

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3649-06

粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究

王光进¹, 杨春和^{1,2}, 张超², 冒海军², 王伟³

(1.重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2.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;
3.北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

摘 要: 明显的粒径分级和深部土的颗粒破碎是超高排土场的两个主要特征。基于改装后的大型两用直剪仪对不同粗粒含量的颗粒破碎和抗剪强度进行试验研究。颗粒破碎试验结果表明: 垂直压力小于 400 kPa 的情况下破碎率极小, 在垂直压力大于 400 kPa 时, 随垂直压力的增大破碎率增加明显; 粗粒含量小于 46.0% 时, 相对破碎率较小, 粗粒含量大于 46% 时, 颗粒破碎率随粗粒含量的增加而明显增大; 相对破碎率与垂直压力可用双曲线关系表示; 长期浸泡于水中的土样颗粒破碎相当明显。剪切强度试验结果表明: 在粗粒含量等于 24% 时, 低垂直压力下的剪应力-应变曲线呈微软化或微硬化型, 较高垂直压力下呈轻微软化型; 在粗粒含量等于 78% 时, 低垂直压力下其剪应力-应变曲线呈软化型, 较高垂直压力下表现为轻微硬化型。较高垂直压力下的抗剪强度包线呈明显的非线性。当颗粒破碎率较小时, 分别在垂直压力小于 400 kPa 和大于 400 kPa 时拟合的内摩擦角值变化不大; 当颗粒破碎率明显增大时, 垂直压力大于 400 kPa 时的内摩擦角值明显低于垂直压力小于 400 kPa 时拟合的内摩擦角值。

关键词: 粗粒土; 大型直剪仪; 粗粒含量; 颗粒破碎率; 抗剪强度

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents

WANG Guang-jin¹, YANG Chun-he^{1,2}, ZHANG Chao², MAO Hai-jun², Wang Wei³

(1. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
3. BGI Engineering consultants LTD, Beijing 100038, China)

Abstract: The significant particle size grading and particle breakage of deep soils are two major characteristics of super-high dumping sites. The particle breakage and shear strength of different coarse-grain contents were studied based on the refitted large-scale direct shear apparatus. The experimental results of particle breakage indicated that particle breakage index was very small when upright stress was lower than 400 kPa and increased obviously with the increase of upright stress that was higher than 400 kPa. The particle breakage index was very little at coarse-grain contents less than 46.0% and increased significantly according to the increasing of coarse-grained contents which was more than 46.0%. The relationship between particle breakage index and upright stress could be expressed by hyperbolic curve. The particle breakage of soil sample, which was soaked for a long time in water, was remarkable. The experiments studied on shear strength showed that the shear stress-strain curves were micro-softening model or micro-hardening model under low upright stress and were slight-softening model at higher upright stress when the coarse-grain contents was equal to 24.0%. At coarse-grain contents equal 78.0%, the shear stress-strain curves were softening model under low upright stress and slight-hardening model at higher upright stress. The shear strength envelope expressed nonlinear under higher upright stress. When the particle breakage index was small, the internal friction angles which were respectively fitted in the upright stress lower than and higher than 400 kPa changed little. With the obvious increment of particle breakage index, the internal friction angle of upright stress higher than 400 kPa was much smaller than that of upright stress lower than 400 kPa.

Key words: coarse-grain soil; large-scale direct shear apparatus; coarse-grain contents; particle breakage index; shear strength

1 前 言

目前, 我国排土场堆存高度已达 100~300 m,

一些超高排土场的排土总高度甚至超过 300 m (如: 海南矿排土场最高达 200 m, 南芬矿庙儿沟排土场要求下游方向堆高达 280 m, 朱家包包矿排土场总

收稿日期: 2009-07-22

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (No. 50725414)。

第一作者简介: 王光进, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程与边坡稳定性研究。E-mail: wangguangjin2005@163.com

高为 148~280 m, 福建省潘洛铁矿大格高排土场顺排单台阶高度达 240 m, 紫金山金矿江山崇排土场顺排单台阶高度达 450 余米^[1-2]。此超高排土场与一般排土场不同之处在于: 超高排土场的粒级分级更加明显, 深部土(下部废石土)的出现也是超高排土场的又一特征。赵光思^[3]认为, 深部土 的强度特性与颗粒破碎率的大小密切相关。这是因为颗粒破碎会改变颗粒粒径、颗粒级配、密实程度、颗粒间接触压力等, 从而使颗粒间接触压力重新调整, 接触压力均匀化, 阻碍了剪胀的发挥, 从而降低岩土材料的抗剪强度。同时, Marsal^[4-5]也经过大量的试验指出: 当颗粒材料受力后, 其应力状态发生改变, 从而引起颗粒本身的破碎, 这种破碎是影响材料抗剪强度最重要的因素之一。因此, 粒径级配和颗粒破碎是影响超高排土场散体材料抗剪强度特性的两个主要因素。事实上, 颗粒破碎试验对排土场和堆石坝具有实际的工程意义: 在堆筑过程中, 散体材料首先要经过开采、运输、堆排等工序, 这将会引起小部分的颗粒破碎; 其次, 散体材料要经过振动碾压, 此过程颗粒将发生明显的破碎, 这也是颗粒产生破碎的主要原因; 随着堆排高度的增加, 在自重作用下底部土亦将发生一部分的破碎, 特别是当下部粗粒土处于水库中时, 长期浸泡对颗粒破碎作用也是比较明显的, 以上阶段的破碎总称为主压缩破碎^[6]。由于很少有关于排土场或堆石坝现场颗粒破碎的资料报道, 所以只有通过室内试验来研究粗粒土的颗粒破碎。梁军^[6]认为, 室内试验的颗粒破碎与实际工程中的主压缩破碎具有一定相关性。

自从 Terzaghi 对砂样的颗粒破碎研究以来。许多学者都对颗粒破碎进行了试验研究, Kjaernsli、Sande^[7]对砂样进行了三轴压缩试验, 发现在给定的应力下, 不规则的、表面粗糙的颗粒更易发生破碎。Hall、Gordon^[8]发现, 在一定的应力下, 级配良好的砂的破碎要比级配不良的少得多。刘汉龙^[9]根据三轴试验获知, 颗粒破碎的增加将导致粗粒料抗剪强度降低, 峰值内摩擦角与颗粒破碎率之间呈幂函数关系。魏松^[10]等通过三轴湿化颗粒破碎试验指出: 湿化引起的颗粒破碎量随着围压的增加和湿化应力水平的增加而增大, 湿化轴变与湿化颗粒破碎近似呈线性关系。张家铭^[11]认为, 在低围压下, 钙质砂的剪胀对其强度的影响远远大于颗粒破碎, 而随着围压的增加, 钙质砂颗粒破碎加剧, 剪胀影响越来越小, 而颗粒破碎的影响则越来越显著。堆石料在剪切过程中发生破碎主要集中在 20~60 mm 粒径之间颗粒的表面区域, 且破裂的大部分都研碎成

5 mm 以下的细颗粒^[12]。

以往的研究多是在围压下的三轴颗粒破碎试验, 其尺寸效应明显, 且很少考虑不同粒级配下颗粒破碎对抗剪强度的影响。而大型直剪仪试样尺寸较大, 可以最大程度上保留土样的原始级配, 弱化尺寸效应, 且直剪试验操作简便、适用范围广, 而应用最为普遍^[13], 故本文采用中国科学院武汉岩土力学研究所和香港大学联合研制的应变控制式大型室内及现场两用直剪仪研究不同粗粒含量下颗粒破碎及强度特性。

2 试验研究

2.1 试验设备

本次试验采用的两用直剪仪属于拼装式结构, 主要由整体可拆卸式外框架、水平加载系统、垂直加载系统、剪切盒等组成。剪切盒的净空几何尺寸为: 长×宽×高 = 500 mm×500 mm×410 mm。下剪切盒与整体框架连接在一起, 上、下剪切盒之间的最大开缝宽度为 10 mm。由于此直剪仪剪切过程中下剪盒固定, 上剪盒只能在水平面内移动, 所以剪切缝不会由于试样的剪胀作用而发生改变, 从而使试样的变形较传统的直剪仪更加均匀。与现场应力控制式直剪仪相比, 本直剪仪能反映岩土体变形的全过程, 最大剪切位移可达 140 mm^[14]。

1910 年摩尔提出表示材料的剪切破坏面的函数是一条曲线(即摩尔包线), 而并非是直线。为了使直剪仪试验值更接近真实值和研究较大垂直压力下的颗粒破碎, 在保证原直剪仪整体性质基本不变的情况下, 加固了该试验直剪仪承载力部分, 加大了传感器量程, 改装后直剪仪垂直压力可以加到 1300 kPa, 改进的大型直剪仪如图 1。



图 1 改装后的大型直剪仪

Fig.1 The refitted large-scale direct shear apparatus

2.2 试验方法及试验级配

试验材料选自江西某铜矿排土场。根据文献

[15]: 本文将小于 5 mm 的土称为细粒土, 大于 5 mm 的土称为粗粒土。本文采用具有代表性的 6 种不同粗粒含量 $P_{>5\text{ mm}}$ (大于 5 mm 的质量百分含量) 进行不同的直剪试验。另外, 文献[16]通过大量的试验研究表明: 当 $D/d_{\text{max}} = 4 \sim 6$ 才可基本消除试样的尺寸效应 (D 为剪切盒的尺寸; d_{max} 为最大的试验粒径尺寸)。按照以上直剪仪的设计尺寸, 本次试样的最大粒径选用 80 mm。其试验各粒级组含量见图 2。

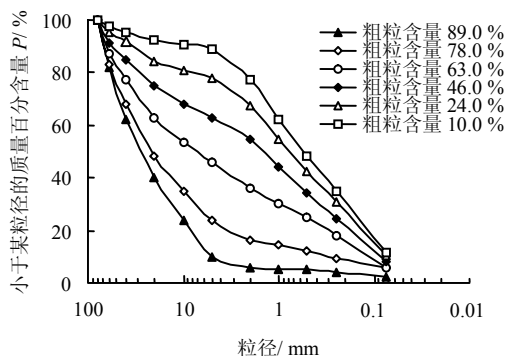


图 2 不同粗粒含量的粒级配曲线
Fig.2 Grade curves of different coarse-grain contents

为了研究水对粗粒土的颗粒破碎影响, 试验选用干密度为 2.08 g/cm^3 , 在非饱和样 (含水率为 4%)、饱和样与浸泡样进行试验, 每组试验垂直压力分别为 50、100、200、400、700、1000、1300 kPa。此处的浸泡样是指: 将按配比称重后的风干土样放入装水的容器中, 在无外力的作用下保证土样处于全饱和状态, 封存一个月之后的土样。试验之前, 将现场取回土样风干后进行筛分, 称重并按要求加水拌匀 (饱和样需加水至使土样处于全饱和状态), 分 3 层装料振实。然后对试样进行人工固结, 固结稳定标准控制在 0.0025 mm/min , 变形稳定后进行直剪试验, 试验的水平剪切速率为 1.4 mm/min , 剪切应变为 20% 时停止试验。试验完成后, 再次风干土样并筛分, 从而研究颗粒破碎情况。

3 试验结果分析

3.1 粗粒含量与颗粒破碎的关系特征

根据 Hardin^[17]定义: 相对颗粒破碎率 B_r 是试验前后级配曲线间的面积 B_1 除以初始破碎势 B_p , 即 $B_r = B_1 / B_p$, 相对颗粒破碎率能够反映试验前后试样内各个粒径的变化量。因此, 本文采用试验剪切后的相对颗粒破碎率 B_r 分析研究颗粒破碎率与垂直压力 σ 和粗粒含量 $P_{>5\text{ mm}}$ 之间的关系, 其关系见图 3。

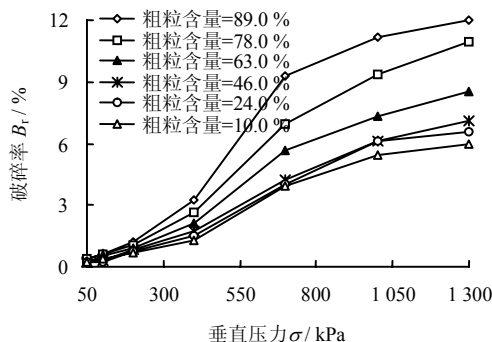


图 3 不同粗粒含量下 σ - B_r 关系曲线
Fig.3 Relationship between σ and B_r at different coarse-grain contents

从图中可知, 颗粒破碎率 B_r 与垂直压力和粗粒含量密切相关。根据试验结果, 在不同粗粒含量下, 垂直压力小于 400 kPa 下粗粒土的颗粒破碎不明显, 并且在 50、100、200、400 kPa 的破碎率都相差不多。但在垂直压力从 400 kPa 增加到 1300 kPa 时, 同一粗粒含量 $P_{>5\text{ mm}}$ 时的破碎率明显增大。这是由于在较低垂直压力下, 颗粒之间接触力还没有达到大多数颗粒破碎的强度, 但随着垂直压力的增加, 必定造成接触点的应力加大, 一旦应力达到或超过颗粒所能承受的强度时, 颗粒就通过颗粒破碎 (增加颗粒接触点数或接触面积) 来分散应力。一般而言, 垂直压力越大, 颗粒的接触面积和接触点数会相应地增加。同时, 在同一粗粒含量 $P_{>5\text{ mm}}$ 时, 垂直压力从 400 kPa 变化到 1300 kPa 时, 颗粒会发生进一步的破碎, 但其颗粒破碎速率有所减缓。这可以解释为颗粒破碎导致小颗粒的增多, 使小颗粒不断的填充相对大颗粒间的孔隙, 从而增加了颗粒间的接触面积, 减小了颗粒破碎。这种趋势也表明: 当压力增加到一定值时, 颗粒破碎率极小。

另外, 根据图 3 破碎率随粗粒含量变化可知, 在 $P_{>5\text{ mm}} < 46.0\%$ 时, 颗粒破碎率基本不随粗粒含量而变化, 这是由于此时的细颗粒含量较多, 颗粒间细粒能充分填充孔隙, 颗粒能充分接触, 所以随压力增加, 其粗粒含量对破碎率的变化不是很明显。当 $P_{>5\text{ mm}} > 46.0\%$ 时, 破碎率有明显增大的趋势。说明此时粗颗粒土已形成骨架, 随粗粒含量的增加, 颗粒间接触点的数量减少, 颗粒容易产生应力集中, 导致颗粒发生明显的破碎。通过拟合不同粗粒含量下的破碎率 B_r 与垂直压力 σ 的关系, 相对破碎率 B_r 与垂直压力 σ 可用双曲线式表示:

$$B_r = \frac{(\sigma / P_a)}{A_0 + A_1 (\sigma / P_a)} \quad (1)$$

式中： σ 为垂直压力； P_a 为大气压力； A_0 为与粗粒含量(ΔP)有关的参数，其关系式可用下式表示： $A_0 = 1.31 - 1/(2\Delta P)$ ； $A_1 = -1/50 \sim 1/50$ 。此处引入大气压力是为了将坐标化为无因次量。

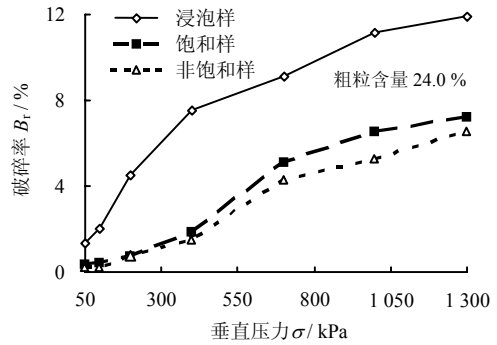
3.2 含水率与颗粒破碎关系特征

郭庆国^[15]认为，粗粒含量 $P_{>5\text{mm}}$ 为 30% 和 70% 是影响工程特性变化的特征点，结合本试验成果，本文选择 $P_{>5\text{mm}} = 24.0\%$ 和 $P_{>5\text{mm}} = 78.0\%$ 作为代表性粒径含量。

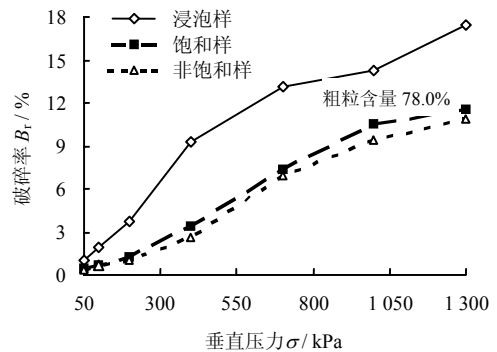
在相同试验条件下，对比了粗粒土在含水率为 4%、饱和样和浸泡样 3 种土样直剪后的颗粒破碎情况，结果见图 4。从图中可以看出，在同一 $P_{>5\text{mm}}$ 下，饱和样的破碎率相对于非饱和样的破碎率有所增加，但增加不是很明显。相反，粗粒土经过一个月的饱和浸泡后，其颗粒破碎相当明显，比饱和和非饱和情况下土样的破碎率要大很多。并且，在垂直压力为 400 kPa 时，浸泡样的破碎率也很明显，说明粗粒土在水的长期浸泡下，土颗粒自身组织结构发生细微变化，其强度降低比较明显。所以从长期来说，水对粗粒土具有软化作用，然而短暂的水流对粗粒土的颗粒破碎并不明显。同时，从图中看出，粗粒含量在 78.0% 时的浸泡样比粗粒含量在 24.0% 的破碎率要大。

3.3 剪应力与剪切应变的关系特征

一般，粗粒土的剪切破坏面并不是理想的平面。因为粗粒土在贯穿性剪切面完全形成过程中，剪切带内的粗粒土伴有颗粒的翻滚和滑移、破碎、重新排列等现象，所以粗粒土的剪应力-应变曲线表现出硬化型和软化型。粗粒土的剪应力-应变关系曲线见图 5，图中“|”表示出现明显峰值的位置。实际上，当 $P_{>5\text{mm}} = 24.0\%$ 时，粗粒土细颗粒含量较多，颗粒间的孔隙小，大小颗粒得到相互填充，颗粒挤得较紧，因此，尽管此时粗颗粒较少，但粗粒土在低垂直压力下还是能表现出一定的剪胀性。但在不同垂直压力时，剪应力-应变曲线表现出不同的形式。如图 5(a) 表示粗粒含量 $P_{>5\text{mm}} = 24.0\%$ 的剪应力-应变关系图，从图中可知，在低垂直压力下，其剪应力-应变曲线呈微软化或微硬化型，在较高垂直压力时，其剪应力-应变曲线呈轻软化型。这主要是在低垂直压力下，此时曲线没有明显的峰值，剪切面的局部区域不仅存在颗粒的翻滚，而且土颗粒的重排和充填使孔隙有减少趋势。此时如果颗粒翻滚起主导作用，其剪应力-应变曲线呈现微软化型(如 50 kPa)；当土颗粒的充填表现明显时，剪应力-应变曲线呈微硬化型(如 100~400 kPa)。在较高垂直压力时，达

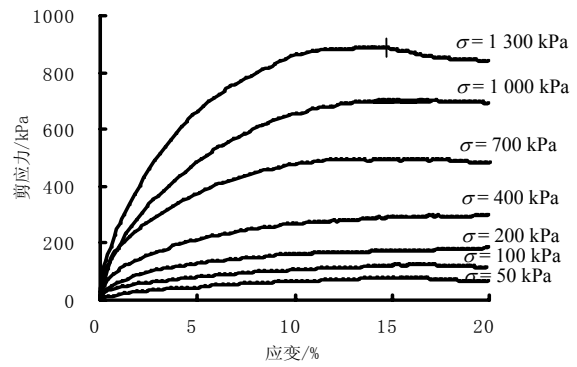


(a) $P_{>5\text{mm}} = 24.0\%$

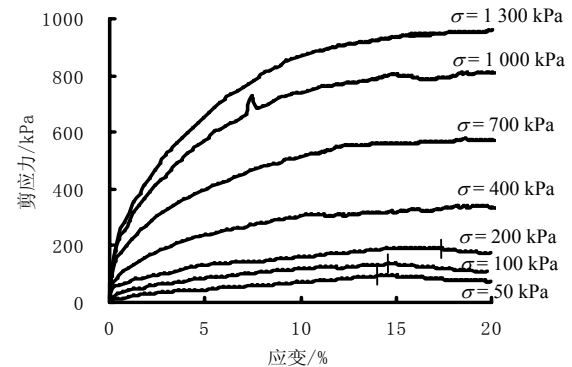


(b) $P_{>5\text{mm}} = 78.0\%$

图 4 不同含水率下 σ - B_r 关系图
Fig.4 Relationship between σ and B_r at different water contents



(a) $P_{>5\text{mm}} = 24.0\%$



(b) $P_{>5\text{mm}} = 78.0\%$

图 5 剪应力-剪切应变关系图
Fig.5 Relationship between shear stress and strain

到峰值后，此时可认为贯穿性剪切破坏面已基本形成，随剪切变形的增加，此时土体的强度也有所降低，从而使剪应力-应变曲线基本呈轻软化型。

当粗粒含量为 78.0%，此时粗颗粒含量较多，粗颗粒土表现出明显的骨架作用，此时粗粒部分相互架空形成较大的孔隙，土体处于相对疏松状态，粗颗粒的咬合作用较明显。但在不同垂直压力时，剪应力-应变曲线也表现出不同的形式。图(5)(b)表示粗粒含量 $P_{>5\text{mm}} = 78.0\%$ 的剪应力-应变关系曲线，从图中可以看出，在低垂直压力时，剪应力-应变曲线呈软化型；在较高垂直压力时，其曲线表现出轻微硬化型。这是因为在较低的垂直压力下，此时垂直压力较小，粗粒含量多，其垂直压力不足以限制颗粒翻越，此时剪切带内颗粒表现出明显的颗粒翻滚，从而使剪应力-应变曲线呈软化型。在较高垂直压力时，较高的垂直压力对颗粒翻越有明显地限制作用，所以剪切带内的颗粒主要表现为颗粒重排和填充，另外，此时颗粒破碎也较明显，从而使得较高垂直压力时其剪应力-应变曲线呈轻微硬化型。以上结论尚需进行更多的试验来进一步验证。

3.4 不同粗粒含量下的颗粒破碎与内摩擦角的关系特征

此试验以应变 15%（即剪切位移 75 mm）为剪应力的取值点，在 15%之前有峰值的取其峰值^[13]。其抗剪强度拟合图见图 6，从图中可以看出，当粗粒含量大于 46.0%时，抗剪强度包线在 400 kPa 时有向下弯曲的趋势，其强度包线呈现非线性特征，在粗粒含量为 89.0%时表现得最为明显。但此时在 $\sigma = 0 \sim 400\text{ kPa}$ 和 $\sigma = 400 \sim 1300\text{ kPa}$ 范围内的抗剪强度与垂直压力之间还是呈现良好的线性关系，并且 $\sigma = 0 \sim 400\text{ kPa}$ 拟合的内摩擦角值大于 $\sigma = 400 \sim 1300\text{ kPa}$ 所拟合的内摩擦角值。颗粒破碎导致颗粒间接触压力重新调整，接触压力均匀化，阻碍

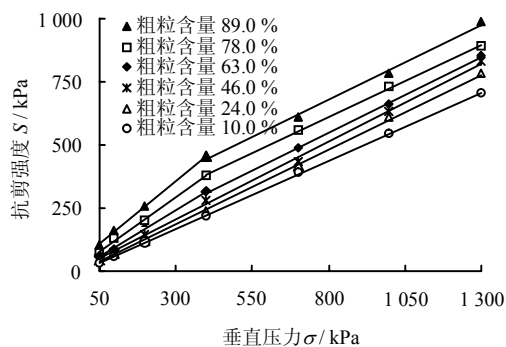


图 6 不同粗粒含量的抗剪强度拟合图

Fig.6 Fitted linear regression lines of shear strength at different coarse-grain contents

了剪胀效应的发挥，从而使土体在剪切过程中的强度降低^[18]。同时，根据前文对颗粒破碎的研究可知：当粗粒含量大于 46.0%后的颗粒破碎明显。这也说明颗粒破碎是剪切特性呈现明显非线性的主要原因。

在 $\sigma < 400\text{ kPa}$ 和 $\sigma > 400\text{ kPa}$ 获得的内摩擦角 φ 与粗粒含量 $P_{>5\text{mm}}$ 的关系见图 7。从图中可以看出，其 φ 值与粗粒含量 $P_{>5\text{mm}}$ 呈增函数关系。这是因为粗粒土的内摩擦角值主要受粗粒含量的影响。当 $P_{>5\text{mm}}$ 较小时，粒间孔隙被细颗粒完全充填，此时的粗颗粒不能充分接触咬合，因此， φ 值较小；但随着 $P_{>5\text{mm}}$ 的增加，粗颗粒形成骨架，其粗粒部分得到充分的接触咬合，使得 φ 值不断增大。同时，从图 3 中可看出，当粗粒含量小于 46.0%时，此时的破碎率不大，所以颗粒的破碎并不引起峰值内摩擦角显著降低，但当粗粒含量大于 46.0%时，此时随粗粒含量的增加颗粒破碎率明显增大，导致内摩擦值有明显的降低。这说明当相对颗粒破碎率达到一定值后，颗粒的继续破碎将引起峰值内摩擦角明显降低。Vesic 和 Clough^[19]认为：这是因为粗粒土等散体粒状材料存在一个破碎值，超过此破碎值，初始孔隙比和剪胀效应对强度的影响将明显减弱，颗粒破碎将逐渐成为影响强度的主导因素。

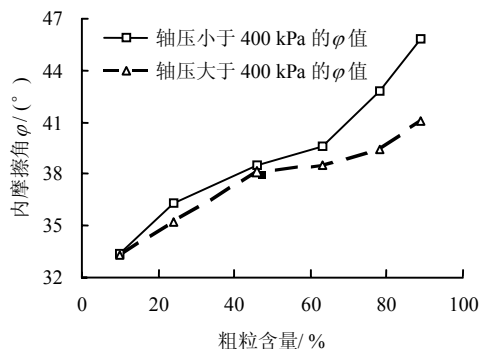


图 7 内摩擦角随粗粒含量变化关系图

Fig.7 Curve of internal friction angle vs coarse-grain content

4 结 论

(1) 垂直压力低于 400 kPa 破碎不明显，当垂直压力从 400 kPa 增加到 1300 kPa 时，颗粒发生明显破碎。其相对破碎率与垂直压力的关系可以用双曲线表示。

(2) $P_{>5\text{mm}} < 46.0\%$ 时相对破碎率小；在 $P_{>5\text{mm}} > 46.0\%$ 时，随粗粒含量的增加颗粒破碎率增加明显。同时，由于水的软化作用，导致长期浸泡于水中的土样颗粒破碎率增加非常明显。

(3) 在粗粒含量 $P_{>5\text{mm}} = 24.0\%$ 时, 低垂直压力时的剪应力-应变曲线呈微软化或微硬化型; 较高垂直压力时的剪应力-应变曲线呈轻微软化型。当粗粒含量 $P_{>5\text{mm}} = 78.0\%$ 时, 低垂直压力时的剪应力-应变曲线呈软化型; 较高垂直压力时剪应力-应变曲线表现为轻微硬化型, 此结论还需进一步的验证。

(4) 在粗粒含量大于 46.0% 时, 强度包线呈现出非线性; φ 值与粗粒含量 $P_{>5\text{mm}}$ 呈增函数关系; 当粗粒含量小于 46.0% 时, 由于此时颗粒破碎较小, 分别在 $\sigma < 400\text{ kPa}$ 和 $\sigma > 400\text{ kPa}$ 拟合的内摩擦角值变化不大; 但当粗粒含量大于 46.0% 时, 此时随粗粒含量的增加颗粒破碎率明显增大, $\sigma > 400\text{ kPa}$ 时的内摩擦值有明显降低。颗粒破碎是粗粒土在较高垂直压力条件下剪切特性非线性的根本原因。

参 考 文 献

- [1] 杜炜平, 颜荣贵. 高台阶排土场技术及其发展趋势[J]. 矿冶工程, 1993, 18(1): 18-22.
DU Wei-ping, YANG Rong-gui. Techniques for high-bench dumping sites and its development[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 1993, 18(1): 18-22.
- [2] 贺健. 大格高台阶排土场岩土流失规律研究[J]. 金属矿山, 2001, 11: 14-16.
HUO Jian. Investigation of the soil erosion law of dage high bench dump[J]. **Metal Mine**, 2001, 11: 14-16.
- [3] 赵光思, 周国庆, 朱锋盼, 等. 颗粒破碎影响砂直剪强度的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 291-294.
ZHAO Guang-si, ZHOU Guo-qing, ZHU Feng-pan et al. Experimental research on the influence of particle crushing on direct shear strength of sand[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2008, 37(3): 291-294.
- [4] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1967, 93(SM2): 27-43.
- [5] MARSAL R J. 土石坝工程[M]. 江苏: 水利出版社, 1979.
- [6] 梁军, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 堆石蠕变机理分析与颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 479-483.
LIANG Jun, LIU Han-long, GAO Yu-fong, et al. Creep mechanism and breakage behaviour of rockfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 479-483.
- [7] KJAERNSLI B, SANDE A. Compressibility of some coarse-grained materials[C]//Proc. European Conf. Soil Mech. And Found. Engrg. Weisbaden: Germany, 1963: 245-251.
- [8] HALL E B, GORDON B B. Triaxial testing with large-scale high pressure equipment[J]. **Laboratory Shear Testing of Soils. Spechial Tech. Pubication**, 1963, 361: 315-328.
- [9] 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.
- [10] 魏松, 朱俊高. 粗粒料三轴湿化颗粒破碎试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1252-1258.
WEI Song, ZHU Jun-gao. Study on wetting breakage of coarse-grained materials in triaxial test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1252-1258.
- [11] 张家铭, 蒋国盛, 汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2043-2048.
ZHANG Jia-ming, JIANG Guo-sheng, WANG Ren. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2043-2048.
- [12] 高玉峰, 张兵, 刘伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1237-1246.
GAO Yu-feng, ZHANG Bing, LIU Wei, et al. Experimental study on particle breakage behavior of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1237-1246.
- [13] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48-51.
WEI Hou-zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 48-51.
- [14] 闵弘, 刘小丽, 魏进兵, 等. 现场室内两用大型直剪仪研制(I): 结构设计[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 168-172.
MIN Hong, LIU Xiao-li, WEI Jin-bing, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test(I): configuration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 168-172.
- [15] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [16] 周小文, 龚壁卫, 丁红顺, 等. 砾石垫层-混内土接触面力学特性单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 876-880.
ZHOU Xiao-wen, GONG Bi-wei, DING Hong-shun, et al. Large-scale simple shear test on mechanical properties of interface between concrete face and gravel underlayer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 876-880.
- [17] HARDIN. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering American Society of Civil Engineers**, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [18] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [19] VRDIC A S, CLOUGH G W. Behavior of granular materials under high stresses[J]. **Journal of Soils Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers**, 1968, 94(3): 661-688.