

考虑颗粒破碎的砂土高应力一维压缩特性颗粒流模拟

史旦达¹, 周健^{1,2}, 贾敏才^{1,2}, 闫东霄¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:以 Toyoura 砂室内高应力一维压缩试验结果为基础, 利用二维颗粒流方法中的接触黏结模型生成簇颗粒单元来模拟实际砂土的颗粒破碎特性。高应力一维压缩数值试验中, 数值试样由 887 个簇颗粒单元组成。数值试验与室内试验结果对比表明: 数值试验得到的压缩曲线形状及颗粒破碎屈服应力大小均与 Toyoura 砂室内试验结果一致, 说明数值试验能够较好地再现实际砂土在高应力一维压缩条件下的颗粒破碎特性。与室内试验相比, 利用数值试验不仅能得到宏观的颗粒破碎现象, 而且还能通过分析内部接触力的变化和对黏结破裂位置的追踪来研究颗粒破碎的细观演化规律, 从而可进一步探讨颗粒破碎的细观力学机制。最后, 就细观参数、加荷速率、簇颗粒数量及试样平均粒径等因素变化对数值试验结果的影响进行了分析。

关键词: Toyoura 砂; 高应力一维压缩试验; 颗粒破碎; 二维颗粒流方法; 数值模拟

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)05-0736-07

作者简介:史旦达(1979-), 男, 浙江舟山人, 博士研究生, 主要从事砂土力学性质细观数值模拟及试验研究。E-mail: shidanda@163.com。

Numerical simulations of particle breakage property of sand under high pressure 1D compression condition by use of particle flow code

SHI Dan-da¹, ZHOU Jian^{1,2}, JIA Min-cai^{1,2}, YAN Dong-xiao¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the results of high pressure 1D compression laboratory tests on Toyoura sand, the cluster element which was formed by the contact-bond model in PFC^{2D} was used to simulate the particle breakage characteristics of sand under high pressure. The high pressure 1D compression numerical tests were executed with the sample consisting of 887 clusters. It was indicated that the compression curve and the yield stress at the beginning of particle breakage achieved from numerical tests were both in good agreement with those of the laboratory tests on Toyoura sand. Compared with the laboratory tests, numerical tests could not only demonstrate the macro phenomenon of particle breakage, most importantly, it could also expose the regularity of evolution of particle breakage microscopically, and would contribute to the further research of the micromechanics of particle breakage. Finally, the sensitivity of the results of numerical tests to the variation of micro parameters, loading velocity, number of clusters and mean cluster size, was also investigated.

Key words: Toyoura sand; high pressure 1D compression test; particle breakage; PFC^{2D}; numerical simulation

0 引言

粒状土颗粒破碎现象广泛存在于岩土工程实践中, 在桩端持力层、高土石坝及重力式海工建筑物地基中常常存在高应力分布区, 在这种高应力条件下, 作为填充材料或地基材料的粒状土会发生明显的颗粒破碎现象^[1]。在室内, 关于颗粒破碎现象的研究常采用高应力一维压缩试验。Terzaghi & Peck^[2]最早用一维压缩试验发现了砂土试样在高应力水平下存在较明显的颗粒破碎现象。之后, De Souza^[3]对砂样高应力一维压缩曲线中的屈服应力点进行了定义, 认为此屈服

应力点与砂样颗粒破碎密切相关, 当应力大于屈服应力后, 砂样颗粒破碎显著。Hagerty 等^[4]利用高应力一维压缩试验对砂样平均粒径与颗粒破碎屈服应力之间关系进行了试验研究, 结果表明, 砂样在高应力一维压缩条件下的颗粒破碎特性具有明显的尺寸效应, 随着平均粒径的增加, 屈服应力减小, 砂样越容易发生颗粒破碎。在砂土高应力一维压缩试验中, 由于试验

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50578122)

收稿日期: 2006-07-17

设备本身的局限性, 一般只能通过压缩前后试样颗粒级配曲线的对比分析从宏观上研究砂土颗粒破碎及其影响因素, 而无法得到整个加荷过程中试样内部接触力的变化及颗粒破碎演化的全过程, 这限制了对颗粒破碎细观力学机理的进一步研究。

离散单元法自 Cundall^[5]首次用于岩石边坡的渐进破坏分析以来, 作为研究离散介质力学行为的有力工具, 目前已受到研究者的广泛关注^[6]。本文采用的二维颗粒流方法(Particle Flow Code in 2-Dimension, PFC^{2D})属于离散单元法的一种。周健等^[7]利用 PFC^{2D}进行了砂土双轴试验模拟, 分析了试样细观参数变化与宏观力学响应之间的内在联系。池永^[8]利用 PFC^{2D}研究了砂土剪切带的形成及发展规律。然而以上研究均是在刚性圆盘颗粒的基础上进行的, 没有对 PFC^{2D}簇颗粒单元(cluster)进行开发, 而已有研究表明^[9], 由 PFC^{2D}黏结模型构造簇颗粒单元来模拟实际砂土的力学性质将比圆盘颗粒更具优越性。

本文以 Toyoura 砂室内高应力一维压缩试验结果为基础, 利用 PFC^{2D}接触黏结模型生成簇颗粒单元, 通过对簇颗粒细观参数的合理设置来模拟实际砂土的颗粒破碎特性。在数值试验加荷过程中, 通过对试样内簇颗粒黏结总数变化的记录及对黏结破裂位置的追踪, 来分析数值试样颗粒破碎的细观演化规律。最后, 就细观参数、加荷速率、簇颗粒数量及试样平均粒径等因素变化对数值试验结果的影响进行了研究。

1 Toyoura 砂室内高应力一维压缩试验

Nakata 等^[10]以 Toyoura 砂为研究对象, 对砂土在高应力一维压缩条件下的颗粒破碎现象进行了室内试验研究。Toyourea 砂粒径范围在 0.106~0.25 mm 之间, 各项物理特性指标为: 比重 $G_s=2.636$, 最大孔隙比 $e_{\max}=0.977$, 最小孔隙比 $e_{\min}=0.609$, 平均粒径 $d_{50}=0.202$, 不均匀系数 $C_u=1.56$, 曲率系数 $C_c=1.15$ 。一维压缩试样直径 50 mm, 高度 10 mm, 初始孔隙比 $e_0=0.617$ ($D_r=98\%$), 加荷速率 0.01 mm/min。

图 1 (文献[10]中图 2) 为试验得到的高应力一维压缩曲线 $e - \lg \sigma_v$ 。

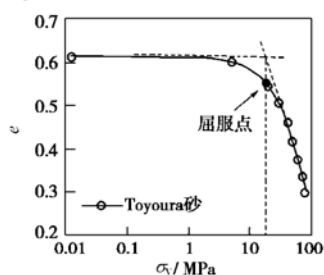


图 1 Toyoura 砂室内高应力一维压缩 $e - \lg \sigma_v$ 曲线

Fig. 1 The $e - \lg \sigma_v$ curve for Toyoura sand under high pressure 1D compression lab test

由图 1 可见, 压缩曲线由两段斜率发生明显改变的近似直线组成, 且在斜率发生显著变化处存在一个应力屈服点, 屈服点的位置可由图 1 中的示意法确定, 屈服应力大小约为 20 MPa。压缩前后的颗粒级配曲线对比表明, 当竖向应力小于屈服应力时, 试样内无明显的颗粒破碎现象发生, 试样的压缩变形很小; 当竖向应力超过屈服应力后, 试样内颗粒破碎显著, 压缩变形明显增大。

本文以文献[10]Toyourea 砂室内试验结果为基础, 对砂土在高应力一维压缩条件下的颗粒破碎特性进行数值模拟分析。

2 PFC^{2D} 黏结模型及簇颗粒单元

PFC^{2D} 黏结模型包括接触黏结模型(contact-bond model)与平行黏结模型(parallel-bond model)两种。

接触黏结模型可以假想为在颗粒之间的接触点处作用有一对具有恒定法向刚度及切向刚度的弹簧, 同时该弹簧被赋予一定的法向抗拉强度(即法向黏结强度)和切向抗剪强度(即切向黏结强度)。当颗粒之间的法向接触力大小超过其法向抗拉强度或者切向接触力大小超过其切向抗剪强度时, 黏结破裂, 此时接触黏结模型即告失效。

与接触黏结模型相比, 平行黏结模型的模型细观参数较复杂, 除需考虑细观黏结强度外, 还需考虑细观黏结刚度与黏结半径。考虑到目前有关黏结模型的研究积累的经验较少, 本文选用细观参数相对较少的接触黏结模型来模拟砂土颗粒破碎问题, 以期能够更有效地研究细观参数与宏观力学量之间的定量关系。

有关 PFC^{2D} 黏结模型的详细介绍参见文献[11]。簇颗粒单元是通过运用黏结模型(接触黏结模型或平行黏结模型均可)将若干个刚性圆盘颗粒黏结而成。可通过改变圆盘颗粒的大小、数量及黏结形式来得到不同大小及形状的簇颗粒单元。本文数值试验中簇颗粒单元由粒径相等的 7 个圆盘颗粒用接触黏结模型黏结而成, 每个簇颗粒单元具有 12 个初始黏结, 簇颗粒形状见图 2, 图中黑实线表示初始黏结所在位置。

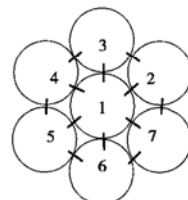


图 2 簇颗粒形状

Fig. 2 Shape of cluster

3 数值试样制备及细观参数设置

3.1 数值试样制备

与室内试验一样,数值试验也可分制样和加荷两大步。数值试样粒径按实际 Toyoura 砂粒径范围控制,级配服从均匀分布,且处于初始密实状态。试样制备具体可分以下几步:

- (1) 在长 5 mm,高 5 mm 的二维空间内,按最小粒径 0.1 mm,最大粒径 0.25 mm 生成级配服从均匀分布的圆盘颗粒,控制初始孔隙率为 0.1。
- (2) 利用 Fish 函数记录圆盘颗粒的位置和粒径。
- (3) 删去圆盘颗粒,且在原来位置生成与圆盘颗粒粒径相等的簇颗粒,簇颗粒形状如图 2 所示。
- (4) 施加重力,循环 80000 步,簇颗粒在重力作用下沉积,并达到初始平衡状态。
- (5) 利用 History 命令记录沉积过程中顶部簇颗粒的竖向位移,由此调整顶部墙体的位置。
- (6) 卸除重力,等待加荷开始。

沉积完成后的最终试样如图 3 所示,试样高 4.54 mm,长 5 mm,初始面积 22.7 mm²。共有簇颗粒 887 个,初始黏结总数 10644 个,簇颗粒初始实体总面积 18.265 mm²(簇颗粒未破碎之前,簇颗粒内部孔隙的面积归于簇颗粒的实体面积),计算得到试样加荷前的初始孔隙率为 0.195。

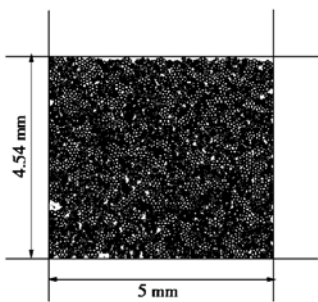


图 3 数值试样
Fig. 3 Numerical sample

加荷过程中,上、下墙体以 1 m/s 的加荷速率相对移动,同时控制左、右墙体的移动速率为 0,以模拟实际的侧限条件。同时,利用 History 命令对加荷过程中竖向应力 σ_y (上、下墙体应力的平均值)、侧向应力 σ_x (左、右墙体应力的平均值)、竖向应变 ε_y 及黏结总数 n 的变化进行全程记录。当竖向应力 σ_y 达到 100 MPa 时,数值试验加荷停止。

3.2 细观参数设置

由接触黏结模型生成簇颗粒单元时,需要确定的细观参数有:法向黏结强度 b_n ,切向黏结强度 b_s ,法向接触刚度 k_n ,切向接触刚度 k_s ,颗粒摩擦系数 f_c 及颗粒密度 ρ_s 。其中,接触刚度 k_n, k_s 影响颗粒间接触力的大小,黏结强度 b_n, b_s 影响簇颗粒黏结的强弱。表 1 给出了本次数值试验所采用的细观参数值。细观

参数变化对数值试验结果的影响将在 5.1 节中讨论。

表 1 数值试样细观参数值汇总表

Table 1 Values of micro parameters of numerical sample						
细观参数	b_n/N	b_s/N	$k_n/(N \cdot m^{-1})$	$k_s/(N \cdot m^{-1})$	f_c	$\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$
数值大小	1×10^3	1×10^3	5×10^8	5×10^8	0.5	2636

加荷墙体的接触刚度与簇颗粒接触刚度相当,法向与切向均为 5×10^8 N/m,墙体摩擦系数设为 0,以减小加荷时侧壁的摩擦阻力。

4 数值试验结果分析

4.1 压缩曲线及与 Toyoura 砂结果对比

图 4 给出了单个簇颗粒破碎发展的示意图。在加荷开始之前,簇颗粒未发生破碎,此时,簇颗粒内部孔隙的面积应归于簇颗粒的实体面积,如图 4 (a) 所示;加荷开始后,当荷载增加到一定程度,簇颗粒发生破碎,此时,原来归属于簇颗粒实体面积的那部分内部孔隙就会释放出来,变成试样的外部孔隙,如图 4 (b) 所示。随着内部孔隙的不断释放,试样中的实体总面积不断减小,在这种情况下,精确确定试样孔隙率的变化是十分困难的,可以考虑的做法是由加荷过程中试样面积的变化 A/A_0 来近似代替试样孔隙率的变化^[12]。

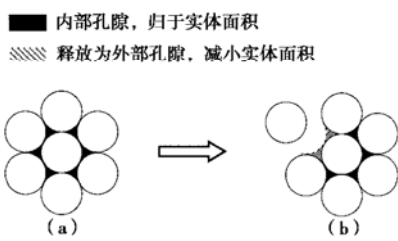


图 4 簇颗粒破碎示意图

Fig. 4 The schematic diagram of cluster breakage

图 5 给出了数值试验得到的压缩曲线 $A/A_0 - \lg \sigma_y$ 及加荷过程中黏结总数 n 随竖向应力 σ_y 的变化曲线 $n - \lg \sigma_y$ 。

分析图 5 (b) 可知,在加荷过程中,数值试样存在一个明显的颗粒破碎点(图中黑点所示),其在压缩曲线 $A/A_0 - \lg \sigma_y$ 上即为对应的屈服应力点,屈服应力在数值上约为 20 MPa。由图 5 (b) 可知,当竖向应力小于屈服应力时,簇颗粒黏结总数保持不变,说明试样内基本无颗粒破碎发生,试样的变形主要来自孔隙的压密;而当竖向应力超过此屈服应力时,随着竖向应力的增加,簇颗粒黏结总数呈线性规律递减,此时,试样内颗粒破碎现象已十分明显,试样的压缩变形加剧。数值试验得到的这一现象与 Toyoura 砂室内试验结果一致,这说明数值试验能够较好地再现砂土在高应力一维压缩条件下颗粒破碎的一般规律。

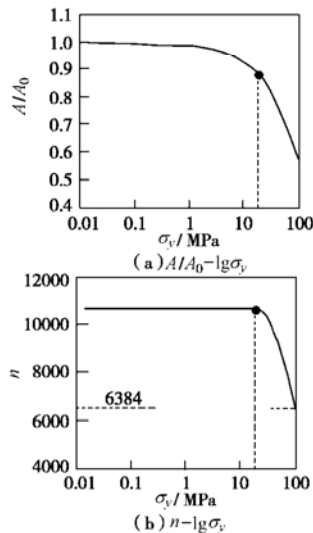


图5 数值试验结果

Fig. 5 Results of numerical tests

将图1的 Toyoura 砂 $e - \lg \sigma_v$ 曲线用初始孔隙比 $e_0 (e_0=0.617)$ 归一化后与数值试验压缩曲线 $A/A_0 - \lg \sigma_v$ 绘于一起, 如图6所示。由图6可见, 数值试验得到的压缩曲线在形状上与 Toyoura 砂室内试验得到的压缩曲线基本一致, 且两者的屈服点位置十分接近, 屈服应力在数值上均为 20 MPa 左右。

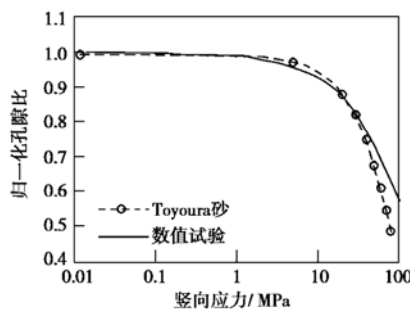


图6 数值试验与 Toyoura 砂室内试验结果对比

Fig. 6 Comparison of compression curves between numerical tests and lab tests on Toyoura sand

由图6分析可知, 当竖向应力大于屈服应力, 即试样进行颗粒破碎阶段以后, 对应于同一应力水平, 室内试验 Toyoura 砂的压缩变形量要稍大于数值试样的压缩变形量, 这可能与高应力条件下, 室内试验砂样中由颗粒破碎细化得到的小颗粒的进一步破碎导致压缩变形增大有关; 而在数值试验中, 簇颗粒破碎后细化为圆盘颗粒, 而圆盘颗粒不能进一步破碎, 关于这一点笔者将在以后的工作中作进一步研究。

4.2 内部接触力及颗粒破碎演化

图7(a)为加荷过程中试样内部平均接触力大小随竖向应力的变化关系, 图7(b)为竖向应力达到 20 MPa (即屈服应力大小) 时试样内部接触力分布图。由图7(a)可见, 当竖向应力达到试样的屈服应力时,

试样内部平均接触力大小并未达到簇颗粒的黏结强度, 然而, 在内部不均匀接触力系作用下, 颗粒破碎已经开始触发。

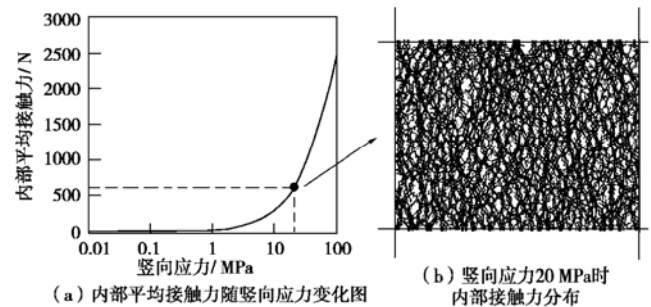


图7 加荷过程中数值试样内部平均接触力变化

Fig. 7 Variation of mean contact force in numerical sample during loading

图8为不同加荷阶段试样内黏结破裂位置分布图。图8(a)为 20 MPa 时的情况, 图8(b)为 50 MPa 时的情况。由图8结合图7可知, 随着竖向应力的增加, 试样内部平均接触力也不断增大, 颗粒破碎率也随之增加。当竖向应力为 20 MPa 时, 黏结破裂总数仅为 65 个, 以黏结总数的丧失计算得到的颗粒破碎率为 0.6%; 当竖向应力增加到 50 MPa 时, 黏结破裂总数增加到 1462 个, 对应的颗粒破碎率为 13.7%; 由图5(b)可知, 当竖向应力达到 100 MPa 时, 剩余黏结总数为 6384 个, 对应的颗粒破碎率为 40%, 即有接近一半左右的黏结已发生破裂。

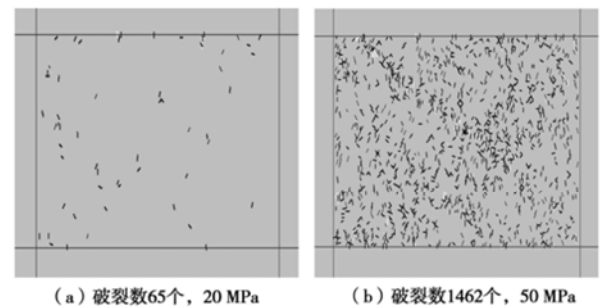


图8 黏结破裂位置分布

Fig. 8 Distribution of bonding breakage

在图8中, 黑色短线处表示簇颗粒黏结由于颗粒间切向接触力超过切向黏结强度而破裂, 白色短线处表示簇颗粒黏结由于颗粒间法向接触力超过法向黏结强度而破裂。由图8分析可知, 无论是竖向应力 20 MPa 情况, 还是 50 MPa 情况, 试样内黏结的破裂均以切向破裂为主。以竖向应力 50 MPa 时的情况为例, 在黏结破裂总数中, 切向破裂所占的比例为 90%。

4.3 侧压力系数变化规律

数值试验中侧压力系数 K_0 可由侧向应力 σ_x 与竖向应力 σ_y 的比值计算得到。图9(a)为高应力一维压

缩数值试验侧压力系数 K_0 随竖向应力 σ_y 的变化规律, 由图 9 (a) 可知, 当竖向应力小于屈服应力时, K_0 值稳定在 0.3 左右; 当竖向应力大于屈服应力, 即试样进入颗粒破碎阶段之后, K_0 值的增大十分明显。Jaky^[13] 提出了描述侧压力系数与土体有效内摩擦角之间关系的半经验公式

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 随 K_0 的增大, 有效内摩擦角 φ' 减小。

将不同应力水平下的 K_0 值由式 (1) 换算后可得对应的试样有效内摩擦角, 如图 9 (b) 所示。分析图 9 (b) 可知, 随着竖向应力的增加, 当试样发生颗粒破碎后, 有效内摩擦角逐渐减小。当竖向应力为 20 MPa 时, 试样 φ' 约为 45°, 当竖向应力增大到 100 MPa 时, 试样 φ' 仅为 25° 左右。

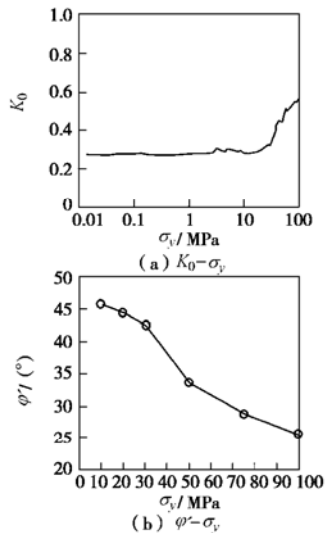


图 9 数值试验结果

Fig. 9 Results of numerical tests

已有的砂土高围压三轴试验结果表明^[14], 在高围压条件下, 土体试样发生颗粒破碎细化后, 由于小颗粒对大颗粒间孔隙的填充, 抑制了土体的剪胀, 使土体抗剪强度中的剪胀分量减小, 从而导致土体抗剪强度降低。所以, 本文数值试验得到的试样有效内摩擦角随应力水平增大而减小的规律符合土体颗粒破碎与抗剪强度变化的一般机理。

5 数值试验影响因素分析

5.1 细观参数影响

文献[7, 8]研究表明, 细观参数变化会影响数值试样的宏观力学响应。在颗粒密度 ρ_s 和颗粒摩擦系数 f_c 保持不变的前提下, 分析黏结强度 b_n , b_s 及接触刚度 k_n , k_s 变化对数值试样高应力一维压缩特性的影响。

将表 1 中 b_n , b_s , k_n , k_s 的数值同时乘以一个放大倍数 m 。当 $m=0.5$ 时, $b_n=b_s=5 \times 10^2$ N, $k_n=k_s=2.5 \times 10^8$

N/m; 当 $m=1.0$ 时, 即为表 1 中数值; 当 $m=1.5$ 时, $b_n=b_s=1.5 \times 10^3$ N, $k_n=k_s=7.5 \times 10^8$ N/m; 当 $m=2.0$ 时, $b_n=b_s=2 \times 10^3$ N, $k_n=k_s=1 \times 10^9$ N/m。

图 10 为细观参数值变化时, 数值试验得到的压缩曲线及黏结总数变化曲线对比关系图。

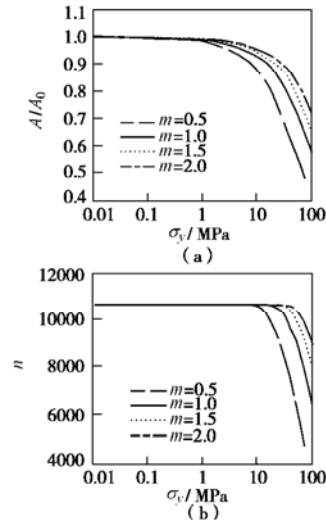


图 10 细观参数变化影响

Fig. 10 Effect of variation of micro parameters on numerical tests

由图 10 可知, 随着细观参数放大倍数 m 的增大:

(1) 在半对数坐标上, 压缩曲线及黏结数变化曲线逐渐右移, 试样发生颗粒破碎时的屈服应力逐渐增大。

(2) 簇颗粒抗破碎能力提高, 在同一应力水平下, 试样颗粒破碎率减少。

(3) 试样进入颗粒破碎阶段后, 压缩曲线在半对数坐标上的斜率基本保持不变。

进一步分析图 10 可知, 当细观参数增大 m 倍时, 试样屈服应力大小也对应增大 m 倍左右, 这一规律较好地反映了数值试样细观参数与宏观力学量之间的内在联系, 也为进一步探索 PFC^{2D} 细观参数与宏观参数之间的定量关系提供了启示。

5.2 加荷速率影响

数值试验中, 确定加荷速率的原则是在不影响数值试验结果的前提下尽可能选择较快的加荷速率, 以最大可能地节省计算机时间。

对加荷速率分别为 0.5, 1, 2, 5 m/s 条件下得到的高应力一维压缩数值试验结果进行分析。不同加荷速率下对应的压缩曲线及黏结总数变化曲线见图 11。

由图 11 可见, 0.5 m/s 与 1 m/s 条件下得到的试验曲线重合较好; 而当加荷速率大于 1 m/s 后, 试验曲线在屈服应力位置处出现明显波动, 曲线平滑度下降。同时, 随着加荷速率的增大, 屈服应力大小也会略有增大。因此, 适宜的加荷速率应为 1 m/s 左右。

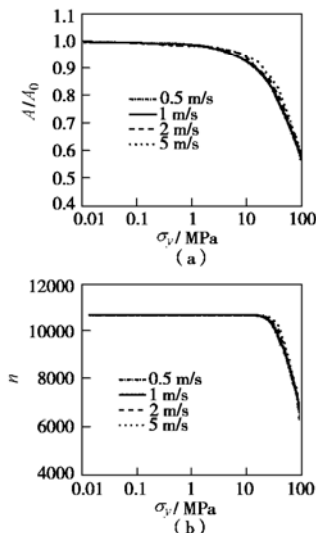


图 11 加载速率变化影响

Fig. 11 Effect of variation of loading velocity on numerical tests

5.3 簇颗粒数量影响

颗粒数量的多少同样会影响数值试验的计算机耗时。目前, 由于受计算机水平的限制, 在 $\text{PFC}^{2\text{D}}$ 数值试验中, 一般不宜采用实际室内试验的颗粒数量。减少数值试样颗粒数量的办法通常有两种: 一种是颗粒粒径保持与室内试样一致, 适当缩小数值试样尺寸; 另一种是保持数值试样尺寸与室内试样相仿, 适当放大颗粒的粒径。本文数值试验采用了第一种方法。

对簇颗粒粒径分布保持不变, 颗粒数量分别为 887, 1738, 3530 条件下数值试验结果进行分析。不同颗粒数量条件下得到的压缩曲线及黏结总数变化曲线如图 12 所示。

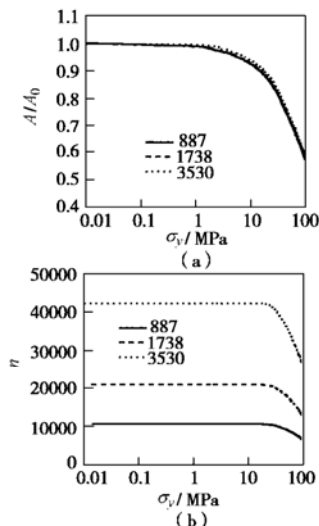


图 12 簇颗粒数量影响

Fig. 12 Effect of total number of clusters on numerical tests

分析图 12 可知, 由不同数量簇颗粒组成的数值试样, 其试验得到的压缩曲线基本重合, 同时, 其屈服应力大小均在 20 MPa 左右, 说明颗粒数量对数值试

验结果影响不大。

5.4 试样平均粒径影响

文献[4]高应力一维压缩室内试验研究表明, 砂土试样在高应力条件下的颗粒破碎现象具有明显的尺寸效应, 试样平均粒径越大, 屈服应力越小, 试样越容易发生颗粒破碎。

在数值试验中, 通过将原数值试样粒径范围 0.1~0.25 mm 放大到 2 倍 (0.2~0.5 mm), 同时保持试样尺寸不变的方法来分析平均粒径变化的影响。

粒径放大后, 簇颗粒数量相应减少, 大粒径试样有簇颗粒 216 个, 初始黏结 2592 个。大粒径试样数值试验中, 加荷速率仍为 1 m/s, 细观参数设置与原小粒径试样相同, 具体数值见表 1。

图 13 (a) 给出了两种不同平均粒径数值试样颗粒破碎率随竖向应力的变化曲线。由图 13 (a) 可知, 随着平均粒径的增大, 试样发生颗粒破碎时的屈服应力减小, 对应同一应力水平下, 颗粒破碎率增大。这一结果与文献[4]室内试验结果一致。

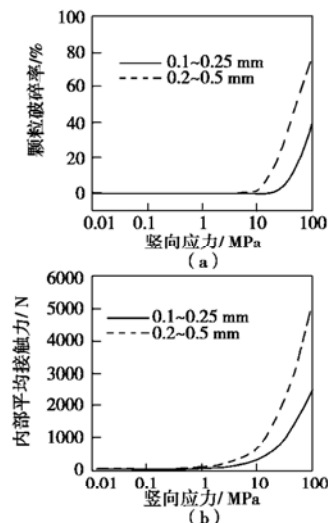


图 13 试样平均粒径影响

Fig. 13 Effect of mean grain size on numerical tests

这一现象的原因与平均粒径变化引起试样内部接触力变化有关, 图 13 (b) 为不同平均粒径试样内部平均接触力随竖向应力变化对比关系图。由图 13 (b) 可知, 平均粒径增大后, 由于单位面积内颗粒之间的接触点数减少, 在相同的外部荷载水平下, 试样内部平均接触力增大, 颗粒破碎现象更易发生。

然而以上分析是在大、小粒径试样细观参数设置相同的前提下进行的, 已有室内试验研究表明^[15], 由于大粒径颗粒内部的疵点和孔隙较多, 所以其单颗粒抗压碎强度要小于小粒径颗粒, 然而这种宏观抗压碎强度的降低要通过细观参数的减小来定量描述目前仍较为困难, 这也是笔者今后将进一步开展的工作。

6 结 语

(1) 与室内试验结果相比, 数值试验得到的压缩曲线形状及颗粒破碎屈服应力大小均与 Toyoura 砂室内试验结果一致, 说明数值试验能够较好地再现实际砂土在高应力一维压缩条件下的颗粒破碎特性。

(2) 与室内试验相比, 数值试验的优势在于得到颗粒破碎宏观现象的同时, 可以通过分析试样内部接触力的变化以及对黏结破裂位置的追踪, 来研究颗粒破碎的细观演化规律, 从而可进一步探讨颗粒破碎的细观力学机制。

(3) 数值试样细观参数变化对宏观颗粒破碎现象影响较大, 细观参数值增大 m 倍, 对应的颗粒破碎屈服应力大小也增大 m 倍左右, 此规律为进一步探索 PFC^{2D} 细观参数与宏观参数之间的定量关系提供了启示。

(4) 加荷速率对数值试验结果有一定影响, 适宜的加荷速率应为 1 m/s 左右; 颗粒数量对数值试验结果影响不大。

(5) 在细观参数设置不变的前提下, 数值试样平均粒径增大后, 由于单位面积内颗粒之间的接触点数减小, 在相同的外部荷载水平下, 试样内部平均接触力增大, 颗粒破碎更易发生。

参考文献:

- [1] MURPHY D J. Stress, degradation, and shear strength of granular material[M]. SAYED M, ed. Geotechnical modeling and applications. Houston, Texas: Gulf Publishing Co, 1987: 181 - 211.
- [2] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1948: 65 - 67.
- [3] DE SOUZA J M. Compressibility of sand at high pressure[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1958.
- [4] HAGERTY M M, HITE D R, ULLRICH C R, HAGERTY D J. One-dimensional high pressure compression of granular media[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(1): 1 - 18.
- [5] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive

large scale movements in blocky rock systems[C]// Proceeding of Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Nancy, 1971: 8.

- [6] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展, 2003, 33(4): 483 - 490. (LIU Kai-xin, GAO Ling-tian. A review on the discrete element method[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(4): 483 - 490. (in Chinese))
- [7] 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 Yu-wei, CHI Yong, et al. Simulation of biaxial test by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 701 - 704. (in Chinese))
- [8] 池 永. 土的工程力学性质的细观研究[D]. 上海: 同济大学, 2002. (CHI Yong. Micromechanical research on soil properties[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))
- [9] THOMAS P A, BRAY J D. Capturing nonspherical shape of granular media with disk clusters[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 169 - 178.
- [10] NAKATA Y, KATO Y, HYODO M, et al. One-dimensional compression behavior of uniformly graded sand related to single particle crushing strength[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(2): 39 - 51.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. The manuals of particle flow code in 2-dimension[R]. Version 3.1, Minneapolis, 2004.
- [12] MCDOWELL G R, HARIRECHE O. Discrete element modeling of yielding and normal compression of sand[J]. Geotechnique, 2002, 52(4): 299 - 304.
- [13] JAKY J. Pressure in soils[C]// Proceeding of 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1948: 103 - 107.
- [14] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 131 - 133. (LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 131 - 133. (in Chinese))
- [15] MCDOWELL G R. Statistics of soil particle strength[J]. Geotechnique, 2001, 51(10): 897 - 900.