

土体注浆后的性能分析

张友葩 吴顺川 方祖烈

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

摘要 应用 Mohr-Coulomb 屈服准则, 推导了注浆后岩土体的屈服函数. 根据位于 205 国道上某土质边坡的实际情况, 利用现场实测数据和实验数据, 分别对注浆前后坡体的破坏状态、不同位置位移的变化情况以及坡体的整体稳定性等方面进行了模拟计算. 结果表明, 注浆后岩土体的弹性区域显著增大, 侧向位移明显减小, 而岩土体的剪应力屈服区域则由集中趋于分散.

关键词 岩土体; 中高压注浆; 性能分析; 数值模拟; 内聚力; 内摩擦角

分类号 TU 472; TB 125

岩土体的稳定性问题是岩土工程中一个非常重要的课题, 如何充分利用岩土体残余强度有效阻止岩土介质的滑移从而保持结构的稳定, 这是岩土工程加固中的理想状态. 利用注浆技术再辅之以其他加固措施可以实现这一目标. 因为在注浆过程中, 浆液可以通过渗透、压密、劈裂以及

1 岩土介质的改性分析

与岩土体的相互作用, 改善了岩土体的性能^[1-5], 使岩土体的自稳定能力有较大幅度的提高.

$$f(c_0 + \Delta c, \phi_0 + \Delta \phi) = f(c_0, \phi_0) + \left(\Delta c \frac{\partial}{\partial c} + \Delta \phi \frac{\partial}{\partial \phi} \right) f(c_0, \phi_0) + \frac{1}{2!} \left(\Delta c \frac{\partial}{\partial c} + \Delta \phi \frac{\partial}{\partial \phi} \right)^2 f(c_0, \phi_0) + \frac{1}{3!} \left(\Delta c \frac{\partial}{\partial c} + \Delta \phi \frac{\partial}{\partial \phi} \right)^3 f(c_0, \phi_0) + \dots + \frac{1}{n!} \left(\Delta c \frac{\partial}{\partial c} + \Delta \phi \frac{\partial}{\partial \phi} \right)^n f(c_0, \phi_0) + \Delta$$

(1)

式中, c_0, ϕ_0 分别表示岩土介质注浆前的初始值. 为计算方便考虑其中的前三项, 则上式可以写成如下形式:

$$f(c_0 + \Delta c, \phi_0 + \Delta \phi) = f(c_0, \phi_0) + \Delta c \frac{\partial f(c_0, \phi_0)}{\partial c} + \Delta \phi \frac{\partial f(c_0, \phi_0)}{\partial \phi} + \Delta c \frac{\partial^2 f(c_0, \phi_0)}{\partial c^2} + \Delta \phi \frac{\partial^2 f(c_0, \phi_0)}{\partial \phi^2} + \Delta c \cdot \Delta \phi \frac{\partial^2 f(c_0, \phi_0)}{\partial c \partial \phi} \quad (2)$$

根据 Mohr-Coulomb 屈服准则, 岩土介质的屈服函数可以表示为:

收稿日期 2003-01-22 张友葩 男, 37岁, 高级工程师, 博士

$$\begin{cases} f(c, \phi) = \sigma_1 - \sigma_3 k - 2c\sqrt{k} \\ k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \end{cases} \quad (3)$$

式中, k 表示土压力系数, σ_1, σ_3 分别表示土体中的最大和最小主应力, $f(\cdot)$ 表示土体的屈服 (临界) 函数. 根据式 (2) 和 (3), 屈服函数用下式表示:

$$\begin{aligned} f(c, \phi) = & \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0} - 2c_0 \sqrt{\frac{1 + \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0}} - \\ & 2\Delta c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0}} - \Delta \phi \frac{2c_0 \cos \phi_0}{(1 + \sin \phi_0)^2} - \\ & \Delta \phi \sigma_3 \frac{2 \cos \phi_0}{(1 - \sin \phi_0)^2} - 2\Delta \phi \left[\Delta c \frac{\cos \phi_0}{(1 + \sin \phi_0)^2} + \right. \\ & \left. c_0 \frac{2 \cos^2 \phi_0 (1 + \sin \phi_0) - \sin \phi_0 (1 + \sin \phi_0)^2}{(1 + \sin \phi_0)^4} + \right. \\ & \left. \sigma_3 \frac{\cos^2 \phi_0 (1 - \sin \phi_0) - \sin \phi_0 (1 - \sin \phi_0)^2}{(1 - \sin \phi_0)^4} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\Delta c, \Delta \phi$ 分别表示土体注浆后内聚力和内摩擦角的增量. 土体内聚力和内摩擦角的增加, 与注浆量有直接的关系, 设浆液的注入率为 η , 则其可以表示为:

$$\eta = \frac{V_g}{V_s} \quad (5)$$

式中, V_g, V_s 分别表示注浆体的体积和原土体的体积. 于是注浆后, 在忽略浆液的水化和水解作用的情况下, 岩土体的内摩擦角和内聚力可以分别表示为:

$$\begin{cases} \phi_{gs} = \frac{\eta}{1 + \eta} \phi_s + \frac{1}{1 + \eta} \phi_0 \\ c_{gs} = \frac{\eta}{1 + \eta} c_s + \frac{1}{1 + \eta} c_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $c_g, c_s (c_s = c_0)$ 分别表示浆体和土体的内聚力, $\phi_g, \phi_s (\phi_s = \phi_0)$ 分别表示浆体和土体的内摩擦角. 根据式 (6), 则注浆后岩土体的内摩擦角和内聚力的增量可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta\phi_{ag} = \phi_{ag} - \phi_s = \frac{\eta}{1+\eta}(\phi_s - \phi_s) \\ \Delta c_{ag} = c_{ag} - c_s = \frac{\eta}{1+\eta}(c_s - c_s) \end{cases} \quad (7)$$

由此根据注浆机理,不妨设由于土体与浆液的相互作用而引起内聚力和内摩擦角变化的系数分别为 k_c, k_ϕ ,这两个系数可以借助于室内实验和现场测试获取,也可以采用文献[3]中的方法.由此可以求得注浆以后土体的内聚力和内摩擦角的增加值:

$$\begin{cases} \Delta c = \frac{\eta}{1+\eta}(c_s - c_s)k_c \\ \Delta\phi = \frac{\eta}{1+\eta}(\phi_s - \phi_s)k_\phi \end{cases} \quad (8)$$

由(8)和(4)式就可以求出注浆后土体的实际屈服(临界)函数式.并由此可以计算出土体的屈服包络面(如图1所示).

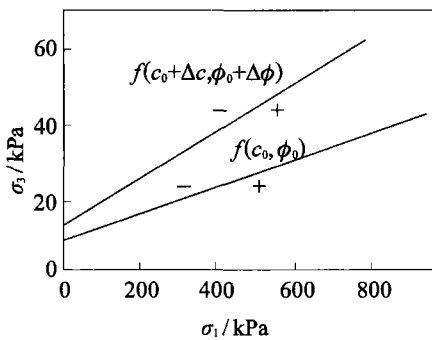


图1 Mohr-Coulomb 破裂准则

Fig.1 Mohr-Coulomb failure criterion

2 事例分析

2.1 实验结果

205国道位于山东省泰安市境内的某土质边坡,在外部载荷和地表水的长期作用下发生了滑移,根据工程的实际情况设计采用了中高压注浆和微型抗滑桩的加固方案,设计中所建议的注浆压力为2.0~2.5 MPa.根据勘察报告,边坡的土质比较均匀,主要由含砂砾的亚粘土组成,亚粘土呈粉粒和粘粒,砂砾含量较高,局部达到15%,平均为5%,砾石的主要成分为花岗岩、泥岩和灰岩碎块,因而可注性较好.根据现场的实验结果,其注浆前后土体的物理力学性质如表1.

从表1中可以看出,边坡中的土体在中高压

注浆的作用下可以实现土体的整体改性.注浆后边坡土体在浆液的渗透、压密作用下被充实,空隙比和压缩比明显降低,压缩模量大大提高.同时,高压注浆的压力达到一定程度时,土体在浆液的作用下发生劈裂,层面扩大或是形成较大宽度的裂隙,水泥浆液呈脉状、层状或是平板状注入土体中,形成土体的结构骨架.

2.2 数值模拟

(1) 计算模型.数值模拟采用FLAC2D,图2为坡体的计算模型,模型中每一个网格所代表的实际尺寸为0.5 m,考虑到坡体的顶部承受公路载荷,因而在这位置施加30 kN/m的车辆载荷.

坡体采用应变硬化(软化)模型.这一模型实际上是Mohr-Coulomb模型的扩展,其不同之处在于,当某一区域发生塑性屈服时,土体的内聚力、内摩擦角、膨胀角以及抗拉强度等属性在Mohr-Coulomb模型中是恒定不变的,而在应变硬化(软化)模型中则会发生相应地变化——硬化或软化^[10].模型中的剪切硬化参数和张拉硬化参数的增量可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta e^{ps} = \left[\frac{1}{2}(\Delta e_1^{ps} - \Delta e_m^{ps})^2 + \frac{1}{2}(\Delta e_m^{ps})^2 + \frac{1}{2}(\Delta e_3^{ps} - \Delta e_m^{ps})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \Delta e_m^{ps} = \frac{1}{3}(\Delta e_1^{ps} + \Delta e_3^{ps}) \\ \Delta e^{pt} = \Delta e_1^{pt} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\Delta e^{ps}, \Delta e^{pt}$ 分别表示土体的剪切硬化参数和张拉硬化参数的增量; $\Delta e_j^{ps}, j=1,3$ 表示主塑性剪应变增量.

(2) 计算结果.图3分别表示坡体注浆前后的破坏状态,注浆后坡体的弹性区域明显增加,屈服区域明显降低,而且剪切屈服的区域比较分散,这说明注浆后坡体的稳定性大大增强.图4中所出现的张拉屈服以及剪切屈服均出现在公路路基的区域,表明这两种屈服主要是由车辆载荷所引起的.

图4分别表示注浆前后坡体不同位置单元体在水平方向上的位移随计算时步的变化过程.其中的三个单元分别取自坡体的上部、下部和中部,其中单元(15,4)位于坡体底部,单元(34,11)位于坡体中部,而单元(48,18)则在坡体的顶部,

表1 注浆前后土体的物理及力学性能

Table 1 Mechanical properties of original and cement-grouting soil mass

土样	含水率/%	湿密度 (t·m ⁻³)	干密度 (t·m ⁻³)	土体密度 (t·m ⁻³)	空隙比	压缩系数	压缩模量 (MPa)	内聚力 (kPa)	内摩擦角/(°)
注浆前	11.30	1.79	1.64	1.69	0.69	0.44	5.04	16.40	21.5
注浆后	13.85	1.91	1.67	1.72	0.63	0.29	8.15	22.13	23.65

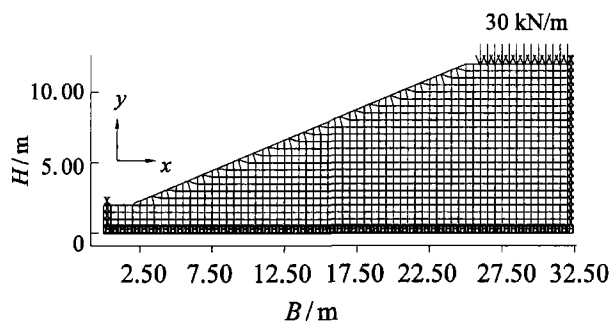


图2 计算网格及边界条件

Fig.2 Simulation grids plot and boundary condition of the soil slope

每一个单元距坡面的距离为 3m. 在三个单元中顶部单元的位移量最大, 这与公路所承受的车辆载荷有直接关系. 由于注浆前后坡体的原始应力状态变化不大, 同时所取的单元体均位于坡体内部相对稳定的区域, 所以坡体的位移变化趋势基

本相似. 从图中可以看出, 注浆后坡体的自稳定时间提前, 而且其在水平方向上的位移值也明显降低, 不同位置单元的位移降低幅度大约在 30%~50% 之间.

图 5 分别表示在主动土压力条件下, 注浆前后坡体的破裂面包络线轮廓. 位于屈服面上部的为塑性屈服区域, 而位于屈服面下部区域为弹性区域. 从图中可以看出, 注浆后坡体的弹性区域明显增加, 坡体的自稳定能力大大增强. 这是因为在注浆体尤其是高压注浆的作用下, 当注浆的压力大于土体中间主应力值 σ_2 时, 土体中就会形成新的劈裂面, 如此继续下去土层就会形成网状浆脉, 其内聚力和内摩擦角得到提高.

图 6 分别表示注浆前和注浆后, 平行于坡面方向距坡面 3m 处坡体 (自下而上) 在水平方向上的位移速度变化情况. 从图中可以看出: 坡体

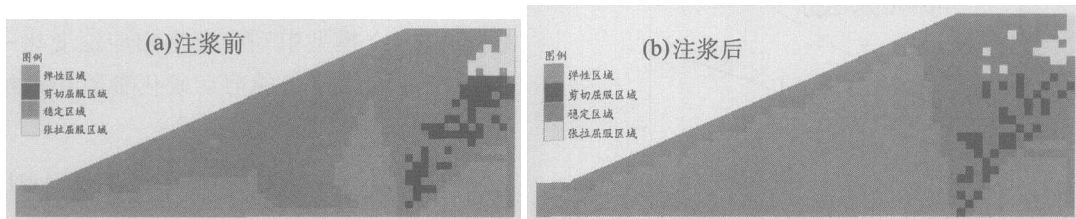


图3 注浆前后坡体的破坏状态

Fig.3 State contours before and after grouting

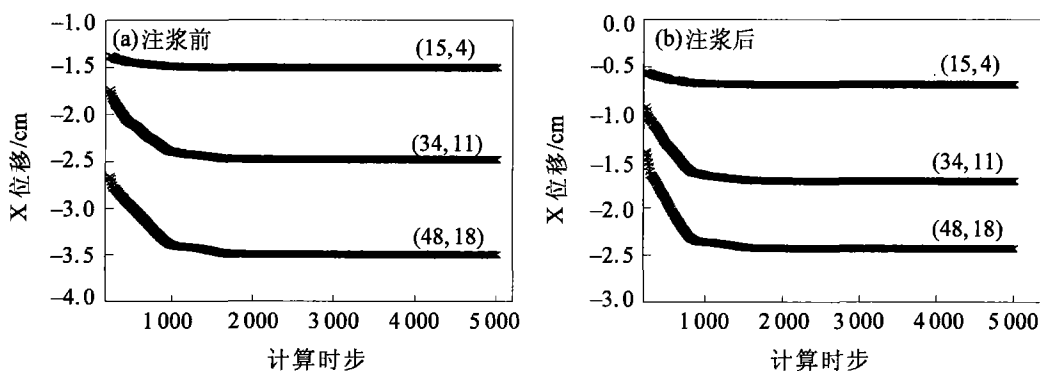


图4 注浆前后坡体不同位置的单元在水平方向上的位移变化曲线

Fig.4 Curves of the X-displacement in different positions vs the number of computing steps before and after grouting

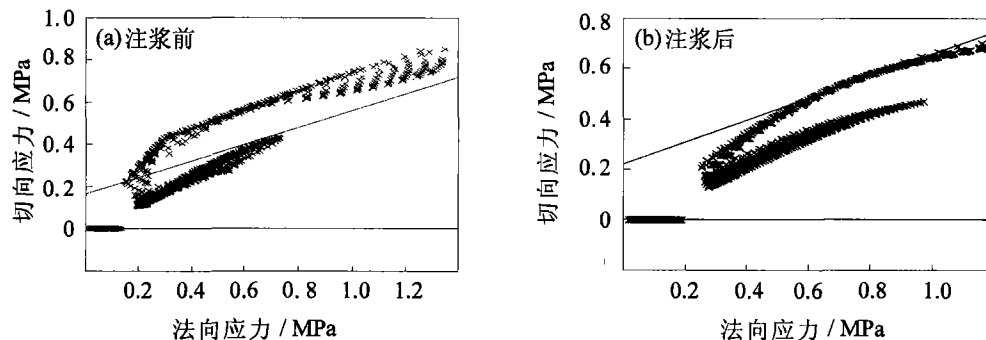


图5 注浆前后坡体的破裂面包络线

Fig.5 Failure surface plots before and after grouting

注浆后整个坡体在水平方向上的位移速度明显降低, 而且速度的波动幅度也明显变小, 趋于一种相对平缓的状态. 尤其是坡体的上部其位移速

度从 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 降到了 $8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, 这说明坡体的整体稳定性得到了较大程度的提高. 注浆后, 在公路车辆载荷作用下下坡体保持稳定状态.

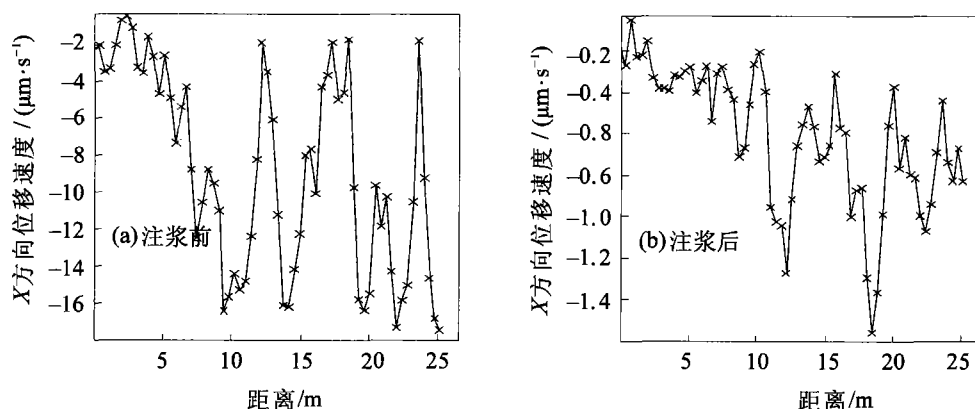


图6 注浆前后沿坡体(距离坡面3 m处)在X方向上的位移速度变化曲线

Fig.6 Curves of distance vs X-displacement before and after grouting (be at 3 m to the slope surface)

3 结论

注浆后岩土介质的内聚力和内摩擦角都会有不同程度地提高, 其中内聚力的提高幅度较大. 在外部载荷作用下, 岩土体的弹性区域明显增大, 塑性剪应变的屈服区域和体积应变的屈服区域则由注浆前的集中变得相对分散, 而且总体规模也相对减少, 从而大大增加了岩土体的稳定性和承载能力.

参考文献

- Rankin W J. Recent developments in compensation grouting [J]. J Tunnel Tunneling, 1996, 28(5): 36
- Widmann R. International society for rock mechanics commission on rock grouting [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1996, 33(8): 803
- 李宁, 张平, 闫建文. 灌浆的数值仿真分析模型探

讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 326

- 杨米加, 陈明雄, 贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 839
- 梁炯望. 我国岩土工程预应力锚索的发展问题[A]. 国际岩土锚固与灌浆技术新进展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- Nichol S C, Goodings D J. Physical model testing of compaction grouting in cohesionless soil [J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2000(9): 848
- 岩土注浆理论与工程事例协作组. 岩土注浆理论与工程事例 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 4
- Lee J S, Bang C S, Mok Y J. Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 37 (7): 1027
- 葛家良. 软岩巷道注浆加固机理及注浆技术问题的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1995
- FLAC Manual of Constitutive Model Theory and Implementation [M]. Itasca Consulting Group p2-12-98, 2002

Property Analysis of Rock and Soil Masses Properties After Cement-grouting

ZHANG Youpa, WU Shunchuan, FANG Zulie

Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT Based on the Mohr-Coulomb failure criteria, the yield functions were deduced under the passive earth pressure condition. By using of the in-situ test data and assisted by FLAC2D, the numerical analysis of an unstable soil slope located at the No.205 national highway is carried out. The results show that the increment of elastic area and the decrement of lateral displacement in the soil slope after cement-grouting are notable, also the strain-sheared area and the volume strain area tend to dissipation.

KEY WORDS rock and soil mass; middle-high pressure grouting; property analysis; numerical simulation; cohesion; friction angle