

文章编号:1006-2106(2016)11-0012-05

黏性粗粒土颗粒宏观力学参数相关性研究*

詹永祥^{1**} 姚海林¹ 张静波²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

摘要:研究目的:为准确选取颗粒的细观参数以真实反映颗粒材料的宏观力学性质,利用量纲分析理论,得到黏性粗粒土数值模型的细观参数和宏观力学参数之间的相似关系。采用颗粒流软件,对黏性粗粒土材料样本开展大量的平面双轴压缩试验,并结合摩尔-库伦破坏准则,着重探讨黏性粗粒土细观参数中颗粒接触刚度系数比、颗粒摩擦系数以及颗粒接触黏结强度比与材料宏观强度参数的相关性,可为今后粗粒土颗粒材料力学参数的确定提供借鉴。

研究结论:(1)颗粒接触刚度系数比与黏聚力呈明显的对数相关,与材料内摩擦角近似呈线性相关;颗粒摩擦系数对黏聚力有微弱影响并呈多项式相关,而对内摩擦角影响较大且呈对数相关;颗粒接触黏结强度对黏聚力影响显著,而对内摩擦角几乎无影响;(2)颗粒接触黏结强度比是影响材料剪切破坏形态的重要因素,宏观力学参数会随着剪切破坏的形态不同而呈不同的相关关系;(3)该研究成果对快速、合理地确定 PFC 模型细观参数具有指导意义。

关键词:颗粒流;双轴试验;黏性粗粒土;细观参数;宏观参数

中图分类号:TU44 **文献标识码:**A

Research on the Relationship between Mesoscopic and Macroscopic Mechanical Parameters of Cohesive Coarse Grained Soil

ZHAN Yong-xiang¹, YAO Hai-lin¹, ZHANG Jing-bo²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract; Research purposes: In order to select accurately particle mesoscopic parameters to reflect macroscopic mechanical properties of granular materials, scaling law that describes relationship between micro and macro parameters of cohesive coarse grained soils is obtained by using dimensional analysis. A number of plane biaxial compression simulation tests are carried out for cohesive coarse grained soil, and based on Mohr-Coulomb failure criterion, the relationship is interpreted between particle mesoscopic parameters of cohesive materials, including particle stiffness ratio, particle friction coefficient, particle contact bond strength ratio, and material macroscopic shear strength parameters, which can provide references for determining mechanics parameters of coarse grained soil particle material in the future.

Research conclusions: (1) The relationship between particle stiffness ratio and cohesion force is obvious logarithmic correlation, particle stiffness ratio and internal friction angle meet linear correlation. Particles friction coefficient has a weak effect on cohesion force, and there is a polynomial relationship between them. While particles friction coefficient

* 收稿日期:2016-05-23

基金项目:国家重点基础研究发展规划“973”项目(2013CB036405);国家自然科学基金项目(41402317,41472290);贵州省交通运输厅科技项目(2014-122-007)

** 作者简介:詹永祥,1979年出生,男,副研究员。

has a greater influence on internal friction angle and there is logarithmic correlation between them. Contact bond strength is significantly influence on cohesion force, but almost no impact on internal friction angle. (2) Particle contact bond strength ratio is the important factors to affect material shear failure form, the micro and macro mechanics parameters have different correlation under different shear failure form. (3) The study results have directive meaning to quickly and reasonably determine the micro - parameters of PFC model.

Key words: particle flow theory; biaxial compression test; cohesive coarse grained soil; mesoscopic parameters; macroscopic parameter

1 引言

在岩土工程中,颗粒材料的力学特性与变形破坏机理非常复杂,采用传统的摩尔-库伦准则下的连续介质力学难以直接用于计算和模拟此类材料具体的破坏形式和破坏的全过程^[1]。目前颗粒离散元法已广泛应用于采矿、岩土等诸多领域,成为研究颗粒材料的重要工具。颗粒离散单元法利用牛顿第二定律和力-位移法则确定颗粒的运动和接触面上的力,其核心是颗粒接触特性,即接触本构。研究表明,细观参数决定着颗粒材料的宏观响应,只有在细观参数正确选取的前提下,离散元模拟才能获得成功。但细观参数选取具有一定的人为性和不确定性,不同文献选用的细观参数往往差异迥然。如何将细观力学参数与宏观力学参数间相互对应,细观参数与颗粒材料的宏观力学特性存在何种联系,是采用颗粒流分析方法必须面对的难题。

针对该问题,国内外许多学者展开了大量的探讨。例如,H. Y. Huang^[2]采用商业软件 PFC^{2D},并利用软件提供的 contact - bond 接触模型,研究了黏性颗粒材料微观参数和宏观参数之间的相似关系;B. D. Yang 等^[3]采用 parallel - bond 接触模型,对黏性颗粒材料进行了二维单轴压缩试验。但上述研究中都只得出了细观参数与宏观特性的定性关系,并没有研究出它们之间的定量关系式。国内徐小敏等^[4]通过室内三轴试验的 PFC^{3D}模拟和结果的回归分析,基于线性接触模型建立了颗粒材料初始杨氏模量、初始泊松比等宏观弹性常数与颗粒法向刚度、颗粒刚度比等细观弹性常数间的经验公式;尹成薇等^[5]基于颗粒流原理对砂土材料宏观强度指标与其对应的细观参数相关性进行了研究;赵国彦等^[6]利用数值分析的方法对平行黏结模型中部分细观参数(如颗粒半径比、颗粒刚度比等)对宏观变形参数的影响进行了研究;尹小涛等^[7]利用单轴压缩或双轴数值试验进行了颗粒黏结强度与内摩擦角的研究;井国庆等^[8]在 PFC^{2D}中利用连接杆将 7 个二维圆盘组合成颗粒团模拟了道砟在循环荷载作用下的破碎机理。但在以上研究成果中,如何将黏性材料

的剪切强度参数(内摩擦角、黏聚力)与颗粒流细观参数联系起来,以及如何正确有效地选取颗粒细观参数来真实反映黏性材料剪切特性,仍没有很好地解决。因此,本文针对黏性粗粒土颗粒材料样本开展了大量的平面双轴压缩试验,对 Mohr - Coulomb 破坏准则下的强度指标与其对应的细观力学参数相关性进行了系统地研究,采用非线性拟合方法给出宏、细观力学参数之间的定量关系式,为快速、合理地确定 PFC 模型细观参数提供一条很好的途径。

2 颗粒接触黏结模型与强度准则

接触黏结模型在接触点的极小区域内产生黏结作用,在机理上相当于接触点处的刚性环黏结,黏结本身不可变形,当作用力大于黏结强度时,黏结断裂,该模型为点接触,只能传递力,不能传递弯矩。接触黏结模型将能更真实和准确地反映黏土类材料的宏观力学特性。数值模拟确定的细观参数有:

几何物理参数:颗粒平均半径 R , 试样尺寸 L , 颗粒密度 ρ , 空隙率 n ;

接触模型的参数:颗粒法向接触刚度系数 k_n^{ball} , 颗粒切向接触刚度系数 k_s^{ball} , 颗粒间摩擦系数 μ^{ball} , 法向黏结强度 n_ball , 切向黏结强度 s_ball ;

界面(墙体-颗粒)参数:界面法向刚度系数 k_n^{wall} 、界面切向接触刚度系数 k_s^{wall} , 界面摩擦系数 μ^{wall} ;

试验参数:围压 σ_0 , 加载速度 v 。

量纲分析原理指出,每个物理定律都可以用几个 0 量纲幂次的量表达出来。由量纲分析原理得出无量纲控制参数组:

$$\left\{ \frac{k_n^{\text{ball}}}{k_s^{\text{ball}}}, \mu^{\text{ball}}, \frac{n_ball}{s_ball}, \frac{k_n^{\text{wall}}}{k_s^{\text{wall}}}, \mu^{\text{wall}}, \frac{L}{R}, n, \frac{R_{\max}}{R_{\min}}, \frac{\sigma_0 R}{k_n^{\text{ball}}}, \frac{v}{\sqrt{k_n^{\text{ball}} \rho}} \right\}$$

本文设计二维(PFC^{2D})双轴压缩数值试验,由于数值模拟是在准静态条件下进行,所以参数 v 和 ρ 不考虑。研究指出,当 L/R 大于 40 时,可以忽略颗粒尺寸及边界参数对材料宏观特性的影响。本文取 $L/R = 50$,且认为 R_{\max}/R_{\min} 、空隙率是衡量颗粒尺寸分布的不变指标。通过分析,建立以下定性计算公式:

$$c = \phi_c \left(\frac{k_n^{ball}}{k_s^{ball}}, \mu^{ball}, \frac{n_ball}{s_ball} \right) \quad (1)$$

$$\varphi = \phi_\varphi \left(\frac{k_n^{ball}}{k_s^{ball}}, \mu^{ball}, \frac{n_ball}{s_ball} \right) \quad (2)$$

颗粒模型的建立及加载:双轴压缩数值模型试样长2.0 m,宽1.0 m,通过建立“墙”,从而确定模型的边界。预先设定颗粒的最小半径5 mm,最大半径20 mm,空隙率15%,颗粒在最大半径与最小半径之间随机生成,并通过半径扩大法来调整模型内的颗粒分布,试验模型如图1所示。

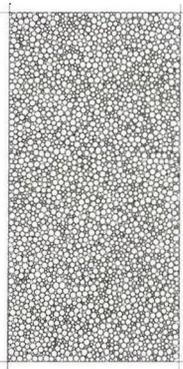


图1 双轴压缩试验模型

利用内嵌 Fish 语言通过伺服调节法施加试验荷载。围压通过墙体向内运动来施加,其大小由颗粒对墙产生的平均压力来量测;通过调整墙的运动速度来改变围压,并采用 PFC 模型伺服机制程序进行控制,伺服机制程序使围压在整个试验过程中保持一致。

偏应力通过上、下截面向内运动来施加,其大小由颗粒对上、下墙产生的平均压力来量测;运动速度与室内试验加载速度一致,为了消除一次施加瞬时速度引起的惯性力影响,速度是通过几个阶段的 N 次循环来逐渐实现的。为了探讨各细观参数对材料宏观力学特性影响的敏感性,数值试验采用控制变量法,固定次变量,调整主变量确定各主变量对函数的定量关系,数值模型基本细观参数如表1所示。

表1 数值试验基本细观参数

空隙率	法向刚度系数/(MN/m)	刚度系数比	摩擦系数	接触黏结强度比
0.15	30	1.0	0.4	1.0

本文采用摩尔-库伦强度准则对样本的 c, φ 值进行标定,由于工程中颗粒材料应力水平较低,本次数值模拟试验设置了围压为50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa四个等级,不同围压下典型应力-应变曲线如图2所示。计算的摩尔-库伦强度准则强度包络线在低应力水平下基本成直线,由此对样本的 c, φ 值进行判定。

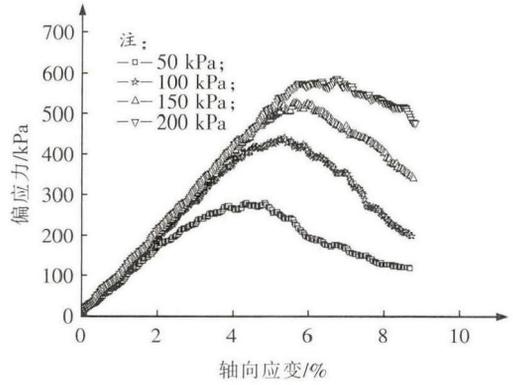


图2 不同围压下应力-应变曲线

3 黏性粗粒材料细观参数对强度参数的影响

3.1 颗粒接触刚度系数比对粗粒土宏观强度参数的影响

试验保持颗粒法向接触刚度系数 $k_n^{ball} = 30 \text{ MN/m}$ 不变,颗粒摩擦系数 $\mu^{ball} = 0.4$,颗粒接触黏结强度比 $n_ball/s_ball = 1.0$,通过调整颗粒刚度系数比 k_n^{ball}/k_s^{ball} 的大小确定其对粗粒土宏观强度参数的影响,结果如图3、图4所示。

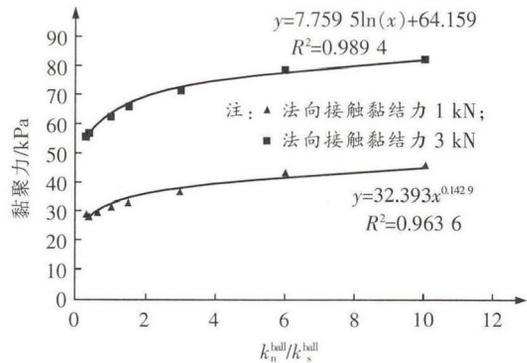


图3 接触刚度系数比与黏聚力的关系

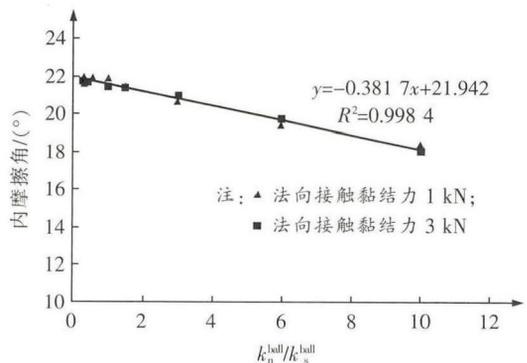


图4 接触刚度系数比与内摩擦角的关系

由图3、图4可以发现,颗粒法向和切向刚度系数

比对材料宏观力学特性的影响有一定规律性,黏聚力随刚度比的增大而增大,两者呈明显的对数分布,即:

$$c = a_{c1} \ln\left(\frac{k_n^{ball}}{k_s^{ball}}\right) + b_{c1} \quad (3)$$

式中 a_{c1} 、 b_{c1} ——待定系数。

而内摩擦角随刚度比的增大而减小,且呈明显的线性分布,即:

$$\varphi = a_{\varphi1} \frac{k_n^{ball}}{k_s^{ball}} + b_{\varphi1} \quad (4)$$

式中 $a_{\varphi1}$ 、 $b_{\varphi1}$ ——待定系数。

总体而言,刚度系数比对材料强度参数的影响较小。不同接触黏结强度的情况下,黏聚力与接触刚度比关系式中的待定系数值并不相同,而接触黏结强度对内摩擦角几乎无影响。相同接触刚度比时,颗粒接触黏结强度越大,黏聚力也越大,对黏聚力起主控作用。

3.2 颗粒摩擦系数对粗粒土宏观强度参数的影响

试验中,保持颗粒切向刚度系数 $k_n^{ball} = 30 \text{ MN/m}$, 刚度系数比 $k_n^{ball}/k_s^{ball} = 1.0$, 颗粒接触黏结强度比 $n_{ball}/s_{ball} = 1.0$, 通过调整颗粒摩擦系数 μ^{ball} 的大小确定其对材料宏观力学参数的影响,结果如图 5、图 6 所示。

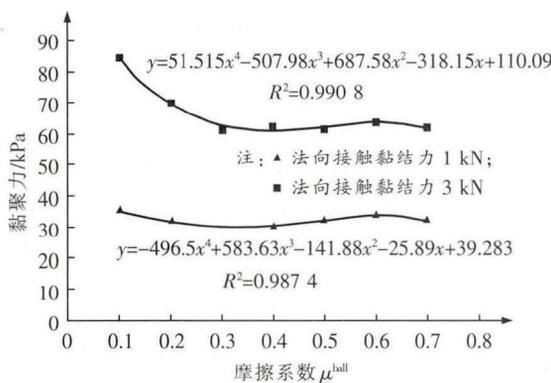


图 5 颗粒摩擦系数与黏聚力的关系

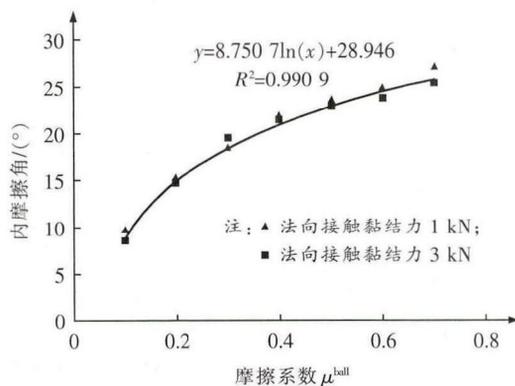


图 6 颗粒摩擦系数与内摩擦角的关系

从图 5、图 6 可以看出,当颗粒摩擦系数小于 0.3, 摩擦系数增大时,材料黏聚力表现出明显的减小;当摩擦系数大于 0.3 后,摩擦系数变化对黏聚力几乎没有影响。摩擦系数对黏聚力的影响满足多项式关系:

$$c = a_{c2}(\mu^{ball})^4 + b_{c2}(\mu^{ball})^3 + c_{c2}(\mu^{ball})^2 + d_{c2}\mu^{ball} + e_{c2} \quad (5)$$

式中 a_{c2} 、 b_{c2} 、 c_{c2} 、 d_{c2} 、 e_{c2} ——待定系数。

材料内摩擦角随颗粒摩擦系数增加先急剧上升,然后上升速度变慢,二者并不呈线性增长关系,而是呈对数相关性。

$$\varphi = a_{\varphi2} \ln(\mu^{ball}) + b_{\varphi2} \quad (6)$$

式中 $a_{\varphi2}$ 、 $b_{\varphi2}$ ——待定系数。

同样,不同接触黏结强度的情况下,黏聚力与材料摩擦系数关系式的待定系数值并不相同,而接触黏结强度对内摩擦角几乎无影响。相同摩擦系数时,接触黏结强度越大,黏聚力也越大。

3.3 颗粒接触黏结强度比对粗粒土宏观强度参数的影响

试验中,保持颗粒切向刚度系数 $k_n^{ball} = 30 \text{ MN/m}$, 颗粒刚度系数比 $k_n^{ball}/k_s^{ball} = 1.0$, 颗粒摩擦系数 $\mu^{ball} = 0.4$, 颗粒法向接触黏结强度 $n_{ball} = 10 \text{ kN}$, 通过调整颗粒切向黏结强度大小,确定接触黏结强度比 n_{ball}/s_{ball} 对材料宏观强度参数的影响,试验结果如图 7、图 8 所示。

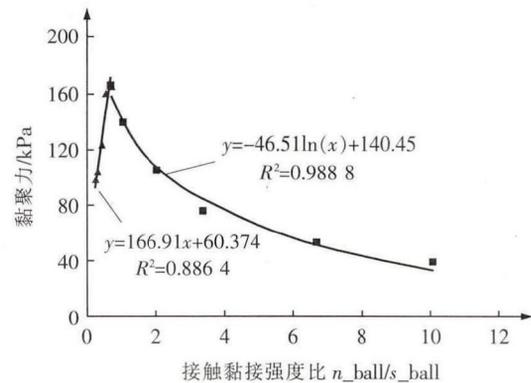


图 7 接触黏结强度比与黏聚力的关系

从图 7、图 8 可以看出,材料黏聚力和内摩擦角与接触黏结强度比也呈明显的非线性关系。当接触黏结强度比在 0 ~ 1 之间时,颗粒法向黏结强度弱于切向黏结强度,颗粒黏结点以拉裂破坏为主,黏聚力随接触黏结强度比的增大近线性增大,而内摩擦角随接触黏结强度比的增大近线性减小。当接触黏结强度比大于 1 时,颗粒法向黏结强度强于切向黏结强度,颗粒黏结点以剪切破坏为主,黏聚力随接触黏结强度比的增大先快速减小后趋于稳定,而内摩擦角随接触黏结强度比

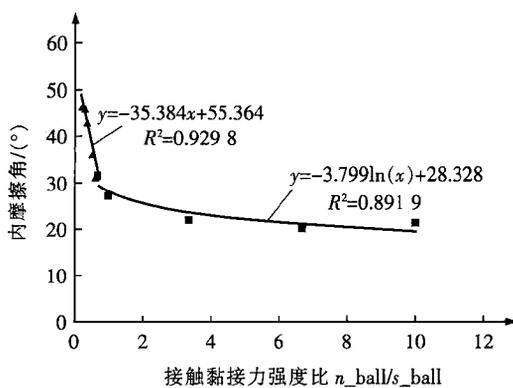


图8 接触黏结强度比与内摩擦角的关系

的增大而略有减小。

接触黏结强度比对宏观强度参数的影响可表示为:

当 $n_{ball}/s_{ball} < 1$ 时:

$$\begin{cases} c = a_{c3}(n_{ball}/s_{ball}) + b_{c3} \\ \varphi = a_{\varphi3}(n_{ball}/s_{ball}) + b_{\varphi3} \end{cases} \quad (7)$$

当 $n_{ball}/s_{ball} > 1$ 时:

$$\begin{cases} c = a_{c4}\ln(n_{ball}/s_{ball}) + b_{c4} \\ \varphi = a_{\varphi4}\ln(n_{ball}/s_{ball}) + b_{\varphi4} \end{cases} \quad (8)$$

式中 a_{c3} 、 b_{c3} 、 $a_{\varphi3}$ 、 $b_{\varphi3}$ 、 a_{c4} 、 b_{c4} 、 $a_{\varphi4}$ 、 $b_{\varphi4}$ ——待定系数。

可见,颗粒细观参数与材料宏观力学特性存在一定的关联性,然而颗粒各个细观参数与材料剪切强度的相关性不尽相同。因此,有必要根据上述的各关系式,在掌握各细观参数对剪切强度影响规律的基础上,通过若干次参数调整及试算,必可得到与实际宏观力学性质相吻合的细观参数。

4 结论

(1)黏性土的宏观抗剪强度指标 c 、 φ 值与颗粒间的细观参数密切相关,主要受颗粒接触刚度系数比、摩擦系数和接触黏结强度比等的影响。

(2)材料黏聚力是颗粒集黏结性能的宏观体现,黏结强度越大,材料黏聚力越大。颗粒接触刚度系数比与黏聚力呈明显的对数相关;颗粒摩擦系数对黏聚力有微弱影响,呈多项式相关;颗粒接触黏结强度比是影响材料的剪切破坏形态的重要因素,颗粒接触黏结强度比小于1时,与黏聚力呈线性相关,颗粒接触黏结强度比大于1时,与黏聚力呈对数相关。

(3)材料内摩擦角是颗粒集摩擦性能的宏观体现,二者近似呈对数相关性。颗粒接触刚度系数比也会对材料内摩擦角造成一定的影响且呈线性相关,而接触黏结强度对内摩擦角几乎无影响,但会随着剪切破坏的形态不同而呈不同的相关性。

(4)本文定量描述了规则粗粒土颗粒细观参数同材料宏观力学参数中的黏聚力和内摩擦角之间关系,为后继模拟具有不规则外形的颗粒聚集体宏观力学参数相关性提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] 徐峻龄,马惠民,郑静,等. 滑坡的规律研究与防治[J]. 铁道工程学报,2005(S1):333-339.
Xu Junling, Ma Huimin, Zheng Jing, etc. Research on the Rules and Controlling of Landslide[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005(S1):333-339.
- [2] Huang H Y. Discrete Element Modeling of Tool Rock Interaction[D]. Minnesota: University of Minnesota, 1999.
- [3] Yang B D, Jiao Y, Lei S T. A Study on the Effects of Microparameters on Macroproperties for Specimens Created by Bonded Particles[J]. Engineering Computations, 2006(6):607-631.
- [4] 徐小敏,凌道盛,陈云敏,等. 基于线性接触模型的颗粒材料细-宏观弹性常数相关关系研究[J]. 岩土工程学报,2010(7):991-998.
Xu Xiaomin, Ling Daosheng, Chen Yunmin, etc. Correlation of Microscopic and Macroscopic Elastic Constants of Granular Materials Based on Linear Contact Model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(7):991-998.
- [5] 尹成薇,梁冰,姜利国. 基于颗粒流方法的砂土宏-细观参数关系分析[J]. 煤炭学报,2011(S2):264-267.
Yin Chengwei, Liang Bing, Jiang Ligu. Analysis of Relationship between Macro-micro-parameters of Sandy Soil Based on Particle Flow Theory[J]. Journal of China Coal Society, 2011(S2):264-267.
- [6] 赵国彦,戴兵,马驰. 平行粘结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012(7):1491-1498.
Zhao Guoyan, Dai Bing, Ma Chi. Study of Effects of Microparameters on Macroproperties for Parallel Bonded Model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(7):1491-1498.
- [7] 尹小涛,李春光,王水林,等. 岩土材料细观、宏观强度参数的关系研究[J]. 固体力学学报,2011(S1):343-351.
Yin Xiaotao, Li Chunguang, Wang Shuilin, etc. Study on Relationship between Micro-parameters and Macro-parameters of Rock and Soil Material[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011(S1):343-351.
- [8] 井国庆,高亮,邵磊. 吹砟车维修机理离散元仿真与应用[J]. 铁道工程学报,2011(11):58-62.
Jing Guoqing, Gao Liang, Shao Lei. Simulation and Application of Maintenance Mechanism of Ballast Blowing Car with DEM[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(11):58-62.