

颗粒介质尺度效应的抗剪试验及物理机理分析*

房莹光†

(华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641)

(华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641)

(2013年8月31日收到; 2013年11月4日收到修改稿)

针对颗粒介质力学特性的颗粒尺度效应研究, 选用土矿物颗粒制备不同颗粒尺度的抗剪试样, 进行一系列直剪快剪和三轴抗剪试验, 测得了不同颗粒粒径和体分比试样的变形曲线及剪应力强度; 基于颗粒间微观作用力与重力比值和胞元体模型, 首次从微观和细观角度解释颗粒尺度效应的物理机理. 结果表明, 随着介质中粗颗粒的比例增加和粒径减小, 介质变形特性增强, 剪应力强度也随之提高; 体分比对变形和强度特性的影响比粒径的影响更加显著. 基于介质特性尺度效应物理机理分析, 提出衡量介质颗粒聚集和摩擦效应的微重比判别参数以及应变梯度和变形协调微裂纹引起颗粒尺度效应的细观机理解释; 文中提出的胞元体模型大大减少了颗粒物质体系的计算自由度, 为工业和工程设计的计算建模提供一种可行途径.

关键词: 颗粒介质, 颗粒尺度效应, 抗剪试验, 物理机理

PACS: 45.70.-n, 83.80.Fg, 83.80.Nb

DOI: 10.7498/aps.63.034502

1 引言

颗粒介质由大量固体颗粒聚集而成, 是具有复杂多变量力学性质的特殊介质. 颗粒介质复杂特性源于颗粒间相互作用机理的复杂性, 受到颗粒间范德华力、库仑力和液桥力等微观相互作用力的性质和作用规律, 以及颗粒表面效应、量子尺度效应等物理化学机理的影响, 其物理力学特性异常复杂, 其中一些课题成为学术界研究的前沿^[1-4]. 同时, 颗粒介质特性研究具有广泛的工程应用背景, 如化学工程中的粉末输送与分离设计、农业工程中的谷物输送及储存仓压计算、水利工程中的泥沙输送与沉积分析以及河道淤塞整治、防灾工程中的泥石流和滑坡防治, 以及岩土工程中各类土体的变形和稳定计算等, 均涉及颗粒介质基本特性. 目前, 人们并未完全掌握颗粒介质特性, 一些相应的关键技术仍不成熟, 致使工业生产中约10%的能量因此而白白损耗^[5], 导致巨大的浪费. 颗粒介质特性, 如运

动特征、变形和强度特性、颗粒的聚集与分离性质等, 强烈地依赖于颗粒尺寸及尺度分布范围, 这是介质的颗粒尺度效应. 对颗粒尺度效应的研究是掌握颗粒介质复杂特性之钥匙, 有助于提高相关工业技术和工程技术的水平.

颗粒介质特性与其不同尺度颗粒间的相互作用微观力场及作用机理产生关联和耦合, 是多尺度关联和耦合问题, 仅从单个尺度上的物理机理难于描述颗粒介质的复杂特性. 传统力学通常把诸如土介质、泥沙等颗粒介质视为连续介质, 忽视了颗粒介质的不连续特征, 本构方程不包含尺度参数而不能描述其力学特性的尺度特征^[6,7]. 目前, 对于颗粒介质力学性质尺度效应的研究, 主要集中于颗粒尺度为同一数量级的散体介质方面^[8,9], 对于跨尺度颗粒聚集成介质的尺度效应研究还比较少见. 最近, 对于粒间无粘结的颗粒物质的动力分离^[10,11]、受约束颗粒物质的应力分析^[12,13], 以及颗粒介质应力网络(力链)分析^[14,15]等方面研究取得了一些进展. 在散体介质计算中, 通常采用离散元或颗粒

* 亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究(批准号: 2012ZA04)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fangyg@scnu.edu.cn

流分析理论^[16,17],把颗粒作为荷载传递和分析的单元,粒间作用力为法向接触力和切向摩擦力,考虑颗粒相互摩擦、碰撞和挤压效应对宏观特性的影响^[18],以体现散体介质的尺度效应机理.离散元和颗粒流模型存在两个主要问题,一是模型参数不易确定,导致计算偏差和不确定性;二是需要计算数量非常巨大的颗粒自由度,计算量极其惊人,应用于工程实体尺寸区域的计算分析有很大困难.土体是自然界最常见的一种颗粒介质,其颗粒的尺度跨越5—6个数量级,多尺度现象非常突出.然而,长期以来传统土力学仍然基于连续介质的观点处理问题^[19,20],关于土介质特性尺度效应研究的文献并不多见.本文采用直剪和三轴两种标准抗剪试验方法,对由天然和人工微细颗粒(黏粒)与商品石英颗粒(粗颗粒)制备的不同级配的颗粒介质试样(土样)的变形曲线、剪切强度等特性,进行了颗粒尺度效应测试;根据颗粒间微观作用力对颗粒尺度进行划分,提出胞元体模型对尺度效应的细观物理机理进行解释.胞元体模型把凝聚的微细颗粒“固化”为连续基体,粗颗粒则视为“增强颗粒”,这样使颗粒介质的计算自由度大为减少,又可考虑颗粒介质变形的不连续性特征,为颗粒物质体系的工业和工程实际设计的计算建模提供一种可行途径.

2 尺度效应的直剪和三轴抗剪试验

土介质是自然界最普遍的颗粒介质,其最具代表性的变形和强度试验是抗剪试验.为此,文中选取土矿物颗粒制备系列试样,通过直剪快剪和三轴抗剪试验,来分析和研究颗粒介质的变形和强度特性的颗粒尺度效应.

2.1 抗剪试样及其制备

颗粒介质尺度效应的直剪和三轴抗剪试样由微细颗粒和不同粒径石英颗粒掺入适量水混合而成.其中直剪试样中的微细颗粒为商品膨润土颗粒,平均粒径为12.5 μm ,石英颗粒粒径0.25—0.90 mm;三轴抗剪试样中的微细颗粒由天然粘土沉降分选获得,粒径小于75 μm ,石英颗粒粒径0.10—0.90 mm.按照土工试验相关规范的划分,试样中的微细颗粒和石英颗粒分为粉粒和砂

粒.制备抗剪试样时,先把干燥的微细颗粒和石英颗粒按比例掺入后进行充分混合,再掺入适量水进行长时间搅拌,确保不同尺度的颗粒均匀分布,并控制掺入的水量,使制成的直剪试样呈现可塑状态,而三轴抗剪试样呈现硬塑状态.试样在标准试样模具内压实而成,并使每组试样有相同密实度.直剪试样直径和高度分别为 $\phi = 61.8 \text{ mm}$ 和 $h = 20 \text{ mm}$;三轴抗剪试样直径和高度分别为 $\phi = 39.1 \text{ mm}$ 和 $h = 80 \text{ mm}$.

2.2 直剪抗剪试验及结果

直剪试验是在应变式直剪仪上按土工试验相关规范进行的快剪试验.图1所示为直剪试验示意图,直剪仪的上下剪切盒同轴对齐后,把试样置入其中,试样上下端面放置一层不透水薄膜和一块透水石.在施加各级法向(竖向)压应力条件下,固定上剪切盒,而由步进电机推动下剪切盒水平移动,试样在上下剪切盒交界面处产生剪切带,由传感器测得水平剪切力和水平剪切位移,每个试验结果由3个试样测得.

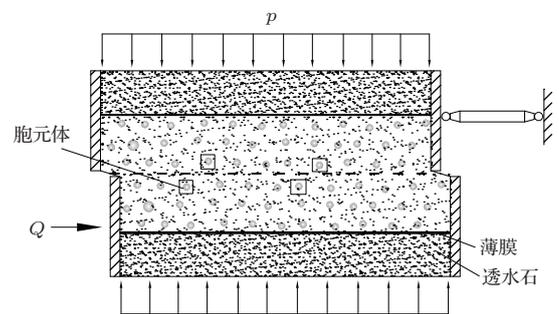


图1 直剪试验示意图

图2给出了法向压应力 p 作用下,不同石英颗粒级配(粒径)试样的剪应力-剪切位移试验曲线.其中 α 表示试样中石英颗粒总体分比,即石英颗粒实体体积与试样体积的比值; d 表示试样中石英颗粒的粒径,各试样掺入重量相等的2种粒径的石英颗粒;剪应力为剪切力 Q 与试样断面积 A 之比.图3给出了不同石英颗粒体分比 α 试样,在不同法向压力 p 作用下,剪切强度随石英颗粒平均粒径变化的试验结果.图4给出了含不同粒径石英颗粒试样的剪切强度随法向法压力变化的实验结果.

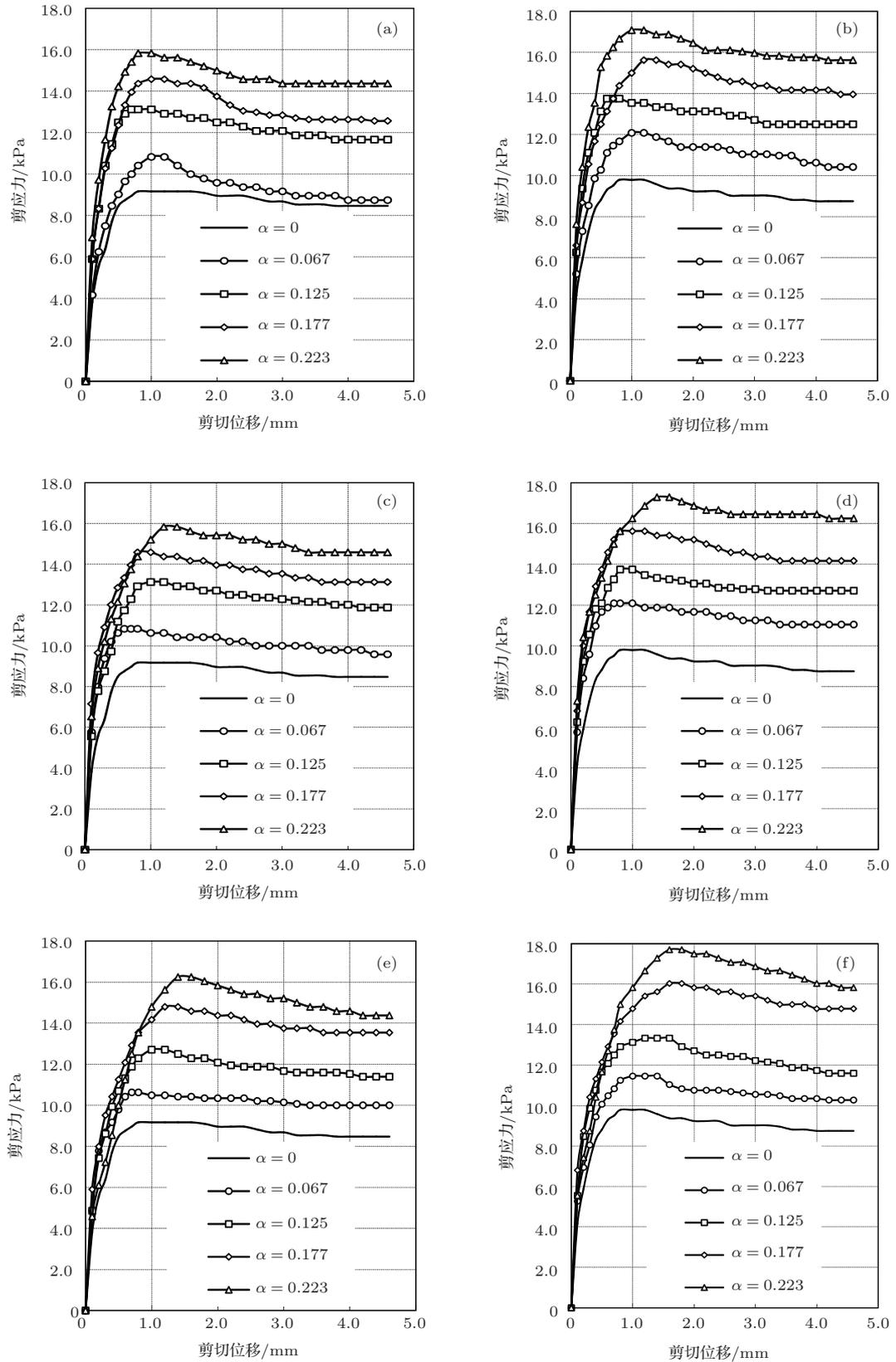


图2 直剪试验的剪应力-剪切位移曲线 (a) $d = 0.75$ mm, 0.9 mm, $p = 50$ kPa; (b) $d = 0.75$ mm, 0.90 mm, $p = 100$ kPa; (c) $d = 0.50$ mm, 0.65 mm, $p = 50$ kPa; (d) $d = 0.50$ mm, 0.65 mm, $p = 100$ kPa; (e) $d = 0.25$ mm, 0.35 mm, $p = 50$ kPa; (f) $d = 0.25$ mm, 0.35 mm, $p = 100$ kPa

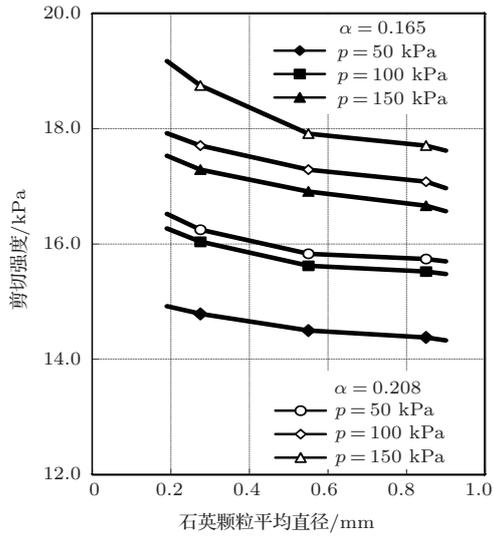


图3 剪切强度随颗粒粒径变化试验结果

2.3 三轴抗剪试验及结果

三轴抗剪试验是在全自动三轴剪切仪上按土工试验相关规范进行的不排水不固结(UU)和固结不排水(CU)的三轴抗剪试验,图5所示为三轴抗剪试验的加载示意图.对于UU三轴抗剪试验,试样密封在橡皮膜内,整个试验过程不能排水;先施加围压 σ_3 ,随后施加轴向偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 直至剪坏.对于CU三轴抗剪试验,先施加围压 σ_3 使试样充分排水固结(产生体积压缩),然后在不排水状态下施加轴向偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 直至剪坏.试验测得轴向应变 ε_1 和偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$,可得剪应力-应变关系曲线及剪应力强度.

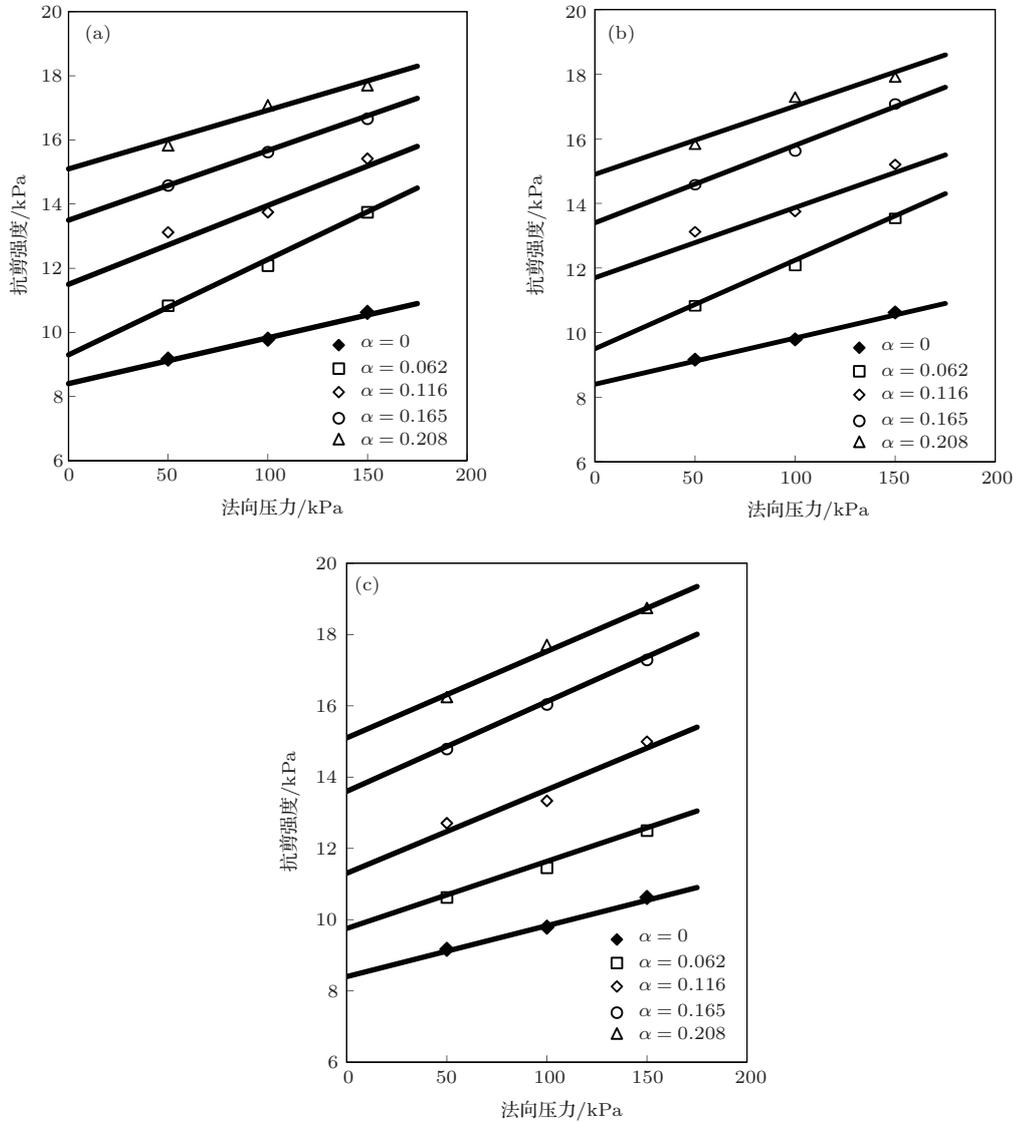


图4 剪切强度随法向压力变化试验结果 (a) $d = 0.75$ mm, 0.90 mm; (b) $d = 0.50$ mm, 0.65 mm; (c) $d = 0.25$ mm, 0.35 mm

图6, 图7分别给出了三轴UU抗剪和三轴CU抗剪的应力应变关系试验曲线. 其中, ε_1 表示轴向应变; $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 为与轴向成 45° 截面上的剪应力; d 表示试样中石英颗粒粒径, 掺入的各粒径石英颗粒的重量相等; α 为试样中石英颗粒的总体分比. 图8给出了三轴UU抗剪和三轴CU抗剪的剪应力强度 τ_q 试验结果. 其中, d 表示石英颗粒平均粒径; p 表示固结围压 (即为 σ_3).

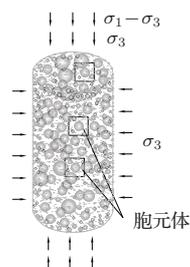


图5 三轴抗剪试验加载示意图

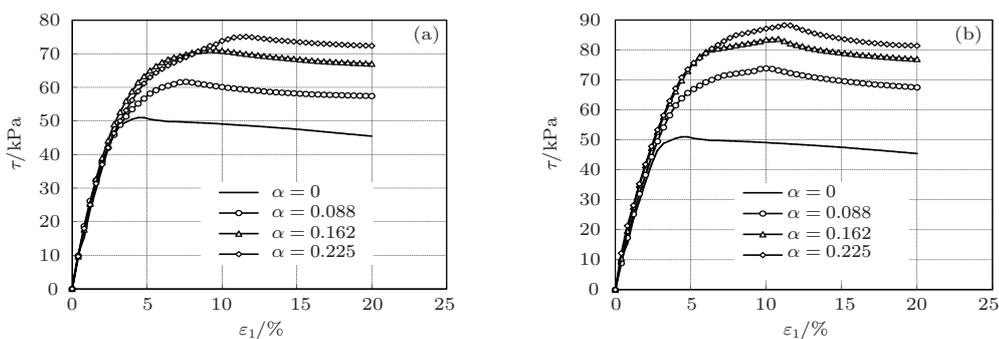


图6 三轴UU抗剪应力应变曲线试验结果 (a) $d = 0.275$ mm, 0.55 mm, 0.85 mm; (b) $d = 0.15$ mm, 0.275 mm

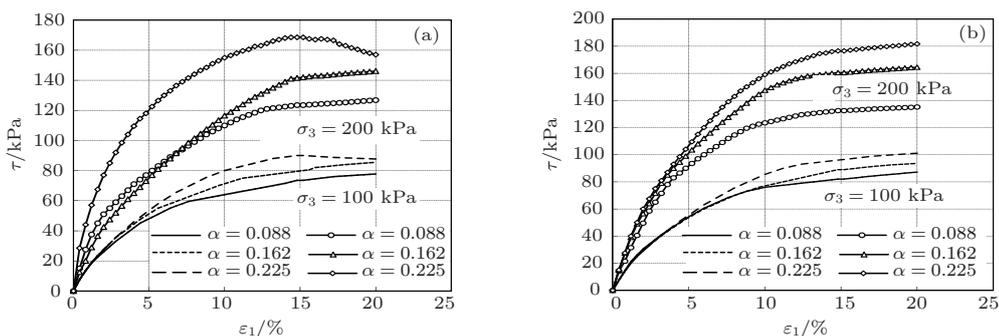


图7 三轴CU抗剪应力应变曲线试验结果 (a) $d = 0.55$ mm, 0.85 mm; (b) $d = 0.15$ mm, 0.275 mm

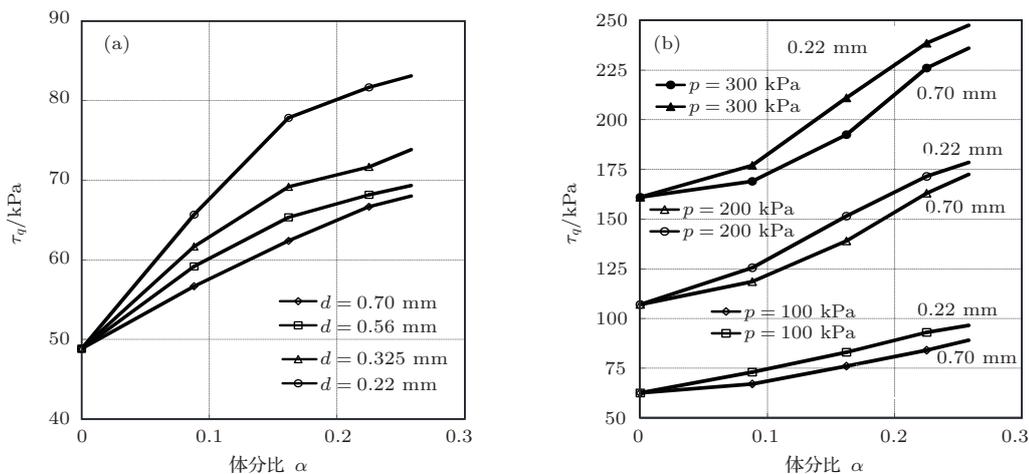


图8 剪应力强度三轴试验结果 (a) 三轴UU抗剪试验; (b) 三轴CU抗剪试验

3 实验结果分析及微细观物理机理解释

3.1 颗粒介质的物理力学特性尺度效应

上节给出了由土矿物颗粒制备的具有不同颗粒尺度试样的直剪快剪试验以及三轴UU和CU抗剪试验的变形曲线及剪应力强度的测试结果, 这些试验结果随试样石英颗粒粒径及其体分比改变而明显变化, 展示出颗粒介质的变形和强度等物理力学特性强烈的颗粒尺度效应.

从图2所示的直剪快剪试验的剪应力-剪切位移曲线可见, 当剪切位移较小时, 剪应力随剪切位移增大而快速增加, 随后剪应力增加的速度逐渐减缓而进入屈服阶段. 图6所示的三轴UU抗剪试验的应力应变曲线具有与直剪快剪的变形曲线相似特点, 轴向应变较小时, 剪应力随轴向应变增大而快速增加, 随后增加的速度逐渐减缓而进入屈服阶段. 图7所示的三轴CU抗剪试验的应力应变曲线与图2及图6所示的变形曲线有较大特性差异, 进入屈服阶段之前产生较大的变形, 且非线性变形性质明显. 无论是直剪快剪、三轴UU抗剪还是不同固结围压的三轴CU抗剪试验, 上述的变形试验曲线均随试样所含石英颗粒(以下称为砂粒)粒径及其体分比的变化而明显改变. 当砂粒粒径不变时, 变形特性随砂粒体分比增加而明显增强, 即同样剪应变(或剪切位移)产生的抗剪应力明显增大; 当砂粒体分比不变时, 变形特性随砂粒粒径的减小而明显增强. 从图3, 图4和图8所示直剪快剪及三轴UU和CU抗剪的剪应力强度试验结果可见, 直剪快剪强度及三轴UU和CU抗剪强度均随砂粒粒径及其体分比的改变而明显变化, 展示出颗粒介质抗剪强度与变形特性相似的尺度效应. 当砂粒粒径不变时, 剪应力强度随砂粒体分比增加而明显提高; 当砂粒体分比不变时, 剪应力强度随砂粒粒径的减小而明显提高. 从试验结果还可看出, 砂粒的体分比对变形和强度的影响比其粒径的影响总体上更加敏感, 即变形和强度特性随体分比的变化更显著一些.

3.2 颗粒尺度效应的微细观物理机理解释

颗粒介质变形和强度等特性随颗粒粒径大小和体分比(含量比例)变化而改变的现象, 反映了其

力学特性的颗粒尺度效应. 自然界和工程中存在大量的颗粒介质, 正确解释和理解颗粒介质特性颗粒尺度效应的物理机理, 有助于解决诸如滑坡、泥石流等自然灾害以及颗粒输送等工程问题, 也为相应设计计算提供指导.

颗粒介质特性的(颗粒)尺度效应源于介质颗粒性的基本特征, 是颗粒多尺度相互作用内在本质体现, 因此, 物理机理解释还应从颗粒间相互作用微力场性质入手. 介质中颗粒间存在范德华力、库仑力和液桥力等主要微观作用力^[21], 其性质和大小与颗粒的尺度、颗粒矿物和孔隙液的性质等诸多因素有关, 是引起颗粒聚集或分散的根本原因. 微小颗粒比表面积大, 吸附能力强, 表面常覆盖吸附层(如水膜等), 颗粒间非直接接触, 粒间摩擦效应很小, 聚集效应显著; 反之, 粗颗粒之间直接接触, 摩擦效应显著, 聚集效应很小. 在介质变形或运动过程中, 颗粒间的聚集和摩擦效应分别产生如内聚力和内摩擦力等不同的力学效应, 导致物理力学特性差异, 即介质的力学性质与颗粒尺度紧密关联. 颗粒间的聚集和摩擦效应与颗粒间微观作用力与颗粒重力的比值(简称为微重比)有密切关系, 为便于直观比较, 图9给出了两个石英(SiO_2)颗粒间的范德华力和库仑力与其重力比值随粒径变化的计算曲线, 其中 F_e 表示库仑力, 计算所取的颗粒表面电荷密度经阳离子交换试验实测为 9419.5 静电单位/ cm^2 ; F_w 表示范德华力, Hamaker常数为 8.86×10^{-20} J. 同质颗粒间的范德华力为相互吸引力, 同质颗粒间的库仑力则是相互排斥力; 相互吸引的液桥力与水表面张力和饱和度有关, 在潮湿空气中比范德华力约大1—2个数量级^[21], 而随着饱和度增大而逐渐消失.

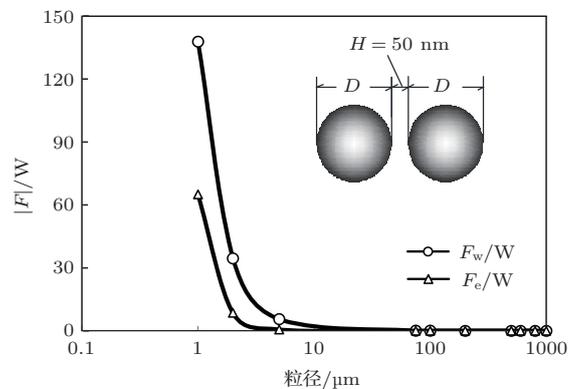


图9 颗粒间微观作用力与重力比值曲线

从图9可见, 颗粒间的范德华力和库仑力与颗

粒重力的比值(微重比)随粒径减小而迅速增大,由此可知,颗粒越小微力场作用越重要,聚集效应越显著;反之,颗粒越大则重力作用越重要,摩擦效应越显著.介质中颗粒尺度和相对含量变化时粒间微力场(或微重比)作用随之变化,引起介质变形过程颗粒聚集和摩擦的效应改变,从而导致介质特性改变,因此可把微重比作为衡量介质颗粒间聚集和摩擦效应以及划分颗粒尺度的判别参数,依据判别参数划分出介质中不同尺度颗粒相对含量,由此评估颗粒介质的相关力学特性.判别参数的确定仍需基于试验进一步深入研究.

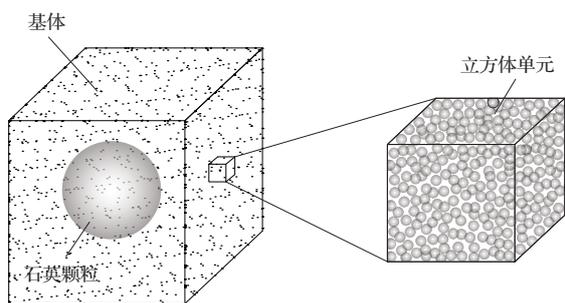


图10 颗粒介质的细观胞元体模型

上述从微观角度解释了颗粒介质特性尺度效应物理机理,下面提出胞元体模型从细观上解释颗粒介质特性尺度效应的物理机理.根据抗剪试样制备过程,可认为砂粒(石英颗粒)均匀分布于试样之中,周围由微细颗粒包裹,每个砂粒按体分比构成图1和图5试样中示意的细观胞元体,宏观上颗粒介质则由许许多多细观胞元体集合而成.细观胞元体为可基本反映介质内部材料信息的最小单位,其中微细颗粒之间的黏聚力(微力场)产生的聚集效应很显著,介质变形率在微细颗粒尺度上变化小,即微细颗粒尺度上的变形可视为连续,由此可近似认为包裹砂粒的微细颗粒聚集成连续介质(称为基体);微细颗粒可在砂粒表面胶结(吸附),图10所示为试样中取出的细观胞元体模型.胞元体在变形过程中,基体产生连续变形,在与砂粒相邻处可产生应变集中,以协调基体与砂粒之间的变形;当应变集中增大至一定程度时,基体中将出现微小协调微裂纹.图11示意了胞元体受压缩和剪切时,与砂粒相邻的基体产生协调微裂纹情况.基于上述细观胞元体模型,可认为颗粒介质特性的颗粒尺度效应由砂粒周围基体的应变梯度(应变集中)以及变形协调微裂纹而产生,砂粒使其周围的基体产生不均匀变形而引起应变梯度和协调微裂纹,导致比均匀变形

情况消耗或储存更多的能量,以使变形阻力增加,在介质宏观特性上体现出具有更强的变形性能和更高的强度.胞元体中的砂粒起到介质增强作用,当砂粒的体分比增加或体分比不变而粒径减小时,介质单位体积中的应变梯度和协调微裂纹的“密度”增加,导致介质强度和变形性能提高.上述物理机理解释了介质变形和强度特性随介质中砂粒体分比和粒径变化的颗粒尺度效应实验结果.

基于胞元体模型的颗粒介质,变形时砂粒可产生平移和转动,基体与砂粒之间可产生间断变形(如界面上相对滑动),不是传统意义上的连续介质,可视其为“准连续”介质.胞元体模型把聚集的微细颗粒“固化”为连续基体,粗颗粒视为“增强颗粒”,使颗粒体系的计算自由度大为减少,同时还可考虑颗粒介质变形的不连续性特征,可为颗粒物质体系的工业和工程设计的计算建模提供一种可行途径.

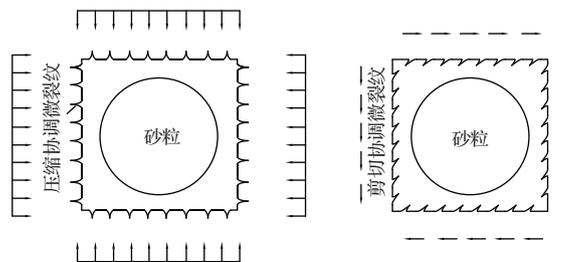


图11 胞元体变形协调微裂纹

4 胞元体模型应力公式及计算自由度分析

以轴向受压土体试样为例,导出胞元体的屈服应力公式,以进一步讨论颗粒介质尺度效应.轴向受压试样的参数和成分及其制备方法与2.1节中三轴试样相同,图12表示试样中的胞元体.把颗粒介质屈服前的胞元体应变能表示为

$$\tilde{U} = \frac{a}{2E} \tilde{\sigma}^2 = \frac{a}{2E} \sigma^2 + U(\eta), \quad (1)$$

式中, $\tilde{\sigma}$, σ 分别为胞元体平均应力和基体应力; $U(\eta)$ 表示增强颗粒(粗颗粒)产生应变梯度 η 对应的应变能,近似表示为 $U(\eta) = bE_\eta \eta^2 / 2$; a , b 分别表示应力和应变梯度的非线性因子; E_η 为变形梯度模量.由(1)式得到

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\sigma^2 + \lambda^2 \cdot \eta^2}, \quad \tilde{\sigma} \leq \tilde{\sigma}_s, \quad (2)$$

式中, $\lambda = \sqrt{EE_\eta b/a}$ 为材料常数,由试验确定; $\tilde{\sigma}_s$ 为屈服应力.采用“平均差分法”把胞元体的应变

梯度 η 近似表示为

$$\eta = \frac{\Delta \varepsilon}{l_D/2} \approx \frac{2}{l_D} (\varepsilon|_{x=l_D/2} - \varepsilon|_{x=0}) \approx \frac{2}{l_D} \left(\frac{A\varepsilon}{A} - \frac{A_D\varepsilon}{A} \right) = \frac{\pi \varepsilon d^2}{2l_D^3}, \quad (3)$$

式中, d 为增强颗粒直径; l_D 为立方胞元体的长宽高尺寸, 且 $l_D = (\pi/6\alpha)^{1/3}d$, α 为增强颗粒的体分比; $A = l_D \cdot l_D$, $A_D = A - \pi d^2/4$. 利用 (3) 式, 可把 (2) 式可进一步表达为

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\sigma^2 + (3\lambda\alpha/d)^2 \varepsilon^2}. \quad (4)$$

由上式可求得胞元体的屈服应力为

$$\tilde{\sigma}_s = \sqrt{\sigma_s^2 + (3\lambda\alpha/d)^2 \varepsilon_s^2}. \quad (5)$$

从 (4), (5) 式可知, 胞元体的应力和屈服应力随增强颗粒体分比 (体积比例) 的增加及其粒径的减小而提高, 与尺度效应物理机理解释相符. 图 13 给出了胞元体屈服应力的理论与实验对比结果, 理论结果与实验具有较好的一致性.

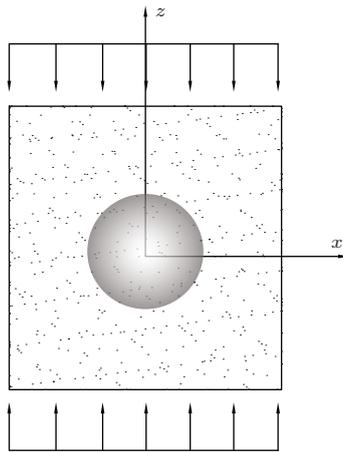


图 12 轴向受压胞元体

下面分析胞元体模型的计算自由度问题. 对于颗粒介质通常采用离散元或颗粒流方法进行计算, 而对于胞元体, 由于其中的微细颗粒聚集为连续基体介质, 可视基体为 Cosserat 介质, 可采用有限元进行计算. 采用立方体单元精细有限元网格计算基体变形时, 若取单元尺寸为基体颗粒平均直径的 20 倍 (约为 mm 级尺度), 设基体孔隙率为 0.50, 则立方单元体包含约 7360 个颗粒. 每个立方体单元有 8 个节点 (见图 10), 共有 8×6 个自由度; 而采用离散元或颗粒流计算时, 以单个颗粒作为计算单元, 每个颗粒有 3 个线位移和 3 个角位移共 6 个自由度, 立方体单元中包含的颗粒共有 7360×6 个自由度,

是单元体自由度的 920 倍. 由此可见, 与离散元和颗粒流方法相比, 胞元体模型即使采用精细的有限元计算, 计算自由度和计算量都可大为减少.

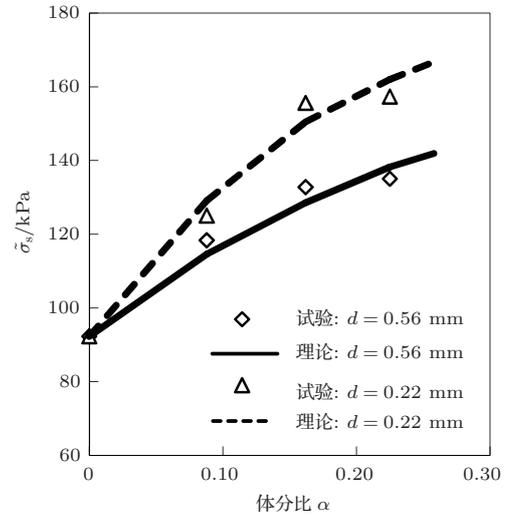


图 13 轴向受压胞元土体屈服应力

5 结 论

针对颗粒介质力学特性的颗粒尺度效应, 进行了包含不同粒径和体分比砂粒试样的系列直剪快剪和三轴抗剪试验, 首次基于颗粒间微观作用力与重力比值和胞元体模型, 分别从微观和细观角度解释了颗粒尺度效应的物理机理, 提出衡量介质聚集和摩擦效应的微重比判别参数以及应变梯度和协调微裂纹引起颗粒尺度效应的细观机理解释, 初步验证了基于物理机理的理论模拟结果与实验结果有较好的一致性. 主要结论如下:

1. 颗粒介质的变形和强度特性随介质中粗细颗粒的比例和粒径变化而改变, 当粗颗粒 (砂粒) 体分比不变而粒径减小时, 介质的变形特性增强, 剪应力强度提高.

2. 颗粒介质的变形和强度特性同时随介质中粗颗粒 (砂粒) 体分比的变化而改变, 当砂粒粒径不变而体分比增加时, 介质的变形特性增强, 剪应力强度提高; 体分比对变形特性和剪应力强度的影响比粒径的影响更加显著.

3. 基于介质特性尺度效应微观物理机理分析认为, 介质中微细颗粒主要产生聚集效应, 粗颗粒 (砂粒) 则产生摩擦效应, 起到增强基体作用; 可把微重比作为衡量颗粒间聚集和摩擦效应以及划分颗粒尺度的判别参数, 依据判别参数计算介质中不

同尺度颗粒的相对含量,可依此评估颗粒介质的相关力学特性.

4. 基于介质特性尺度效应细观物理机理分析认为,颗粒介质可视其由许多细观胞元体集合而成,变形时胞元体内的应变梯度和协调微裂纹“密度”随砂粒的粒径和体分比变化而改变,以致变形时单位体积中消耗或储存的能量改变,引起介质变形阻力改变,由此导致介质特性的颗粒尺度效应.

参考文献

- [1] Conway S L, Shinbrot T, Glasser B J 2004 *Nature* **431** 433
- [2] Zhou J, Long S, Wang M Q, Dinsmore A D 2006 *Science* **312** 1631
- [3] Corwin E I, Jaeger H M, Nagel S R 2005 *Nature* **435** 1075
- [4] Zuriguel I, Mullin T 2008 *Proc. R. Soc. A* **8** 99
- [5] Sun Q C, Wang G Q 2009 *An introduction to the mechanics of granular matter* (Beijing: Science press) p1 (in Chinese) [孙其诚, 王光谦 2009 颗粒物质力学导论 (北京: 科学出版) 第1页]
- [6] Zhao C G, Zhang X D, Guo X 2006 *Adv. in Mech.* **36** 611 (in Chinese) [赵成刚, 张雪东, 郭璇 2006 力学进展 **36** 611]
- [7] Yao Y P, Hou W 2009 *Rock and Soil Mech* **30** 2881 (in Chinese) [姚仰平, 侯伟 2009 岩土力学 **30** 2881]
- [8] Campbell C S 2006 *Technology* **162** 208
- [9] Ghiabi H, Selvadurai 2009 *Int. J. Geomech.* **9** 1
- [10] Yuan X X, Li L S, Wen P P, Shi Q F, Zheng N 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 014501
- [11] Lu C H, Shi Q F, Yang L, Sun G 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2542
- [12] Abdul Q, Madad A S, Saeed A K 2013 *Chin. Phys. B* **22** 058301
- [13] Abdul Q, Shi Q F, Liang X W, Sun G 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034601
- [14] Zhao Y Z, Jiang M Q, Xu P, Zheng J Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1819 (in Chinese) [赵永志, 江茂强, 徐平, 郑津洋 2009 物理学报 **58** 1819]
- [15] Yi C H, Mu Q S, Miao T D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7750 (in Chinese) [宜晨虹, 慕青松, 苗天德 2009 物理学报 **58** 7750]
- [16] Zsaki A M 2009 *Comp and Geotech.* **36** 568
- [17] Majmudar T S, Sperl M, Luding S, Behringer R P 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 058001
- [18] Jop P, Forterre Y, Pouliquen O 2006 *Nature* **441** 727
- [19] Zhang Q, Hou M Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244504 (in Chinese) [张祺, 厚美瑛 2012 物理学报 **61** 244504]
- [20] Inam A, Ishikawa T, Miura S 2012 *Soils and Found.* **52** 465
- [21] Ren J, Shen J, Lu S C 2005 *Science and technology of particle dispersing* (Beijing: Chemical industry press) p66 and p103 (in Chinese) [任俊, 沈健, 卢寿慈 2005 颗粒分散科学与技术 (北京: 化学工业出版社) 第66页, 103页]

Shear test and physical mechanism analysis on size effect of granular media^{*}

Fang Ying-Guang[†]

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

(Received 31 August 2013; revised manuscript received 4 November 2013)

Abstract

Shear test samples of different grain sizes are prepared by using mineral particles of soil, and a series of tests of quick direct shear and tri-axial shear are performed to study the size effect of granular media. Deformation curves and shear stress strength are given of test samples with particles of different size and volume fraction. On the basis of the ratio of micro-acting forces between particles to gravity and the cell element model, physical mechanism of grain size effect is, for the first time as far as we know, explained on the micro-level and mecro-level respectively. Test results show that the deformation characteristic of granular media is enhanced and its shear stress strength increases with increasing volume fraction and decreasing of particle size, and the effect of volume fraction on the deformation characteristics and strength is more notable than that of grain size. According to mechanism analysis on size effect, parameter ratio of micro-acting forces to gravity is suggested to assess aggregation and friction effects of particles in the media, and mecro-mechanism is interpreted as strain gradient and micro-cracks of deformation coordination leading to grain size effect. The cell element model presented in this paper can greatly reduce the degrees of freedom of granular media and provides an available way for calculation modeling in industry and engineering design.

Keywords: granular media, grain size effect, shear test, physical mechanism

PACS: 45.70.-n, 83.80.Fg, 83.80.Nb

DOI: [10.7498/aps.63.034502](https://doi.org/10.7498/aps.63.034502)

^{*} Project supported by State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology (Grant No. 2012ZA04).

[†] Corresponding author. E-mail: fangyg@scnu.edu.cn