

石膏颗粒接触试验研究

周 健^{1,2}, 张 津^{1,2}, 王强强^{1,2,3}

(1. 同济大学 土木工程学院, 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;
3. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

摘要: 利用岩石双轴流变试验仪,研究了石膏试件在单轴压缩和颗粒接触条件下的力学特性和破坏模式. 结果表明:圆柱单轴压缩试件破坏模式为均匀受力下的一次性剪切破坏,球形颗粒接触试件破坏模式为应力集中下的颗粒破碎多次破坏;在利用离散元模型进行模拟时,同种材料单轴压缩试验的细观参数与颗粒接触试验的细观参数相差较大,不同的受力情况需要分别进行标定.

关键词: 石膏; 颗粒接触试验; 破坏模式; 离散元

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Experimental Study on Contact of Gypsum Particles

ZHOU Jian^{1,2}, ZHANG Jin^{1,2}, WANG Qiangqiang^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: Uniaxial compressive tests and particle contact tests were conducted to investigate mechanical properties and failure modes of gypsum test specimens using rock rheological testing system. Results show that cylinder specimens under the uniaxial compression tests fail directly in condition of uniform stress, while spherical specimens under the contact tests fail repeatedly with particle breakage in condition of stress concentration. In addition, even for the same kind of material, microscopic calculation parameters vary greatly with discrete element model. The microscopic calculation parameters of the specimens under different kinds of stress situation need to be calibrated separately.

Key words: gypsum; particle contact tests; failure mode; discrete element method

粗粒土具有强度高、变形小、渗透性好等特性,广泛应用于坝体、路基等工程建设. 同时,粗粒土具有易破碎的特点,颗粒破碎可引起土体级配改变,导致土体本身结构发生改变,对土体的强度、内摩擦角、渗透系数等都会产生不可忽视的影响.

针对这一问题国内外开展了一系列研究,并取得了一定成果. 采用真实粗粒土颗粒进行粒间接触试验获得的颗粒试验参数是最真实的,但是由于实际颗粒的形状难以控制,进行重复性试验比较困难,使用替代材料进行试验是一种较好的解决方案. 彭海明等^[1]通过大量室内试验,证明水泥石膏是一种较好的用于模型制作的相似材料. 使用石膏等替代材料进行试验易于加工,而且高强石膏强度较高,与部分泥岩、粉砂岩等有相似的力学性质,利于重复试验^[2]. 单轴试验为材料的基本力学试验,研究已较为充分. 王杰等^[3]和刘军等^[4]利用离散元模型对岩石的单轴压缩进行了模拟,研究试验全过程的受力特性和颗粒的破碎特性. 在颗粒接触研究方面, Potapov等^[5]对颗粒的碰撞破碎过程进行了数值模拟试验,研究了颗粒脆性破碎的影响影子. Alonso等^[6]采用自然形态的砂岩颗粒进行了径向压缩试验,研究了颗粒的尺寸效应对长期变形的影响. 曲嘉^[7]通过钢纤维混凝土圆球状试件的点荷载劈裂试验研究了其力学特性及破碎形态.

针对单轴压缩条件下和颗粒接触条件下材料的不同受力特性方面的研究相对较少,因此本文设计了2个石膏半球形颗粒的接触试验,从细观角度观察和研究颗粒接触的受力特性,并与单轴压缩试验进行对比,比较两者的受力特性和破坏形态之间的差别.

收稿日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(51479138)

第一作者: 周 健(1957—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为土体细观力学和离散元数值分析.

E-mail: tjugezhoujian@tongji.edu.cn

1 单轴压缩与颗粒接触试验

1.1 试验仪器和材料

本次试验采用的平台是同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室的岩石双轴流变试验机,如图 1 所示. 试验机能够提供稳定的位移控制和伺服控制双轴加载条件,且受力与变形的测量与控制精度分别可达到 5 N 和 0.001 mm. 为完成设计试验,设计制作了 1 套测试装置,包括上下 2 个夹持装置,用于固定 2 个颗粒并传递平台荷载,可实现 2 个颗粒的法向接触和切向接触. 装置由凹形底座、方形垫片、带有圆弧凹陷的夹片和紧固螺丝组成,可通过改变垫片的厚度完成不同直径颗粒的试验.

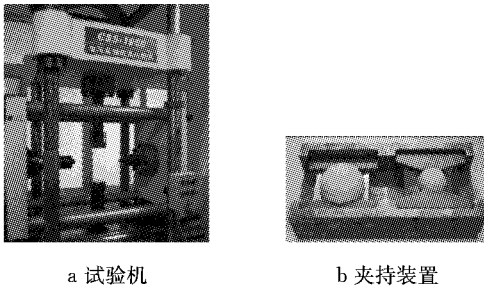


图 1 岩石双轴流变试验机和夹持装置

Fig. 1 Rock rheological test system and assembled attachment system

本文选取改良的石膏作为试验材料. 所选材料具有颗粒足够细、配比简单、塑形方便、试验的可重复性较高等特点. 材料无需配置骨料,强度较高,水固比为 24% 时 1 h 的抗压强度可达 40 MPa 以上,其性质与一些强度较低的岩石材料相似. 单轴压缩的试件尺寸根据(GB/T 50266—2013)《工程岩体试验方法标准》^[8] 规定,采用直径为 50 mm、高度为 102 mm 的圆柱形试件,每组试验试件的数量为 3 个. 颗粒接触试验试样采用半球形,设计 4 种不同粒径,分别为 50、32、25、10 mm,每组试样试件数为 3 个. 试件制作时采用模具浇筑的方法,浇筑时振动密实,尽量消除试样内部气泡,完成后进行养护. 在试样成型 30 min 后脱模,室温、室内干燥环境条件下养护 14 d. 养护完成后,采用细砂纸将试件底部打磨平整,然后用游标卡尺测量直径和高度.

1.2 单轴压缩试验

单轴压缩试验前粘贴应变片,并进行防潮处理. 按照(GB/T 50266—2013)《工程岩体试验方法标准》,将试样置于试验机承压板中心,调整球形支座,使试样的 2 个面与承压板水平接触. 将粘贴温度补

偿片的试件放在试验机外. 以 $0.5 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加载速率逐级对试件施加荷载直至破坏,并记录各级荷载作用下轴向和径向应变值.

图 2 所示为试样 1 的单轴压缩试验的试验曲线. 可以看出,轴向应变前半段斜率逐渐增大,中间段向直线发展,最后斜率迅速变大,随后破坏,破坏模式为均匀受力下的一次性剪切破坏. 体积应变在荷载较小时表现出线性变化,当荷载达到一定值,体积应变在短暂的不变阶段之后,曲线反弯,出现体积膨胀的现象. 从整体来看本试验材料的应力应变关系曲线基本属于下凹曲线^[9],即弹塑性曲线,反映出材料具有比较明显的塑性变形. 其余 2 组试验与试样 1 结果相似,见表 1.

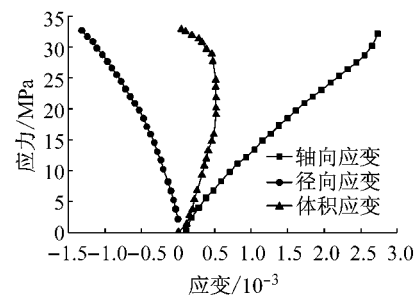


图 2 单轴压缩试样应力应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of uniaxial compression sample

表 1 试验材料抗压强度

Tab. 1 Compressive strength of the test materials			
参数	试样 1	试样 2	试样 3
破坏荷载/kN	79.6	88.4	75.0
抗压强度/MPa	37.0	41.2	34.9
平均弹性模量/GPa	13.0	13.3	14.5
平均泊松比	0.33	0.32	0.39

从破坏形态来看,单轴压缩的破坏与柱状劈裂破坏类似,如图 3 所示. 加载过程中试样中部出现竖向裂纹,局部出现横向裂纹,并快速发展成破坏. 破坏之后的块体体积没有明显的规律.

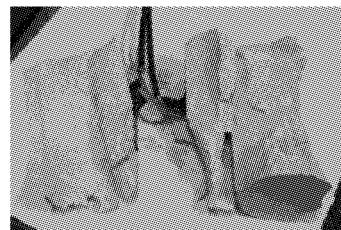


图 3 单轴压缩试件的破坏形态

Fig. 3 Failure mode of specimen under uniaxial compression

1.3 颗粒接触试验

接触试验采用相同直径的 2 个半球颗粒进行试

验.在装样后首先施加 0.01 kN 的预加荷载,使试样和仪器之间充分接触,然后以 0.005 kN · s⁻¹ 的速率施加法向荷载,直至试样破坏停止试验.

图 4 为不同直径颗粒法向接触试验荷载-变形关系曲线(因为接触面积无法测量,无法计算出应力).其中,直径 50 mm 的颗粒接触试验荷载-变形曲线前半段斜率逐渐增大,后半段开始向直线发展.其他粒径的接触试验结果在曲线的第一次下降之前部分,也表现出与 50 mm 类似的规律.从终止条件上看,直径 50 mm 的颗粒在颗粒破碎时即激发加载设备保护限制,其能承受的荷载值远小于单轴压缩的破坏荷载.其余粒径颗粒在破碎后设备仍能加载,但是负荷并没有继续上升,而是上下波动,变形快速增加,颗粒持续破碎.这个现象说明,接触试件的破坏模式为应力集中下颗粒破碎的多次破坏.

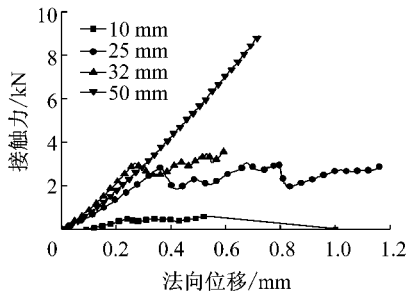


图 4 颗粒法向接触荷载-变形曲线

Fig.4 Force-deformation curve of contact test in normal direction

在对颗粒接触力学性质进行分析时,选取法向接触刚度作为分析的主要内容.本文中所指法向接触刚度采用线性接触刚度模型中的定义,如下所示:

$$K_n = F_{i,n}/U_n$$

式中: K_n 为法向刚度(割线刚度), $N \cdot m^{-1}$; U_n 为法向重叠量, m ; $F_{i,n}$ 为法向接触力, N .

图 5 和 6 为 50 mm 颗粒接触力-变形和法向刚度(割线刚度)曲线.3 次试验的曲线形状一致,证明了本文试验条件下获得的接触变形规律的可靠性,曲线之间的偏差认为是由试样制作、试验操作等误差引起的.通过图 5 和 6 的对比可以发现,颗粒接触的力学特性分为以下 3 个阶段(包括破碎后阶段):第 1 阶段,法向刚度快速增加,刚度曲线可以近似为直线,该阶段变形占破坏变形的 5%左右;第 2 阶段,法向刚度缓慢增加,直至破坏,刚度曲线为斜率逐渐减小的曲线,但是幅度不大,仍可以近似为直线;第 3 阶段为颗粒出现明显破碎后,此时法向荷载呈波浪状上下波动,如图 4 中曲线所示,说明颗粒破碎后无

法承担更大的荷载,同时变形不断增加,说明颗粒在不断破碎.

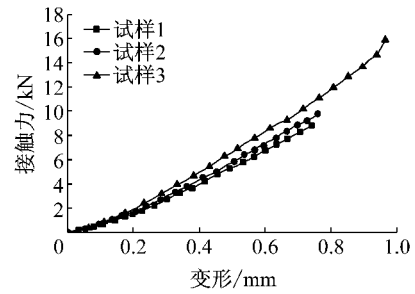


图 5 直径 50 mm 颗粒接触力-变形曲线

Fig.5 Relation curves of contact force-deformation (particle size is 50 mm)

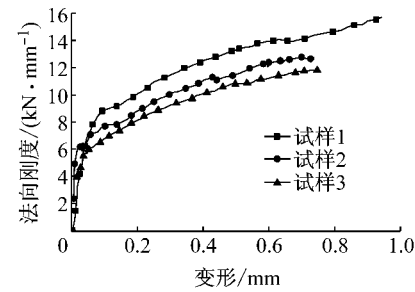


图 6 直径 50 mm 颗粒接触刚度-变形曲线

Fig.6 Relation curves of stiffness-deformation (particle size is 50 mm)

不同直径的颗粒法向刚度曲线与 50 mm 粒径类似,也可以分为 3 个阶段.图 7 为不同直径颗粒的法向刚度曲线,对比可以发现颗粒接触的荷载大小受颗粒粒径的控制,随粒径的减小而减小,其接触刚度也呈减小趋势.

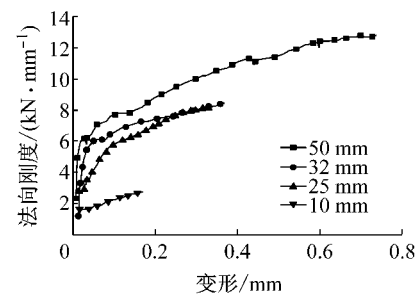


图 7 不同粒径刚度曲线比较

Fig.7 Relation curves of stiffness-deformation with different particle sizes

从颗粒的破坏形态看,颗粒接触点产生明显的塑性变形(见图 8),形成了 1 个圆形的受力平台,局部呈锥形刺入状破坏,并从锥尖向下延伸出裂缝.不同直径的颗粒接触试验的破坏模式相似,2 个试验接触点处均形成圆形受力平台和刺入锥,根据平台下

方颗粒的破碎状态可以分为不同类型:① 颗粒接触受力平台下方接近圆柱体范围内出现粉碎性破坏,形成众多小颗粒,圆柱体范围外分为 4 块大小接近的块体(体积比约为 1:1:1:1);② 颗粒接触点受力平台下方形成刺入锥,颗粒整体以椎体为中心形成两道发散的裂缝,分成 3 块体积较大块体(体积比约为 1:1:2).

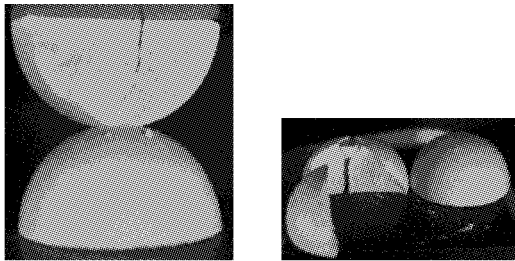


图 8 直径 50 mm 颗粒破坏模式

Fig.8 Particle failure mode (particle size is 50 mm)

2 试验对比

将单轴压缩的试验结果与颗粒接触的试验结果进行比较,分析不同受力状态下的破坏机理.

2.1 试验曲线对比

由于单轴压缩试验的试验结果为应力应变关系,而接触试验的试验结果为接触力-变形关系,应将 2 个试验结果进行单位变换.单轴压缩试验直径为 50 mm 的试样,接触试验也选取 50 mm 的试验组.

将单轴压缩试验的结果变换成力-变形关系再与颗粒接触试验的结果进行对比,如图 9 所示.可以看出,两条曲线的差别比较大,颗粒接触试样的法向变形接近圆柱体试样的 3 倍,破坏荷载仅为圆柱体试样的 1/5,两条曲线的斜率相差 13 倍.这说明颗粒接触点处的应力集中对其力学性质的影响非常大.

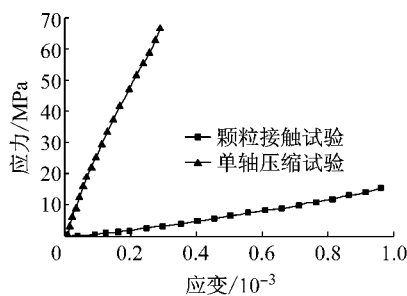


图 9 颗粒接触试验与单轴压缩试验比较

Fig.9 Comparison of contact test and uniaxial compression test

2.2 破坏形态对比

将单轴压缩圆柱体试件(直径 50 mm)的破坏形

态与 50 mm 颗粒接触试验的破坏模式进行对比可以发现,两者在破坏之后都分成几个较大的块体.不同的是,在颗粒接触试验中,接触点处形成了一个锥形的区域,区域内的颗粒破碎严重强度很低,而单轴压缩试验中并没有这样的区域.结合试验过程中的现象和试验曲线可以发现,单轴压缩试件破坏时塑性变形不明显,而颗粒接触试验的破坏从接触点开始,出现明显的塑形变形,这也与曲线中的波动段相对应.破坏之后的块体体积分布两者也有不同,单轴试验的体积分布没有规律,而接触试验的体积分布有 1:1:1:1 和 1:1:2 2 种.

2.3 不同应力条件下的破坏模式

对比不同试验的结果,可以发现应力集中是导致 2 个试验发生不同破坏现象的重要原因.单轴压缩试验和颗粒接触试验的破坏模式不同.圆柱体试件是均匀受力下的一次性剪切破坏,破坏时变形较小;接触试件是集中应力下的颗粒渐进破碎的多次破坏,破坏时变形较大,可达圆柱体试样的 3 倍.

3 数值模拟

由于颗粒离散元中假定颗粒为刚性体,无法变形和破碎,所以采用 1 个球形单元代表 1 个土体颗粒的方式进行模拟时,在不考虑颗粒自身变形和颗粒破碎的情况下,离散元模型能够在一定程度上反映土体的宏观性质.但是,在面对如土石坝等高应力环境时,颗粒本身的变形和颗粒破碎将是影响粗粒土宏观性质的重要因素.因此本文采用具有与实际颗粒相似外形的离散元颗粒集合体模拟粗粒土颗粒(见图 10),在这个前提下,离散元法可以实现对各种颗粒形状的模拟.本节利用 PFC^{3D} 软件模拟了单轴压缩变形试验和颗粒接触试验,分析了圆柱体试样细观计算参数与颗粒接触试验细观计算参数间的关系,探索采用离散元颗粒集合体表征粗粒土颗粒的发展方向.

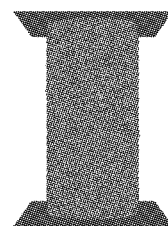


图 10 单轴压缩变形试验离散元模型

Fig.10 Discrete element model of uniaxial compression test

3.1 对单轴压缩试验的模拟

利用 PFC^{3D} 软件对试验进行模拟时,首先建立单轴压缩试验的离散元模型.模型尺寸为半径 50 mm、高 102 mm 的圆柱体,与室内试验试样尺寸保持一致.首先建立上下 2 个面墙体单元和圆柱形墙单元.模型颗粒由随机算法生成,尺寸的最小半径为 0.75 mm,最大半径与最小半径之比为 1.8,粒径呈正态分布,总颗粒数在 3 万左右.颗粒生成后,通过上下 2 个墙体单元控制在试样中施加 1 MPa 的均匀应力,以使颗粒之间充分接触,然后删除接触数小于 3 的颗粒,因为这种颗粒会影响黏结力的发挥.最后,删除圆柱形墙单元,在试样中施加平行黏结力.最终试样生成后如图 10 所示.需要说明的是,细观参数与模型中的颗粒大小、分布有一定的关系,需要进一步的研究.

模型建立后,对数值模拟的细观参数进行标定,过程如下:首先,标定球-球接触模量 E_c 和平行黏结模量 \bar{E}_c ,标定依据的目标值为单轴压缩变形试验割线弹性模量.将材料强度固定在一个较高值,本文选用 60 MPa,高于单轴压缩试验中的强度最高值,再调节球-球接触模量 E_c 和平行黏结模量 \bar{E}_c ,使数值模型的割线模量与室内试验相近.然后,标定球-球接触的法向刚度与切向刚度的比值 K_n/K_s ,以及平行黏结的法向刚度与切向刚度的比值 \bar{K}_n/\bar{K}_s ,标定目标值为单轴压缩变形试验割线弹性模量对应的泊松比.最后,标定平行黏结的法向和切向强度平均值 ($\bar{\sigma}_c, \bar{\sigma}_c$) 及其标准差,标定依据的目标值为单轴压缩变形试验获得的强度值.

经过上述步骤的标定后,本文采用的圆柱体离散元模型已经能够再现室内试验的弹性阶段曲线,如图 11 所示.曲线的下降段为数值模拟结果,在此不做讨论.标定完成后采用的细观计算参数汇总于表 2.

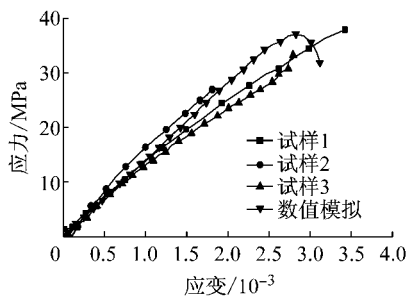


图 11 数值模拟应力应变曲线

Fig.11 Stress-strain curve in numerical simulation

表 2 单轴试验标定的细观参数

Tab.2 Microscopic parameters based on uniaxial test			
参数	数值	参数	数值
球-球接触模量/Pa	1.87×10^{10}	平行黏结模量/Pa	1.87×10^{10}
球刚度比	4.8	平行黏结刚度比	4.8
球摩擦系数	0.5	平行黏结半径系数	1
平行黏结法向强度平均值/Pa	3.2×10^7	平行黏结剪切强度平均值/Pa	3.2×10^7
平行黏结法向强度标准差/Pa	3.5×10^6	平行黏结剪切强度标准差/Pa	3.5×10^6

3.2 对颗粒接触试验的模拟

建立颗粒接触试验的数值模型,并用单轴压缩标定的参数进行试算.建立模型时采用与单轴压缩同样的颗粒尺寸与分布,在颗粒接触模型生成时,以单轴压缩试验的数值试样为基础,以单轴压缩试验的加载面为半球颗粒的加载面,剪切出 2 个半球形颗粒.计算时将 2 个颗粒移动到顶部接触,如图 12 所示.对生成的模型进行加载,模拟接触试验进行试算.加载板采用 Wall 单元模拟,模拟过程采用变形加载,与室内采用的力加载不同,这可能会引起一些误差,加载速度考虑计算时间和颗粒规模的限制,采用 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.根据室内接触试验的结果施加 1 mm 位移.

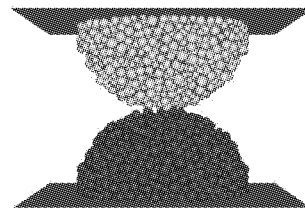


图 12 颗粒接触离散元模型

Fig.12 Discrete element model of contact test

图 13 为采用单轴压缩试验标定的细观计算参数模拟直径 50 mm 颗粒接触试验的计算结果与实际试验对比,数值模拟的峰值荷载仅为 2.55 kN,对

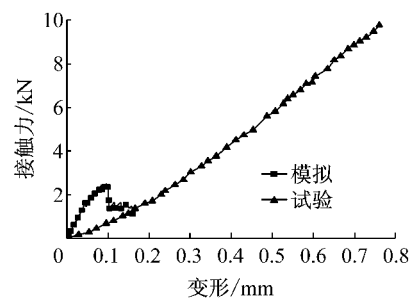


图 13 单轴压缩标定参数计算结果与实际试验结果对比

Fig.13 Comparison of force-deformation curves in numerical simulation (based on uniaxial compression test) and contact test

应的位移仅为 0.097 mm,与室内试验结果差距非常大(最小峰值为 8.95 kN,对应位移为 0.755 mm)。

由此可以看出,采用单轴压缩试验标定的参数直接应用于颗粒接触试验的模拟并不合适,应根据颗粒接触试验的结果对接触试验的细观参数重新标定.图 14 为重新标定后模型计算结果与室内试验的比较,模拟结果与实际试验结果已比较吻合.表 3 为两次标定的参数对比,由表中可见单轴压缩模型与颗粒接触模型的参数相差较大,部分参数甚至相差 4 倍左右.经过分析认为,参数标定时采用的是圆柱体模型,试样内的应力分布较为均匀,而颗粒接触试验中存在明显的应力集中,两者表现在细观参数上会有差别.因此在采用离散元颗粒集合体来表征粗粒土颗粒时不同的受力情况需要分别进行标定,细观参数不能通用。

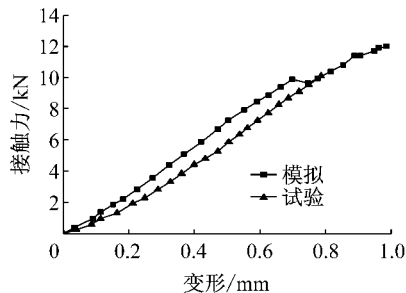


图 14 颗粒接触标定参数计算结果与实际试验结果对比

Fig. 14 Comparison of force-deformation curves in numerical simulation (based on contact test) and contact test

表 3 两次标定的细观参数对比

Tab. 3 Comparison of mesoscopic parameters in numerical simulation

参数	单轴标定值	接触反算值	单轴/接触
球-球接触模量/Pa	1.87×10^{10}	7.00×10^9	2.66
平行黏结模量/Pa	1.87×10^{10}	7.00×10^9	2.66
平行黏结法向强度平均值/Pa	3.2×10^7	1.3×10^8	0.25
平行黏结剪切强度平均值/Pa	3.2×10^7	1.3×10^8	0.25

4 结论与展望

(1) 颗粒接触试验和单轴压缩试验的破坏模式不同,圆柱体试件为均匀受力下的一次性剪切破坏,接触试件为应力集中下颗粒破碎的多次破坏。

(2) 利用 PFC^{3D}软件模拟时,单轴压缩试验标定的细观参数与接触试验的细观参数相差较大,不同的受力情况需要分别进行标定。

(3) 颗粒法向接触的接触力-变形曲线分为 3 个阶段:第 1 阶段,法向刚度近似呈线性快速增加,变形量占破坏总变形的比例为 5%,且随着直径增加而

减小;第 2 阶段,法向刚度呈线性缓慢增加;第 3 阶段,颗粒多次破坏,曲线出现波动。

(4) 半球形试样接触试验条件下,法向接触试件的破坏形态主要有 2 种:第 1 种是颗粒出现贯通裂缝,分裂成 2~4 个体积较大的块体;第 2 种是颗粒中部圆柱形核心区出现贯通的粉碎性破坏,外围分裂成小块体。

利用石膏模拟岩性材料来进行试验能够较为有效地研究颗粒接触的力学特性.本文只研究了颗粒在 1 个方向上受力时的力学特性,且颗粒的形状较为单一,并未对颗粒在有围压条件下、不同形状颗粒接触条件下的受力特性展开讨论.今后的工作将针对上述不足,通过进一步的室内试验与离散元模拟继续对粗粒土的接触力学性质进行研究。

参考文献:

- [1] 彭海明,彭振斌. 岩性相似材料研究[J]. 广东土木与建筑, 2002(12):13.
PENG Haiming, PENG Zhenbin. Study of similar material to rock [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2002 (12):13.
- [2] 林韵梅. 实验岩石力学模拟研究[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984.
LIN Yunmei. Research on simulation experiment of rock mechanics [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House Press, 1984.
- [3] 王杰,李世海,周东. 模拟岩石破裂过程的块体单元离散弹簧模型[J]. 岩土力学, 2013(8):2355.
WANG Jie, LI Shihai, ZHOU Dong. A block-discrete-spring model to simulate failure process of rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(8):2355.
- [4] 刘军,刘俊新,龙志伟. 花岗岩三轴压缩颗粒流模拟研究初探[J]. 四川建筑科学研究, 2014(3):134.
LIU Jun, LIU Junxin, LONG Zhiwei. Simulation of granite of three axial compression with PFC [J]. Sichuan Building Science, 2014(3):134.
- [5] Potapov A V, Campbell C S. Parametric dependence of particle breakage mechanisms[J]. Powder Technology, 2001, 120(3): 164.
- [6] Alonso E E, Oldecop L, Pinyol N M. Long term behaviour and size effects of coarse granular media[M]//Mechanics of Natural Solids. Berlin: Springer, 2009: 255-281.
- [7] 曲嘉. 碳纤维混凝土劈拉强度的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
QU Jia. The experimental study on the split strength of SFRC [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [8] 中国电力企业联合会. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[M]. 北京:中国计划出版社, 2013.
China Electricity Council. GB/T 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass [M]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [9] 沈明荣,陈建峰. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社, 2006.
SHEN Mingrong, CHEN Jianfeng. Rock mass mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006.