

文章编号: 1000-7598-(2007) 07-1353-06

袖阀管注浆技术改性土体研究及效果评价

吴顺川, 金爱兵, 高永涛

(北京科技大学 土木与环境工程学院 北京 100083)

摘 要: 注浆技术作为一种有效的岩土工程施工方法, 理论研究远落后于工程应用。在简要分析袖阀管注浆原理及注浆机制类型的基础上, 采用岩土颗粒流程序, 从微观上模拟了单孔条件下不同注浆压力对土体改性效果的影响, 认为随注浆压力的提高, 土体出现显著的压密效应, 拉应力增加且范围扩大, 并产生劈裂注浆效应, 尤其是注浆孔周围土体, 空间置换率较大; 同时模拟了多孔状态下浆液扩散、土体压密及劈裂效应产生的过程, 认为对于土体改性存在一合理的注浆压力, 浆液挤压土体并在土体中产生劈裂缝, 在多孔之间贯通、交叉, 形成网状浆脉, 土体得到整体改性。模拟结果与现场注浆试验取得了较为一致的结果, 土体改性效果良好。

关 键 词: 压力注浆; 袖阀管注浆; 土体改性; 数值模拟

中图分类号: TU 7556⁺.3

文献标识码: A

Studies of sleeve-valve-pipe grouting technique and its effect on soil reinforcement

WU Shun-chuan, JIN Ai-bing, GAO Yong-tao

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

Abstract: As an effective method of rock-soil reinforcement, the grouting technique has been widely used in civil engineering and well practiced; but the theoretical study is seldom concerned. In order to study the mechanism of soil reinforcement by pressure grouting, this paper, on the basis of brief analysis of the principle of sleeve-valve-grouting and grouting mechanism types, adopts a program of Particle Flow Code to simulate the effect of soil mass reinforcement under different grouting pressures in a single hole. With the increment of grouting pressures, the soil becomes denser; and with the increment of tensile stress in soil, the crack-induced grouting effect results, especially the special replacement ratio becomes great in soils surrounding the grouting hole. At the same time, the procedures of grouting slurry spreading, soil masses compacting and induced split grouting effect are also simulated. The results of simulation have also been verified by an in-situ grouting test. The technique of the sleeve-valve-pipe grouting has been theoretically proved to be a feasible method to reinforce soil masses.

Key words: pressure grouting; sleeve-valve-pipe grouting; soil reinforcement; numerical simulation

1 引 言

注浆技术是岩土工程中一种极为重要的施工方法^[1, 2]。但注浆土体改性理论研究远落后于工程实践, 随着岩土工程技术的快速发展, 注浆尤其是高压注浆在岩土工程中的应用越来越广, 因而, 对压力注浆土体改性机制的研究是一个非常重要而又具有实际意义的课题。

在土体注浆过程中, 浆液通过渗透、压密、劈裂等方式与土体相互作用, 改善土体的性能^[3, 4], 使土体自稳能力及抗变形能力有较大幅度的提高。

在注浆工艺方面, 高压注浆技术从单管注浆逐步形成双管、三管注浆、袖阀管注浆等, 且已经发展成为与锚固技术共同使用的一项常规施工技术。

2 袖阀管注浆技术

2.1 袖阀管结构及注浆工艺

袖阀管注浆工法是由法国 Soletanche 基础工程公司开发研究的一种注浆工法, 该工法是为确保土体均匀改性而提出的, 属比较可靠的工法^[5], 我国先后在上海、广州、深圳地铁以及其他工程中推广应用, 均取得了较好的工程效果。

收稿日期: 2005-06-21

作者简介: 吴顺川, 男, 1969 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程、工程力学等方面的研究和教学工作。E-mail: wushunchuan@vip.sina.com。

袖阀管工作原理及结构如图 1 所示。

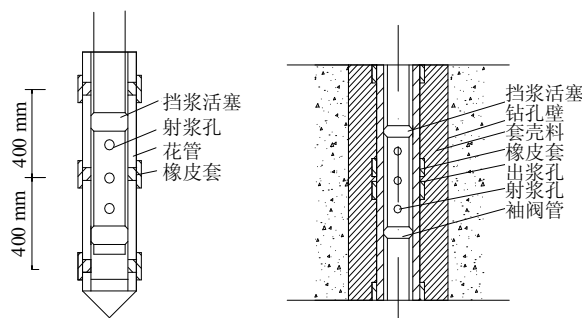


图 1 袖阀管工作原理及结构示意图

Fig.1 Sketch map of principle and structure of sleeve-valve-pipe

袖阀管注浆工艺流程包括：浇注套壳料、安装袖阀管、套壳料的养护、浆液制备、开环及注浆。

2.2 袖阀管注浆工艺特点

袖阀管注浆工艺具有以下特点：

(1) 可根据需要灌注任何一个注浆段；(2) 可进行重复注浆；(3) 注浆时冒浆和串浆的可能性小；(4) 钻孔和注浆作业可以分开；(5) 每一注浆段长度可调整，能根据地层的实际情况调整注浆段长度及注浆压力；(6) 由于进行分段控制注浆，一般自下而上，注浆压力较小时浆液的扩散沿注浆孔的水平方向多于垂直方向，可有效地压密土体；注浆压力较大时浆液扩散沿注浆孔的垂直方向多于水平方向，可在土体中产生劈裂效应。

其缺点包括：(1) 袖阀管外套管不能重复使用，成本高；(2) 施工有一定难度；(3) 施工进度较慢。

2.3 袖阀管注浆土体改性机制

与岩体压力注浆不同，在土体中进行压力注浆，由于土体性质的特殊性，根据注浆压力、浆液稠度等因素的不同，土体产生改性的注浆物理机制主要有充填、渗透、压密、劈裂 4 种类型^[6,7]。

上述 4 种注浆类型有其不同的产生条件：充填注浆效应的产生表明土体中存在明显的孔洞或裂隙；渗透注浆一般出现在土体松散、孔隙率较大、注浆压力较小的情况下；压密注浆则出现在土体孔隙率较小、强度较大、浆液水灰比较小、注浆压力较大的条件下；而劈裂注浆效应则在土体抗拉强度较低、注浆压力很大的条件下易于产生。

对于袖阀管注浆土体改性问题，注浆通过充填、渗透、压密和劈裂复合效应来达到土体改性的目的，4 种注浆形式并不是单独存在的，但一般情况下，袖阀管注浆压力较大，劈裂和压密效应占主导地位，

充填、渗透效应相对较弱。

正是由于袖阀管注浆土体改性的均匀性及有效性，故可以采用二维模拟手段进行分析。

3 注浆土体改性模拟实现方法

目前在压力注浆的数值仿真模拟等方面的研究不多^[8,9]，特别是从土体颗粒与浆液相互作用的角度进行分析报道比较少见，本文试图从细观上探讨压力注浆条件下土体性质、应力应变状态的变化及其宏观表现。

模拟采用二维颗粒程序 Particle Flow Code in 2 Dimensions^[10]。该程序既可直接模拟圆形颗粒的运动与相互作用问题，也可以通过两个或多个颗粒连接形成任意形状的组合体来模拟块体结构问题。

3.1 流动公式

如图 2 所示^[10]，将土体孔隙的几何形状看作是一系列圆形质点(黑点)的集合，两个相邻区域间的每一个连接(“导管”即图中黑线)是一个潜在的裂隙，因为它是一个可能会破坏的黏结接触。在有浆液的情况下，该导管相当于一个长为 L 、孔径为 a 、在外平面上有单位深度的平行板通道，一个导管中的流量(单位时间体积)可由公式(1)给出^[10]：

$$q = ka^3 \frac{(P_2 - P_1)}{L} \quad (1)$$

式中： k 为传导系数； $(P_2 - P_1)$ 为两相邻区域间的压力差。规定压力差为正时，流体由区域 2 流向区域 1。导管的长度 L 为邻近所考虑接触处的所有质点半径的总和。

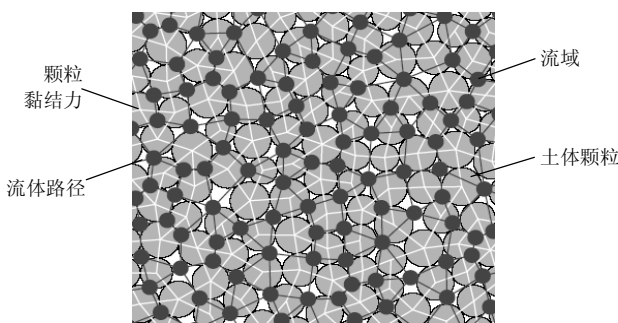


图 2 流固耦合计算示意图

Fig.2 Sketch map of fluid-solid-coupling calculations

式(2)表达浆液流动的经验取值，它确保孔径等于在法向力为 0 时的残余孔径，且孔径将随着压力趋向于无穷大而渐进地趋于 0 (压力为正，且公式仅适用于法向力为压力的情况)：

$$a = \frac{a_0 F_0}{F + F_0} \quad (2)$$

式中： F_0 为法向力的大小； F 为孔径减小到 $a_0/2$ 时的法向力； a_0 为残余孔隙大小。

3.2 压力公式

每一区域从周围导管流入的流量为 Σq ，在一个时步 Δt 中，浆液压力增量可由式（3）给定（假定流入为正）：

$$\Delta P = \frac{K_f}{V_d} (\Sigma q \Delta t - \Delta V_d) \quad (3)$$

式中： K_f 为浆液体积模量； V_d 为该区域的表观体积。 ΔV_d 表示该区域受力改变产生的体积变化。

3.3 力学耦合

在浆液和土体颗粒之间有3种耦合型式：

（1）由于接触处的开合或者接触力改变而使孔径（并由此导致流动阻力改变）产生的变化。

（2）由于区域体积的力学变化而引起的区域压力的改变。

（3）区域流体压力在质点周围引起的牵引作用。

前两条已经隐含。为简化向质点施加压力，假定浆液通过导管流动产生的压降位于相应的接触点处。因此，在该区域内的压力是均匀的，牵引作用也与该区域周围的路径无关。选择多边形路径为连接某一区域周围接触点的路径，在一个典型质点上的力矢量为

$$\vec{F}_i = P \vec{n}_i s \quad (4)$$

式中： $\vec{n}_i$ 为该质点两个接触点连线上的单位法向矢量； s 为该连线的长度。

3.4 解算方案

采用显式解算方案，分别再对所有导管应用流动方程与对所有区域应用压力方程两者之间交替进行。

由以下方法得出稳定的临界时步：在某一单独区域内考虑一个压力扰动 ΔP_p ，由于该压力扰动引起流入该区域的流量根据式（1）计算得：

$$q = \frac{Nka^3 \Delta P_p}{2R} \quad (5)$$

式中： R 为该区域周围质点的平均半径； N 为连接到该区域的导管数量。

由该流量所引起的压力扰动根据式（6）计算：

$$\Delta P_p = \frac{K_f q \Delta t}{V_d} \quad (6)$$

为保持稳定，压力响应必须小于初始的压力扰动，因此，由式（5）和式（6）得：

$$\Delta t < \frac{2RV_d}{NK_f ka^3} \quad (7)$$

根据工程实际情况建立计算模型，注入浆液与土体颗粒按上述过程进行耦合计算，研究土体注浆效应。

4 计算模型及方案

4.1 土样原型及计算参数选择

模拟土体位于某高速公路 k46+320~k46+420 段，路线经过区域位于黄河冲洪积平原区，其主要物理力学参数见表1。

模拟试验尺寸：为了使模拟试验与现场情况基本一致，模拟范围取 16 m×16 m。数值模拟基本参数见表2。

表1 土体物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

w/%	$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	e_0	I_p	I_L	$\alpha_{0.1-0.2} / \text{MPa}^{-1}$	E_s / MPa	c / kPa	$\phi / (^\circ)$	标贯 / 次	$v_s / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
29	19.0	0.69	13.1	0.77	0.34	5.5	15	26	4~6	136.5

表2 数值模拟基本参数表

Table 2 Basic parameters of numerical simulation

最大粒径 / m	最小粒径 / m	摩擦系数	颗粒法向接触刚度 / $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	颗粒刚度比	s_bond / N	n_bond / N
0.2	0.1	0.1	1.3×10^8	1	4×10^5	2×10^5

4.2 土体注浆模拟方案

土体注浆模拟试验方案包括：

（1）单孔条件下注浆压力对注浆效果的影响：模拟在单孔注浆条件下，注浆压力分别为 1.0、2.0、3.0 MPa 时的土体改性效果。

（2）多孔条件下压力注浆土体改性效果：模拟

在多孔注浆条件下，注浆压力 2.0 MPa 时，探讨压力注浆对土体产生的影响。

5 注浆模拟结果分析

5.1 单孔条件下注浆压力对注浆效果的影响

（1）注浆压力 1.0 MPa 时

模拟结果表明,土体颗粒相互作用力是随机分布的,其分布特点与边界条件有关;注入浆体压力分布影响范围半径不足 1.0 m,该范围外的土体颗粒基本不受注浆的影响;由于注浆压力较小,土体颗粒中注浆影响范围内局部虽出现拉应力,但没有出现劈裂裂缝。

土体孔隙率变化曲线表明,在注浆压力的作用下,土体孔隙率增加,即土体由于压密效应产生的土体空间被浆液充填。

(2) 注浆压力 2.0 MPa 时

土体注浆改性影响范围半径约 1.5~2.0 m,并出现明显的劈裂裂缝,该影响范围外(1.5~3.0 m)的土体颗粒之间局部产生拉应力,但拉应力较小,不足以破坏土体的黏结强度,基本不产生注浆劈裂效应。

土体孔隙率变化表明出现了明显的劈裂注浆效应,尤其是注浆孔周围 1.0 m 半径范围内土体的最终平均孔隙率最大达 16%,即土体空间置换率达 6%;而 1.5 m 以外无劈裂裂缝产生,土体孔隙率变化主要是由于注浆压密效应引起的,一般小于 4%。

图 3 为不同监测范围内土体颗粒 x 方向应变率变化过程曲线。注浆孔周围 1 m 范围内,平均最大应变率达 2.8%,4 m 范围内平均最大应变率仅 0.1%,因此,认为土体颗粒快速变形主要产生在注浆孔周围 1 m 范围内。

不同监测范围内土体 x 方向应力变化过程曲线表明(图 4),离注浆孔越近,注浆过程中土体颗粒间最终应力越大。半径为 1 m 时, x 方向最大应力约 1 MPa;半径为 4 m 时, x 方向最大应力约 0.55 MPa。

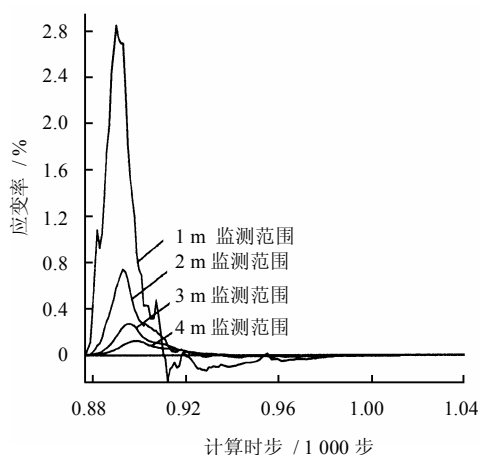


图 3 不同监测范围内土体颗粒 x 应变率变化曲线
(注浆压力 2.0 MPa)

Fig.3 Strain rate curve of particles in different monitoring zones (grouting pressure 2.0 MPa)

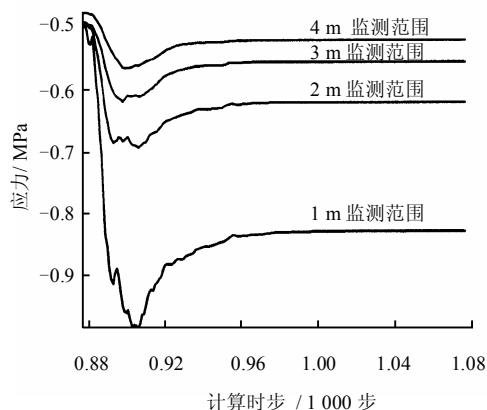


图 4 不同监测范围内土体颗粒 x 应力变化曲线
(注浆压力 2.0 MPa)

Fig.4 x -direction stress curve of soil particles in different monitoring zones (grouting pressure of 2.0 MPa)

(3) 注浆压力 3.0 MPa 时

土体颗粒相互作用力、浆体压力计算结果表明(图 5),土体注浆改性产生的劈裂裂缝范围半径不大于 2.0 m,与注浆压力为 2.0 MPa 条件下相比,劈裂裂缝范围略有扩大,但拉应力区域扩大较多。

土体孔隙率变化表明,注浆孔周围 1.0 m 半径范围内土体的最终平均孔隙率最大达 17%,即土体空间置换率大于 7%;而 1.5 m 以外,土体孔隙率变化一般小于 4%,主要是由于注浆压密效应引起的。

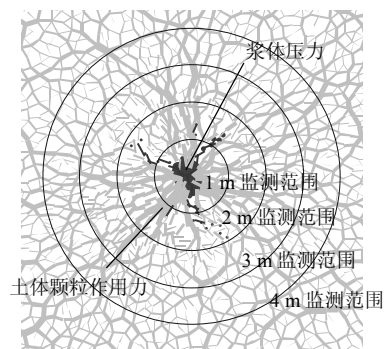


图 5 土体颗粒相互作用力、浆体压力及监测范围
(注浆压力 3.0 MPa)

Fig.5 Interaction between the soil grains, slurry pressure and scope of monitoring

5.2 多孔条件下压力注浆土体改性效果模拟

为了解和掌握多孔条件下压力注浆土体改性的效果和规律,在压力 2.0 MPa 条件下进行多孔注浆土体改性模拟。

模拟结果表明,随着注浆过程的进行,浆液挤压土体并在土体中产生劈裂裂缝,从而在多孔之间贯通、交叉,形成一个网状浆脉(图 6),使得注浆

孔周围土体得到改性,土体密实度得到相应的提高,同时土体应力状态也发生改变,监测点的颗粒单元相互作用力由注浆前 0.5 MPa 提高到 1.0~1.5 MPa,土体表现出明显的三向应力状态。

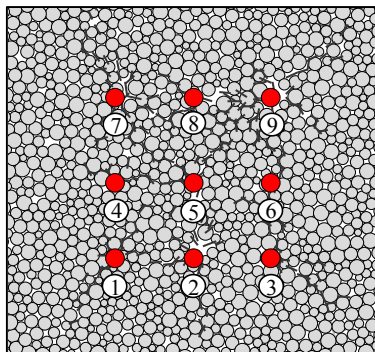


图 6 多孔注浆劈裂与压密效应

Fig.6 Splitting and compacting of multi-hole grouting

考虑了多种不同的条件及工况组合,经过大量地模拟试算,得出在模拟土体参数分别为:法向黏结强度 $n_bond = 2 \times 10^5$ 、切向黏结强度 $s_bond = 4 \times 10^5$ 、法向刚度 $k_n = 1.3 \times 10^8$ 、切向刚度 $k_s = 1.3 \times 10^8$,注浆压力为 2.0 MPa 时,注浆孔之间的土体劈裂缝产生有效的交叉和连接,改性效果好。注浆压力过低,达不到整体改性的效果,而压力过高,土体改性效果与上述模拟结果相比虽略有提高,但具体实施时,在施工工艺上存在较大的难度。

因此,在注浆土体改性设计中,注浆压力的确定,应以浆脉网络的形成或近乎形成为标志,同时在土体中注浆压力不宜高于 3.0 MPa,如果注浆改性后的土体仍不能满足使用要求,可采用其它的结构方案和工艺措施进行加强,不宜一味地提高注浆压力。

6 注浆土体改性试验

根据模拟计算结果,在前述高速公路软弱土地基进行了袖阀管压力注浆土体改性试验,注浆压力分别为 $P = 1.5, 2.0, 2.5$ MPa (孔距 2.5 m),并进行瑞利波速测定,结果见表 3 所示。

表 3 不同注浆压力下瑞利波速测定试验结果
Table 3 Testing results of Rayleigh wave speed in soil subjected to different pressures

试验编号	1-1-1~1-1-2	1-2-1~1-2-2	1-3-1~1-3-2
注浆压力/MPa	1.5	2.0	2.5
改性前瑞利波速/ $m \cdot s^{-1}$		100~185	
改性后瑞利波速/ $m \cdot s^{-1}$	120~203	150~235	170~275
波速增加数量/ $m \cdot s^{-1}$	20~45	50~65	70~95

图 7(a)和(b)分别是注浆压力为 1.5 MPa 和 2.0 MPa 条件下,土体改性前后的瑞利波频散曲线。

对比图 7(a)和(b)注浆前后瑞利波波速变化曲线,两曲线形状基本类似,说明瑞利波频散曲线反映了压力注浆土体改性后地基的整体力学性状。注浆压力较大时,瑞利波速提高幅度也大,土体改性效果较好。图 7(a)显示,在埋深 10 m 内,经改性后地基土的瑞利波速较天然地基有较大提高,该深度值即是压力注浆深度范围。同时,在整个压力注浆段内,瑞利波速的增加值并不一致,某些深度波速增加较小,说明在整个压力注浆加固深度范围内的注浆并不均匀。总体上看,在浆液固结范围内,经压力注浆改性后土体的瑞利波速度得到提高,但是,由于压力注浆自身的原因,在浆液固结范围内,水泥浆体及土体改性范围并不连续。

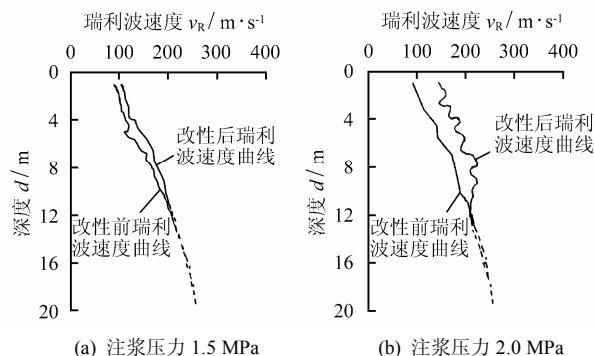


图 7 土体改性前后瑞利波速随深度变化曲线

Fig.7 Curve of Rayleigh wave speed vs depth

7 结 论

在简要分析袖阀管注浆原理及其土体改性机制类型的基础上,结合工程实例,从细观上模拟了单孔条件下,不同的注浆压力对土体改性效果的影响,同时模拟了多孔状态下浆液扩散、土体压密及劈裂效应产生的过程,模拟结果经现场试验,取得了较为满意的土体改性效果,由此得出如下主要结论:

(1) 土体在注浆压力作用下,产生压密和劈裂效应,注浆压力较小时,注浆孔周围土体局部产生拉应力,不产生劈裂缝,注浆对土体的影响范围很小。

(2) 随注浆压力的提高,注浆孔周围土体出现显著的压密效应,同时拉应力增加且范围扩大,出现劈裂缝,产生劈裂注浆效应,尤其是注浆孔周围 1.0 m 半径范围内土体的空间置换率较大。

(3) 多孔注浆模拟试验表明,针对改性土体存在一合理的注浆压力,随着注浆过程的进行,浆液

挤压土体并在土体中产生劈裂缝,从而在多孔之间贯通、交叉,形成一个网状浆脉,使得注浆孔范围内的土体得到整体改性。

上述结论对注浆土体改性过程从细观上进行了合理地解释,并对注浆机制进一步深化研究进行了有益的尝试。其他影响因素对土体改性效果的影响,有待于进一步深入探讨。

参考文献

- [1] 郝哲, 王国民, 刘斌. 土体注浆堵水的可靠性设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 379—383.
HAO Zhe, WANG Guo-min, LIU Bin. Reliability design of grouting for sopping up water in soil mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.2): 379—383.
- [2] 梁炯望. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] 李晓红, 姜德义, 刘春, 等. 公路隧道穿越采空区治理技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 910—914.
LI Xiao-hong, JIANG De-yi, LIU Chun, et al. Study on treatment technology of highway tunnel through working out area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 910—914.
- [4] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学(第 3 版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [5] 张民庆, 黄平先, 常记春, 等. 袖阀管注浆工法在国内工程施工中的应用[J]. 探矿工程, 1999, (5): 19—21.
ZHANG Min-qing, HUANG Ping-xian, CHANG Ji-chun. Application of sleeve valve barrel grouting in construction in domestic foundation engineering[J]. **Exploration Engineering**, 1999, (5): 19—21.
- [6] 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—841.
YANG Mi-jia, CHEN Ming-xiong, He Yong-nian. Current research state of grouting technology and its development direction in future[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(6): 839—841.
- [7] 张友葩, 吴顺川, 方祖烈. 土体注浆后的性能分析[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(3): 240—243.
ZHANG You-pa, WU Shun-chuan, FANG Zu-lie. Analysis of rock and soil masses properties after cement-grouting[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2004, 26(3): 240—243.
- [8] 晏启祥, 何川, 姚勇, 等. 小净距隧道施工小导管注浆效果的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(Supp. 2): 239—242.
YAN Qi-xiang, HE Chuan, YAO Yong, et al. Numerical simulation analysis of little tremie grouting effect while construction of going into portal at small-distance tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp. 2): 239—242.
- [9] 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—330.
LI Ning, ZHANG Ping, YAN Jian-wen. Numerical modeling of grouting in geo-engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 326—330.
- [10] Itasca Consulting Group, Inc. PFC2D&3D (Particle Flow Code) Theory and Background[R]. Itasca Consulting Group, 2001.

上接第 1352 页

参考文献

- [1] 夏才初, 李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
- [2] 二滩水电开发有限公司. 岩土工程安全监测手册[M]. 北京: 中国水利水电出版, 1999.
- [3] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [5] 郑岩, 顾松东, 吴斌. MARC2001 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [6] 公路隧道设计规范[S].
- [7] 张素梅, 宋玉香, 朱永全. 隧道围岩特性曲线数值模拟与分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 455—458.
ZHANG Su-mei, SONG Yu-xiang, ZHU Yong-quan. The numerical simulation and analysis of ground curve[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 455—458.