

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.011

粗粒土大型单剪颗粒破碎试验研究

刘 尧^{1,2}, 卢廷浩^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:使用新研制的大型单剪仪,对粗粒土的颗粒破碎及粗粒土-结构接触面进行了系统的试验研究,分析了试验中影响颗粒破碎的主要因素及颗粒破碎对粗粒土-结构接触面应力应变特性的影响.试验结果表明,颗粒破碎率随着法向应力的增大而增大,颗粒破碎受剪应力大小的影响程度随着法向应力的增大而减小.

关键词:粗粒土 颗粒破碎 大型单剪试验 接触面

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)02-0175-04

在水利水电工程中,随着高土石坝的广泛使用,粗粒土作为主要筑坝材料得到广泛使用,而与之相关的粗粒土特性研究成为当前关注的焦点.随着设计坝高的增加,高应力下坝料颗粒变得更容易破碎,破碎问题成为粗粒土相关研究中不可忽视的一个问题.1948 年, Terzaghi 等进行砂粒的高压单轴压缩试验时,发现颗粒破碎引起了试样的孔隙比与有效应力对数坐标关系曲线的斜率明显变陡; Lee 等^[1-2]就颗粒状土样的可压缩性和压碎性先后进行了讨论; Bobby 等^[3]进行了关于砂的压碎试验并定义了相应的破碎参量.相对砂而言,粗粒土作为粒径更大的颗粒,在剪切过程中更易破碎.破碎改变了原先土样的级配、内摩擦角、应力应变特性及剪胀性等重要指标,所以在粗粒土的相关研究中有必要考虑颗粒破碎因素. Marsal^[4]从统计学角度对粗粒土颗粒进行了分类,定义了颗粒名义直径、形状系数、颗粒接触点数、土体体积颗粒密度和面积颗粒密度等概念,推导出颗粒接触点数、接触点力、破碎应力等的表达式.郭庆国^[5]经实践证明,粗粒土颗粒组成越均匀,受风化影响越大,粗粒土颗粒本身越软弱,越是棱角状,压力水平越高,越容易破碎,对强度的影响越大.刘汉龙等^[6]利用大三轴剪切试验仪对粗粒土在多种应力路径下的剪切性状进行了试验研究,通过多种围压下(300 kPa, 600 kPa, 900 kPa 和 1 200 kPa)的试验对粗粒土的应力应变特征进行了观察和分析,研究了影响颗粒破碎的主要因素及颗粒破碎对粗粒土应力应变关系的影响.由此可见,粗粒土的破碎特性研究已有很大进展,但颗粒破碎对于粗粒土-结构接触面力学特性影响的研究还有待深入.

目前颗粒破碎研究成果主要来自于常规三轴试验,基本上处于初步分析阶段,还没有达到实际应用的水平.新研制的大型单剪仪难以满足大粒径粗粒土接触面力学特性及本构规律的研究.本文利用大型单剪仪对粗粒土进行了系统的破碎特性试验和相应的接触面静力力学特性试验,在试验基础上,对粗粒土颗粒产生破碎的影响因素及破碎对接触面应力应变关系的影响进行研究.

1 试验仪器、材料及方法

试验中使用的大型单剪仪包括一个大尺寸单剪装置和一个数据采集系统(由计算机,传感器, A/D 转换器,信号放大、调理、传输系统组成).所有的试验数据由专门软件控制进行定时自动采集、存储,显示适时图形,试验完成后由计算机对所采集的数据进行处理.

图 1 为大型单剪仪示意图.5 层叠环的单剪装置,每层叠环及下部盒体的前端都装有测量水平位移变化的探针,上部固定,通过中心垂直压杆施加法向应力,上盒表面装有同样 4 根探针以测量法向位移;下部盒体由液压装置提供拉力在滚轴上水平滚动,以实现下盒与叠环的剪切.最下层叠环可根据材料最大粒径的不同

更换为厚度更小的 5 层等厚叠环,以更好地观测水平位移变化.单剪盒直径 300 mm,高 240 mm.

该大型单剪仪可施加最大法向、水平应力 200 kN,最大法向、水平行程均 80 mm,最大允许粒径 60 mm.剪切速率和初始法向应力均可通过与仪器相连的电控设备设定.试验材料选取的粗粒料为石灰岩风化土样,最大粒径为 60 mm,初始密度为 1.9 g/cm³,选用 100 kPa,200 kPa,400 kPa,800 kPa,1 600 kPa 5 组初始法向应力,剪切速率设定为 0.2 mm/min.不同法向压力下试验前各粒组质量分数见表 1.选择 1 块光滑钢板与粗粒土构建接触面.将备好的土样混合均匀,分 3 层装料振实.当剪力基本保持不变或接触面相对剪切位移达到 10 mm 时,停止试验.试验结束后,对试样再进行筛分以获得剪切变形后的颗粒级配.每组试验进行平行试验以检验试验结果的重复性,结果见表 1.



图 1 大型单剪仪示意图

Fig. 1 Large-scale shear apparatus

表 1 不同法向压力下试样前后各粒组含量

Table 1 Particle sizes before and after tests under various normal pressures

状态	法向压力 σ_n/kPa	不同粒径时各粒组质量分数/%				
		60 ~ 40 mm	40 ~ 20 mm	20 ~ 10 mm	10 ~ 5 mm	< 5 mm
试验前		18.4	27.2	21.3	17.7	15.4
试验后	100	18.0	26.5	21.3	17.8	16.4
	200	17.7	26.0	21.4	18.0	16.9
	400	17.3	25.8	21.5	18.1	17.3
	800	16.5	25.9	21.4	18.3	17.9
	1 600	14.8	26.6	21.8	18.4	18.4

2 试验成果及分析

2.1 接触面剪切变形

根据所做的单剪试验,得到了不同法向应力 σ_n 下接触面剪应力与相对剪切位移的关系曲线(图 2).由图 2 可知:(a)随着法向应力的增大,接触面剪应力水平上升很快,土样产生剪切破坏时所对应的水平位移量也逐渐增大;(b)当法向应力到达高压范围(1 600 kPa)后,接触面剪应力水平的增加速率远大于法向应力处于低压范围(≤ 800 kPa)时的相应速率.

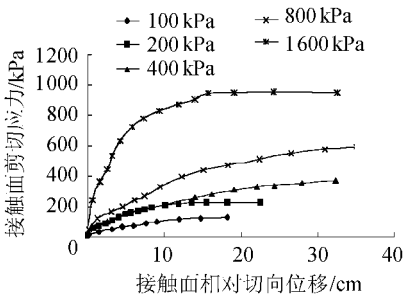


图 2 不同法向压力下接触面剪切试验曲线

Fig. 2 Curves of shear tests on soil-structure interface under different normal stresses

2.2 颗粒破碎

2.2.1 颗粒破碎率的测定

目前颗粒破碎程度的确定大多基于整个试样不同粒径组的统计进行量化^[7-11].本文颗粒破碎率采用 Marsal^[7]定义的 B_g .先计算试验前后各粒组的质量分数差值 ΔW_k ,然后取 ΔW_k 正值之和,用百分数表示,即为颗粒破碎率,即

$$B_g = \frac{\sum \Delta W_k}{\sum W_{ki} - W_{kf}}$$

式中: W_{ki} ——试验前级配曲线上某级粒组的质量分数; W_{kf} ——试验后级配曲线相同粒组的质量分数.破碎率的测定以整个试验土样的破碎率为准.

2.2.2 颗粒破碎与法向应力、剪应力的关系

已有的试验研究证明,颗粒的破碎不是在试验的一开始就发生的.郭熙灵等^[12]基于三轴试验结果认为:在固结压力较小时(远小于颗粒的点荷载破碎强度),颗粒破碎主要发生在剪切阶段峰值出现以前,试样在固结阶段颗粒破碎甚微.如果固结压力足够大,则固结过程中会出现颗粒破碎,因为正应力也可以引起破碎.类似的情况也会发生在单剪过程中.初始的法向应力只有在达到很大的水平时才会造成颗粒破碎.对剪应力而

言,土样随着剪切的进行即剪应力的持续增大而趋于紧密,颗粒间孔隙变小,接触点的接触应力逐渐增大,当增大到一定程度时,破碎才开始产生.可见剪应力水平的大小是决定颗粒破碎产生与否的重要因素.

颗粒开始发生破碎时所对应的剪应力大小可通过以下方法判别:发生破碎时,接触面剪应力的增大速率应处于一个在极小相邻时间段内的极小值(在剪应力-剪切位移曲线上表现为曲线斜率变小).这是因为剪切开始后,由于外力做功造成系统内部颗粒摩擦耗能及结构储能不断变化,在破碎开始发生后,系统内部又增加了破碎耗能.为克服颗粒破碎耗能,水平剪应力在一个较小时段内应逐渐增大,在达到可以使中、大尺寸颗粒发生破碎的值后,又使颗粒破碎产生.此时,系统内部能量发生了剧烈的转换,宏观表现为水平剪应力在产生破碎前持续增大一段时间后,在瞬间变得略小些,然后再重新变大.在破碎刚刚开始发生时,剪应力的这种变化比较敏感,容易被仪器捕捉到,于是将剪应力发生敏感性波动时对应的应力大小定为颗粒开始发生破碎时所对应的剪应力.

对初始法向应力 σ_n 为 100 kPa,400 kPa,800 kPa,1 600 kPa,密度 $\rho = 1.9 \text{ g/cm}^3$ 土样的接触面剪应力-剪切位移数据进行筛选分析,结果如图 3 及表 2 所示.由表 2 和图 3 可以看出:(a)在不同的法向应力下,接触面剪应力-剪切位移曲线在局部出现了斜率变缓的现象,说明在剪切过程中,当破碎开始时会出现剪应力的敏感波动;(b)随着法向应力的增大,破碎发生所需要的剪应力水平也随之增大,这是因为法向应力的增大使得试验土样内抗剪强度增大,颗粒咬合得更紧密,破碎耗能增加,对剪应力的要求也随之上升;(c)发生破碎时所对应的接触面剪应力与试样剪切破坏时的接触面剪应力峰值之比随法向应力的增大而减小,说明法向应力的增大使其对颗粒破碎的影响作用也逐渐增大.

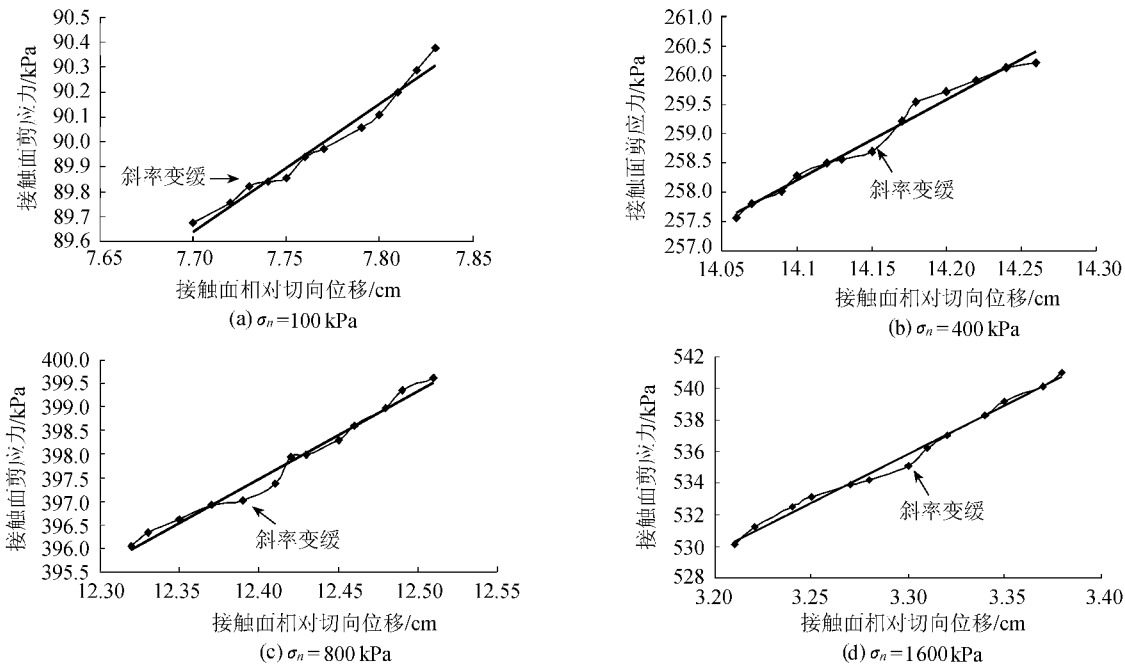


图 3 不同法向压力下破碎开始时的剪应力

Fig. 3 Shear stresses at the beginning of particle breakage under different normal stresses

3 结 论

本文通过对粗粒土颗粒破碎特性和粗粒土-结构接触面的试验,研究了粗粒土颗粒破碎产生过程中的影响因素和发生破碎时相应的剪应力水平,得出以下结论:

颗粒破碎率随着法向应力的增大而增大;在低法向应力下,颗粒的破碎主要受剪应力大小的影响,破碎开始于剪应力达到峰值之前,在高法向

表 2 不同法向压力下破碎开始时的剪应力与剪应力峰值

Table 2 Shear stresses and peaks at the beginning of particle breakage under different normal stresses

法向应力 σ_n /kPa	破碎时 剪应力/kPa	接触面剪应力 峰值/kPa	破碎时剪应力与 相应峰值之比/%
100	89.9	128.2	70.1
400	259.0	370.7	69.8
800	397.5	589.9	67.4
1 600	536.0	948.2	56.5

应力下,颗粒破碎受法向应力影响的程度更大.破碎开始时所对应的接触面剪应力占试样接触面剪切破坏时剪应力峰值的比例随法向应力的增大而减小.

参考文献：

[1] LEE K L,FARHOOMAND I.Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal,1967,4 369-86.

[2] HILLIS S F.Discussion of“ Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression”[J]. Canadian Geotechnical Journal,1967,4 390-92.

[3] BOBBY O,HARDIN F.Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering,ASCE,1985, 111(10) 3177-1192.

[4] MARSAL R J.Large-scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division,American Society of Civil Engineers,1967,93(2) 327-43.

[5] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报,1987(5) 359-66.

[6] LIU Han-long,DENG An,SHENG Yang. Shear behavior of coarse aggregates for dam construction under varied stress paths[J]. Water Science and Engineering,2008,1(1) 363-77.

[7] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill[M]//Embankment dam engineering,casagrand volume. New York 3Wiley,1973 3109-200.

[8] 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[G]. 水利水电科学研究院科学研究论文集 第 32 集(结构材料、岩土与抗震工程). 北京 水利电力出版社,1991 319-29.

[9] HARDIN F. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering,American Society of Civil Engineers,1985,111(10) 31177-1192.

[10] MIURA N,O-HARA S. Particle crushing of decomposed granite soil under shear stresses[J]. Soils and Foundations,1979,19(3) 31-14.

[11] 沈新慧. 天生桥混凝土面板堆石坝筑坝材料特性研究[G]. 水利水电科学研究院科学研究论文集 第 32 集(结构材料、岩土与抗震工程). 北京 水利电力出版社,1985 365-73.

[12] 郭熙灵,胡辉,包承刚. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报,1997,19(3) 383-88.

Large-scale simple shear tests of particle breakage of coarse-grained soil

LIU Yao^{1, 2}, LU Ting-hao^{1, 2}

- (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China ;
2. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 210098,China)

Abstract：The newly-developed large-scale simple shear apparatus was employed to systematically study the particle breakage of coarse-grained soil and the interface between the coarse-grained soil and other structures. The main factors affecting the particle breakage and the effects of the particle breakage on the stress-strain behaviors of the coarse-grained soil-structure interface were analyzed. The test results show that the particle breakage rate increases with the increase of the normal stress and the effect of the shear stress on the particle breakage decreases with the increase of the normal stress.

Key words：coarse-grained soil；particle breakage；large scale shear test；interface