

文章编号: 1001-1986(2007)02-0045-04

节理岩坡中注浆效应的 FLAC^{3D} 数值分析

卢敦华^{1,2}, 何忠明^{1,2}, 林 杭³

(1. 中南大学地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 郑州经济管理干部学院环境工程系, 河南 郑州 451191;

3. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:通过理论推导, 确定了边坡的有效注浆范围; 由三维拉格朗日元法(FLAC^{3D})建立数值计算模型, 在有效注浆范围内对弱面进行注浆。对比节理边坡在注浆前后应力场和位移场的变化, 结果表明: 通过注浆提高了节理面的抗剪强度和抗剪刚度, 使岩体的应力场和位移场变得均匀和连续; 边坡上缘的拉应力区逐渐消失; 坡体内各个部位的位移分叉现象逐渐减少, 有利于边坡稳定。

关键词:注浆; 应力; 位移; FLAC^{3D}

中图分类号: TU457 **文献标识号:** A

Numerical analysis for grouting effect in jointed slope by FLAC^{3D}

LU Dun-hua^{1,2}, HE Zhong-ming^{1,2}, LIN Hang³

(1. College of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Environment Engineering, Zhengzhou Economic Management Institute, Zhengzhou 451191,

China; 3. School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effective grouting area for rock bedded slope is calculated. A numerical calculation model is founded by the method of fast Lagrangian analysis of continua three dimensions (FLAC^{3D}). The grouting is done in the effective grouting area. The comparison analysis for the stress field and displacement field before and after grouting are conducted. The analysis results show that after grouting the shear resistance strength and shear stiffness are increased. The stress field and displacement field of rock mass are more symmetrical and continuous. The tensile stress area is reduced gradually. The phenomenon of displacement mutation is reduced, which is good to the stability of slope.

Key words: grouting; stress; displacement; FLAC^{3D}

压力注浆作为岩体的加固措施在巷道工程中已大量采用^[1], 但在边坡工程中应用较少, 主要是因为边坡注浆加固机理尚不成熟。文献[2]—[5]从理论和试验方面探讨了注浆对岩体的影响。近年来随着计算机和数值计算技术的快速发展, 通过计算机来实现岩体力学问题的分析与计算, 已成为可能^[6-9]。

本文首先通过力学推导得到边坡的有效注浆范围; 然后利用三维拉格朗日元法(FLAC^{3D})对岩质边坡中的注浆效应进行数值分析, 力图从宏观的角度揭示出注浆加固后, 节理边坡不同区域应力场和位移场的变化。

1 有效注浆范围

设边坡走向与弱面走向一致, 建立计算模型如图 1。设边坡的自然坡角为 β_2 , 沿边坡走向厚度为 d , 倾角为 α , 弱面倾角为 β_1 , 其中一条弱面上缘到

坡顶距离为 $|B_iC| = L_i$ 。对于顺层岩质边坡, 其稳定性大多受弱面的控制, 针对 $\alpha > \beta$ 的情况, 假设边坡的失稳形式为沿弱面滑动。

取 B_iD_i 面为研究对象, 根据面上抗剪安全系数的定义, B_iD_i 面的安全系数为抗剪强度 S 与实际剪

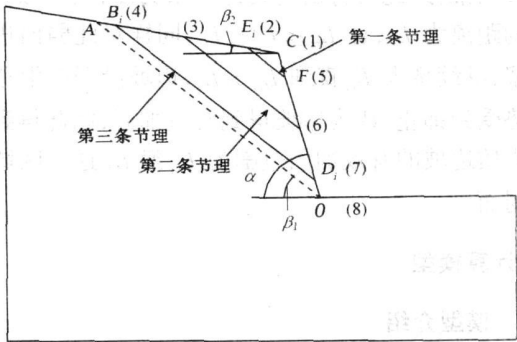


图 1 计算模型

Fig. 1 The calculation model

收稿日期: 2006-10-17

作者简介: 卢敦华(1966—), 男, 浙江台州人, 讲师、博士, 主要从事地质工程方面的教学与科研工作。

应力 τ 的比值,表达式为:

$$F_s = \frac{S^{BD}}{\tau^{BD}} = \frac{F_k^i}{F_x^i} \quad (1)$$

式中 F_k^i 为 B_iCD_i 块的抗滑力; F_x^i 为 B_iCD_i 块的下滑力。各个参数有下列关系:

$$|D_iC| = \frac{L_i \sin(\beta_1 - \beta_2)}{\sin(\alpha - \beta_1)} \quad ; \quad (2)$$

$$G_{B_iCD_i} = \frac{1}{2} \gamma \cdot d |B_iC| \cdot |D_iC| \sin(\alpha - \beta_2) \quad , \quad (3)$$

式中 $G_{B_iCD_i}$ 为 B_iCD_i 块的重力; γ 为 B_iCD_i 块的平均容重。在 B_iD_i 面上有:

$$F_k^i = G_{B_iCD_i} \cos \beta_1 \tan \varphi_j + \frac{c_j L_i \sin(\alpha - \beta_2) \cdot d}{\sin(\alpha - \beta_1)} \quad ; \quad (4)$$

$$F_x^i = G_{B_iCD_i} \sin \beta_1 \quad , \quad (5)$$

式中 φ_j 为弱面内摩擦角; c_j 为弱面粘结力。

将式(4)、式(5)代入式(1),可得到:

$$F_s = \frac{G_{B_iCD_i} \cos \beta_1 \tan \varphi_j + \frac{c_j L_i \sin(\alpha - \beta_2)}{\sin(\alpha - \beta_1)}}{G_{B_iCD_i} \sin \beta_1} \quad . \quad (6)$$

当 $F_s = 1$ 时, B_iCD_i 块处于临界滑动状态,由(6)式得到顺层坡滑动的临界长度:

$$L_{cr} = \frac{2c_j}{\gamma \sin(\beta_1 - \beta_2)(\sin \beta_1 - \cos \beta_1 \tan \varphi_1)} \quad . \quad (7)$$

如图 1 中虚面 AO 与弱面平行且过坡角, $|AC| = L_0$, 由先前的假设, 得到以下结论:

- a. 当 $L_{cr} > L_0$ 时边坡处于稳定状态;
- b. 当 $L_{cr} = L_0$ 时边坡处于临界状态;
- c. 当 $L_{cr} < L_0$ 时边坡处于不稳定状态。

针对 $L_{cr} < L_0$ 不稳定情况, 对 L_{cr} 弱面注浆, 使得 c 、 φ 增大, 由(7)式可见 L_{cr} 增大, 即临界滑移面向坡内推移, 此时将出现另外一条弱面, 其上缘到坡顶的距离为 L_k , 且 $L_{cr} \leq L_k \leq L_0$, 同样对此弱面进行注浆, 继续增大 L_{cr} 直到 $L_{cr} > L_0$, 边坡沿弱面滑移的趋势受到抑止, 认为边坡得到有效加固, 因此得到顺层岩质边坡的有效加固范围为 L_{cr} 到 L_0 这个区域内的弱面。

2 计算模型

2.1 模型介绍

FLAC3D 数值软件在解决岩土工程问题上具有许多优越性, 已逐渐成为工程技术人员理想的三维数值模拟工具。然而, 其在模型建立以及单元网格划分等前处理问题上存在一定不足^[10]。本文采用 FORTRAN 语言编写了 ANSYS-FLAC3D 的前处理程

序。在 ANSYS 中建立模型, 使网格划分更加合理, 然后导入 FLAC3D 进行计算。数值模型见图 2。

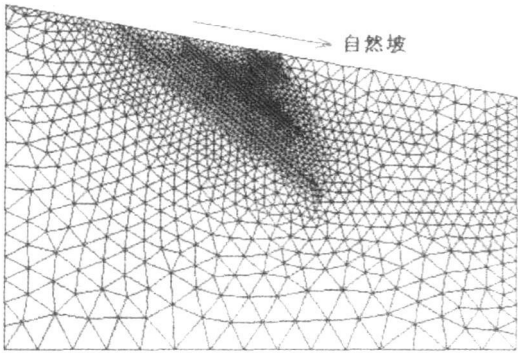


图 2 数值模型

Fig.2 The numerical simulation model

模型尺寸: 长 150 m, 坡高 45 m, 坡角 75°, 节理倾角 40°, 自然坡角 10°。边界条件: 左右边界、前后边界和底边界均施加位移约束条件, 上边界为自由边界。模型单元: 四面体单元, 共计 3 293 个节点, 9 795 个单元。本构模型: 采用 Mohr-Coulomb 准则, 初始应力场按自重应力场考虑。边坡计算参数见表 1。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation Parameters

岩层	容重 /kN·m ⁻³	弹性模量 /GPa	泊松比	粘聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
岩体	25	3.0	0.20	500	35	1.00
弱面	17	0.01	0.30	120	20	0.05
浆体	20	0.1	0.20	240	23	1.00

2.2 监测点布置

对边坡内的节理进行注浆后(将原先弱面参数改为浆体参数), 岩体应力场和位移场将发生变化, 为揭示边坡岩体外场效应的变化特点, 在岩体外不同部位设置相应的监测点(1、2、3、4、5、6、7、8), 如图 1 所示, 以便作对比分析。

为揭示边坡岩体内部场效应的变化规律, 设置相应内部监测点, 如图 3。沿坡顶向下每隔 5 m 设一点, 共布设 10 个记录点, 分别为 p⁰¹—p¹⁰, 并在每个记录点位置沿自然坡倾向, 向坡体内侧每隔 2 m 布设一点, 每条监测线共设 26 个记录点, 以记录内部质点的应力和位移变化。

2.3 有效注浆范围

将本模型的参数代入式(7)中, 得到顺层坡滑动的临界长度 $L_{cr} = 12.71$ m。

对于本模型, $L_0 = 54.26$ m, $L_1 = 9.51$ m, $L_2 = 29.09$ m, 可见第二、三条节理面在有效注浆范围内, 因此对第二、三条节理面进行注浆, 分析对边坡的加

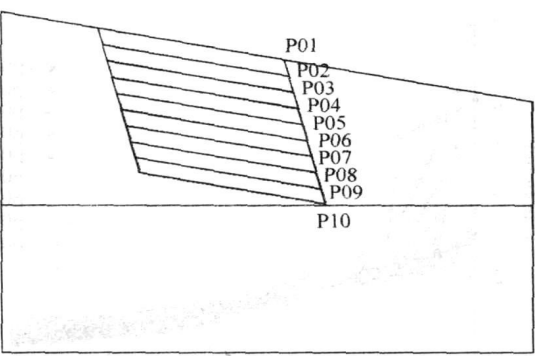


图 3 内部监测点

Fig.3 The inside monitoring points

固效应。

3 计算与分析

3.1 边坡岩体最大主应力分布对比分析

如图 4 所示,岩体点单元的最大主应力(拉为正,压为负)是决定单元应力状态的最主要因素,由于将边坡岩体视为弹塑性体,根据莫尔-库仑强度判据,当岩体单元的最大主应力和最小主应力达到一定的组合值时,单元将发生塑性破坏,并将不平衡力传递给相邻的岩体质点,导致相邻岩体质点应力的增加,如果塑性破坏点连成的塑性破坏面沿坡体贯通,则此面将是危险的滑动面。节理边坡开挖后,在坡体大部分区域,最大主应力表现为压应力,这些区域基本是稳定的,但在节理面附近却表现为拉应力区,并在此处形成较大的应力集中,产生很大的拉应力值,而岩体的抗拉强度一般是较小的,所以在该区域易于形成受拉破坏区,并沿节理面形成塑性贯通区,造成边坡失稳滑动的隐患。

节理岩体注浆加固后,节理面的物理力学参数发生改变,导致节理面介质的力学性质得以改善,即节理面的强度和刚度增强,应力场通过节理面得到均匀扩散,从图 5 可见,节理面的应力值明显减小,因此,节理面的安全性提高,节理边坡的整体稳定性提高,而且节理面处的变异性减小。

3.2 节理边坡特征监测点总位移-时步曲线

开挖坡体外部监测点注浆前总位移-时间曲线(图 6)可见:在同一时间段内,由坡面向里的监测点的位移(1→2→3→4)逐渐减小,达到平衡时刻的极限位移值也按此顺序逐渐减小;变形初期监测点的应变速率同样按此顺序逐渐减小;对于坡面布置的监测点,在同一时间段内,由上到下(5→6→7→8)位移逐渐减小,达到平衡时刻的极限位移值也按此顺序逐渐减小;变形初期监测点的应变速率同样按此顺序逐渐减小;在所有的监测点中,1 点的位移

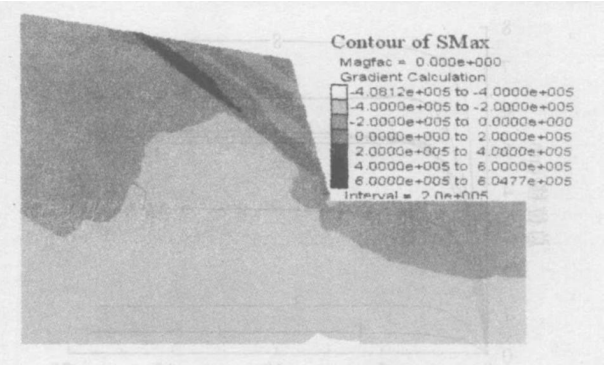


图 4 注浆前的最大主应力

Fig.4 The maximum principal stress before grouting

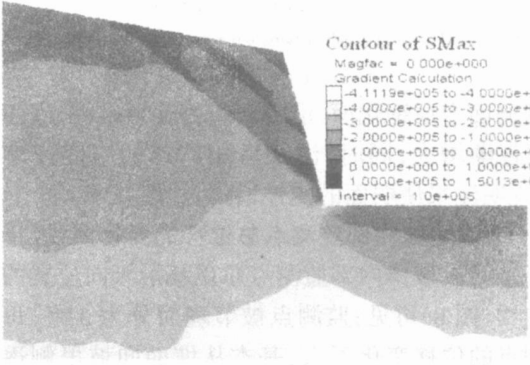


图 5 注浆后的最大主应力

Fig.5 The maximum principal stress after grouting

最大,因而其可作为变形监测的特征点,点 8 在节理面的下部,故其位移为恒定值。

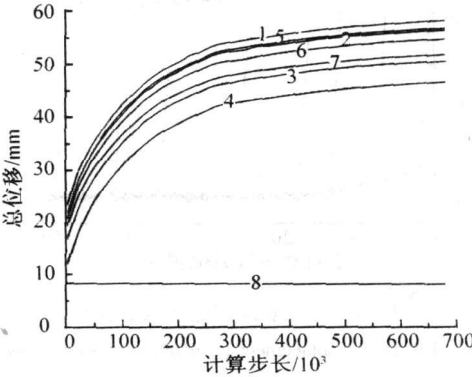


图 6 注浆前总位移-时间关系

Fig.6 The relationship between total displacement and time before grouting

由边坡注浆后监测点总位移-时间曲线(图 7)可见:由于节理面加固后,胶结体的强度依然小于上下盘岩体的强度,所以还要产生较大的变形,水平观测点的总位移按顺序 1→2→3→4 逐渐减小;而点 5 的位移接近于点 7 的位移,这是因为第一条节理未注浆;其他坡面监测点的总位移按顺序 6→7→8 逐渐增大,这是因为注浆后岩体变得均匀连续,原

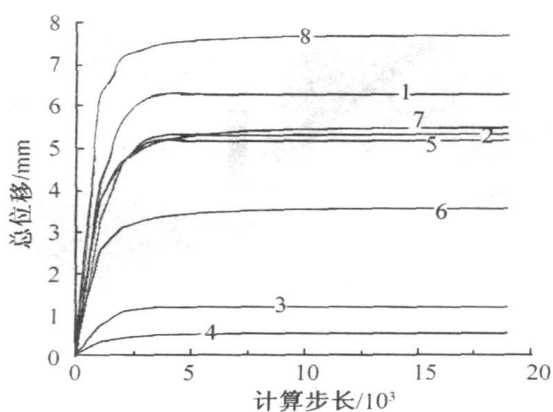


图 7 注浆后总位移—时间关系

Fig. 7 The relationship between total displacement and time after grouting

节理弱面变成钢化面,沿竖向应力逐渐增大,因而位移也逐渐增大;同时,注浆后相应点的应变速率增大,说明注浆使弱面的刚性增强,塑性减弱。

3.3 节理边坡内部监测点总位移的变化曲线

从开挖坡体内部监测点总位移沿倾向位置的变化曲线(图 8)可见:监测点被节理面分为 3 组,每组监测点的位移变化不大,基本从坡面向坡里侧逐渐减小,且同一监测线上的位移曲线在经过节理面时都存在分叉现象。

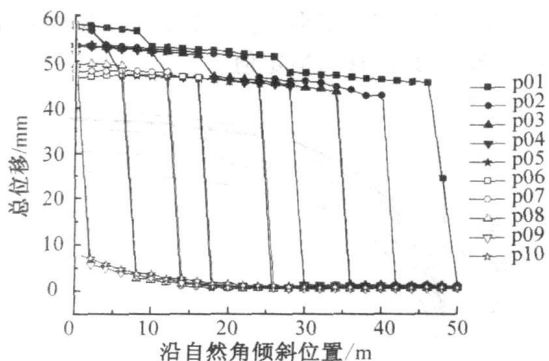


图 8 注浆前内部监测点总位移

Fig. 8 The total displacement of monitoring point inside slope before grouting

由坡体节理面注浆后监测点总位移沿倾向位置的变化曲线(图 9)可见:同一条监测线上各监测点的总位移变化均匀连续,从坡面至坡里侧方向逐渐减小,在节理面上基本无分叉现象,且各条监测线相应位置监测点总位移由上到下逐渐增大;由于第一条节理未注浆,通过该节理面后位移存在分叉现象。(如 p01 和 p02 两条监测线)

4 结论

a. 针对坡角大于弱面倾角的情况,通过推导

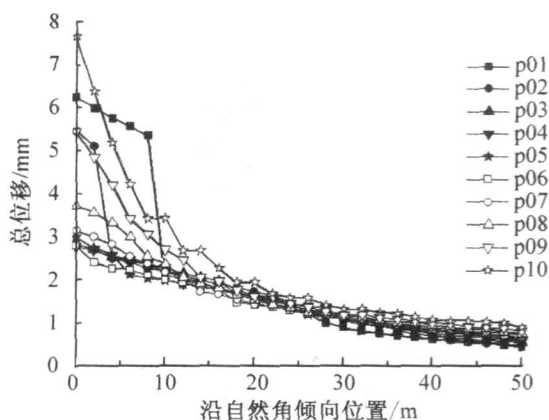


图 9 注浆后内部监测点总位移

Fig. 9 The total displacement of monitoring point inside slope after grouting

得到顺层坡滑动的临界距离,从而确定了边坡有效注浆范围。

b. 边坡开挖后,导致节理边坡岩体应力场和位移场的重新分布,在坡顶上缘节理面处产生较大的拉应力区,从而产生较大的张拉裂隙;岩体沿节理面产生较大的位移和变形,由于节理弱面的存在,造成岩体应力在节理面处产生突变,使岩体的整体应力分布不均匀,从而对边坡岩体的整体稳定不利。

c. 注浆使岩体的应力场和位移场变得均匀和连续,在节理面处的较大位移得以抑制;消除或减弱了坡顶区域的张拉裂隙,从而提高了边坡的整体稳定性。

参考文献

- [1] 高大钊. 岩土工程的回顾与前瞻[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
- [2] 许万忠,曹平,彭振斌,等. 考虑弱面注浆因素对加锚层理边坡抗剪性能影响的力学机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1475—1480.
- [3] 许万忠,彭振斌,胡毅夫,等. 岩体边坡锚注加固模拟试验研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 6—10.
- [4] 许万忠,彭振斌,袁海平. 节理裂隙边坡锚注加固机制及特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(5): 30—33.
- [5] 许万忠,彭振斌,袁海平. 节理裂隙边坡锚注加固抗剪效应研究[J]. 矿冶工程, 2006, 26(4): 5—9.
- [6] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000.
- [7] 钱家欢,殷宗泽. 土工数值分析[M]. 北京:中国铁道出版社, 1991.
- [8] 徐士良. 计算机常用算法[M]. 北京:清华大学出版社, 1995.
- [9] 李庆扬. 现代数值分析[J]. 北京:高等教育出版社, 1995.
- [10] 廖秋林,曾钱帮,刘彤,等. 基于 ANSYS 平台复杂地质体 FLAC3D 模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1010—1013.