

三种因素影响下南海钙质砂抗剪强度及破碎特性

朱剑锋, 李 挺, 鞠露莹, 杨 浩

Shear strength and crushing characteristics of calcareous sand in South China Sea under the influence of three factors

ZHU Jianfeng, LI Ting, JU Luying, and YANG Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无黏性土的压缩特性及模型

Compression characteristics and models of cohesionless soil

马露 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 72-77

排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials

刘小平, 刘天林, 曹晓毅, 张宝元, 王玉涛 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 191-198

基于离散元法的砂石混合体直剪试验结果分析

An analysis of direct shear test results of sand - gravel mixture based on the discrete element method

苏永华, 王栋 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 97-104

土工格栅与碎石土混合料界面作用的大型直剪试验研究

Large-scale direct shear test on the interface between geogrid and gravel-soil mixture

王家全, 祁航翔, 黄世斌, 唐毅 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 81-90

3种因素影响下固化废弃淤泥的微观特性研究

Research on the micro-characteristics of solidified waste sludge under the effect of three factors

杨浩, 朱剑锋, 陶燕丽 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 91-99

泸定大渡河桥冰碛土的结构及现场剪切试验研究

Soil structure and in-site shear test of moraine soil near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding

程强, 郭喜峰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 126-133



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312017

朱剑锋, 李挺, 鞠露莹, 等. 三种因素影响下南海钙质砂抗剪强度及破碎特性 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 113-124.
ZHU Jianfeng, LI Ting, JU Luying, et al. Shear strength and crushing characteristics of calcareous sand in South China Sea under the influence of three factors[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 113-124.

三种因素影响下南海钙质砂抗剪强度及破碎特性

朱剑锋, 李挺, 鞠露莹, 杨浩

(浙江科技大学土木与建筑工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 作为一种海源土体, 南海钙质砂具有多孔、形状不均匀、易破碎等特征, 而目前从细观角度开展钙质砂力学性状的研究比较有限。为获得竖向压力、剪切程度及相对密实度对钙质砂强度和颗粒破碎特性的影响规律, 开展了南海饱和钙质砂直剪试验, 并与陆源硅砂(中国标准砂和福建中级砂)的试验结果进行对比。结果表明: (1)不同相对密实度下的钙质砂剪应力-位移曲线趋势大致相同, 且剪应力峰值基本一致, 这与中国标准砂和福建中级砂受相对密实度影响规律显著不同; (2)与陆源硅砂无黏结性不同, 南海钙质砂有一定“似黏聚力”, 其主要原因在于南海钙质砂颗粒形状不均匀, 颗粒之间存在一定的咬合作用, 进而呈现出一定的黏结特性; (3)随着竖向应力的增加, 钙质砂破碎逐渐由大颗粒转变为小颗粒, 同时剪切程度为 50% 时钙质砂的破碎面主要位于相对薄弱处, 而剪切程度为 100% 时, 破碎面主要分布在单颗粒钙质砂中间位置; (4)相对破碎势与竖向应力、相对密实度及剪切程度有很好的相关性, 构建的破碎势计算模型涵盖了竖向应力、相对密实度及剪切程度的影响, 可在工程中推广应用。研究结果可为我国南海岛礁工程建设提供依据。

关键词: 钙质砂; 直剪试验; 颗粒破碎; 相对密实度; 破碎势

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0113-12

Shear strength and crushing characteristics of calcareous sand in South China Sea under the influence of three factors

ZHU Jianfeng, LI Ting, JU Luying, YANG Hao

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: Calcareous sand, a type of marine soil found in the South China Sea, is characterized by its porous nature, irregular particle shape, and susceptibility to breakage. However, few studies have examined the mechanical properties of calcareous sand from the microscopic perspective. To investigate the impact of vertical pressure, shear degree and relative density on the strength and particle breakage characteristics of calcareous sand, direct shear tests were conducted on saturated calcareous sand from the South China Sea. A comparative analysis was performed with the test results of terrestrial silica sand, namely Chinese standard sand and Fujian intermediate sand. It is found that both the trend of stress-displacement curve and the peak shear stress values exhibit a similar behavior for calcareous sand under different relative compaction, which were distinctly different from the influence of relative compaction on Chinese standard sand and Fujian intermediate sand. The calcareous sand in

收稿日期: 2023-12-11; 修订日期: 2024-03-28

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879133); 浙江省公益项目(LGG22E090002); 浙江省“十四五”研究生教改项目(2023-295)

第一作者: 朱剑锋(1982—), 男, 博士, 教授、博导, 主要从事海洋岩土基本物理力学性质研究。E-mail: zhujianfeng@zust.edu.cn

通讯作者: 鞠露莹(1996—), 女, 博士, 讲师, 主要从事软土与改性土的本构模型研究。E-mail: 11812026@zju.edu.cn

the South China Sea exhibit a noteworthy “similar cohesion”, a feature that distinguishes it from the non-cohesiveness of terrigenous silica sand. This cohesion in calcareous sand is attributed to the non-uniform shape of its particles and featuring interlocking between particles, presenting certain bonding characteristics. As the vertical stress increases, the crushing of calcareous sand gradually changes from large particles to small particles. At a shear degree approaching 50%, the crushing surface of calcareous sand occurs mainly at a relatively weak position. However, at the shear degree approaching 100%, the primary crushing surface predominantly occurs in the middle of individual calcareous sand particles. The relative breaking potential demonstrates a strong correlation with vertical stress, relative compaction, and shear degree. The developed empirical model for breaking potential, which takes all three factors into account, holds significant potential for practical applications in engineering. The findings provide valuable insights for the construction of islands and reefs in the South China Sea.

Keywords: calcareous sand; direct shear test; crushing of particles; relative density; breaking potential

近年来,我国南海岛礁建设如火如荼,海上风电、防波堤、机场等大型基础设施建设规模逐步提高,地基沉降、失稳以及岛礁土体的破碎演变等问题日趋增多^[1-2],严重影响了工程施工成本和安全。因此,掌握南海岛礁土体的物理力学特性显得尤为重要。

南海岛礁大部分为珊瑚礁,其主要组成物质是钙质砂(又称珊瑚砂),与陆源的石英砂相比,钙质砂具有形状不均匀、易破碎、多孔隙、低强度等特点^[3-5]。国内外学者针对钙质砂的力学特性开展了深入研究,如钟丽等^[6]发现应力路径对钙质砂变形特性有重要影响;黄良等^[7]认为钙质砂颗粒形状与其剪切特性呈现良好的相关性;刘萌成等^[8]提出了钙质砂抗剪强度、内摩擦角和孔隙比与平均主应力的经验模型;Lade等^[9]发现钙质砂的强度和变形特征受剪切速率影响显著;张家铭等^[10]发现钙质砂应力-应变关系与陆源砂差异较大,且其剪胀性和峰值应力比与围压密切相关;Brandes等^[11]通过开展钙质砂和石英砂的循环单剪对比试验,揭示了二者差异性的根本原因;Wang等^[12]发现钙质砂和石英砂存在剪胀性差异性。

除了剪切特性外,钙质砂的易破碎特性也引起了学者们的浓厚兴趣,如高雪等^[13]开展了钙质砂剪切数值模拟,发现剪切过程中需要更大输入功才能实现钙质砂颗粒持续破碎;高敏等^[14]提出了考虑颗粒破碎和应力路径影响的钙质砂强度包线;王青等^[15]研究了不同粒径、含水率、剪切速率对钙质砂强度和破碎特性的影响规律;Lü等^[16]对钙质砂和石英砂开展了不同高应变率条件下霍普金森压杆对比试验,发现随着荷载增加,钙质砂颗粒破碎由局部失稳发展到整体破碎;张季如等^[17]发现钙质砂峰值内摩擦角与破碎率呈指数关系。

综上,现有针对钙质砂的力学性能研究主要集中在宏观层面,而从细观角度开展钙质砂力学性状的研究比较有限^[18-19]。研究发现细观结构是决定土壤宏观力学特性变化的根本因素^[20-22]。因此,深入研究钙质砂在剪切荷载作用下的细观结构变化具有重要意义。

本文通过开展不同竖向应力(σ_v)和相对密度下(D_r)饱和钙质砂的直接剪切试验,综合对比相同条件下陆源硅砂(中国标准砂和福建中级砂)的试验结果,获得饱和钙质砂的剪切特性,利用BC4K-3630E工业电子显微镜(industrial electron microscope, IEM)获得不同剪切程度(S_D)下饱和钙质砂细观颗粒的变化规律,最后利用破碎势对不同条件(D_r 、 σ_v 、 S_D)下钙质砂颗粒破碎进行量化分析并构建相应的计算模型,以期对南海工程设计提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

如图1所示,试验所选用土体分别为南海钙质砂、中国标准(简称“ISO”)砂和福建中级(简称“FJZ”)砂。其中,钙质砂取自我国南海某岛礁,主要由珊瑚碎屑及软体生物外壳组成,比重(G_s)为2.639,中值粒径(d_{50})为0.8 mm;ISO砂和FJZ砂均为厦门艾思欧标准砂有限公司生产的标准砂, G_s 分别为2.626和2.672, d_{50} 分别为0.67 mm和0.64 mm。3种砂的物理参数指标和颗粒级配如表1和图2所示,其中 e_{\max} 为最大孔隙比, e_{\min} 为最小孔隙比, C_c 为曲率系数, C_u 为不均匀系数。

1.2 试验仪器及方法

(1)直接剪切试验

采用南京土壤仪器厂生产的ZJ型应变控制式直

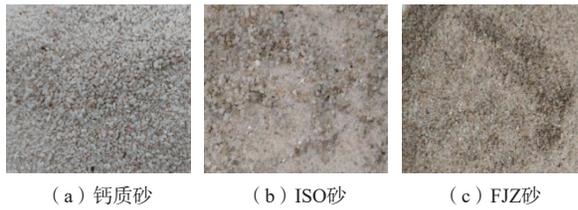


图 1 试验所用砂样

Fig. 1 Sand samples used in the laboratory tests

表 1 基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators

材料	物理指标				
	G_s	e_{max}	e_{min}	C_c	C_u
ISO砂	2.626	0.764	0.377	1.081	3.269
FJZ砂	2.672	0.928	0.647	0.925	1.443
钙质砂	2.639	1.344	1.094	0.894	2.173

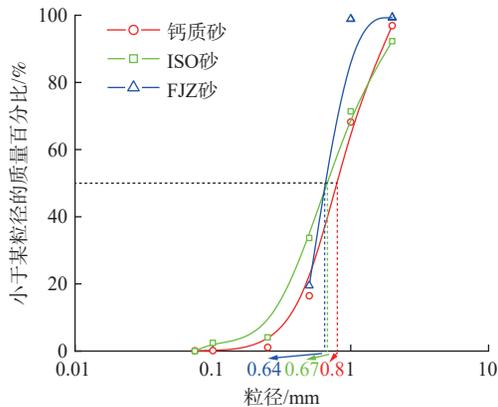


图 2 试验所用砂土颗粒级配

Fig. 2 Particle gradation of sand sample used in the laboratory tests

剪仪, 根据 3 种砂的 G_s 、 e_{max} 、 e_{min} 计算出不同相对密度下直剪试样的干密度和质量; 称取相应干砂并使水充满试样的孔隙达到饱和, 按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[23] 的饱和砂土固结快剪试验要求, 控制剪切速度为 0.8 mm/min, 直至试验结束。

(2) IEM 试验

采用 IEM 从细观角度对剪切过程中的砂样的演化过程进行拍摄, 仪器工作电压为 220 V, 测量精度为 1 μ m, 采用最大观测倍数 (125 倍) 观测剪切过程中和完成后剪切面处砂土的颗粒形态和破碎情况。

1.3 试验方案

如表 2 所示, 对不同相对密度 (D_r) 和竖向应力 (σ_v) 下的 3 种饱和砂土进行直剪试验。另外, 为获得剪切过程中钙质砂物理形态的细观演化规律, 还开展了不同直剪程度 (S_b) 下钙质砂的 IEM 试验。

表 2 试验方案
Table 2 Test project

试样编号	试验对象	$S_b/\%$	D_r	σ_v/kPa	$S_b/\%$
DS-1	ISO砂	100	0.2, 0.4, 0.6, 0.8	50, 100, 200, 300, 400	—
DS-2	FJZ砂				—
DS-3	钙质砂				50, 100

注: S_b 为试样饱和度。

2 直剪试验结果与分析

2.1 南海饱和钙质砂直剪试验结果

2.1.1 竖向应力影响

$D_r=0.4$ 时, 不同竖向荷载 ($\sigma_v=50, 100, 200, 300, 400$ kPa) 下饱和钙质砂的剪应力 (τ)-位移 (s) 曲线如图 3 所示。由图可知, ①随着 σ_v 的增大, 饱和钙质砂的峰值剪应力 (τ_f) 增大, 并且相应的峰值位移 (s_f) (1.6, 2.6, 4.2, 4.8, 5.2 mm) 和残余应力 (τ_r) (8.410, 15.242, 49.218, 85.458, 104.824 kPa) 也逐渐增大, 这是因为 σ_v 越大, 钙质砂埋置深度越深, 其结构越紧密, 颗粒间的咬合力越强, 对应的 τ_f 、 s_f 也逐渐提高。类似规律也出现在硅砂试验结果中^[24]。②随着 σ_v 的增大, 钙质砂 τ - s 曲线逐渐出现波动, 尤其当 σ_v 达到 400 kPa 时, 波动最为严重。这是因为在较低竖向压力下, 结构较为松散, 颗粒间咬合力较差, 钙质砂颗粒随着剪切面滑移而移动, 剪切强度主要由整体剪切面提供, 因此, τ - s 曲线呈光滑形态; 但随着 σ_v 逐渐增加, 钙质砂结构日趋紧密, 处在剪切面处的钙质砂颗粒随着剪切面滑移时被剪碎, 进而产生重分布, 使 τ - s 曲线产生了波动。

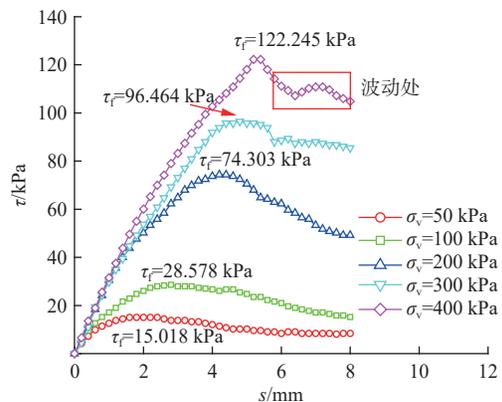


图 3 不同 σ_v 下饱和钙质砂 τ - s 关系曲线 ($D_r=0.4$)

Fig. 3 Shear stress-displacement relationships of saturated calcareous sand under different σ_v ($D_r=0.4$)

2.1.2 相对密度影响

图 4 为 $\sigma_v=200$ kPa 下, 不同 D_r 下南海饱和钙质砂

的 τ - s 关系曲线。由图可知：①不同 D_r 下，饱和钙质砂的 τ_r 逐渐增加，与 $D_r=0.2$ 对应的 $\tau_r=40$ kPa 相比，当 $D_r=0.8$ 时 τ_r 达到了 70 kPa，增长幅度为 75%，因此，与 σ_v 相比(最大增长幅度可达 500%)， D_r 对南海饱和钙质砂抗剪强度增长有限。②各 D_r 下饱和钙质砂的 τ - s 曲线趋势基本相同，且 $D_r=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 下饱和钙质砂的 s_r 分别为 4.6, 4.2, 4.2, 4.2 mm，最大相对差值仅为 9.5%。③各 D_r 下饱和钙质砂的 τ_r 趋于相同，这是因为剪切过程中不同密实状态的钙质砂发生了颗粒破碎和重排列致使各 D_r 下的钙质砂结构趋于一致。

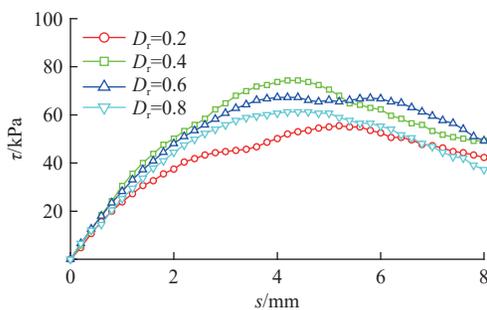


图 4 不同 D_r 下饱和钙质砂 τ - s 关系曲线 ($\sigma_v=200$ kPa)
 Fig. 4 Shear stress-displacement relationships of saturated calcareous sand under different D_r ($\sigma_v=200$ kPa)

根据图 4 数据绘制莫尔圆，可得到南海饱和钙质砂的有效内摩擦角 (ϕ') 和有效黏聚力 (c')^[25]，结果见表 3。

表 3 不同 D_r 下饱和钙质砂直剪试验强度指标
 Table 3 Strength parameters for direct shearing test of saturated calcareous sand under different D_r

强度指标	D_r			
	0.2	0.4	0.6	0.8
$\phi'/(^\circ)$	16.22	16.38	17.17	17.33
c'/kPa	4.160	4.265	4.413	4.637

从表 3 可知，①随着 D_r 的增加，南海饱和钙质砂的 ϕ' 和 c' 逐渐增大，但 D_r 从 0.2 增加至 0.8 时， ϕ' 和 c' 仅分别增长了 1.11° 和 0.477 kPa，增长幅度非常有限。因此， D_r 对南海饱和钙质砂强度指标影响较小。②与传统硅砂通常呈现非黏聚性状态 ($c'\approx 0$) 不同^[24]，南海饱和钙质砂的 c' 通常大于 0，呈现“似黏聚”状态，这主要是因为南海钙质砂颗粒形状不均匀，相关之间存在咬合力，因此使得钙质砂具备一定的“似黏聚力”^[26]。

2.2 南海饱和钙质砂与陆源硅砂直剪试验对比

为进一步研究南海饱和钙质砂的剪切特性，现采用典型陆源硅砂 (ISO 砂和 FJZ 砂) 为试验对象，饱和后分别开展不同竖向压力 ($\sigma_v=50, 100, 200, 300, 400$ kPa)

和相对密实度 ($D_r=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) 下的直剪试验，并与相同条件下的南海饱和钙质砂试验结果进行对比，结果如图 5 所示。

由图 5 可知：①不同 σ_v 下，ISO 砂初始剪切模量 (G_0 ，即 τ - s 曲线切线斜率) 和 τ_r 最大，FJZ 砂次之，而钙质砂最小。这是由于一方面 ISO 砂的颗粒级配优于 FJZ 砂，颗粒排列更为紧密，因此其 G_0 高于 FJZ 砂；另一方面，ISO 砂与 FJZ 砂均属于硅砂，单颗粒强度要显著高于南海钙质砂，在剪切过程中未发生破碎，只发生了颗粒之间的移动和结构重分布，从而使二者的 G_0 和 τ_r 均高于南海钙质砂。②当 $\sigma_v \leq 100$ kPa 时，随着 D_r 增加，ISO 砂的 τ_r 与 FJZ 砂相差较小，并且 D_r 对两种砂 τ_r 的影响不是很明显；而当 $\sigma_v > 100$ kPa 之后，随着 D_r 增加，二者相差较为显著，同时随着 D_r 的增加，两种砂 τ_r 逐渐增加，这与前述南海饱和钙质砂的 τ_r - D_r 关系明显不同。这是因为较低的 σ_v 无法将两种硅砂压实，因此 D_r 对砂的剪应力峰值影响较小；当 σ_v 大于 100 kPa 后，ISO 砂与 FJZ 砂皆被压实，而二者的颗粒在剪切过程中很难被剪碎，因此，ISO 砂与 FJZ 砂的 τ_r 随着 D_r 增加而明显增加。③当 $\sigma_v \leq 100$ kPa 时，ISO 砂的 G_0 与 FJZ 砂相差较大； $\sigma_v > 100$ kPa 后，二者之间的差异性显著降低。这是因为在较小竖向应力状态下，陆源硅砂颗粒没有被压实，其力学特性主要取决于其物理性质，而由表 1 可知，ISO 砂的颗粒级配 ($C_u=3.269$) 要优于 FJZ 砂 ($C_u=1.443$)，从而使得 ISO 砂的 G_0 较高。而随着 σ_v 的增加，陆源硅砂逐渐被压实，使得物理性质的影响逐渐减弱，ISO 砂与 FJZ 砂的 G_0 趋于一致。

图 6(a)(b) 分别为 3 种砂土抗剪强度指标 (ϕ' 和 c') 随 D_r 的变化规律。

由图可知，①同一 D_r 下，ISO 砂的 ϕ' 最大，FJZ 砂次之，钙质砂最小。且随着 D_r 的增加，ISO 砂与 FJZ 砂的 ϕ' 得到了显著提高，而南海钙质砂 ϕ' 的增长趋势比较平缓。这是因为根据 Terzaghi 等^[27] 的研究结果，无黏结土的内摩擦角与颗粒间的接触面积有关，对于陆源硅砂 (ISO 砂和 FJZ 砂) 而言，其颗粒形状主要呈球形，矿物成分主要由强度高的圆形石英构成，因此，随着 D_r 的增加，硅砂颗粒接触面积逐渐增大，硅砂的 ϕ' 逐渐增大。而对于南海钙质砂而言，其矿物成分主要是强度有限的方解石，颗粒形状不规则，在剪切过程中会发生破碎，颗粒发生重分布，接触面积也会随之发生显著变化，尽管随着 D_r 的增加，南海钙质砂颗粒接触面积有一定的增大，但与颗粒破碎相比影响幅

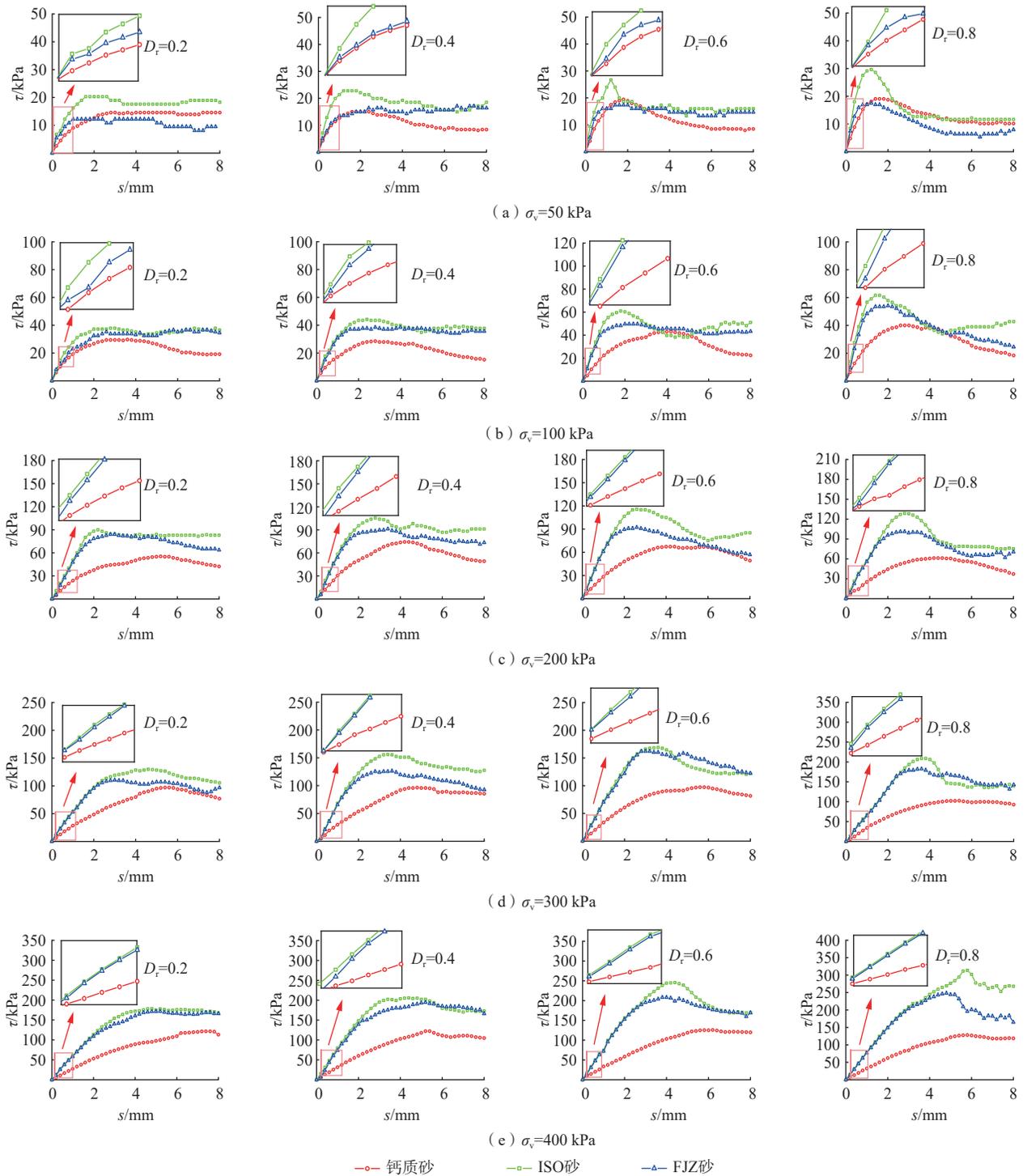


图 5 3 种饱和砂土剪切荷载-位移关系曲线

Fig. 5 Shear load-displacements of three kinds of saturated sand

度有限, 因此, 提高南海钙质砂 D_r 并不会显著提高其 φ' 。类似现象也在文献 [28 - 29] 中发现。②ISO 砂与 FJZ 砂均属于陆源硅砂, 颗粒形状主要呈圆形, 颗粒之间咬合度低, 相应的 c' 基本为 0, 而南海钙质砂因其颗粒形状不规则, 存在一定程度的咬合, 导致其出现了“似黏聚力”, 因此其 $c' > 0$, D_r 对此钙质砂颗粒

咬合影响有限, 因此随着 D_r 的增加, 钙质砂 c' 增长不明显, 类似结果也在文献 [28 - 29] 的研究中出现。

3 南海钙质砂剪切破碎特性细观分析

3.1 IEM 试验分析

为揭示直剪过程中南海钙质砂颗粒破碎演化及

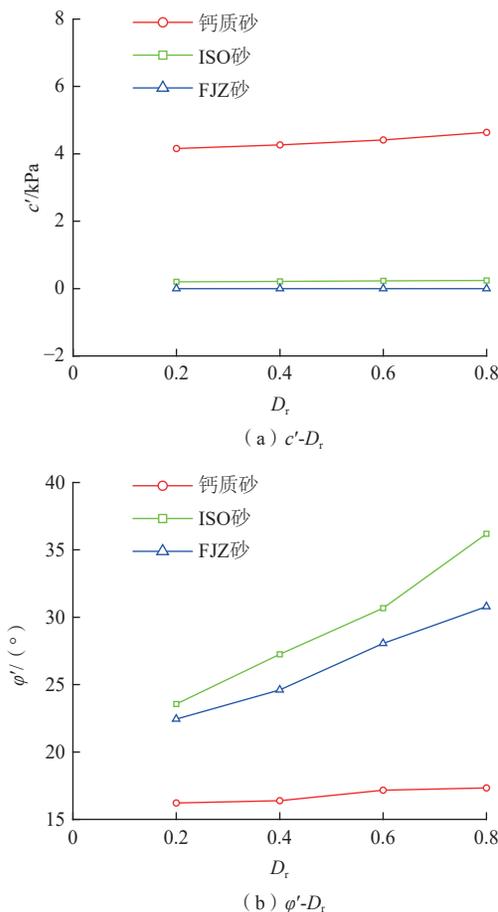


图 6 饱和砂土抗剪强度指标与 D_r 关系曲线

Fig. 6 Relationship between shear strength parameters of saturated sand and relative density

其对钙质砂抗剪强度影响规律, 现分别开展不同 D_r 和 σ_v 下剪切程度 (S_D) 分别为 50% ($s=0.5s_f$) 和 100% ($s=s_f$) 的南海饱和钙质砂的 IEM 试验, 结果分别见图 7—9。

(1) 50% 直剪程度

从图 7 中可以看出, ①相同 D_r 下, 随着 σ_v 的增加, 钙质砂的破碎逐渐由大颗粒破碎转变为小颗粒破碎。这是因为一方面, 与小颗粒相比, 钙质砂大颗粒之间咬合作用更强^[15], 在剪切过程中受到的阻力更大; 另一方面, 由图 7 可知大颗粒钙质砂破碎时, 其周围排布的空隙更大, 空间分布和受力更复杂。在上述两种因素共同作用下, 大颗粒钙质砂更易被剪碎, 类似现象也在文献 [15] 中出现。②相同 σ_v 、不同 D_r 条件下破碎的钙质砂颗粒粒径大小相近, 如 $\sigma_v=50$ kPa、 $D_r=0.6$ 时破碎的钙质砂颗粒粒径为 1.7 mm, $\sigma_v=50$ kPa、 $D_r=0.8$ 时为 1.5 mm, 粒径大小仅相差 13.33%; 而随着 σ_v 的增加, 破碎的钙质砂颗粒粒径逐渐减小, 如 $\sigma_v=50$ kPa、 $D_r=0.6$ 时破碎的钙质砂颗粒粒径为 1.7 mm, $\sigma_v=400$ kPa、 $D_r=0.6$ 时仅为 1.0 mm, 粒径大小相差 70%。

因此, σ_v 对钙质砂颗粒破碎的影响要强于 D_r , 这也验证了前述图 3 和图 4 的试验结果。③钙质砂出现裂纹的方向基本与剪切方向呈现一定的夹角。以 $\sigma_v=50$ kPa、 $D_r=0.2$ 、 $S_D=50\%$ 钙质砂细观图 (图 7) 为例, 钙质砂拉应力方向如图 8 所示, 裂纹方向与拉应力方向垂直; 同时钙质砂颗粒在剪切前排布方向不一致, 导致裂纹方向呈现不同的形态, 但都与水平方向呈现一定的夹角。

(2) 100% 直剪程度

由图 9 可知, ①与 $S_D=50\%$ 南海钙质砂样沿单颗粒薄弱部位发生剪切破碎不同, $S_D=100\%$ 时, 破碎大多发生在单颗粒中间部位, 这是因为 S_D 较低时, 主要沿着薄弱处发生剪切破碎, 但随着剪切的发展, 所剩完整性较好的钙质砂颗粒排列在剪切面处, 上下剪切盒相对位移逐渐增大, 使得单颗粒中间处也发生了破碎。②与 $S_D=50\%$ 类似, 当 S_D 增至 100% 时, 在同一 D_r 下随着 σ_v 的增加钙质砂的破碎逐渐由大颗粒破碎转变为小颗粒破碎, 而相同 σ_v 、不同 D_r 条件下破碎的钙质砂颗粒粒径大小则相近; 但在同一条件下, $S_D=100\%$ 比 $S_D=50\%$ 时钙质砂样破碎后颗粒粒径更小。

3.2 南海钙质砂颗粒破碎势计算

鉴于颗粒破碎对南海钙质砂剪切特性影响的重要性, 现基于 Hardin^[30] 提出的相对破碎势 (B_r) 计算模型 (式 1) 对南海饱和钙质砂直剪试验结果进行分析。

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \tag{1}$$

式中: B_p ——初始破碎势;

B_t ——总破碎势。

如图 10 所示, B_p 为初始粒径分布曲线 (采用直剪仪固结完成后钙质砂的颗粒级配曲线) 与粒径 0.074 mm 竖线所围成的面积; B_t 为试验前后 (分别指饱和钙质砂固结结束时和直剪试验完成后) 钙质砂试样粒径分布曲线与粒径 0.074 mm 竖线所围成的面积。

将剪切好的试样进行烘干, 之后用标准砂进行筛分, 由式 (1) 可确定不同 D_r 、 σ_v 和 S_D 条件下饱和钙质砂的相对破碎势, 结果见图 11。

3.2.1 D_r 、 σ_v 和 S_D 的影响

图 11(a) 为 $\sigma_v=200$ kPa、 $S_D=50\%$ 下相对破碎势与相对密实度的关系曲线, 由图易知, 随着 D_r 的增加, B_r 逐渐提高, 但增长幅度有限, D_r 由 0.2 增至 0.8 时, B_r 增幅为 1.108%, 这与前述 D_r 对钙质砂影响较小试验结论是一致的。

图 11(b) 为 $D_r=0.4$ 、 $S_D=50\%$ 下 B_r - σ_v 关系曲线。从

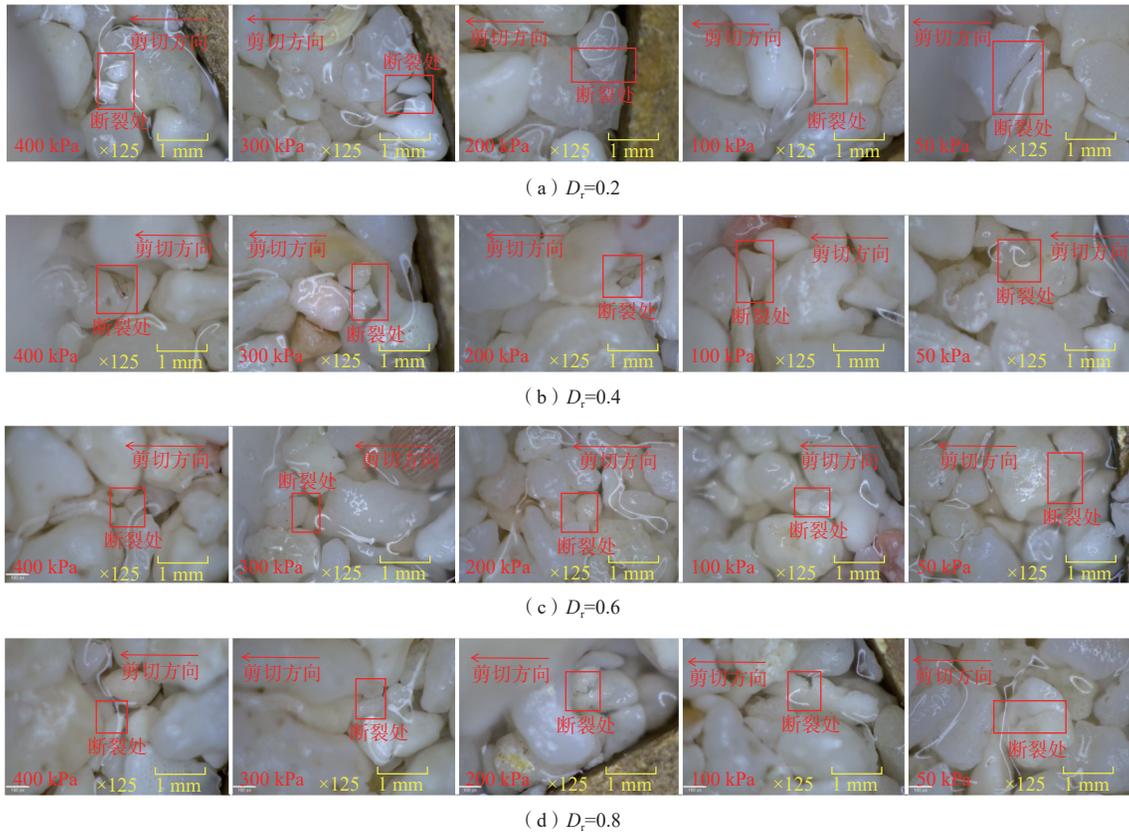


图 7 饱和钙质砂剪切破碎细观图 ($S_b=50\%$)

Fig. 7 Meso-graph of shear fracture for saturated calcareous sand ($S_b=50\%$)

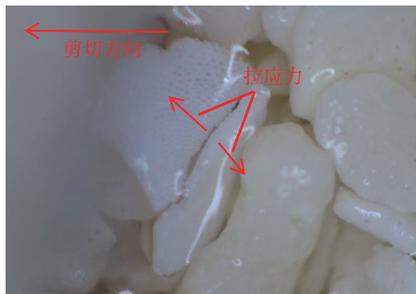


图 8 饱和钙质砂剪切破碎原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of shear crushing principle of saturated calcareous sand

图中可以看出,随着 σ_v 的增加, B_r 也逐渐增加,这是因为较高的 σ_v 下,钙质砂颗粒咬合更加紧密,剪切后破碎更为明显;同时, σ_v 由 50 kPa 增至 400 kPa 时, B_r 的增幅为 1.483%,较 D_r 变化时增幅大,也证实了南海钙质砂剪切特性受 σ_v 的影响高于 D_r 。

图 11(c) 为 $D_r=0.4$ 、 $\sigma_v=200$ kPa 下 B_r-S_D 关系曲线。由图可以看出,随着 S_D 的增加, B_r 逐渐提高,这说明在南海钙质砂颗粒在剪切过程中一直发生破碎,且 $S_D>25\%$ 后, B_r 增长趋势显著加快,这是因为当 S_D 较小时,钙质砂的破碎主要发生在数量有限的较大颗粒,

而随着 S_D 的增加,大量的中小钙质砂颗粒被剪碎,从而显著提高了 B_r 增长幅度。

3.2.2 综合模型的建立

由图 11 可知,对南海钙质砂而言, D_r 、 σ_v 及 S_D 均与 B_r 有较高正相关性。现保持 $D_r=0.4$ 和 $S_D=50\%$,对图 11(b) 试验结果进行拟合(图 12),可得:

$$B_r = 3.141/[0.854 + e^{-0.856(\sigma_v/p_0)}] - 1.7 \quad (2)$$

式中: p_0 ——标准大气压/kPa, 为 101.325 kPa。

在式(2)的基础上,引入 D_r 对 B_r 的影响因子 α , 可得综合考虑 D_r 和 σ_v 影响的 B_r 表达式为:

$$B_r = (1 + \alpha)\{3.141/[0.854 + e^{-0.856(\sigma_v/p_0)}] - 1.7\} \quad (3)$$

设定 $\sigma_v=200$ kPa、 $S_D=50\%$, 将图 11(a) 某一 D_r 下的 B_r 测试结果代入式(3)可反推出 α , 从而得出影响因子 α 与 D_r 的关系曲线如图 13 所示。

根据图 13 中的回归方程,可得:

$$\alpha = 0.071e^{3.267D_r} - 0.258 \quad (4)$$

类似地,在式(3)基础上引入 S_D 对 B_r 的影响因子 β , 可得综合考虑 D_r 、 σ_v 及 S_D 影响的 B_r 表达式为:

$$B_r = (1 + \alpha)(1 + \beta)\{3.141/[0.854 + e^{-0.856(\sigma_v/p_0)}] - 1.7\} \quad (5)$$

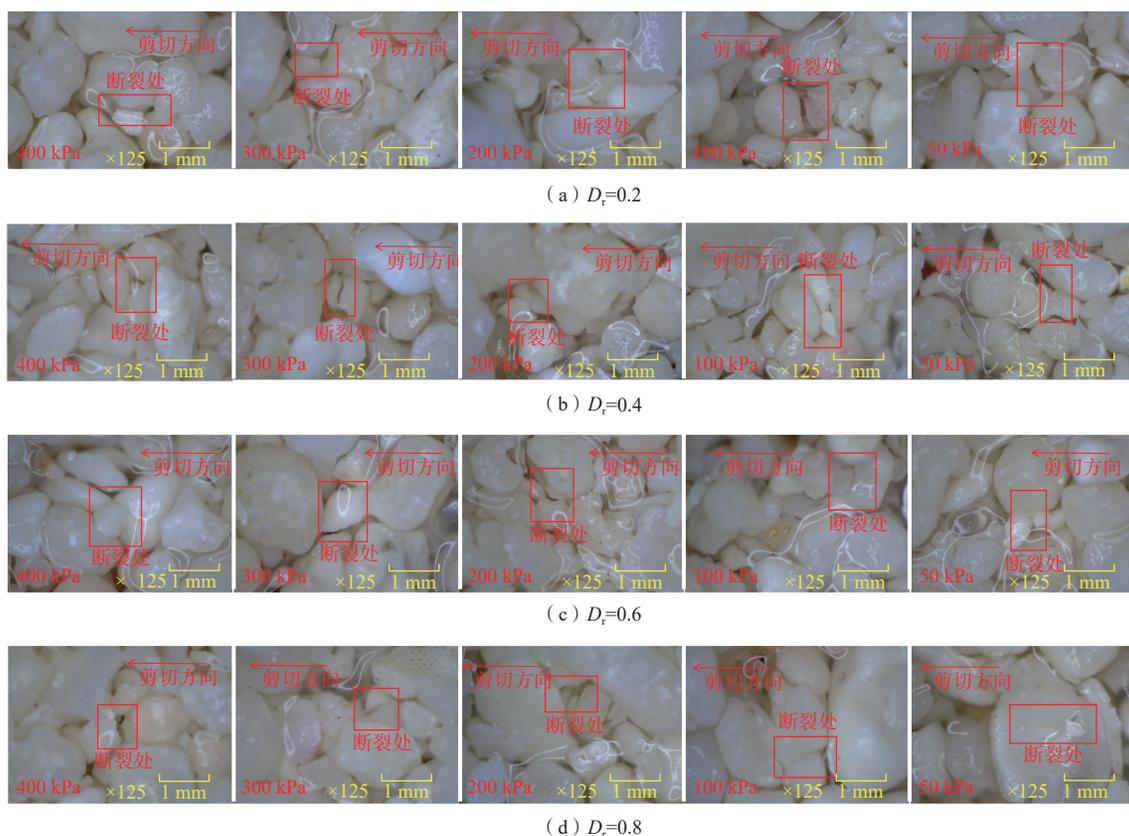


图 9 饱和钙质砂剪切破碎细观图 ($S_D=100\%$)

Fig. 9 Meso-graph of shear fracture for saturated calcareous sand ($S_D=100\%$)

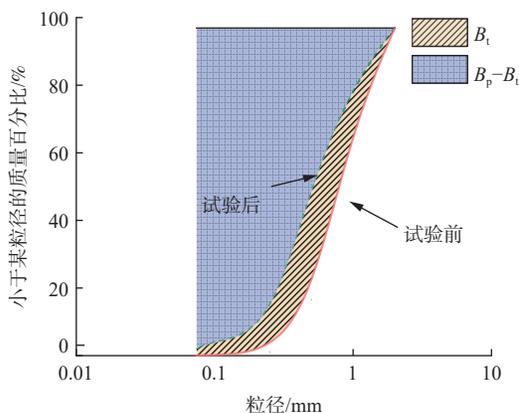


图 10 相对破碎势计算原理

Fig. 10 Calculation principle of relative crushing potential

相应地设定 $\sigma_v=200$ kPa 和 $D_r=0.4$, 将图 11(c) 某一 S_D 下 B_r 测试结果代入式(5)可反推出 β , 从而得到如图 14 所示的 $\beta-S_D$ 的关系曲线。

根据图 14 中的回归方程, 可得 β 为:

$$\beta = 0.00665S_D^{1.248} - 1.031 \quad (6)$$

综上可建立综合考虑 D_r 、 σ_v 及 S_D 影响的 B_r 经验计算模型为:

$$B_r = (1 + \alpha)(1 + \beta)\{a/[b + e^{c(\sigma_v/p_0)}] + d\} \quad (7)$$

其中:

$$\alpha = Ae^{BD_r} - C \quad (8)$$

$$\beta = GS_D^E - F \quad (9)$$

式(7)–(9)中, A 、 B 、 C 、 E 、 F 、 G 、 a 、 b 、 c 、 d 均为模型参数, 可通过钙质砂直剪试验进行标定, 本文中 $A=0.071$ 、 $B=3.267$ 、 $C=0.258$ 、 $E=1.248$ 、 $F=1.031$ 、 $G=0.00665$ 、 $a=3.141$ 、 $b=0.854$ 、 $c=-0.856$ 、 $d=-1.7$ 。

3.3 模型验证

为验证本文破碎势计算模型的可靠性, 现分别开展不同相对密实度、竖向应力和剪切程度下的南海饱和钙质砂直剪试验。主要包括:

(1) 采用 $\sigma_v=350$ kPa, $S_D=60\%$, $D_r=0.5$ 、 0.7 对南海饱和钙质砂进行直剪试验并与式(7)–(9)所得预测值进行对比, 结果见表 4 和图 15。由表 4 可知, 相同 σ_v 和 S_D 下, 采用本文破碎势计算模型预测的 B_r 与试验所得最大相对误差为 4.1%, 最小误差仅为 2.664%, 因此本文计算模型具有较好的预测精度。

(2) 采用 $D_r=0.5$, $S_D=60\%$, $\sigma_v=150$, 250 kPa 对钙质

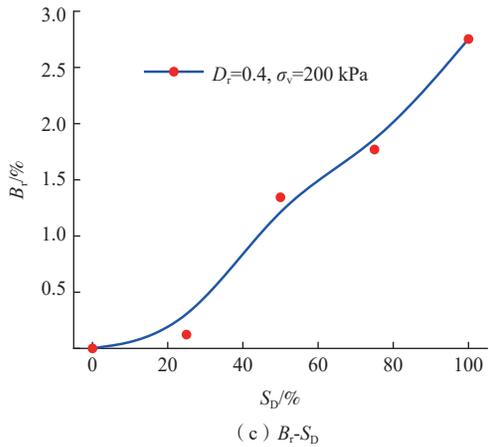
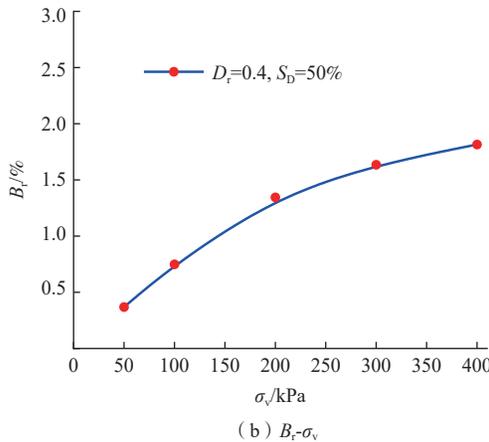
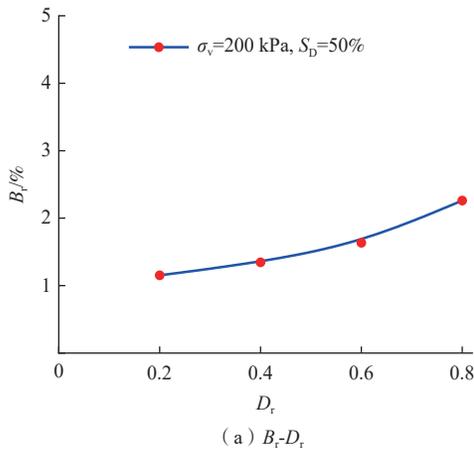


图 11 B_r 与 D_r 、 σ_v 、 S_D 间的关系曲线
Fig. 11 Relationship between B_r and D_r , σ_v , S_D

砂进行直剪试验结果见图 16, 而本文破碎势计算模型(式 7—9)所得预测值如表 5 所示。图 16 为 $D_r=0.5$, $\sigma_v=150, 250$ kPa 下饱和钙质砂直剪试验结果。由表 5 可知: 相同 D_r 和 S_D 下, 本文破碎势计算模型预测结果接近于实测值(最大相对误差仅为 3.43%), 因此本文计算模型是可行的。

(3) 采用 $D_r=0.5$, $\sigma_v=350$ kPa, $S_D=60\%$ 、 90% 对钙质砂进行直剪试验, 实测值与本文模型预测值对比结果

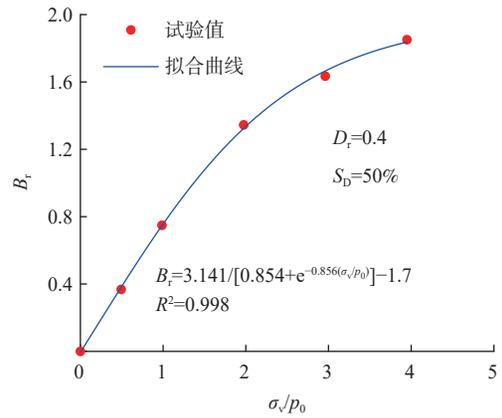


图 12 B_r - σ_v/p_0 关系曲线

Fig. 12 Relationship between B_r and σ_v/p_0

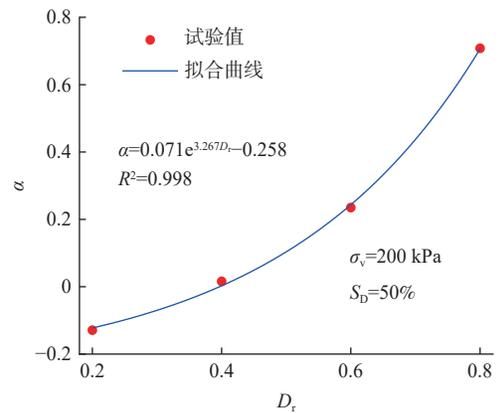


图 13 α - D_r 关系曲线

Fig. 13 Relationship between α and D_r

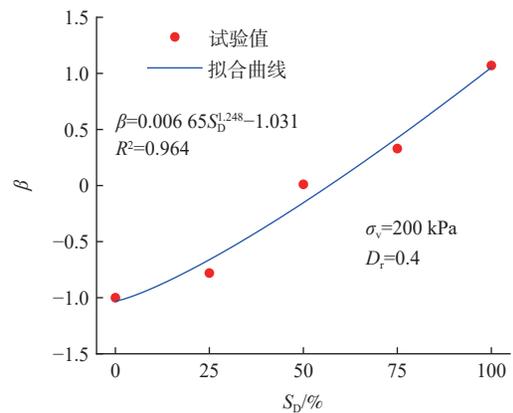


图 14 B_r - S_D 关系曲线

Fig. 14 Relationship between B_r and S_D

见下表 6。与前述结果类似, 模型预测结果与实测结果比较接近, 进一步验证了本文模型的可靠性。

综上, 本文所提出涵盖相对密实度、竖向应力和剪切程度的南海饱和钙质砂破碎势计算模型具有很好的可靠性, 可在实际工程中推广应用。

表 4 不同 D_r 下南海饱和钙质砂破碎势实测值与预测值

Table 4 Measured values and predicted values of South China Sea saturated calcareous sand under different D_r

D_r	破碎势		
	实测值	预测值	相对误差/%
0.5	2.048	2.132	4.100
0.7	2.852	2.778	2.664

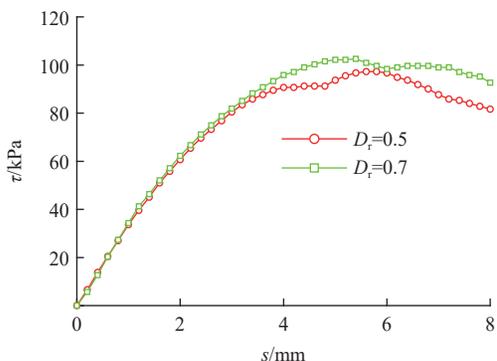


图 15 不同 D_r 下饱和钙质砂 τ - s 关系曲线 ($\sigma_v=350$ kPa)

Fig. 15 Shear stress-displacement relationships of saturated calcareous sand under different relative densities ($\sigma_v=350$ kPa)

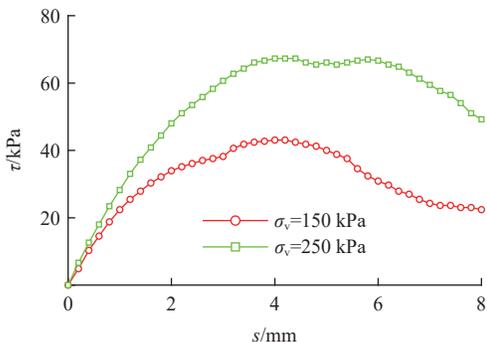


图 16 不同 σ_v 下饱和钙质砂 τ - s 关系曲线 ($D_r=0.5$)

Fig. 16 Shear stress-displacement relationships of saturated calcareous sand under different vertical stresses ($D_r=0.5$)

表 5 不同 σ_v 下南海饱和钙质砂破碎势实测值与预测值

Table 5 Measured values and predicted values of South China Sea saturated calcareous sand under different σ_v

σ_v /kPa	破碎势		
	实测值	预测值	相对误差/%
150	1.261	1.288	2.14
250	1.899	1.836	3.43

4 结论

(1) 相同 σ_v 下, 南海饱和钙质砂在不同 D_r 下的剪应力(τ)-位移(s)曲线大致相同, 且峰值强度相差较小; 而同一 D_r 下, 随着 σ_v 的增加, 饱和钙质砂的剪切应力峰值(τ_f)逐渐增大, 且相应的峰值位移(s_f)和残余

表 6 不同 S_D 下南海饱和钙质砂破碎势实测值与预测值

Table 6 Measured values and predicted values of South China Sea saturated calcareous sand under different S_D

S_D /%	破碎势		
	实测值	预测值	相对误差/%
60	2.048	2.132	4.10
90	3.679	3.578	2.82

应力(τ_r)也逐渐增大, 同时曲线波动现象逐渐显著。

(2) 南海钙质砂与典型陆源硅砂 (ISO 砂和 FJZ 砂) 直剪试验对比结果表明: 初始剪切模量 (G_0) 和 τ_f 方面 ISO 砂最大, FJZ 砂次之, 而钙质砂最小; D_r 对 ISO 砂和 FJZ 砂的强度参数 (有效内摩擦角 ϕ' 和有效黏聚力 c') 影响比较明显, 而对南海钙质砂的 ϕ' 和 c' 影响较小; 且南海钙质砂因不均匀颗粒间的咬合作用而呈现出一定的“似黏聚力”。

(3) 随着 σ_v 的增加, 钙质砂破碎逐渐由大颗粒转变为小颗粒, 而不同 D_r 下破碎的钙质砂颗粒粒径大小相近, σ_v 对钙质砂颗粒破碎的影响要强于 D_r ; $S_D=50\%$ 的钙质砂颗粒的破碎主要在相对薄弱处, 而 $S_D=100\%$ 的砂样破碎主要分布在单颗粒钙质砂中间位置; 在竖向应力和水平剪切共同作用下, 钙质砂出现裂纹的方向基本与剪切方向呈现一定的夹角。

(4) 随着 D_r 的增加, 破碎势 (B_r) 逐渐增加, 但增长幅度有限, σ_v 对 B_r 影响程度明显高于 D_r , 随着 S_D 的增加 B_r 逐渐提高, 且整个剪切过程均发生了颗粒破碎。建立南海钙质砂 B_r 计算模型综合考虑 σ_v 、 D_r 及 S_D 的影响, 可为我国南海工程建设提供指导。

参考文献 (References) :

[1] 中国科学院南沙群岛综合科学考察队. 南沙群岛自然地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1996. [The Nansha Islands Comprehensive Scientific Expedition Team of the Chinese Academy of Sciences. Physical geography of Nansha Islands[M]. Beijing: Science Press, 1996. (In Chinese)]

[2] 王新志, 王星, 刘海峰, 等. 珊瑚礁地基工程特性现场试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2065 - 2070. [WANG Xinzhi, WANG Xing, LIU Haifeng, et al. Field test study of engineering behaviors of coral reef foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 2065 - 2070. (in Chinese with English abstract)]

[3] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831 - 1836. [ZHU Changqi, CHEN Haiyang, MENG Qingshan, et

- al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7): 1831 – 1836. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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*, 2015, 30(7): 2043 – 2048. [ZHANG Jiaming, JIANG Guosheng, WANG Ren. Study on the influence of particle breakage and dilatancy on the shear strength of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 30(7): 2043 – 2048. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 秦月, 姚婷, 汪稔, 等. 基于颗粒破碎的钙质沉积物高压固结变形分析 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3123 – 3128. [QIN Yue, YAO Ting, WANG Ren, et al. Particle breakage-based analysis of deformation law of calcareous sediments under high-pressure consolidation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3123 – 3128. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 钟丽, 陈鑫莲, 刘晓璇, 等. 不同应力路径下钙质砂的力学及变形特性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(10): 2929 – 2941. [ZHONG Li, CHEN Xinlian, LIU Xiaoxuan, et al. Experimental study on the mechanical and deformation characteristics of calcareous sand under different stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(10): 2929 – 2941. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 黄良, 刘鑫, 兰恒星. 钙质砂特征形状分析及不排水剪切强度研究 [J]. *工程地质学报*, 2024, 32(2): 378 – 386. [HUANG Liang, LIU Xin, LAN Hengxing. Investigation on characteristic shape of calcareous sand and associated effect on undrained shear strength[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(2): 378 – 386. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘萌成, 陈茂林, 王涓. 钙质砂固结排水剪切特性三轴试验 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36(1): 47 – 57. [LIU Mengcheng, CHEN Maolin, WANG Juan. Investigation of shear behavior of calcareous sand in consolidated and drained triaxial tests[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(1): 47 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [9] LADE P V, LIGGIO C D, NAM J, et al. Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(7): 941 – 953.
- [10] 张家铭, 张凌, 刘慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(增刊 1): 3010 – 3015. [ZHANG Jiaming, ZHANG Ling, LIU Hui, et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(Sup1): 3010 – 3015. (in Chinese with English abstract)]
- [11] BRANDES H G. Simple shear behavior of calcareous and quartz sands[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29(1): 113 – 126.
- [12] WANG Xing, ZHU Changqi, WANG Xinzhi, et al. Study of dilatancy behaviors of calcareous soils in a triaxial test[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 37(9): 1057 – 1070.
- [13] 高雪, 高燕, 孙可天, 等. 剪切过程中钙质砂的颗粒破碎与能量演化 [J]. *中山大学学报(自然科学版中英文)*, 2023, 62(6): 11 – 21. [GAO Xue, GAO Yan, SUN Ketian, et al. Particle breakage and energy evolution of calcareous sand during shearing process[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2023, 62(6): 11 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 高敏, 何绍衡, 夏唐代, 等. 复杂应力路径下钙质砂颗粒破碎及抗剪强度特性 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(增刊 1): 321 – 330. [GAO Min, HE Shaoheng, XIA Tangdai, et al. Particles breakage and shear strength characteristic of calcareous sand under complex stress path[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Sup1): 321 – 330. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王青, 侯贺营, 康鑫睿, 等. 直剪条件下钙质砂强度及颗粒破碎 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(15): 6240 – 6247. [WANG Qing, HOU Heying, KANG Xinrui, et al. Strength and particle breakage of calcareous sand under direct shear test[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(15): 6240 – 6247. (in Chinese with English abstract)]
- [16] LÜ Yaru, LIU Jiagui, XIONG Ziming. One-dimensional dynamic compressive behavior of dry calcareous sand at high strain rates[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 11(1): 192 – 201.
- [17] 张季如, 华晨, 罗明星, 等. 三轴排水剪切下钙质砂的颗粒破碎特性 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(9): 1593 – 1602. [ZHANG Jiru, HUA Chen, LUO Mingxing, et al. Behavior of particle breakage in calcareous sand during drained triaxial shearing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9): 1593 – 1602. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 吴野, 王胤, 杨庆. 考虑钙质砂细观颗粒形状影响的液体拖曳力系数试验 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(9):

- 3203 – 3212. [WU Ye, WANG Yin, YANG Qing. Experiment on drag force coefficient of calcareous sand in liquid considering the effect of particle shape[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3203 – 3212. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 沈扬, 沈雪, 俞演名, 等. 粒组含量对钙质砂压缩变形特性影响的宏观研究 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 3733 – 3740. [SHEN Yang, SHEN Xue, YU Yanming, et al. Macro-micro study of compressive deformation properties of calcareous sand with different particle fraction contents[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 3733 – 3740. (in Chinese with English abstract)]
- [20] XU Dongsheng, HUANG Ming, ZHOU Yang. One-dimensional compression behavior of calcareous sand and marine clay mixtures[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(9): 04020137.
- [21] XU Dongsheng, LIU Huabei, RUI Rui, et al. Cyclic and postcyclic simple shear behavior of binary sand-gravel mixtures with various gravel contents[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 123: 230 – 241.
- [22] XU Dongsheng, TANG Zhiyuan, ZHANG Lei. Interpretation of coarse effect in simple shear behavior of binary sand-gravel mixture by DEM with authentic particle shape[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 195: 292 – 304.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [24] 肖建勇, 严伟, 乔世范, 等. 干密度与含水率对标准砂抗剪强度的影响研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(10): 3789 – 3797. [XIAO Jianyong, YAN Wei, QIAO Shifan, et al. Experimental research on the influence of dry density and moisture content on the shear strength of standard sand[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(10): 3789 – 3797. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 姚强岭, 王伟男, 杨书懿, 等. 含水率影响下砂质泥岩直剪特性及声发射特征 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2910 – 2922. [YAO Qiangling, WANG Weinan, YANG Shuyi, et al. Direct shear and acoustic emission characteristics of sandy mudstone under the effect of moisture content[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2910 – 2922. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王新志, 翁贻令, 王星, 等. 钙质土颗粒咬合作用机制 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(9): 3113 – 3120. [WANG Xinzhi, WENG Yiling, WANG Xing, et al. Interlocking mechanism of calcareous soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3113 – 3120. (in Chinese with English abstract)]
- [27] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1996.
- [28] 刘杰, 姚志华, 翁兴中, 等. 三轴剪切下珊瑚砂颗粒破碎规律及强度特征 [J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(5): 1463 – 1471. [LIU Jie, YAO Zhihua, WENG Xingzhong, et al. Particles breaking regularity and strength characteristics of coral sand under triaxial shear conditions[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(5): 1463 – 1471. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 闫超萍, 龙志林, 周益春, 等. 钙质砂剪切特性的围压效应和粒径效应研究 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(2): 581 – 591. [YAN Chaoping, LONG Zhilin, ZHOU Yichun, et al. Investigation on the effects of confining pressure and particle size of shear characteristics of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2): 581 – 591. (in Chinese with English abstract)]
- [30] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(10): 1177 – 1192.

编辑: 刘真真