

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.05.004

高应力下粗砂-结构接触面颗粒破碎 影响因素试验研究

檀俊坤¹, 郭佳奇², 乔世范¹, 刘希亮²

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 为了研究高应力下粗砂与结构接触面的剪切破碎影响因素, 采用改装后的 RMT-150B 试验系统的直剪试验仪进行接触面直剪试验, 对高法向应力作用下含水率为 0%, 8%, 16%, 24% 的粗砂与具有 4 种不同粗糙度、强度混凝土基底的接触面直剪试验结果进行了分析, 结果表明: 基底硬度增大, 基底硬度与相对破碎率关系曲线趋于下降趋势, 相对破碎率减小; 相对破碎率随着含水率增加而增加, 随粗糙度的增加破碎量减小; 法向应力对颗粒破碎影响明显, 相对破碎率的增大速率也表现出随法向应力增大而增大的趋势。保持含水率不变, 法向应力与颗粒破碎曲线规律性较好; 保持基底硬度和接触面粗糙度不变, 法向应力与颗粒破碎关系较为离散, 总体保持颗粒破碎随法向应力增加而增加。进行方差分析表明: 接触面粗糙度对粗砂-混凝土结构接触面剪切破碎的影响较显著; 法向应力、基底硬度与含水率对结构接触面剪切颗粒破碎的影响均特别显著, 显著性从大到小依次为: 砂的含水率、基底硬度、法向应力、接触面粗糙度。针对不同试验所得到的法向应力对颗粒相对破碎率影响规律进行讨论, 认为: 从零法向应力开始, 随法向应力的增大相对破碎率增加速率增大, 当剪切应力达到集中段颗粒抗剪破强度后, 相对破碎率增加速率随法向应力增加而减小。

关键词: 道路工程; 颗粒破碎; 直剪试验; 接触面; 高应力

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)05-0027-09

Experimental Study on Influencing Factors of Particle Breakage of Coarse Sand Structure Interface under High Stress

TAN Jun-kun¹, GUO Jia-qi², QIAO Shi-fan¹, LIU Xi-liang²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China)

Abstract: In order to study the influencing factors of shear fracture of interface between coarse sand and structure under high stress, the direct shear test on the interface is carried out by using direct shear tester modified from RMT-150B testing system. The direct shear test result higher of the interface between the coarse sand with water contents of 0%, 8%, 16%, 24% and the concrete base with 4 roughnesses and strengths under higher normal stresses are analysed. The result shows that (1) as the base hardness increases, the relation curve of base hardness and relative breakage rate tends to decrease, the relative breakage is reduced; (2) the relative breakage rate increases as the water content goes up, while breakage quantity decreases as the roughness increases; (3) the normal stress has a significant effect on the particle breakage, and the increase rate of the relative breakage rate also shows a tendency to increase as the normal stress increases. Keeping the water content constant, the normal stress and the particle fracture curve are

收稿日期: 2018-02-01

基金项目: 河南省重点科技攻关项目 (152102210318); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (13A440318)

作者简介: 檀俊坤 (1989-), 男, 河南濮阳人, 博士研究生. (tanjunkunde@126.com)

regular; (4) keeping the hardness of the base and the roughness of the contact surface constant, the relationship between the normal stress and the particle breakage is relatively discrete, and the overall particle breakage increases with the increase of the normal stress. The variance analysis shows that (1) the roughness of the contact surface significantly influences the shear breaking of the coarse sand-concrete structure contact surface; (2) normal stress, base hardness and water content all present significant influence on the shearing grain breakage of the structure contact surface, and the order of significance is: moisture content of sand, base hardness, normal stress, and roughness of the contact surface. According to the influence of the normal stress obtained by different experiments on the relative breakage rate of the particles, it is concluded that from zero normal stress, the relative breakage rate increases with the increase of normal stress, while it decreases with the increase of normal stress when the shear stress reaches the shear strength of particles in the concentrated section.

Key words: geotechnical engineering; significant; variance analysis; contact surface; direct shear test

0 引言

土与结构接触面广泛存在于实际工程中,其力学行为一直是土与结构接触面相互作用研究中十分重要的课题。粗粒土作为一种重要的工程材料,众多学者对其强度、变形、压实性、流变及渗透性进行了深入的研究^[1]。相应地,粗粒土与结构接触面的剪切力学特性也得到了许多学者的关注,并进行了大量系统深入的研究^[2-3]。

颗粒破碎是粗粒土的十分重要特性之一^[4],尤其在高应力条件下其破碎表现更加显著。粗粒土的颗粒破碎会造成细小颗粒增多,因而改变粗粒土的原来的粒径级配状态,进而对粗粒土的力学特性产生明显影响,因此,探究其颗粒破碎的机制和影响因素十分重要。1985年,Bobby等^[5]通过砂的压碎试验认为,剪切过程中土体的颗粒破碎受颗粒大小影响显著。李雪梅^[6]利用大型直剪试验系统对粗粒土进行剪切破碎试验,结果表明,不同种类的粗粒土在较小的法向应力作用下剪切破碎差异表现不显著,随着法向应力增大,剪切破碎差异越来越明显。冯大阔等^[7]利用循环直剪仪对粗粒土进行破碎试验得出:结构面板硬度越小、粗糙度越大,接触面颗粒剪切破碎越严重。以上研究有力地促进了土与结构接触面剪切颗粒破碎的研究,有助于深化对颗粒破碎特性的认识。但上述试验研究均是在砂土粒径较大且低应力状态下开展的,对研究中接触面颗粒破碎影响因素进行定性分析,并未对各因素影响程度进行定量分析。

深部工程、大型土石坝等的广泛出现,使原本针对浅部的土与结构接触面相关的剪切试验成果的应用面临严峻的挑战,开展高应力条件下的接触面剪切力学特性试验将不可避免^[8]。胡万雨^[9]利用大

型直剪设备对不同粒径粗颗粒土进行剪切试验,指出随着法向应力的增加颗粒破碎程度增加。夏红春^[10]在研究高压下土与结构接触面力学特性时认为,高压下颗粒破碎与土的粒径大小有关。赵光思^[11]利用超高压直剪试验系统对粒状材料进行直剪试验得出:砂的相对破碎率与法向应力之间呈二次函数关系。上述文献在高应力下接触面颗粒破碎影响因素方面取得了丰硕的研究成果,但未对含水量含水率、接触面硬度、接触面粗糙度等颗粒破碎影响因素进行深入分析。鉴于此,本文使用在RMT-150B试验系统的基础上设计改进适于高应力状态下接触面剪切仪,进行了43组不同含水率的粗砂与不同粗糙度、不同基底硬度接触面的直接剪切试验,基于试验结果对接触面粗砂颗粒破碎影响因素重要性及规律进行了研究,研究结果对地下结构设计具有重要意义。

1 试验系统及试验方法

1.1 试验系统

目前国内外直剪仪垂直出压较小,输出的法向应力不能满足本试验的要求,因此作者在RMT-150B岩石力学系统上进行设计^[12]。

改装后的设备可开展较大接触面尺寸的直接剪切试验,在接触面剪切方向可提供最高为500 kN的剪切荷载,接触面法向方向可施加高达1 000 kN的竖直荷载,上剪切盒内径为124 mm,据此计算最大法向应力可达10 MPa;基底混凝土块尺寸为250 mm×200 mm×60 mm。该装置在水平剪切方向和法向方向均配备液压伺服控制系统,可实现自动加载、数据实时采集、自动绘制图表等功能。设计改装的高应力接触面剪切系统见图1。

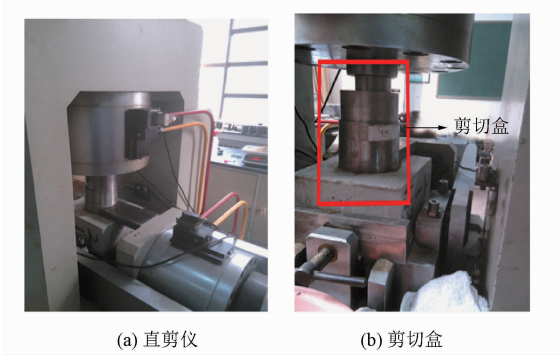


图 1 高应力直剪仪

Fig. 1 Direct shear apparatus under high stress

1.2 接触面粗糙度与基底硬度

基底材料采用具有人工预制标准棱台形状的粗糙混凝土面板作为结构面, 该基底棱台高度与宽度相同, 棱台高度分别设置为 1, 2, 3, 4 mm, 等腰梯形棱台底角统一为 45°, 图 2 为 4 mm 棱高结构面设计形状。

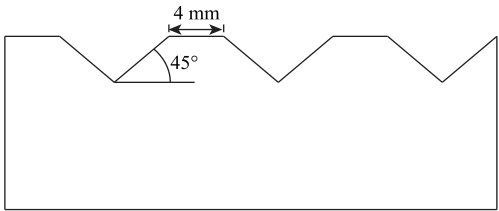
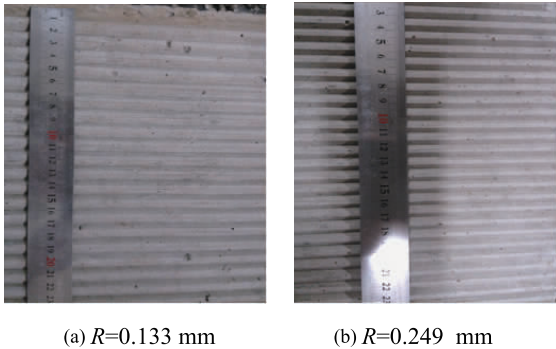


图 2 4 mm 棱高结构面

Fig. 2 Structure surface with edge height of 4 mm

基底粗糙度通过灌砂法确定^[13], 具体为: 将粒径为 0.1 mm 砂平铺在混凝土梯形锯齿状结构表面, 刮扫平整后将砂倒入托盘, 用 100 mL 的量筒量出砂子的体积, 以上工作循环进行 3 次, 采用砂体积的平均值 v 除结构表面积 s 计算得出粗糙度 r 。本试验采用的 4 种人工预制混凝土面板基底接触面粗糙度分别为 0.083, 0.133, 0.249, 0.332 mm, 其中粗糙度 0.133, 0.249 mm 的混凝土面板表面情形如图 3 所示。



(a) $R=0.133$ mm (b) $R=0.249$ mm

图 3 粗糙度 0.133 和 0.249 的混凝土面板

Fig. 3 Concrete panels with roughness of 0.133 and 0.249

根据文献 [14 – 15] 确定的相应混凝土拌和物配合比浇注 C20, C30, C40, C50 这 4 种强度混凝土基底, 并对混凝土基底进行回弹试验确定其硬度^[16], 基底硬度直接用回弹值表示, 所用 4 种强度混凝土基底的回弹值见表 1。

表 1 混凝土基底回弹值

Tab. 1 Rebound value of concrete base				
混凝土强度	C20	C30	C40	C50
回弹值/ ($N \cdot mm^{-2}$)	28.1	33.9	38.1	41.9

1.3 试样准备与试验方法

试验所用粗砂为筛除粒径大于 2 mm 的河砂, 该河砂外形为不规则的多菱角形状, 将所用土置于室外风干, 然后放入烘干箱内保持 106 °C, 烘干 1 h。粗砂特征粒径及特征参数见表 2, 颗粒级配曲线见图 4。

表 2 特征粒径及特征参数

Tab. 2 Characteristic particle size and characteristic parameters					
土性	d ₆₀	d ₃₀	d ₁₀	C _u	C _c
粗砂/mm	0.464	0.263	0.089	5.21	1.675

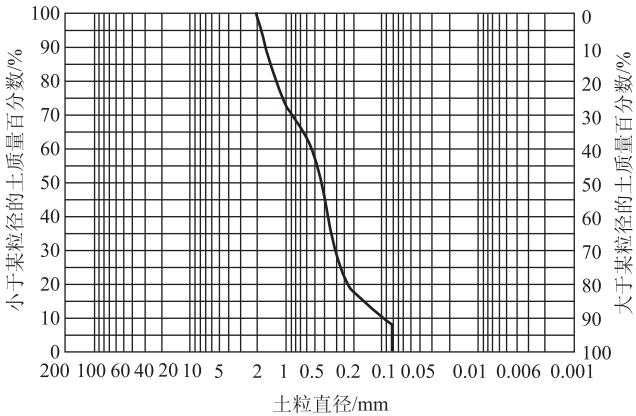


图 4 颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle gradation curve

天然砂土含水率通常不超过 40%^[17], 由此本试验设置 0%, 8%, 16%, 24% 这 4 种含水率的粗砂, 其具体配制方法为: 称取烘干的粗砂 1 000 g 放置于托盘, 均匀喷洒水量 0, 80, 160, 240 g 进行配制 (含水率 = 水质量/土粒质量), 即可得到本试验所需含水率分粗砂试样, 将配制好的粗砂试样放置封试样袋中进行封闭保存, 以防止土样含水量含水率发生变化。

进行剪切试验时, 将配置好的粗砂试样放进剪切盒中, 然后垂直方向加荷, 加载速率控制为 0.5 kN/s。固结时法向荷载控制在 2 MPa 下进行, 固

结稳定的标准控制在 0.0025 mm/min (固结时间约为 3 min)，在粗砂体积处于稳定时，砂土密度不变后，进行直接剪切试验，剪切试验的剪切速率为 0.02 mm/s ，剪切位移达到 13 mm 时停止剪切。试验采用微机控制剪切荷载、法向位移、法向荷载、相对剪切位移等参数的输出和采集。试验前后分别对试样进行筛分，以掌握颗粒破碎以及颗粒级配变化状况。

1.4 法向应力水平的选取

当地下工程埋深超过 100 m ，深厚表土层中水平地压 $p^{[18]}$ 为

$$p = KH, \quad (1)$$

式中， H 为计算点的埋深高度； K 为计算系数，取 $0.01 \sim 0.02$ 。

目前深部地下工程在土层中的埋深多集中在 $50 \sim 500 \text{ m}^{[19]}$ 。本试验选取埋深 $100, 200, 300, 400 \text{ m}$ ，由式 (1) 计算出水平地压力 (试验中的法向应力) 为 $2, 4, 6, 8 \text{ MPa}$ (取 $K=0.2$)。

1.5 试样方案

本研究接触面直剪试验安排两组试验方案：

第 1 组试验方案：保持恒定法向应力 4 MPa ，3 种不同含水率土样 ($0, 8\%, 16\%$)，3 种不同基底硬度 ($28.1, 33.9, 38.1 \text{ N/mm}^2$) 和 3 种接触面粗糙度 ($0.083, 0.133, 0.249 \text{ mm}$) 进行 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 组接触面直剪试验。

第 2 组试验方案：选取混凝土基底硬度、法向应力、接触面粗糙度、土样含水量含水率 4 个颗粒破碎的影响因素，每个影响因素安排 4 个水平，因素安排情况见表 3。

表 3 试验因素水平

Tab. 3 Test factor levels

法向应力 $A/$ MPa	接触面粗糙度 B/mm	基底硬度 $C/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	含水率 $D/\%$
2 (A1)	0.083 (B1)	28.1 (C1)	0 (D1)
4 (A2)	0.133 (B2)	33.9 (C2)	8 (D2)
6 (A3)	0.249 (B3)	38.1 (C3)	16 (D3)
8 (A4)	0.332 (B4)	41.9 (C4)	24 (D4)

试验采用 $L16(4^5)$ 正交表进行规划。对各组试验统一进行编号以方便记录，以 $A2 - B3 - C1 - D4$ 为例，表示法向应力 4 MPa ，混凝土接触面粗糙度 0.249 mm ，基底硬度 28.1 N/mm^2 ，砂土含水率为 24% 的 1 组试验，其他意义相同。

2 接触面厚度选取与颗粒破碎评价

2.1 接触面厚度选取

接触面的颗粒破碎主要发生在结构面板附近一薄层区域内，其厚度即为接触面剪切带厚度。Desai 等^[20]认为结构接触面颗粒的剪切破坏发生在结构面板附近土体中。Frost 等^[7]通过数字照相技术从细观上确定了砂土与结构接触面厚度为 $(5 \sim 7) D_{50}$ 。Wang 等^[21]通过利用二维离散元的方法进行分析得出：接触面剪切带最大厚度为 $(8 \sim 10) D_{50}$ 。张嘎^[2]运用接触面直剪仪机摄影技术，通过对影像图片分析指出土与结构接触面厚度为 $(5 \sim 6) D_{50}$ 。

综合以上对接触面剪切带厚度的研究，可以得出，平均粒径 D_{50} 能够一定程度上反应了颗粒间的转动、自锁、调整和颗粒破碎潜在的能力^[22]，因此接触面剪切带厚度选取应与平均粒径有紧密的关系。根据上述文献，本研究选取 $6D_{50}$ 作为接触面厚度，经计算试验平均粒径 $D_{50} = 0.43 \text{ mm}$ ，因此本研究接触面厚度定为 2.58 mm 。

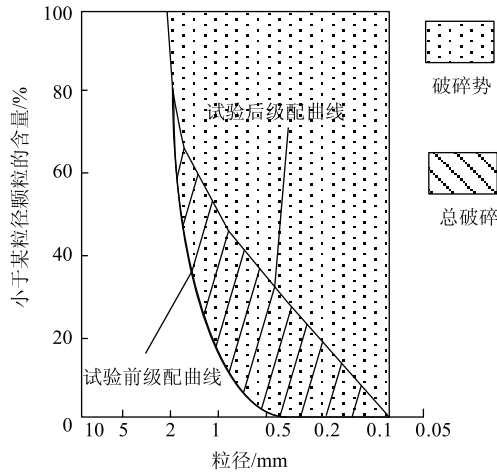
2.2 颗粒破碎评价方法及选取

粗粒料在外力作用下易发生破碎，为了量化颗粒破碎程度需要相应的量化指标。Lade 等^[23]在研究粗颗粒破碎特性时提出，采用限制粒径 d_{10} 在试验前后的变化值 (B_{10}) 来表征颗粒破碎程度。但该指标仅能反映某个粒径下颗粒的增减。Marsalr^[24]建议利用破碎率 B_g 来作为粗粒料的反映指标，对于同一试样，计算试验前后各个颗粒含量的差值，取所有差值之比就是破碎率 B_g ，该指标受颗粒和粒径影响较大，难以反映各粒组的实际变化。

Hardin^[25]在总结前人研究成果的基础提出了颗粒破碎可能随着颗粒粒径的增大而增大，大颗粒破碎成粉粒时，颗粒将不再破碎，由此将试验前与试验后粒径分析曲线与粒径 $d = 0.074 \text{ mm}$ 对应的竖线所闭合围成面积定义为总破碎 B_t ，以试验前后的颗粒分析曲线与粒径 $d = 0.074 \text{ mm}$ 对应的竖线所闭合围成的面积定义为破碎势 B_p ，并定义了一个可以反映总体上破碎情况的相对破碎率，见图 5。该指标不仅能从总体上反映破碎情况，并且计算方便，因此本文采用该指标衡量颗粒破碎情况。

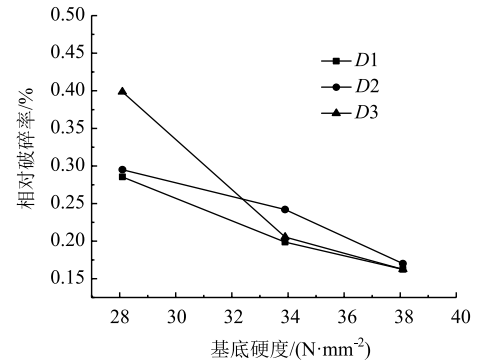
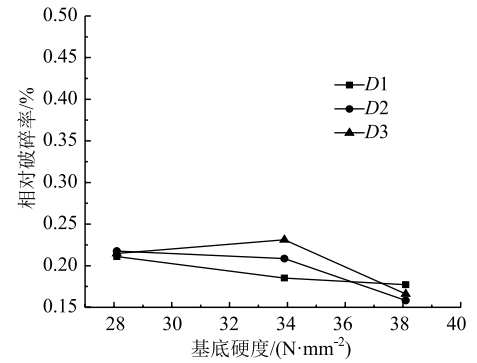
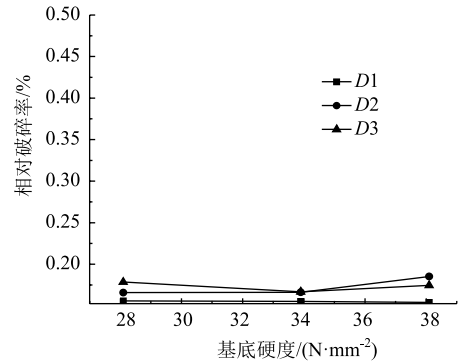
3 颗粒破碎与各影响因素之间关系分析

按照上述 Hardin 制定的颗粒破碎评价方法，利用数据处理软件 Origin 对第 1 组试验方案接触面颗

图5 相对破碎率 B_r 的定义Fig. 5 Definition of relatively broken rate B_r

粒破碎所得数据进行处理, 得到基底硬度 - 相对破碎率关系曲线, 如图 6 所示。

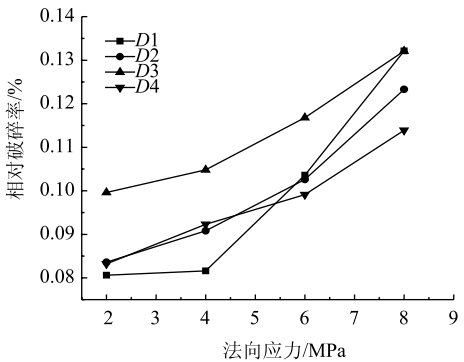
从图 6 可以看出, 随着基底硬度增大, 基底硬度与相对破碎率关系曲线呈下降趋势, 表明相对破碎率随基底硬度的增大而减小。颗粒与基底接触形式主要为点接触, 接触点面积远小于颗粒与结构面形成接触面积, 颗粒棱角在高法向应力作用下刺入结构接触面与结构镶嵌, 混凝土试块具有弹塑性, 基底硬度越小单个颗粒嵌入体积越大, 颗粒水平约束增强, 颗粒受剪时该颗粒难以移动, 造成颗粒水平剪切破坏。对含水率进行分析可知, 含水率增加相对破碎率增加, 由于该粒径段砂粒的天然微裂隙或缺陷较多, 水分易侵入到其裂隙中, 水的浸润下颗粒抗剪能力减弱, 颗粒破碎量增大。除此之外, 颗粒浸水后材料软化, 在应力相同或增加的情况下, 颗粒与接触面的接触点所能承受荷载的能力降低, 致使颗粒破碎量增加, 从而颗粒之间和颗粒与接触面之间的接触面积增大, 以保证砂-结构接触面的剪切应力与外力平衡。对比图 6 中的 3 幅图, 可知, 相对破碎率随着粗糙度的增加破碎量减少, 这与冯大阔等^[7]得出结构接触面粗糙度较大时, 颗粒破碎相对较多的结论有所不同, 究其原因在于本试验的颗粒粒径选择和粗糙程度设置与其有所区别, 由于试验平均粒径 $D_{50} = 0.43 \text{ mm}$, 最小粗糙度 0.083 mm 所设棱槽上界面宽度为 2 mm 难以对颗粒有效锁嵌, 颗粒与结构接触界面的摩擦仅在棱台台面上, 在棱槽上部位仅存在颗粒与颗粒的摩擦, 因而随着接触面粗糙度的增大, 颗粒与混凝土结构接触的接触面积减少, 颗粒破碎也随之减少。

(a) 接触面粗糙度 0.83 mm (b) 接触面粗糙度 0.133 mm (c) 接触面粗糙度 0.249 mm 图6 法向应力 4 MPa 下基底硬度 - 相对破碎率关系曲线Fig. 6 Curves of relation between base hardness and relative breakage rate under normal stress of 4 MPa

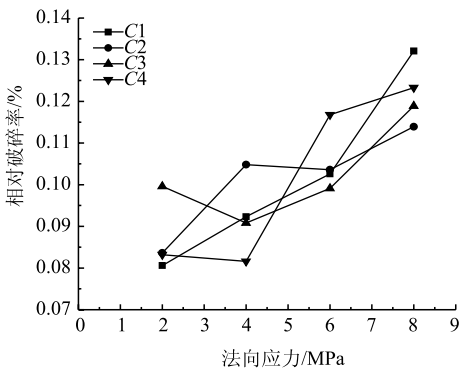
对第 2 组试验方案的颗粒破碎试验数据进行处理得到法向应力 - 颗粒破碎关系曲线, 如图 7 所示。

在接触面剪切试验过程中, 影响破碎的因素很多, 因此试验结果的离散性比较大, 可重现性较差。由图 7 的基本趋势, 可以认为在 $2 \sim 8 \text{ MPa}$ 范围内法向应力对颗粒破碎有以下规律: (1) 颗粒破碎随法向应力的增大破碎率增大, 法向应力对颗粒破碎影响明显, 相对破碎率的增大速率也表现出随法向应力增大而增大的趋势。

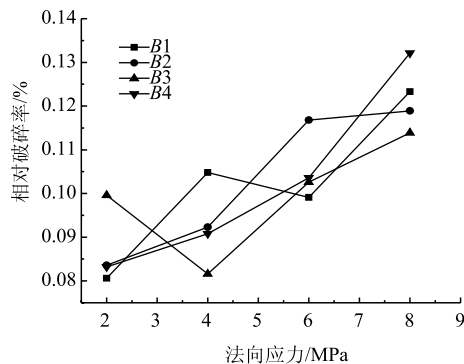
形成上述规律的原因在于: 高应力接触面剪切试验的颗粒破碎存在两种形式, 一种是颗粒受压破



(a) 不同含水率条件下法向应力与相对破碎率的关系曲线



(b) 不同基底硬度条件下法向应力与相对破碎率的关系曲线



(c) 不同接触面粗糙度条件下法向应力与相对破碎率的关系曲线

图 7 相对破碎率 - 法向应力关系曲线

Fig.7 Curves of relation between relative breakage rate and normal stress

碎, 由于颗粒大小不一, 颗粒受压时, 颗粒与接触面、颗粒与颗粒之间, 大颗粒都发挥骨架作用承受大部分法向压力, 小颗粒镶嵌于骨架之间, 承担其余法向压力, 施加法向应力大颗粒局部棱角损坏或整体损坏形成较小颗粒, 抵抗法向压力能力增强, 当施加更大的法向应力, 颗粒再次破坏形成更小的颗粒与法向压力形成新的抗压破碎平衡, 表现出随法向应力增大压破碎量增大的现象。另一种是颗粒受剪破碎, 刘尧^[26]通过大型单剪试验指出剪切应力水平的大小是决定颗粒破碎的重要因素, 颗粒与接

触面主要以点接触的形式存在, 受法向应力影响, 颗粒与颗粒间镶嵌挤实, 法向应力越大颗粒与接触面咬合越紧密, 颗粒越难以发生滑动、滚动, 剪切时颗粒受水平剪切破坏量增大。(2) 保持含水率不变, 法向应力与颗粒破碎曲线规律性较好。(3) 保持基底硬度和接触面粗糙度不变, 法向应力与颗粒破碎关系较为离散, 但总体保持颗粒破碎随法向应力增加而增加。

4 接触面颗粒破碎显著性分析

粗砂 - 混凝土接触面剪切试验中颗粒破碎受法向应力、砂的含水率、基底硬度和接触面粗糙度等因素影响, 为了确定各影响因素的显著性, 特对本文第 2 组试验方案的试验数据进行方差分析。

4.1 颗粒破碎因素显著性判别规则

正交试验分析方法可分为直观分析法和方差分析法, 直观分析法简单易懂, 实用性强, 方差分析法的分析精度较高, 把试验误差二者引起的试验数据波动区别开来, 用于检验试验过程中因素对试验结果影响的显著性^[27], 弥补直观分析的不足。 F 值是两个均方的比值, F 值越大, 说明处理之间效果越明显, 误差项越小, 试验精度越高。

4.2 接触面粗砂颗粒破碎影响因素显著性分析

利用颗粒破坏相对破碎率指标接触面粗砂的相对破碎率, 计算结果见表 4。

表 4 接触面颗粒相对破碎率
Tab. 4 Relative breakage rate of contact surface

试验号	因素				相对破碎率 Br/%
	A	B	C	D	
1	A1	B1	C1	D1	0.080 6
2	A1	B2	C2	D2	0.083 6
3	A1	B3	C3	D3	0.099 6
4	A1	B4	C4	D4	0.083 2
5	A2	B1	C2	D3	0.104 8
6	A2	B2	C1	D4	0.092 3
7	A2	B3	C4	D1	0.081 6
8	A2	B4	C3	D2	0.090 8
9	A3	B1	C3	D4	0.099 1
10	A3	B2	C4	D3	0.116 8
11	A3	B3	C1	D2	0.102 6
12	A3	B4	C2	D1	0.103 6
13	A4	B1	C4	D2	0.123 3
14	A4	B2	C3	D1	0.118 9
15	A4	B3	C2	D4	0.113 9
16	A4	B4	C1	D3	0.132 1

采用方差分析法对表4中不同剪切条件下的接触面颗粒破碎影响因素显著性进行分析,分析结果见表5。

表5 接触面颗粒破碎率影响因素显著性方差分析结果

Tab. 5 Analysis of variance of significance of influencing factors on particle breakage rate in contact surface

方差来源	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	F 值	显著性
A	0.095	3	0.031 66	8.695 6	**
B	0.052 5	3	0.017 5	4.805 4	*
C	0.096 1	3	0.032 03	8.796 3	**
D	0.111 2	3	0.037 0	10.178	**
误差 e	0.043 7	12	0.014 56		
总和 T	0.398 5	24	0.001 62		

由表5知,法向应力对粗砂-混凝土结构接触面剪切破碎强度影响高度显著;接触面粗糙度对粗砂-混凝土结构接触面剪切破碎的影响表现较显著;含水率与基底硬度对结构接触面剪切破碎的影响均表现为高度显著。其影响因素显著性由大到小顺序为:砂的含水率、法向应力、基底硬度、接触面粗糙度。

5 讨论

冯大阔^[7]在接触面循环直剪试验中指出:法向应力较小时,接触面相对破碎率随法向应力增加而迅速增加;法向应力较大时,颗粒相对破碎率增速相对较小(图8),接触面相对破碎率关系可用幂函数 $B_r = K(\sigma)^n$ (σ 为法向应力),与本试验结果不尽相同。赵光思等^[11]通过高压直剪试验认为砂的相对破碎率与法向应力有良好的二次函数关系 $y = 0.054 5x^2 + 0.501 6x$ (图9),法向应力较小时,接触面相对破碎率随法向应力增加而速率较慢;法向应力较大时,颗粒相对破碎率增速增大,与本试验结果较为接近。胡万雨通过对粗粒土进行大型直剪试验指出:相同法向应力颗粒粒径对破碎的影响明显,粒径越大破碎率越大^[9],可以认为颗粒的抗剪破强度受颗粒大小影响显著。

综合文献[7, 9, 11]和本试验结果进行分析,笔者认为:试验所采用最小的法向应力产生相应的砂-结构接触面剪切力与集中段颗粒(本研究将试样砂中同一粒径段总质量最大的粒径段颗粒称为集中段颗粒)的抗剪破强度接近或大于其抗剪破强度时进行剪切,集中段颗粒与比集中段粒径大的颗粒,由于抗剪破强度和抗压破碎强度小于最小法向应力所产生的压应力和剪切应力而破碎明显,形成较

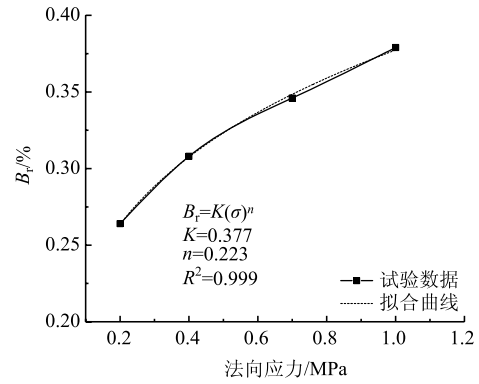


图8 文献[7] 接触面相对破碎率与法向应力的关系

Fig. 8 Relation between relative breaking rate of contact surface and normal stress in Ref. [7]

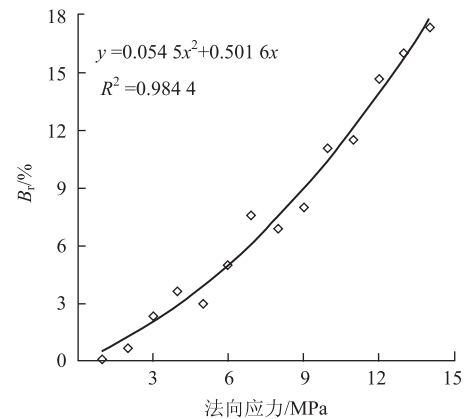


图9 文献[11] 接触面相对破碎率与法向应力的关系

Fig. 9 Relation between relative breaking rate of contact surface and normal stress in Ref. [11]

小的颗粒,集中段颗粒粒径也随之变小(新形成的集中段颗粒称为二次集中段颗粒),随着颗粒粒径变小抗剪破强度增加。此时增加法向应力,接触面剪切应力也随之增大,但其剪切应力增加量小于二次集中段颗粒抗剪破强度增量,造成颗粒破碎增加速率减慢,该现象与文献[7]接触面相对破碎率与法向应力关系趋势一致。

文献[11]与本试验选取颗粒远小于文献[7]颗粒的粒径,颗粒抗剪破能力也较强,试验采用最小的法向应力时产生相应的砂-结构接触面剪切应力远小于集中段颗粒的抗剪破强度,最小法向应力所对应产生的剪切应力造成的颗粒破碎多发生于试验中抗剪强度较小的较大颗粒,由于该部分颗粒数量少,因此破碎量也较小,随着法向应力增大,达到更多颗粒的抗剪强度,其抗剪强度对应颗粒分布量更加密集,由此破碎速率迅速增加,直至剪切应力增大到集中段颗粒抗剪破强度后,表现出文献

[11] 中颗粒破碎与法向应力的关系。鉴于上述分析,笔者认为本试验和文献[11]是接触面剪切应力未达到集中段颗粒抗剪破强度前相对破碎率与法向应力关系的规律,文献[7]为剪切应力达到集中段颗粒抗剪破强度后,相对破碎率与法向应力关系的规律。由土的抗剪强度规律^[28]知剪切应力与法向应力呈正比,因此相对破碎率与法向应力的关系可认为:从零法向应力开始,随法向应力的增大相对破碎率增加速率增大,当剪切应力达到集中段颗粒抗剪破强度后,相对破碎率增加速率随法向应力增加而减小。

针对上述讨论需要进一步试验研究,探索试验法向应力与颗粒破碎表现两种不同规律是否具有连续性、集中段颗粒抗剪破强度是否是破碎速率由增变减的拐点等问题。

6 结论

利用自行设计改装的接触面高应力直剪仪进行不同含水率粗砂与不同接触面粗糙度、基底硬度的直剪试验得出以下结论:

(1) 在法向应力 4 MPa 下,随着接触面基底硬度增大,相对破碎率随基底硬度的增大而减小;含水率增加相对破碎率增加;相对破碎率随着粗糙度的增加破碎率减少。

(2) 法向应力对粗砂-混凝土结构接触面剪切破碎强度影响特别显著;接触面粗糙度对粗砂-混凝土结构接触面剪切破碎的影响较显著;基底硬度与含水率对结构接触面剪切破碎的影响均特别显著;且影响因素显著性由大到小顺序为:砂的含水率、基底硬度、法向应力、接触面粗糙度。

(3) 颗粒破碎随接触面法向应力的增大破碎率增大,法向应力对颗粒破碎影响明显;保持含水率不变,法向应力与颗粒破碎曲线规律性较好;保持基底硬度和接触面粗糙度不变,法向应力与颗粒破碎关系较为离散,但总体保持颗粒破碎随法向应力增加而增加。

参考文献:

References:

- [1] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
GUO Qing-guo. Engineering Characteristics of Coarse-grained Soil and Its Application [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1998.
- [2] 张嘎. 粗粒土与结构接触面静动力学特性及弹塑性损伤理论研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002.
ZHANG Ga. Study on Static Characteristics and Elastoplastic Damage Theory of Contact Surface between Coarse Grained Soil and Structure [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.
- [3] 冯大阔, 张嘎, 张建民, 等. 常刚度条件下粗粒土与结构接触面三维力学特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (10): 1571-1577.
FENG Da-kuo, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, et al. Experimental Study on 3D Cyclic Behavior of Soil-structure Interface under Constant Normal Stiffness Condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (10): 1571 - 1577.
- [4] MARSAL R J. Large-scale Testing of Rockfill Materials [J]. Journal of Soils Mechanics and Foundation Division, 1967, 93 (2): 27 - 43.
- [5] HARDIN B O. Crushing of Soil Particles [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111 (10): 1177 - 1192.
- [6] 李雪梅, 李红文, 方华建. 基于大型直剪试验的粗粒料颗粒破碎对比研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (增1): 3581 - 3587.
LI Xue-mei, LI Hong-wen, FANG Hua-jian. Comparative Study of Crushing of Coarse-grained Soils by Large-scale Direct Shear Tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S1): 3581 - 3587.
- [7] 冯大阔, 张建民. 循环直剪条件下粗粒土与结构混凝土结构接触面颗粒破碎研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (4): 767 - 773.
FENG Da-kuo, ZHANG Jian-min. Particle Breakage of Gravel-structure Interface under Cyclic Shear [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (4): 767 - 773.
- [8] 檀俊坤, 郭佳奇, 徐子龙, 等. 高应力下粗砂与混凝土接触面剪切特性影响因素试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40 (6): 67 - 75.
TAN Jun-kun, GUO Jia-qi, XU Zi-long, et al. Experimental Investigation of the Influential Factors on the Shear Characteristics of the Interface between Coarse Sand and Concrete under High Stress [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40 (6): 67 - 75.
- [9] 胡万雨, 覃燕林, 刘恩龙, 等. 粗粒土颗粒破碎大型直剪试验研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11 (2): 31 - 33.
HU Wan-yu, QIN Yan-lin, LIU En-long, et al. Large-scale Direct Shear Experimental Study on Particle Breakage

- of Coarse-grained Soils [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11 (2): 31-33.
- [10] 夏红春,周国庆. 土-结构接触面剪切力学特性及其影响因素试验 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39 (6): 831-836.
- XIA Hong-chun, ZHOU Guo-qing. Experimental Study of the Shear Mechanical Characteristics at a Soil-structure Interface and the Factors Affecting Them [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39 (6): 831-836.
- [11] 赵光思,周国庆,朱峰盼,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.
- [12] 檀俊坤,郭佳奇,徐子龙,等. 高应力剪切条件下粗砂与混凝土结构接触面颗粒破碎试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2017, 265 (8): 72-77.
- TAN Jun-kun, GUO Jia-qi, XU Zi-long, et al. Experimental Study on Particle Breakage at Interface between Coarse Sand and Concrete Structure under High Stress Shear [J]. Concrete and cement products, 2017, 265 (8): 72-77.
- [13] 程红强,高丹盈,张启明. 老混凝土表面粗糙度的一种简单测定法 [J]. 郑州大学学报:工学版, 2006, 27 (1): 23-26.
- CHENG Hong-qiang, GAO Dan-ying, ZHANG Qi-ming. An Easy Method to Measure the Roughness of Old Concrete Surface [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2006, 27 (1): 23-26.
- [14] JGJ55—2011, 普通混凝土配合比设计规程 [S].
- JGJ55—2011, Specification for Mix Design of Plain Concrete [S].
- [15] GB/T50107—2010, 混凝土强度检验评定标准 [S].
- GB/T50107—2010, Standard for Evaluation of Concrete Compressive Strength [S].
- [16] JGJT23—2011, 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程 [S].
- JGJT23—2011, Technical Specification for Inspecting of Concrete Compressive Strength by Rebound Method [S].
- [17] 马建林. 土力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- MA Jian-lin. Soil Mechanics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013.
- [18] 刘希亮. 深厚表土不稳定性地层中井壁受力研究 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- LIU Xi-liang. Study on Stress of Shaft Lining in Unstable Stratum of Deep Topsoil [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2004.
- [19] 郭佳奇,刘希亮,苏承东. 高应力下砂土与结构界面单剪试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2008, 33 (4): 120-126.
- GUO Jia-qi, LIU Xi-liang, SU Cheng-dong. Simple Shear Test of Interface between Sand and Structure under High Stress [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2008, 33 (4): 120-126.
- [20] DESAI C S, MA Y. Modelling of Joints and Interfaces Using the Disturbed-state Concept [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 16 (9): 623-653.
- [21] WANG J F, GUTIERREZ M S, DOVE J E. Numerical Studies of Shear Banding in Interface Shear Tests Using a New Strain Calculation Method [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods, 2007, 31 (12): 1349-1366.
- [22] DEJONG J T, CHRISTOPH G G. Influence of Particle Properties and Initial Specimen State on One-dimensional Compression and Hydraulic Conductivity [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135 (3): 449-454.
- [23] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of Particle Crushing in Granular Materials [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122 (4): 309-316.
- [24] MARSALR J. Mechanical properties of Rockfill Embankment Dam Engineering [M]. New York: Wiley, 1973: 109-200.
- [25] HARDIN B O. Crushing of Soil Particles [J]. J Geotech Engrg ASCE, 1985, 111 (10): 1177-1192.
- [26] 刘尧,卢延浩. 粗粒土大型单剪颗粒破碎试验研究 [J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009, 37 (2): 175-178.
- LIU Yao, LU Yan-hao. Large-scale Simple Shear Tests of Particle Breakage of Coarse-grained Soil [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2009, 37 (2): 175-178.
- [27] 栾军. 现代试验设计优化方法 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.
- LUAN Jun. Optimized Method of Modern Test Design [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1995.
- [28] LU Yan-hao. 土力学 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2004.
- LU Y H. Soil Mechanics [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2004.