

灌浆的数值仿真分析模型探讨*

李 宁^{1,2} 张 平¹ 闫建文¹

(¹ 西安理工大学岩土工程研究所 西安 710048)

(² 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室 兰州 730000)

摘要 在岩土工程中,就灌浆这一施工措施对岩土体力学特性的影响进行了较全面的分析讨论,并在此基础上提出了灌浆对岩土体变形、强度、损伤及渗透等力学量的量化影响模型与分析计算方法。为进一步在岩土工程数值仿真分析中考虑灌浆的力学效果提供了科学依据。

关键词 灌浆模型, 灌浆后岩体损伤, 灌浆后岩体渗透张量

分类号 TU 755.6, TU 452

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)03-0326-05

1 引 言

随着岩土工程技术的飞速发展,灌浆在岩土工程中的作用越来越大。灌浆的实质是对岩土体的胶结、增强、充填与加固。即将低品质的岩体、土体原位进行化学、力学加固,改变其物理力学性质和水力学性质,以达到工程的要求。现代灌浆技术无论在理论研究,还是在灌浆材料、工艺、施工机具及其应用规模与范围等方面都取得了重大进展^[1~9],并日趋成熟。然而,对各种灌浆施工后岩土体力学性质、力学响应的定量分析与描述,即灌浆的相应数值仿真模型等研究仍少见报道。

本文对灌浆后岩土体变形、强度、损伤及渗透的影响机理进行了初步分析,并在此基础上试图对灌浆的力学效应进行数学、力学描述,以期能够定量评价灌浆的力学效果与作用,并为优化设计与施工提供科学依据。

2 灌浆对岩土介质变形性质影响的仿真模型

化灌或各种灌浆、注浆、旋喷注浆等均可改变

岩土介质的变形性质。在数值分析中,对灌浆后岩土介质的刚(柔)度矩阵、变形模量、泊松比等应给予适当的考虑,最简单可靠的方法是根据岩土体灌浆前、后声波波速的变化对岩土介质的变形模量进行修正。本文根据灌浆的主要工作机理与现场测试,提出的修正方法为

$$\left. \begin{aligned} E_g &= \left(\frac{v_s^g}{v_s^0} \right)^2 \frac{r_g}{r_0} E_0 \\ m_g &= K_m m_0 \\ K_m &= \left\{ \frac{1 - 2 \left(\frac{v_s^g}{v_p^g} \right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{v_s^g}{v_p^g} \right)^2 \right]} \right\} / \left\{ \frac{1 - 2 \left(\frac{v_s^0}{v_p^0} \right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{v_s^0}{v_p^0} \right)^2 \right]} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： r_0 , r_g 分别为灌浆前、后的岩土密度； v^0 , v^g 分别为灌浆前、后的波速；下标 p 为纵波；下标 s 为横波。

对于成层的岩土介质,其弹性矩阵表示为

$$D = \frac{E_2}{A} \begin{bmatrix} n(1 - nm_1^2) & & \text{对} \\ n(1 + m_1) m_2 & 1 - m_1^2 & \text{称} \\ 0 & 0 & mA \end{bmatrix} \quad (2)$$

2000 年 7 月 10 日收到初稿,2000 年 8 月 30 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(19772039)资助项目。

作者 李 宁 简介:男,1959 年生,博士,1982 年毕业于西北农业大学农田水利专业,现为西安理工大学岩土工程研究所教授、博导,1998 年入选中国科学院“百人计划”,后移至中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室工作,主要从事岩体动力学及岩土工程数值仿真分析等方面的研究工作。

式中： $n = \frac{E_1}{E_2}$ ， $m = \frac{G_2}{E_2}$ ， $E_1 = \left(\frac{v_1^g}{v_1^0} \right)^2 \frac{r_g}{r_0} E_1^0$ ， $E_2 = \left(\frac{v_2^g}{v_2^0} \right)^2 \frac{r_g}{r_0} E_2^0$ ； $A = (1+m_1)(1-m_1-2nm_2^2)$ ， m_1 ， m_2 ， G_2 可用类似的方法估算。

3 灌浆对岩土介质宏观强度性质影响的仿真模型

灌浆可明显改变岩土材料颗粒的胶结性质，表现为宏观强度的提高。即材料粘聚力 c 值的明显提高，间接地也提高了材料的内摩擦角 j 。在数值分析中，除了将材料的 c 、 j 值、抗压、抗拉强度等按声波波速作类似上节的相应提高外，还要考虑到由于灌浆的作用，使岩土体的破坏形态、破坏部位发生变化。图 1, 2 为某重力坝在坝基化灌前、后的变形、应力图，是文[10]所作的数值分析结果。该图显示了化灌前坝体在水荷载作用下裂隙开裂，化灌后坝体、坝基整体变形的形态。图 3, 4 给出了本

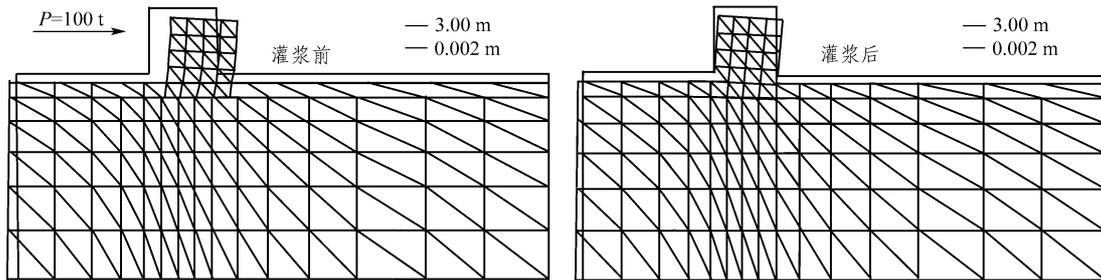


图 1 某重力坝在坝基灌浆前、后的变形图

Fig.1 Deformation of gravity dam on the foundation with and without grouting

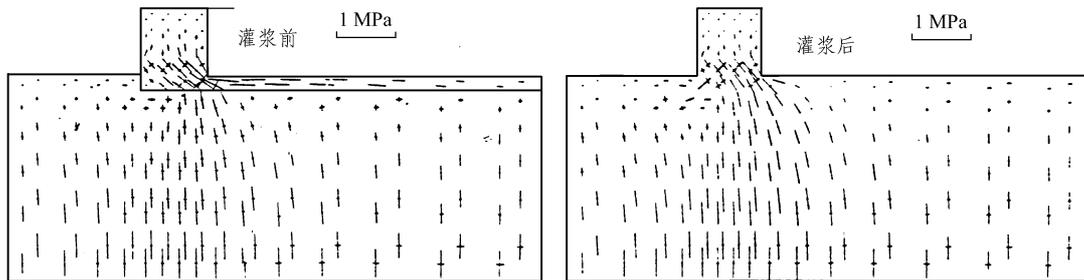


图 2 某重力坝在坝基灌浆前、后的应力图

Fig.2 Stresses of gravity dam on the foundation with and without grouting

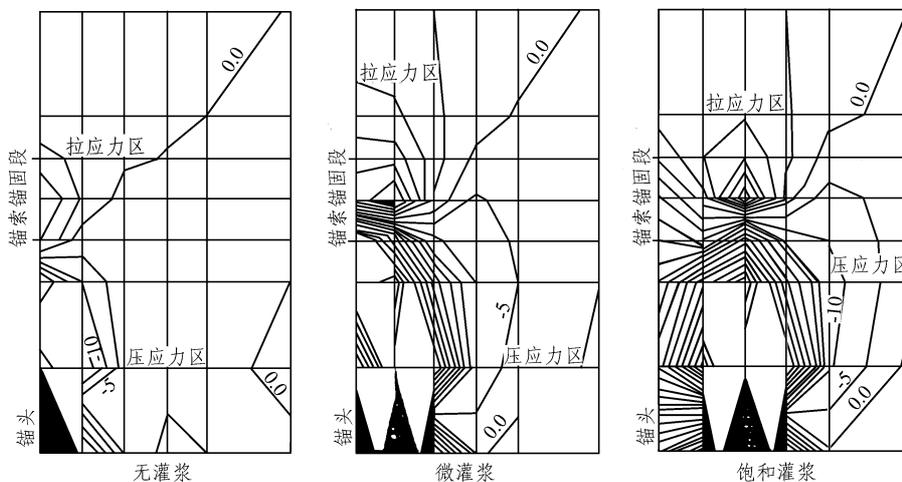


图 3 某边坡预应力锚索灌浆前、后应力图(单位：MPa)

Fig.3 Stresses of prestressed anchor cables with and without grouting(unit：MPa)

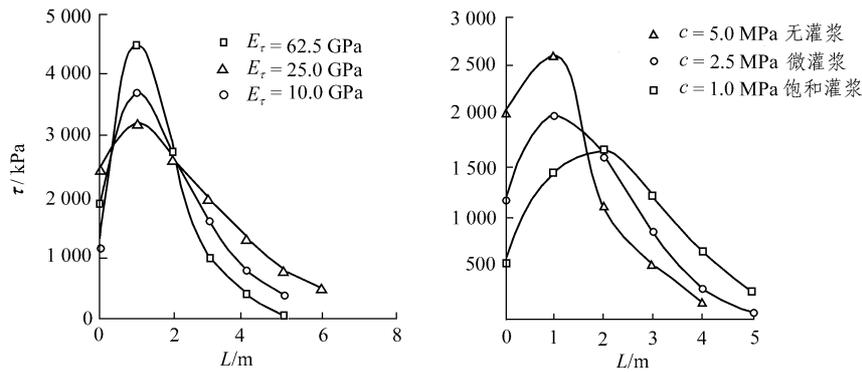


图 4 某边坡预应力锚索锚固段砂浆层面上灌浆前、后剪应力分布图

Fig.4 Shear stress distribution on the interface between mortar and anchorage cable with and without grouting

文分析的某边坡预应力锚索在化灌前、后的应力场与锚固段砂浆层面上的剪应力分布。从图中可以明显看出，灌浆使岩体 E ， c 值升高后，同一吨位下的预应力锚索所需的锚固长度从 6~8 m 降到 4~5 m，从而给工程带来巨大的经济效益。

岩土工程中由于复杂地质条件、意外荷载、设计与施工不当等原因，常常造成各种类型的混凝土基础断裂、错位、喷层衬砌裂缝、漏水、面板折断、渗漏、节理裂隙张开、滑移等病害。化学灌浆是治理这些工程病害的良药。对这些裂缝的数值模拟可采用基于内界面理论之上的接触型界面单元模型，其力学原理可参见文[10, 11]。对于化灌后裂缝的强度与变形状态，可采用基于弹簧理论的 Goodman 节理单元^[12]模型来模拟被胶结后界面的变形、强度性质的变化规律。其中的法向刚度 K_n 、切向刚度 K_s 可通过对化灌材料凝固后的压缩、剪切试验曲线斜率确定；化灌材料强度参数 R_i ， c ， j 也可通过相应的抗拉、抗剪强度试验确定。同时，裂缝被化灌后的稳定性可按该界面单元的强度条件分析判断。

4 灌浆对岩土介质损伤性质影响的仿真模型

岩体中的节理和断层严重地影响了岩体的变形和破坏特性，对于有限的相当大规模的不连续面(节理、断层、软弱带)，可应用空间曲面节理单元、夹层单元^[11, 12]等数值模型进行分析、描述，对这些软弱部位灌浆后，可根据实测值适当提高这些宏观节理单元模型的 c ， j 值与抗拉强度指标来模拟；另一方面，对于岩体中微观尺度的裂纹，可应用等效连续的传统弹塑性、粘弹塑性模型予以描述。而岩体中等尺度(相对岩体结构)的不连续节理对岩体变

形的影响，用损伤力学中的损伤张量表示这种不连续性质的几何特性则最为有效。

对于岩体中的不连续面，一般通过岩体表面的裂隙分布规律或一维的探洞资料，来推测不连续面的空间分布，即建立岩体结构的概率统计模型。应用下式的岩体结构概率统计模型，可以估算节理岩体的损伤张量^[13, 14]：

$$\dot{U}_i = \frac{t_i}{V} \sum_{k=1}^N a_i^{(k)} n_i \otimes n_i \quad (3)$$

采用平均值，式(3)可写为

$$\dot{U}_i = t_i L_i \bar{a}_i n_i \otimes n_i \quad (4)$$

式中： V 为单元体积， L_i 为单位体积内第 i 组节理的节理数， \bar{a}_i 为单位体积内第 i 组节理的平均面积， t_i 为第 i 组节理裂隙平均厚度与其间距之比。

本文认为：灌浆对损伤张量影响的最直接估算应根据灌浆对节理裂隙(体积)的直接充填作用，可用单位体积的灌浆量 f 估算，即

$$\bar{A}_i = \sum \bar{a}_i L_i t_i - f \frac{c_g}{c_r} \quad (5)$$

修正后的损伤张量为

$$\dot{U}_i = \bar{A}_i n_i \otimes n_i \quad (6)$$

式中： \bar{A}_i 为灌浆后第 i 组节理裂隙的等效面积(体积)； f 为单位体积的灌浆量； c_g ， c_r 分别为灌浆材料、岩石的粘聚力。本文提出的上式考虑了灌浆量与浆材标号的双重影响。

对于实际工程中的节理岩体，假设从新鲜岩石中取出岩样为无损伤体，其变形模量 E 可由室内试验确定，而岩体(损伤体)的变形模量 E_d 可由各种野外测试手段确定。根据各个方向的不同岩体性质可测得其各向异性变形系数矩阵(二阶张量)。由完整

岩样变形系数张量 \dot{E} 和节理岩体的变形系数张量 \dot{E}_d , 可得到节理的损伤张量为

$$D = \dot{E} - \dot{E}_d : \dot{E}^{-1} \quad (7)$$

灌浆后, 各种尺度的裂隙、节理不同程度地被浆液所充填、胶结, 岩体的变形模量有所提高。由现场实测得到灌浆后的变形模量张量 \dot{E}_b , 可得灌浆后材料的损伤张量为

$$D_b = \dot{E} - \dot{E}_b : \dot{E}^{-1} \quad (8)$$

5 灌浆对岩土介质渗透性质影响的仿真模型

灌浆对裂隙岩体的作用机理, 一方面, 浆液充填各裂隙使裂隙表面积减少, 而使岩体初始损伤张量明显减小; 浆液凝固后使裂隙的张开、滑移可能性降低, 力学表述上应是岩体损伤演化变小。另一方面, 浆液充填裂隙、缝隙等渗流通道使渗透量直接减小, 表述为渗透系数(或张量)减小。

裂隙的渗流按等流量法则平均到岩体中去, 使岩体模拟为各向异性渗透介质, 其达西定律表述为

$$U_i = K_{ij} J_j \quad (9)$$

式中: K_{ij} 是渗透张量, 与岩体裂隙系统的几何特性、水力参数和应力场有关。

假定代表单元体积 (REV) 内裂隙可概化为 K 组, 其中第 K 组的单位向量为 $n^{(k)}$, 平均开度为 $t^{(k)}$, 具有 $m^{(k)}$ 条等半径 $r^{(k)}$ 圆盘裂纹。忽略岩块的导水性, 可推得每一个圆盘的孔隙体积为 $\delta [r^{(k)}]^2 t^{(k)}$, 则第 K 组裂隙的总孔隙体积为

$$V^{(k)} = \delta [r^{(k)}]^2 t^{(k)} m^{(k)} \quad (10)$$

对于 K 组裂隙, 经迭加求和后, 可得渗透单元体的表观流速如下(按达西定律):

$$U_i = \sum_{k=1}^K \frac{g}{12Vc^{(k)}} \delta [r^{(k)}]^2 I^{(k)} \mathbf{r}^{(k)} [t^{(k)}]^3 [d_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}] J_j \quad (11)$$

式中: $\mathbf{r}^{(k)} = m^{(k)} / V$, V 为单元体积; d_{ij} 为克罗内克尔符号; $r^{(k)}$ 为第 K 组节理裂隙的半径; $c^{(k)}$ 为第 K 组节理裂隙面上的传压系数; $I^{(k)}$ 为第 K 组节理观测面上单位面积内的节理数。将式(9), (11)相比较后, 有

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^K \frac{g}{12Vc^{(k)}} \delta [r^{(k)}]^2 I^{(k)} \mathbf{r}^{(k)} [t^{(k)}]^3 [d_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}] \quad (12)$$

式中: K_{ij} 为二阶对称张量, 当 $i \neq j$ 时, $K_{ij} = 0$ 。

关于 Louis 提出的经验公式 $K = K_0 \exp(-as'_n)$, 实际上只适用于裂隙闭合变形状态, 而处于压剪状态下的裂隙是不适合的, 裂隙岩体损伤演化对渗透张量的演变主要有如下的影响^[14]:

(1) 当裂隙受压闭合时, 裂隙面的相对法向位移为

$$\Delta u = \frac{s'_n}{K_n} \quad (13)$$

式中的 s'_n 以拉为正, 当 s'_n 为压时, $\Delta u < 0$, 其对渗透张量的贡献为

$$K_{ij}^{(k)} = \frac{g \delta [r^{(k)}]^2}{12Vc^{(k)}} I^{(k)} \mathbf{r}^{(k)} \left[t_0^{(k)} + \frac{1}{K_0^{(k)}} s'_n n_k^{(k)} n_l^{(k)} \right]^3 [d_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}] \quad (14)$$

(2) 当裂隙在化灌后仍被受拉开裂时, 由裂纹体中的卡氏定理可得裂纹表面的平均张开位移为

$$\Delta u = \frac{16\sqrt{2} (1 - m_0) a s'_n}{5\delta E_0} \quad (15)$$

对渗透张量的贡献为

$$K_{ij}^{(k)} = \frac{g \delta [r^{(k)}]^2}{12Vc^{(k)}} I^{(k)} \mathbf{r}^{(k)} [t_0^{(k)} + \Delta u^{(k)}]^3 [d_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}] \quad (16)$$

(3) 处于压剪应力状态下的裂隙, 裂隙面上有滑动剪切应力 $t_s = c + s'_n \tan j$ 。式中的 c, j 分别为化灌材料的粘聚力和内摩擦角; s'_n 为裂隙法向应力。当上下裂隙面开始滑动, 由于裂隙面的粗糙度, 将出现剪胀效应, 使缝面开度增加, 从而增加了导水渗透性, 即

$$K_{ij}^{(k)} = \frac{g \delta [r^{(k)}]^2}{12Vc^{(k)}} I^{(k)} \mathbf{r}^{(k)} \left[t_0^{(k)} + \frac{s'_n}{K_n} + \frac{t_s}{K_s} \tan a_n \right]^3 [d_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}] \quad (17)$$

式中: a_n 是剪胀角。

无论裂隙处于哪种受力状态, 在灌浆后除了上节描述的灌浆对损伤演化的影响外, 由于渗透通道被阻塞, 渗透量也将明显减小, 减小量可根据裂隙被充填的体积估算。

$$K_{ij}^g = K_{ij}^0 S_0 \quad (18)$$

式中: K_{ij}^0 为灌浆前介质的渗透张量, K_{ij}^g 为灌浆后介质的渗透张量, S_0 为灌浆后裂隙被充填的正的体积系数。

$$S_0 = \frac{\left| \left[\mathbf{f} - \delta [r^{(k)}]^2 \mathbf{I}^{(k)} \right] \right|}{V} \quad (19)$$

式中： \mathbf{f} 为单元体积的灌浆量， V 为单元体积。

6 结 论

本文从工程仿真模拟分析的角度出发，对灌浆后岩土体的变形、强度、损伤及渗透特性的主要变化规律进行了力学模拟与仿真分析，提出了一种初步、简单、实用的模拟思路与方法，为优化岩土工程设计与施工提供了必需的量化依据。

参 考 文 献

- 熊厚金. 地基处理技术·灌浆法[M]. 北京：中国环境科学出版社，1996
- 中国科学院广州化学研究所. 化学灌浆技术[M]. 北京：水利电力出版社，1984
- 中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京：中国电力出版社，1999
- 熊厚金，张良辉，邹小平等. 岩土工程化学导论[J]. 岩土工程学报，1999，21(4)：403～407
- 熊厚金. 国际岩土锚固与灌浆新进展[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1996
- 叶林宏，何泳生，冼安如等. 论化灌浆液与被灌岩石的相互作用[J]. 岩土工程学报，1994，16(6)：47～55
- 张良辉，熊厚金，张清. 浆液的非稳定渗流过程分析[J]. 岩石力学与工程学报，1997，16(6)：564～570
- 张良辉. 岩土灌浆渗流机理与渗流力学[博士学位论文][D]. 北京：北方交通大学，1996
- 熊厚金，林天健，李宁. 岩土工程化学[M]. 北京：科学出版社，2001
- 雷晓燕，Swoboda G，杜庆华. 接触摩擦单元的理论与应用[J]. 岩土工程学报，1994，16(3)：23～32
- 雷晓燕，李宁. 三维摩擦接触单元的新模型[J]. 华东交通大学学报，1993，(1)：1～5
- 朱伯芳. 有限单元法原理及应用[M]. 北京：水利电力出版社，1979
- 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京：水利电力出版社，1990
- 杨太华. 水-裂隙岩体相互作用理论及其应用研究[博士学位论文][D]. 上海：同济大学，1995

NUMERICAL MODELING OF GROUTING IN GEOENGINEERING

Li Ning^{1,2}, Zhang Ping¹, Yan Jianwen¹

(¹ Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048 China)

(² Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000 China)

Abstract With the consideration of strengthening mechanism of grouting to geomaterials, the proper grouting modeling methods are proposed. The proposed methods can model the deformation properties of grouted geomaterials by variation of sound wave velocities before and after grouting, and the strength properties by properly estimating the strength parameters of rock joints or soft soils. The damage tensors and seepage parameters of grouted jointed rock mass can be obtained by the representative element volume of grouted materials.

Key words grouting modeling, damage of grouted rock mass, seepage tensor of the grouted rock mass

谢先德当选欧亚科学院院士

广东省科协主席、著名矿物学家谢先德最近被选为国际欧亚科学院院士，同时当选的还有左铁镛、汪暘集等 12 位我国科学家。国际欧亚科学院是国际性的科学家组织，目前已拥有欧洲、亚洲、澳洲、北美洲和南美洲等 46 个国家的 500 多名院士与名誉成员。目前该院的中国院士已增至 67 名，还有通讯院士 7 名。

摘自 2001 年 10 月 25 日《科学时报》