

珊瑚海水海砂混凝土三轴力学性能

陈宇良^{1,2,3}, 李培泽¹, 陈宗平³

(1. 广西科技大学土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 广西高校防灾减灾与预应力技术重点实验室, 广西 柳州 545006;
3. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004)

摘 要: 为研究珊瑚海水海砂混凝土的三轴力学性能, 通过常规三轴试验研究了不同骨料组合与侧向围压对试件破坏形态、应力-应变曲线、屈服应力、屈服应变及损伤演变的影响规律。结果表明: 珊瑚粗骨料试件更易受围压值影响, 在 9 MPa 的围压值下试件表面出现裂缝形式转变与塑性流动, 在 12 MPa 的围压值下其应力-应变曲线出现“应力平台段”, 碎石粗骨料试件则分别在 15 MPa 与 24 MPa 的围压值下出现上述变化; 在围压值达到 15 MPa 后, 珊瑚粗骨料试件的应力-应变曲线呈现具有第二线性分支的双线性形状; 随着围压值增加, 试件的屈服应力、屈服应变及耗散能均逐渐提高, 损伤发展逐渐延缓。最后, 提出了珊瑚海水海砂混凝土的屈服应力计算式, 可为相关理论分析与工程应用提供借鉴。

关键词: 珊瑚海水海砂混凝土; 三轴受压; 应力-应变曲线; 能量耗散; 损伤分析

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-2814-10

网络出版时间: 2023-08-14



Triaxial Mechanical Properties of Coral Seawater Sea Sand Concrete

CHEN Yuliang^{1,2,3}, LI Peize¹, CHEN Zongping³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China;
2. Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation and Prestress Technology of Guangxi Colleges and Universities, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 3. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety, Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To analyze the triaxial mechanical properties of coral seawater sea sand concrete, the effects of aggregate and lateral confining pressure on the failure mode, stress-strain curve, yield stress, yield strain, and damage evolution of specimens were investigated via conventional triaxial tests. The results show that the coral coarse aggregate specimen is more susceptible to the influence of confining pressure value. The cracks form transformation and plastic flow appear on the surface of the specimen at a confining pressure value of 9 MPa. The stress-strain curve appears a stress platform section' at a confining pressure value of 12 MPa, while the gravel coarse aggregate specimen appears the above changes at confining pressure values of 15 MPa and 24 MPa, respectively. After a confining pressure value reaches 15 MPa, the stress-strain curve of the coral coarse aggregate specimen shows a bilinear shape with a second linear branch. The dissipation energy of the specimens gradually increases and the damage development gradually delays with the increase of confining pressure, yield stress and yield strain. In addition, the yield stress calculation formula of coral seawater sea sand concrete was also proposed, thus providing a reference for the relevant theoretical analysis and engineering application.

Keywords: coral seawater sea sand concrete; triaxial compression; stress-strain curve; energy dissipation; damage analysis

在临海地区大量使用陆地自然资源, 不仅会面临材料运输周期长、工程成本增加等问题, 还会对陆地自然资源的资源储备造成巨大负担^[1-2]为此, 将

临海地区丰富的海水、海砂和珊瑚等海洋资源制成珊瑚海水海砂混凝土(CSSC), 用于临海地区工程建设, 无疑是解决该问题的有效措施之一。

收稿日期: 2023-04-28。 修订日期: 2023-05-19。

基金项目: 中国博士后科学基金(2021M693854); 八桂学者专项经费资助项目([2019]79); 广西研究生教育创新计划项目(YCSW2023474)。

第一作者: 陈宇良(1987—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2023-04-28. Revised date: 2023-05-19.

First author: CHEN Yuliang (1987—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: ylchen@gxust.edu.cn

相较于碎石粗骨料, 珊瑚粗骨料具有更复杂的颗粒组成、表面结构和内部孔隙结构, 这导致两者间的力学性能有着显著差异。Lyu 等^[3]通过对珊瑚粗骨料的特征和形态进行研究发现, 珊瑚粗骨料的粗糙表面会显著降低珊瑚混凝土的坍落度和可泵送性, 但有助于增加珊瑚粗骨料与水泥基体间的黏结。Huang 等^[4]通过分析珊瑚混凝土轴压试验与数字图像相关(DIC)观测结果, 发现海砂对混凝土强度同时具有积极和消极两种影响, 珊瑚粗骨料与碎石粗骨料的破坏机制存在明显差异。然而, 现有的研究多集中于单轴受力情况, 对于多轴受力情况下的研究仍鲜见报道。

归因于混凝土结构特性与外界环境因素的影响, 实际工程中的混凝土结构多处于三轴受力状态, 如 FRP 约束混凝土^[5]、位于土体内的防渗墙^[6]及受冲击荷载作用下的混凝土结构^[7]等。诸多学者对混凝土三轴力学性能的研究表明^[8-11], 随着侧向围压增加, 孔隙率与养护龄期对混凝土强度的影响均逐渐减小。Deng 等^[12]探究了全珊瑚混凝土的三轴力学特性, 发现大多数应力-应变曲线存在“塑性流动平台段”。综上可知, 三轴受压会对混凝土的力学性能产生显著影响。然而, 目前对 CSSC 的研究多局限于单一受力情况, 其不同因素下的三轴力学特性仍有待探究。该方面的研究成果可为相关结构设计与分析提供理论依据, 并为 FRP 约束 CSSC 和圆钢管约束 CSSC 的研究提供借鉴。因此, 有必要对 CSSC 的三轴力学性能进行研究。

本工作以骨料组合与侧向围压为变化参数, 设计制作了 99 个圆柱体试件进行常规三轴试验, 并利用扫描电子显微镜(SEM)分析其微观形貌特征, 研究 CSSC 的三轴力学性能、耗能能力及损伤演变规律, 对比三轴受压下珊瑚粗骨料与碎石粗骨料间的破坏机理差异, 以期对 CSSC 的理论研究和工程应用提供借鉴。

1 实验

1.1 试件设计与制作

以 3 种骨料组合(珊瑚-河砂、珊瑚-海砂、碎石-海砂)及 11 种侧向围压值 $\sigma_w(0 \leq \sigma_w \leq 30 \text{ MPa})$, 中间级差 3 MPa)作为变化参数, 设计制作了 99 个几何尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的圆柱体试件进行常规三轴试验, 试件强度等级为 C30。水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。海砂和海水均取自南海, 海水的主要化学组成如表 1 所示。海砂与河砂均属于中砂,

细度模数分别为 2.77、2.97。珊瑚来自南海, 根据颗粒形貌可分为鹿角状、杆状珊瑚和珊瑚礁, 将其破碎、筛分后得到骨料粒径为 5~20 mm 的珊瑚粗骨料。珊瑚粗骨料的多孔隙结构使其吸水率较高, 为满足试件的和易性, 设计附加用水 W_a 用于预湿珊瑚粗骨料, W_a 的种类与拌和水相同。试件自然养护至 28 d 后进行试验。珊瑚骨料破碎前的表现特征如图 1 所示。分别依据 T/CECS 10090—2020《混凝土用珊瑚骨料》、GB/T 14685—2011《建设用卵石、碎石》及 GB/T 14684—2022《建设用砂》对粗、细骨料的级配进行测试, 粗、细骨料的级配曲线如图 2 所示。粗骨料物理性能指标如表 2 所示。混凝土的配合比如表 3 所示。



图 1 珊瑚骨料破碎前的表现特征

Fig. 1 Apparent characteristics of coral aggregate before crushing

1.2 三轴试验

采用由中科院和 SIMENS 公司联合研发的 RMT-301 试验机^[16]进行常规三轴试验。以荷载-位移混合控制模式加载, 具体加载制度如下: 荷载控制阶段, 轴向荷载与侧向围压以相同速率施加, 以确保试件在达到目标围压值前均匀受力。在达到目标围压值后, 维持侧向围压稳定, 转为位移控制模式; 位移控制阶段, 轴向作动器以 0.02 mm/s 的加载速率施加轴向荷载, 直至获取完整下降段或轴向位移过大时停止试验。在此过程中, 侧向围压始终维持恒定。

2 结果与讨论

2.1 试件破坏形态

对比加载结束后不同骨料组合试件的破坏形态发现, CSSC 与珊瑚河砂混凝土(CRSC)的破坏形态相近, 故仅选取碎石海砂混凝土(GSSC)与 CSSC 进行破坏形态分析。图 3 分别为 GSSC 和 CSSC 在不同围压值下的破坏形态。

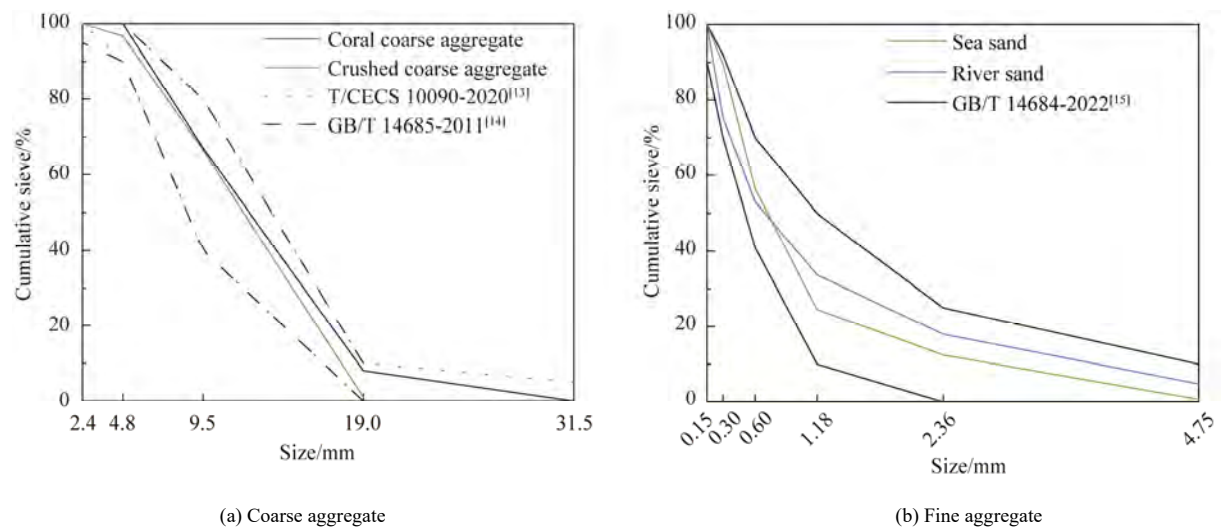


图 2 骨料级配曲线
Fig. 2 Aggregate grading curves

表 1 海水的主要化学成分

Table 1 Main chemical constituents of seawater g/L				
NaCl	Na ₂ SO ₄	MgCl ₂	CaCl ₂	KCl
24.282	4.014	5.035	1.151	0.586

如图 3 所示, 当 $\sigma_w=0$ MPa 时, 试件发生纵向劈裂破坏, 试件表面出现数条平行于荷载方向、宽度不一的纵向裂缝; 当 $3 \leq \sigma_w \leq 12$ MPa 时(CSSC 为 $3 \leq \sigma_w \leq 6$ MPa), 试件表面的裂缝转为水平角约为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 的斜向裂缝, 在主裂缝周围伴有较多相互交错的斜向微裂纹, 呈现斜向剪切破坏; 当 $15 \leq \sigma_w \leq 30$ MPa 时(CSSC 为 $9 \leq \sigma_w \leq 30$ MPa), 试件表面斜向裂缝已完全消失, 转而出现在水平方向发展、分

布较为均匀的不规则裂纹, 裂纹数量随着围压值的增加而增加。此外, 由于水泥基体沿裂缝面塑性流动, 部分裂纹处出现鼓起。裂缝发展形式的转变主要是由于: 一方面, 侧向围压的环向约束作用使试件内部主要破坏模式由粗骨料–水泥基体界面破坏逐渐转为粗骨料自身被剪断、压碎而破坏; 另一方面, 在高围压值下, 强环向约束作用在抑制裂缝发展的同时, 也改变了裂缝原有的发展趋势, 使裂缝转向薄弱部位发展, 表现为裂缝由近似直线的斜向发展, 转为不规则的横向发展。此外, 强环向约束作用使部分黏结强度较低或应力集中部位的水泥基体沿裂缝向试件外表面塑性流动, 导致试件表面裂缝处出现鼓起。

表 2 粗骨料的物理性能指标

Table 2 Physical performance index of coarse aggregate						
Coarse aggregate	Stacking density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Apparent density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Water absorption (by mass)	Crush index/%	Tube compressive strength/MPa	Chloride ion content/%
Gravel	1 412.0	2 703.9	0.31%	19.89		
Coral	879.9	1 667.0	11.81%	4.86	4.11	0.02

表 3 混凝土配合比

Table 3 Mix proportions of concrete										
Concrete	Material consumption/(kg·m ⁻³)								Slump/mm	Cube crushing strength/MPa
	Coral	Gravel	Sea sand	River sand	Cement	Water	Super-plasticizer	Water		
Coral sea sand concrete	655.75		760.08		535	214.0	1.40	75.08	156	32.09
Coral river sand concrete	655.75			760.08	535	214.0	3.00	75.08	155	30.16
Gravel sea sand concrete		1 208.54	542.94		535	217.7	1.48	0	185	41.11

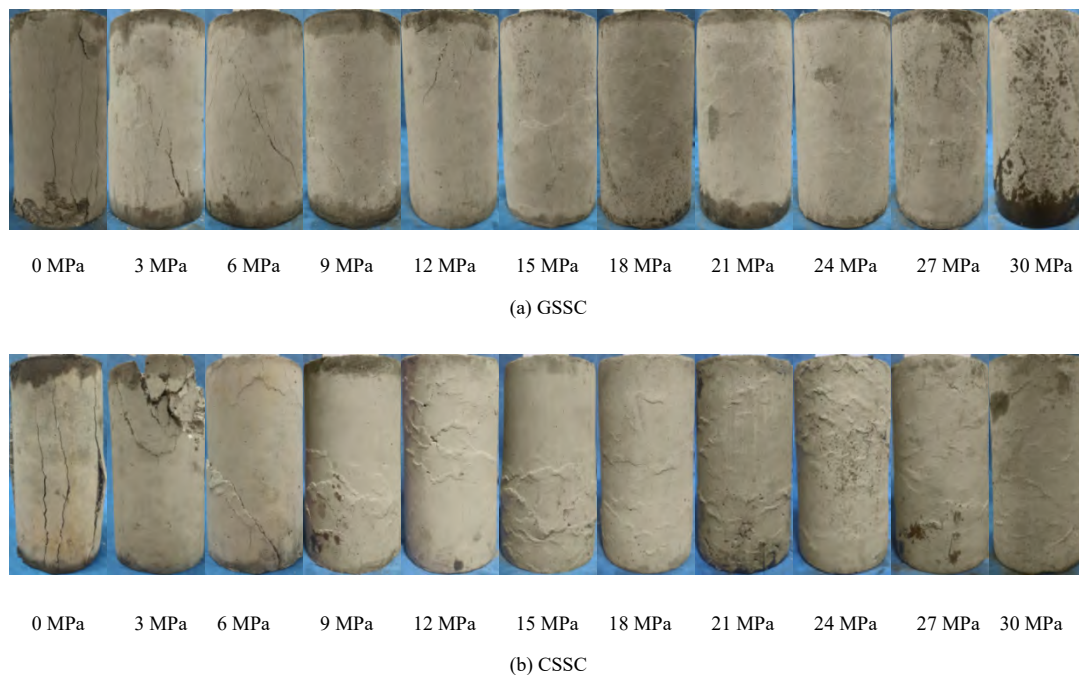


图 3 试件的典型破坏形态

Fig. 3 Typical failure modes of specimens

2.2 微观形貌分析

对加载试验结束后的试件进行取样, 分别获取试件在经历单轴受压和三轴受压作用后, 试件破坏面处的碎块, 并使用 SEM 观察其微观形貌特征, 结果如图 4 所示。

图 4a 为水泥基体与珊瑚粗骨料的结合面。水泥基体由珊瑚骨料表面孔隙向珊瑚内部流动并凝结硬化^[5], 使水泥基体与珊瑚骨料之间存在机械咬合作用, 提高了水泥基体与珊瑚骨料间的结合力。图 4b

和图 4c 分别为珊瑚粗骨料在经历单轴($\sigma_w=0$ MPa)和三轴作用($\sigma_w=30$ MPa)后的破坏断面。在单轴受压下, 试件的纵向劈裂破坏使珊瑚粗骨料直接断裂, 骨料断面平整, 内部孔隙完整性较好; 在三轴受压下, 受环向约束作用影响, 珊瑚粗骨料被压碎, 骨料断面粗糙, 表面存在较多裂纹并附着有较多水泥基体, 此外, 由于内部孔隙坍塌, 且破碎的珊瑚碎片在三轴受压作用下逐渐填充内部孔隙, 珊瑚骨料发生体积收缩。

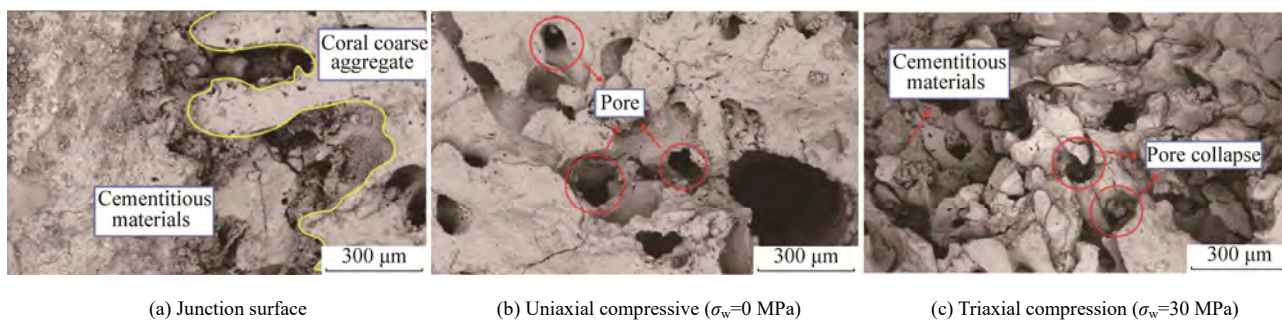


图 4 水泥基体与珊瑚粗骨料结合面的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of the interface between cement matrix and coral coarse aggregate

2.3 应力-应变曲线

图 5 为不同变化参数试件的应力-应变全过程曲线图及示意图。由图 5 可见, 随着侧向围压值的增加, 试件的应力-应变全过程曲线可分为 3 种类型。

I 型: OA 段, 试件内部未产生裂纹, 由水泥砂

浆和粗骨料组成的受力骨架稳定发挥承载作用, 应力-应变曲线呈线性发展; AB 段, 随着轴向荷载持续增加, 水泥砂浆、粗骨料依次开裂, 试件内部发生应力重分布。在此阶段后期, 应力增长速率逐渐减缓, 试件承载力临近峰值; BC 段, 应力-应变曲线经过峰值点后, 试件内部损伤严重, 无环向约束

作用或环向约束作用不足以维持试件受力骨架稳定, 曲线开始下降, 但与单轴受压相比, 三轴受压

试件的下降速率显著减小, 试件最终呈直裂缝劈裂破坏或斜向剪切破坏。

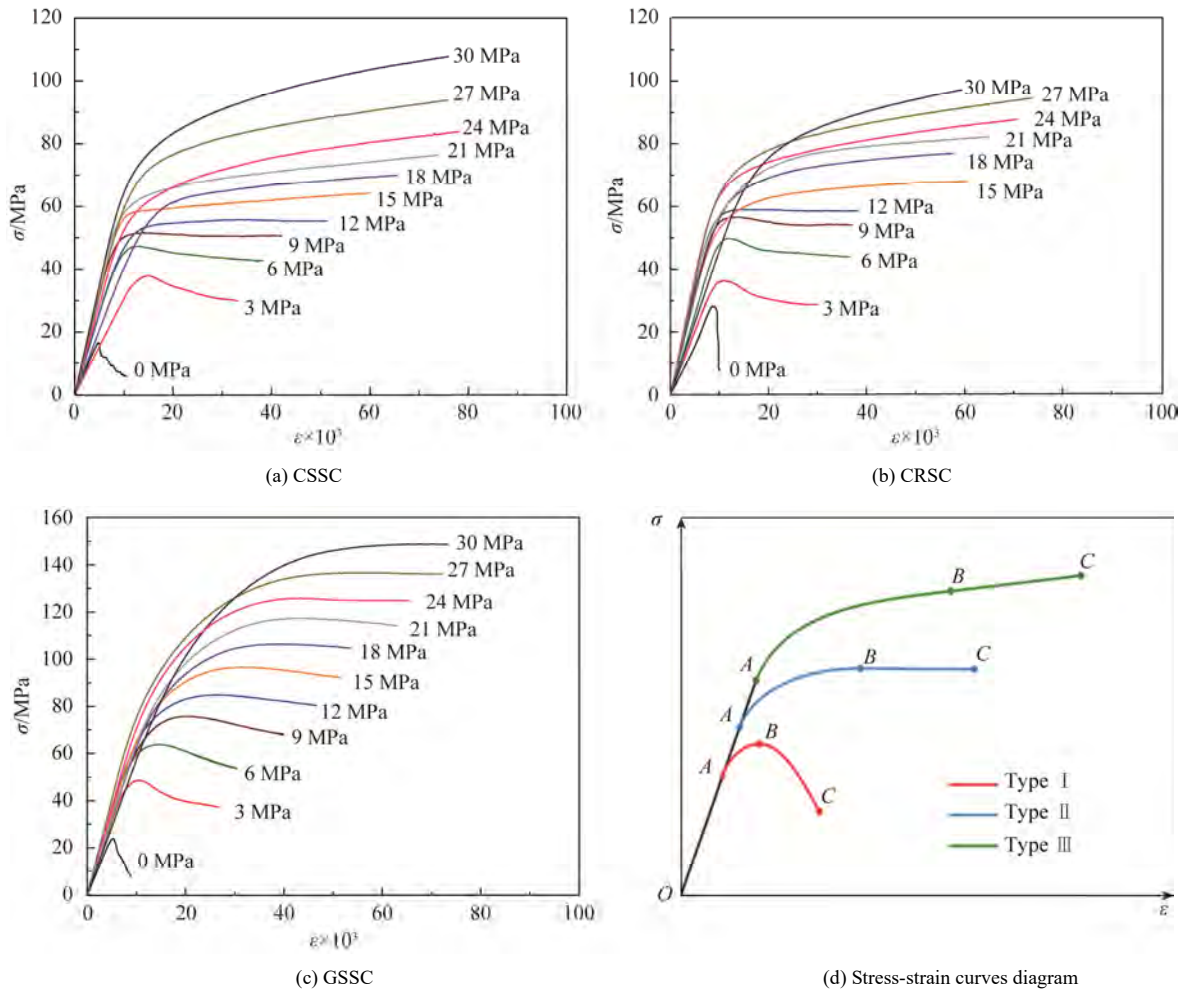


图 5 试件的应力-应变全过程曲线及曲线示意图
Fig. 5 Stress-strain whole process curves and curve diagram of the specimen

II型: 曲线 OA 段与 AB 段皆与I型相似, 但在 AB 段中, 试件的塑性变形段更大, 且在此阶段后期, 试件承载力逐渐停止增长; BC 段, 在轴向荷载持续增加的过程中, 试件内部粗骨料和孔隙被不断压实, 轴向应变逐渐增大, 但在环向约束的作用下, 受力骨架维持平衡状态, 应力-应变曲线进入“应力平台段”, 即应变快速增加, 但应力近似维持稳定, 因此该阶段曲线发展近似水平, 试件表面裂缝转变为横向锯齿状裂纹。

III型: OA 段, 与I、II型相似; AB 段, 强环向约束作用使应力-应变曲线的塑性变形段进一步增加。此阶段后期, 试件内部趋于密实, 试件受力骨架得到强化, 因此曲线没有进入“应力平台段”, 而是呈逐渐上升趋势; BC 段, 在强环向约束作用下, 处于密实状态的试件再次进入“线弹性变形阶段”, 曲线近似直线。最终, 应力-应变曲线呈现出具有第

二线性分支的双线性形状, 试件外表面可明显看到由塑性流动产生的残余变形。

由图 5 可知, 应力-应变曲线受侧向围压值和粗骨料种类影响较大, 细骨料种类对其影响相对较小。当 $\sigma_w=0$ MPa (即单轴受压) 时, 3 种试件应力-应变曲线相似, 曲线在经过峰值点后迅速下降。当 $3 \leq \sigma_w \leq 6$ MPa 时 (GSSC 为 $3 \leq \sigma_w \leq 21$ MPa), 随着侧向围压值的逐级增加, 环向约束作用增强, 试件的承载力逐渐提高, 因此曲线峰值点逐渐升高, 并且, 由于环向约束的强阻裂作用, 试件峰值后的强度损失降低, 曲线 BC 段斜率减小, 属于I型。当 $\sigma_w=12$ MPa 时 (GSSC 为 $24 \leq \sigma_w \leq 30$ MPa), 曲线后半段接近水平, 属于II型。当 $15 \leq \sigma_w \leq 30$ MPa 时, 曲线出现近似线性的第二线性分支, 属于III型。

对比图 5a~图 5c 可见, 当 $\sigma_w=12$ MPa 时 CSSC 与 CRSC 的曲线由I型转为II型, 而 GSSC 的曲线在

$\sigma_w=24$ MPa 时才发生转变。这是由于珊瑚粗骨料强度较低且内部为多孔结构,抑制裂缝扩展的能力较差,使围压抑制裂缝扩展的能力得到有效发挥,因此 12 MPa 的围压值便可维持试件内部受力骨架的稳定。而碎石粗骨料自身具有较高的承载和阻裂能力,在受力骨架破坏时的荷载较大,因此需要更高的围压才能维持受力骨架稳定。

此外,III型曲线只出现在 CSSC 和 CRSC 中,GSSC 的曲线在转为II型后,并未随着围压值的增加转向III型,而是继续表现出II型。这是由于应力重分布后,破碎的珊瑚粗骨料在三轴受压作用下体积不断收缩,并逐渐达到密实状态,试件进入强化阶段,应力随着应变的增加呈近似线性的增长;与之相异的是,GSSC 在应力重分布后,碎石粗骨料体积收缩小,试件很快达到密实状态。但此时试件的轴向荷载较大,已接近水泥砂浆和碎石粗骨料的强度极限,侧向围压的约束作用不足以使试件的受力骨架得到强化,仅能维持平稳状态,因此试件未能进入强化阶段。

3 影响因素分析

3.1 屈服应力与屈服应变的获取

结合图 5 及 2.3 节分析可知:1) 在三轴受压应力-应变曲线中,随着 σ_w 逐级增加,曲线峰值前塑性变形区延长,粗骨料的不可逆损伤也随之增大;

2) 当 σ_w 达到一定等级时,在大幅压缩变形下,应力-应变曲线出现“应力平台段”或第二线性分支。此时,峰值应力的定义已不再适用,且在实际工程结构设计中将“应力平台段”或第二线性分支的强度作为极限强度也存在风险^[17]。因此,采用偏移应变定义法获取试件的屈服应力 σ_y 和屈服应变 ε_y 的影响规律,在本研究中,应变偏移量采用传统的 0.2%。为确保数据获取的一致性,以便进行不同参数试件间的对比分析,所有试件的屈服点均按照相同方式选取。图 6 为偏移屈服点选取示意图。表 4 为各试件特征点参数。

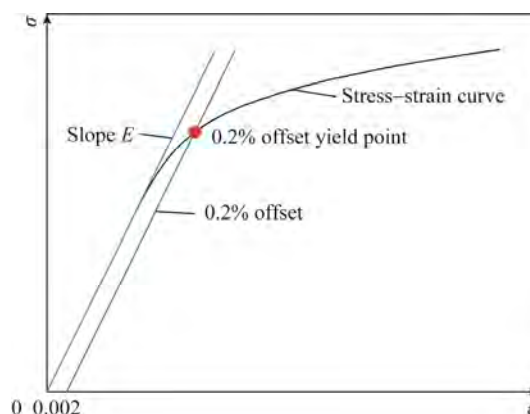


图 6 偏移屈服点选取示意图

Fig. 6 Offset yield point selection diagram

表 4 试件特征点参数

Table 4 Characteristic point parameters of specimen

Specimen No.	σ_y /MPa	$\varepsilon_y \times 10^3$	Specimen No.	σ_y /MPa	$\varepsilon_y \times 10^3$	Specimen No.	σ_y /MPa	$\varepsilon_y \times 10^3$
CSSC-0	13.20	5.58	CRSC-0	21.76	7.75	GSSC-0	19.68	6.05
CSSC-3	36.48	9.19	CRSC-3	37.88	9.71	GSSC-3	48.04	11.04
CSSC-6	46.53	11.03	CRSC-6	45.58	11.18	GSSC-6	60.14	11.99
CSSC-9	49.35	10.77	CRSC-9	55.30	11.31	GSSC-9	66.21	12.60
CSSC-12	53.22	10.70	CRSC-12	54.45	10.41	GSSC-12	77.00	14.37
CSSC-15	57.64	11.27	CRSC-15	56.91	11.35	GSSC-15	80.66	14.15
CSSC-18	58.56	11.50	CRSC-18	60.43	12.50	GSSC-18	82.57	14.76
CSSC-21	58.92	11.92	CRSC-21	61.21	11.49	GSSC-21	85.93	14.35
CSSC-24	59.65	11.79	CRSC-24	63.71	10.65	GSSC-24	89.95	14.79
CSSC-27	66.04	11.48	CRSC-27	65.57	11.43	GSSC-27	89.50	13.98
CSSC-30	69.01	13.66	CRSC-30	66.43	14.39	GSSC-30	98.58	19.19

Note: Taking CSSC-3 as an example, CSSC represents the coral sea sand specimen, and 3 represents the lateral confining pressure value of 3 MPa. In addition, CRSC represents coral river sand specimens, and GSSC represents gravel sea sand specimens.

σ_y is yield stress. ε_y is yield stress.

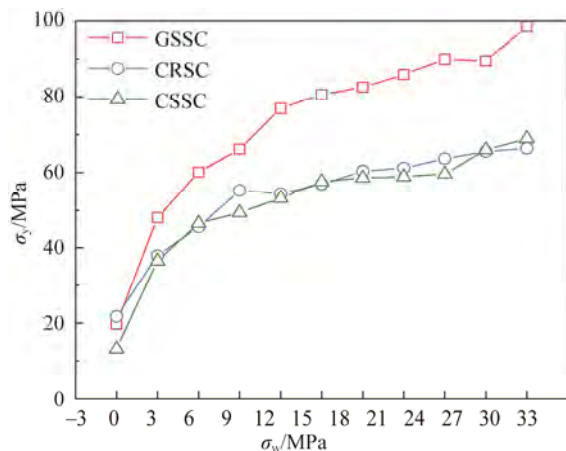
3.2 侧向围压对屈服应力的影响

图 7a 为侧向围压与屈服应力的关系。归因于侧向围压的环向约束作用,3 种试件的屈服应力均随着围压值的增加呈逐渐上升趋势;当围压值由 0 MPa 上升至 30 MPa 时,CSSC、CRSC 和 GSSC 的屈服应

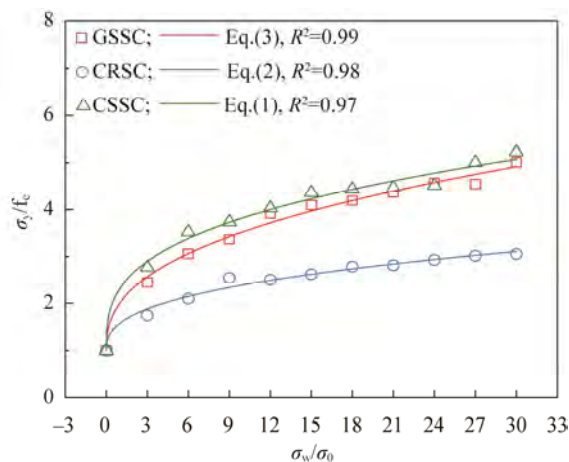
力分别提高了 423%、205%和 401%。CRSC 和 GSSC 在单轴受压下有着相近的屈服应力(两者相差 2.08 MPa),但随着围压值增加,两者的屈服应力差值逐渐扩大,当围压值为 30.00 MPa 时,屈服应力差值达到 32.15 MPa。

这是由于侧向围压提供的环向约束作用增加了碎石粗骨料与水泥基体间的黏结,使碎石的承载能力得到充分发挥,因此屈服应力提高较大;珊瑚粗

骨料低强度、多孔隙的特性削弱了环向约束作用带来的增强效果,限制了试件屈服应力的发展,因此屈服应力在达到一定值后增长变缓。



(a) Relationship between lateral confining pressure and yield stress



(b) Comparison between theoretical value and experimental value

图7 侧向围压与屈服应力的关系及计算结果对比

Fig. 7 Relationship between lateral confining pressure and yield stress and comparison of calculation results

基于试验数据,分别得到了不同侧向围压下 CSSC[式(1)]、CRSC[式(2)]和 GSSC[式(3)]的屈服应力计算公式,计算值与试验值对比如图 7b 所示。

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_0} = 1 + 3.1 \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_0} \right)^{0.33}, \quad R^2 = 0.99 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_0} = 1 + 1.9 \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_0} \right)^{0.38}, \quad R^2 = 0.98 \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_0} = 1 + 3.1 \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_0} \right)^{0.40}, \quad R^2 = 0.99 \quad (3)$$

式中: σ_0 为单轴受压试件的屈服应力。

3.3 侧向围压对屈服应变的影响

图 8 为侧向围压与屈服应变的关系。根据围压值范围,3 种试件的屈服应变可分为 3 个阶段。

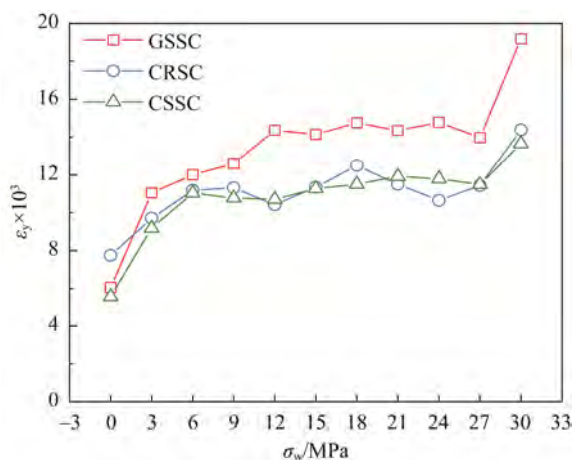


图8 侧向围压与屈服应变的关系

Fig. 8 Relationship between lateral confining pressure and yield strain

上升阶段:当 $0 \leq \sigma_w \leq 6$ MPa 时(GSSC 为 $0 \leq \sigma_w \leq 12$ MPa),随着侧向围压的增加,试件内部孔隙被压缩,粗骨料与水泥基体黏结力提高,屈服应变呈上升趋势,且上升幅度较大;波动变化阶段:当 $6 \leq \sigma_w \leq 27$ MPa 时(GSSC 为 $12 \leq \sigma_w \leq 27$ MPa),屈服应变随着围压值增加呈波动变化,但变化幅度相对上升阶段而言较小。这是由于:高围压在提高屈服应变的同时,也会在围压值上升至目标围压值时对试件造成初始损伤^[10],两者的耦合作用导致了屈服应变的波动变化;二次上升阶段:当 $27 \leq \sigma_w \leq 30$ MPa 时(GSSC 为 $\sigma_w = 30$ MPa),围压提供的正面效果远超过负面效果,从因此屈服应变再次得到大幅度提高。

3.4 不同骨料组合对屈服应力的影响

图 9a 为骨料组合对屈服应力的影响。由图 9a 可知,骨料组合对屈服应力的影响显著。在单轴受压下,碎石海砂试件和珊瑚河砂试件的屈服应力相近,珊瑚海砂试件的屈服应力最小;在三轴受压下($3 \leq \sigma_w \leq 30$ MPa),珊瑚河砂试件和珊瑚海砂试件的屈服应力相近,碎石海砂试件的屈服应力则远高于前者。

珊瑚的多孔隙结构使其具有内养护效果,促进了试件内部的水化反应。此外,在浇筑过程中,胶凝材料流入珊瑚粗骨料外表面孔隙中,在凝结硬化后,珊瑚粗骨料与胶凝材料间存在机械咬合作用,使两者有着更强的黏结力。因此在单轴受压下,碎石海砂试件和珊瑚河砂试件有着相近的屈服应力。而珊瑚海砂试件则由于珊瑚和海砂的组合使其氯盐

含量过高, 氯盐与水泥水化产物发生反应生成了膨胀性物质钙矾石^[19], 使试件内部产生微裂纹, 造成强度降低。在三轴受压下, 环向约束作用抑制了试件的横向扩张, 碎石粗骨料强度高、密度大的特点使碎石海砂试件的屈服应力远高于珊瑚河砂试件和珊瑚海砂试件。此外, 由氯盐造成的微裂纹和海砂中的贝壳造成的应力集中等负面影响, 均被环向约束作用削弱, 因此珊瑚河砂试件和珊瑚海砂试件的屈服应力在三轴受压下相差较小, 平均相差 2.15 MPa。

3.5 不同骨料组合对屈服应变的影响

图 9b 为骨料组合对屈服应变的影响。与屈服应力的变化相似: 在单轴受压下, 由于河砂的细度模数比海砂高, 更有利于填充粗骨料间的空隙, 提高

试件密实度, 因此珊瑚河砂试件的屈服应变最高; 在三轴受压下, 珊瑚河砂试件和珊瑚海砂试件的屈服应变相差较小, 平均相差 0.49×10^{-3} 。此外, 环向约束作用使碎石粗骨料与水泥基体间的咬合力提高, 变形能力增强, 珊瑚粗骨料则由于强度较低而过早破坏, 导致珊瑚河砂试件和珊瑚海砂试件的屈服应变均小于碎石海砂试件。

3.6 能量耗散

为分析在三轴受压状态下, CSSC、CRSC 及 GSSC 发生不可逆损伤时的能量耗散能力, 通过图 10a 所示方式计算了各试件在达到屈服点时的耗散能 W_y 。根据计算结果, 得到了如图 10b 所示的耗散能与侧向围压之间的关系。

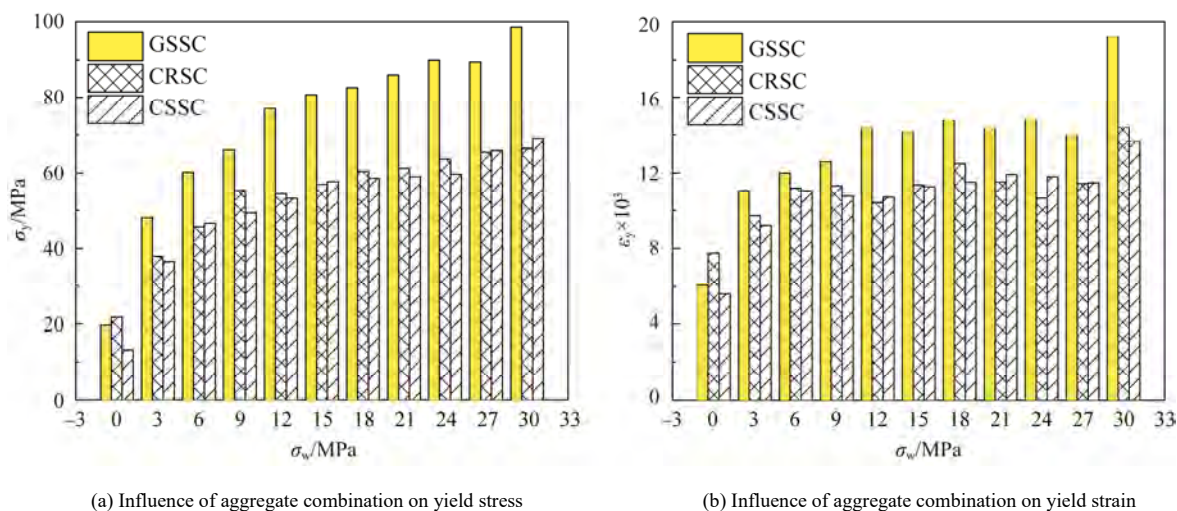


图 9 骨料组合对屈服应力和屈服应变的影响

Fig. 9 Influence of aggregate combination on yield stress and yield strain

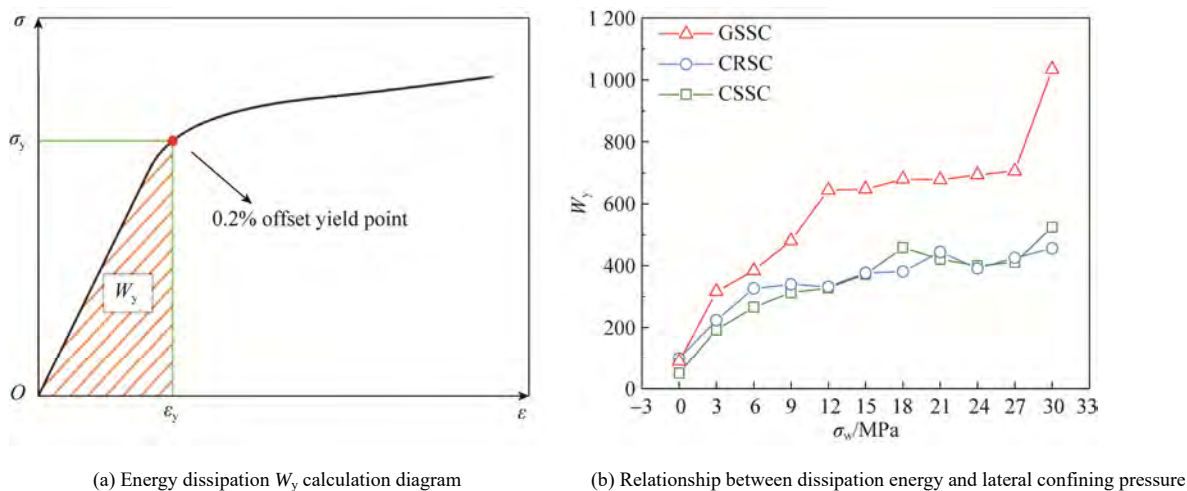


图 10 耗散能计算示意图及耗散能与侧向围压的关系

Fig. 10 Calculation diagram and the relationship between dissipated energy and lateral confining pressure

由图 10b 可见, 随着围压值增加, 约束作用不断增强, 因此各试件的耗散能均呈逐渐上升趋势。

在此过程中, 由于珊瑚粗骨料低强、多孔的特性使其在施加围压的过程中受到的初始损伤更大, 在受

力过程中更易形成不可逆损伤, 因此 GSSC 的耗散能高于 CSSC 和 CRSC。此外, CSSC 和 CRSC 的耗散能始终相差较小, 这表明细骨料种类对耗散能的影响较小。

3.7 损伤分析

为反映 CSSC、CRSC 和 GSSC 在三轴受压状态下的损伤情况, 采用损伤变量 D 来表示试件的受损情况, $0 \leq D \leq 1$, D 值越大, 表明试件受损程度越高。 D 值采用式(4)计算。

$$D = 1 - \frac{E^*}{E_0} \quad (4)$$

式中: E^* 为割线模量; E_0 为应力-应变曲线上上升段 0.4 倍峰值应力处的割线模量。

图 11 为试件应变与损伤的关系曲线。由图 11 可见: 1) 加载初期, 试件处于无损伤的线弹性阶段,

损伤变量 D 接近于 0。2) 随着应变持续增加, 各试件相继出现损伤。其中, 单轴受压试件损伤发展速率最高, 曲线呈现直线上升, 而三轴受压试件的曲线斜率则相对较缓。3) 随着围压值增加, 环向约束作用的增强使试件内部裂纹的产生和发展均被抑制, 减缓了试件内部的损伤演化速率。表现为损伤曲线进入快速发展阶段的应变增加, 损伤增长速率下降。4) 相较于 GSSC, CSSC 和 CRSC 的初始损伤应力更小, 损伤发展速率更快。这归结于两者内部裂缝演变规律间的差异: 裂缝发展至碎石粗骨料时, 其发展方向会因受到阻碍而发生改变, 损伤发展因此减缓, 珊瑚粗骨料则由于强度较低而被裂缝直接贯穿, 对损伤发展的抑制作用较差。5) 低强度的珊瑚粗骨料降低了侧向围压提供的损伤抑制效益, 因此在相同围压值下, CSSC 与 CRSC 的损伤发展速率高于 GSSC。

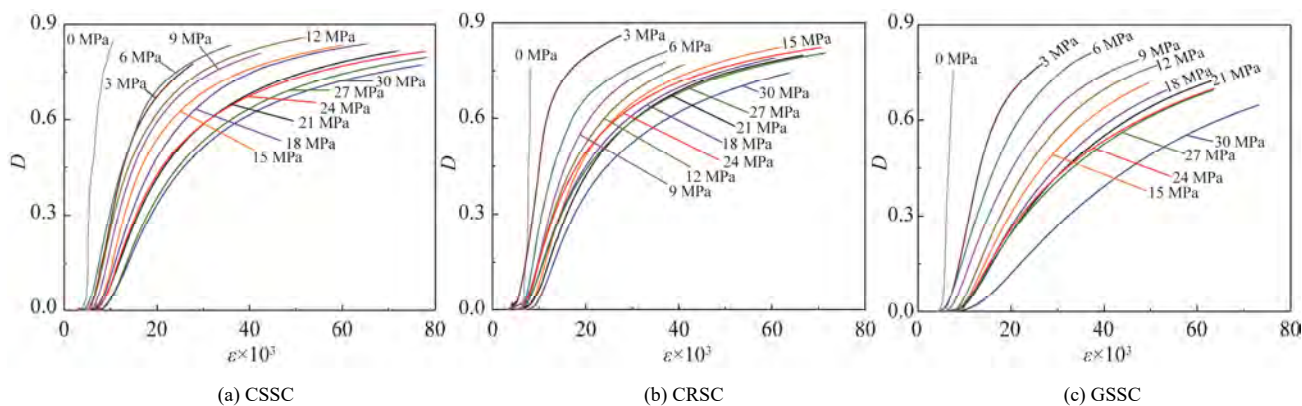


图 11 应变与损伤的关系曲线

Fig. 11 Relationship curves between strain and damage (D)

4 结论

1) 侧向围压与粗骨料种类对试件的破坏形态有显著影响。随着侧向围压值增加 ($0 \leq \sigma_w \leq 30$ MPa), 3 种试件均依次出现纵向、斜向及横向的主裂缝; 相较于碎石粗骨料, 珊瑚粗骨料更易受围压值的影响, 在较小围压值下 ($\sigma_w = 9$ MPa) 便出现塑性流动。

2) 随着围压值增加, 3 种试件的应力-应变曲线峰值点提高、下降段变缓; 当围压值分别达到 24 MPa 和 12 MPa 时, 碎石海砂试件和珊瑚河砂、珊瑚海砂试件的曲线出现“应力平台段”; 当 $15 \leq \sigma_w \leq 30$ MPa 时, 珊瑚河砂、珊瑚海砂试件的曲线出现第二线性分支。

3) 试件的屈服应力与耗散能均随围压值的增加呈上升趋势, 屈服应变则会分别经历上升阶段、波动变化阶段及二次上升阶段; 根据试验数据, 提

出了珊瑚海砂混凝土的屈服应力计算式。

4) 三轴受压下, 珊瑚海砂试件与珊瑚河砂试件的屈服应力和屈服应变相差较小, 平均相差 2.15 MPa 和 0.49×10^{-3} ; 侧向围压抑制了试件的损伤演化, 随着围压值增加, 试件的损伤发展速率逐渐减缓。

参考文献:

- [1] 苏晨, 麻海燕, 余红发, 等. 不同珊瑚骨料对珊瑚混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1771–1780.
- SU Chen, MA Haiyan, YU Hongfa, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1771–1780.
- [2] 蔡新光, 赵青, 陈惠苏. 珊瑚混凝土研究现状[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1753–1764.
- CAI Xinguang, ZHAO Qing, CHEN Huisu. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(8): 1753–1764.
- [3] LYU B C, WANG A G, ZHANG Z H, et al. Coral aggregate concrete: numerical description of physical, chemical and morphological properties of coral aggregate[J]. Cem Concr Compos, 2019, 100: 25–34.
- [4] HUANG Y J, LI X W, LU Y, et al. Effect of mix component on the

- mechanical properties of coral concrete under axial compression[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 223: 736–754.
- [5] WANG J, FENG P, HAO T Y, et al. Axial compressive behavior of seawater coral aggregate concrete-filled FRP tubes[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 147: 272–285.
- [6] FARAJZADEHHA S, ZIAEI MOAYED R, MAHDIKHANI M. Comparative study on uniaxial and triaxial strength of plastic concrete containing nano silica[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 244: 118212.
- [7] MALECOT Y, ZINGG L, BRIFFAUT M, et al. Influence of free water on concrete triaxial behavior: the effect of porosity[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 120: 207–216.
- [8] ZINGG L, BRIFFAUT M, BAROTH J, et al. Influence of cement matrix porosity on the triaxial behaviour of concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2016, 80: 52–59.
- [9] CHEN D, YU X T, LIU R W, et al. Triaxial mechanical behavior of early age concrete: experimental and modelling research[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 115: 433–444.
- [10] CHEN Y L, LI P Z, YE P H, et al. Experimental investigation on the mechanical behavior of polyvinyl alcohol fiber recycled aggregate concrete under triaxial compression[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 350: 128825.
- [11] MENG K, XU L H, CHI Y. Experimental investigation on the mechanical behavior of hybrid steel-polypropylene fiber reinforced concrete under conventional triaxial cyclic compression[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 291: 123262.
- [12] DENG Z H, WU D, WANG Y M. Mechanical properties and failure criteria of coral concrete under true triaxial compression[J]. *J Mater Sci*, 2022, 57(37): 17622–17636.
- [13] 中国工程建设标准化协会. 混凝土用珊瑚骨料: T/CECS 10090—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建设用卵石、碎石: GB/T 14685—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建设用砂: GB/T 14684—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [16] 陈宇良, 朱玲, 张绍松, 等. 粉煤灰陶粒混凝土三轴受压破坏机制及强度准则[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(8): 2196–2204.
- CHEN Yuliang, ZHU Ling, ZHANG Shaosong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(8): 2196–2204.
- [17] 宋玉普, 赵国藩, 彭放, 等. 三轴加载状态下轻骨料混凝土的变形特性[J]. *大连理工大学学报*, 1994, 34(3): 344–351.
- SONG Y P, ZHAO G F, PENG F, et al. *J Dalian Univ Technol(in Chinese)*, 1994, 34(3): 344–351.
- [18] SU B Y, ZHOU Z W, LI Z Q, et al. Experimental investigation on the mechanical behavior of foamed concrete under uniaxial and triaxial loading[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 209: 41–51.
- [19] 徐金俊, 唐月月, 陈宇良, 等. 海水海洋骨料混凝土霍普金森压杆动态力学性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(14): 233–242.
- XU Jinjun, TANG Yueyue, CHEN Yuliang, et al. *J Vib Shock(in Chinese)*, 2022, 41(14): 233–242.