

文章编号: 1000-7598 (2013) 12-3491-10

中、高压下粗粒土-结构接触面特性 受结构面形貌尺度影响的试验研究

陆 勇¹, 周国庆^{1,2}, 夏红春³, 汪平生¹

(1.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;

2.中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 3.聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252059)

摘 要: 采用改进的 DRS-I 型高压直剪仪进行了砂砾与不同形貌尺度的粗糙钢板结构面接触剪切试验, 获得不同压力、形貌尺度条件下的剪切试验结果, 分析了中、高压下的不同结构面形貌尺度与砂土颗粒平均粒径比值 R ($R = H/d_{50}$, 相对形貌尺度) 对接触面剪切特性的影响。结构面相对形貌尺度 R 直接影响接触面剪切过程中的力学与体变特性, 中压与高压下分别呈现不同的影响规律且存在各自的峰值相对形貌尺度 $R_{\max}$ 与稳定相对形貌尺度 R_{st} 。达到峰值相对形貌尺度之前, R 的增大使得接触面剪切耗能随之增加, 而剪切体变在中压、高压下分别随之增加和降低; 稳定相对形貌尺度之后, 接触面剪切耗能随剪切体变达到稳定状态, 随 R 的增大呈微小变化, 变化幅值较小。上述规律与接触面附近一定区域的颗粒变位及破碎等机制密切相关, 获得成果将为研究不同法向压力下受形貌尺度影响的结构面相对粗糙度问题提供新思路, 对于研究不同法向压力下粗粒土与粗糙结构面的接触面力学与变形机制有一定借鉴意义。

关 键 词: 粗粒土; 接触面; 形貌尺度; 剪切耗能; 体变

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Effect of shape scale on characteristics of coarse grained soil-structural interface under medium and high pressures

LU Yong¹, ZHOU Guo-qing^{1,2}, XIA Hong-chun³, WANG Ping-sheng¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3. School of Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract: By modified DRS-I high pressure direct shear test apparatus, interface shear tests of gravel and different structural planes under medium and high pressures are carried out. With different structural planes having different peak-valley distances H , relative scale R is defined as the ratio of H to average particle size ($R = H/d_{50}$). Effects of relative scale R on mechanical and deformation characteristics of interface shear process under medium and high pressures are studied. The test results show that the relative scale R affects the interface shear energy consumption and shear volume deformation directly; and influential rules are different between medium pressure and high pressure. Whether under medium or high pressure, there exist limited and critical R respectively described as $R_{\max}$ and R_{st} . Before $R_{\max}$, the increase of R results in monotonous change of interface shear energy consumption and shear volume deformation. After $R_{\max}$, the increase of R will cause shear energy consumption and shear volume deformation meeting a critical state, and the corresponding relative scale is R_{st} . For above rules closely relate to particle displacement and grain breakage, the limited and critical values of R give new thoughts to research the roughness which affected by relative scale of particles and structural planes under different pressures; and it also has some significance for describing the mechanics and deformation mechanism of interface under different pressures.

Key words: coarse grained soil; interface; shape scale; shear energy consumption; volume deformation

收稿日期: 2012-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50974117); 江苏省普通高校研究生科研创新资助项目 (No. CXZZ12_0936); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目 (No. SKLGDUEK1109)。

第一作者简介: 陆勇, 男, 1987年生, 博士研究生, 主要从事颗粒岩土介质力学特性及土与结构相互作用方面的研究工作。

E-mail: cumtluyong@cumt.edu.cn

1 引言

对接触面力学特性的研究是解决土体与结构相互作用问题的前提,受诸多因素影响。自 1961 年 Potyondy^[1]采用直剪仪进行土料与结构物接触面的力学特性试验以来,该课题一直作为岩土工程中的热点问题被众多学者研究,涉及土力学和基础工程的各个方面。Clough 等^[2]以及 Brandt^[3]相继采用直剪试验,研究了土与混凝土接触面的力学特性,采用双曲线模型对剪应力-剪位移关系进行模拟,认为试验中接触面附近土体的渐进破坏影响着接触面的应力-位移关系。殷宗泽等^[4]通过埋设微型“潜望镜”的细观方法测得接触面上不同位置处的相对位移,得出剪切破坏是从边缘向内部逐步发展的结论。之后,胡黎明等^[5-7],张嘎等^[8],周健等^[9],李邵军等^[10]利用宏、细观观测以及数值模拟等手段,研究了土-结构接触面剪切变形机制和力学特性,获得土粒实际位移与剪应力的关系,这些研究成果为接触面力学特性和本构模型的研究提供重要支撑。随着现有工程朝更高、更深的趋势发展,须考虑高压下粗粒土颗粒破碎对接触面剪切力学与变形特性的影响,周国庆等^[11],夏红春等^[12],刘希亮等^[13]相继进行了粗粒土与结构面在高压下的剪切试验,初步获得接触面剪切力学特性受法向压力、剪切速率及结构面粗糙度等因素的影响规律。

以往的粗粒土与结构接触面的物理与数值试验均着重于接触面剪切过程中宏观力学与变形特性以及接触面附近土体颗粒变位的细观研究,并建立适用于工程计算的接触面单元模型,研究中对于接触面特性受砂土颗粒与结构面表面形貌的相对尺度的影响规律很少考虑,对接触面剪切强度发挥机制的认识尚存不足。在岩石与机械材料的摩擦学方面,接触面两边材料表面粗糙度的相对性问题已被人们认识,众多学者采用分形^[14-16]、高度特征函数、表面形态纹理特征参数^[17-18]等方法去表述结构表面形态,以获得与接触力学特性相联系的结构表面描述方法。

本文采用形貌因子^[18]相同、形貌尺度不同的钢板结构面与砂砾进行中压与高压下接触面剪切试验,初步探究结构面形貌尺度与颗粒平均粒径间的相对尺度在不同压力条件下对接触面力学特性的影响,以期能够更深入理解粗粒土与结构相互作用的机制并重新认识结构面相对粗糙度对接触面剪切力学特性影响的本质。

2 试验方案

2.1 结构面形貌尺度

结构面形貌特征参数众多,本文采用文献[18]定义的形状因子 λ 。其可考虑剪切受力方向的不同对接触面力学性能的影响。

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}} \quad (1)$$

式中: Δx_i 、 Δy_i 分别为曲线在水平方向及相应的高程方向的增量,如图 1 所示。

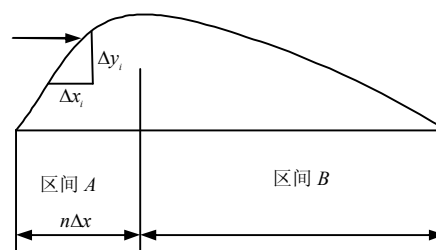


图 1 结构面形状因子

Fig.1 Shape factors of structural plane

式(1)的分母为区间 A 或 B 内的弧长,分子为该区间内的弦长,在该区间内共有 n 个增量单元;当结构面剪切受力方向为图中所示剪切方向时,取区间 A,反之则取区间 B。如果受力范围内有 l 个起伏成分,该受力范围内某个方向上形状因子公式变为

$$\lambda = \sum_{j=1}^l \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_{ij}}{\sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{n_j} \Delta x_{ij}} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2}} \right) \quad (2)$$

式中: Δx_{ij} 、 Δy_{ij} 分别为曲线第 j 个起伏成分中,水平方向及相应的高程方向第 i 个增量,共计有 l 个起伏成分。第 j 个起伏成分中共计有 n_j 个增量,上式第 1 个括号表示的是第 j 个起伏成分在 l 个起伏成分中所占权重。

本文定义结构面形貌尺度为

$$H = \sum_{i=1}^n \Delta y_i \quad (3)$$

依照受力方向可分别计算区间 A 与区间 B。

如果受力范围内有 l 个起伏成分,该受力范围内某个方向上形貌尺度公式变为

$$H = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{n_j} \Delta y_{ij} / l \quad (4)$$

考虑上述结构面形状因子 λ 以及形貌尺度 H 的定义, 试验中将钢板加工成 9 种具有相同形貌特征、不同形貌尺度的粗糙结构面, 并与粗粒土进行接触面剪切试验, 以研究形貌尺度对接触面剪切力学特性的影响规律。

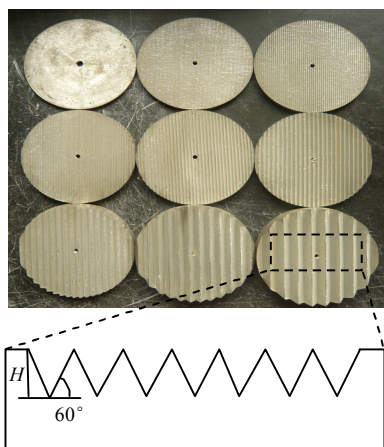


图 2 结构面形貌尺度

Fig.2 Shape scales of structural planes

9 种钢板结构面如图 2 所示, 相应的结构面形状因子 λ 为 0.5, 形貌尺度 H 分别为 0.0、0.6、0.9、1.2、1.5、2.0、3.0、4.5、6.0 mm。

2.2 剪切试验

试验采用 DRS-I 型高压直剪试验系统, 如图 3 所示, 系统所能施加的最大竖向力与水平力为 60 kN。试验过程采用微机自动控制, 剪切荷载、竖向荷载、剪切位移、竖向位移等试验参数均由传感器及数据转换装置自动采集和输出。



图 3 DRS-I 型高压直剪试验系统

Fig.3 DRS-I high pressure direct/residual shear test system

采用由福建标准砂筛分得到的粒径为 1~2 mm 的级配均匀砂砾作为试验用粗粒土, 与上述 9 种不同形貌尺度的直径 $\phi = 61.8$ mm 的圆形粗糙钢板结构面分别进行法向压力 σ 为 0.8、1.6、3.2、6.4 MPa 4 个等级下的共 36 组接触面剪切试验。砂砾的平均

粒径 $d_{50} = 1.5$ mm, 不均匀系数 $C_u = 1.67$, 曲率系数 $C_c = 0.93$, 土粒相对密度 $C_s = 2.64$ 。

采用落雨法进行砂样的分层制样, 较好地控制其初始密度。每组试验保证结构面上方砂样厚度为 30 mm, 试验初始密度为 1.435 g/cm^3 。

考虑目前没有针对中、高压下的土工试验标准, 本试验自行设定加载顺序为 25、50、100、200、400、800 kPa。每级法向压力作用下的固结稳定标准定为: 竖向位移的变化率小于等于 0.005 mm/min 。砂土的固结时间较短, 本文每组试验的固结时间约 6~10 min。

最后一级法向压力固结完成后进行直接剪切试验, 剪切速率设为 1.2 mm/min , 剪切终止位移设为 8 mm。剪切过程中, 由传感器及自动采集装置对剪切荷载 T 、竖向荷载 P 、剪切位移 Δs 、竖向位移 Δh 4 个试验数据进行自动采集并保存。

3 试验成果

3.1 剪应力-剪位移关系与竖向位移-剪位移关系

砂砾试样的面积 $A = \pi \phi^2 / 4$ ($\phi = 61.8 \text{ mm}$), 试验结束后对采集得到的 T 、 P 、 Δs 、 Δh 4 个试验数据进行整理, 获得 4 种法向应力、9 种形貌尺度所对应的 36 组接触面剪切试验的剪应力 $\tau(T/A)$ -剪位移 Δs 曲线以及竖向位移 h -剪位移 Δs 曲线, 图 4、5 为部分试验结果 (图例包含两个参数, 前者为形貌尺度 H , 后者为法向压力 σ)。

图 4 中接触面剪切应力随剪切位移的发展而逐渐发挥, 是一种渐进发展形态^[4]。剪切应力-剪位移曲线形态因受形貌尺度 H 、法向压力 σ 的影响而呈不同形式:

(1) 在形貌尺度 $H = 0 \text{ mm}$, 亦即接触表面光滑的条件下, 法向压力影响着接触剪切应力值, 对接触面剪切应力-剪位移曲线形态的影响较小, 曲线形态均近似呈理想刚塑性。整个剪切过程中砂砾-钢板结构面的相互作用由初始的相对静止状态转变为相对滑移状态。剪切应力主要由砂砾与钢板间的摩擦系数决定, 而高压下接触面附近少量的颗粒破碎对其影响较小。

(2) 形貌尺度 H 为 1.5、6.0 mm, 较 0.0 mm 的接触钢板表面粗糙, 此时的法向压力影响着接触剪切应力值并且显著影响着接触面剪切应力-剪位移曲线形态。曲线形态由法向压力 0.8、1.6 MPa 条件下具有明显剪应力峰值点的应变软化型转变过渡至法向压力 3.2、6.4 MPa 条件下的应变硬化型。剪切过程中砂砾-钢板结构面的相互作用不再为简单

的相对滑移,而存在着砂砾土内部颗粒间的变位(位移与旋转)以及高压下颗粒的破碎^[11-12]。颗粒变位、颗粒破碎与砂砾-钢板间的相对滑移共同决定了 H 为 1.5、6.0 mm 结构面条件下不同压力等级的剪切应力-剪切位移曲线形态。

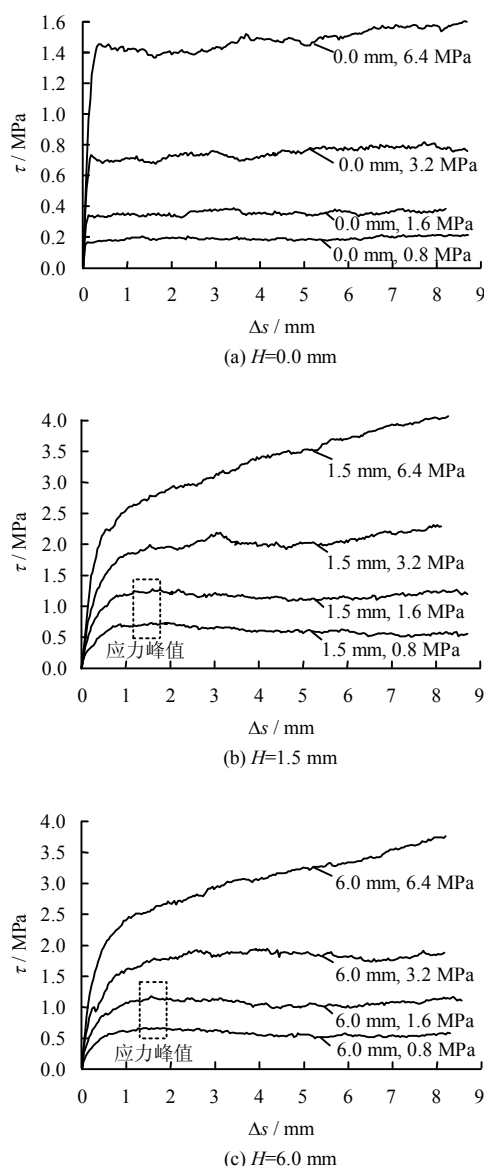


图4 不同法向压力、不同形貌尺度条件下剪应力 τ -剪位移 Δs 关系

Fig.4 Curves of τ - Δs for different H under different σ

图5为不同形貌尺度、不同法向压力条件下接触面剪切过程中试样的竖向位移随剪切位移的发展关系曲线,由于试验过程中试样的截面积为定值,因此,竖向位移能够反映剪切过程中试样的体积变化($\Delta V = \Delta h \pi \phi^2 / 4$),即接触面剪切体变特性。本文中竖向位移以试样体积膨胀为正、试样体积压缩为负。竖向位移-剪位移曲线形态随结构面 H 、 σ 的改变亦呈不同的形式:

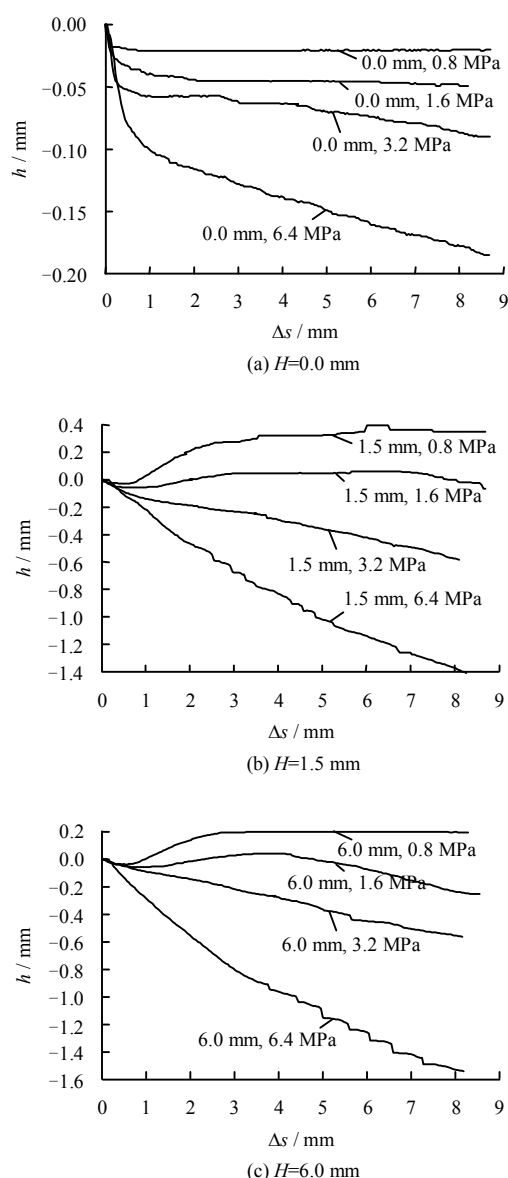


图5 竖向位移-剪切位移关系曲线

Fig.5 Curves of vertical displacement-shear displacement

(1) 在形貌尺度 $H = 0.0$ mm 条件下,剪切过程中试样均呈现一定的体缩。0.8、1.6 MPa 条件下体缩很快完成,之后呈现临界剪切状态,相对竖向位移不再随剪切位移的发展而变化;3.2、6.4 MPa 条件下初期的体缩很快完成,而后体缩持续发展。上述差异主要是由于高压下接触面附近存在一定量破碎的砂砾导致此区域在剪切过程中的持续体缩,而中压下砂砾与钢板结构面以相对滑移作用为主而使得弹性体缩很快完成并呈临界状态(体变不再随剪切位移发展而变化)。

(2) H 为 1.5、6.0 mm 的钢板结构面与砂砾接触剪切条件下,法向压力影响着接触剪切过程中的体变特征。0.8、1.6 MPa 法向压力下的剪切首先呈现初始剪切体缩,之后有一定量的剪切体胀,砂砾-钢板结构面的接触剪切特性由颗粒变位与砂砾-钢

板间的相对滑移共同决定。1.6 MPa 条件下, 一定量剪胀后再次呈现体缩特征, 这是由于法向压力 1.6 MPa 条件下的剪切接触面附近出现了颗粒破碎, 故砂砾-钢板结构面的相互作用由相对滑移、颗粒变位以及颗粒破碎共同决定。3.2、6.4 MPa 法向压力条件下, 剪切体缩从剪切开始至剪切结束持续发展, 表明高压下接触剪切过程中砂砾破碎持续发生, 砂砾-钢板结构面的相互作用以砂砾破碎为主, 使得剪切过程呈现出持续的剪切体缩特征。

综合上述分析, 砂砾-钢板结构面的接触剪切特性受法向压力与结构面形貌尺度的共同影响, 其本质在于法向压力与结构面形貌尺度共同决定了砂砾-钢板结构面间的相互作用机制(相对滑动、颗粒变位、颗粒破碎 3 种作用机制中的单个或多个组合), 相互作用机制的不同在宏观上表现出不同的剪切特性。

3.2 接触面抗剪特性分析

接触面剪应力-剪位移关系受 H 、 σ 共同影响而呈现不同形式, 考虑材料剪切破坏过程的本质是材料内部出现错动摩擦^[7, 12], 本文采用统一的评价指标——剪切耗能来衡量不同条件下的接触面的抗剪特性, 剪切耗能计算能够反映不同条件下接触面剪切过程中的耗能, 计算公式为

$$W = \int_0^s \tau ds \quad (5)$$

式中: s 为剪切过程中总的剪切位移。

分别对 36 组接触面剪切试验的剪应力-剪位移曲线依据式(5)进行积分, 将得到的各组试验的剪切耗能进行整理, 如表 1 所示。

表 1 不同法向压力、不同形貌尺度条件下接触面剪切耗能
Table 1 Shear energy consumption under different H and σ

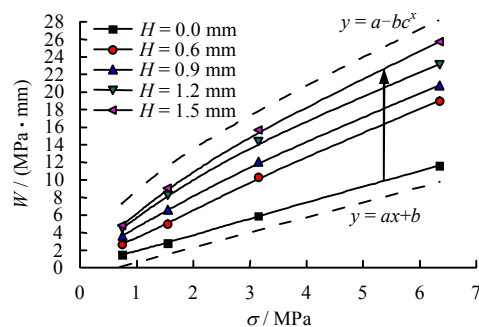
形貌尺度 H / mm	不同 σ (MPa) 下接触面剪切耗能 W / (MPa·mm)			
	0.8	1.6	3.2	6.4
0.0	1.50	2.82	5.92	11.64
0.6	2.70	5.00	10.34	19.03
0.9	3.66	6.62	12.10	20.80
1.2	4.50	8.30	14.41	23.16
1.5	4.83	9.08	15.70	25.70
2.0	4.88	8.96	15.12	25.00
3.0	4.54	8.85	14.40	23.40
4.5	4.65	8.70	14.78	23.35
6.0	4.50	8.36	14.70	23.68

图 6(a)、(b)对应不同 H 条件下接触面剪切耗能 W 与法向压力 σ 的关系。可以看出, H 为 0.0、0.6 mm

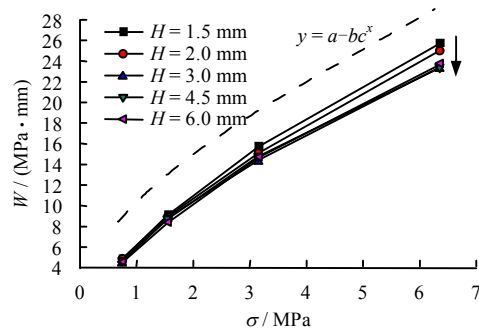
所对应的 W 随 σ 的增大呈近似线性关系, 这即是第 3.1 节中分析的在整个剪切过程中砂砾-钢板结构面的相互作用由初始的相对静止状态转变为相对滑移状态, 剪切应力主要由砂砾与钢板间的摩擦系数决定, 而接触面附近极少量的颗粒破碎对其影响较小。 H 为 0.9~6.0 mm 所对应 W - σ 趋势呈非线性特征, 由式(5)可知在法向压力为 0.8~6.4 MPa 范围内, 接触面剪应力 τ 与法向压力 σ 不再符合摩尔-库仑剪切滑移强度准则。研究表明^[11-13], 这是由于高压下产生了一定量的颗粒破碎, 此时不同法向压力下的砂砾-钢板结构面间的相互作用机制为相对滑动、颗粒变位、颗粒破碎 3 种作用机制的组合。 W 因砂砾破碎产生体缩而降低, 其与 σ 关系可用指数函数关系 $y = a - bc^x$ 进行拟合。

图 6(a)中的箭头标示出 W - σ 关系曲线随结构面 H 在 0.0~1.5 mm 的演变规律。同一法向压力条件下, W 随 H 的增大而增大, 表明 H 在 0.0~1.5 mm 范围内的变化使得砂砾-钢板间的相对滑动摩擦系数增大、颗粒变位显著, 进而使得剪切耗能增大。

图 6(b)为 H 从 1.5 mm 增至 6 mm 所对应的 W - σ 关系曲线, 随 H 增大, 曲线位置呈下降趋势, 在 $H = 3$ mm 之后, 曲线位置相对集中不再变化, 之后 H 对剪切耗能的影响可以忽略。



(a) $H=0.0\sim1.5$ mm



(b) $H=1.5\sim6.0$ mm

图 6 不同形貌尺度条件下接触面剪切耗能-法向应力关系
Fig.6 Relationships between W and σ under different H

综合图 6 中 W - σ 关系曲线的演变规律, 可以将 $H = 1.5, 3.0$ mm 作为 W 随 H 变化的参考形貌尺度, 3.4 节中将详细讨论。

3.3 剪切体变特性分析

为分析不同形貌尺度结构面的接触面剪切体变特性受法向压力的影响, 对剪切试验结束后 (即剪切位移 8 mm) 的相对竖向位移进行分析, 此竖向位移可以反映剪切位移 8 mm 时的法向压力做功 $w = \sigma \Delta h$ 。表 2 中为不同试验条件下, 剪切位移 8 mm 所对应的相对竖向位移。

表 2 不同法向压力、不同形貌尺度条件下相对竖向位移
Table 2 Relative vertical displacements under different H and σ

形貌尺度 H / mm	不同 σ (MPa) 下相对竖向位移 Δh /mm			
	0.8	1.6	3.2	6.4
0.0	-0.02	-0.046	-0.07	-0.16
0.6	-0.01	-0.029	-0.16	-0.78
0.9	0.10	-0.013	-0.31	-0.96
1.2	0.24	-0.028	-0.53	-1.27
1.5	0.35	0.060	-0.42	-1.14
2.0	0.31	0.088	-0.47	-1.10
3.0	0.20	-0.011	-0.51	-1.07
4.5	0.15	0.005	-0.54	-1.20
6.0	0.20	-0.076	-0.45	-1.26

图 7 为砂砾与不同形貌尺度结构面接触剪切位移 8 mm 的相对竖向位移与法向压力的关系曲线。不同 H 下的相对竖向位移量 Δh 随 σ 增大而减小, 即法向压力的增大使得体胀趋势受到削弱, Δh 与 σ 呈非线性衰减关系。

图 7(a) 中箭头标示出 $H = 0.0 \sim 1.2$ mm 接触剪切试验的 Δh - σ 关系曲线演变规律, 表明剪切体变特性受形貌尺度影响显著。法向压力 1.5~2.2 MPa 作为一个“分水岭”, 法向压力在此之前, 相对竖向位移随 H 增大而增大; 而法向压力在“分水岭”之后, 相对竖向位移则随 H 增大而减小。“分水岭”的产生机制是: 在中压条件下, 砂砾-钢板结构面的相互作用机制随形貌尺度的增大, 由相对滑移转向颗粒变位, 进而产生一定的体胀使得竖向位移增大; 而在高压条件下, 随形貌尺度的增大接触面附近颗粒破碎逐渐增多, 使得体缩逐渐增强, 竖向位移减小。

形貌尺度大于 1.2 mm 之后, Δh - σ 关系曲线出现了不明显的上抬, 如图 7(a) 中 1.5 mm 对应曲线处于 1.2 mm 对应曲线的上方。在 1.5 mm 之后, 曲线相对集中, 如图 7(b) 所示, 说明剪切体变特性受形貌尺度的影响较弱, 此时砂砾-钢板结构面的相互作用机制相对稳定, 不再随结构面形貌尺度的变化而

变化。

$H = 1.2$ mm 作为一个参考形貌尺度 (如图 7(a) 中虚线圆圈所标示), Δh 与 σ 的非线性关系由 $H < 1.2$ mm 的正指数衰减趋势向 $H > 1.2$ mm 的负指数衰减趋势转变, 图 8 给出 $H = 0.6, 1.2$ mm 条件的衰减拟合函数形式为 $y = A_1 \exp(-x/t_1) + y_0$, 对应的参数 t_1 分别为 -2.72 与 8.57。

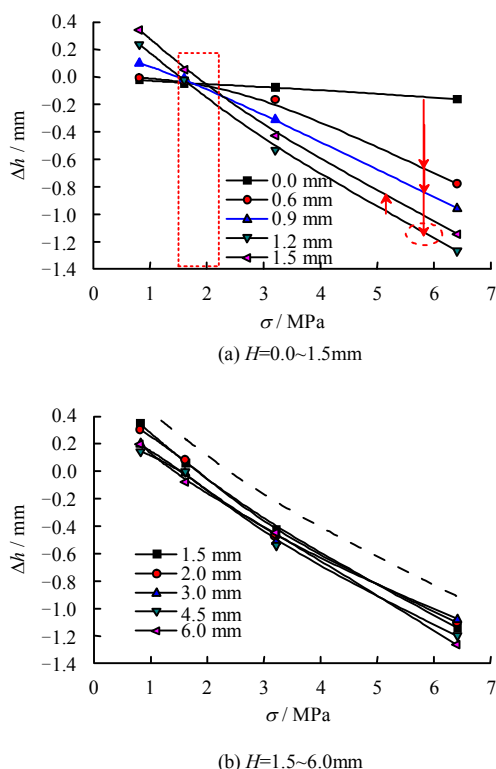


图 7 不同形貌尺度条件下 Δh - σ
Fig.7 Relationships between Δh and σ under different H

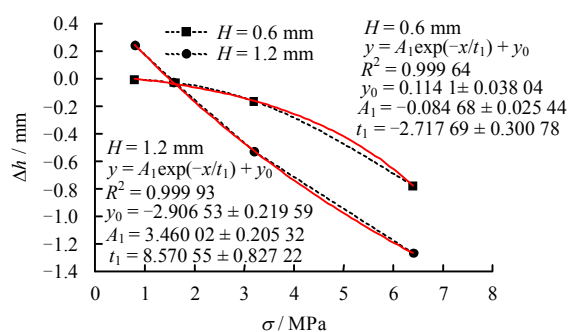


图 8 不同形貌尺度条件下 Δh - σ 拟合函数
Fig.8 The fitting functions of Δh and σ under different conditions

3.4 砂-结构面接触剪切中的峰值相对形貌尺度与稳定相对形貌尺度

由第 3.2、3.3 节中对不同形貌尺度条件下接触面剪切耗能 W 及相对竖向位移量 Δh 与法向压力 σ

关系的分析结果可以确定形貌尺度与法向压力共同影响着接触面剪切特性, 并且不同法向压力下存在相应的参考形貌尺度。为直观分析不同法向压力下形貌尺度对接触面剪切特性的影响规律, 图 9、10 给出试验获得的接触面剪切耗能以及相对竖向位移受形貌尺度的影响趋势。

图 9 表明, 同一法向压力下, 接触面剪切耗能随形貌尺度的增大首先呈近似线性增大, 在 H 约为 1.5 mm 时达到峰值点, 此时砂砾-钢板结构面的相互作用最为强烈, 接触面抗剪切性能最优; 峰值点之后, W 随 H 的增大有一定程度的减小; $H=3$ mm 时, W 达到稳定点, 之后随着 H 的增大变化不大, 呈稳定状态, 砂砾-钢板结构面的相互作用机制相对稳定, 不再随 H 的变化而变化。

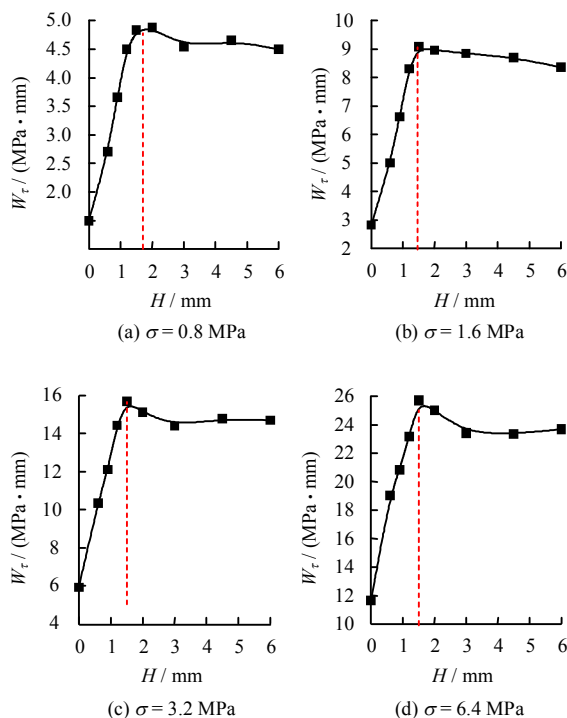


图 9 不同法向应力下接触面剪切耗能-形貌尺度关系
Fig.9 Relationships between W and H under different σ

图 10 为不同 σ 条件下, 接触面剪切位移 8 mm 时的 Δh 与 H 之间的关系。可以看出 $\Delta h-H$ 的变化规律在中压与高压下具有明显不同。在 0.8~1.6 MPa 法向压力下, Δh 随 H 增大而增大, 即 H 的增大使得中压下的剪胀更为显著, 在 $H=1.5$ mm 左右达到峰值点 (图中虚线方框 a 标示), 这与对图 9 的分析结论相对应, 此时砂砾-钢板结构面的相互作用最为强烈, 剪胀最为显著, 接触面抗剪切性能最优; 峰值点后, Δh 随 H 的增大有一定程度的减小; $H=$

3 mm 左右时 (图中虚线方框 b 标示), Δh 达到稳定点, 之后随着 H 的增大呈微小变化, 幅值较小。在 3.2~6.4 MPa 的法向压力下, Δh 随 H 增大而降低, 即 H 的增大使得高压下的剪缩更为显著, 在 $H=1.2$ mm 左右达到峰值点 (图中虚线方框 c 标示), 这是由于 H 的增大增强了砂砾-钢板间的相互作用, 接触剪切过程中的颗粒破碎程度加大, 使得剪切体缩明显; 峰值点后, Δh 随 H 的增大有一定程度的增大; $H=2$ mm 左右时 (图中虚线方框 d 标示), Δh 达到稳定点, 之后仅有微小变化, 幅值较小, 此时砂砾-钢板结构面的相互作用机制不再变化。

Subba 等^[20]及 Hammoud 等^[21]通过大量试验研究发现, 土-结构接触剪切特性由结构表面轮廓平均超高量值 R_a 与土颗粒平均粒径 D_{av} 的比值决定。

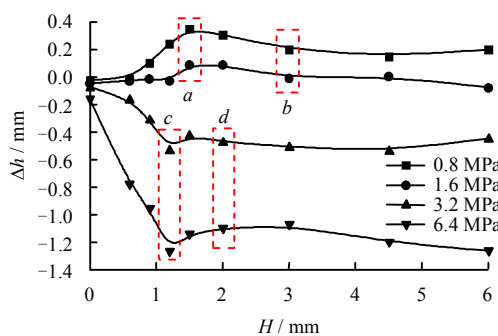


图 10 不同法向压力下相对竖向位移-形貌尺度关系
Fig.10 Relationships between Δh and H under different σ

图 11 中两种接触剪切模型按照 Subba 等^[20]的观点分析, 由于结构面轮廓尺度与颗粒尺度的比值相同而具有了自相似的特征, 因此, 两者的相互作用机制在未出现颗粒破碎的条件下相同。与 Subba 等^[20]的提法相同, 这里定义结构面的形貌尺度与砂砾平均粒径的比值作为“相对形貌尺度”概念, 即 $R = H/d_{50}$ 。结合相对形貌尺度概念及前文所述接触面剪切特性受形貌尺度的影响规律, 分析获得中、高压下针对抗剪切特性与剪切体变特性的峰值相对形貌尺度 $R_{\max}$ 与稳定相对形貌尺度 R_{st} 数值:

(1) 接触面剪切耗能随 R 的增大首先呈近似线性增大, 在相对形貌尺度约为 $H/d_{50} = 1.5$ mm/ $d_{50} = 1$ 时达到峰值点, 之后随 R 的增大有一定程度的减小, 在 R 达到 $H/d_{50} = 3$ mm/ $d_{50} = 2$ 后, 接触面剪切耗能达到稳定点, 不再随 H 的增大而变化。相应的 $R_{\max} = 1$, $R_{st} = 2$ 。

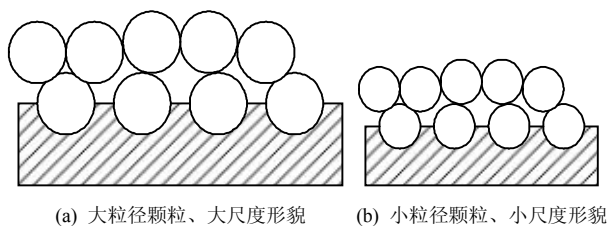


图 11 具有相同形貌尺度的剪切模型

Fig.11 Shearing models with the same relative scale

(2) 接触面 8 mm 的剪切相对竖向位移随 R 的变化规律在中压与高压下明显不同: ①中压下, R 的增大首先使得剪胀明显, 表现为相对竖向位移变大, 在 $H/d_{50} = 1.5 \text{ mm}/d_{50} = 1$ 左右达到峰值点, 之后有一定程度的减小; 相对形貌尺度达到 $H/d_{50} = 3 \text{ mm}/d_{50} = 2$ 之后, 相对竖向位移随 R 的增大呈微小变化, 幅值较小。相应的 $R_{\max} = 1$, $R_{\text{st}} = 2$ 。②高压下, R 的增大使得剪缩更为显著, 相对竖向位移变小, 在 $H/d_{50} = 1.2 \text{ mm}/d_{50} = 0.8$ 左右达到剪缩特征的谷值点 (文章针对形貌尺度的概念, 亦将其称为峰值点), 之后有一定程度的增大; 在 $H/d_{50} = 2 \text{ mm}/d_{50} = 1.3$ 后, R 达到稳定点, 之后随着 H 的增大呈微小变化。相应的 $R_{\max} = 0.8$, $R_{\text{st}} = 1.3$ 。高压较中压条件下 $R_{\max}$ 与 R_{st} 均减小, 初步分析是由于高压下的砂砾破碎使得试样实际平均粒径 d_{50} 略小于 1.5 mm, H 略小于 1.5 mm 与 3 mm 即可获得 $R_{\max}$ 与 R_{st} , 于是按本文方法计算得到的 $R_{\max} = H/1.5 \text{ mm} < 1$, $R_{\text{st}} = H/1.5 \text{ mm} < 2$ 。

引入相对形貌尺度概念, 初步说明结构表面轮廓尺度与土颗粒平均粒径共同决定粗粒土-结构面的相互作用机制, 获得的初步结果对进一步研究深基础、暗挖与挡土墙等岩土问题中的土-结构接触面相互作用机制以及探究受材料尺度与结构尺度共同影响的结构面相对粗糙度提供新的思路, 并可借此研究粗糙度小波分析^[22-23]中过滤阈值范围的问题。峰值相对形貌尺度与稳定相对形貌尺度概念为合理、有针对性地提高或降低土体与结构间的相互作用强度提供了参考。

由于本文试验采用单一粒组石英砂砾及相同形状因子与材料性质的结构面, 所得结果在量值上不具普遍性, 但所得趋势是确定的, 具有一定参考性。本文仍有以下几点需要说明: (1) 对于粗糙度^[20]的定义, 目前基本针对表面轮廓单一、形状规则的结构面。为了更为深入地认识岩土结构表面, 下一步需要提出更为合理的方法对表面轮廓复杂的结构面粗糙度进行定义。(2) 本文结论中的中压、高压是一种相对概念, 受不同土性、不同粒径级配及不

同结构面材料等影响。对中压、高压的界定需要依照土体材料的力学性质, 一般以剪切过程中砂砾试样出现明显破碎的法向压力作为高压范围, 出现少量破碎的法向压力作为中压范围。(3) 得到的 $R_{\max}$ 与 R_{st} 量值仅针对本文试验材料与边界条件, 对于粗粒土与其他不同性质结构面相互作用问题, 因受边界及材料特性的影响需另行研究确定。(4) 本文仅针对粗粒土材料进行了研究, 对于细粒土材料, 由于细粒土内部结构为非单粒结构, 如黏土中的絮凝结构、蜂窝结构等, 造成土颗粒与结构相互作用机制发生质的改变, 因此, 对这种机制的研究仍有大量工作待开展。

4 结 论

(1) 粗粒土-结构接触面剪切特性受法向压力以及结构面形貌尺度共同影响。剪应力-剪位移曲线形态随形貌尺度 H 、法向压力 σ 的改变而呈不同形式。接触面剪切体变特性, 即 8 mm 的剪切相对竖向位移与剪切位移的关系曲线随 H 、 σ 的改变亦呈不同形式, 不同 H 与 σ 条件下分别存在相应的剪胀或剪缩特征。 σ 与结构面 H 对接触面剪切特性影响的本质在于两者共同决定了砂砾-钢板结构面间的相互作用机制 (相对滑动、颗粒变位、颗粒破碎 3 种作用机制中的单个或多个组合)。因相互作用机制的不同, 接触剪切特性在宏观上有不同的表现。

(2) 砂土与不同形貌尺度结构面的接触面抗剪与剪切体变特性受砂土平均粒径与结构面形貌尺度的比值 $R = H/d_{50}$ 的影响, 在中压及高压条件下分别存在相应的峰值相对形貌尺度 $R_{\max}$ 与稳定相对形貌尺度 R_{st} 。 $R_{\max}$ 与 R_{st} 概念对于进一步研究受材料尺度与结构尺度共同影响的结构面相对粗糙度以及岩土工程中的土-结构接触面相互作用机制问题提供新的思路, 也给工程中合理、有针对性地提高或降低土体与结构间的相互作用强度提供参考。由于物理试验均在一定的边界条件下完成, 故所得结果只在一定条件下成立, 对于实际工程中的土-结构相互作用问题需要有针对性地借鉴本文的方法进行研究, 以获得更为普遍的规律。

参 考 文 献

- [1] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. *Geotechnique*, 1961, 11(4): 339-353.
- [2] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. *Journal of the Soil*

- Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1971, 97(12): 1657—1672.
- [3] BRANDT J R. Behavior of soil-concrete interfaces[D]. Edmonton: University of Alberta, 1985.
- [4] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 6(3): 14—22.
YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 6(3): 14—22.
- [5] 胡黎明, 濮家骊. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431—435.
HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 431—435.
- [6] 胡黎明, 马杰, 张丙印. 直剪试验中接触面渐进破坏的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(6): 943—946.
HU Li-ming, MA Jie, ZHANG Bing-yin. Numerical simulation of interface failure during direct shear tests[J]. **Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)**, 2008, 48(6): 943—946.
- [7] 胡黎明, 马杰, 张丙印. 散粒体间接接触面单剪试验及数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2319—2322.
HU Li-ming, MA Jie, ZHANG Bing-yin. Simple shear test and numerical simulation of interfaces between granular materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2319—2322.
- [8] 张嘎, 张建民, 梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 903—907.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, LIANG Dong-fang. Measurement of soil particle movement in soil-structure interface test[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 903—907.
- [9] 周健, 王家全, 孔祥利. 砂土颗粒与土工合成材料接触界面细观研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 61—67.
ZHOU Jian, WANG Jia-quan, KONG Xiang-li. Microscopic study of the interface between sandy soil and geosynthetics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 61—67.
- [10] 李邵军, 孟凡震, 陈静. 土与结构相互作用的可视化剪切试验装置研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 180—188.
LI Shao-jun, MENG Fan-zhen, CHEN Jing. Development of shear test device with interface visualization for soil-structure interaction and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 180—188.
- [11] 周国庆, 夏红春, 赵光思. 深部土-结构接触面与界面层力学特性的直接剪切试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1157—1162.
ZHOU Guo-qing, XIA Hong-chun, ZHAO Guang-si. Direct shear experiment of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(10): 1157—1162.
- [12] 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 & Technology**, 2010, 39(6): 831—836.
- [13] 刘希亮, 于广云, 赵光思. 高压下界面抗剪强度的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1): 34—37.
LIU Xi-liang, YU Guang-yun, ZHAO Guang-si. Experimental research on shear strength of interface under high pressure[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2003, 32(1): 34—37.
- [14] 葛世荣. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 73—80.
GE Shi-rong. The fractal behavior and fractal characterization of rough surfaces[J]. **Tribology**, 1997, 17(1): 73—80.
- [15] 谢和平. 分形——岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [16] 王金安, 谢和平, KWASNIEWSKI M A. 剪切过程中岩石节理粗糙度分形演化及力学特征[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 2—9.
WAGN Jin-an, XIE He-ping, KWASNIEWSKI M A. Fractal evolution of surface roughness and mechanical behavior of joints under shearing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(4): 2—9.
- [17] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [18] 易成, 王长军, 张亮, 等. 基于两体相互作用问题的粗糙表面形貌描述指标系统的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2481—2492.