

含石量对土石混合体压桩承载力影响的离散元分析

季顺迎*, 赵金凤

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

摘 要:土石混合体是介于土体和岩体之间的一种非均质、非连续和非线性的特殊工程地质材料,其在压桩贯入过程中的承载力受含石量的影响非常显著。本文分别采用球形颗粒和非规则镶嵌组合颗粒模拟土体颗粒和块石,对不同含石量下压桩贯入过程进行离散元数值分析。计算结果表明,桩柱阻力及其波动规律在不同含石量下有很大的差别。高含石量下的阻力要明显大于低含石量下的阻力,且其波动性也更加明显。通过对土石混合体内部力链结构的细观分析,揭示了压桩贯入过程中承载力随含石量变化的内在机理。以上研究有助于分析土石混合体材料的宏观力学行为,深入研究其在复杂工程条件下的力学特性。

关键词:土石混合体;压桩贯入;承载力;离散元模型;含石量

中图分类号:TU44;O158 **文献标志码:**A **doi:**10.7511/jslx201405009

1 引 言

近年来,地质灾害在我国乃至世界上频繁发生,其中土石混合体滑坡是最为典型的地质灾害之一^[1,2]。土石混合体在岩土与地质工程中广泛存在,并随着人类地质工程活动的加剧而得到广泛关注。但这类地质材料成分多样,颗粒离散性大,其力学性质极为复杂。因此,有必要对这类特殊地质材料的力学特性开展系统的深入研究。

土石混合体的力学特征不仅取决于材料的孔隙率、平均粒径和含石量等宏观参数^[3-6],还与土体和块石之间的接触状态、摩擦特性及含石量等细观特性密切相关^[7-9]。在土石等散体介质的力学研究中,离散性和非线性均是影响土石混合体承载力的重要因素。为研究土石混合体的力学行为,一个有效的途径是进行压桩试验模拟^[10-12]。通过分析压桩贯入过程,可获得不同含石量下摩擦力的变化规律;但是,若对土石混合体的力学行为进行深入了解,还需要在细观尺度下研究土石混合体的力学行为。采用离散元模型可对岩土材料压桩贯入过程进行模拟,分析相应散体材料的力学特征^[11-13]。

土石混合体是由土与块石构成的离散体的集合,内部块石的含量在很大程度上决定了土石混合

体的破坏机制。为研究这类特殊的散体材料在细观尺度下的力学行为,采用离散单元模型进行数值分析具有明显的优势^[6,8,9,14]。它可以很好地模拟土石混合体在压桩贯入过程中的细观结构,分析影响其承载力的力链结构及内在机理。为此,本文针对土石混合体材料的细观结构特点,采用离散单元方法,对不同含石量下的承载力进行数值分析,研究土体和块石间的力链分布规律,探讨了土石混合体材料的基本力学特性。

2 土石混合体材料的离散单元模型

针对土石混合体颗粒的结构形态,可根据需要建立不同级配的土石混合体试样。对于土石混合体中的土体材料,可采用规则球体颗粒进行模拟;而对于非规则块石,则采用具有镶嵌效应的组合颗粒单元进行构造^[15]。本文采用非规则组合颗粒构造的离散元块石模型,如图1所示。对以上非规则组合颗粒单元,采用有限分割法计算其质量、质心和转动惯量;在整体和局部坐标下分别计算组合颗粒的力矩和转动分量,并采用四元数法进行坐标转换的计算^[15]。组合颗粒的单元尺寸由相应的颗粒质量确定,而每个组合颗粒的质量则采用Monte-Carlo方法随机生成。

本文采用 Hertz-Mindlin 非线性接触模型计算颗粒单元间的作用力。在法线方向上,颗粒之间的作用力包括 Hertz 弹性力和非线性粘滞力。在颗粒接触的切线方向,基于 Mindlin 理论和 Mohr-Coulomb 摩擦定律,并忽略粘滞力影响。对于非

收稿日期:2013-05-17;修改稿收到日期:2013-08-21.

基金项目:国家重点基础研究发展规划(2010CB731502);

国家自然科学基金(41176012)资助项目.

作者简介:季顺迎*(1972-),男,博士,教授

(E-mail: jisy@dlut.edu.cn).

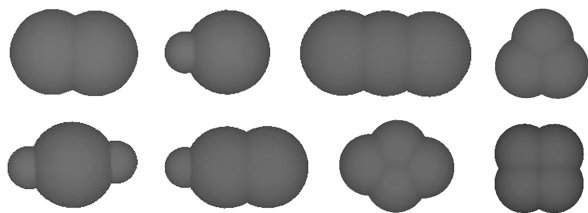


图1 土石混合体中块石的非规则离散单元模型
Fig. 1 Irregular shape of rock in soil and rock mixture based on DEM

线性接触模型,时间步长由颗粒密度、泊松比和剪切模量确定^[16]。

3 土石混合体压桩过程的离散元模拟

3.1 土石混合体试样

在对土石混合体压桩贯入过程的离散元模拟中,刚性圆筒的内径为 300 mm,高度为 400 mm,桩柱直径为 30 mm,端部锥角为 45°。颗粒单元数量根据试样总质量确定。在将试样颗粒置于圆筒内过程中,为防止颗粒生成时造成颗粒重叠并获得密实的初始排列状态,初始颗粒大小设为实际大小的 0.4 倍,然后缓慢生成所需粒径,最终土体颗粒粒径为 10 mm~12 mm,块石有效粒径为 30 mm~90 mm。图 2 为含石量分别为 0%,20%,40%,

60%,80%和 100%的土石混合体初始状态。

3.2 土石混合体压桩贯入过程

在将桩柱按一定速度贯入土石混合体试样过程中,计算各颗粒与桩柱的作用力。桩柱与颗粒接触产生的法向与切向力施加于桩柱壁面及桩端锥体,并由此确定桩柱的整体阻力。在加载过程中,将桩端部与颗粒表面接触时设为起始点,加载速率 $V=0.1 \text{ m/s}$ 。在本文离散元计算中,土体和块石的密度分别为 1800 kg/m^3 和 2650 kg/m^3 ,颗粒之间以及颗粒与桩壁间的摩擦系数分别为 1.0 和 0.5。块石和土体颗粒的弹性模量分别取 58.0 GPa 和 0.58 GPa ,其泊松比均为 0.28。

以含石量为 20%的土石混合体为例,计算得到的桩柱贯入过程中竖向阻力与位移的变化如图 3 所示。可以看出,随贯入深度的增加,摩擦阻力在初期、中期和后期呈现出不同的特征,即(1)贯入初期:由于表层颗粒受竖直方向约束较小,在贯入过程中呈现隆起现象,此时桩柱阻力 F 随贯入深度 H 的增加而缓慢增长。(2)贯入中期:随桩柱贯入深度的增加,桩柱与颗粒的接触面积逐渐增大,阻力与贯入深度总体上呈线性关系。(3)贯入后期:受底部刚性边界的影响,摩擦阻力随贯入深度的增加而迅速增大。

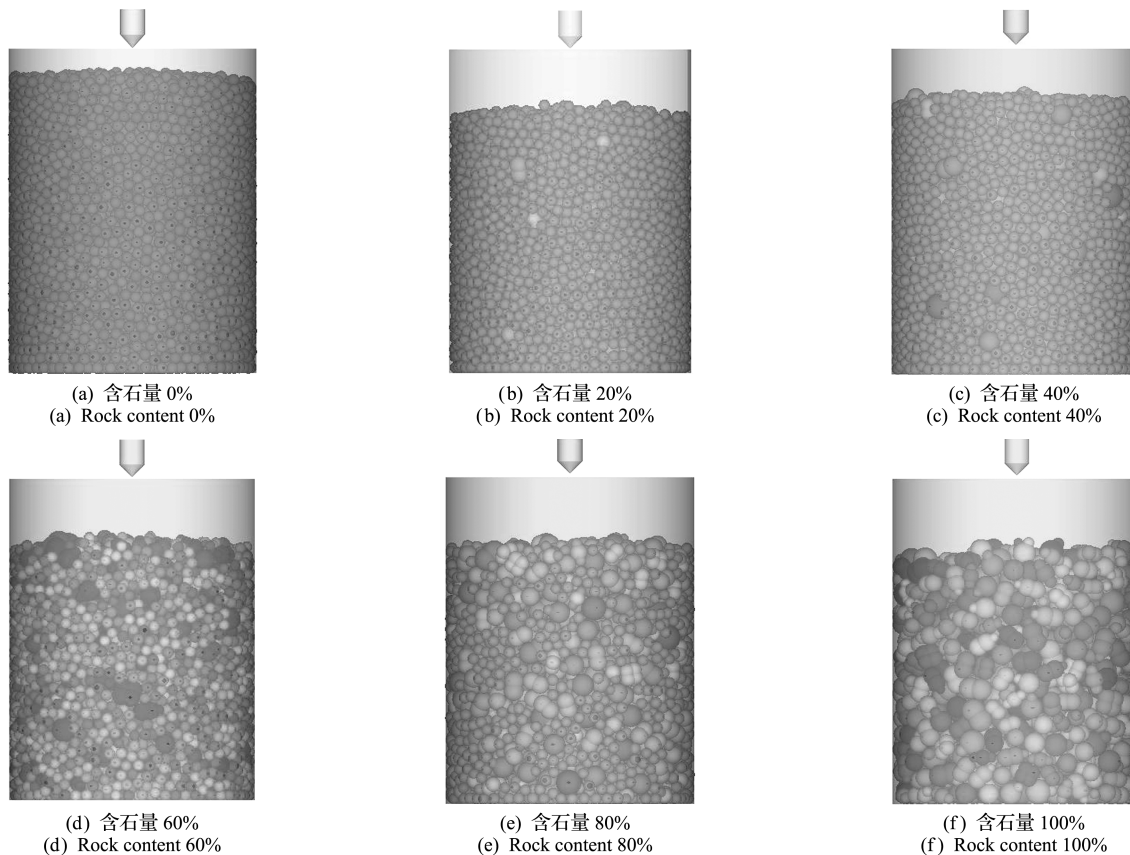


图2 不同含石量下土石混合体的离散元模型

Fig. 2 Discrete element models of soil-rock mixture at different rock contents

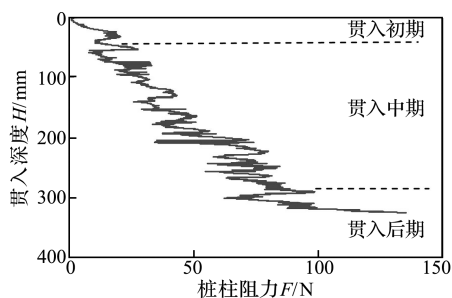


图3 不同贯入深度下的桩柱阻力

Fig. 3 Pile resistance at different penetration depths

桩柱承载力的影响因素很多,除土石混合体的材料性质和桩柱的几何性质外,侧壁和底部的边界约束也很重要^[12,17]。在周健等^[12]开展的砂土中压桩试验和离散元模拟中,其桩径要远小于容器尺寸以减小侧壁的影响。相比而言,本文采用的桩径与容器尺寸比值相对较大。为分析侧壁对桩柱承载力的影响程度,将桩径由 30 mm 减小为 18 mm,由此得到的桩柱承载力与贯入深度的变化趋势相一致,尽管其在数值上受桩径影响有很大差异。有关桩柱承载力对边界约束的敏感性分析,需在后续工作进一步开展。

为进一步分析桩柱贯入过程中桩端锥体和桩柱侧壁的阻力大小,图 4 给出含石量为 20% 时的各阻力变化情况。可以看出,在贯入前期和中期,随桩柱贯入深度的增加,锥部阻力与总贯入阻力基本重合。这表明此时端部锥体阻力是承力主体,而侧壁作用极为微小;随着桩柱继续贯入,锥体和侧壁的阻力均不断增加。但由于侧壁与颗粒的接触面积不断增加,其阻力增加得更加明显,并在桩柱整体阻力中所占的比例不断增加,最终与锥体所承受的阻力大体相同。

3.3 含石量对承载力的影响

通过对不同含石量下压桩贯入过程的离散元数值模拟,桩柱阻力的变化过程如图 5 所示。结果

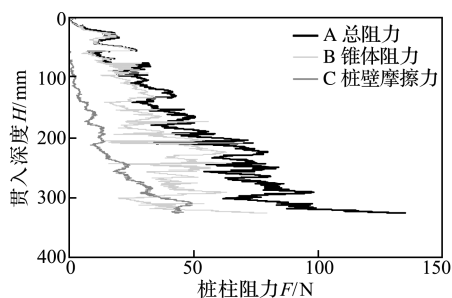


图4 锥体和侧壁阻力随压桩贯入深度的变化

Fig. 4 Resistances on cone and side wall at different pile penetrations

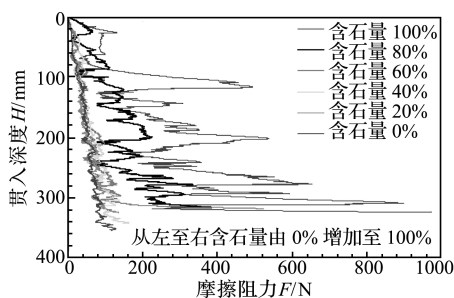


图5 不同含石量下桩柱阻力与贯入深度的关系

Fig. 5 Relationships between penetration depth and resistance under different rock contents

表明,不同含石量下,阻力的变化趋势是一致的,即随着桩柱贯入深度的增加摩擦阻力增大;此外,含石量越高,桩柱阻力就越大,且其波动性就越剧烈。特别是当含石量大于 60% 时,桩柱承载力及波动性有显著的提高。这主要是由于在桩柱贯入过程中,非规则大粒径块石在桩柱作用下会发生移动和重新排列,其对桩柱的作用力要明显高于规则小粒径的土体颗粒。此外,块石颗粒重新排列过程中会导致桩柱与颗粒的非连续接触,从而引起阻力产生波动性变化。特别是当含石量大于 60% 时,土石混合体内的块石颗粒相互接触形成有效承力结构,并由此导致承载力的突变。

4 土石混合物压桩过程的细观分析

力链是散体材料内部各颗粒间作用力的主要传递方式。从细观尺度上分析土石混合物在压桩贯入过程中颗粒单元间力链的空间结构和强度分布,将有助于揭示该散体材料的基本力学行为。以含石量为 100% 的试样为例,桩柱在不同贯入深度时的力链结构,如图 6 所示。可以看出,在贯入过程中,块石间的力链不断发生断裂、重构等演变。最为明显的是在锥部下侧,强力链分布密集,呈辐射状分布。

为分析含石量对贯入阻力的影响,可将不同含石量下的力链结构及强度特性进行对比分析。当桩贯入深度均为 180 mm 时,不同含石量下的力链结构,如图 7 所示。可以看出,随着含石量的增加,力链结构由密集逐渐变为稀疏,而力链强度则不断增大。

为分析力链的强度分布规律,可对不同贯入深度下力链的概率分布进行统计。当含石量分别为 40%, 80% 和 100% 时,不同贯入深度下的力链概率密度,如图 8 所示。可以看出,不同贯入深度下,力链的概率密度均随强度的增大而呈负指数减小。

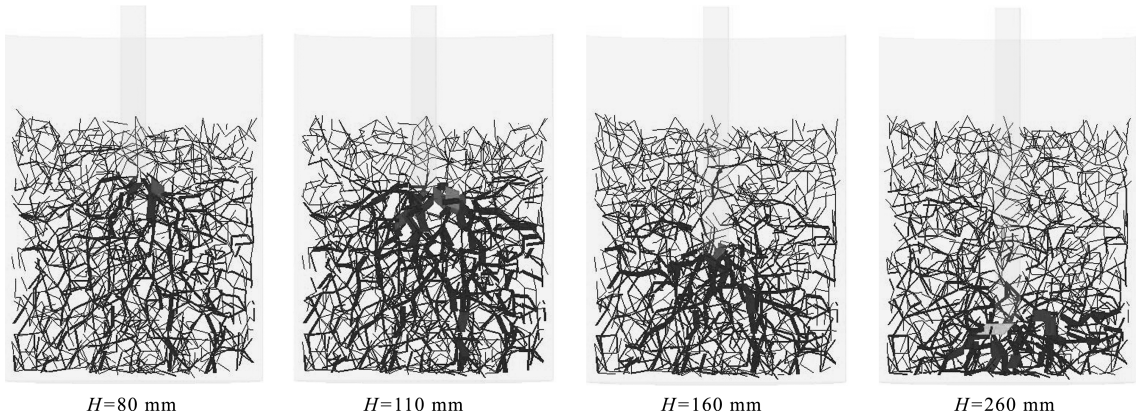


图 6 不同贯入深度下的力链分布情况
Fig. 6 Force chain distributions at different penetration depths

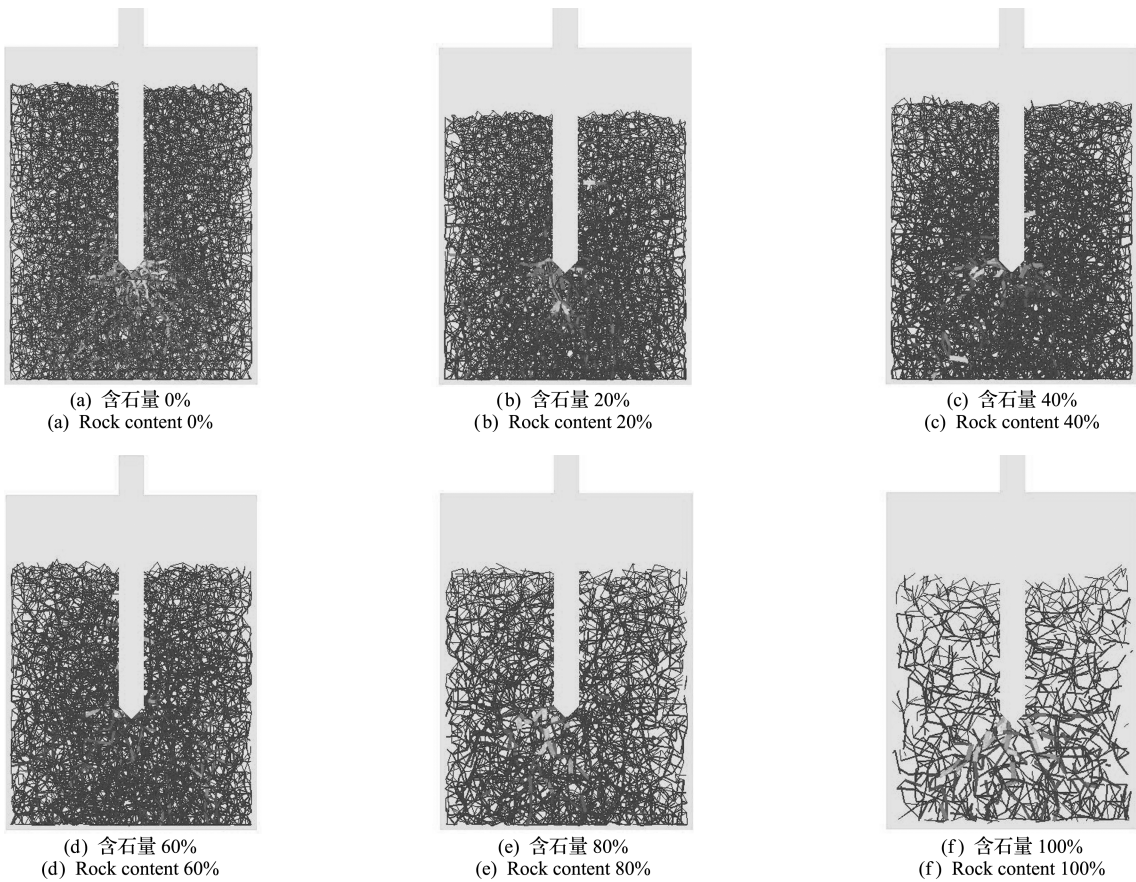


图 7 不同含石量下力链分布
Fig. 7 Force chain distributions of different rock contents

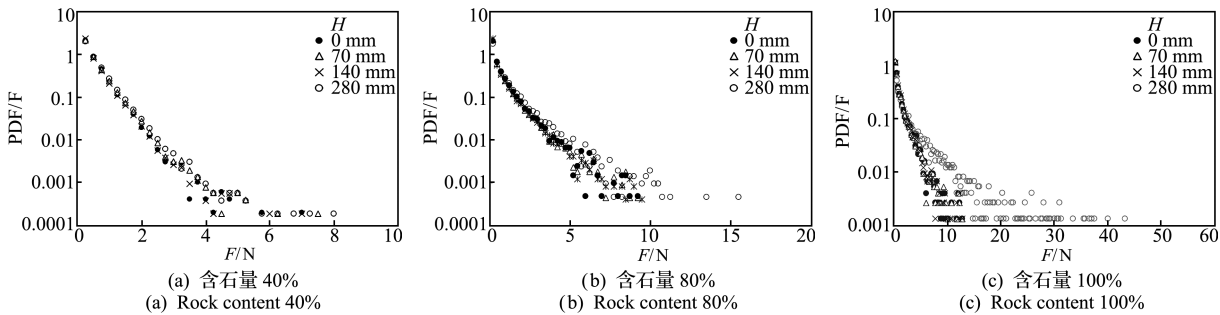


图 8 不同贯入深度时力链强度的概率密度
Fig. 8 Probability density of the force chain strength under different penetration depths

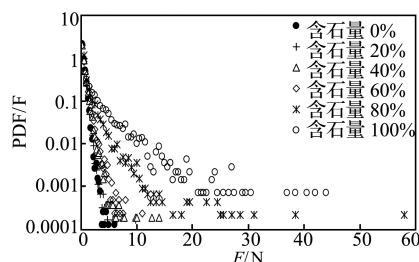


图9 不同含石量下力链强度的概率密度

Fig. 9 Probability density of the force chain strength under different rock contents

随着贯入深度的增加,强力链的分布概率会明显增加。这表明力链的平均强度会随桩柱贯入深度的增加不断增强。力链的概率分布在一定程度上反映了土石混合物试样的宏观应力状态。这也验证了桩柱阻力随贯入深度的演化规律。

通过对含石量为40%,80%和100%进行力链概率统计,可以看到不同含石量下,力链的概率密度所呈的负指数减小速率是不同的。当含石量为40%时,力链强度多集中于2.5 N~5.5 N之间,且不同贯入深度下,力链强度变化很小;当含石量为80%时,土石混合物中块石已经起到骨架的作用,而强力链的分布随着贯入深度的增加有明显的区别,强力链多集中于4.0 N~10.0 N之间;特别当含石量为100%时,力链强度则集中于7.5 N~21.0 N之间。

受土石混合物内部颗粒几何形态和力学特征的影响,不同含石量下的力链结构有很大的差异。

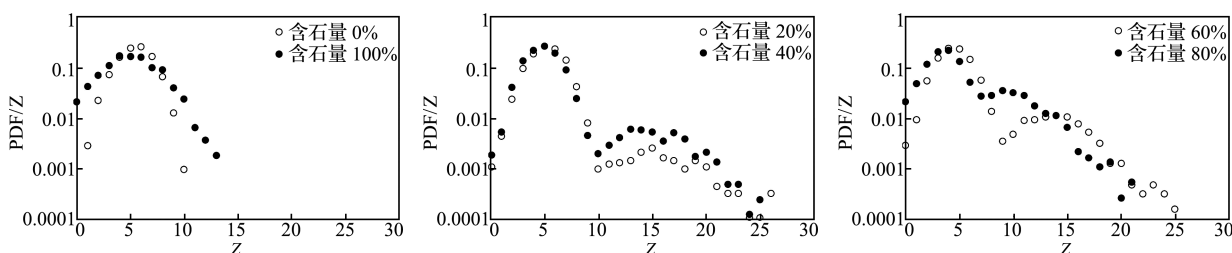


图10 不同含石量下配位数的概率密度分布

Fig. 10 Probability density distribution of the coordination number under different rock contents

5 结 语

本文针对土石混合物材料的细观结构特点,采用离散单元法对其压桩过程进行了数值模拟,分析不同含石量下承载力的变化规律,并通过力链结构讨论了含石量的影响。结果表明,桩柱阻力随贯入深度的增加而不断增大,且含石量越大,其承载力也就越大,波动性也更加明显。通过对桩柱锥体阻力以及侧面不同高度处摩擦阻力的分析,可以发现桩的端部锥体对桩的整体作用力最大,且越靠近底

当贯入深度 $H=140$ mm 时,不同含石量下的力链强度概率分布,如图9所示。可以看出,随着含石量的增加,力链概率不断向高强度发展。对于含石量为0%的土体颗粒,力链强度整体偏低;随着含石量的增加,颗粒之间的强力链不断生成,其概率密度也不断增大。特别当含石量大于60%时,强力链的概率分布明显增高。这也是导致含石量60%时桩柱承载力突变的一个重要内在因素。以上力链的概率分布密度可直观地显示贯入阻力随含石量变化的演化规律。

配位数是表征散体材料接触状态的一个重要参量,其为每个颗粒与周围相邻颗粒的平均接触数目。当贯入深度均为140 mm时,不同含石量下配位数概率分布,如图10所示。可以看出,含石量分别为0%和100%的纯土体和纯块石试样,其配位数概率分布均呈单峰值形态,而在其他含石量下则呈双峰值形态。这主要是由于无论纯土体还是纯块石材料,其试样中的粒径比较接近,其配位数峰值均在6左右。由于块石尺寸的离散性要高于土体颗粒,因此其配位数概率密度分布要相对较宽,即离散性较大。对于同时含土体和块石的试样,小粒径的土体颗粒周围会同时存在土体和块石,其配位数相对较低,而大粒径的块石颗粒会同时与土体和块石接触,其配位数则相对较高。配位数概率分布中的两个峰值,主要反映了土体颗粒的低配位数和块石颗粒的高配位数特征。

部的桩柱部分受到的摩擦力越大。通过对不同含石量下力链分布规律的分析,发现含石量越小,力链分布越密集;但是力链强度越弱。随着含石量的变化,配位数的概率分布密度有一个由纯土体单峰向土石混合物双峰,再向纯块石单峰的演化过程。

参考文献 (References):

- [1] 李世海,李 晓,刘晓宇. 工程地质力学及其应用中的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1125-1140. (LI Shi-hai, LI Xiao, LIU Xiao-yu. Some

- issues in engineering geomechanics and its applications[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **25**(6):1125-1140. (in Chinese))
- [2] 廖秋林,李晓,郝 钊,等. 土石混合体的研究现状及研究展望[J]. 工程地质学报, 2006, **14**(6):800-807. (LIAO Qiu-lin, LI Xiao, HAO Zhao, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates(RSA)[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, **14**(6):800-807. (in Chinese))
- [3] 油新华,汤劲松. 土石混合体野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(10):1537-1540. (YOU Xin-hua, TANG Jin-song. Research on horizontal push shear in situ test of soil and rock mixture [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **21**(10):1537-1540. (in Chinese))
- [4] 徐文杰,胡瑞林,曾如意. 水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7):814-818. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, ZENG Ru-yi. Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(7):814-818. (in Chinese))
- [5] 丁秀丽,张宏明,黄书岭,等. 基于细观数值试验的非饱和土石混合体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8):1553-1566. (DING Xiu-li, ZHANG Hong-ming, HUANG Shu-ling, et al. Research on mechanical characteristics of unsaturated soil-rock mixture based on numerical experiments of meso-structure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(8):1553-1566. (in Chinese))
- [6] 李世海,汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2):172-177. (LI Shi-hai, WANG Yuan-nian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D-DEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(2):172-177. (in Chinese))
- [7] 李维树,丁秀丽,邹爱清,等. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(7):1338-1342. (LI Wei-shu, DING Xiu-li, WU Ai-qing, et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in three gorges reservoir bank slopes under influence of impounding[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(7):1338-1342. (in Chinese))
- [8] 杨 冰,杨 军,常 在,等. 土石混合体压缩性的三维颗粒力学研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5):1645-1650. (YANG Bing, YANG Jun, CHANG Zai, et al. 3-D granular simulation for compressibility of soil-aggregate mixture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(5):1645-1650. (in Chinese))
- [9] 贾学明,柴贺军,郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9):2695-2703. (JIA Xue-ming, CHAI He-jun, ZHENG Ying-ren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(9):2695-2703. (in Chinese))
- [10] McDonald S A, Schneider L C R, Cocks A C F, et al. Particle movement during the deep penetration of a granular material studied by X-ray microtomography [J]. *Scripta Materialia*, 2006, **54**:191-196.
- [11] 蒋明镜. 用于触探试验分析的粒状材料本构模型之展望[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(9):1281-1288. (JIANG Ming-jing. Main features of future constitutive models for granular materials in penetration analysis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(9):1281-1288. (in Chinese))
- [12] 周 健,邓益兵,叶建忠,等. 砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4):501-507. (ZHOU Jian, DENG Yi-bing, YE Jian-zhong, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(4):501-507. (in Chinese))
- [13] 李艳洁,林剑辉,徐 泳. 圆锥指数仪贯入沙土试验的离散元法模拟[J]. 农业机械学报, 2011, **42**(11):44-48. (LI Yan-jie, LIN Jian-hui, XU Yong. Discrete element simulations of the cone penetration tests in sandy soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, **42**(11):44-48. (in Chinese))
- [14] 丁秀丽,李耀旭,王 新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3):477-484. (DING Xiu-li, LI Yao-xu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(3):477-484. (in Chinese))
- [15] Yan Y, Ji S Y. Discrete element modeling of direct shear tests for a granular material[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, **34**:978-990.
- [16] Kremmer M, Favier J F. A method for representing boundaries in discrete element modeling (Part II) kinematics[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001, **51**:1423-1436.
- [17] Stone M B, Bernstein D P, Barry R, et al. Getting to the bottom of a granular medium[J]. *Nature*, 2004, **427**:503-504.

Influences of rock content on bearing capability of soil-rock mixture during pile penetration with discrete element analysis

JI Shun-ying*, ZHAO Jin-feng

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Soil and rock mixture is a special engineering geological material with the non-homogeneous, non-continuous and non-linear mechanical characteristics. In the penetration process of pile, the rock content has obvious influence on its bearing capacity. In this paper, we use spherical particles to simulate soil material, and irregular overlapped clumps to model the rock rubble with Discrete Element Model (DEM). The bearing capacity of pile is obvious different under various rock contents. The resistance of high rock content is much higher than that of low rock content. Moreover, the fluctuation of resistance during the penetration process is more obvious under high rock content condition. The influence of rock content on bearing capacity of pile is discussed based on the distribution of inter-particle force chains on micro scale. It is effective to analyze the macroscopic mechanical behaviors of soil and rock mixture with discrete element method, especially to determine its mechanical characteristics under complex engineering conditions.

Key words: soil and rock mixture; pile penetration; bearing capability; discrete element model (DEM); rock content