扩展使得边坡变成一个机构, 这时边坡才完全丧失了承载能力, 发生整体破坏。这个状态可以用弹塑性分析或极限分析的方法求得。

从极限分析的观点来看, 如果求得的土体内各点的应力状态不破坏屈服条件的话。上述各种方法相当于寻找一个静力容许解。由极限分析的下限定理知。与静力容许应力场 R_o , 对应的安全系数 F_s 大于实际的安全系数 F , 因此对于某一给定滑动面, 应该调整静力容许应力场, 使得安全系数取极大值。而在不同的滑动面中, 真实的滑动面应该是使安全系数取最小值的滑动面。这也就是潘家铮提出的极大极小值原理。

在极限分析理论上、下定理中, 土质边坡涉及参数(每种土质的 γ , C 和 Φ)、地下水条件、几何形状都应该成为安全系数考虑因素。对于边坡内部土层的容重经反复计算所得容重仍然大于实际的容重, 可通过剪力减小(增加)来增加(减

小) 安全系数, 经过多次反复计算直至计算所得容重等于实际的容重为止, 这个过程还影响在用上、下限定理所得的安全系数, 并且是用极限分析所得安全系数的基础, 可以直接比较极限平衡和极限分析的解。

表 1 为不同作者用不同方法计算的安全系数

分析方法	破坏机理	F_s
半经验法	圆弧状	1.38
Spencer 方法	不规则(随即搜寻法)	1.17
下限法	静力容许应力场	1.13
上限法	机动容许速度场	1.25

5 实例分析

本文选择一个典型实例。某一条修建在软黏土地基上硬黏土路堤如图 2, 硬黏土路堤左侧为 1/2 边坡, 地基是厚度为 8 m 的软黏土层; 在 0~4 m 之内内力为 15 kPa, 4~8 m 深内力呈线性从 15 kPa 到 30 kPa 增加。为便于用有限元极限分析模拟软黏土层的内力变化, 将软黏土层分成五个次区域, 在 > 4 m 设成一个单一内力不变次区域, 而在 4~8 m 设成 4 个 1 m 厚次区域。每个区域都有一个内力值。

Jiang 和 Magnan 应用极限分析理论中上、下限定理所获得安全系数分别为 1.25 和 1.13。Low 用极限平衡的半经验法在沿着接近圆弧状滑动面获得路堤的安全系数为 1.38。这样 Jiang 和 Magnan 用上限定理所得安全系数 1.25 低于 Low 用半经验法所得安全系数 1.38。Jiang 和 Magnan 在解

参考文献:

[1] 王仁, 等. 塑性力学引论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992. 279– 285.
[2] 徐秉业 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. 414– 418.
[3] Jiang, GJ, Magnan JP. Stability analysis of embankments comparison of limit analysis with methods of slices [J]. Geotechnique, 1997, 47(4) : 857– 872.
[4] Kim J, Salgado, R, Yu, H S. Limit analysis of soil slopes subjected to pore- water pressure[J]. J. Geotech Geoenviron Eng, 1999, 125(1) : 49– 58.
[5] 段建华, 等. 考虑孔隙水压力的土坡稳定性的刚体有限元上限分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 5(3) : 273– 277.
[6] 张雄. 边坡稳定性分析的改进条分法[J]. 岩土工程学报, 1994, 3(5) : 84– 92.
[7] 李亮, 等. 边坡极限承载力的下限分析法[J]. 中国铁道科学, 2002, 22(1) : 79– 81.
[8] 王开治, 等. 重力坝塑性极限分析[J]. 大坝与安全, 2000, (4) : 14– 18.

释其原因是由于上限分析理论存着大量塑性和有关速度区的不同, 在对路堤计算中还应用一条简单的滑线。而表 1 中安全系数 1.17 是本文实例在应用 PCST ABL6 并结合 spencer 方法中所得到的, 其值介于上、下限定理所得安全系数数值之间, 比较接近真实安全系数值。

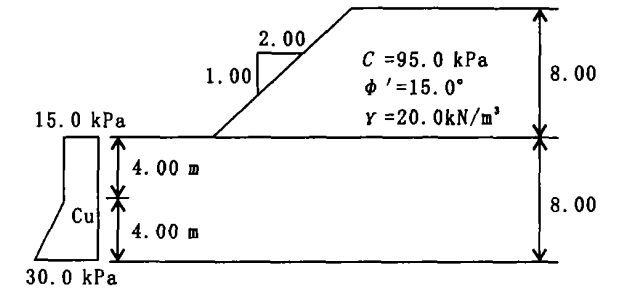


图 2 某一路基剖面图

6 结 语

极限分析理论的上、下限最优化算法, 在对土体进行单元划分的基础上, 对单元的速度和静力平衡进行分析, 只须运用虚功原理即可求出解析解。且极限分析法不需要太多的假设, 可使计算简单、明了。利用极限分析上限法对土质边坡进行稳定性分析是简单可行和有效的。根据上、下限定理, 最优化的结果, 得到最佳上、下限解。这样。在任意确定的滑移机构的基础上, 求得实际可能的安全系数。本文就边坡的安全系数所得值进行了阐述和分析。

欢迎订购《中国水土保持》

由唐克丽研究员等编著的《中国水土保持》一书, 已经由科学出版社正式出版。本书为中国水土保持历史经验、现代主要进展和研究成果的汇总论述。全书分土壤侵蚀和水土保持两篇, 每篇 9 章, 共 18 章, 资料丰富。土壤侵蚀篇包括中国土壤侵蚀现状、土壤侵蚀影响因素、侵蚀类型及区域特征、土壤侵蚀与土地沙漠化、土壤侵蚀过程和环境演变、土壤侵蚀产沙与河流泥沙变化、土壤侵蚀产沙模型及土壤侵蚀研究方法等论述。水土保持篇包括工程、农业和林草三大技术措施的原理和方法, 水土保持区域与规划、流域和区域的水土保持重点工程、水土流失预防监督与管理、水土保持效益评价、水土保持生态环境建设和可持续发展及与防灾减灾相关联的论述。

本书可供水土保持、国土整治、资源、环境、水利、土壤、农业、林业、草牧业、有关的地质、生物学和社会科学等部门的管理

人员、科技工作者及相关专业高等院校师生参考阅读。定价: 128 元。
邮购汇款地址: 100717 北京东皇城根北街 16 号 科学出版社中心分社
联系人和汇款接受人: 霍春雁 联系电话: 010- 64030046