

砂固结预应力锚杆锚固性能的颗粒流数值分析

张思峰¹, 周 健¹, 李艳梅²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 山东省环境保护科学研究设计院, 山东 济南 250013)

摘要: 基于颗粒流理论, 建立分析砂固结预应力锚杆锚固性能的颗粒流数值分析模型。通过数值模型试验, 对砂固结预应力锚杆的荷载 - 位移特性以及砂颗粒在载荷作用下的应力、位移及孔隙率变化规律等微观特性进行分析。分析结果表明: 加载初期挡板位移增长较快; 而随着荷载逐级增大, 表现出位移增量的逐级收敛性; 随挡板移动, 砂颗粒内部孔隙率及其相互之间的接触力从距离挡板由近及远分别经历孔隙率减小、颗粒接触力增大的过程, 并最终分别趋于稳定。通过与室内模型试验结果相对比, 验证数值模拟的正确性, 并通过对挡板埋置深度、砂体初始孔隙率、挡板宽度等因素的分析, 探讨影响砂固结预应力锚杆锚固性能的一些因素。

关键词: 数值模拟; 砂固结预应力锚杆; 锚固性能; 颗粒流

中图分类号: O 241; TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 2921 - 06

NUMERICAL ANALYSIS OF ANCHORAGE PERFORMANCE ON SAND CONSOLIDATED ANCHORAGE PRESTRESSED BOLT BY PARTICLE FLOW CODE

ZHANG Sifeng¹, ZHOU Jian¹, LI Yanmei²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shandong Academy of Environmental Science, Jinan, Shandong 250013, China)

Abstract: Based on the theory of particle flow code(PFC), the numerical analysis model is established to study the anchorage mechanism of sand consolidated anchorage prestressed bolt. According to the numerical model tests, the relationship between pulling force and displacement of loading plate is studied, and the microscopic characteristics of sand particle under the load such as the stress filed, displacement filed and the variation rule of porosity are analyzed. Conclusions can be drawn as follows: the displacement of loading plate increases quickly in the earlier stages of loading, but the increment gradually reduces with the increasing of loading. Along with the moving of loading plate, the interior porosity and the mutual contact force among sand particles will experience reducing and increasing courses with the distance extended from the loading plate, but finally they all can be reached to stabilization. By comparing the results with those of the indoor model tests, the conclusions of numerical simulation are proven to be reasonable. Finally, some factors that may influence the anchorage performance such as embedment deepness of loading plate, original porosity and the breadth of loading plate, are analyzed.

Key words: numerical simulation; sand consolidated prestressed bolt; anchorage performance; particle flow code(PFC)

1 引言

砂固结预应力锚杆是将锚杆底部与刚性挡板相

连, 而岩石孔壁与锚杆之间的环状孔隙采用砂充填。它利用砂的膨胀性产生的与岩壁之间的摩擦力作用而提供锚固力^[1], 是近几年出现的一种新型锚固技术。它最初由俄罗斯的 S. B. Stazhevsky 博士提出,

收稿日期: 2006 - 05 - 02; **修回日期:** 2006 - 07 - 15

作者简介: 张思峰(1977 -), 男, 2001年毕业于山东大学土建与水利学院, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程细观力学方面的研究工作。E-mail: sddxsf@163.com

由于这种新型锚杆安装快，不需要水泥浆等化学黏结剂，安装后可立即施加荷载，因此在国外已获得成功应用^[2~4]。但关于其锚固性能的研究国外文献少有报道，目前国内对于这种新型锚杆的研究尚处于起步阶段。陈荣等^[1, 4, 5]曾在葛修润院士的指导下进行过一系列的室内和现场试验，对砂固结预应力锚杆的锚固机制有了一定的认识。

目前人们对于锚固理论的数值分析主要采用有限单元法和有限差分法等，而锚固效应的理论和试验研究仍局限在连续介质力学和宏观试验的层面上。而砂颗粒作为一种离散介质，采用以上连续介质力学理论显然存在不合理性。P. A. Cundall 等^[6, 7]于 1995 年在离散元理论基础上提出的颗粒流理论及其数值方法，作为一种特殊的离散单元法——其基本单元都是刚性的且单元的几何形态都为球形或圆盘形，尤其适用于砂颗粒等散粒介质的力学分析，并可用于模拟大变形问题。周健等^[8~10]、刘文白等^[11, 12]都分别采用颗粒流理论及其 PFC^{2D}(particle flow code in two dimensions)程序对砂土的细观力学性质、双轴试验以及风砂土在上拔荷载作用下桩的力学特性进行过分析。但作为一种新的加固方法，人们对于砂固结预应力锚固技术还没有从细观的角度对其进行研究。本文将颗粒流理论应用于锚固工程问题的数值模拟分析，从细观角度揭示了宏观力学现象与细观砂土体颗粒之间的接触力、位移等因素之间的关系，对砂固结预应力锚固机制进行了更进一步的研究。

2 颗粒流理论基本原理

PFC^{2D} 程序是通过离散单元方法来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用。可通过单个颗粒的集合体来模拟散粒材料的特性，也可通过颗粒组合模拟介质中的细观结构特征，或者通过不同的颗粒接触模型模拟不同介质的力学特性。颗粒流理论克服了传统连续介质力学的宏观连续性假设，特别适用于模拟散体介质力学和颗粒流动问题。这种方法允许离散体做有限的位移和转动，包括颗粒之间原接触的解离和新接触的形成，它是一种时间步长增量算法，在每一步长内部重复应用牛顿第二定律和力 - 位移接触定律，牛顿第二定律确定颗粒在合力作用下运动，力 - 位移接触定律根据颗粒的位移确定颗粒接触点的接触力^[7]。

2.1 力 - 位移定律

力 - 位移定律在颗粒与颗粒或颗粒与墙体(边界)的接触处起作用，它通过接触处的法向刚度和切向刚度将接触力的分量与法向和切向相对位移联系起来。其中法向分量与法向位移的关系式为

$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad (1)$$

式中： F_i^n 为接触力法向分量， K^n 为接触点法向刚度， U^n 为接触位移量， n_i 为接触面单位法向量。

接触力切向分量与位移的关系式为

$$\Delta F_i^s = -K^s \Delta U_i^s \quad (2)$$

式中： F_i^s 为接触力切向分量， K^s 为接触点颗粒剪切刚度， ΔU_i^s 为接触位移增量的切向分量。

2.2 运动方程

在计算出作用在颗粒上的合力及合力矩后，可以用颗粒内一点的平移运动和转动运动来描述颗粒的状态。而平移及转动则分别由位移 x_i 、速度 \dot{x}_i 、加速度 \ddot{x}_i 及角速度 ω_i 、角加速度 $\dot{\omega}_i$ 来描述。任一颗粒的运动方程的矢量形式可分别表示为合力与平移运动以及合力矩与转动的关系：

$$F_i = m(\ddot{x} - g_i) \quad (3)$$

$$M_i = \dot{H}_i \quad (4)$$

式中： F_i 为施加于颗粒上的外部合力， m 为颗粒质量， g_i 为重力加速度， M_i 为合力矩， \dot{H}_i 为角动量。

2.3 应力 - 应变的计算

在连续介质中，应力一般定义为作用于单位面积上的力，而对于松散介质由于介质中的力是非连续的，变化幅度大，应变也存在同样的问题。因此松散介质中采用平均应力和平均应变的概念来表示连续介质中的相应物理量。在 PFC 中以某一点为圆心作量测圆，计算量测圆内部的平均应力、应变张量。在体积 V 内平均应力张量 $\bar{\sigma}_{ij}$ 为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \quad (5)$$

式中： σ_{ij} 为整个体积内应力张量。颗粒材料应力只存在于颗粒中，这样，积分可以由体积 V 内 N_p 个颗粒求和代替：

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{N_p} \bar{\sigma}_{ij}^{(p)} V^{(p)} \quad (6)$$

式中： $\bar{\sigma}_{ij}^{(p)}$ 为颗粒 p 的平均应力张量。为减小计算误差，应尽量使颗粒直径与量测圆直径之比缩小。

本次数值模拟中, 建立的量测圈如图 1 所示。

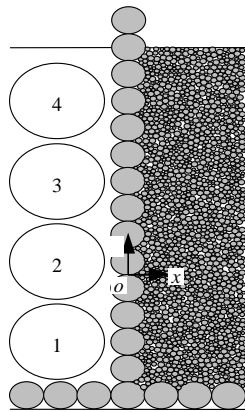


图 1 颗粒流模型及量测圈布置图

Fig.1 PFC Model and Measurement circles

3 数值模型的建立

砂土颗粒的生成采用随机的方法, 即首先给出所研究问题的边界范围和颗粒单元的比例级配, 当生成的颗粒没有跟其他颗粒或边界重合甚至超出边界时, 生成该颗粒, 否则移位重新生成。为保证颗粒生成的效率, 首先生成较小直径颗粒, 然后采用粒径放大系数再将半径复原。模型的边界即锚孔壁由“墙体”实现, 共有 5 段墙体组成, 模型宽 70 mm, 高 135 mm。将锚杆及挡板颗粒组合在一起并视为一刚体, 采用“clump”命令生成, 锚杆直径为 $\phi 10$ mm。预应力的施加通过对锚杆顶部颗粒施加拉拔力来实现。锚杆轴向定义为 y 方向, 与之垂直方向为 x 方向。PFC 模型基本参数如表 1 所示。

表 1 PFC 模型基本参数

Table 1 Parameters for the PFC model

材料名称	颗粒直径 /mm	粒径放大系数	剪切刚度 $k_s/(N \cdot m^{-3})$	法向刚度 $k_n/(N \cdot m^{-3})$	摩擦因数
砂土颗粒	0.25~0.50	2.1	1×10^7	1×10^7	1.0
锚杆、挡板	10.00		1×10^7	1×10^7	
边界墙体			1×10^9	1×10^9	1.0

4 数值模拟结果分析

4.1 荷载 - 位移曲线

通过在锚杆顶部施加张拉荷载, 并分别测定在各级荷载下挡板颗粒的位移变化, 直到挡板位移稳定为止, 以此获得张拉荷载作用下的荷载 - 位移曲

线。图 2 为单级荷载 $T = 100$ kN 作用下挡板随时步的 y 向位移曲线; 图 3 为各分级荷载及其相应位移的数值模拟曲线。由图 3 可以看出, 在加载初期挡板位移速度较大, 这主要由于颗粒压密并产生较大的相对错动和位移, 小颗粒进入大颗粒孔隙中造成孔隙体积减小而引起的。随着荷载的逐级增大, 孔隙体积的减小以及颗粒之间新的应力平衡的逐渐形成, 各分级荷载所引起的变形量在总位移量中的比例逐渐下降, 如 20~60 kN 荷载作用下位移量是 180~220 kN 荷载作用下位移量的 2.9 倍, 但总位移量仍呈缓慢增长趋势, 即位移增量呈逐级收敛。

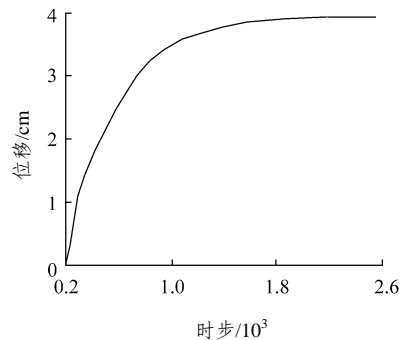


图 2 挡板时步 - 位移曲线

Fig.2 Curve of time step-displacement of baffle

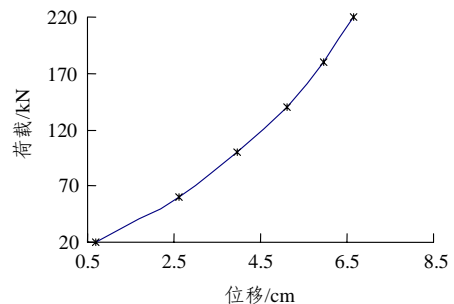


图 3 荷载 - 位移曲线

Fig.3 Curve of load-displacement

4.2 边墙侧压力及颗粒接触力变化分析

图 4 所示为 $T = 100$ kN 荷载作用下边墙所受侧压力随时步的变化曲线, 它反映出在张拉过程中所有与边墙接触的颗粒所施加到“墙”上的土压力的变化过程。由图 4 可知, 边墙所受的土压力并非呈直线形增长, 而大致呈现出指数形式增长。在张拉初期侧压力增长较快, 随着内部应力的逐渐平衡, 对边墙的侧压力也逐渐趋于一稳定值。另外还可看出, 土压力的增长呈现出波动状态, 这反映出砂颗粒在张拉过程中是一个不断变换位置并最终稳定的过程。另外, 在荷载施加过程中, 颗粒与颗粒之间

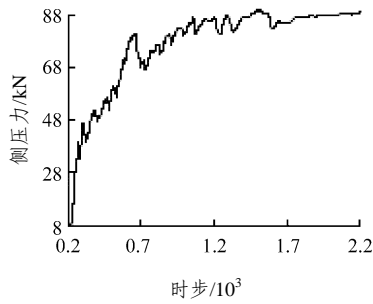


图4 边墙侧压力 - 时步曲线

Fig.4 Curve of lateral pressure-time step of side wall

相互挤压所形成的高压应力区并非沿锚杆轴向均匀分布。图 5 给出了颗粒之间法向和切向接触力的分布规律，线条的粗细表示颗粒间接触力的大小。可以明显的看出，颗粒之间的高应力区均保持在挡板附近为最大，超过挡板前方一定范围，接触力急剧衰减。随着挡板的不断移动及颗粒之间的不断挤密，此高应力区范围也不断扩展，对边墙的压力也随之增大。

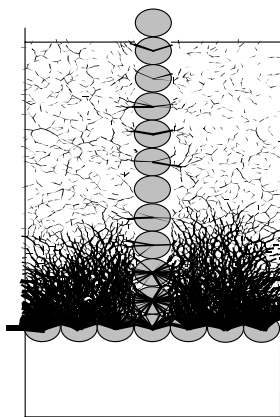


图5 颗粒接触力分布图

Fig.5 Distribution of contact forces between particles

4.3 孔隙率变化规律

通过分布于锚杆与边墙之间的量测圆(见图 1)，可以分析在锚杆张拉过程中，沿锚杆轴向不同位置处孔隙率的变化规律。由图 6 可看出，随着加载的开始，靠近挡板的砂颗粒首先产生位移，使孔隙率减小，远离挡板的砂颗粒基本没有移动。随着挡板移动，挡板前方不同位置处的砂颗粒将依次经历孔隙率减小的过程，在最终平衡后，距离挡板较近的砂颗粒孔隙率变化最大，而较远处孔隙率则变化较小，说明从挡板到封口砂颗粒密实度是逐渐减小的。

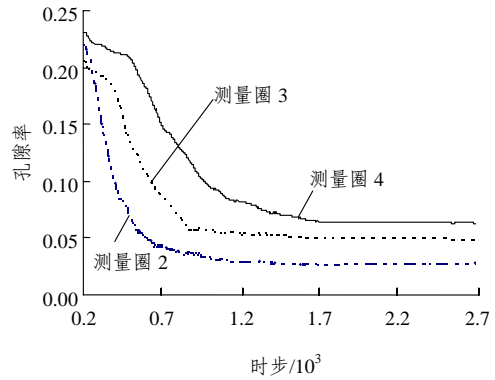


图6 不同位置处砂颗粒孔隙率变化

Fig.6 Variety of porosity at different position

4.4 砂土颗粒内应力场分布

通过量测圆分析砂土颗粒内部应力场 σ_x , σ_y 的变化规律，同样得出类似于孔隙率变化的关系曲线，即在挡板不断移动过程中，距离挡板由近至远的各量测圆压应力值依次增大，并最终分别趋于一稳定值。距离挡板越近，最终平衡时水平及竖向压应力越大，对周围岩体产生的压力也越大，从而使砂体孔隙率最小，这与以上分析是相对应的。

5 影响因素分析

5.1 挡板埋置深度影响

挡板埋置深度与极限抗拔力、锚杆位移量有直接关系。通过改变挡板至封口之间砂体长度的大小模拟挡板埋设深度对荷载 - 位移曲线的影响。图 7 为挡板埋置深度对荷载 - 位移曲线的影响。在同样的荷载下，砂体厚度较大将引起较大的位移量。由于在数值模拟中封口“墙体”被认为是一刚体，不存在破坏情况，无法考虑对于极限抗拔力的影响。但一般随锚固力的增大，应同时加大砂体长度^[1]。

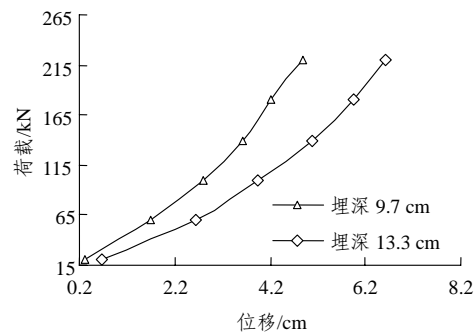


图7 挡板埋置深度对荷载 - 位移曲线的影响

Fig.7 Influence on load-displacement for different depth of Baffle

5.2 初始孔隙率影响

砂土的初始孔隙率反映了砂土的密实状况, 它将显著影响砂固结锚杆的承载性能。在同样的砂体长度及荷载情况下, 紧密砂所产生的位移要远小于松散砂所产生的位移, 同时也说明在相同的拉拔量情况下, 密砂可以提供比松散砂更大的荷载。因此, 在砂锚杆的制作过程中, 应尽量提高砂体的初始密实度。

5.3 挡板宽度影响

除了砂土密实度(通过孔隙率表示)及挡板埋置深度以外, 挡板的几何尺寸也是影响承载性能的重要因素。数值模拟中, 将挡板宽度由 70 mm 变为 50 mm, 而其余挡板埋置深度、砂体密实度及拉拔力不变。荷载施加初期, 挡板前方土体首先发生压缩变形, 挡板两侧土体基本没有位移, 形成刺入剪切破坏形式, 类似于地基基础的冲剪破坏。随着挡板的不断移动, 在挡板两侧与轴向大致呈 45° 以内的楔形砂体不断被挤密(见图 8 中虚线), 此楔形挤密区随挡板的移动最后在与刚性封口的共同作用下, 在挡板前方形成一多边形区域(由墙体及图中虚线构成), 该区域内颗粒的位移比周围土体的位移要大, 且此区域内颗粒之间接触力明显大于其他区域, 说明此区域也构成了最后荷载的承载体。与挡板宽度

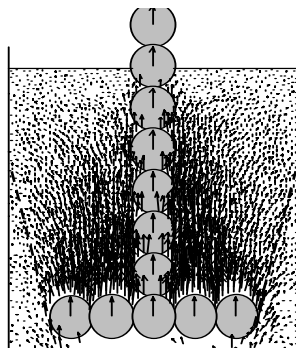


图 8 颗粒位移矢量图

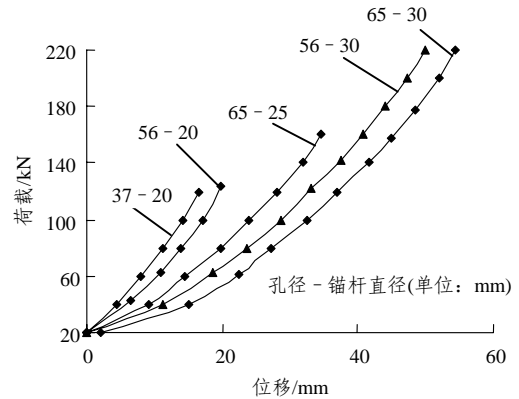
Fig.8 Vector diagram of particle displacements

为 70 mm 受荷情况相比, 挡板宽度的减小将显著增大其最终位移量。当挡板宽度小于锚孔孔径时, 将不利于砂锚杆锚固性能的发挥。

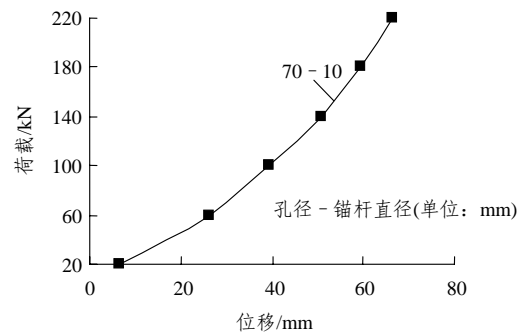
6 计算与试验结果的对比

陈荣等^[5]曾采用室内试验的方法对砂固结预应力锚杆的锚固性能进行过研究, 分别用 3 种内径($\phi 65, 56, 37$ mm)的厚壁无缝钢管模拟锚孔, 用 4

种直径($\phi 16, 20, 25, 30$ mm)的钢筋作为锚杆, 所得到的拉拔力与挡板位移关系曲线见图 9(a)。对比图 9(b)中的 PFC^{2D} 数值模拟结果, 可以认为颗粒流程序较好地模拟了砂固结预应力锚杆在张拉过程中的载荷位移特性。



(a) 室内试验结果^[5]



(b) 数值模拟结果

图 9 室内试验与数值模拟结果对比

Fig.9 Comparison between laboratory test result and numerical simulation by PFC

另外, 陈荣等^[1]还通过试验得到结论: (1) 距离挡板越近, 砂体所受压力越高; (2) 将砂体从距离挡板由近到远分为超密砂区、密砂区以及松散砂区等结论都与本文数值模拟结果相似。

7 结 论

PFC 理论是基于颗粒的细观力学特性建立起来的, 避免了连续介质本构关系的选取这一难题, 并克服了传统连续介质力学的宏观连续性假设, 对于模拟砂土等散粒体介质的力学问题具有其独特的优越性。

(1) 本文正是基于颗粒流理论, 建立了砂固结预应力锚杆颗粒流数值模型试样。通过数值模拟, 对各级荷载作用下锚杆的上拔位移与荷载的关系进

行了分析。单级荷载下, 加载初期挡板位移增长较快; 而随着荷载逐级增大, 表现出位移增量的逐级收敛性。

(2) 随着挡板的移动, 砂颗粒内部孔隙率及其相互之间的接触力并非沿锚杆轴向均匀变化, 而是从距离挡板由近及远分别经历孔隙率减小、颗粒接触力增大的过程, 并最终分别趋于不同的稳定值。在此过程中, 边墙所受总压力也不断呈波动状态增大。

(3) 较大的砂体厚度、孔隙率以及较小的挡板宽度将显著增大挡板的最终位移量, 并且在挡板宽度减小的情况下, 荷载的承载体为挡板两侧与轴向呈一定角度内的楔形砂体。

(4) 通过将数值模拟结果与室内试验结果相对比, 可以认为其所得到的规律是令人非常满意的, 但由于一些细观参数无法从宏观试验中得到, 因此在具体的数值上还无法比较, 需要进一步进行研究。

参考文献(References):

- [1] 陈 荣, 杨树斌, 吴新生, 等. 砂固结预应力锚杆的室内试验及锚固机制分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 235 - 237.(CHEN Rong, YANG Shubin, WU Xinsheng, et al. Laboratory tests on consolidated sand anchorage with prestressed bolt and analysis of anchorage mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 235 - 237.(in Chinese))
- [2] STAZHEVSKY S B. 砂锚杆的理论与实践[J]. 水利水电快报, 2000, 21(22): 26 - 28.(STAZHEVSKY S B. Theory and practice of sandy anchor[J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 2000, 21(22): 26 - 28.(in Chinese))
- [3] STAZHEVSKY S B, KOLYMBAS D. Vorgespanute anker nach dem dilatan zprinzip[J]. Boden und Felsmechanik, 1993, (4): 202 - 206.
- [4] 陈 荣, 登学璟, 胡正东, 等. 砂固结锚固室内试验及砂土强度特性理论的再认识[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 73 - 76.(CHEN Rong, DENG Xuejing, HU Zhengdong, et al. Laboratory testing study on sand-consolidated-anchorage-prestressed bolt and new suggestion on sand strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 73 - 76.(in Chinese))
- [5] 陈 荣, 彭伟东, 尹建华, 等. 砂固结预应力锚杆的试验及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 330 - 333.(CHEN Rong, PENG Weidong, YIN Jianhua, et al. Testing study and numerical simulation on sand-consolidated-anchorage-prestressed bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 330 - 333.(in Chinese))
- [6] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [7] CUNDALL P A. Particle flow in 2 dimensions user's manual and FISH reference summary[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc., 1999.
- [8] 周 健, 池 永, 池毓蔚, 等. 颗粒流方法及 PFC^{2D} 程序[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 38 - 39.(ZHOU Jian, CHI Yong, CHI Yuwei, et al. The method of particle flow and PFC^{2D} code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 38 - 39.(in Chinese))
- [9] 周 健, 池毓蔚, 池 永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 701 - 704.(ZHOU Jian, CHI Yuwei, CHI Yong, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 701 - 704.(in Chinese))
- [10] 周 健, 池 永. 土的工程力学性质的颗粒流模拟[J]. 固体力学学报, 2004, 25(4): 377 - 382.(ZHOU Jian, CHI Yong. Simulation soil properties by particle flow code[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(4): 377 - 382.(in Chinese))
- [11] 刘文白, 周 健. 上拔荷载作用下桩的颗粒流数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 516 - 521.(LIU Wenbai, ZHOU Jian. Numerical simulation of particle flow code for pile under uplifting load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 516 - 521.(in Chinese))
- [12] 刘文白, 周 健. 扩底桩的上拔试验及其颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 201 - 206.(LIU Wenbai, ZHOU Jian. Prototype tests and particle flow numerical simulation of under-reamed piles on uplift loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 201 - 206.(in Chinese))