

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.037



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



透明砂土-结构接触面剪切力学特性试验研究

蒋正旺, 周航, 李运舟, 刘良禧

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 针对传统土工试验难以直接观测土-结构接触面内部细观变形的局限, 基于全自动透明土直剪仪与数字图像相关(DIC)技术, 系统开展多因素耦合下的透明砂土-钢结构接触面直剪试验, 全面探讨法向应力、相对密实度、颗粒级配及相对粗糙度对宏观界面剪切行为与细观位移场演化的影响规律。结果表明: 相对密实度主导接触面由应变硬化向应变软化模式的转变, 高法向应力迫使颗粒从斜向翻越转变为水平滑移, 抑制了密砂的剪胀特性; 颗粒不均匀系数的增大增强了细观咬合作用, 促使级配良好的砂土发生整体抬升, 具备更高的界面峰值强度和更剧烈的剪胀位移场; 证实了接触面临界粗糙度阈值($R_{cr} \approx 1.43$)的存在, 超越该阈值后, 剪切破坏面转移至土体内部, 界面的残余抗剪强度、最大剪胀量及剪切带厚度均趋于收敛并保持相对稳定。

关键词: 土-结构接触面; 透明砂土; 界面直剪试验; 数字图像相关(DIC)

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-16

Experimental study on shear mechanical properties of transparent sand – structure interface

JIANG Zhengwang, ZHOU Hang, LI Yunzhou, LIU Liangxi

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Addressing the limitation of traditional geotechnical tests in directly observing the internal mesoscopic deformation of soil-structure interfaces, this study systematically conducted multi-factor coupled direct shear tests on a transparent sand-steel structure interface using a fully automated transparent soil direct shear apparatus and digital image correlation (DIC) technology. The research comprehensively investigated the influences of normal stress, relative density, particle size distribution, and relative roughness on the macroscopic interface shear behavior and the evolution of the mesoscopic displacement field. The results indicate that: (1) relative density governs the transition of the interface from a strain-hardening to a strain-softening mode, while high normal stress forces particles to shift from oblique over-riding to horizontal sliding, thereby suppressing the dilatancy characteristics of dense sand; (2) an increase in the coefficient of uniformity enhances the mesoscopic interlocking effect, causing well-graded sand to undergo overall uplift, which leads to higher peak interface strength and a more intense dilatant displacement field; (3) the experiment confirms the existence of a critical

收稿日期: 2026-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(52278330); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(L2024G013)

作者简介: 蒋正旺(1998-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: 894489297@qq.com。

周航(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zh4412517@163.com。

Received: 2026-02-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52278330); the Science and Technology Research and Development Program of China State Railway Group Co., Ltd. (No. L2024G013).

Author brief: JIANG Zhengwang (1998-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 894489297@qq.com.

ZHOU Hang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zh4412517@163.com.

interface roughness threshold ($R_{cr} \approx 1.43$). Beyond this threshold, the shear failure surface shifts into the soil mass, and the residual shear strength, maximum dilatancy, and shear band thickness of the interface all tend to converge and remain relatively stable. This study provides a novel experimental approach for exploring the mechanisms of soil-structure interactions.

Keywords: soil-structure interface; transparent sand; interface direct shear test; digital image correlation (DIC)

土体与工程结构之间的相互作用主要通过接触面传递,其界面力学行为在深基础、挡土墙、顶管及隧道工程等众多土木工程领域中扮演着至关重要的角色。在土体与结构发生相对错动的剪切过程中,结构表面附近的土体会产生强烈的剪切变形与体积应变,随着内部土颗粒的翻滚、滑移及重新排列,接触面附近逐渐发生应变局部化,并最终演化为剪切带^[1]。由此可见,细观层面上土颗粒的运动模式决定了宏观土体的界面剪切破坏模式。因此,在剪切过程中精准捕捉土体内部颗粒的运动特征与演化规律显得尤为重要。然而,传统的土工试验技术多局限于观测土-结构接触面的整体宏观力学响应,难以有效观测剪切过程中土体内部的颗粒相互作用与细观变形机理。

围绕接触面的剪切力学特性,学者已开展了大量研究。在宏观试验与机理探讨方面,Han等^[2]、Wang等^[3]系统探讨了表面粗糙度、颗粒几何特征和级配对界面摩擦角及剪胀效应的影响规律。Sun等^[4]进一步从多尺度层面揭示了深部地下空间中砂土-钢结构界面的复杂力学行为。为探究局部变形特征,Tejchman等^[5]、胡黎明等^[6]以及DeJong等^[7]借助X射线、数字照相及PIV等可视化技术观测了接触面附近的应变局部化现象,证实了接触面临界相对粗糙度 R_{cr} 的存在^[8]。近年来,学者在研究中引入了数字图像相关(DIC)等先进光学测量技术,以深化对界面剪切带微观行为及复杂应力下界面力学特性的理解^[9-10]。

尽管可视化技术不断进步,但传统天然土体试验仍难以突破不透明的黑箱限制。鉴于此,透明土技术与DIC方法的结合成为了实现内部全场无损观测的有效途径。自Sadek^[11]及Ezzein等^[12]研发并优化透明砂土材料以来,孔纲强等^[13-14]、高岳等^[15]及王文国^[16]通过系列三轴与直剪试验,系统论证了熔融石英砂/玻璃砂透明土在宏观变形与强度特征上替代天然砂土的可靠性。随着透明土可视化技术的发展,其已向更深层次拓展。例如,Yu等^[17]利用透明土试验从微观角度探究了土-结构界面对均粒土渗流特性的影响;Tong等^[18]则将光学切片与三维DIC结合,实现了透明土内部全场三维变形的高精度测量;透明土技术还被广泛应用于水力侵蚀和复

杂基础破坏机制的量化评估中^[19-20]。此外,Li等^[21]基于亚塑性本构模型等理论严密确证了透明土与天然砂的物理力学相似性。

近年来,尽管离散元数值模拟被广泛应用于细观机理研究中^[22-24],但其参数的标定往往依赖于经验。同时,新兴的三维透明土技术虽然实现了空间拓展^[18],但受到扫描频率与景深的局限,难以以高分辨率清晰捕捉单颗粒的瞬态翻转与运动轨迹。鉴于此,高分辨率的二维激光切片物理试验仍具有不可替代的优势。该方法不仅能规避侧壁边界效应,更能为DEM数值模拟提供未经简化且精确至亚像素级的基准数据。目前,关于透明土-结构接触面的研究仍存在局限,尤其是利用高精度的物理试验揭示接触面宏观力学响应与细观颗粒运动学机制之间的对应关系。笔者利用全自动透明土直剪仪,将透明土技术与DIC技术相结合,系统开展透明砂土-结构接触面的直剪试验,以探明多因素(相对密度、法向应力、颗粒级配及表面粗糙度)影响下,接触面剪切行为的宏观力学响应与细观变形演化规律。通过在剪切全过程中实时、同步获取宏观剪切应力数据与内部颗粒位移场,直观揭示土体宏观剪切特征与细观颗粒运动轨迹之间的内在联系。

1 透明砂土界面直剪试验

1.1 试验仪器

基于图1所示的全自动透明土直剪仪结合光学测量设备研究土体的界面剪切行为。用于填充土样的上剪切盒由亚克力材料和钢力臂组成,内尺寸为60 mm×60 mm×60 mm,可实现土体可视化,下剪切盒用于装配具有不同粗糙度的钢结构界面。在宏观力学数据采集方面,该全自动直剪仪系统配备了高精度的荷重传感器与位移计,能通过计算机控制软件,在剪切全过程中实时、自动监测并记录法向应力、剪切应力、水平剪切位移以及垂直体积变形(剪胀/剪缩量)等数据。同时,在细观变形观测方面,配备透明土试验所需的连续片状激光器和CCD相机,以实现全剪切过程中的土体内部变形场进行非侵入式测量。

1.2 图像采集与处理方法

将透明土激光制斑技术与DIC方法相结合,进

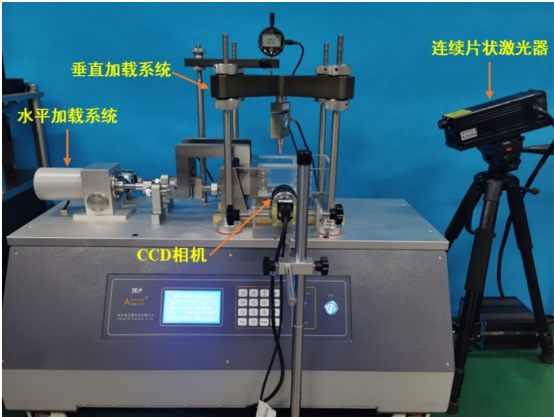


图 1 全自动透明土直剪仪

Fig.1 Fully automated transparent soil direct shear apparatus

行非侵入式全场应变分析。采用 MV-HS1200GC CMOS 相机配备 BT-MPX 系列 C 端口 5 兆像素工业镜头,焦距 12.5 mm,以每秒 1 张的速度进行图像拍摄(该拍摄频率能够确保相邻图像间的变形满足 DIC 算法的连续性要求,有效避免了散斑场失去相关性),图像尺寸为 4112 px×3008 px。同时采用波长 532 nm、功率 3W 的激光进行照射制斑。如表 1 所示,拍摄得到的图片采用开源 2D DIC 软件 Ncorr^[25]进行处理,分析参数为单参考图像,图像比例为 0.04 mm/px,子集半径为 40~60 px,并采用连续子集以确保空间分辨率最大化,处理采用的是连续执行,即 1 个线程。

表 1 散斑场分析 DIC 计算参数表

Table 1 DIC calculation parameters for speckle pattern analysis

DIC 参数	数值/方法
计算软件平台	Ncorr(version 1. 2. 2)
参考图像模式	单一参考图
空间物理标定比例尺	0.04 mm/px
子区半径	40~60px
子区步长	0px(连续子区计算)
迭代收敛阈值	1×10 ⁻⁶
最大迭代次数	50
线程设置	1(串行处理)
应变计算法则	拉格朗日有限应变

1.3 试验材料

透明土作为一种基于折射率匹配原理的人工可视化材料,通过将固体骨架和与之折射率一致的孔隙液相混合配制而成。选用熔融石英砂作为透明砂土的固体骨架,并采用 15 号白油与正十二烷的混合溶液作为孔隙液体。按 15 号白油与正十二烷的质量比约 4:1 进行配制,使混合孔隙液的折射率严格匹配至 1.458 5(配制过程中采用阿贝折射仪实

时监测,确保混合液在试验室温下折射率严格达到 1.458 5,即室温下熔融石英砂的折射率)。最终配制完成的透明砂土试样具有良好的可视性,如图 2 所示。

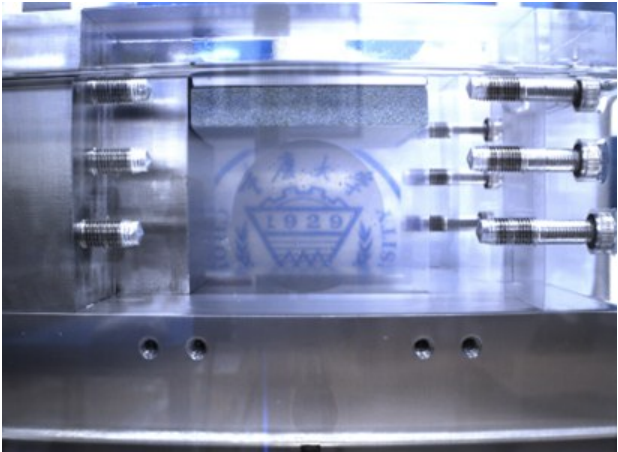


图 2 透明砂土试样

Fig.2 Transparent Sand Specimen

表 2 总结了采用的福建标准砂(FSS)与 9 种级配透明砂土(TS)的物理参数。其中,TS-1 与 FSS-1 具有相同的粒径级配,即 D_{50} 、不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ,将 TS-1 用于模拟天然砂 FSS-1,其最大最小孔隙率和 AR 的细微差别是颗粒形状的细微差异导致的。TS-2 到 TS-9 则用于对比不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 对剪切行为的影响。需要特别说明的是,由于熔融石英砂(TS)的制备经过了人工破碎,相比于天然福建标准砂(FSS),其颗粒棱角往往更为明显。这种形貌特征的差异可能导致透明砂土在剪切过程中表现出略高的峰值抗剪强度和内摩擦角。然而,大量研究证实,由熔融石英砂配制的透明土在静、动力学特性及剪胀行为上均能高度还原天然砂土^[13-15,21,26]。因此,以 TS-1 作为 FSS-1 的物理等效材料,其核心目的并非关注微小数值差

表 2 熔融石英砂与福建标准砂的物理参数

Table 2 Physical parameters of fused silica sand and Fujian standard sand

砂土类型	G_s	D_{50}/mm	C_u	C_c	$e_{\min}$	$e_{\max}$	AR
TS-1	2.24	0.70	5.84	1.24	0.40	0.76	1.81
TS-2	2.24	0.85	4.00	1.5	0.37	0.80	2.07
TS-3	2.24	1.30	6.00	1.5	0.34	0.80	1.94
TS-4	2.24	1.63	8.00	1.5	0.29	0.83	1.74
TS-5	2.24	1.95	10.0	1.5	0.30	0.84	1.99
TS-6	2.24	1.30	8.00	0.5	0.30	0.78	1.96
TS-7	2.24	1.44	8.00	1.0	0.31	0.81	1.70
TS-8	2.24	1.63	8.00	3.0	0.34	0.86	1.83
TS-9	2.24	1.65	8.00	4.0	0.34	0.86	2.08
FSS-1	2.70	0.70	5.84	1.24	0.38	0.74	1.41

异,而是借由透明土无损可视化的独特优势,重点揭示多因素耦合影响下土-结构界面剪切行为演化的物理规律与细观运动学机制,其揭示的宏细观联系对天然砂土体系同样具有适用性与工程指导价值。

图3所示为福建标准砂和透明砂土的粒径级配分布,8种不同的颗粒级配确保了模拟不同粒径条件下砂土-钢结构界面剪切行为的可靠度。

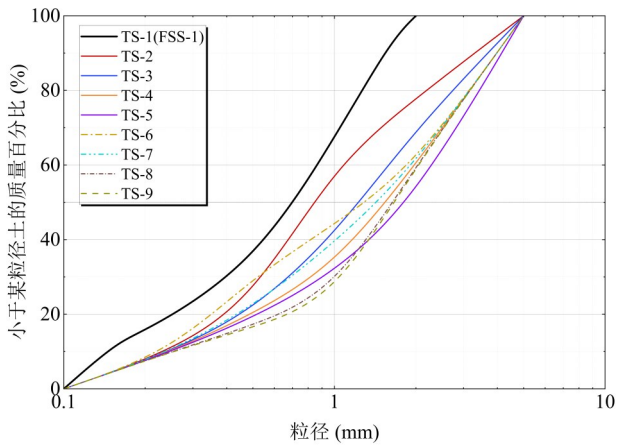


图3 九种熔融石英砂与福建标准砂的颗粒级配

Fig.3 Particle size distribution of nine fused silica sands and Fujian standard sand

1.4 结构接触面

结构接触面通过几何形状分为随机型和规则型。

如图4所示,试验采用规则型接触面^[27],通过仪器加工得到8个不同粗糙度水平的锯齿钢结构界面,控制其锯齿角度均为90°,凹槽深度 R_a 分别为0、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 mm。相对粗糙度定义为 $R_n=R_a/D_{50}$,这是公认的具有普适性的定义方式^[6,28]。虽然试验采用了理想化的规则锯齿接触面以方便变量控制,但8个粗糙度全面地覆盖了从光滑到完全高度粗糙的界面纹理,涵盖甚至超出了真实工程结构的粗糙度区间。

1.5 工况设计

为了系统揭示透明砂土-结构接触面剪切行为

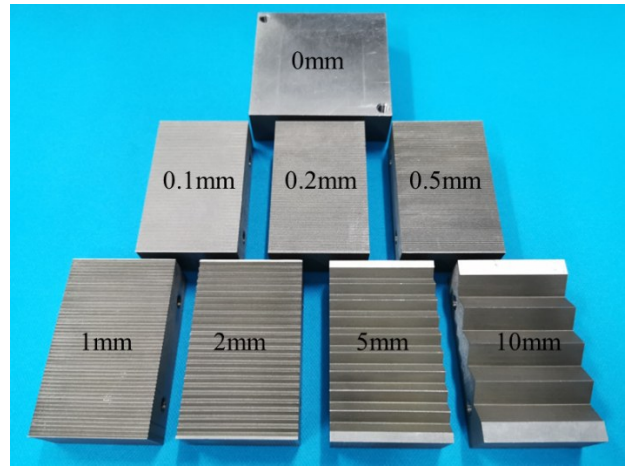


图4 不同粗糙度的钢结构接触面

Fig.4 Steel structure interfaces with different roughness

的宏细观机理,共考虑4个因素对界面剪切行为的影响,分别为相对密实度 D_r 、法向应力 σ_n 、颗粒级配和相对粗糙度 R_n 。秉持先探究应力约束、再探究内部土骨架、最后探究剪切破坏模式的三层次设计逻辑,制定了如表3所示的单因素控制试验方案。具体设计原理如下:

1)为探究外部压力对土颗粒运动自由度和剪胀空间的影响规律,法向应力 σ_n 选取10、100、200、400 kPa,模拟从浅土层到中深部地下空间土-结构界面所受的法向有效土压力范围。

2)在探明外部压力约束规律的基础上,进一步揭示颗粒级配对土颗粒咬合特性的影响,试验通过控制变量配制了9种级配(TS-1~TS-9),其中TS-1用于模拟天然砂FSS-1,TS-2~TS-5固定曲率系数 $C_c=1.5$ 探究不均匀系数 C_u (4.00~10.0)的影响,TS-6~TS-9固定不均匀系数 $C_u=8.00$ 探究曲率系数 C_c (0.5~4.0)的影响。

3)在明确土体力学属性的演化后,最后探究外部结构对土体剪切破坏模式的控制规律,绝对粗糙度 R_a 取0~10 mm(即相对粗糙度 $R_n=0\sim14.3$),涵盖从光滑到极度粗糙的宽泛区间,以精准捕捉界面剪切行为的临界收敛规律。

表3 界面直剪试验工况汇总

Table 3 Summary of the experimental program for interface direct shear tests

组别	相对密实度 $D_r/\%$	法向应力 σ_n/kPa	颗粒级配	粗糙度 R_a/mm	试验数量
1	30、55、70	10、100、200、400	TS-1	10	12
2	30、55、70	100	TS-2、TS-3、TS-4、TS-5、TS-6、TS-7、TS-8、TS-9	10	24
3	30、55、70	100	TS-1	0、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0	24

此外,每个组别均考虑3种相对密实度($D_r=30\%、55\%、70\%$),以覆盖工程中从松散至密实的砂土状态。所有工况的剪切速率均设定为0.8

mm/min。

1.6 试验步骤

采用恒法向荷载进行界面直剪试验,为确保光

学观测质量,整个试验过程的室温被严格控制在 $(26\pm 0.2)^{\circ}\text{C}$,以保证试样孔隙液体的折射率在剪切过程中保持稳定。具体的试验步骤如下。

1) 试样准备阶段:首先将钢结构接触面固定在下剪切盒内,上剪切盒放置在其上方并使用力臂和螺栓固定,随即在整个剪切盒内注入折射率为 1.458 5 的孔隙液体;然后利用水下落砂法将配制好的熔融石英砂分层填充到上剪切盒中,并均匀压实至指定的相对密实度,填土高度统一控制为 40 mm。

2) 真空饱和与固结阶段:对装样完毕的剪切盒整体进行抽真空处理约 2 h,排除土体内部气泡,使透明砂土试样达到完全饱和并呈现出清晰的可视化状态。随后,在试样顶部施加试验设定的法向应力,当计算机控制软件监测到连续 30 min 内试样的竖向压缩变化量小于 0.01 mm 时,判定固结完成。

3) 剪切与监测阶段:启动全自动剪切程序。在

剪切全过程中,上剪切盒保持固定不动,下剪切盒以指定的恒定速率向剪切方向平移。在此期间,计算机控制软件自动实时采集并记录法向应力、剪切应力及竖向位移等宏观数据;同时,CCD 相机对土体中部的激光散斑场进行连续自动拍摄。当界面剪切位移达到 9 mm 时,系统自动停止剪切,随后缓慢卸载法向应力并结束试验。

2 结果与分析

2.1 法向应力的影响

图 5 所示为不同相对密实度($D_r=30\%$ 、 55% 、 70%)与不同法向应力($\sigma_n=10$ 、 100 、 200 、 400 kPa)下,接触面的宏观界面直剪试验曲线。为便于对比,采用应力比 μ (剪应力 τ 与法向应力 σ_n 的比值)来表示界面的抗剪强度。同时,规定垂直位移 v 向下(即试样整体压缩)为正,向上(即试样整体膨胀)为负。

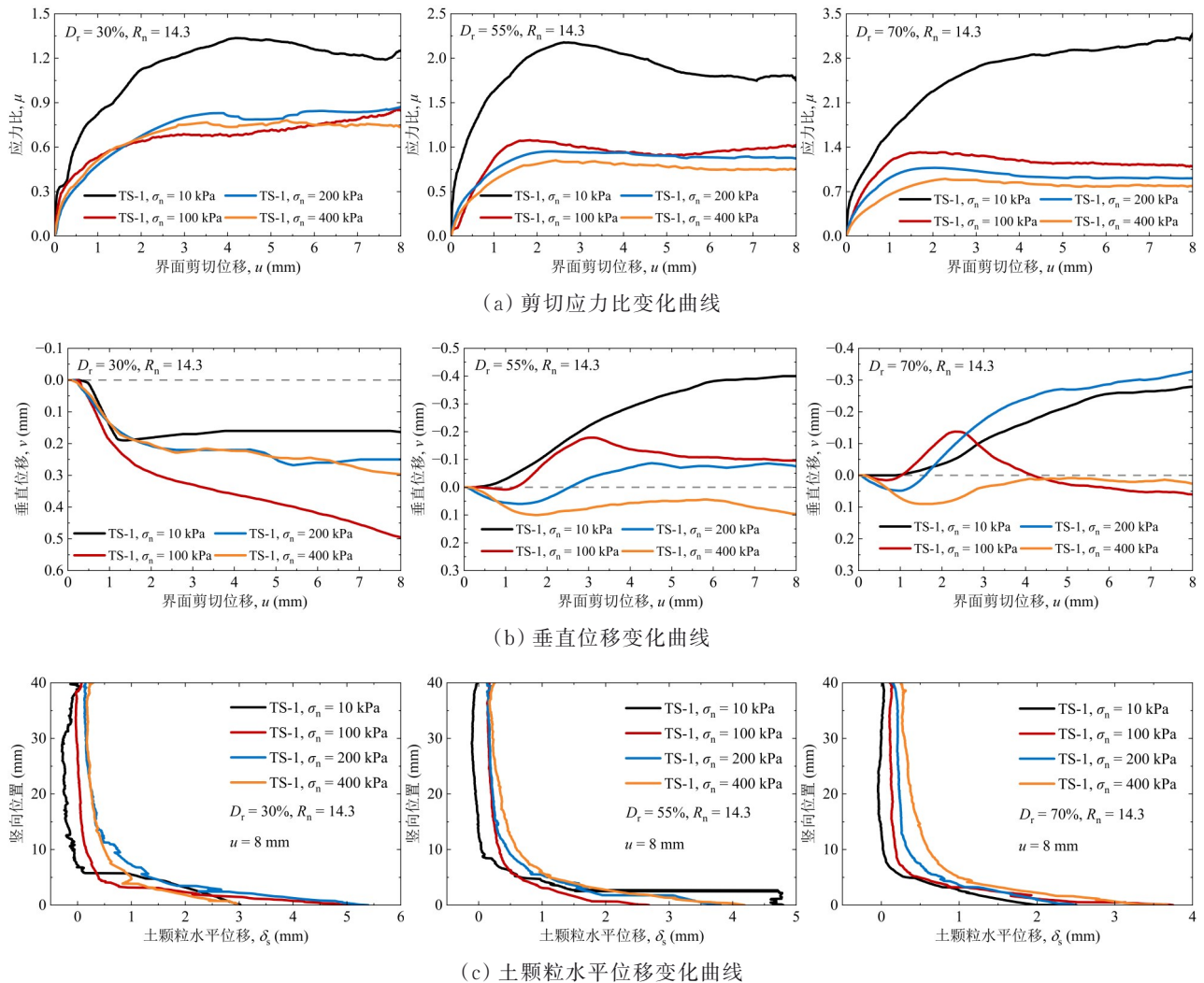


图 5 不同法向应力下界面直剪试验曲线

Fig.5 Interface direct shear test curves under different normal stresses

由图5(a)可知,界面应力比-剪切位移曲线的形态受控于砂土的初始相对密度。对于松砂试样($D_r=30\%$),在各级法向应力下,应力比曲线均呈现出典型的硬化特征:应力比 μ 随剪切位移 u 的增加单调且非线性增长,在大位移阶段逐渐趋于稳定,无明显的峰值强度出现。然而,对于中密砂($D_r=55\%$)和密砂($D_r=70\%$)试样,曲线则逐渐转变为软化型。以 $D_r=70\%$ 为例,应力比在极小的剪切位移($u<2\text{ mm}$)内迅速达到峰值,随后发生一定程度的强度衰减,最终在剪切后期($u>6\text{ mm}$)趋于稳定。此外,法向应力水平对界面的峰值应力比具有显著的影响。在极低法向应力($\sigma_n=10\text{ kPa}$)下,3种相对密度试样的应力比均表现出异常偏高的现象。这主要是由于在低围压约束下,粗糙接触面锯齿对砂土颗粒的“犁沟”与咬合作用被放大,颗粒更容易发生翻越而非滑移或破碎,从而提供了极高的表观摩擦力。随着法向应力从 100 kPa 增加至 400 kPa ,峰值应力比显著降低并逐渐收敛。这表明高法向应力限制了颗粒的自由翻滚与剪胀空间,使颗粒间的互锁效应减弱。

为了进一步量化上述界面的软硬化特征与强度演化规律,图6提取了不同工况下接触面的峰值剪切应力比 μ_p 与残余剪切应力比 μ_r 的演化曲线(需要指出的是,对于未出现明显应力跌落的硬化型曲线,统一取试验结束最大剪切位移处的应力比作为其峰值 μ_p)。由图6可知,在极低法向应力($\sigma_n=10\text{ kPa}$)下,各密度试样的应力比均异常偏高,尤其是密砂($D_r=70\%$)的 μ_p 极值高达近3.5。这表明在低围压约束下,粗糙锯齿的嵌合作用迫使颗粒发生翻越,从而产生了极高的咬合力与摩阻力。然而,随着法向应力增加至 400 kPa ,各相对密度下的

峰/残余应力比均发生骤降,并收敛至 $0.85\sim 1.0$ 的狭窄区间内。同时可以观察到,随着 σ_n 的增加,峰值与残余应力比之间的差值($\mu_p - \mu_r$)急剧缩小。这一量化特征,为高法向应力抑制接触面的软化效应提供了有力的数据支撑。

界面剪切过程伴随着土体内部颗粒的重新排列,从而在宏观上表现为体积的变化。图5(b)清晰地反映了试样体变随界面剪切位移的演化规律。松砂($D_r=30\%$)颗粒排列较为松散,在剪切错动作用下孔隙体积不断被压缩,因而在整个剪切过程中均表现为持续的垂直位移增加(即剪缩现象)。相较之下,密砂($D_r=70\%$)颗粒初始排列紧密,剪切初期伴随微弱的错动发生短暂剪缩后,颗粒必须通过越过相邻颗粒或界面锯齿才能继续滑动,从而引发明显的体积膨胀,表现出典型的先剪缩再剪胀的特征。同时,图5(b)也证实了法向应力对剪胀行为的强烈抑制作用。以 $D_r=70\%$ 为例,在 $\sigma_n=10\text{ kPa}$ 时试样在剪切后期产生了极大的负向垂直位移(即剧烈剪胀);但当法向应力提升至 400 kPa 时,高压迫使颗粒无法向上翻越,剪胀效应被抑制,试样位移曲线几乎全程维持在正值(剪缩)区域。这一宏观体变规律较好地对应了上述应力比的衰减机制。

由图5(c)的中心土剖面一维水平位移曲线可知,在界面剪切过程中,土体的变形并非均匀分布,而是呈现应变局部化特征。土颗粒的水平位移 δ_s 主要集中在紧贴钢结构接触面上方的极窄区域内,该应变局部化错动区域即为剪切带。在剪切带上方,土颗粒的水平位移迅速衰减至零,表明上覆土体基本保持为刚体平移状态,未发生明显的内部剪切破坏。随着法向应力 σ_n 的增加,界面接触更加紧密,土颗粒向土体内部传递剪应力的能力增强,导致剪切带厚度出现向上方略微扩展的趋势,且界面处颗粒的最大水平位移量也随之改变。

图7的DIC位移云图为上述剖面特征提供了直观的全场二维证据。在水平位移云图(图7(a)所示)中,位移高值区(暖色调)被严格限制在底部粗糙界面附近,形成了一条清晰可见的带状扰动区,再现了接触面拖拽邻近砂土颗粒滑动的过程。更重要的是,竖向位移云图(图7(b))从细观的角度解密了宏观体变的内在机理。可以观察到,在低法向应力、高相对密度(如 $\sigma_n=10\text{ kPa}$ 、 $D_r=70\%$)工况下,界面上方的土体大面积呈现出代表向上位移的冷色调或相应数值区间,这对应了密砂中强烈的剪胀膨胀区。相反,在高法向应力、低相对密度(如 $\sigma_n=400\text{ kPa}$ 、 $D_r=30\%$)工况下,土体内部几乎被代表向下沉降变形的区域占据,证实了高压松砂状态

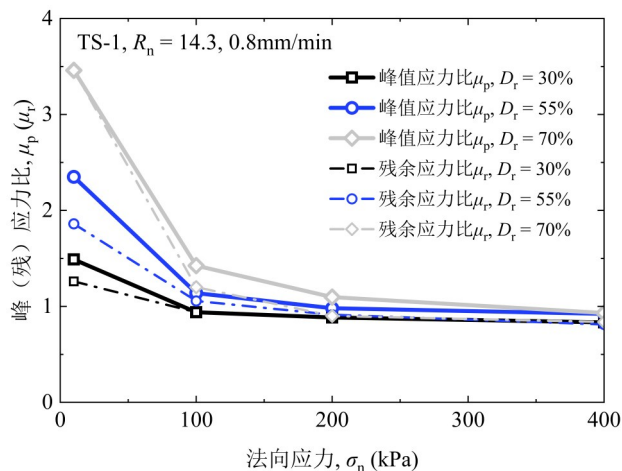


图6 峰/残剪切应力比随法向应力的演化曲线

Fig.6 Evolution curves of peak and residual shear stress ratios with normal stress

下颗粒孔隙的持续坍塌与剪缩。DIC技术揭示的局部体变集中区,为理解传统宏观力学响应提供了细观尺度支撑。

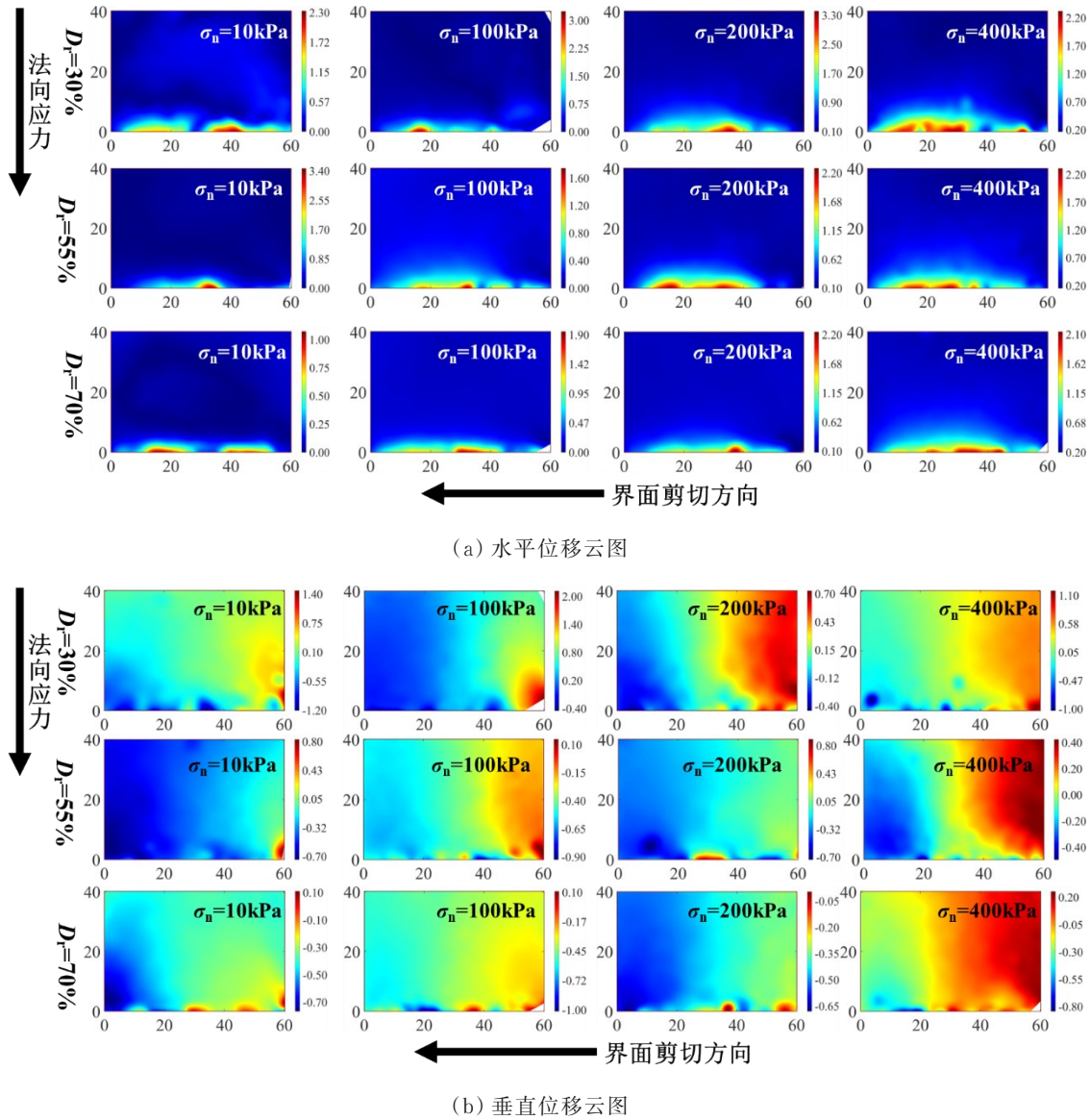


图7 不同法向应力下土体中心剖面的位移云图(单位:mm)

Fig.7 Displacement contours of the central soil profile under different normal stresses

为了从颗粒运动学视角揭示法向应力对剪切行为的调控机制,图8提取了中密($D_r=55\%$)工况下不同法向应力的颗粒位移矢量场。矢量箭头的方向与长度表示了土颗粒的运动轨迹与局部错动剧烈程度。观察矢量图可以发现,在极低法向应力($\sigma_n=10\text{ kPa}$)下,紧贴界面的底层颗粒受到下剪切盒向左的摩擦拖拽;法向压力极弱,颗粒无法通过单纯的水平滑移来抵抗剪切变形,而是被迫越过粗糙界面的锯齿,导致矢量箭头呈现出非常明显的斜向左上大角度偏转。这种土颗粒向上翻越并层层传递的运动,正是该工况下剧烈剪胀的根本原因。随着法向应力的提升,高压对颗粒运动轨迹的约束效应愈发明显。当 $\sigma_n=100\text{ kPa}$ 与 $\sigma_n=200\text{ kPa}$ 时,

底层矢量箭头的向上偏转角度逐渐减小,运动模式向贴面滑移过渡。而当法向应力达到 400 kPa 时,巨大的竖向压迫力限制了颗粒的翻越空间,底层位移矢量被强行压平为近乎水平的向左移动,且剪切带上方土体局部出现向下移动的趋势(孔隙压缩)。这一从斜向翻越到水平滑移的细观矢量演化规律,为前文所述的高法向应力抑制密砂剪胀特性提供了细观运动学证据。

2.2 颗粒级配的影响

试验选用8种不同级配的透明砂土(TS-2~TS-9),通过控制变量法分别探究了不均匀系数 C_u (TS-2~TS-5,固定曲率系数 $C_c=1.5$)与曲率系数 C_c (TS-6~TS-9,固定不均匀系数 $C_u=8.00$)的独

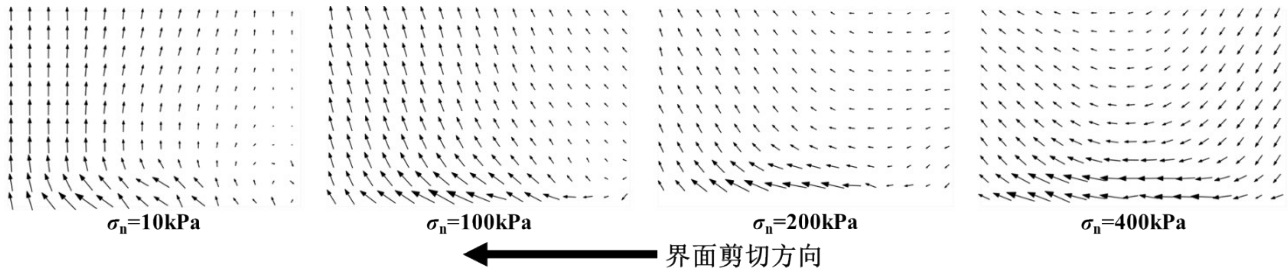


图8 不同法向应力下土体中心剖面土颗粒位移矢量场($D_r=55\%$)

Fig.8 Soil particle displacement vector fields of the central soil profile under different normal stresses ($D_r=55\%$)

立影响规律。

图9(a)展示了不同级配透明砂土在3种相对密实度($D_r=30\%$ 、 55% 、 70%)下的应力比-剪切位移曲线。与法向应力组的规律类似,相对密实度决定了曲线的基础形态:松砂呈现硬化特征,密砂呈现软化特征。在此基础上,颗粒级配对界面的抗剪强度表现出明显的调控作用。首先,当固定曲率系数 $C_c=1.5$ 时,在密砂($D_r=70\%$)状态下,随着 C_u 从

4.00(TS-2)增加至10.0(TS-5),界面的峰值应力比呈现出显著且单调的递增趋势。TS-5($C_u=10.0$)的峰值应力比远高于级配相对不良的TS-2($C_u=4.0$),这可能是因为, C_u 越大代表粒径分布越宽;在剪切过程中,不同粒径的颗粒能够形成更致密的镶嵌结构,细小颗粒填充于大颗粒的孔隙中,极大地增强了颗粒间的咬合力以及土体与粗糙界面锯齿间的摩擦阻力。

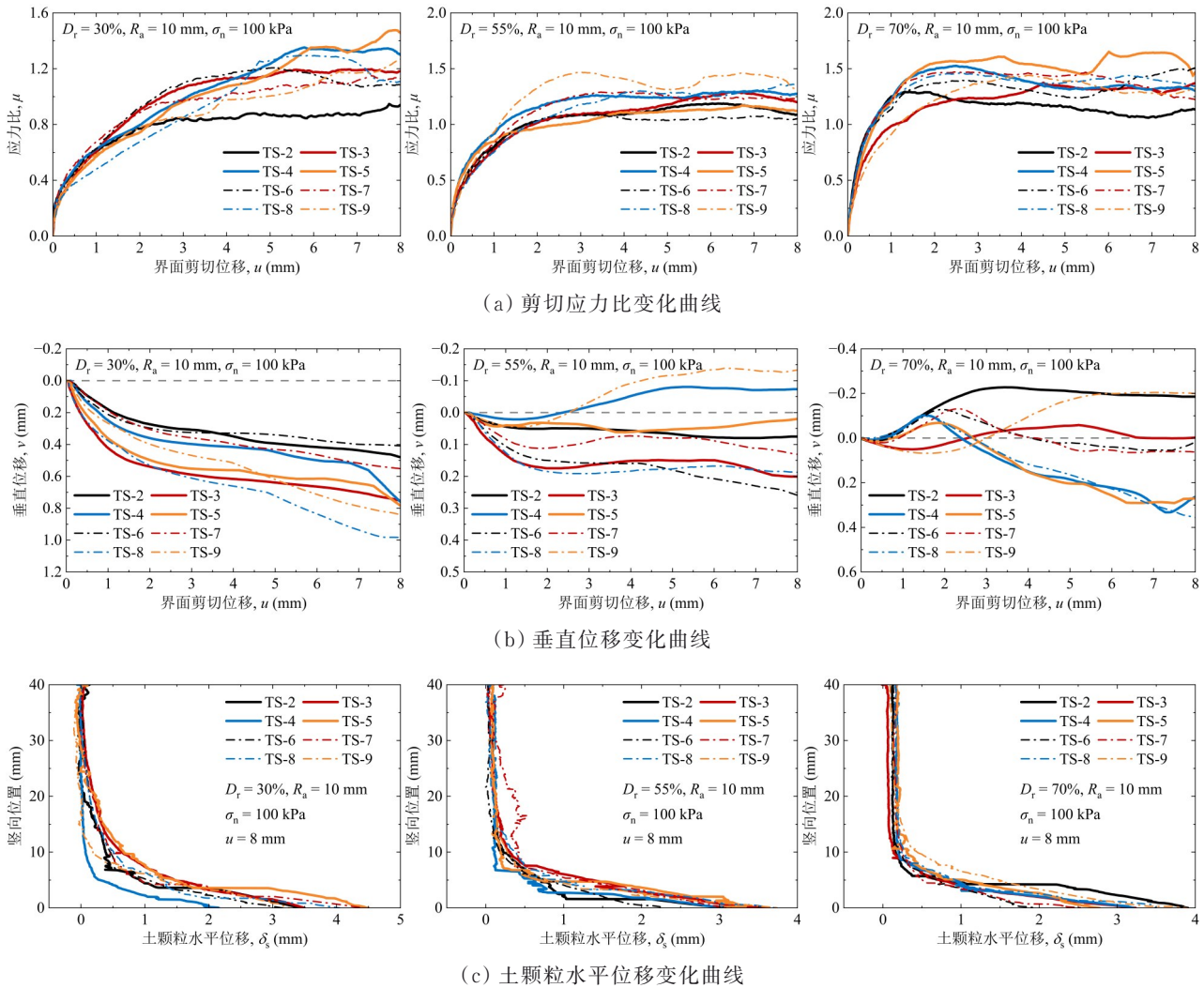


图9 不同颗粒级配下界面直剪试验曲线

Fig.9 Interface direct shear test curves under different particle size distributions

其次,曲率系数 C_c 同样对界面的宏观观剪切行为具有调控作用,这一效应在密砂($D_r=70\%$)工况下较为明显。在固定 $C_u=8.0$ 的条件下,当 C_c 处于 1~3 的良好连续级配区间(如 TS-7、TS-4 和 TS-8)时,试样表现出更高的峰值应力比和更稳定的残余强度(如图 9(a)所示)。从细观力学角度,与前面对于不均匀系数 C_u 的分析一致,良好的中间粒径分布能够使不同尺寸的颗粒之间嵌合更佳,粗大颗粒构建骨架,中、细颗粒则填充于孔隙之中,从而形成紧密的强咬合镶嵌结构。相反,当 $C_c=0.5$ (TS-6,典型的不连续或缺失中间粒径级配)或 $C_c=4.0$ (TS-9)时,细颗粒往往在粗颗粒的巨大孔隙中处于游离状态,无法有效分担法向荷载并传递剪切力,导致力链网络在剪切错动下更容易坍塌,界面的抗剪强度随之减小。

为了进一步定量分析颗粒级配对界面强度的影响,图 10(a)展示了不同相对密实度下界面峰值与残余应力比随 C_u 的演化规律(固定 $C_c=1.5$)。由图可知,在密砂($D_r=70\%$)状态下,随着 C_u 从 4.0 增加至 10.0,峰值应力比 μ_p 呈现出近乎线性的递增趋势,由 1.40 提升至 1.76。这证明了在密砂中粒径分布越宽,不同粒径颗粒间的镶嵌与咬合作用越强。此外,观察其峰残差值($\mu_p - \mu_r$)可以发现,随着 C_u 的增大,应力比的跌落程度愈发剧烈。这表明级配良好的密砂由于初始嵌固较紧,在越过峰值后的结构坍塌更突出,展现出更强的软化特征。图 10(b)则揭示了曲率系数 C_c 对界面抗剪强度的调控规律(固定 $C_u=8.0$)。曲线特征表明,当 C_c 处于 1~3 的连续级配区间时,界面抗剪强度较高。一旦 C_c 偏离该区间(如 $C_c=0.5$ 或 4.0),中间粒径缺失,土体骨架的稳定性下降,导致峰值应力比出现不同程度的衰减。对比图 10(a)与图 10(b)可以发现,相比于 C_c , C_u 对界面强度的单调提升作用更加明显,这说明粒径跨度的增加是强化界面力学性能的核心因素。

图 9(b)反映了不同级配试样垂直位移 v 随剪切位移的演化规律。在强烈的剪胀区(如 $D_r=70\%$),颗粒级配(不均匀系数 C_u 与曲率系数 C_c)对土体内部的剪胀特性均具有调控作用。首先, C_u 的影响较为显著:具有宽级配特征的 TS-5($C_u=10.0$)表现出了全组最大的负向垂直位移(即最强烈的剪胀效应),而级配最窄的 TS-2($C_u=4.0$)的剪胀量则相对较小。此外, C_c 的变化也决定了剪胀行为的强弱:良好连续级配试样(C_c 处于 1~3 区间的 TS-7、TS-8)的负向垂直位移显著大于级配不良试样(C_c 缺失或过大的 TS-6、TS-9)。综合分析可知,由级配主

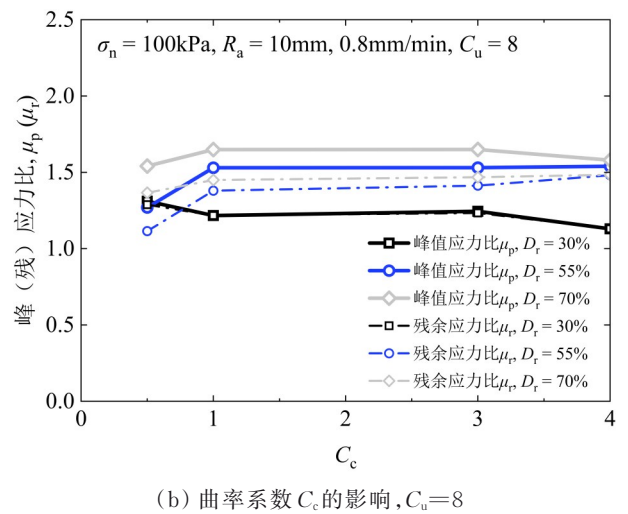
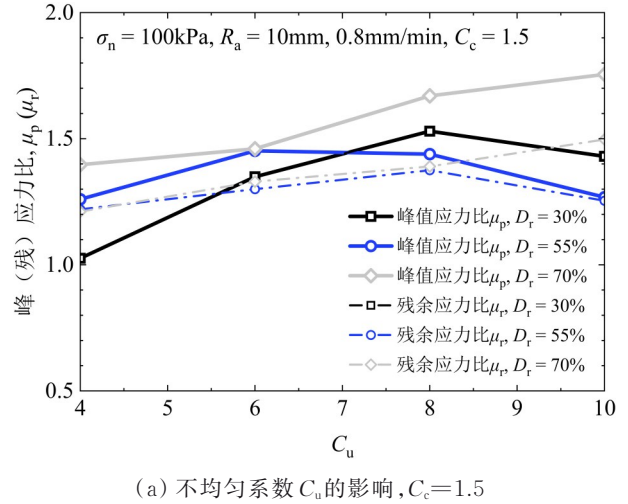


图 10 峰/残剪切应力比随颗粒级配的演化曲线

Fig.10 Evolution curves of peak and residual stress ratios with grain size distribution parameters

导的剪胀差异,其细观机理是一样的。无论是 C_u 增大引起的孔隙填充,还是 C_c 带来的土颗粒有效咬合,均使得良好级配砂土具备较高的初始密度与颗粒互锁结构。当界面发生剪切错动时,原本高度嵌合的颗粒群难以通过简单的局部骨架坍塌来抵抗剪切变形,必须发生大规模的整体向上翻越与扩容(即剧烈剪胀),才能为剪切带内的颗粒滑移提供足够的空间。相反,无论是粒径单一还是中间粒径断层的级配不良砂土的内部孔隙均较多,颗粒不仅能发生翻越,不稳定的土骨架更易发生坍塌,从而抵消了部分剪胀量。

由图 9(c)土颗粒水平位移剖面可知,无论颗粒级配如何变化,剧烈的剪切变形始终位于固定的狭窄区域内。然而,仔细观察各曲线可以发现,级配特征改变了剪切带内部的应变梯度。对于 C_u 较低的试样(如 TS-2),颗粒粒径相对单一,剪切带内的错动导致界面处的最大水平滑移量较大;而对于级配良好的试样(如 TS-5),大小颗粒的强互锁作用限

制了连续滑移面的形成,这在曲线上表现为水平位移衰减梯度的微小差异。

图 11 的水平位移云图直观反映了各级配试样剪切带的存在,且云图中高亮红色区域的厚度与图 9(c)的量化结果高度吻合。图 12 的垂直位移云图将土体内部复杂的剪缩/剪胀机制进行了全场可视化。以密砂($D_r=70\%$)工况为例,对比图 12 中不同 C_u 的子图可以发现,TS-5(宽级配)的左侧底部界面

上方呈现出代表膨胀位移的深蓝色冷色调区域,证明了其宏观上表现出的剧烈剪胀是由底边颗粒群体的整体向上翻转和抬升所致。与之形成鲜明对比的是,在松砂($D_r=30\%$)工况下,TS-2 的图幅被大面积的红色和黄色暖色调占据,表现出结构松散、颗粒均一而导致的内部大范围孔隙压缩和土骨架坍塌现象。

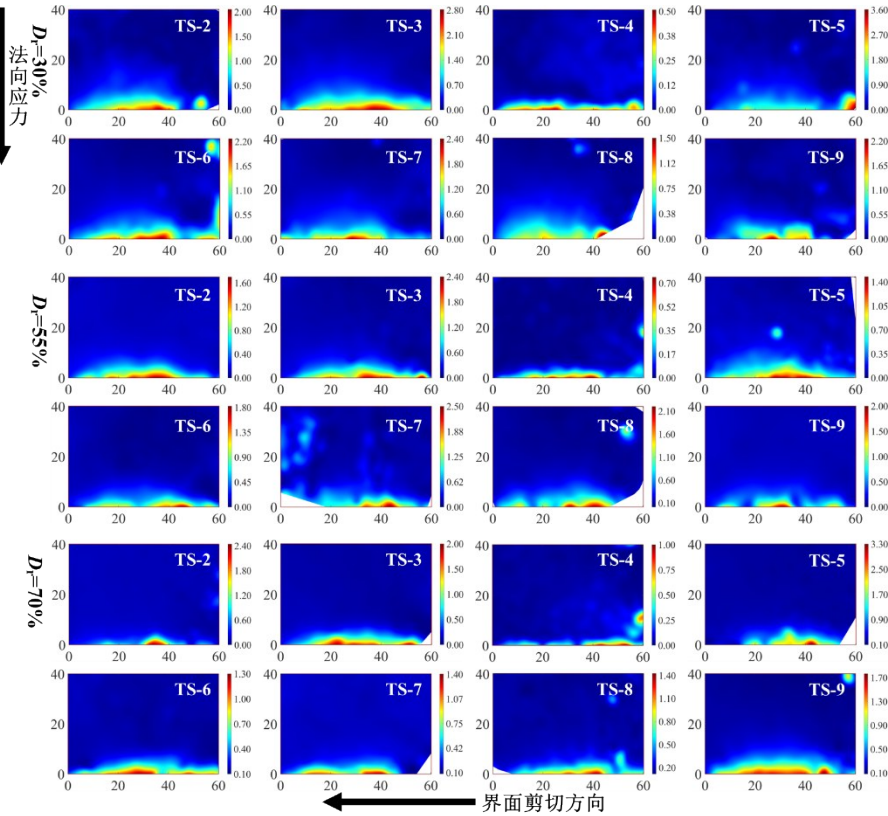


图 11 不同颗粒级配下土体中心剖面的水平位移云图(单位:mm)

Fig.11 Horizontal displacement contours of the central soil profile under different particle size distributions

图 13 提取了中密砂($D_r=55\%$)工况下 4 个典型级配的细观颗粒位移矢量场。矢量箭头直观地反映了剪切带内部不同骨架结构的变化轨迹。对比不均匀系数 C_u 的变化(TS-2、TS-4、TS-5,固定 $C_c=1.5$)可以发现,随着粒径跨度的变宽,底部颗粒的运动模式发生了转变。对于级配均一的砂土 TS-2,由于缺乏细颗粒填充,骨架咬合力弱,在下剪切盒向左的摩擦拖拽下,底层矢量主要呈水平向错动,且上方大面积土体出现了向下指引的矢量箭头(即土骨架坍塌),宏观剪胀量极小。而随着 C_u 增至 10.0(TS-5),丰富的各粒径颗粒形成了致密的强咬合镶嵌结构。在向左剪切时,底层颗粒无法轻易滑移,被迫产生大角度的斜向左上翻越运动,并带动土骨架结构发生明显的群体抬升。这种斜向翻越颗粒群,从颗粒运动学角度证明了级配良好的密砂具有更高的抗剪强度和更剧烈的剪胀。对比曲率

系数 C_c 的差异(TS-4 与 TS-6,固定 $C_u=8.0$)可以发现,良好连续级配的 TS-4 矢量排布具有极好的连续性与整体翻越趋势;相反,缺失中间粒径的不良级配 TS-6($C_c=0.5$),其矢量场在空间分布上显得相对紊乱。由于部分细颗粒游离在粗大孔隙中无法形成有效骨架结构,TS-6 内部向斜上方抬升的颗粒较少,甚至在局部薄弱区出现了向下的崩塌。这从细观力学角度表明,中间粒径的缺失会导致力链网络在剪切错动下易发生应力集中与局部骨架失稳,从而削弱界面的抗剪强度与剪胀特性。

2.3 粗糙度的影响

不同初始相对密实度($D_r=30\%$ 、 55% 、 70%)下界面的宏观力学响应曲线如图 14 所示。

由图 14(a)的应力比-界面剪切位移曲线可以看出,接触面粗糙度从根本上改变了界面力学行为机制。对于光滑的钢结构界面($R_n=0$),3 种相对密实

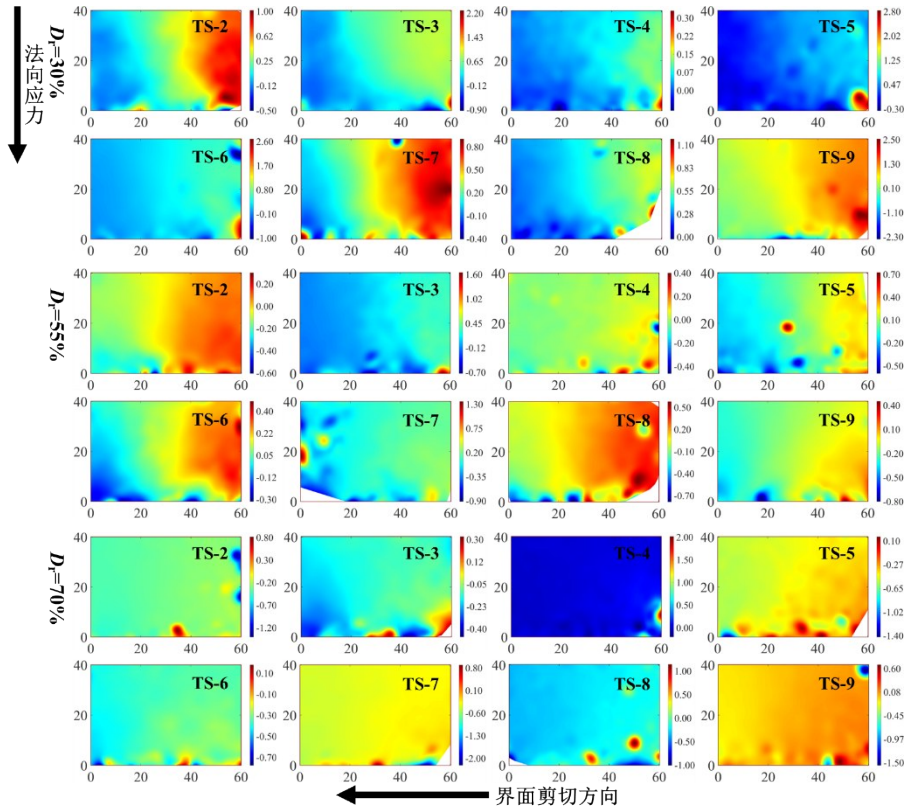


图 12 不同颗粒级配下土体中心剖面的垂直位移云图(单位:mm)

Fig.12 Vertical displacement contours of the central soil profile under different particle size distributions

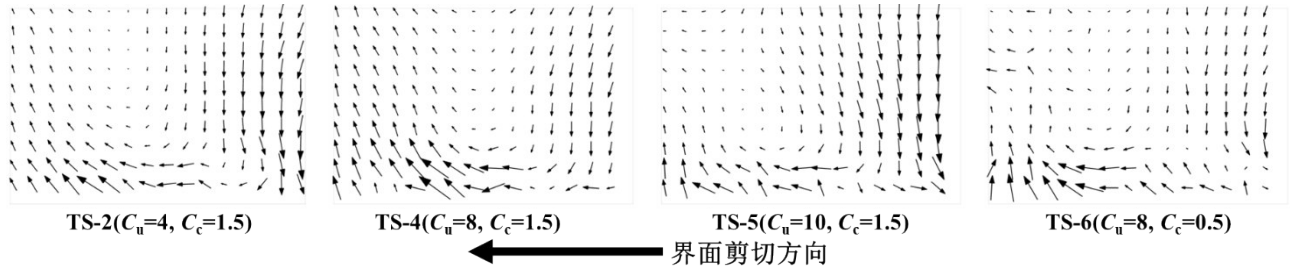


图 13 不同颗粒级配下土体中心剖面土颗粒位移矢量场(\$D_r=55\%\$)

Fig.13 Soil particle displacement vector fields of the central soil profile under different particle size distributions (\$D_r=55\%\$)

度下的土体应力比均处于最低水平(0.3左右),且曲线极其平缓,既无明显的峰值也无残余强度衰减。这表明在光滑界面下,土体与结构之间发生的是纯粹的表面滑移,土颗粒无法被钢板表面的微小起伏挂住,因而无法触发土体内部的抗剪行为。随着相对粗糙度 R_n 的增加,钢结构界面的锯齿开始刺入砂土骨架内部,界面抗剪强度显著提升。这一阶段,剪切破坏模式逐渐由表面滑移向土体内部的剪切破坏过渡。值得注意的是,粗糙度对强度的提升并不是无止境的。观察图 14(a)可发现,当相对粗糙度超过一定阈值(如 $R_n \geq 1.43$)后,曲线开始高度重合,峰值应力比不再随粗糙度的增加而继续增大。这一现象证实了接触面临界相对粗糙度 R_{cr} 的存在。当 $R_n > R_{cr}$ 时,钢结构表面的凹槽已被土颗粒完全填满,实际的剪切滑动面从土-结构界面转移至

土-土内部,此时界面的抗剪强度几乎等效于砂土自身的内部抗剪强度,即达到了强度的上限。

为了定量揭示界面剪切破坏模式随粗糙度的演化规律,图 15 展示了界面峰值与残余应力比随相对粗糙度 R_n 的变化曲线。由图 15 可知,当 R_n 从 0 增加至 1.43 时,3 个相对密度试样的峰/残应力比均呈现出爆发式增长,其中密砂($D_r=70\%$)的 μ_p 从 0.35 迅速攀升至 1.18。量化数据表明,当 R_n 超过临界粗糙度阈值 $R_{cr} \approx 1.43$ 后,峰值应力比趋于收敛。值得注意的是,在 $R_n \geq 1.43$ 后,不同相对密度试样的残余应力比 μ_r 均收敛于 1.05~1.20 这一区间,定量证实了此时剪切破坏面已转移至土体内部,界面抗剪强度已由土-结构间的滑动摩擦转变为土-土间的内摩擦阻力。

图 14(b)展示了粗糙度对垂直位移演化的控制

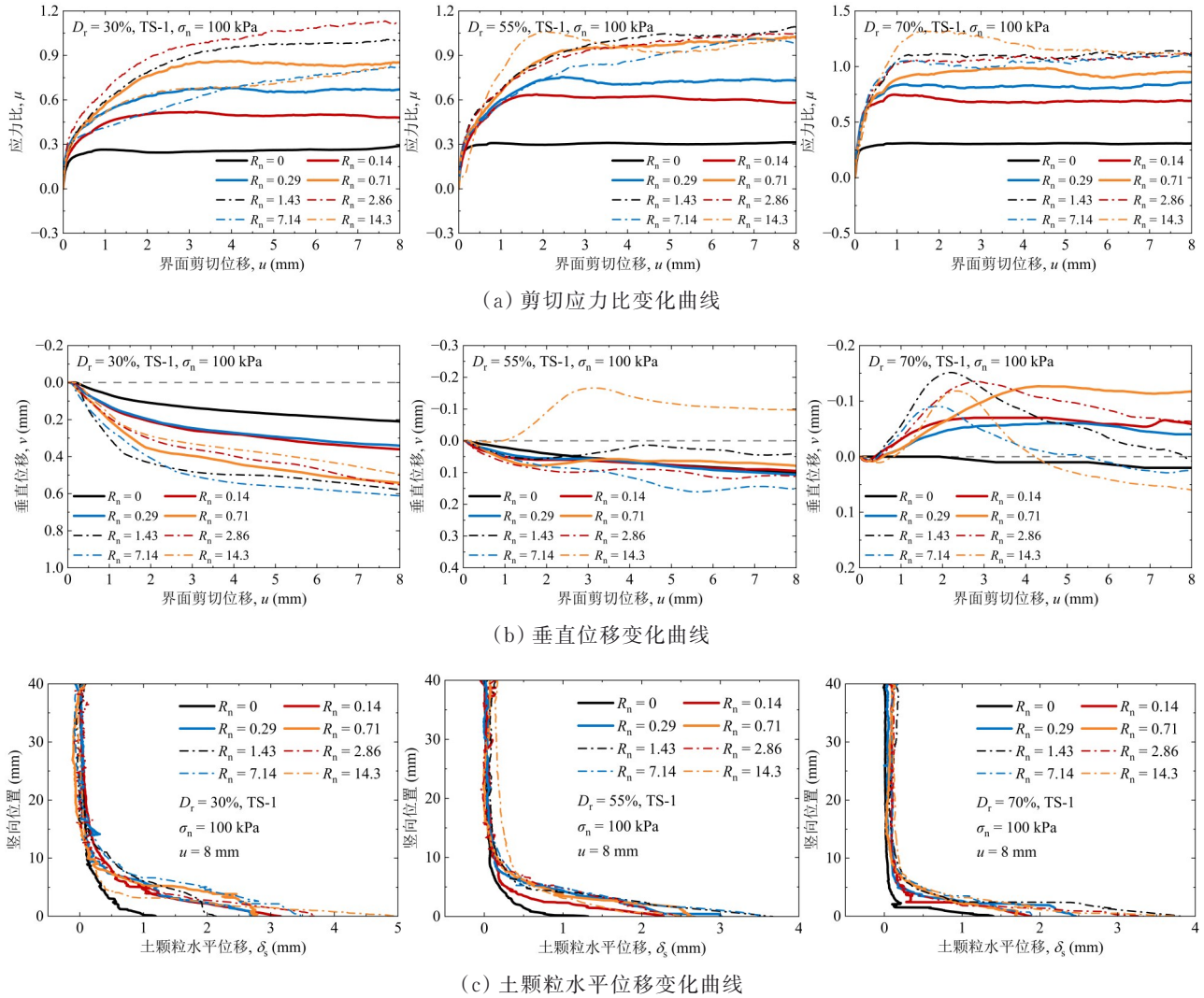


图 14 不同粗糙度下界面直剪试验曲线

Fig.14 Interface direct shear test curves under different roughness levels

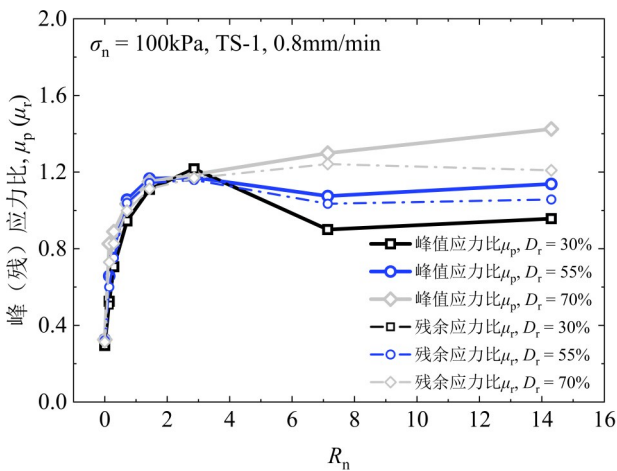


图 15 峰/残剪切应力比随相对粗糙度的演化曲线

Fig.15 Evolution curves of peak and residual stress ratios with relative roughness

作用。光滑界面($R_n=0$)由于无法使土颗粒产生翻越作用,无论是松砂还是密砂,在剪切全过程中均主要表现为体积压缩(正向位移),几乎不发生剪

胀。随着 R_n 的增大,接触面锯齿对土体产生了强烈的几何强迫作用。在剪切相对错动时,嵌固在凹槽内的土颗粒为了继续向前运动,必须克服所受压力,向上翻越相邻颗粒或越过钢结构界面的锯齿,从而诱发了强烈的体积膨胀(负向位移)。这种强制剪胀效应在密砂($D_r=70\%$)工况下尤为明显。与强度特性类似,剪胀量同样受控于临界粗糙度:当 R_n 增加到1.43之后,图14(b)中的垂直位移演化曲线也趋于收敛,最大剪胀量基本保持恒定。

图14(c)清晰展示了剪切带随粗糙度的演化过程。在光滑界面($R_n=0$)下,土颗粒的最大水平位移 δ_s 极小,且位移在距界面极短的距离($<2\text{ mm}$)内瞬间衰减为零,说明此时几乎没有形成具有一定厚度的剪切带。随着 R_n 的增加,界面摩擦拖拽能力增强,下层土颗粒的位移被向上层层传递,剪切扰动区逐渐向土体内部扩展,剪切带厚度增加。

图16的水平位移云图从另一角度反映了这一规律:底部代表高位移的红色区域带随着 R_n 的增加

而明显变宽。然而,与宏观强度的临界效应相呼应,当粗糙度达到 R_{cr} 时,图14(c)中的水平位移曲线几乎完全重合,图16中的扰动带厚度也趋于稳定。这表明,一旦剪切带完全转移至土体内部,其最终的厚度(通常约为 $5\sim 8D_{50}$ 左右)仅取决于土体自身的颗粒特性和应力状态,而不再受界面几何特征的进一步影响。图17的垂直位移云图展示了宏观体积变形。在松砂($D_r=30\%$)的高粗糙度工况下,图中主要呈现代表沉降和孔隙压缩的暖色调(红/

黄),局部伴随微小的膨胀区,揭示了松散骨架在粗糙界面错动下的崩坏机制。而在密砂($D_r=70\%$)且高粗糙度($R_n\geq 1.43$)的工况下,可以观察到整个界面上方被代表向上翻跃的深蓝色冷色调大面积覆盖。正是这种强烈、均一且大范围的向上位移,导致图14(b)中宏观曲线出现剧烈剪胀。相反,对比观察 $D_r=70\%$ 的 $R_n=0$ 或 $R_n=0.14$ 工况,其垂直位移场极为平淡,多呈现极微小位移或轻微压缩,证实了光滑界面无法有效激发密砂的剪胀特性。

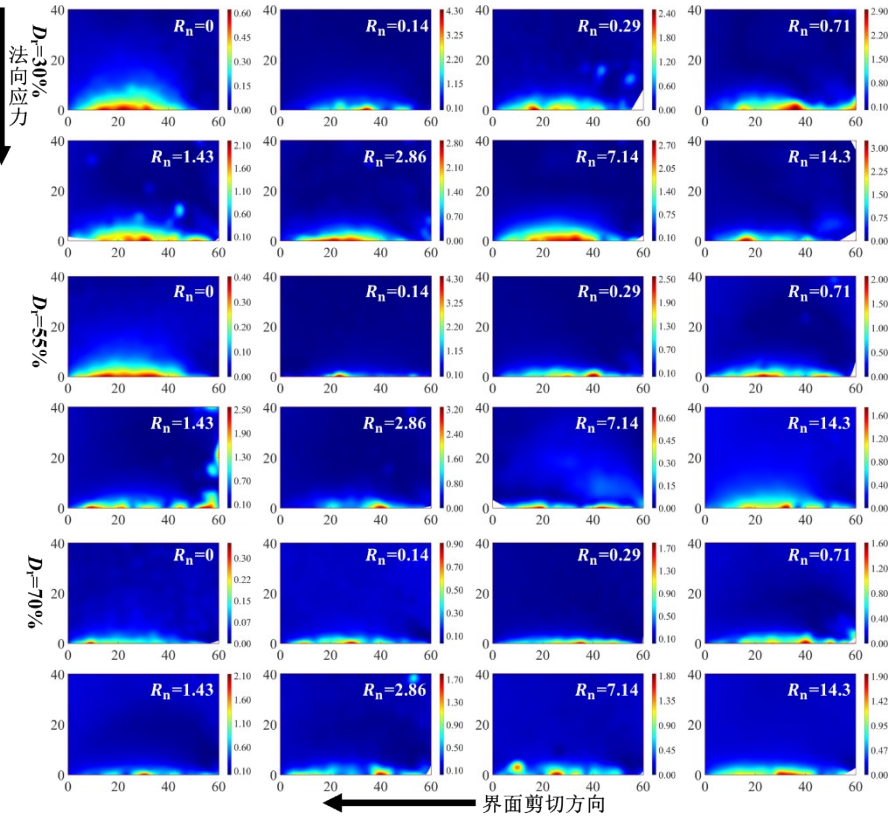


图16 不同粗糙度下土体中心剖面的水平位移云图(单位:mm)

Fig.16 Horizontal displacement contours of the central soil profile under different roughness levels (Unit: mm)

图18提取了中密砂($D_r=55\%$)在4个关键粗糙度节点($R_n=0, 0.14, 1.43, 14.3$)下的细观颗粒位移矢量场。观察矢量场的演化可以发现,界面力学行为随粗糙度增加经历了一个清晰的机理转移过程。在光滑界面($R_n=0$)下,剪切带底部的极少数扰动矢量呈水平向左平行分布,且上方土体位移近乎为零,进一步表明土-结构界面间发生的是纯粹的表面滑移。当粗糙度微增至 $R_n=0.14$ 时,界面的微小锯齿开始发挥轻微的几何强迫作用,底层扰动区略微增厚,但矢量方向仍以水平错动为主,向上翻越趋势并不明显。然而,当粗糙度达到临界阈值($R_n=1.43$)时,颗粒运动模式发生了改变。界面锯齿的强力嵌固迫使底层颗粒无法通过水平滑移抵抗变形,必须发生大角度的斜向左上强制翻越运动。这种斜向运动颗粒群的上移是诱发高粗糙度

下密砂产生剧烈剪胀的根本原因。更进一步,当粗糙度达到极端的 $R_n=14.3$ 时,矢量场展现出了强烈的大角度向上抬升特征。这是由于在下剪切盒向左的强力推挤下,10 mm的巨大锯齿使整个剪切带内的土颗粒群被迫以极大的倾角向左上方剧烈翻跃与抬升。对比 $R_n=1.43$ 与 $R_n=14.3$ 的矢量图可以发现,尽管后者的抬升现象更为剧烈,但两者的破坏机制均已脱离钢板表面,转化为土颗粒间的相互翻越与扩容。这从细观运动学的角度,为宏观抗剪强度与剪胀量在超越临界粗糙度阈值后趋于收敛的现象提供了有力的支撑。

2.4 讨论

众多天然砂土试验已经探明初始相对密度与法向应力对界面应变软化/硬化行为的宏观调控规律。例如,Janipour等^[29]在大型混凝土-砂土接触

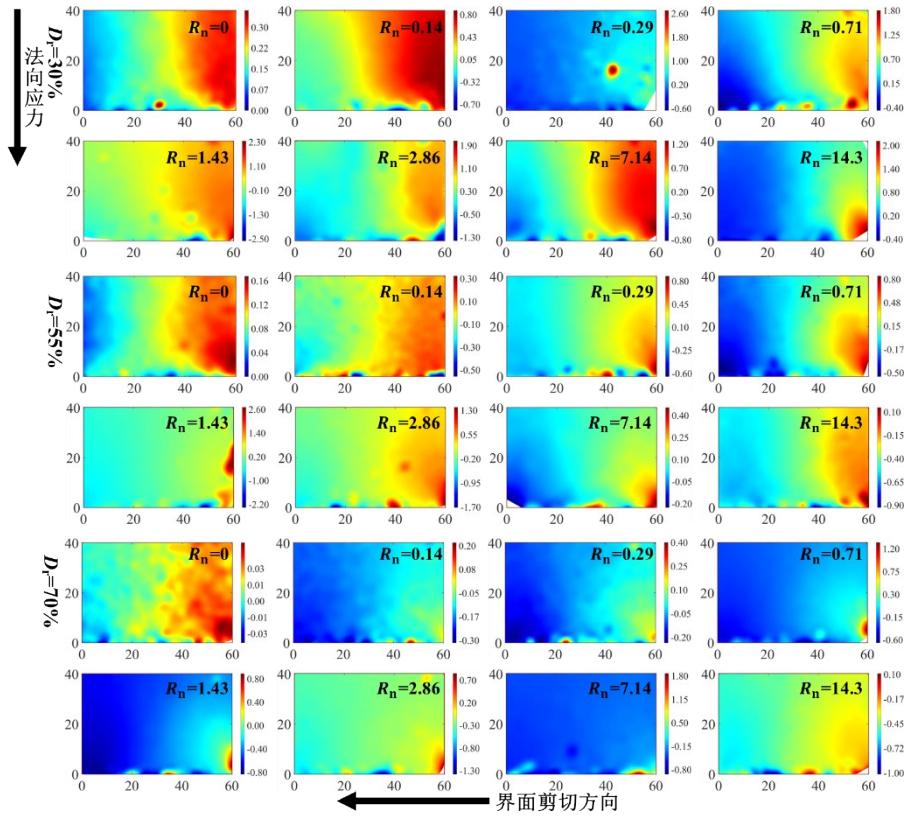
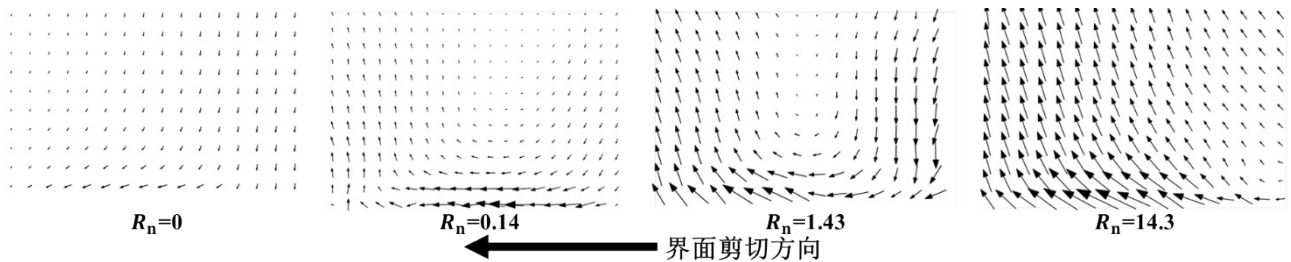


图 17 不同粗糙度下土体中心剖面的垂直位移云图(单位:mm)

Fig.17 Vertical displacement contours of the central soil profile under different roughness levels (Unit: mm)

图 18 不同粗糙度下土体中心剖面土颗粒位移矢量场($D_r=55\%$)Fig.18 Soil particle displacement vector fields of the central soil profile under different roughness levels ($D_r=55\%$)

面试验中指出, 密砂在粗糙界面会表现出剧烈剪胀与极高的峰值摩擦角; Al-Emami 等^[30]的研究同样发现高围压会显著削弱界面的应变软化。然而, 传统不透明试验难以解释这一规律背后的细观运动学本质。图 8 和图 13 的颗粒位移矢量场为此提供了直接的细观运动学证据: 当底部颗粒在克服粗糙锯齿的阻碍时会发生斜向左上方的强制翻越运动, 进而诱发了密砂的宏观剧烈剪胀; 而当法向应力极高或级配不良时, 巨大的竖向压力或脆弱的土颗粒骨架结构限制了颗粒的翻越空间, 导致底层具有斜向位移趋势的颗粒被限制为近乎水平的滑移运动。这种颗粒运动轨迹的转变揭示了高法向应力抑制宏观剪胀与应变软化的机理。

Bosscher 等^[31]的宏观研究曾提出, 随着界面粗糙度的增加, 表观摩擦阻力会逐渐逼近砂土的内摩

擦角; Su 等^[32]进一步定量提出了“临界粗糙度阈值”的宏观概念。图 15 精确定量重现了临界阈值($R_{cr} \approx 1.43$)与残余强度的收敛规律(收敛于 1.05~1.20 区间), 更重要的是, 图 18 的矢量场演化揭示了该宏观临界现象的运动学本质: 当粗糙度低于该阈值时, 颗粒表现为沿界面的被动拖拽滑移; 而一旦超越该阈值, 破坏模式发生改变, 界面凹槽被颗粒填满锁定, 剪切带内部呈现出颗粒群体整体大角度抬升的土内剪切特征。同时, 图 16 证明了此时剪切带扩展厚度亦趋于稳定($5D_{50} \sim 8D_{50}$), 这与 Martinez 等^[33]在扭转环剪试验中推算的厚度范围基本一致。

3 结论

开展了多因素耦合作用下的透明砂土-钢结构接触面直剪试验, 通过对宏观力学响应的定性及定

量分析与细观全场位移及矢量演化的剖析,得出以下主要结论:

1) 相对密实度主导了接触面由应变硬化向应变软化模式的转变,而高法向应力对密砂的剪胀特性及软化效应具有强烈的抑制作用。细观颗粒位移矢量场证实,高压迫使密砂底层颗粒的运动模式由大角度的斜向翻越转变为近乎水平的滑移,从而在全场位移上表现出界面上方大范围土体由膨胀抬升转变为孔隙压缩。

2) 不均匀系数 C_u 的增加提升了土骨架间的镶嵌与咬合作用。级配良好的密砂不仅展现出更高的界面峰值抗剪强度,其细观矢量场更呈现出颗粒群体整体大角度抬升特征。这种强咬合力链网络能够优化颗粒间的应力分配,避免出现级配不良砂土在剪切错动中易发生的土骨架坍塌失稳现象。

3) 接触面相对粗糙度 R_n 是主导剪切破坏模式的核心条件。证实了接触面临界相对粗糙度阈值(本研究中 $R_{cr} \approx 1.43$) 的存在:当 $R_n > R_{cr}$ 时,底层颗粒的运动模式由界面被动拖拽滑移转变为强嵌固作用下的大角度翻越,实际剪切破坏面向上转移至土体内部。此时,界面的残余抗剪强度、最大剪胀量以及剪切带的最终厚度均趋于收敛并保持稳定,不再受界面几何特征的进一步影响。

参考文献

- [1] 张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及其应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 62-66.
Zhang D J, Lu T H. Establishment and application of a interface model between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 62-66. (in Chinese)
- [2] Han F, Ganju E S, Salgado R, et al. Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand-steel interface friction angle[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(12): 04018096.
- [3] Wang H L, Zhou W H, Yin Z Y, et al. Effect of grain size distribution of sandy soil on shearing behaviors at soil-structure interface[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(10): 04019238.
- [4] Sun Y H, Wang H L, Meng F Y, et al. Multiscale mechanical behaviour of sand-steel structure interface for deep underground space[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2025, 62: 1-16.
- [5] Teichman J, Wu W. Experimental and numerical study of sand-steel interfaces[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1995, 19(8): 513-536.
- [6] 胡黎明, 濮家骝. 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 L M, Pu J L. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431-435. (in Chinese)
- [7] DeJong J T, Westgate Z J. Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil-structure interface behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(11): 1646-1660.
- [8] Tehrani F S, Han F, Salgado R, et al. Effect of surface roughness on the shaft resistance of non-displacement piles embedded in sand[J]. Géotechnique, 2016, 66(5): 386-400.
- [9] Zhang K, Yan J L, Mu Y H, et al. Global and local shear behavior of the frozen soil-concrete interface: effects of temperature, water content, normal stress, and shear rate[J]. Buildings, 2024, 14(10): 3319.
- [10] Liu K X, Wu R D, Ma B S, et al. Macro/meso-evolution of shear behavior of sand-steel interface in pipe jacking *via* digital image correlation (DIC) technology[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 155: 106197.
- [11] Sadek S G. Soil structure interaction in transparent synthetic soils using digital image correlation[D]. New York: Polytechnic University, 2001.
- [12] Ezzein F M, Bathurst R J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(6): 590-601.
- [13] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140-1146.
Kong G Q, Liu L, Liu H L, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1140-1146. (in Chinese)
- [14] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土与标准砂土强度特性对比三轴试验[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2): 250-255.
Kong G Q, Liu L, Liu H L, et al. Comparative analysis of the strength characteristics of transparent glass sand and standard sand[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(2): 250-255. (in Chinese)
- [15] 高岳, 隋旺华. 熔融石英型透明砂土及其岩土工程性质[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2016, 31(2): 60-66, 88.
Gao Y, Sui W H. Geotechnical properties of transparent sand made of fused silica[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2016, 31(2): 60-66, 88. (in Chinese)
- [16] 王文国. 基于透明土的钻井过程土体位移变形实验研

- 究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- Wang W G. An experimental investigation on soil displacement and deformation of drilling process using transparent soil modeling[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [17] Yu G, Cui Y, He L, et al. Influence of the soil-structure interface on seepage characteristics in uniformly-grained soils: microscopical insights from transparent soil experiments[J]. *Soils and Foundations*, 2025, 65(2): 101596.
- [18] Tong L Y, Zhou H, Sheil B, et al. Full-field internal 3D deformations measurement of transparent soil using 3D-DIC combined with optical slicing[J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(3): 1627-1648.
- [19] 刘汉龙, 钟文涵, 仇文岗, 等. 基于透明土石混合体的水力侵蚀特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(9): 1868-1877.
- Liu H L, Zhong W H, Zhang W G, et al. Hydraulic erosion characteristics based on transparent soil-rock mixture [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(9): 1868-1877. (in Chinese)
- [20] Zhou T, Mu L L, Lu Y M, et al. Rate-dependent uplift behavior and soil failure mechanisms of suction anchors in loose sand: a transparent soil PIV study[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 341: 122555.
- [21] Li Y Z, Zhou H, Qi G P, et al. Similarity evaluation of transparent sand and natural sands based on simulation of a hypoplastic constitutive model[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2025, 25(6): 04025089.
- [22] Chen W B, Zhou W H, Yin Z Y. Recent development on macro-micro mechanism of soil-structure interface shearing through DEM[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 30(3): 1843-1862.
- [23] Liu Y N, Lei H Y, Wang M T, et al. Internal instability evolution mechanism of tunnel face in sand-clay composite strata: Transparent soil model tests and DEM simulations[J]. *Transportation Geotechnics*, 2026, 56: 101840.
- [24] Wang Z H, Zhou H, Li Y Z, et al. Numerical simulation of debris flow impact on pier with different cross-sectional shapes based on coupled CFD-DEM[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2025, 49(8): 2025-2046.
- [25] Blaber J, Adair B, Antoniou A. Ncorr: open-source 2D digital image correlation Matlab software[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(6): 1105-1122.
- [26] Iskander M G, Sadek S, Liu J Y. Optical measurement of deformation using transparent silica gel to model sand [J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2002, 2(4): 13-26.
- [27] 陆勇, 周国庆, 夏红春, 等. 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[J]. *岩土力学*, 2013, 34(12): 3491-3499, 3526.
- Lu Y, Zhou G Q, Xia H C, et al. Effect of shape scale on characteristics of coarse grained soil-structural interface under medium and high pressures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(12): 3491-3499, 3526. (in Chinese)
- [28] Uesugi M, Kishida H, Tsubakihara Y. Behavior of sand particles in sand-steel friction[J]. *Soils and Foundations*, 1988, 28(1): 107-118.
- [29] Janipour A K, Mousivand M, Bayat M. Study of interface shear strength between sand and concrete[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(2): 172.
- [30] Al-Emami O H F, Al-Sultan A A, Sadegh-Azar H, et al. Effect of mechanical surface roughness on soil-structure interface shear behavior of a silty sand soil[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2025, 1545(1): 012062.
- [31] Bosscher P J, Ortiz G C. Frictional properties between sand and various construction materials[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 113(9): 1035-1039.
- [32] Su L J, Zhou W H, Chen W B, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface[J]. *Measurement*, 2018, 122: 339-346.
- [33] Martinez A, Frost J D. Axial and torsional axisymmetric laboratory interface shear tests for CPT attachment studies[C]//3rd International Symposium on Cone Penetration Testing. Omnipress, Madison, WI, 2014: 179-187.

(编辑 XXX)