

微生物灌浆的颗粒流细观力学数值模拟研究

秦鹏飞

(郑州工业应用技术学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450010)

摘 要: 基于流固耦合原理的 PFC2D 颗粒流数值模拟程序, 运用其内置 FISHTANK 函数库和 FISH 语言, 分别定义流体域的流动方程和压力方程, 对微生物灌浆过程中菌液在地层中的扩散过程和形态进行了数值模拟计算。通过调节 PFC 命令流中的注浆压力 p 、时步 $step$ 、水力传导系数 $perm$ 等参数对菌液的注浆过程进行了模拟计算。数值模拟计算表明, 灌浆过程中菌液与地基土的作用形式与灌浆压力大小密切相关, 过高的注浆压力会对地层结构造成一定的破坏。对钻孔周围土体的应力状态进行了理论推导和分析, 理论推导结果与数值模拟结果相符。劈裂灌浆作用发生时, 孔隙率和应变率均增加。

关 键 词: 微生物灌浆; 颗粒流; 数值模拟; 注浆压力; 注浆时间; 渗透性质

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 增 1-0603-06

Mesomechanics particle flow numerical simulation research on sandy soil bio-grouting

QIN Peng-fei

(School of Architecture and Civil Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou, Henan 450010, China)

Abstract: Based on the principle of fluid-structure coupling numerical simulation program, PFC^{2D} particles flow, which uses its built-in FISHTANK function library and FISH language, the flow equation and pressure equation of fluid domain have been defined. The process of grouting slurry diffusion in the formation and shape are simulated and calculated. By adjusting the parameter of step and perm in PFC's command stream, grouting effects in different penetration gravels are obtained. Numerical simulation indicates that action modes between serous fluid and ground soil are mutually affected by the grouting pressure; foundation structure will be destroyed as the grouting pressure increases excessively. Stressed states around the drilling hole have been analyzed theoretically. The theoretical results are consistent with the simulation ones. When split grouting action occurs the porosity and strain increase.

Keywords: bio-grouting; grouting; particle flow; numerical simulation; grouting pressure; grout time; penetration

1 引 言

微生物科学家利用一些特定微生物, 通过为其提供富含钙离子和氮源的营养盐, 快速析出具有胶凝作用的碳酸钙结晶。这一微生物成矿技术, 被称为 MICP (microbial induced carbonate precipitation) 技术。经 MICP 灌浆加固的地基, 可有效地提高地基刚度、承载力及抗液化能力, 使得 MICP 灌浆技术相对于传统的水泥或化学灌浆技术具有一定优势。MICP 灌浆加固技术有望成为液化砂土地基的新型加固方法^[1-2]。

周健等^[3]基于颗粒流理论, 运用 PFC2D 计算程序的 FISHTANK 函数库和 FISH 语言, 对砂土的工程力学性质和土中的渗流过程进行了模拟。吴顺川等^[4]采用岩土颗粒流程序, 从微观上模拟了单孔和多孔条件下不同注浆压力对土体改性效果的影响。孙锋等^[5]对致密土体的劈裂注浆过程进行细观模拟研究, 分别对比了不同注浆压力和不同土体性质下浆体压力扩散及劈裂缝的发生、发展规律。袁敬强等^[6]基于散体介质理论的颗粒流方法, 研究了注浆压力、注浆时间、渗透性质及颗粒黏结强度对菌液扩散半径和注浆类型的影响规律。

已有的成果针对微生物灌浆菌液扩散机制方面的研究工作相对偏少,本文基于流固耦合的原理,从细观层面模拟研究了微生物菌液在地层中的扩散和分布形态,并对不同渗透性质土体、不同注浆时间下的灌浆效果进行了初步探索。

2 注浆细观模拟的基本理论

二维颗粒流(PFC2D)程序的基本解题思路是将实际土工问题的物理模型进行抽象和简化,从细观角度建立符合工程特点的数学模型,并对模型赋予一定的物理力学参数和初始条件、边界条件,实现对工程问题的仿真求解^[7-8]。

2.1 流体流动基本方程

若菌液在管道内的流速恒定,则其流动规律遵循平板缝隙立方定理,菌液的流量为

$$q = ka^3 \frac{p_2 - p_1}{L} \quad (1)$$

式中: k 为缝隙内的水力传导系数; a 为缝隙高度; L 为缝隙长度; $p_2 - p_1$ 为两相邻流域的压力差,正值使域 2 的流体流入域 1。

颗粒间接触力为拉力时管道孔径的计算公式为

$$a = a_0 + mg \quad (2)$$

式中: g 为两颗粒表面间的法向距离; m 为缩放因子。当管道周围颗粒间的法向接触力为压力时,管道孔径受到挤压减小,可按式(3)计算。

$$q = \frac{Nka^3 \Delta p_p}{2R}, (\Delta P_r < \Delta P_p) \quad (3)$$

式中: F 为当前荷载作用下的法向接触力; F_0 为管道孔径从 a 减小到 $a_0/2$ 时的法向压力; ΔP_p 为扰动压力。

流体域内的流体压力会随菌液的流入而不断增加,其增量的计算公式为

$$\Delta p = \frac{K_d}{V_d} (\sum q \Delta t - \Delta V_d); \Delta t = \frac{2RV_d}{NK_d ka^3} \quad (4)$$

式中: $\sum q$ 为流量; Δt 为时间; V_d 为该流体域的表观体积; K_d 为菌液的体积模量。

2.2 求解方法

若模型的某一流体域内存在扰动压力 ΔP_p , 根据 PFC^{2D} 计算原理,由于压力扰动而流入该域的流量为

$$\Delta P_r = \frac{K_d q \Delta t}{V_d}, (\Delta P_r = \Delta P_p) \quad (5)$$

式中: N 为连接到单个域的管道的数量; R 为该流体域周围颗粒的平均半径。

菌液流入后又会引起该流体域内压力的增加,由式(4)计算可得

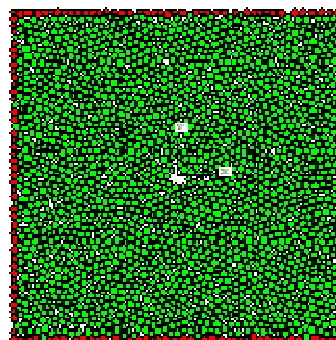
$$a = \frac{a_0 F_0}{F + F_0} \quad (6)$$

3 二维颗粒流数值模拟计算

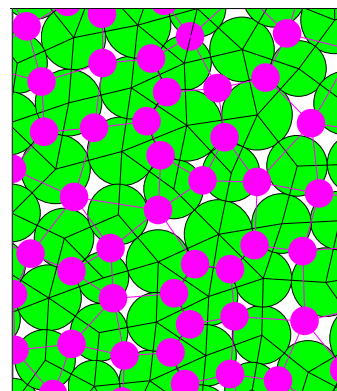
3.1 计算模型及方案

本次数值试验共生成 1 226 个颗粒单元,见图 1(a)。本计算模型的长和宽各为 4 m,内部充填密实的圆盘颗粒以模拟实际的地层结构。图 1(b)中浅紫色的圆点代表流体域(domain),由域间的紫色线段构成颗粒间的缝隙通道。模型中浅绿色的圆盘代表地层结构中的土体颗粒,连接圆颗粒间的黑色线段则代表颗粒间的接触连接。

颗粒的细观参数决定着土质的类型以及地层所处的物理状态,对数值模拟计算的结果及其准确性有直接的影响^[9]。



(a) 土体颗粒流模拟图



(b) 流体域与颗粒单元关系

图 1 二维颗粒流计算模型

Fig.1 Calculate model of PFC^{2D}

结合文献[10]的参数选取情况,本计算模型所取的细观参数见表 1。

表 1 颗粒细观参数

Table 1 Micro parameter of the particle

最小粒 径 $R_{\min}$	粒径比 $R_{\max}$	法向接 触刚度 $k_n/(N/m)$	刚度比 k_n/k_s	摩擦系 数 f_c	孔隙 率 n	法向黏 结强度 n_bond/N	切向黏 结强度 s_bond/N
3.5	1.43	5×10^7	1	0.1	0.25	5×10^5	5×10^5

3.2 计算方案

本次 PFC^{2D} 颗粒流数值计算设计了两种模拟方案: (1) 保持土体模型和细观参数不变, 对注浆压力进行调节, 研究不同注浆压力对注浆效果的影响; (2) 不同注浆时间、不同渗透性质菌液在特定注浆压力下的注浆效果。

4 灌浆压力对灌浆效果的影响

4.1 不同灌浆压力的计算结果

图 2(1)为压力 $p = 1$ MPa 作用下土体内部的应力场及菌液的扩散范围分布。从图中可以看出, 在注浆压力的作用下土体内部颗粒互相挤压并向外膨胀, 模型的外围出现了较大的压应力, 在注浆孔环向附近则出现了张拉应力, 菌液的扩散范围大约达到 100 cm (每个测量圈各间隔为 20 cm)。图 2(2)为注浆压力 $p = 2$ MPa 作用下土体内部的应力场及菌液的扩散范围分布。从图中可以看出, 2 MPa 的注浆压力已将地层启劈, 地层内出现劈裂缝 (红色线条代表劈裂缝)。图 2(2)的(b)图显示, 劈裂缝在各方向上的扩展长度不等, 大体分布在 40~80 cm 之间。图 2(3)为注浆压力 $p = 3$ MPa 作用下土体内部的应力场及菌液的扩散范围分布情况。从图中可以看出, 随着注浆压力的增加, 土体内部劈裂的范围不断扩大。劈裂缝的扩展形态更加全面完善, 在土体内部形成了纵横交错的网状浆脉, 土体劈裂灌浆达到最为理想的效果。

4.2 土体应力状态分析

由弹性理论^[1]可知, 灌浆孔四周土体在自重应力场中径向和环向承受的应力分别为

$$\sigma_r = -\frac{1 - \frac{r^2}{R^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} p_0; \quad \sigma_\varphi = -\frac{1 + \frac{r^2}{R^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} p_0 \quad (7)$$

式中: σ_r 为径向应力; σ_φ 为环向应力; p_0 为土体侧向自重应力; r 为钻孔半径; R 为灌浆影响半径; ρ 为劈裂灌浆扩散半径。

在灌浆压力 p 作用下土体环向承受拉应力和径向承受压应力, 见式 (8), 受力分析如图 3 所示。

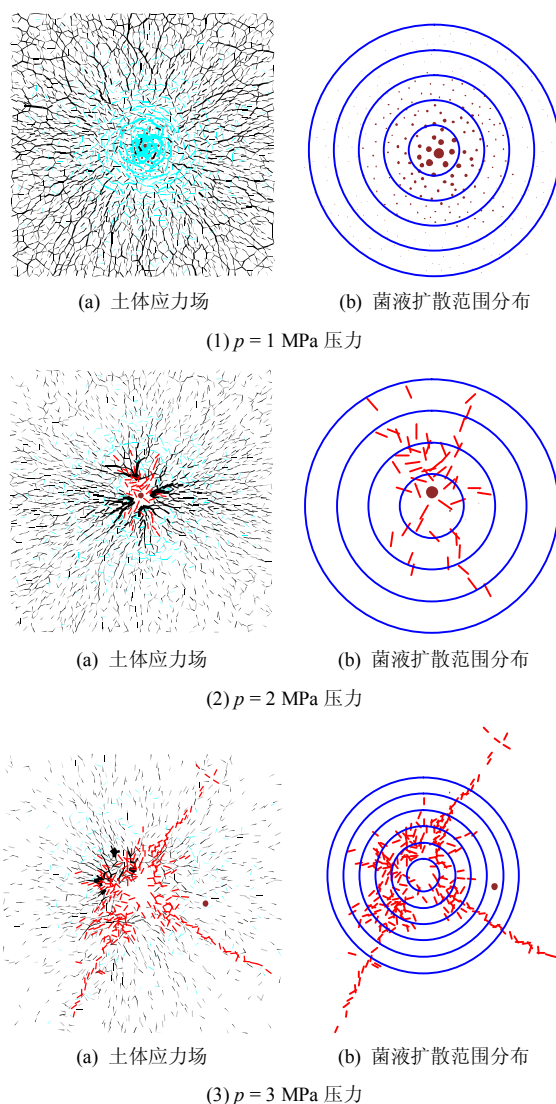


图 2 不同压力下土体应力场及菌液扩散范围
Fig.2 Soil stress field and slurry diffusion under different pressures

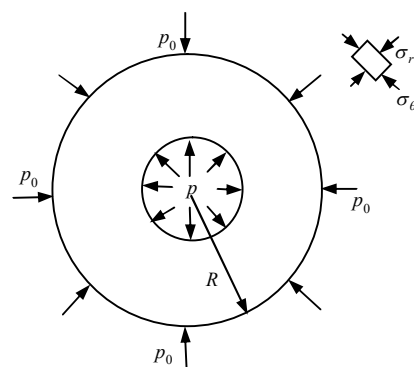


图 3 灌浆孔周围土体受力状态分析
Fig.3 Stress analysis around drilling hole

$$\sigma_r = -\frac{\frac{R^2}{r^2} - 1}{\frac{R^2}{r^2} - 1} p - \frac{1 - \frac{r^2}{R^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} p_0; \quad \sigma_\varphi = \frac{\frac{R^2}{r^2} + 1}{\frac{R^2}{r^2} - 1} p - \frac{1 + \frac{r^2}{R^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} p_0 \quad (8)$$

图 2 中的(a)图土体的应力场分布图基本表征了这一转变过程。

5 细观注浆结果分析

5.1 孔隙率变化

图 4(a)、4(b)为注浆压力 1 MPa 作用下监测半径分别为 0.5、1.0、1.5 m 范围内土体孔隙率的变化趋势线。从图中可以看出,与注浆前砂砾石土的孔隙率相比,注浆压力作用下砂砾石土体孔隙率增加

约 1.2%~1.7%。图 4(c)、4(d)为注浆压力 2 MPa 作用下监测半径分别为 0.5、1.0、1.5 m 范围内土体孔隙率的变化趋势线。从图中可以看出,注浆压力作用下砂砾石土体孔隙率整体也有所增加,增加幅度约为 1.18%~3.78%。图 4(e)、4(f)为注浆压力 3 MPa 作用下监测半径分别为 0.5、1.0、1.5 m 范围内土体孔隙率的变化趋势线。从图中可以看出,3 MPa 注浆压力作用下砂砾石土体孔隙率大幅增加,增加幅度约为 23.5%~33.3%。

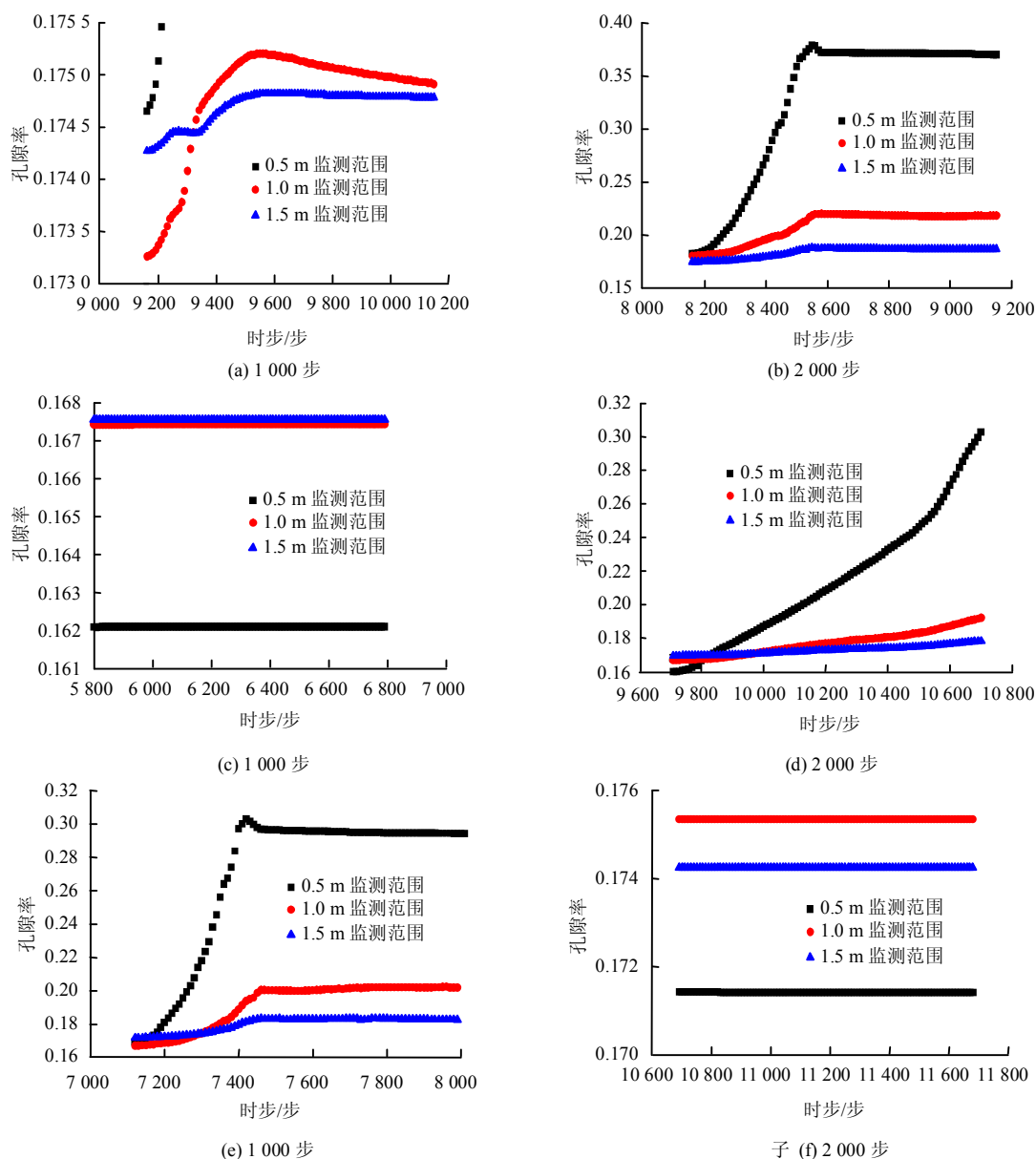


图 4 砂砾石土内部孔隙率变化
Fig.4 Porosity variety inner the sand

5.2 应变率变化

图 5 为不同监测范围内砂砾石土颗粒 x 方向应变率的变化过程曲线。从图中可以看出,各不同监测范围内砂砾石土应变率的最大变化值及变化趋势

基本相同,反映菌液的扩散过程比较平稳。1 MPa 注浆压力下 x 向应变率较小,仅为 4.5%; 2 MPa 注浆压力下 x 向应变率约为 1.3%; 3 MPa 注浆压力下 x 向应变率约为 24%。

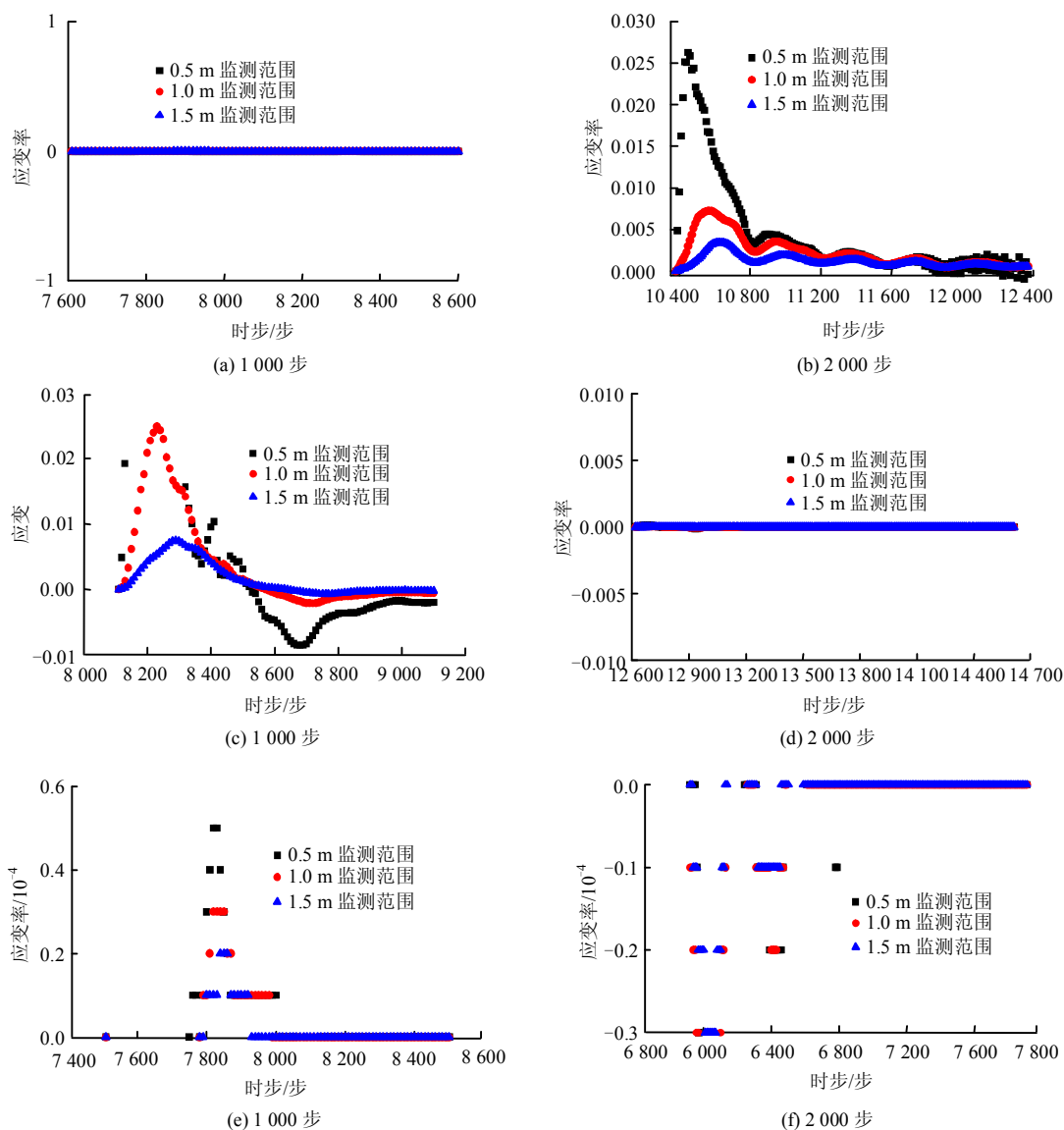


图 5 砂砾石土内部 x 向应变率变化
Fig.5 x -direction strain rate inner the sand

6 结 论

(1) 灌浆过程中菌液与地基土的作用形式与灌浆压力大小密切相关, 为达到理想的劈裂灌浆效果需要适当提高注浆压力, 但过高的注浆压力会对地层结构造成一定的破坏。

(2) 对钻孔周围土体的应力状态进行了理论推导和分析, 指出土体环向拉应力的增加导致钻孔周围产生劈裂缝, 菌液由渗透作用方式向劈裂作用方式转变, 理论推导结果与数值模拟结果相符。

(3) 劈裂灌浆作用发生时注浆压力拓展了砂砾石土空间, 孔隙率增加。劈裂灌浆对砂砾石土结构具有一定破坏作用, 应变率也有较大增加。

参 考 文 献

[1] DUAN Hong-fei, JIANG Zhen-quan, ZHU Shu-yun. New

composite grouting materials: Modified urea- formaldehyde resin with cement[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2012, 22: 195—200.

[2] van PAASSEN L A, GHOSE R, Van DER LINDEN T J M, et al. Quantifying bio-mediated ground improvement by ureolysis: A large scale biogROUT experiment[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136: 1721—1728.

[3] 周健, 池永. 砂土力学性质的细观模拟[J]. **岩土力学**, 2003, 24(6): 901—906.

ZHOU Jian, CHI Yong. Meso-mechanical simulation of sand mechanical properties[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 901—906.

[4] 吴顺川, 金爱兵, 高永涛. 袖阀管注浆技术改性土体研究及效果评价[J]. **岩土力学**, 2007, 28(7): 1353—1359.

- WU Shun-chuan, JIN Ai-bing, GAO Yong-tao. Studies of sleeve-valve-pipe grouting technique and its effect on soil reinforcement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 1353—1359.
- [5] 孙锋, 张顶立, 陈铁林, 等. 土体劈裂注浆过程的细观模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 474—480.
- SUN Feng, ZHANG Ding-li, CHEN Tie-lin, et al. Meso-mechanical simulation of fracture grouting in soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 32(3): 474—480.
- [6] 袁敬强, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 软弱地层注浆的细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊): 653—659.
- YUAN Jing-qiang, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. Mesomechanical simulation of grouting in weak strata[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.): 653—659.
- [7] 周健, 池永, 池毓蔚, 等. 颗粒流方法及PFC2D程序[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 271—274.
- ZHOU Jian, CHI Yong, XU Jian-ping. The method of particle flow and PFC2D code[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 271—274.
- [8] Itasca Consulting Group. PFC2D user's manual (version 3.1)[M]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc, 2004.
- [9] Itasca Consulting Group Inc.. PFC2D(particle flow code in 2D) theory and background[R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc., 2008.
- [10] 余华中, 阮怀宁, 褚卫江. 岩石节理剪切力学行为的颗粒流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1482—1490.
- YU Hua-zhong, RUAN Huai-ning, CHU Wei-jiang. Particle Flow Code modeling of shear behavior of rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1482—1490.
- [11] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- XU Zhi-lun. Simple course of elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- DEM analyses[J]. **Computers and Geotechnics**, 2004, 31(6): 473—489.
- [8] 申志福, 蒋明镜, 朱方园, 等. 离散元微观参数对砂土宏观参数的影响[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 160—165.
- SHEN Zhi-fu, JIANG Min-jing, ZHU Fang-yuan, et al. Influence of the micro parameters of discrete element on the macro parameters of sands[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2011, 33(2): 160—165.
- [9] JIANG Min-jing, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. **Computers and Geotechnics**, 2005, 32: 340—357.
- [4] WANG J, JOSEPH E, DOVE P E. Anisotropy-based failure criterion for interphase systems[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(5): 599—608.
- [5] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1953, 20(3): 327—344.
- [6] IWASHITA K, ODA M. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1998, 124(3): 285—292.
- [7] JIANG M J, LEROUEIL S., KONRAD J M. Insight into shear strength functions of unsaturated granulates by

上接第 595 页