

文章编号: 1000-7598-(2014)11-3086-07

颗粒破碎对绢云母片岩强度和变形影响的试验研究

秦尚林¹, 杨兰强^{1,2}, 陈荣辉¹, 陈善雄¹

(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.浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315000)

摘 要: 为进一步弄清颗粒破碎对软岩粗粒料强度、变形的影响, 开展 2 组不同初始干密度下的绢云母片岩粗粒料的固结排水三轴试验, 分析了绢云母片岩粗粒料颗粒破碎规律, 并探讨了颗粒破碎对绢云母片岩粗粒料力学性质的影响。结果表明, 绢云母片岩粗粒料相对破碎率随围压的增加而增大, 但颗粒破碎增幅速率受初始干密度影响较大, 颗粒破碎与围压之间的关系可用线性关系描述; 由于初始孔隙率的影响, 使得试样在同一应力水平下高密度试样颗粒破碎明显高于低密度试样; 颗粒破碎对高密度试样抗剪强度降低的影响高于低密度试样, 导致两种干密度试样的应力-应变曲线在某处出现相交, 最终出现初始密度低的试样抗剪强度大于初始密度高的试样抗剪强度的现象; 高密度试样孔隙率较小, 其剪胀因子一直保持在 1 附近, 而低密度试样孔隙率较大, 受颗粒破碎和剪胀的影响迟缓一些, 低密度试样体变较高密度要大些, 但整体上由于颗粒破碎和剪胀的影响, 绢云母片岩粗粒料的体变均不大。

关 键 词: 绢云母片岩; 相对破碎率; 不同干密度; 抗剪强度; 剪胀因子

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental study of effect of particle breakage on strength and deformation of sericite schist

QIN Shang-lin¹, YANG Lan-qiang^{1,2}, CHEN Rong-hui¹, CHEN Shan-xiong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Zhejiang Engineering Investigation Institute, Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: In order to further clarify the effect of particle breakage on strength and deformation of soft rock coarse aggregates, consolidation drained triaxial shear tests of two groups of different initial dry densities of sericite schist coarse aggregates are carried out. The law of particle breakage and its influence on mechanical properties of sericite schist coarse aggregates are discussed. The result shows that the relative particle breakage index of sericite schist coarse aggregates increases with confining pressure. But the growth rate of particle breakage is greatly influenced by the initial dry density. The relationship between particle breakage and confining pressure might be described by a linear function. The particle breakage of high density samples is significantly higher than low density samples under the same stress level because of the influence of the initial porosity. So influence of particle breakage on shear strength decrease under the high density is higher than the influence of low density samples; this might cause stress strain curve of two different dry densities to intersect somewhere. Finally, the shear strength of low density is greater than the high density samples. The porosity of high density sample is small and its dilatancy factor always stay near 1. The porosity of low density sample is larger and the particle breakage and dilatancy delay the impact on its dilatancy factor. So the lower density of samples, the larger volume change is. However, the volume change is very small because of the influence of particle breakage and dilatancy of sericite schist coarse aggregates.

Key words: sericite schist; relative particle breakage rate; different dry densities; shear strength; dilatancy factor

1 前 言

粗粒料是一种天然的填筑材料, 广泛应用于大坝、路基、机场等填筑工程。粗粒料的力学特性一

直是岩土工程中的重要研究方向之一, 随着大型三轴试验仪的发展, 研究人员对粗粒料进行了不同应力路径、不同围压、循环加、卸载等条件下的三轴试验^[1-3], 但主要集中在圆球状、块状的硬质母岩

收稿日期: 2013-07-02

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51079142); 中国科学院重点部署项目 (No. KZZD-EW-05); 湖北省谷城至竹溪高速公路科技项目 (No. GZL-KJ-02-01)。
第一作者简介: 秦尚林, 男, 1973 年生, 博士, 副研究员, 主要从事特殊土工程特性与处治方法及灾害防治技术等方面研究。E-mail: qinshlin@sina.com

粗粒料方面三轴试验研究。大量试验研究和数值模拟多采用圆球状、块状颗粒试样，而对片状颗粒缺乏足够地认识，导致采用片状粗粒料作为填料的工程时常发生各种病害。

颗粒破碎是影响粗粒土剪切特性的重要因素。在土力学研究初期，Terzaghi 就提出土细观结构的概念，此后随着细观土力学的发展，越来越多的学者对颗粒破碎进行了研究。Lee 等^[4]、Marsal^[5]、Hardin^[6]等学者对颗粒破碎进行了度量，国内外许多研究人员对影响颗粒破碎的因素进行了探索，建立了一些考虑颗粒破碎的本构模型，并认识到颗粒破碎是影响粗粒料力学特性的重要因素。程展林等^[7]采用 CT 三轴仪研究了块状粗粒土颗粒运动规律。王光进等^[8]对砾石粗粒土三轴试验进行了数值模拟。目前对颗粒破碎的研究主要集中在影响因素的试验研究上，破碎对土体的力学性质会产生什么样的影响鲜见文献报道^[9]，对于更易破碎的片状颗粒和风化片状颗粒研究很少。

绢云母片岩是一种非常特殊的片状软岩，作为路基填料，压实过程中颗粒极易破碎，表现出类似于粉土的压实特性，压实质量非常难以控制，国内外对其力学特性及压实特性研究甚少，鲜见相关文献资料。本研究对片状、易发生颗粒破碎的绢云母片岩粗粒料进行了大型三轴试验及颗粒分析试验，初步分析了绢云母片岩粗粒料颗粒破碎特性，重点探讨了颗粒破碎对绢云母片岩粗粒料力学性质的影响。

2 粗粒料力学特性试验研究

2.1 片岩颗粒的矿物特征及基本性质

试验试样取自谷竹高速公路，线路位于鄂西北地区，沿线广泛赋存绢云母片岩，见图 1。



图 1 绢云母片岩
Fig.1 Sericite schist

绢云母片岩主要矿物成分为云母、绿泥石、石英和长石，呈鳞片状结构，片状构造，极易沿片理面劈开成极薄片状，径厚比大。因此，绢云母片岩

粗粒料棱角丰富，且强度低，相比块状结构的颗粒更易发生破碎。另外，绢云母片岩表面滑腻，碾碎后的细颗粒具有一定的黏性，兼具云母类矿物和黏土类矿物的多种特点。

对绢云母片岩进行 X 衍射试验，其结果见表 1。其主要矿物成分为绿泥石和云母，绿泥石与云母极相似，解理完全，参差状断口。

表 1 X 衍射试验分析结果
Table 1 X-ray diffraction experiments analysis

矿物成分	绿泥石	云母	石英	长石
含量/%	35	35	25	5

2.2 试样制备

试验在 2 000 kN 大型动静三轴试验机上进行，试样尺寸为 $\phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ，试样中容许最大粒径为 60 mm。由于试验仪器尺寸的限制，必须对现场原始级配进行缩尺。为能近似反映出材料的实际工作条件，本试验采用替代法^[10]对原始试料进行缩尺备样，用粒径为 5~60 mm 替代粒径大于 60 mm 的颗粒，并保持小于 5 mm 的粒径含量不变，初始级配和试验级配如图 2 所示。其中，粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量小于 5%，属于无黏性粗粒料。

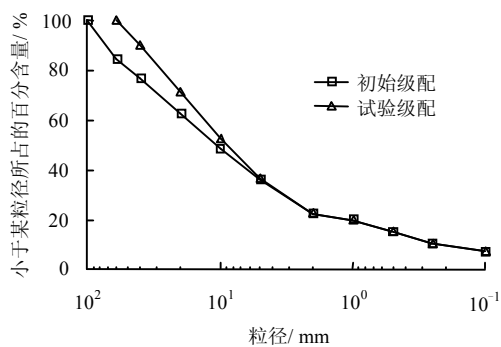


图 2 初始级配和试验级配
Fig.2 Initial gradation and test gradation

按同一级配，两种干密度制备试样，为方便说明，试样按表 2 进行分组编号。其中，ST1 为较高初始密度试样组，分 6 层装样，每层高 10 cm，击实成型；ST2 为较低初始密度试样组，分 4 层装样，每层高 15 cm，人工轻微振捣压实。

表 2 试样分组及编号情况
Table 2 Grouping and numbering of sample

试样分组	控制干密度 /(g/cm ³)	围压 /kPa
ST1	2.18	200、400、600、800
ST2	1.98	

2.3 试验方法

试样直径为 300 mm、高为 600 mm，由不同粒径组颗粒按上述试验级配制成，对试验后的每个试样整体风干后进行筛分试验。每组做 4 个试样，均为饱和固结排水三轴试验，围压分别取 200、400、600、800 kPa。制样、饱和方法以及加载按规范要求，轴向加载由应变控制，剪切速率为 1 mm/min。为研究颗粒破碎规律，轴向加载终止条件：当应力-应变关系曲线有明显的峰值时，达到峰值后 2% 的应变停止；当应力-应变无峰值时，取应变 15% 所对应的应力为破坏应力，并使应变达到 17% 停止加载。试验完毕后对样品进行全料颗粒分析试验。

3 绢云母片岩粗粒料颗粒破碎分析

3.1 颗粒破碎的度量

为了描述颗粒破碎的程度，定量地分析颗粒破碎对粗粒土力学特性的影响，许多学者定义了颗粒破碎参量来衡量粗粒料的颗粒破碎。常用的方法有以下几种。

Lee 等^[4]在研究砂土的颗粒破碎时，将试验前颗粒含量为 15% 的粒径与试验后颗粒含量为 15% 的粒径的比值作为破碎参量，即 $B_{15}=D_{15i}/D_{15f}$ ，其中 D_{15i} 、 D_{15f} 分别为试验前、后颗粒含量为 15% 所对应的粒径。

柏树田^[11]提出，用堆石料受荷前、后限制粒径之差来度量颗粒破碎，即 $B_{60}=D_{60i}-D_{60f}$ ，该方法主要都是针对某一粒径的变化来描述颗粒破碎。

Marsal^[5]在对土的抗剪强度进行讨论时定义了破碎参量 B_g ，将试验后级配曲线上某一筛分粒径的百分含量减去试验前该筛分粒径的百分含量得到该粒径的百分含量变化值，并把各个筛分粒径的百分含量变化值的正值部分之和定义为破碎参量 B_g ，即

$$B_g = \sum_{k=1}^n \Delta W_k \quad (1)$$

式中： B_g 为颗粒破碎率； $\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf}$ ， W_{ki} 为试验前级配曲线上某级粒组的含量， W_{kf} 为试验后级配曲线相同粒组的含量。

Hardin^[6]对堆石料和砂土进行了大量的试验，发现粒径小于 0.074 mm 的土颗粒很难破碎。因此，将级配曲线与 0.074 mm 竖线所围成的面积定义为土体的破碎势 B_p ，并定义破碎参量 B_t 为试验前后的破碎势之差，即

$$B_t = B_{pi} - B_{pf} \quad (2)$$

式中： B_{pi} 、 B_{pf} 分别为试验前、后的破碎势。为了消除土体初始级配的影响，Hardin 提出了相对破碎参量 B_r 的概念，即 $B_r = B_t/B_{pi}$ 。该破碎参量能够整体地反映颗粒破碎。

3.2 颗粒破碎试验结果及分析

为研究绢云母片岩粗粒料在不同装样干密度、不同应力水平下的颗粒破碎情况，对饱和固结排水三轴试验后的试样进行了颗粒分析试验。试验结果及颗粒破碎参量计算数据见表 3，图 3 为围压与各种颗粒破碎参量关系曲线。

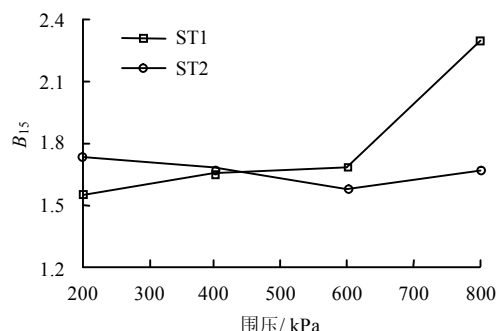
表 3 颗粒破碎统计
Table 3 Statistic data of particle breakage

试样 分组	围压 / kPa	B_{15}	B_{60} / mm	B_g / %	B_r / %
ST1	200	1.55	4.66	44.96	15.15
	400	1.66	5.05	47.04	15.88
	600	1.68	5.37	56.14	19.13
	800	2.30	5.53	61.70	20.86
ST2	200	1.74	4.30	44.09	12.86
	400	1.68	4.59	53.79	14.92
	600	1.58	4.62	56.61	16.23
	800	1.67	4.64	58.84	16.78

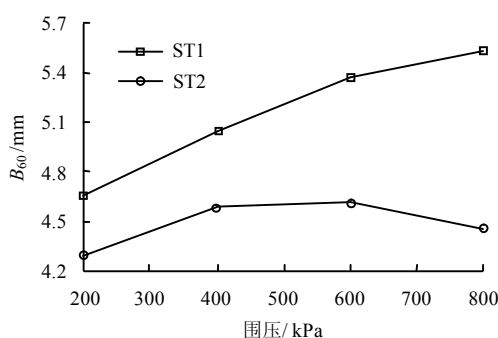
由表 3 可以看出，对于较高初始密度的 ST1 试样组， B_{15} 、 B_{60} 、 B_g 和 B_r 均随围压的增加而增大；对于较低初始密度的 ST2 试样组， B_r 随围压的增加略微增大，而 B_{15} 、 B_{60} 和 B_g 随围压增加呈波动变化。从 B_g 的计算中可以看出，只有大于 10 mm 粒径的颗粒组含量是减少的，只有该部分对 B_g 的值产生影响。 B_{15} 、 B_{60} 两种参数比较类似，均反映某一粒径在试验前、后的变化，而相对破碎率 B_r 能反映级配曲线与 0.074 mm 线的面积变化情况，综合考虑了各粒组含量变化的影响，并消除了初始级配的影响，因此采用相对破碎率 B_r 进行分析，得到以下认识：

(1) 绢云母片岩粗粒料在较低应力水平下也易发生颗粒破碎，围压为 200 kPa 时，初始装样密度高的试样与初始装样密度低的试样相对颗粒破碎率 B_r 分别达到了 15.15% 和 12.86%，相比于泥岩、灰岩和砂岩更易破碎；(2) 除围压为 200 kPa 外，其余围压下初始干密度越大，相对破碎率越大。初始干密度越高，试样孔隙率越小，进行饱和排水剪切时，相比于低密度试样，颗粒间有更多的接触点，颗粒不宜翻滚和滑动，加上绢云母片岩自身的强度和形状特点，更容易发生破碎或者沿颗粒本身的层理破裂；(3) 同一密度下，随着围压增大，颗粒间的承载结构会破坏，颗粒变得更易滑动，因此，相

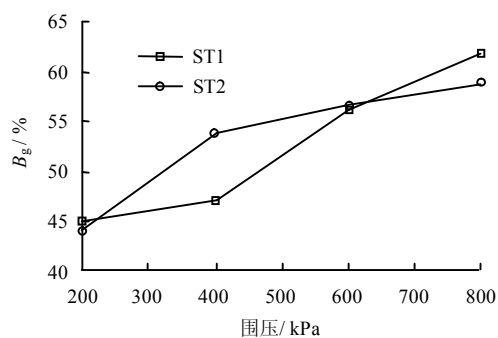
对破碎率 B_r 越大; 初始干密度越高, 相对颗粒破碎率随围压的增加而增加。



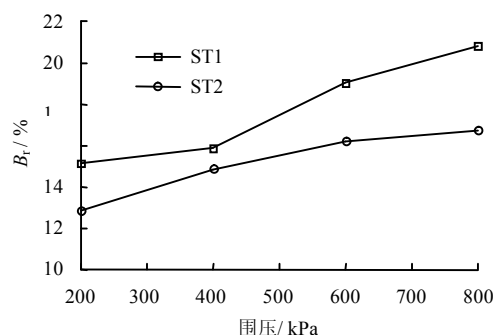
(a) B_{15} 与围压的关系



(b) B_{60} 与围压的关系



(c) B_g 与围压的关系



(d) B_r 与围压的关系

图 3 颗粒破碎参量与围压的关系

Fig.3 Relationships between particle breakage parameter and confining pressure

文献[12]将 B_r 与围压 σ_3 的关系采用式 (3) 来描述。

$$\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) / B_r = a + b \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) \quad (3)$$

式中: a 、 b 为拟合参数; p_a 为标准大气压强 (kPa)。

本试验结果采用式 (3) 拟合曲线, 如图 4 所示。

表明 $\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) / B_r$ 与 $\frac{\sigma_3}{p_a}$ 之间具有良好的线性关系, 进一步验证了式 (3) 具有一定的普遍意义。

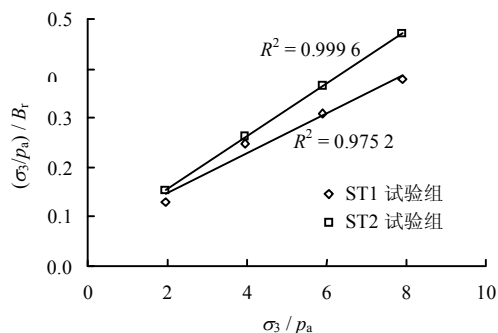


图 4 相对破碎率与围压的关系

Fig.4 Relationships between particle breakage parameter and confining pressure

4 颗粒破碎对力学性质的影响

4.1 颗粒破碎对应力-应变关系的影响

为研究颗粒破碎对绢云母片岩粗粒料力学性质的影响, 图 5 给出了 ST1 和 ST2 两组试样的饱和固结排水三轴试验 ($\sigma_1 - \sigma_3$) - ε_1 和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线。由图可知, 偏应力峰值随围压增大而增大, 两种干密度试样在整个加载过程中均表现为应变硬化型, 但同一围压下初始阶段, ST2 低密度试样组的偏应力小于 ST1 高密度试样组的偏应力; 随着轴向应变的增加, ST2 的偏应力增幅速率较大, 当应变达到一定程度时, 在同一坐标系下两种干密度试样的应力-应变曲线出现交叉, 表现出初始密度低的试样偏应力峰值大于初始密度高的试样。

一般而言, 初始干密度越大, 对应的峰值强度也就越高, 而绢云母片岩粗粒料却出现了初始干密度越大, 峰值强度越低的情况, 分析认为主要是由于颗粒破碎造成的。大量研究表明, 剪胀提高了抗剪强度, 剪缩减小了抗剪强度。由于颗粒破坏, 使断裂的颗粒残余部分更容易嵌入孔隙中, 不易形成大孔隙, 因而大大减小了土产生剪胀的可能性, 颗粒破碎量大时很少发生剪胀, 因此, 颗粒破碎导致粗粒料的抗剪强度降低。

为了更好地解释这个问题, 这里采用了剪胀因子 $D^{[13]}$, 其定义为

$$D = 1 - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \quad (4)$$

当 $D > 1$ 时, 表示剪胀; $D < 1$ 时, 表示剪缩。

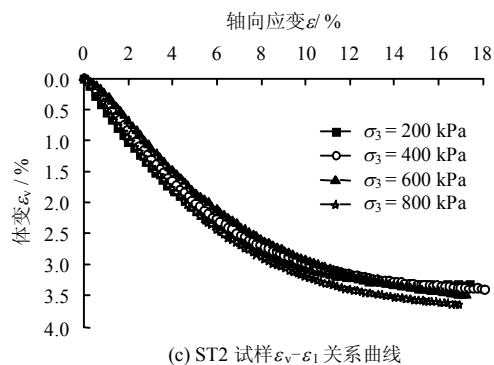
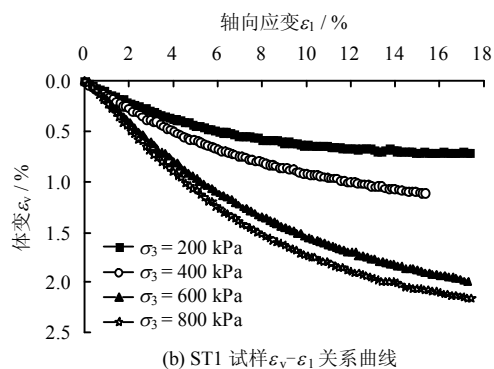
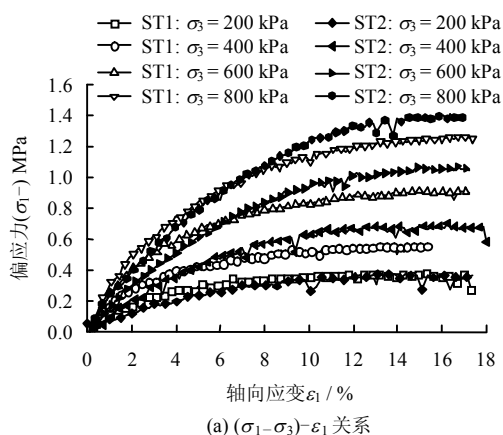


图5 偏应力-轴向应变关系和
体积应变-轴向应变关系曲线
Fig.5 Curves of deviatoric stress-strain
and volumetric strain-axial strain

图6为两种干密度下的剪胀因子与轴向应变的关系。由图可知, 围压从200 kPa到800 kPa时, ST1 试样组随着轴向应变增大, 其剪胀因子基本位于0.8~1.0之间, ST2 试样组随着轴向应变增大, 其剪胀因子出现先减小后逐渐增大, 并趋近于1的现象。图6(b)可以反映出, 试样在剪切过程中均表现出先剪缩, 后逐渐朝剪胀的方向发展。而ST1反映了在剪切的一开始, 颗粒破碎就对剪胀性就受到

抑制。由于ST1初始孔隙率较ST2要低, 初始阶段的颗粒间内嵌活动较少, 因此, 初始阶段剪缩现象不明显。由表3的颗粒破碎指数可以看出, ST1 剪切过程产生的颗粒破碎要大于ST2剪切造成的颗粒破碎。

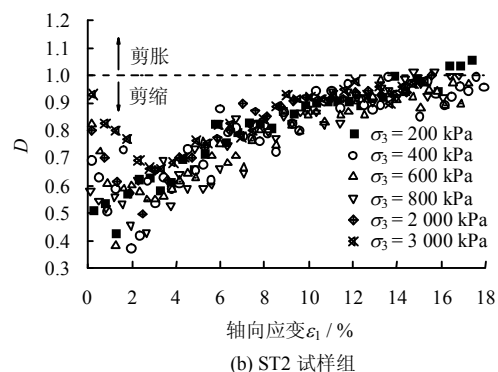
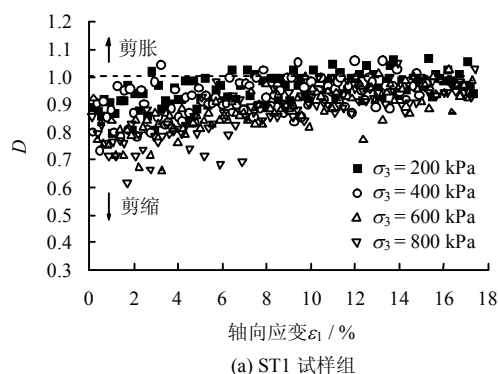


图6 剪胀因子与轴向应变关系曲线
Fig.6 Curves of dilatancy factor and axial strain

由于ST1初始干密度大于ST2的初始干密度, 加载初期, 试样的颗粒破碎程度还未对试样的抗剪强度产生影响, 因此, 初始阶段ST1偏应力大于ST2的偏应力。随着加载地继续, 大量的颗粒破碎导致粗粒料的抗剪强度降低。由于ST1初始孔隙率较小, ST1要比ST2试样先进入颗粒破碎阶段, ST1的颗粒破碎率始终大于ST2的颗粒破碎率, 所以在加载后期, ST1的颗粒破碎导致抗剪强度迅速衰减, 而ST2相对颗粒破碎较低, 两种干密度试样的应力-应变曲线在某处出现相交, 最终出现初始密度低的试样抗剪强度大于初始密度高的试样抗剪强度。

绢云母片岩粗粒料两种干密度的体变-轴向应变关系如图5(b)、5(c)所示。由图可以看出, 围压从200 kPa到800 kPa时, 体变一直以剪缩为主, 并没有出现粗粒料常有的剪胀现象。这主要是由于绢云母片岩本身颗粒以片状为主, 导致片状颗粒的转动需要消耗更多的能量, 使得颗粒间翻滚活动没有球状、块状颗粒明显。另外, 绢云母片岩属于软岩

粗粒料, 颗粒易破碎, 颗粒破碎具有抑制剪胀的作用。因此, 颗粒形态和颗粒易破碎的特性, 共同决定了剪胀受到了抑制。

ST1 高密度试样组体变相比 ST2 较低密度试样组的体变要小。分析认为, ST1 初始孔隙率较小, 图 6(a)中的 ST1 剪胀因子 D 保持在 1 附近, 说明颗粒破碎一直抑制剪胀的发展, 因此, 剪缩变形较小。而 ST2 干密度较小, 则初始孔隙率较大, 如图 6(b)所示 ST2 剪胀因子 D 先减小后增大, 说明 ST2 先经历颗粒内嵌的体缩变形, 再受颗粒破碎以及剪胀的共同作用, 因此, ST2 的体变要比 ST1 大一些。

4.2 颗粒破碎对抗剪强度的影响

图 7 为 2 组试样在不同围压下的摩尔圆和抗剪强度包线, 试验结果大体上符合摩尔-库仑强度计算公式:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (5)$$

式中: φ 为粗粒料咬合产生的内摩擦角; c 为粗粒料咬合产生的表观黏聚力。

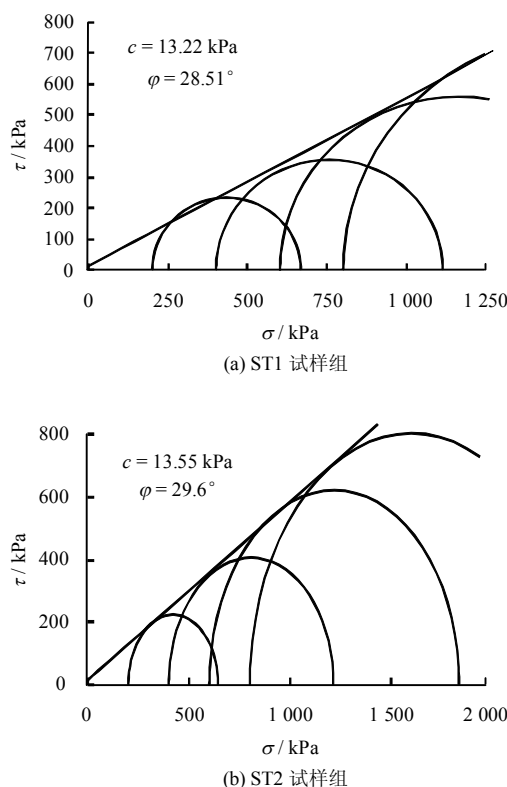


图 7 试样摩尔圆和抗剪强度包络线

Fig.7 Mohr circles and shear strength envelopes of sample

一般情况下, 试样密度越高, 其抗剪强度指标也会越高, 但从图 7 可以看出, 本次试验应力范围内绢云母片岩高密度试样的抗剪强度指标的 c 、 φ 值均略低于低密度试样。分析认为, 由于颗粒破坏,

使断裂的颗粒残余部分更容易嵌入孔隙中, 不易形成大孔隙, 大大减少了土产生剪胀的可能性, 颗粒破碎量大时会很少发生剪胀, 因此颗粒破碎导致粗粒料的抗剪强度降低; ST2 初始孔隙较大, 在初始阶段需要经历一段时间剪缩后才会受颗粒破碎和剪胀的影响, ST1 孔隙率较小, 易颗粒破碎, 加载过程中发生了大量的颗粒破碎, 导致试样抗剪强度降低; ST2 颗粒破碎发展历程要比 ST1 迟缓, 使得同时期的颗粒破碎对试样的抗剪强度影响没有 ST1 大, 因此, ST2 的峰值强度要比 ST1 要高。

由于试样的颗粒破碎受初始密度的影响, 试样最终颗粒破碎率是不同的, 导致试验完毕后试样的最终密度是不同的, 表 4 为 ST1 与 ST2 试样试验完毕后的干密度测试结果。由表可以看出, 在相同的试验条件下, 试验完毕后 ST1 的干密度要小于 ST2 的干密度。表明初始干密度高的试样, 受颗粒破碎的影响后, 其最终干密度并不一定高, 图 7 所描述试样抗剪强度参数正是这种结果的反映, 这也表明颗粒破碎是导致强度变化的主要原因。

表 4 试验完毕后试样的干密度

Table 4 Dry density of the samples after test

试样	围压/kPa		
	400	600	800
ST1	2.19	2.21	2.22
ST2	2.22	2.24	2.25

5 结 论

(1) 绢云母片岩粗粒料易发生颗粒破碎, 相对破碎参量 B_r 随围压的增加而增大, 初始干密度越大, 随围压增大越明显, B_r 与围压的关系可以用线性关系描述; 在较高围压下, 初始干密度越大, 颗粒破碎量越大。

(2) ST2 初始孔隙率较大, 在初始阶段需要经历一段时间体缩变形, 才会受颗粒破碎和剪胀的影响。ST1 孔隙率较小, 易颗粒破碎, 加载过程中发生大量的颗粒破碎的时间要早。当颗粒破碎严重到一定程度, 会导致试样抗剪强度降低。而 ST2 颗粒破碎发展历程要比 ST1 迟缓, 使得同时期的颗粒破碎对试样的抗剪强度影响没有 ST1 大。两种干密度试样的偏应力在某处出现相交, 最终出现初始密度低的试样抗剪强度大于初始密度高的试样抗剪强度。

(3) ST1 初始孔隙率较小, 又由于颗粒破碎与剪胀的共同作用, 剪胀因子 D 一直保持在 1 附近, 说明在整个加载过程中, 试样既不剪胀也不剪缩,

试样在剪切过程中体变较小。ST2 干密度较小, 初始孔隙率较高, 初始阶段由于颗粒间镶嵌造成的剪缩现象较为明显。因此, ST2 体变较 ST1 要大一些。

参考文献

- [1] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 应力路径条件下堆石料剪切特性大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 176—186.
LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear behaviors of rockfill large-scale triaxial tests under different stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 176—186.
- [2] 褚福永, 朱俊高, 贾华, 等. 粗粒土卸载-再加载力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1061—1066.
CHU Fu-yong, ZHU Jun-gao, JIA Hua, et al. Experimental study of mechanical behaviour of coarse-grained soil in unloading and reloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1061—1066.
- [3] 王昆耀, 常亚屏, 陈宁. 往返荷载下粗粒土的残余变形特性[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 48—53.
WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Residual deformation characteristics of coarse-grained soil under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(3): 48—53.
- [4] LEE K L, FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1967, 14: 69—86.
- [5] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill materials[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. American Society of Civil Engineers**, 1967, 93(2): 27—43.
- [6] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(10): 1177—1192.
- [7] 程展林, 吴良平, 丁红顺. 粗粒土组构之颗粒运动研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 29—33.
CHENG Zhan-lin, WU Liang-ping, DING Hong-shun. Research on movement of fabric of granular material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 29—33.
- [8] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒土三轴试验数值模拟与试样颗粒初始架构初探[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 587—592.
WANG Guang-jin, YANG Chun-he, ZHANG Chao. Numerical simulation triaxial tests for coarse-grained soil and preliminary study of initial fabric of sample grain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 587—592.
- [9] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 661—665.
ZHANG Jia-ming, WANG Ren, ZHANG Yang-ming, et al. Advance in studies of soil grain crush[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 661—665.
- [10] 屈智炯, 何昌荣, 刘双光, 等. 新型石渣坝-粗粒土筑坝的理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [11] 柏树田. 西北口混凝土面板堆石坝筑坝材料特性的试验研究[C]//水利水电科学研究院科学研究论文集. 北京: 水利电力出版社, 1991: 19—29.
- [12] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562—566.
LIU Han-long, QIN Hong-yu, GAO Yu-Feng, et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 562—566.
- [13] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] 原中华人民共和国电力工业部. GB/T 50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [15] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特征的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245—255.
HUANG Da, HUANG Run-qi, ZHANG Yong-xing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 245—255.

上接第 3078 页

DENG Hua-feng, LI Jian-lin, ZHU Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under “saturation-air dry” circulation function[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3306—3312.

- [13] ISRM. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.**, 1979, 16: 135—140.
- [14] 原中华人民共和国电力工业部. GB/T 50266—99 工程