

文章编号: 1000-7598 (2011) 09-2856-05

基于 FLAC^{3D} 的超长 大直径钢管桩 竖向承载特性模拟

张明远¹, 黎生南², 彭文韬¹, 宋华珠³

(1. 武汉理工大设计研究院, 武汉 430070; 2. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023; 3. 武汉理工大学 计算机学院, 武汉 430070)

摘 要: 近年来, 超长 大直径钢管桩在工程中的应用已越来越多, 但对其承载特性的研究却很少, 设计中仍然参考普通桩的计算理论。本文采用三维连续介质快速拉格朗日法 (FLAC^{3D}) 对实际工程中一超长 大直径开口钢管桩试桩的竖向承载特性及沉降特性进行了数值模拟分析, 并将模拟结果与静载荷竖向承载特性试验实测结果进行了对比, 两者相互补充和相互验证, 取得了比较一致的结果, 表明了本文所编制的有限差分程序用以初步模拟分析超长 大直径钢管桩承载特性的可行性。研究表明: 超长 大直径钢管桩是典型的端承摩擦型桩; 桩侧摩阻力随深度的变化很复杂, 其变化与土性密切相关; 桩身轴力向下传递的速度与桩侧摩阻力在不同土层中的发挥程度息息相关。这些结论对实际工程中超长 大直径钢管桩基础的设计具有参考意义。

关 键 词: 超长 大直径钢管桩; 三维连续介质快速拉格朗日法; 竖向承载特性

中图分类号: TU 473.1+1

文献标识码: A

Simulation of vertical bearing features for large-diameter and super-long steel pipe pile based on FLAC^{3D}

ZHANG Ming-yuan¹, LI Sheng-nan², PENG Wen-tao², SONG Hua-zhu³

(1. Institute of Design and Research, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China; 3. Institute of Computer Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: More and more large-diameter and super-long steel pipe piles are applied to engineering in recent years. But so far, few people have focused on studying their bearing characteristics. Computational theory of ordinary piles is referenced in the foundation design. Vertical bearing and settlement features are simulated for large-diameter and super-long steel pipe piles based on the fast Lagrangian analysis of continua in three dimensions (FLAC^{3D}). Then comparison between simulation results and the results of vertical static load bearing capacity test is conducted and they are complemented and verified each other. The consistent results demonstrate that the method of using the finite difference procedure in this paper to preliminarily simulate the vertical load-bearing characteristics and settlement characteristics of large-diameter and super-long steel pipe pile is feasible. The study shows that the large-diameter and super-long steel pipe pile is a typical end-bearing friction pile. The pile lateral friction resistance changes intricately with depth, which is closely related to the soil characteristics. And the transferring speed of pile axial force depends on the action of pile lateral friction resistance in the different soil. These conclusions are of significance for the reasonable large-diameter and super-long steel pipe pile foundation designed in engineering applications.

Key words: large diameter and super long steel pipe piles; fast Lagrangian analysis of continua in three dimensions; vertical bearing features

1 引 言

近年来, 超长 大直径钢管桩在超高层建筑、大跨度桥梁及深水港口等工程中应用越来越多。但到

目前为止, 对超长 大直径钢管桩的承载特性的认识尚不清楚, 设计中仍然参考普通桩的计算理论。采用数值模拟方法研究单桩的承载特性比较方便, 常用的方法有有限元法、有限差分法及边界元法等。

收稿日期: 2011-08-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 50709036)。

第一作者简介: 张明远, 男, 1968 年生, 博士, 副研究员, 主要从事教学与科研、结构设计方面的研究工作。E-mail: zmyzc@163.com

岩土介质是一种复杂的地质材料,在破坏时会产生裂缝、破裂带,呈现出不连续的状态,岩土力学问题往往都牵涉到非线性大变形问题。然而,普通有限元法是基于小变形假设提出的,不考虑应变的二次幂,边界元法却仅仅是离散边界,对非线性和变系数问题适用性不强。FLAC^{3D} 是一种基于显式有限差分法的数值分析方法,将计算模拟区域离散成一系列六面体单元,每个单元的材料模型可以不同,并且在一定的边界条件下,这些六面体单元满足既定的线性的或非线性的本构关系,单元可以在应力作用下使得材料屈服或产生塑性流动,单元网格及节点也会随着材料的屈服或塑性流动而变形,其算法非常适合于模拟大变形问题,尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域有其独到的优点^[1-5]。因此,本文采用三维连续介质快速拉格朗日法 (FLAC^{3D}) 来分析超长直径开口钢管桩的竖向承载特性。用有限差分法对试桩 GT3^[6]进行了模拟分析,并与静载荷竖向承载特性试验结果进行对比,二者结果基本一致。数值模拟与现场试验相互补充和相互验证,从一定程度上证明用本文所编制的有限差分程序来初步模拟分析超长直径钢管桩的承载特性是可行的,建模采用的边界条件比较符合实际。通过对试验和模拟结果进行对比分析,初步得出了以下几点超长直径钢管桩竖向承载特性和沉降特性。

2 计算模型及参数选择

在实际工程中土体强度远远小于桩体,桩-土体系在荷载作用下一般是土体先破坏,而此时钢管桩的桩体还处在弹性工作阶段。本文的数值模型假定土体的塑性行为符合理想弹塑性关系,不产生应变硬化或软化,土体的屈服准则采用 Mohr-Coulomb 模型;桩体为均质弹性体。

根据圣维南原理,在荷载作用下,荷载只对一定范围内的土体产生明显的影响,对于距桩轴 20R 外的土体剪应变已经很小可以忽略^[7],对于长桩通常可取桩长及桩端以下 $L/2$ 范围作为计算深。固取计算域的水平范围为 18 m,垂直范围为 93 m。

考虑到竖向荷载作用下单桩结构和荷载的对称性,取 1/2 模型进行数值分析。FLAC^{3D} 模型的轴线平行于 Z 轴,坐标轴原点位于桩顶。

2.1 网格划分及接触面单元

钢管桩采用柱形壳体网格,桩周土体采用柱形隧道外围渐变放射网格,环绕桩柱体。对模型进行网格划分时,靠近桩体的处密、远离桩体的处疏,

为模拟桩-土共同作用的实际情况,需考虑桩体与土体之间的接触与滑移,因此,在两者之间设置桩土接触面,桩侧的桩-土接触面处采用中间为空心的柱体网格,在桩端处采用柱体网格的界面单元。

2.2 边界条件

根据实际受力情况,将计算模型区域表面的侧面和底部的法向位移固定,桩顶面及地表面的法向位移自由。即模型的顶面 ($z=0$ 平面) 是一个自由面,模型的底面 ($z=-93$ m 平面) 固定于 Z 的负方向,在模型的侧面 $x=\pm 18$ m, $y=0$ 和 $y=18$ m 处施加滚支边界条件。

2.3 计算参数的选取

模型中的力学参数关系到计算的准确度和精度,因此,各土层的参数、桩体参数和接触面参数取值是数值模拟中关键的一个部分。

各层土的类型和计算参数取值见表 1。

桩周和桩端土体采用 Mohr-Coulomb 模型,在 FLAC^{3D} 程序中,岩土体变形参数不是直接采用压缩模量,而是采用剪切模量和体积模量。因此,需首先采用如下公式将压缩模量转化为变形模量^[8]:

$$E_0 = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) E_s \quad (1)$$

然后再利用以下公式将变形模量转化为剪切模量和体积模量:

$$G = \frac{E_0}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

$$K = \frac{E_0}{3(1-2\nu)} \quad (3)$$

式中: E_0 为土的变形模量; ν 为土体的泊松比; E_s 为土的压缩模量; G 为土的剪切模量; K 为土的体积模量。

桩体采用弹性模型,在 FLAC^{3D} 程序中,只需要 G 和 K 两个参数,各计算参数见表 2。

桩侧摩阻力通过桩侧表面和土层之间设置的接触面来模拟的,界面的摩擦和黏聚特性表示为钢管桩与土层之间的侧摩阻力;在桩端和土层之间也设置接触面。接触面模型,采取反复移动法建立。这样建立的几何模型在桩侧接触面和桩底接触面交接处的节点会有两个不同的 ID 号,这两个不同的 ID 号会随着载荷的增加而产生分离,产生不同的沉降,比较符合实际情况。如果采用切割法建立,则在桩侧接触面和桩端接触面交接处就不会产生两个

节点编号, 这样建立的接触面统一模型与原模型相比, 在前期载荷阶段, 桩顶的沉降位移相差不多, 但随着载荷的增加, 桩侧面产生破坏, 沉降会明显小于原模型的沉降, 这是由于桩侧接触面与桩底接

触面交接处节点没有产生分离而导致接触面同时受力造成的。由于存在滑移和分离的情况, 接触面摩擦参数 (黏聚力 c 和内摩擦角 φ) 的选取相对于刚度 (K_n 和 K_s) 更重要, 接触面各计算参数见表 3。

表 1 土体材料参数值

Table 1 Material parameters of soils

土层名称	层厚/m	泊松比 ν	变形模量 E_0 /MPa	体积模量 K /MPa	剪切模量 G /MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c /kPa	密度 $\rho/(\text{g/cm}^3)$
粉砂土	5.0	0.20	9.99	5.55	4.16	28.8	13.0	1.97
粉砂土	4.5	0.20	9.18	5.11	3.83	31.4	21.0	1.96
淤泥质粉质黏土	3.0	0.35	1.71	1.91	0.63	39.0	12.0	1.83
淤泥质黏土	2.6	0.35	1.36	1.51	0.51	3.7	10.0	1.75
含砾中砂	1.9	0.20	10.89	6.05	4.54	34.1	9.0	2.02
粉质黏土	7.0	0.30	4.58	3.82	1.76	16.2	45.5	1.95
粉砂	3.5	0.20	7.67	4.26	3.21	28.6	49.0	1.96
粉质黏土	2.0	0.35	3.01	3.33	1.11	11.0	26.0	1.90
粉质黏土	4.4	0.35	2.59	2.87	0.96	10.3	26.0	1.87
细砂	10.2	0.20	11.61	6.45	4.84	33.9	17.0	1.96
粉质黏土	6.9	0.30	5.07	4.23	1.96	13.1	37.0	1.92
粉质黏土	4.4	0.25	4.34	2.89	1.74	12.8	38.0	1.96
细砂	2.6	0.20	12.61	6.31	4.73	36.5	10.0	2.07
粗砂	6.5	0.15	11.70	6.01	5.48	35.4	7.0	2.00
粉质黏土	2.3	0.30	4.31	3.54	1.62	24.6	28.0	1.95
中砂	2.7	0.20	11.79	6.55	4.92	40.0	15.0	2.06
粉质黏土	5.8	0.25	9.01	6.01	3.61	20.2	57.0	1.99
黏土	2.8	0.25	5.74	3.83	2.31	21.3	48.0	1.98
黏土	14.3	0.25	8.03	5.35	3.21	21.7	48.0	1.96

表 2 桩体材料参数值

Table 2 Material parameters of pile

桩长 /m	入土 深度 /m	粒径 D /m	壁厚/mm		泊松比 ν	E_s /GPa	G /GPa	K /GPa	密度 /(g/cm ³)
			桩顶以下	其余					
76.7	63	1.5	22	19	0.30	206	79	171.7	7.85

表 3 接触面参数值

Table 3 Parameters of contact surfaces

接触面	范围	$K_n=K_s$ /MPa	c /kPa	$\varphi/(^\circ)$
1	5.0~9.5	471.52	6.5	17.3
1	9.5~12.5	433.28	10.5	18.8
1	12.5~15.1	116.28	6.0	2.3
1	15.1~17.0	92.520	5.0	2.2
1	17.0~24.0	514.01	4.5	20.5
1	24.0~27.5	261.52	24.5	9.7
1	27.5~29.5	361.92	5.5	17.2
1	29.5~33.9	204.13	13.0	6.6
1	33.9~44.1	176.12	13.0	6.2
1	44.1~51.0	547.98	8.5	20.3
1	51.0~55.4	289.96	18.5	7.7
1	55.4~58.0	221.25	19.0	7.7
1	58.0~63.0	535.23	5.0	21.9
2		565.11	3.5	21.2

由于钢管桩属于预制桩, 其桩-土界面的摩擦

特性比灌注桩差, 接触面上的 c 值取相邻土层的 0.5 倍, φ 值可取桩相邻土层的 0.6 倍。 K_n 和 K_s 可采用如下公式计算:

$$K_n = K_s = 10 \max[(K + 4G/3)/\Delta z_{\min}] \quad (4)$$

式中: K_n 、 K_s 分别为法向刚度和切向刚度 (MPa); $\Delta z_{\min}$ 为接触面法向上连接区域上的最小尺寸, 无量纲。

3 超长大直径钢管桩模拟试验结果分析

将用有限差分法模拟的超长大直径钢管桩的 $Q-s$ 曲线、桩身轴力和桩侧摩阻力与静载荷试验的实测结果进行了对比分析, 如图 1~3 所示。

(1) 由图 1 $Q-s$ 对比曲线可见, 两条曲线趋势基本一致, 吻合较好。在加载初期在同一荷载作用下模拟值比实测沉值略小, 而加载后期模拟值比实测沉值略大, 相对实测值, 各离散点沉降值的平均模拟误差为 10% 左右。实测和模拟结果表明, 该试桩的 $Q-s$ 曲线没有明显的拐点和陡降段, 为缓变型。这种类型的桩破坏特征点不显著, 属于渐进型破坏, 加载后期沉降仍趋于稳定, 桩周土的侧摩阻

力逐渐发挥作用, 只是桩周土的塑性区范围扩大, 塑性沉降量增加。在实际工程应用中, 可以通过允许的沉降值大小控制其极限承载力。

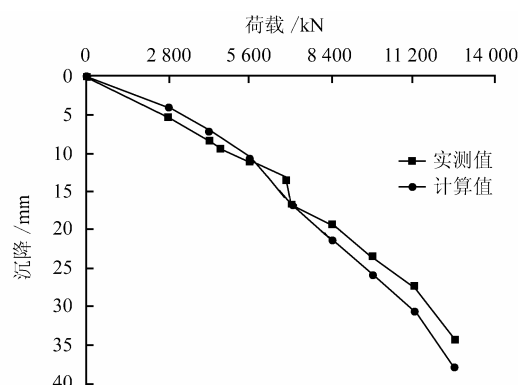


图1 荷载沉降曲线对比图

Fig.1 Load-settlement comparison curves

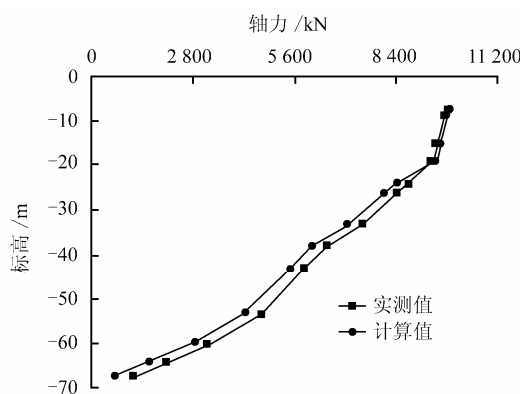


图2 轴力分布曲线对比图 ($Q=9\,800\text{ kN}$)

Fig.2 Axial force comparison curves ($Q=9\,800\text{ kN}$)

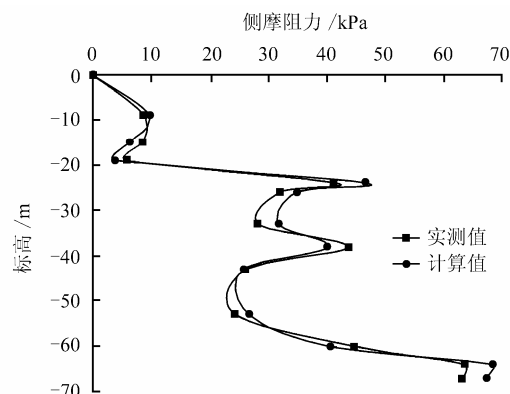


图3 侧摩阻力分布曲线对比图 ($Q=9\,800\text{ kN}$)

Fig.3 Lateral friction resistance curves ($Q=9\,800\text{ kN}$)

(2) 从图2 桩身轴力的对比曲线可知, 桩身轴力的模拟值和实测值吻合很好, 相对误差小于4%。在桩顶荷载作用下, 桩身轴力随深度的增加而减小, 但桩身底部仍然有轴力, 说明该桩是典型的端承摩擦桩。桩身上部的桩身轴力传递很慢, 20 m 以下传递速度明显增大, 而且随着深度增大, 轴力减小的

速率呈增大的趋势。这是因为摩擦型桩的桩顶荷载在向下传递过程中, 大部分竖向荷载通过桩侧摩阻力以剪应力的形式传递到桩周土体中, 桩侧摩阻力的大小决定了桩身轴力的传递速度。该超长直径钢管桩试桩桩周上部侧摩阻力很小, 桩身轴力传递慢。

(3) 从图3 可见, 试桩侧摩阻力的模拟曲线与实测值曲线趋势完全一致, 与实测值相比, 离散点的最大模拟误差为10%左右。超长直径钢管桩的侧摩阻力沿深度的分布非常复杂, 从标高0 到-10 m 的曲线可见, 桩侧摩阻力是至上而下沿着桩身逐步发挥的, 由于该厚度的土层土质均匀, 可见, 在超长直径钢管桩的上部, 侧摩阻力随深度增大而增大。从标高-10 m 到-20 m 的曲线可见, 但随着土性的变化, 侧摩阻力随深度增大而减小, 可以初步认为, 侧摩阻力的分布与深度和土层性质都有关。从标高-20 m 到-70 m 的曲线可见, 在约-20 m 深度处侧摩阻力有一次突变, 往下曲线摆动很明显, 表明该桩在深度20 m 以下侧摩阻力发挥比较充分, 且受土层特性变化影响显著。根据土力学理论可知, 剪应力是通过变形来发挥的, 与正应力有关, 正应力越大, 剪应力就越大, 因此, 桩的侧摩阻力的发挥与桩-土的相对位移量和土的水平有效应力有关。随着深度增大, 土的水平有效应力增大, 有利于桩侧摩阻力的发挥, 但从图中侧摩阻力随深度变化的趋势可见, 到达一定深度后(25 m 以下), 土的水平有效应力对侧摩阻力的有利影响减小, 侧摩阻力受土层性质的影响显著。因为钢管桩桩土刚度比很大, 在各土层中应变基本相同, 桩侧摩阻力随着土层模量的增大而增大, 因此, 在深度一定时, 桩侧摩阻力在淤泥质土、泥土、粉质黏土、细砂、中砂和岩层中依次增大。

通过对比分析可见, 本文采用有限差分法计算的结果与静载荷试验结果比较接近, 两者相互验证, 证明本文所编制的有限差分程序用来初步模拟分析超长直径钢管桩的承载特性是可行的。虽然模拟的 $Q-s$ 曲线与实测结果基本规律一致, 但仍存在一定的差异, 若忽略实测值的测量误差, 模拟计算的 $Q-s$ 曲线比实测的 $Q-s$ 曲线的沉降斜率要大, 模拟计算的轴力传递速率大于静载荷试验实测的速率, 模拟计算的桩侧摩阻力也大于实测的桩侧摩阻力, 其原因可能是:

(1) 在建模过程中, 对桩和土体的模拟以及材料选择上与实际工程有差别, 实际工程中情况比较复杂, 而模拟却采用简化模型。模型中参数的选取

也存在与实际工程不精确相等的情况。

(2) 由于桩-土间的静摩擦系数大于动摩擦系数, 桩顶刚开始加载时, 桩-土间处于滑动临界状态的剪应力大于桩-土滑动后的剪应力, 而模拟计算时并不考虑静摩擦与动摩擦的区别。

(3) 桩体和土体的变形模量及接触面的刚度都是加载前期大于加载后期, 而模拟计算时变形模量和刚度都是保持不变的。

(4) 在加载后期, 桩身上部的桩周土体存在软化现象, 这会导致桩侧摩阻力达到极限值后出现一定程度的降低, 而在模拟计算中, 并没有考虑这种软化现象。

4 结 论

(1) 超长大直径钢管桩属于端承摩擦型桩, 超长大直径钢管桩的大部分竖向荷载通过桩侧摩阻力以剪应力的形式传递到桩周土体中, 桩端阻力的大小取决于桩侧摩阻力的发展程度。

(2) 超长大直径钢管桩的 $Q-s$ 曲线为缓变型, 在不断加载的过程中, 桩周土的侧摩阻力逐渐发挥作用, 沉降的增长趋于稳定, 没有拐点, 但桩周土的塑性区范围扩大, 塑性沉降量增加, 直到桩周土发生剪切破坏。在实际工程应用中, 这类桩可以通过允许的沉降值大小控制其极限承载力。

(3) 在竖向荷载作用下, 超长大直径钢管桩桩身轴力随深度的增加而减小, 桩身轴力随深度的增加减小的速度与桩侧摩阻力沿深度变化的趋势息息相关, 桩侧摩阻力增大时, 桩身轴力减小的速度快。

(4) 在竖向荷载作用下, 超长大直径钢管桩桩侧摩阻力沿深度的分布比较复杂, 桩侧摩阻力的大小与土层参数、土层深度、桩土相对位移等有关。

总体而言, 超长大直径钢管桩桩侧摩阻力随深度的增大而增大, 但到达一定深度后, 侧摩阻力受土层深度的影响变小, 受土层参数的影响显著。

参 考 文 献

- [1] 黄润秋, 许强. 显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 346—354.
- [2] HUANG Run-qiu, XU Qiang. Application of explicit Lagrangian finite difference method in rock slope engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(4): 346—354.
- [3] 杜延华, 李冰冰. 桩锚土钉联合支护的深基坑的 FLAC^{3D} 模拟与分析[J]. 科技信息, 2008, (3): 254—257.
- [4] 王广国, 杜明芳, 侯学渊. 深基坑的大变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 509—512.
- [5] WANG Guang-guo, DU Ming-fang, HOU Xue-yuan. Large deformation analysis of deep excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(4): 509—512.
- [6] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [7] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [8] 彭文韬. 超长大直径钢管桩竖向承载特性试验分析与预测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [9] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [10] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [11] BAGI K. An algorithm to generate random dense arrangements for discrete element simulations of granular assemblies[J]. *Granular Matter*, 2005, 7(1): 31—43.
- [12] 魏群. 岩土工程中散体单元的基本原理、数值方法及实验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
- [13] SOBOLEV K, AMIRJANOV A. A simulation model of the dense packing of particulate materials[J]. *Advanced Powder Technology*, 2004, 15(3): 365—376.
- [14] TORQUATO S, TRUSKETT T M, DEBENEDETTI P G. Is random close packing of spheres well defined?[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(10): 2064—2067.
- [15] ZAMPONI F. Packings close and loose[J]. *Nature*, 2008, 53: 606—607.
- [16] JERIER J F, RICHEFEU V, IMBAULT D, et al. Packing spherical discrete elements for large scale simulations[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, 199: 1668—1676.
- [17] SCOTT G D. Packing of spheres[J]. *Nature*, 1960, 188: 908—909.
- [18] ZASKI A M. An efficient method for packing polygonal domains with disks for 2D discrete element simulation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(4): 568—576.
- [19] HERN C S, LANGER S A, LIU A J, et al. Random packing of frictionless particles[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(7): 1—4.
- [20] BENABBOU A, BOROUCAKI H, LAUG P, et al. Numerical modeling of nanostructured materials[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2010, 46(1—2): 165—180.

上接第 2855 页