

结构面倾角对岩质边坡位移影响的分析

杜太亮¹, 张永兴¹, 谢强¹, 钟坚敏²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045 2. 重庆工学院数理学院, 重庆 400081)

摘要: 岩体结构面是影响岩质边坡位移及其稳定性的重要因素之一, 但是由于数学和力学上的困难, 岩体结构面对岩质边坡变形的影响通常难以用理论公式计算得出, 目前只能采用数值分析手段。分别针对坚硬岩边坡和软岩边坡中存在软弱结构面的情况, 用有限元差分程序 FLAC 和边坡稳定性系数公式, 定量和定性地讨论了岩体结构面倾角对岩质边坡位移的影响。通过计算分析发现, (1) 岩体中结构面的存在是影响岩石边坡位移及其稳定性的重要因素之一; (2) 随着结构面倾角的增加, 边坡的稳定性和边坡的位移可能增加, 也可能减小, 并不象我们想象的那样随着结构面倾角的增加而增加, 必须用定性和定量方法针对具体问题进行具体分析。

关键词: 岩体结构面; 岩质边坡; 边坡位移; 定量分析; 定性分析

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

岩体中结构面的存在是影响岩石边坡位移及稳定性的重要因素之一。当岩体中有软弱结构面存在(例如坚硬岩体中的节理、裂隙、软弱夹层、断层等), 且又构成有利于滑动的组合形式时, 在外力的作用下, 有可能沿某一个(或某几个)最有利于滑动的结构面产生滑动, 这是坚硬裂隙岩体中最常见的边坡破坏形式。由于在产生滑动以前已有破裂面存在, 因此, 控制这种类型破坏的根本因素是沿滑动面的抗剪性能, 当破裂面中有充填物存在时, 则也与充填物的力学性能有关。对于坚硬岩石的滑动破坏, 岩石本身的强度一般不起控制作用^[1]。

岩体中结构面的存在, 降低了岩体的整体强度, 增大了岩体的变形性能, 加强了岩体的流变力学特性和其他的时间效应, 并加深了岩体的不均匀性、各向异性和非连续性等性质。尤其在那些部位又常常是物理力学变动和物理化学作用的强烈反应的地带, 因此往往会导致岩石边坡产生较大的位移, 最终发展为边坡失稳。大量的岩石边坡工程失事证明, 不稳定岩体往往是沿着适宜的一个结构面或多个结构面的组合边界的剪切滑移、张拉破裂和错动变形

等而造成边坡岩体的失稳。

岩体结构面对边坡应力或位移的影响大小通常是难以用理论公式计算得出, 由于数学和力学上的困难, 对于岩石边坡的应力和变形的计算, 目前只能采用数值分析手段^[2]。在计算机技术快速发展的今天, 采用数值分析可以非常容易地得出边坡的应力和变形, 即使是异常复杂的边坡问题。

本文将采用有限差分法对影响岩质边坡位移的结构面倾角进行定量化分析。

1 分析工具及计算模型

1.1 有限差分程序^[3,4]

有限差分法是较为成熟的一种数值分析方法, 目前已广泛用于各类岩土工程问题的研究中。本文采用的定量化分析工具是有限差分程序 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), 它是一种二维显函数有限差分程序, 由美国 ITASCA 咨询集团公司 Cundall 博士于 1986 年设计。程序中材料模型可按用户要求划分为若干单元(四方网格), 单元中应

收稿日期 (Received date): 2005-10-11; 改回日期 (Accepted): 2005-12-23.

基金项目 (Foundation item): 重庆市教委科学技术研究项目 (编号: 2002c20)。[Funded by Chong Qing Municipal Education Commission (Serial Number 2002c20)]

作者简介 (Biography): 杜太亮 (1969-), 男, 重庆大学土木工程学院岩土工程专业博士研究生。[First author: Du Taoliang (1969-), male

PhD Student of geotechnical engineering, Faculty of Civil Engineering, Chongqing University. E-mail: dutail@163.com, Tel: 13320230300]
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力—应变可呈线性或非线性关系。

FLAC算法的基础是快速拉格朗日计算方法,它能模拟岩石、土体及其他材料的大变形、挠曲或塑性流动,特别适用于岩土力学中的非线性大变形或不稳定(如滑动或分离)问题。

1.1.1 有限差分格式

1 导数的表示——Wilkins(1963)根据偏导数的积分定义,提出了一个差分格式

$$\frac{F}{x_i} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\Delta x} \int_{x_i}^{x_i + \Delta x} F n_i ds \right] \quad (1)$$

式中 F 为某一纯量、矢量或张量; x_i 为位移矢量分量; ds 为弧长增量; n_i 为垂直于切线的单位法线分量。

(1)式的面积分是连续的,但沿一个有限多边形进行积分时,可以写为一个等效的(虽然近似的)表达式

$$\frac{F}{x_i} = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^N F \varepsilon_k \Delta x_k \quad (2)$$

式中 N 为边数; F 为边 n 上 F 的平均值; Δx_k 为边 n 的矢量长度的分量; ε_k 为二维置换张量 $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

用(2)式来推导FLAC中的所有空间差分格式,应注意,这种表示没有限制外形及边数,不同于以矩形网格为依据的许多有限差分表示法。

2 运动方程式

$$\rho l \frac{\partial U_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3)$$

式中 ρ 为密度; σ_{ij} 为应力张量; U_i 为速度; g_i 为体力分量; t 为时间。

随时间变化作用的某质量的运动方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{F}{m} \quad (\text{即 } F = ma) \quad (4)$$

可以用包含半时间步长的速度的中心差分格式来求解(4)式。(4)式左边的加速度可以写为

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\dot{U}^{(t+\frac{\Delta t}{2})} - \dot{U}^{(t-\frac{\Delta t}{2})}}{\Delta t} \quad (5)$$

代入(4)式后,得

$$\dot{U}^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{U}^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{F}{m} \Delta t \quad (6)$$

这是半时间步长时的网点速度。现在,可以用一个附加积分由速度求得位移为

$$\dot{U}^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{U}^{(t)} + \dot{U}^{(t+\frac{\Delta t}{2})} \Delta t \quad (7)$$

进而可以求出同一时间增量之间的力。

1.1.2 强度准则

数值计算采用的岩体屈服条件为与岩土体相适应的Mohr-Coulomb直线型强度准则^[5],其强度包络线的直线表达式为:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + c \cos \phi \quad (8)$$

$$\text{或 } R \left\{ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi - c \cos \phi \right\} = 0 \quad (9)$$

式中 σ_1 、 σ_3 为分别为最大和最小主应力; C 为岩土体的粘聚力; ϕ 为岩土体的摩擦角。

1.2 计算模型

计算模型如图1所示,图中单位: m。模型底部DE边约束X方向和Y方向位移,CD边和EF边约束X方向位移, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

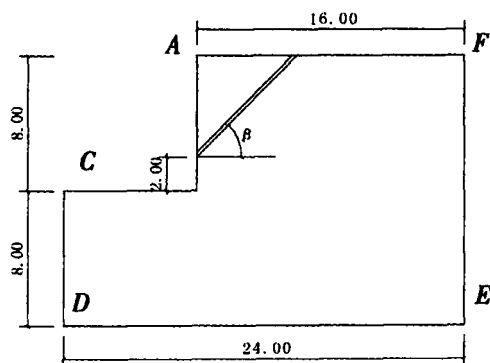


图1 有限差分法计算模型

Fig. 1 A model for finite difference method

1.3 选用参数

表1为各级边坡岩体性质指标标准值^[6],其中极软岩岩体稳定性差,岩体力学性质极弱;硬质岩岩体自稳能力较强,自然界中普遍偏于稳定,在本文的研究中主要分别讨论坚硬岩和软岩中存在结构面的情况,表中“*”所示。边坡岩体计算参数取值如表2所示。表中A1为软岩岩边坡岩体;A2为坚硬岩边坡岩体。

表 1 边坡岩体性质指标标准值^[6]
Table 1 Characteristic value of rock slope^[6]

岩石类别	指标名称	重度 γ (kN/m^3)	抗剪强度		变形模量 G/Pa	泊松比 μ
			$C(\text{MPa})$	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$		
硬质岩	坚硬岩	24.5~26.5	> 1.80	> 46	> 4.5	0.20
	较坚硬岩	23.0~25.0	1.0~1.80	43~46	2.5~4.5	0.10~0.25
软质岩	较软岩	24.0~25.0	0.50~1.00	38~43	1.5~3.0	0.20~0.30
	软岩	23.5~25.0	0.25~0.50	32~38	1.0~2.0	0.25~0.33
	极软岩	23.5~24.5	< 0.25	< 32	< 1.0	> 0.33

表 2 不同工况下边坡岩体计算参数
Table 2 Physical calculative parameters of rock slope under different work conditions

工况	变形模量 G/Pa	泊松比 μ	重度 γ (kN/m^3)	摩擦角 $\phi(^{\circ})$	$C(\text{MPa})$
A1	1.50	0.29	24.25	35.0	0.375
A2	4.50	0.20	24.50	46.0	1.800

表 3 结构面抗剪强度指标标准值^[6]
Table 3 Characteristic value of rock structure face^[6]

序号	结构面两侧岩石坚硬程度类别及结构面的结合程度	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	粘聚力 c (MPa)
1	硬质岩, 结合好	> 35	> 0.20
2	硬质岩, 结合一般; 软质岩结合好	35~27	0.20~0.11
3	硬质岩, 结合差; 裂面粗糙; 软质岩, 结合一般	27~18	0.11~0.07
4	硬质岩, 结合很差, 裂面平直, 含泥; 软质岩, 结合差, 裂面粗糙, 含泥	18~12	0.07~0.03
5	硬质岩或软质岩, 结合很差, 裂面充泥厚度 > 5 mm; 软质岩或极软岩, 泥化层	< 12	< 0.03

表 4 岩体结构面计算参数
Table 4 Physical calculative parameters of rock structure face

结构面两侧岩石坚硬程度类别及结构面的结合程度	变形模量 G/Pa	泊松比 μ	重度 γ (kN/m^3)	$\varphi(^{\circ})$	$c(\text{MPa})$
硬质岩, 结合很差, 裂面平直, 含泥; 软质岩, 结合差, 裂面粗糙, 含泥	1	0.3	20.0	15	0.05

2 计算结果及分析

2.1 定量分析

设计计算模型如图 1, 取结构面倾角 $\beta = [45^{\circ}, 50^{\circ}, 55^{\circ}, 60^{\circ}, 65^{\circ}]$, 结构面抗剪强度指标参数选择表 3 中第 4 类结构面, 计算中所用岩体结构面参数如表 4。用 FLAC 程序计算开挖边缘坡顶 A 点的位移并绘制成如图 2、图 3 所示的结构面倾角与边坡特征点变形的关系曲线。图中纵坐标 D 表示位移, 横坐标 β 为结构面倾角, x_{dis} 和 y_{dis} 分别表示特征点 A 在 x 方向和 y 方向位移。

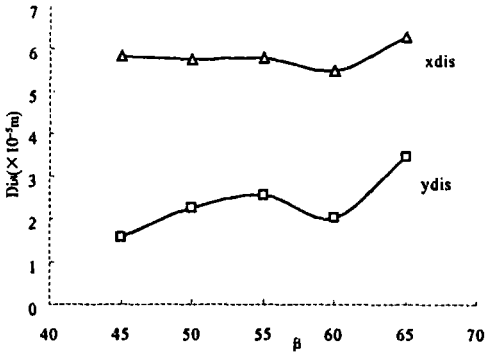


图 2 A1 条件下结构面倾角与边坡特征点变形关系曲线
Fig. 2 Relationship curves of structure face dip and the deformation of point A on slope under A1 work condition

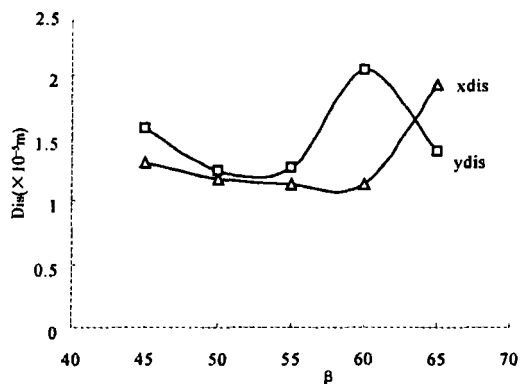


图 3 A2条件下结构面倾角与边坡特征点变形关系曲线

Fig 3 Relationship curves of structure face dip and the deformation of point A on slope under A2 work condition

由图 2 图 3 所示的位移曲线看出, 无论是坚硬岩中存在结构面情况还是软岩中存在结构面的情况, A 点的 x 方向位移和 y 方向位移变化均不象我们想象的那样随着结构面倾角的增加而增加, 基本无规律可寻。

2.2 定性分析

下面用边坡稳定性系数的定义来定性分析边坡稳定性随结构面倾角的变化而变化的规律。如图 4 所示。

边坡稳定性系数定义为

$$\begin{aligned} K \frac{\bar{S}}{S} &= \frac{Nf + d}{S} \\ &= \frac{W \cos \beta \cdot \tan \phi + d}{W \sin \beta} \\ &= \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + \frac{cL}{W \sin \beta} \end{aligned} \quad (10)$$

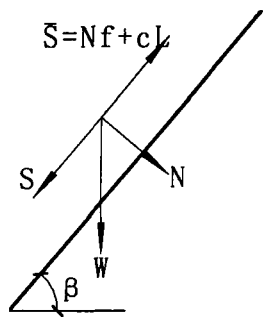


图 4 结构面对边坡稳定性影响分析图示

Fig 4 Sketch of effects of structure face on rock slope stability

式中 β 为结构面倾角 ($^{\circ}$); W 为滑体重量 (kN); L 为结构面 (滑移面) 长度 (m); ϕ 为结构面摩擦角 ($^{\circ}$); c 为结构面粘聚力 (kPa)。

在岩体参数不变的前提下, 如果结构面倾角 β

增加, 则第一项 $\frac{\tan \phi}{\tan \beta}$ 减小。在第二项中, 随着结构面倾角 β 增加, 结构面 (滑移面) 长度 L 减小, $\frac{d}{\sin \beta}$ 减小, 滑体重量 W 减小, 增加 $\frac{1}{W}$, 所以第二项 $\frac{d}{W \sin \beta}$ 可能增加, 也可能减小, 公式的定性分析与上述数值计算的结果是一致的, x 方向和 y 方向位移变化并不象我们想象的那样随着结构面倾角 β 的增加而增加。所以由公式推判和数值分析均可得到以下结论: 边坡的稳定性系数随着结构面倾角 β 的增加而增加; 或边坡的变形会随着结构面倾角 β 的增加而增加的说法均是不正确的, 必须针对具体问题进行具体分析。

3 影响边坡位移的其他因素

除上述因素外, 地下水、气候条件、风化作用、植物生长以及其他因素都可能影响边坡的变形和稳定性。例如, 冰冻不仅加速表层岩体的风化剥落, 且使含水裂隙因冰层膨胀而张开; 冻土中冰层融化时使土层疏松, 含水量增大; 机械和化学风化作用都破坏边坡岩体的粘聚力; 甚至植物的生长也直接影响边坡的稳定; 植物根系可保持土质边坡的稳定, 减少边坡的变形, 通过植物吸收部分地下水, 有助于保持边坡的干燥; 但在岩石裂隙中树根的生长有时是边坡局部滑移的起因^[1]。

通常这些因素是难以表述和量化的, 这给岩质边坡的变形及稳定性分析带来了一定的难度, 在理论分析中, 人们常常将这些因素反映在边坡岩体的基本物理力学参数、岩石边坡的几何特征参数、岩体的结构面强度参数等上面。

4 小结

本文利用有限差分程序 FLAC 和边坡稳定性系数定义公式, 定量和定性地讨论了坚硬岩和软岩边坡中存在软弱结构面的情况下, 岩体的结构面倾角变化对岩质边坡位移和稳定性的影响。通过的计算分析, 可得到如下基本结论:

1 岩体中结构面的存在是影响岩石边坡位移及其稳定性的重要因素之一;

2 公式定性分析与数值定量分析均得出一致结论: 随着结构面倾角的增加, 边坡的稳定性和边坡的

位移可能增加, 也可能减小, 并不象我们想象的那样随着结构面倾角的增加而增加, 必须用定性和定量方法针对具体问题进行具体分析。

参考文献 (References)

- [1] Hunan Design Institute for Water Conservancy and Hydroelectricity Engineering Geology of Slope [M]. Beijing: Water Conservancy and Hydroelectricity Press, 1983. 4 [湖北省水利水电勘测设计院. 边坡工程地质 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1983. 4]
- [2] Wang Guilin. Stability Study of Rock Foundation with Cavems [D]. Ph.D. Dissertation of Chongqing University, 2004 [王桂林. 岩石洞室地基稳定性研究 [D]. 重庆: 重庆大学博士论文, 2004]
- [3] Cundall P. A. . Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics [J]. *Numerical Methods in Engineering (Proc. of the EEF Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, VA)*, 1993. 132~150.
- [4] Zhang Jianhua, Xie Qiang, Zhang Zhaoxi. Arching Effect of Anti-slide Pile Structure and its Numerical Simulation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, (4): 699~703 [张建华, 谢强, 张照秀. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (4): 699~703]
- [5] The Compile Commission of Geotechnical Engineering Manual. Geotechnical Engineering Manual [M]. Beijing: China Architecture Industry Publishing House, 1995. [岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册 [M]. 中国建筑工业出版社, 1995.]
- [6] Chongqing Technical Supervision Bureau, Chongqing Construction Management Committee, Local Standard of Chongqing. Code for Engineering Geology Investigation [S] (DB50/5005-1998) 1998. [重庆市地方标准. 工程地质勘察规范 [S] (DB50/5005-1998) 1998.]

Analysis on Effects of Structure Faces Dip on Rock Slope Displacement

DU Tailiang¹, ZHANG Yongxing¹, XIE Qiang¹, ZHONG Jiamin²

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

(2. College of Math and Physics, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400081, China)

Abstract: Structures faces in rock mass are one of the important factors influencing the deformation and stability of rock slope, but because of difficulty of mathematics and mechanics, the slope deformation caused by the structure faces in rock mass is usually difficult to calculate out with the theoretical method. Only can we adopt numerical analysis at present. Here in the article, with finite difference program FLAC and stability coefficient formula of slope, the authors have discussed the impact on slope displacement by the dip of structure faces in rock mass quantitatively and qualitatively when weak structure faces exist in hard rock slope and soft rock slope respectively. Through computational analysis, we can see that: (1) The existence of the structure faces is one of the important factors which influences the displacement and stability of rock slope; (2) With the increase of the inclination of the structure face, the displacement and stability of the slope may increase or may reduce too and does not increase with increase of the inclination as what we imagined. We must make a concrete analysis of the concrete problem quantitatively and qualitatively.

Key words: structure faces in rock mass; rock slope; slope displacement; quantitative analysis; qualitative analysis