

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221515

温度和盐度对珊瑚砂抗剪力学性能的影响

李 蓓¹, 雷 潇², 徐家鹏¹, 郭 宇¹, 许晓亮¹

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要: 珊瑚砂作为岛礁工程建设的重要材料, 其不同海洋环境下的物理力学特性直接影响岛礁构筑物的设计、施工及长期运行。为研究温度和盐度影响下珊瑚砂剪切力学特性, 采用自主研制的温控桩—土接触面三轴试验仪, 对南海海域的珊瑚砂进行了不同温度和盐度的三轴排水剪切试验。结果表明, 与标准砂类似, 珊瑚砂的剪切应力—应变曲线存在峰值, 且呈现出应变软化特征; 珊瑚砂的抗剪强度受温度影响不明显, 但对盐度比较敏感, 相对于淡水环境, 盐度使峰值抗剪强度下降了 2.5%~8.5%, 且围压越低降幅越大; 盐度对珊瑚砂的粘聚力有劣化效应, 其减小幅度接近 30%, 但对珊瑚砂内摩擦角的影响不明显。

关键词: 珊瑚砂; 剪切强度; 温度; 盐度; 粘聚力

中图分类号: [TV221. 2]; TU41

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0155-04

1 引言

我国在南海的吹填造岛工程大多是以珊瑚断枝、礁灰岩碎块及碎贝壳等为主要来源的珊瑚砂作为筑岛的原材料^[1]。近年来, 南海气候出现异常, 频繁发生南方涛动与厄尔尼诺现象, 导致南海地区的温度显著变化^[2], 加之该区域用于吹填筑岛的珊瑚砂含盐量较高, 因此有必要研究温度变化和海水环境作用对珊瑚砂剪切特性的影响。但已有研究主要聚焦于珊瑚砂与其他普通砂物理性质的差异性^[3], 对珊瑚砂物理力学性质影响的研究也主要集中于密实度、剪胀性等方面^[4-6], 涉及温度和盐度的研究尚不多见。鉴于此, 本文采用自主研制的温控桩—土接触面三轴试验仪^[7], 对南海海域的珊瑚砂进行了不同温度和盐度条件下的三轴排水剪切试验, 通过对比分析试验结果, 揭示温度等级和盐度对珊瑚砂剪切力学特性的影响规律, 以为海洋岛礁建设与开发提供技术借鉴。

2 试验概况

2.1 试验仪器及材料

试验使用了自主研制的温控桩—土接触面三轴试验仪, 与传统三轴试验仪相比, 增加了温度控

制系统与加温装置; 其中, 温度控制系统采用电脑控制能实时采集温度数据与精准加温; 加热装置主要由密封罩内侧装设的螺旋铜管与铜管内的液体组成, 在加温过程中主要通过铜管内部不同温度等级的液体循环改变压力室的温度, 将传统的三轴密封罩改装设计为双层有机玻璃密封罩以达到保温的效果。围压、轴压加载系统和数据采集系统与常规三轴试验仪器的结构整体接近。

试验材料为南海海域的珊瑚砂, 属于一种未胶结、结构松散的砂性土。为控制试验误差, 通过室内筛分试验, 选用粒径范围为 0.5~5.0 mm, 相对均匀、级配良好的珊瑚砂样, 其颗粒级配曲线见图 1, 珊瑚砂样的比重 G_s 为 2.73, 平均粒径 d_{50} 为 1.35 mm, 不均匀系数 C_u 为 1.31, 曲率系数 C_c 为 1.06, 最小孔隙比 e_{min} 为 0.88, 最大孔隙

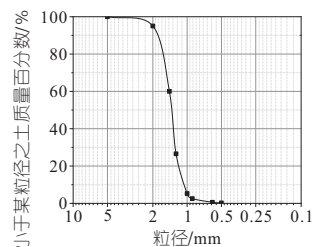


图 1 试验珊瑚砂筛分曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of test coral sand

收稿日期: 2022-07-23, 修回日期: 2022-09-01

基金项目: 湖北省自然科学基金创新群体项目(2020CFA049)

作者简介: 李蓓(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程, E-mail: 1025937919@qq.com

通讯作者: 许晓亮(1989-), 男, 副教授、硕导, 研究方向为岩土工程等, E-mail: sichuan106@ctgu.edu.cn

比 e_{max} 为 1.56。按照《土工试验规程》^[8], 利用橡胶膜制作直径 61.8 mm, 高度 120 mm 的标准圆柱样, 开展三轴排水剪切试验。

2.2 试验方案

南海诸岛近年来的气温变化范围约为 10~40 °C^[2], 海水盐度约为 31.8‰~34.9‰^[9]。针对珊瑚砂, 试验采用在南海分布较广的典型盐度值, 约为 34‰, 为研究不同盐度的影响, 分别设置 17‰ 盐度和淡水(无盐度)条件作为对照组; 同时设置 10、25、40 °C 三个温度等级和 50、100、200 kPa 三个围压等级。为了与常见的陆源砂土性质比较, 以标准砂作为对照组开展排水剪切试验, 由于标准砂剪切力学特性对温度不敏感^[10,11], 故仅考虑常温(25 °C)条件下不同盐度与围压等级的影响。具体试验方案见表 1, 相应的应力与温度路径见图 2。

表 1 试验方案
Tab. 1 Test scheme

试验材料	试验编号	温度/°C	围压/kPa	盐度/‰
珊瑚砂	S-1	10/25/40	50	34
	S-2		100	
	S-3		200	
	S-4	10/25/40	50	17
	S-5		100	
	S-6		200	
	S-7	10/25/40	50	0
	S-8		100	
	S-9		200	
标准砂	B-1	25	50/100/200	34
	B-2		50/100/200	17
	B-3		50/100/200	0

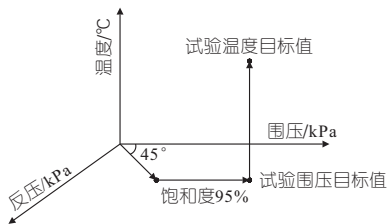


图 2 试验应力与温度路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test stress and temperature path

2.3 试验步骤

试验前先将干燥的珊瑚砂浸泡于纯水中煮沸 30 min, 进行初步排气, 然后使用海盐和电子盐度计进行盐度调制, 并按《土工试验规程》^[8] 中的三轴试验规定进行装样, 再采用反压饱和法使试样达到饱和状态, 围压、反压和温度的具体操作步骤如下。

步骤 1 先向压力室内注入液面超过顶盖量的纯水; 打开排水阀, 通过气压型围压控制装置施加初始围压 10 kPa。通过反压控制装置分级施

加反压(试验中, 为了使有效围压保持稳定, 反压增量和围压增量保持一致, 反压增量和围压增量按照 10 kPa/5 min 的速率同时施加), 当饱和度达到要求时停止施加反压, 继续施加围压至试验目标值。

步骤 2 利用温控系统使压力室温度达到 25 °C 的初始值, 保持排水条件, 然后根据试验方案的温度设计等级对压力室进行升温或降温控制, 压力室温度变化速率控制为每 8 min 改变 5 °C, 观察土体温度的变化, 待达到试验目标值时停止加温, 并维持目标值稳定 1 h。

(3) 待围压与温度均达到目标值且稳定时, 按照 0.2 mm/min 的轴向加载速率进行排水剪切试验, 直至试件破坏, 结束试验。

3 试验结果

3.1 应力—应变曲线特征分析

通过分析试验数据, 以 34‰ 浓度盐水环境和淡水环境为例, 绘制了不同温度和围压下的饱和珊瑚砂三轴排水剪切应力—应变关系曲线(图 3)。由图 3 可知, 珊瑚砂排水剪切应力—应变曲线呈现以下特征: ① 珊瑚砂三轴排水剪切试样的剪切应力—应变关系曲线存在峰值剪切应力, 呈现出应变软化特征。在加载开始阶段, 随着试样剪切应力不断增大, 轴向变形随之增大, 直至出现峰值剪切应力; 随着加载进行, 轴向变形继续增大, 其剪切应力随之减小并逐步趋于稳定。② 在盐水和淡水环境中, 试样的剪切应力均随围压的增大而增大, 且围压越大剪切峰值强度对应的峰值应变越大, 应力—应变关系曲线存在由软化型向硬化型发展的趋势, 表明围压约束了试件的变形, 提高了其剪切强度; 整体而言, 相对于淡水, 在

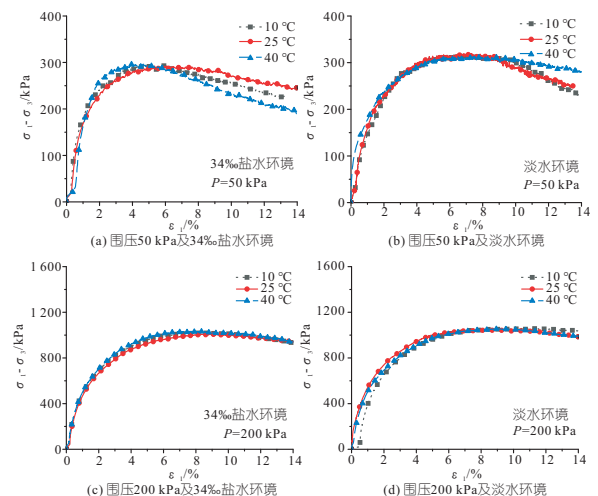


图 3 珊瑚砂剪切应力—应变关系曲线

Fig. 3 Shear stress-strain curve of coral sand

盐水环境中珊瑚砂的抗剪强度峰值有所下降,幅值达 2.5%~8.5%。③试样剪切应力—应变关系曲线软化情况与其密实程度有关,珊瑚砂剪切应力—应变关系曲线符合三轴试验中的密实类砂土剪切曲线特征^[12]。试验中珊瑚砂试样在剪切应力峰值前,颗粒间的咬合作用不断增强;在峰值强度后,颗粒间的咬合作用发生了改变。在剪切应力趋于稳定时,颗粒间的咬合作用已完全被破坏,此时珊瑚砂结构已彻底松动而成为一种强度不变的摩擦流体,在相当于残余强度的剪切应力作用下,发生体积恒定的连续剪切变形。

图 4 给出了标准砂三轴排水剪切应力—应变关系曲线。对比图 3、4 可知,与珊瑚砂类似,标准砂剪切应力—应变曲线也存在应变软化特征,但相同条件下,珊瑚砂抗剪性能明显高于标准砂,这主要是由于珊瑚砂的粘聚性及颗粒粗糙程度均高于标准砂。

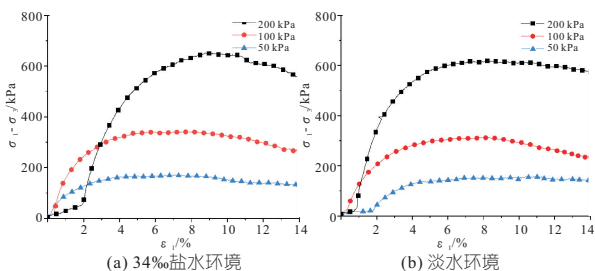


图 4 标准砂剪切应力—应变关系曲线

Fig. 4 Shear stress-strain curve of ISO standard sand

3.2 温度等级影响分析

为研究温度等级对珊瑚砂抗剪强度的影响,结合图 3 可知,在相同围压等级和盐度条件下,不同温度等级的珊瑚砂剪切应力—应变曲线比较接近,在围压等级为 200 kPa 时表现得尤为明显,可见温度对珊瑚砂剪切应力—应变曲线影响较小,且较高围压等级能进一步弱化温度对珊瑚砂剪切特性的影响。

图 5 给出了不同温度等级下珊瑚砂剪切峰值强度响应。由图 5 可看出,不同温度等级下,珊瑚砂剪切峰值强度整体较为平稳,且随着围压的变化,淡水与盐水环境中的珊瑚砂剪切峰值强度波动幅度介于 1%~3% 范围内,说明试验温度等级对珊瑚砂的剪切应力—应变曲线的影响并不明显,这与标准砂受温度的影响规律比较接近^[10,11];DI DONNA A 等^[10]认为一般温度下砂土颗粒的表面特征变化极其微小,颗粒间的咬合作用相对比较稳定,而其剪切强度变化不大。

3.3 盐度等级影响分析

结合图 5 进一步分析盐度对珊瑚砂剪切强度

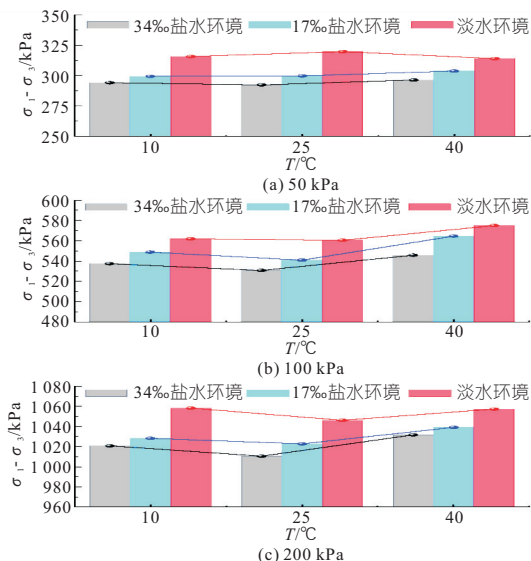


图 5 不同温度等级下珊瑚砂剪切峰值强度响应

Fig. 5 Shear peak strength of coral sand at different temperature levels

的影响,不难发现,在相同温度和围压等级下,17‰、34‰两种盐度下的珊瑚砂剪切峰值强度比较接近,后者略低于前者,但盐水环境中的剪切峰值强度明显低于淡水环境,降低幅度在 2.5%~8.5% 之间,且围压越大降低幅度越小,表明围压的升高可削弱盐水环境对珊瑚砂剪切峰值强度的影响。初步认为是由于较大的围压使珊瑚砂的密实度增大、孔隙率减少,导致盐水溶液渗入砂土试样的范围和数量减小,从而减轻了对珊瑚砂剪切强度的影响。

以 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,淡水和盐水环境下的包络线拟合结果见图 6,同时表 2 列出了各工况下珊瑚砂的粘聚力 c 与内摩擦角 φ 值。由图 6、表 2 可知,珊瑚砂剪切破坏仍满足摩尔—库伦准则,不同温度等级下珊瑚砂抗剪强度参数值均比较接近,同样说明珊瑚砂剪切强度性能受温度的影响也不明显。同样,由表 2 可知,珊瑚砂存在较小的初始粘聚力 c 值,这与文献^[13]的研究结论一致。

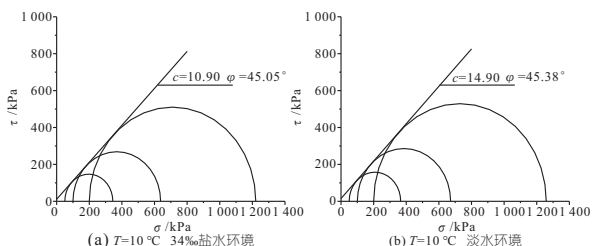


图 6 不同工况下试验珊瑚砂的破坏包线图

Fig. 6 Failure envelope diagram of coral sand under different working conditions

此外,表 2 还给出了标准砂在三种盐度下的 c 、 φ 值,随着盐度增大,标准砂的粘聚力略有增加,内摩擦角基本不变;对比来看,珊瑚砂的抗剪

表 2 不同工况下试验珊瑚砂与标准砂的粘聚力与内摩擦角

Tab.2 Cohesion and internal friction angle of coral sand and ISO standard sand under different working conditions

材料	温度 盐度		c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	材料	温度 盐度		c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
	/°C	/‰				/°C	/‰		
珊瑚砂	10	34	10.90	45.05	标准砂	40	34	10.50	45.25
		17	11.30	45.07		17	13.07	45.19	
		0	14.90	45.38		0	14.90	45.37	
	25	34	10.10	44.90		25	0	0.80	37.36
		17	12.13	45.01		17	1.40	37.84	
	0	15.30	45.09	34	3.70	37.97			

强度指标显著高于标准砂,两种盐度下珊瑚砂的粘聚力相对淡水环境分别降低了约 19.08%、32.14%,但内摩擦角 φ 均在 45° 左右,变化很小。可见,不论标准砂还是珊瑚砂,盐度对其内摩擦角影响很小,但对珊瑚砂的粘聚力影响较大,盐度对珊瑚砂剪切强度的影响主要是通过改变其粘聚力实现的。

关于盐度对标准砂和珊瑚砂抗剪特性的影响机制,结合已有研究^[14]分析认为,对于标准砂,盐度的增加使砂颗粒间吸引力增强,导致颗粒聚集,此外盐晶体可能沉积在颗粒的孔隙中,使其具有微弱的胶结效应,相应粘聚力略有增大;而对于珊瑚砂,由于砂土颗粒表面存在不平衡的负电荷,会吸引盐溶液中的阳离子,从而形成“负电荷—水分子—阳离子”双电层,盐度增加使砂土颗粒表面吸附更多的阳离子,导致双电层厚度减小,即砂土颗粒间的结合水膜厚度减小,土体结构随之由集聚状态转变为絮凝状态,从而引起粘聚力的减小,最终导致土体的抗剪强度降低。

4 结论

a. 珊瑚砂剪切应力—应变关系曲线存在峰值,且呈现出明显的应变软化特点,符合密实砂性土的典型剪切曲线特征;在达到峰值强度前,珊瑚砂颗粒间的咬合作用不断增强,但峰值强度后珊瑚砂颗粒重新排列且变得松散,颗粒间的咬合作用受到破坏而导致剪切强度有所减小。

b. 珊瑚砂存在 10~15 kPa 的初始粘聚力,并且其内摩擦角较高,接近 45° ,均高于标准砂及其他常见的陆源砂;与标准砂类似,珊瑚砂抗剪力学特性受温度影响并不明显;相较于淡水环境,随着盐度增加,标准砂粘聚力略有增加,而珊瑚砂粘聚力明显降低,在南海常见的 34‰ 盐度下,其粘聚力降幅可达 30%;相比于粘聚力,盐度对两种砂的内摩擦角影响并不明显。

c. 盐水环境可使标准砂颗粒间吸引力增强,且盐晶体的沉积呈现出微弱胶结效应,进而标准砂的粘聚力略有增大;但盐度增大会使珊瑚砂颗粒间结合水膜厚度减小,珊瑚砂初始的集聚状态被打破,其粘聚性明显降低。工程中,珊瑚砂常作为浅层地基材料,可从减小海水长期入渗角度考虑,更好地利用珊瑚砂的初始粘聚力,同时也可通过增大围压以降低盐度对其剪切强度的影响。

参考文献:

- [1] 申春妮,方祥位,姚志华,等. 珊瑚砂微生物固化体三轴压缩声发射试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 134-140.
- [2] 刘伟,刘巧珍. 1980—2018 年南海海表温度时空分布研究浅析[J]. 环境生态学, 2020, 2(11): 51-56.
- [3] SANDOVAL E A, PANDO M A. Experimental assessment of the liquefaction resistance of calcareous biogenous sands [J]. Earth sciences research journal, 2012, 16(1): 55-63.
- [4] 张家铭,张凌,刘慧. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (增刊 1): 3010-3015.
- [5] 王新志,汪稔,孟庆山. 钙质砂室内载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 147-151,156.
- [6] 文哲,段志刚,李守定,等. 中国南海岛礁吹填珊瑚砂剪切力学特性[J]. 工程地质学报, 2020, 28 (1): 77-84.
- [7] 李春红,孔纲强,张鑫蕊,等. 温控桩—土接触面三轴试验系统研制与验证[J]. 岩土力学, 2019, 40 (12): 4955-4962.
- [8] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL237-1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [9] 万道静. 南海海表盐度的分布特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [10] DI DONNA A, FERRARI A, LALOUI L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures [J]. Canadian geotechnical journal, 2016, 53(4): 659-672.
- [11] 孙学谨,孔纲强,李春红,等. 温度影响下透明土—混凝土接触面摩擦力学特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 632-638.
- [12] 李广信,张丙印,于玉贞. 土力学(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [13] 程忠庆,阳平,姜海波. 珊瑚砂中浅基础抗风可靠性动态分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 113-115.
- [14] 周荣,庄心善,周睦凯,等. 氯化钠溶液对膨胀土强度影响研究[J]. 湖北工业大学学报, 2022, 37 (1): 100-103.

Study on Hydraulic Connection Characteristics of Local Open Channel and Pressurized Tunnels in Water Transfer Project

DONG He-fei¹, XU Wen-ren¹, LAI Yong²

- (1. Wenzhou Oujiang Water Diversion Development Limited Company, Wenzhou 325000, China;
2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China)

Abstract: The local open channels play a certain role in regulating and storing water, but the water flow in the junction section with open channel variation and pressure is relatively complex, which may cause adverse water flow phenomena such as air intake, whirlpool and surges. In order to study the hydraulic pattern of the connecting section between the open channel and the pressurized tunnel, based on the water conveyance tunnel of Wenzhou Oujiang water diversion project, a 30:1 large scale normal local hydraulic model was built according to the gravity similarity criterion. The hydraulic pattern, water surface line distribution, velocity distribution and wave characteristics under different conditions were observed through hydraulic model tests. The flow trend, depth, velocity and wave characteristic parameters under different working conditions were obtained. The research results show that the flow in the open channel and the pressurized junction section through the gradual transition is in good shape, and there is no air intake, backflow and surge, which provides support for the safe operation of the project.

Key words: water transfer project; open channel flow; free water tunnel; pressurized tunnel; hydraulic pattern; model test

(上接第 154 页)

Effect of Coplanar Double Fissures on Mechanical Properties and Failure Characteristics of Sandstone

ZHANG De-chao, XIAO Tao-li, SHE Hai-cheng

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: The internal defects of rock mass have a significant effect on its mechanical properties and damage and fracture. The influence of fissure angles and bridge lengths on rock mechanical properties and failure was analyzed by uniaxial compression test and DIC technique. The research findings are as follows: The peak stress and elastic modulus of the samples have an obvious change trend with the change of the fissure angle. Compared with the length of the rock bridge, the fissure angle has a more significant effect on the mechanical properties of the rock. With the increase of fissure angle, the number of surface cracks, main failure cracks and surface spalling decreases, while the area of falling blocks increases obviously. However, with the increase of bridge length, the characteristics of crack propagation and spalling are basically the same. In the process of crack propagation, the connection of rock bridge is related to the fissure angle and the length of rock bridge. In the low fissure angle, the failure mode of rock samples is dominated by tensile failure cracks; With the increase of the fissure angle, the performance is as follows: the tension damage crack to shear damage crack transformation to form a mixed tensile shear damage mode; At the same time, with the increase of bridge length, the more difficult the rock bridge is to penetrate, and the local crack expansion failure changes from tensile-shear crack to tensile crack.

Key words: sandstone-like; coplanar double fissures; fissure angle; rock bridge length; DIC technique

(上接第 158 页)

Effect of Temperature and Salinity on Shear Mechanical Properties of Coral Sand

LI Bei¹, LEI Xiao², XU Jia-peng¹, GUO Yu¹, XU Xiao-liang¹

- (1. Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Power China Sichuan Electric Power Engineering Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Coral sand is an important material for island and reef engineering construction. Its physical and mechanical properties in different marine environments directly affect the design, construction and long-term operation of island and reef structures. In order to study the shear mechanical properties of coral sand under the influence of temperature and salinity, the triaxial drainage shear tests of coral sand in the South China Sea were carried out at different temperatures and salinity by using the self-developed temperature controlled pile-soil interface triaxial tester. The results show that similar to ISO standard sand, the shear stress-strain curves of coral sand have peaks, presenting its characteristics of strain softening; The shear strength of coral sand is not significantly affected by temperature, but it is sensitive to salinity. Compared with fresh water environment, the peak shear strength of coral sand in salt water environment decreases by 2.5%-8.5%, and the lower of confining pressure, the greater of decrease range; Salinity has a deterioration effect on the cohesion of coral sand, and its reduction range is about 30%, but the effect on the internal friction angle of coral sand is not obvious.

Key words: coral sand; shear strength; temperature; salinity; cohesion