

三轴受压粉煤灰陶粒轻骨料混凝土力学性能试验

陈宇良 朱玲 吉云鹏 吴辉琴 叶培欢

Experiment study on mechanical properties of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under triaxial compression

CHEN Yuliang, ZHU Ling, JI Yunpeng, WU Huiqin, YE Peihuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211028.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空心粉煤灰对铁氧体-炭黑/水泥基复合材料吸波性能的影响

Effects of hollow fly ash on microwave absorbing properties of ferrite-carbon black/cement based composites

复合材料学报. 2017, 34(6): 1381-1387 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170121.002>

高延性纤维增强偏高岭土-粉煤灰基聚合物在不同环境下的自愈合性能

Self-healing characteristics of engineered geopolymers incorporating metakaolin and fly ash under different environments

复合材料学报. 2018, 35(10): 2841-2850 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171227.005>

自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力学性能

Mechanical property of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear stress

复合材料学报. 2019, 36(8): 1984-1994 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181030.002>

冻融循环作用下玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土抗压强度试验与微观结构

Compression-tensile tests and meso-structure of basalt fiber-slag powder-fly ash concrete under freeze-thaw cycles

复合材料学报. 2021, 38(3): 953-965 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200722.002>

自密实轻集料混凝土双轴受力学性能

Mechanical properties of self-compacting lightweight aggregate concrete under biaxial loading

复合材料学报. 2019, 36(4): 993-1000 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180619.001>

纳米SiO₂改性轻骨料混凝土性能

Properties of nano-SiO₂ modified lightweight aggregate concrete

复合材料学报. 2019, 36(2): 498-505 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180330.001>



DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20211028.005

三轴受压粉煤灰陶粒轻骨料混凝土
力学性能试验



分享本文

陈宇良^{*1,2}, 朱玲¹, 吉云鹏¹, 吴辉琴¹, 叶培欢¹

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 柳州 545006; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510641)

摘 要: 以粉煤灰陶粒轻骨料浸泡时间、强度等级、侧向围压为变化参数, 共设计 120 个粉煤灰陶粒轻骨料混凝土试件进行常规三轴受压试验, 研究其在三轴应力状态下的力学性能。试验观察了轻骨料混凝土的破坏过程及破坏形态, 获取了三轴受力状态下的应力-应变全过程曲线, 分析了各变化参数对其三轴受压力学性能的影响规律。研究表明: 随着围压值的增大, 试件破坏由竖向劈裂破坏变为斜向剪切破坏, 当围压值大于 12 MPa 时, 试件则表现为外表无明显裂缝的鼓起破坏; 应力-应变曲线受围压值影响较大, 受骨料浸泡时间和强度等级的影响较小, 围压值大于 12 MPa 后, 曲线不再出现下降段; 峰值应力随骨料浸泡时间、强度等级、侧向围压的增大而增大; 峰值应变受陶粒浸泡时间的影响不大, 随强度等级的增大而减小, 随围压值的增大而增大; 弹性模量随强度等级和围压值的增大而增大, 受骨料浸泡时间的影响不显著。

关键词: 粉煤灰; 高强陶粒; 轻骨料混凝土; 三轴受压; 力学性能

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)10-4801-12

Experiment study on mechanical properties of fly ash ceramsite lightweight aggregate
concrete under triaxial compression

CHEN Yuliang^{*1,2}, ZHU Ling¹, JI Yunpeng¹, WU Huiqin¹, YE Peihuan¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;
2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: A total of 120 specimens of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete were designed for conventional triaxial compression tests in order to reveal the mechanical properties and behavior under complex stress conditions with ceramsite soaking time, strength level and lateral confining pressure as the changing parameters. The failure process and final failure behavior of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under triaxial compression were observed, the stress-strain curves of specimens were obtained, and the influence of changing parameters on the mechanical performances was analyzed. The experimental results show that with the increase of the confining pressure, the failure behavior of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete changes from vertical splitting failure to oblique shear failure. When the confining pressure value is greater than 12 MPa, the specimen shows bulging failure without obvious cracks. The stress-strain curve is greatly affected by the value of confining pressure, but less affected by the immersion time and strength grade of the concrete. And after the confining pressure is greater than 12 MPa, the curve no longer has a descending section. The peak stress increases with the increase of ceramsite immersion time, strength grade and lateral confining pressure. The peak strain is not greatly affected by the soaking time of the ceramsite, it decreases with the increase of the strength grade, and increases with

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-10-04; 录用日期: 2021-10-18; 网络首发时间: 2021-10-29 09:39:56
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211028.005>
基金项目: 国家自然科学基金(51908141); 中国博士后科学基金(2021M693854); 广西科技基地和人才专项(AD19110068); 广西高校中青年教師科研基
础能力提升项目(2019KY0361); 广西重点实验室开放课题项目(2019ZDK038); 广西研究生教育创新计划项目(YCSW2021319)
通信作者: 陈宇良, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为再生混凝土结构、钢-混凝土组合结构 E-mail: ylchen@gxust.edu.cn
引用格式: 陈宇良, 朱玲, 吉云鹏, 等. 三轴受压粉煤灰陶粒轻骨料混凝土力学性能试验 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4801-4812.
CHEN Yuliang, ZHU Ling, JI Yunpeng, et al. Experiment study on mechanical properties of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete
under triaxial compression[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4801-4812(in Chinese).

the increase of the confining pressure value. The elastic modulus increases with the increase of the strength grade and the confining pressure value, and is not significantly affected by the soaking time of the ceramsite.

Keywords: fly ash; high-strength ceramsite; light aggregate concrete; triaxial compression; mechanical properties

粉煤灰陶粒是以粉煤灰为主要原料(85wt%左右),掺入适量石灰(或电石渣)、石膏、外加剂等原料经水化和水热合成反应或自然水硬性反应而制成的一种人造轻骨料,用其取代天然碎石制作的轻骨料混凝土,具有轻质高强、耐火耐久性能优良、综合经济效益高等特点。自 20 世纪 50 年代以来,轻骨料混凝土在工程实践中受到了广泛关注和应^[1],国内外学者对其进行了大量的试验研究和理论分析^[2-3],并将相应研究成果纳入了相关规范^[4-5]。

然而,由于粉煤灰陶粒具有孔隙率较大的特性,因此该类型混凝土与普通混凝土相比延性较差,且破坏时多为骨料破坏^[6-9]。在实际工程中常利用各种约束手段来限制混凝土在轴向受压时产生的横向变形,并以此来达到改善变形性能的目的。因此,吴涛等^[1,10-11]对箍筋约束轻骨料混凝土的影响因素及应力-应变全曲线进行研究,建立了适用于轻骨料混凝土的峰值应力、峰值应变和下降段代表点计算模型,给出了峰值点时箍筋实际应力计算方法;王新堂等^[12-13]对钢管轻骨料混凝土短柱受火后的力学性能进行了试验研究,结果表明此类构件在受火后仍然具有较高的承载力和良好的延性;叶艳霞等^[14-15]利用钢纤维的约束效应研究了不同钢纤维类型及钢纤维体积分数对轻骨料混凝土力学性能的影响,结果表明,钢纤维可有效提高轻骨料混凝土的强度和韧性,且钢纤维掺量越大,轻骨料混凝土的韧性越佳。结合上述研究可知:在约束状态下,轻骨料混凝土的各项力学性能均得到了较大改善,然而通过改变钢管厚度、配箍率和纤维掺量无法精确测量侧向约束力的大小,且受限于试件数量,约束应力的调节范围往往偏小且不够灵活,因此可以通过常规三轴受压试验来模拟轻骨料混凝土在约束作用下的复杂受力状态。目前,关于混凝土三轴受力性能方面的研究,多以普通混凝土^[16-17]、再生混凝土

土^[18-22]、高强混凝土^[23-24]等碎石类混凝土为主,粉煤灰陶粒轻骨料混凝土由于陶粒孔隙率较高且强度偏低,导致其在复杂受力状态下的受力特性也必然与其他类型的混凝土存在本质的不同。

结合上述分析,本文以粉煤灰陶粒轻骨料混凝土为研究对象,考虑陶粒浸泡时间、混凝土强度、侧向围压值 3 种变化参量的影响,对 120 个圆柱体粉煤灰陶粒轻骨料混凝土试件进行常规三轴加载试验,深入分析粉煤灰陶粒混凝土在三轴应力状态下的力学性能及变化规律,以期为该类混凝土的推广应用提供理论支撑。

1 试验概况

1.1 试验材料及配比

粗骨料采用中小型粉煤灰高强陶粒,粒径区间为 5~10 mm,其中 5~8 mm 的粒径占比 93.86%,其制作原料主要来自燃煤发电厂,可实现工业废料的回收再利用,物理性能指标详见表 1;由于粉煤灰是以酸性氧化物为主的玻璃相物质,其在水化产物形成的碱性环境中会逐渐腐蚀并发生火山灰反应引起二次水化,导致水泥基体的强度进一步增大,因此为保证轻骨料混凝土的基体强度,并减缓骨料自身的化学腐蚀,在配制混凝土时加入适量的粉煤灰,粉煤灰由某工厂的工业废料经提纯所得,烧失量为 7.27%,具体化学成分详见表 2;细骨料采用中粗河砂;水泥为 P·O42.5 普通硅酸盐水泥;试验用水为城市自来水。参照 JGJ/T 12—2019《轻骨料混凝土应用技术标准》^[5],配制 LC20 和 LC30 两种强度等级的轻骨料混凝土,配合比详见表 3。

1.2 试件设计与制作

以混凝土强度等级(LC20、LC30)、侧向围压值 σ_w 、粉煤灰陶粒浸泡时间 t (1 h、12 h)为变化参数,设计并制作了 40 组直径 $D=100$ mm、高度 $H=200$ mm 的圆柱体试件,试件一组 3 个,合计

表 1 粉煤灰高强陶粒的物理性能

Table 1 Physical performance of ceramsite

Fly ash content/wt%	Bulk density/(kg·m ⁻³)	Cylinder compressive strength/MPa	Water absorption for 1 h/%	Water absorption for 12 h/%	Saturated water absorption/%
80	650	7.2	14.96	16.12	17.22

表 2 粉煤灰主要化学成分

Table 2 Main chemical composition of fly ash						
Compound type	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Content/wt%	44.84	16.81	23.43	3.09	1.32	1.41

表 3 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土配合比 (kg/m³)

Table 3 Mix proportion of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete (kg/m ³)						
Strength level	Cement	Fly ash ceramsite	Sand	Fly ash	Water	Water-binder ratio
LC20	350	420.3	667.4	75.0	170	0.40
LC30	400	407.7	634.3	47.4	170	0.38

120 个。各试验参数的选择原因如下：

(1) 现有研究中，文献 [20, 25] 先后对 48 个和 68 个混凝土试件进行了常规三轴加载试验，二者中侧向围压值最高仅为 27 MPa 且侧向围压设置时均以 3 MPa 为级差。从试验结果来看，该试验围压级差设置合理且围压值达到上限后试件的各项力学指标还存在明显的变化趋势，因此对粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的侧向围压值设置在上述研究的基础上进行适当改进，即将 LC30 试件仍以 3 MPa 为级差设置侧向围压，但侧向围压最高值提高到 33 MPa；将强度等级较低的 LC20 试件以 6 MPa 为级差设置侧向围压，并将侧向围压的最高值提高到 42 MPa；

(2) 在混凝土强度等级方面，由于文献 [25] 的试验结果表明侧向围压削弱了混凝土强度对峰值应力的影响效果，而该现象在现有文献中鲜有提及，因此设置了 LC20 及 LC30 两种混凝土的强度等级，以研究三轴受压状态下轻骨料混凝土强度等级对其力学性能的影响规律；

(3) 关于骨料浸泡时间的设置，在混凝土浇筑之前进行了陶粒的吸水率测试试验，试验结果表明陶粒在浸泡的前 1 h 内吸水速率最快，吸水率达到饱和吸水率为 86.9% 左右，在浸泡时间达到 12 h 后，吸水速率非常缓慢且基本接近饱和吸水率，所以设置 1 h 和 12 h 两种陶粒的浸泡时间。

试件编号如表 4 所示，采用“骨料浸泡时间-混凝土强度等级-侧向围压值”的组合命名方式。试件浇筑时，先将陶粒提前放入水池中浸泡，达到预定时间后取出并沥干陶粒表面多余水分，然后将陶粒与其他材料依次放入搅拌机干拌，待搅拌均匀后再加水湿拌 5 min，最后浇筑、脱模并在室内养护 28 天。

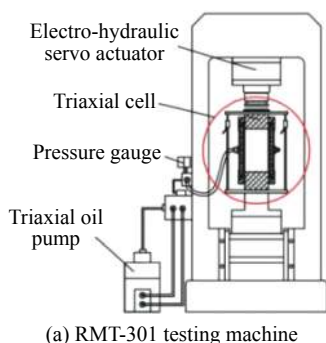
表 4 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的特征点参数

Table 4 Characteristic point parameters of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete			
Specimen	E_u /GPa	σ_u /MPa	$\varepsilon_u/10^{-3}$
1h-LC20-0MPa	3.03	18.10	5.60
1h-LC20-6MPa	4.29	54.30	22.02
1h-LC20-12MPa	4.42	75.92	40.54
1h-LC20-18MPa	4.93	101.93	51.79
1h-LC20-24MPa	5.57	115.61	72.54
1h-LC20-30MPa	8.05	133.65	85.62
1h-LC20-36MPa	8.66	151.90	102.79
1h-LC20-42MPa	7.79	167.17	107.20
12h-LC20-0MPa	3.51	18.09	8.86
12h-LC20-6MPa	5.43	54.29	20.17
12h-LC20-12MPa	4.28	73.64	46.14
12h-LC20-18MPa	6.20	92.25	61.61
12h-LC20-24MPa	6.11	109.49	71.04
12h-LC20-30MPa	4.66	131.77	105.74
12h-LC20-36MPa	6.32	145.72	109.34
12h-LC20-42MPa	7.18	162.35	120.56
1h-LC30-0MPa	3.26	19.03	7.23
1h-LC30-3MPa	4.40	44.43	10.97
1h-LC30-6MPa	6.20	56.01	16.66
1h-LC30-9MPa	4.06	64.34	29.73
1h-LC30-12MPa	4.29	77.45	44.24
1h-LC30-15MPa	4.13	87.76	49.88
1h-LC30-18MPa	5.51	93.79	48.95
1h-LC30-21MPa	7.53	100.36	71.99
1h-LC30-24MPa	7.20	114.11	72.47
1h-LC30-27MPa	8.32	115.75	68.10
1h-LC30-30MPa	4.15	130.57	98.88
1h-LC30-33MPa	6.12	138.43	95.86
12h-LC30-0MPa	4.22	22.11	6.98
12h-LC30-3MPa	4.69	46.83	15.84
12h-LC30-6MPa	5.65	59.02	16.68
12h-LC30-9MPa	4.74	71.25	27.43
12h-LC30-12MPa	5.11	79.02	36.21
12h-LC30-15MPa	4.84	88.91	48.05
12h-LC30-18MPa	6.54	93.88	66.50
12h-LC30-21MPa	6.75	108.49	59.92
12h-LC30-24MPa	6.20	115.76	62.10
12h-LC30-27MPa	5.80	126.55	76.79
12h-LC30-30MPa	8.11	136.52	81.71
12h-LC30-33MPa	7.12	140.43	84.55

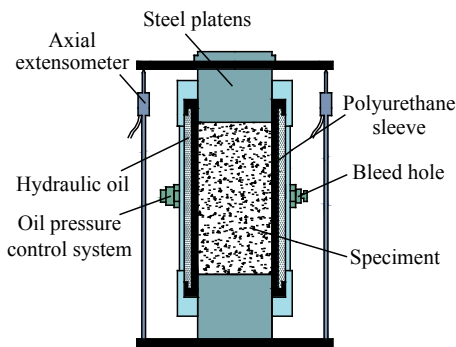
Notes: E_u —Elastic modulus; σ_u —Peak stress; ε_u —Peak strain.

1.3 加载装置及加载制度

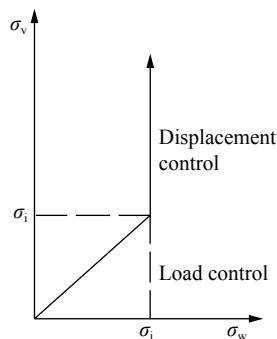
三轴试验装置采用中科院和 SIMENS 公司联合研发的 RMT-301 试验机 (图 1(a))。该设备设有电液伺服作动器、围压泵、三轴压力室 (图 1(b)) 等精密装置，在加载时，试件置于三轴压力室中，由电液伺服作动器提供竖向荷载，围压泵通过液压油管与三轴压力室连接，为试件提供稳定的侧向围压。试件的变形与荷载均由数据采集系统实时记录并显示在控制计算机上，变形采集精度在±0.0005 mm 之内。



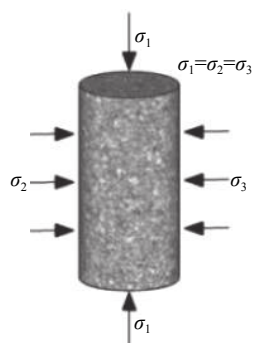
(a) RMT-301 testing machine



(b) Triaxial cell



(c) Loading system



(d) Mechanical model

σ_v —Axial stress; σ_w —Confining pressure; σ_1 —Target confining pressure

图1 加载装置及加载制度

Fig. 1 Test setup and specimens mechanical model

加载制度如图1(c)所示,采用位移和荷载混合控制的加载制度,首先通过荷载控制使侧向围压与竖向荷载按1:1的加载速率加载至图1(d)所示的静水压力状态,此时,试件受到的侧向围压即为该试件对应的目标围压值,之后侧向围压保持不变,加载方式转为位移控制,以0.01 mm/s的加载速率对试件施加竖向荷载,直至试件轴向承载力降至峰值荷载的85%或由于试件的轴向变形过大无法继续加载后停止试验。

2 试验结果与分析

2.1 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土破坏形态

三轴受压下粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的破坏

形态如图2所示,破坏形态主要与侧向围压值 σ_w 的大小有关。

单轴受压($\sigma_w=0$ MPa)状态下,试件发生竖向劈裂破坏。加载初期,由于试件处于弹性阶段,试件表面无明显破坏特征;随着竖向荷载的增大,试件内部微裂纹开始延伸发展,并伴有轻脆的“噼啪”声;当荷载达到0.7倍峰值荷载附近时,微裂纹逐渐连通并延伸至试件表面,试件中部出现数条平行于加载方向的竖向裂缝,裂缝随荷载的增大迅速扩展延伸,到达峰值荷载后,试件被竖向裂缝彻底贯穿,试件表面混凝土剥落严重;当荷载下降至0.6~0.7倍峰值荷载后,竖向裂缝进一步加宽,试件表面基本无新裂缝产生。加载结束后沿裂缝处撬开试件,试件断面上约半数陶粒被剪断。

三轴受压($\sigma_w>0$ MPa)状态下,当围压值为0 MPa< $\sigma_w\leq 12$ MPa时,在加载初期,由于侧向围压的约束作用,试件的弹性变形区间随围压值增加逐渐增大;当荷载达到约0.5~0.8倍峰值荷载时,由于裂缝发展、试件内部的孔隙被压缩及水泥基体挤压流动等原因,试件开始出现塑性变形并逐渐增大;继续加载,试件内部裂缝进一步延伸,当裂缝发展至粗骨料附近时,由于侧向围压可有效增强粗骨料-砂浆粘结界面的强度且陶粒内部孔隙率较大,因此裂缝常直接贯穿陶粒;加载结束后,在侧向围压的约束作用下,试件内部应力发生倾斜,试件发生斜向剪切破坏,破坏主裂缝与试件中轴线的夹角约为30°~35°,且随着围压的增大,主裂缝倾角越大。

当围压值 $\sigma_w>12$ MPa后,由于粗骨料内部孔隙较多且侧向围压的约束作用较强,试件在加载结束后出现了严重塑性变形,此时,试件表面仅有少量细微裂缝,但试件中部或端部混凝土鼓起现象严重,试件整体变粗变短,且围压值越大,试件的残余变形越明显,说明侧向围压越大的试件的延性越好。

2.2 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土三轴受压应力-应变曲线

轻骨料混凝土试件的应力-应变全过程曲线如图3所示。可见,围压值对应力-应变曲线的影响较大,骨料浸泡时间和混凝土强度等级对应力-应变曲线的影响较小。围压值 $\sigma_w=0$ MPa时,应力-应变曲线在峰值荷载40%~50%之前呈线性关系增长;线弹性阶段过后,应力-应变曲线呈非线性增

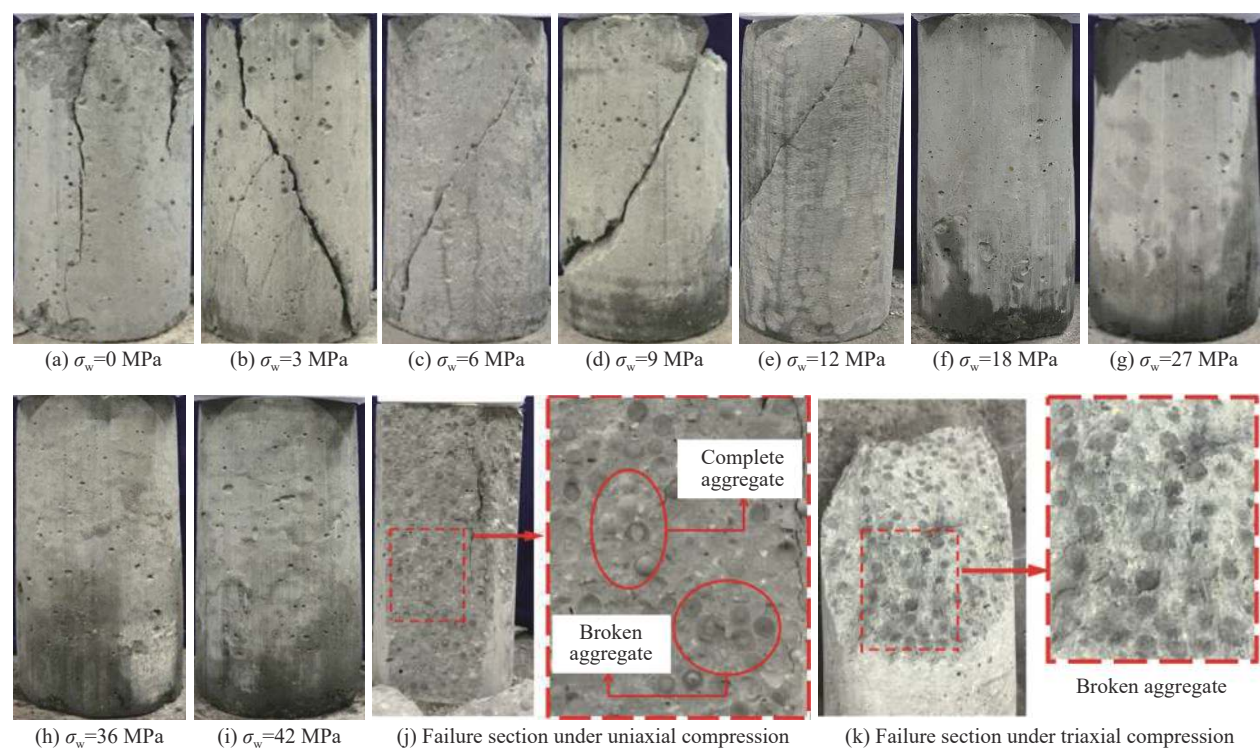


图2 三轴受压下粉煤灰陶粒轻骨料混凝土试件的典型破坏形态

Fig. 2 Typical failure form of fly ash ceramsite lightweight concrete specimens under triaxial compression

长，可见此时混凝土内部裂缝开始逐渐发展导致曲线斜率开始降低，表明试件的刚度逐渐退化；到达试件的峰值承载能力后，应力-应变曲线迅速下降，试件表现出显著的脆性特征。

当围压值为 $0\text{ MPa} < \sigma_w \leq 12\text{ MPa}$ 时，加载初期，轴向荷载与变形之间呈线性关系，侧向围压值越大，曲线斜率(初始刚度)越大，此时试件处于弹性阶段；当荷载为约 0.5-0.8 倍峰值荷载时，试件进入弹塑性阶段，此时随轴向变形的增大，应力-应变曲线的斜率逐渐降低，且围压值越大，对应试件的应力-应变曲线越高；当达到峰值荷载后，应力-应变曲线的下降段随围压值增大而逐渐平缓，并当侧向围压值达到 12 MPa 后基本消失，此时，试件表现出良好延性。

当围压值 $\sigma_w > 12\text{ MPa}$ 后，应力-应变曲线在加载结束后仍未出现峰值点，且随着围压的增大，应力-应变曲线继续升高，说明增大侧向围压可以增加轻骨料混凝土的极限承载能力和变形能力。

2.3 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土特征点参数

表 4 给出了各试件峰值应力、峰值应变、初始弹性模量等特征参数，各参数均取同组试件的平均值。峰值应力取自应力-应变曲线的最大值，峰值应变为峰值应力对应的应变值，弹性模量取

应力-应变曲线上 0.4 倍峰值应力处的割线模量。图 4 为不同参数下每组试件的峰值应力的误差，图中数据为每组 (3 个试件一组) 试件的平均值，相同参数下试验数据结果间的平均误差值在 5.1% 以内，可见试验结果离散性小，试验数据可靠。

3 影响因素分析

3.1 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应力

3.1.1 骨料浸泡时间对峰值应力的影响

图 5(a) 为不同粉煤灰陶粒骨料浸泡时间下试件的峰值应力随侧向围压值变化情况。可见，骨料浸泡 12 h 的试件峰值应力整体高于浸泡 1 h 的试件，为方便对比各围压下骨料浸泡时间对试件峰值应力的影响程度，图 5(b) 给出了骨料浸泡 12 h 与骨料浸泡 1 h 试件的峰值应力比值，该比值平均值约为 1.06 且随围压值增大整体减小，说明粉煤灰陶粒骨料浸泡时间对峰值应力的提高有一定影响，但该影响随围压值增大逐渐减小。究其原因，可能是骨料浸泡时间越长，陶粒内部孔隙含水量越高，在水泥凝结硬化的过程中，陶粒可向其周围水泥基体持续输水并促进其持续水化，进而提高粗骨料-砂浆粘结界面的粘结强度，使骨料的咬合力及摩阻力得到相应提高，从而增大了轻

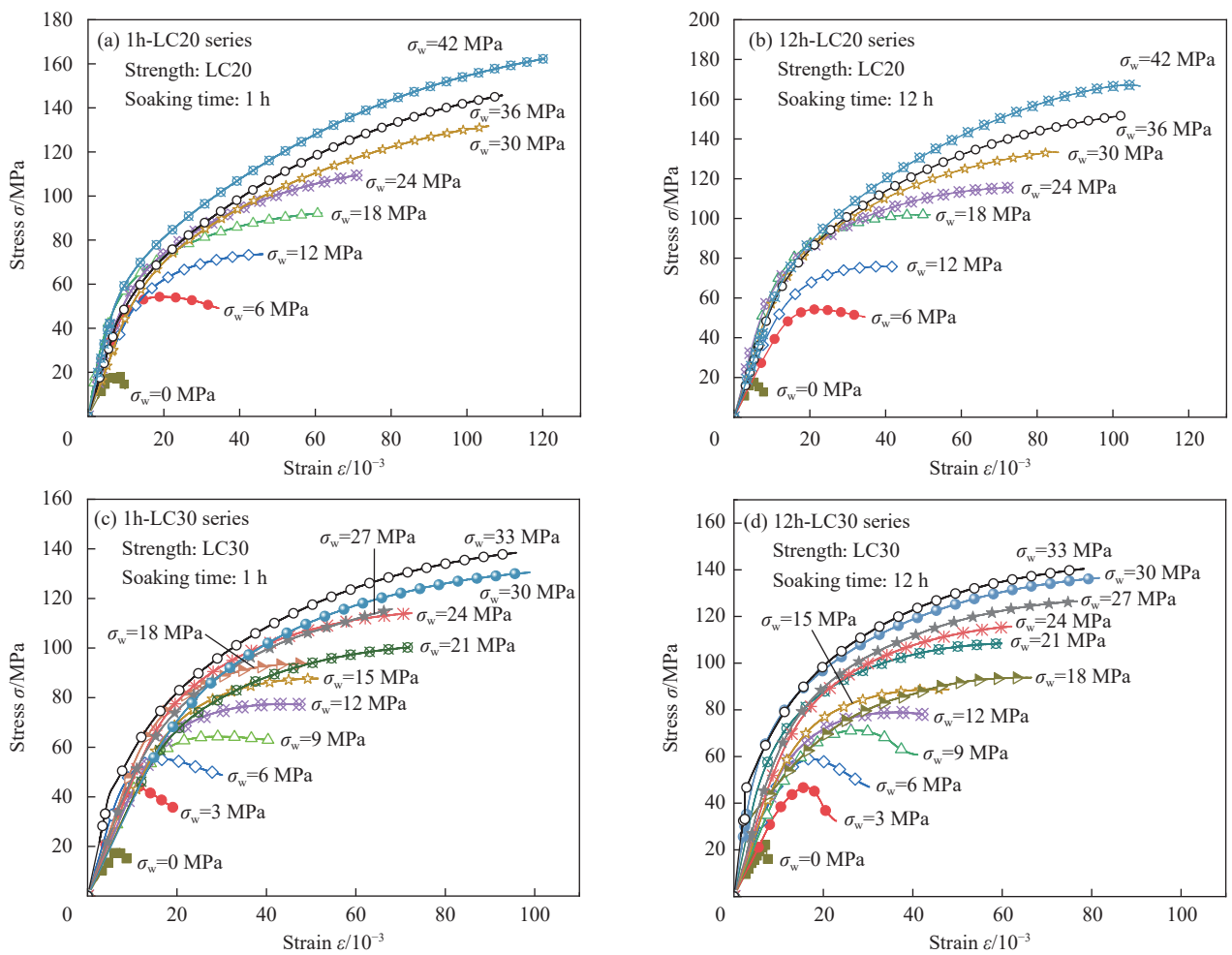


图3 三轴受压下粉煤灰陶粒轻骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under triaxial compression

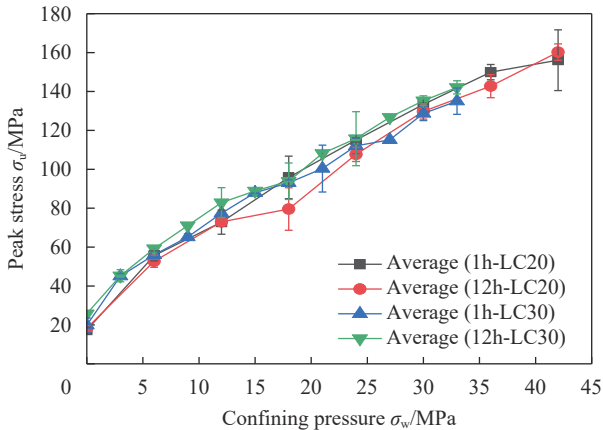


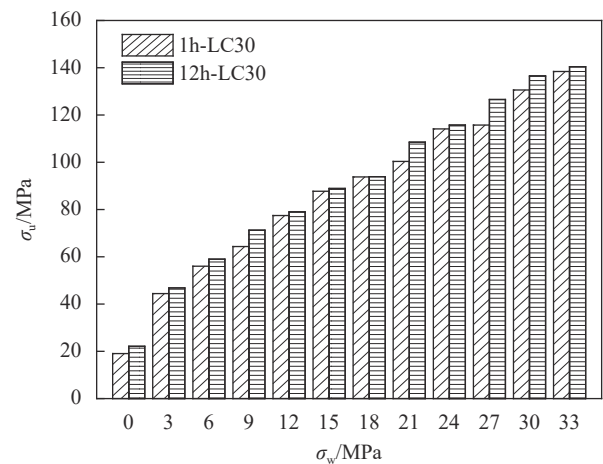
图4 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应力的离散性

Fig. 4 Dispersion of peak stress in fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete

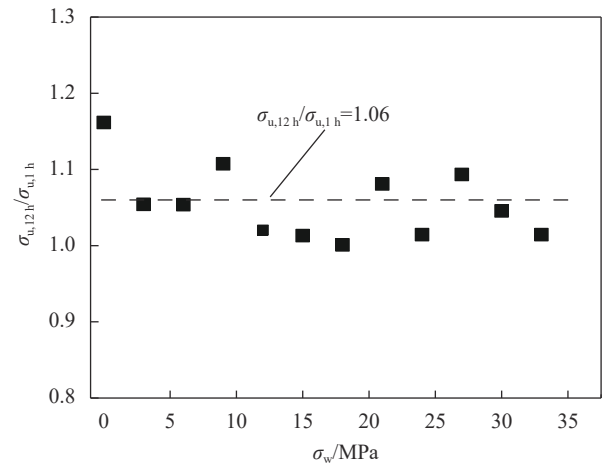
骨料混凝土在三轴受压下的极限承载能力。而当侧向围压值增大后，由于侧向围压同样对骨料-砂浆粘结界面存在增强作用，因此陶粒反水现象对粘结界面的增强效果占比减弱。

3.1.2 强度等级对峰值应力的影响

图6(a)为不同强度等级下试件的峰值应力对比情况。可见，相同围压下，峰值应力随着轻骨料混凝土强度等级的增大有所提高，LC30强度等级试件的峰值应力较LC20试件整体提高了约5.58%。图6(b)给出了两种强度等级试件的峰值应力对比。可见，随着侧向围压值的增大，峰值应力比值逐渐降低并向数值1收敛，当侧向围压 $\sigma_w \geq 18$ MPa时，峰值应力比值基本趋近于1。上述现象主要是由于侧向围压的约束作用在混凝土内部产生的压应变可以有效减小竖向荷载在混凝土内部产生的拉应变，且在三向受压状态下，混凝土内部孔隙被严重压缩并伴随有明显的挤压流动现象，因此当混凝土强度等级相差不大时，在侧向围压的干预下骨料和水泥基体的强度对混凝土峰值应力的影响逐渐减弱，侧向围压的支撑作用对混凝土峰值应力的影响逐渐加强。

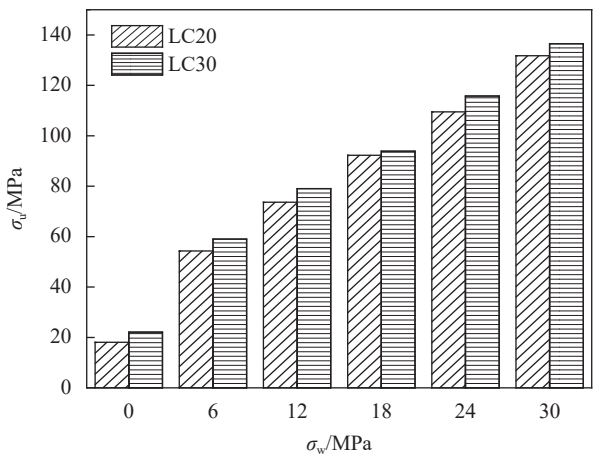


(a) Peak stress of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under different soaking time

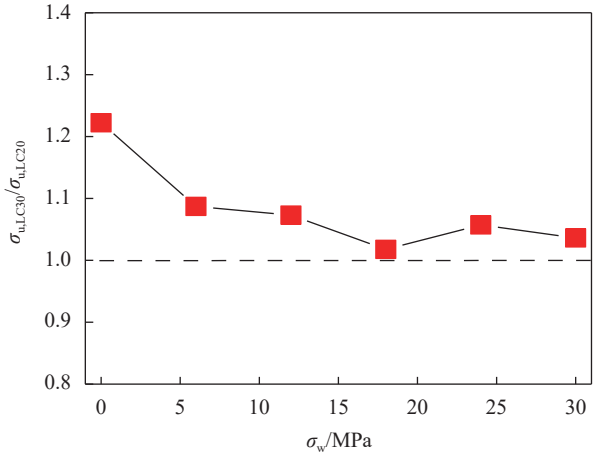


(b) Ratio of peak stress in fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete

图5 浸泡时间对粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应力的影响
Fig. 5 Influence of soaking time on peak stress of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete



(a) Peak stress of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under different strength levels



(b) Ratio of peak stress in fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete

图6 强度等级对粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应力的影响
Fig. 6 Influence of strength grade on peak stress of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete

3.1.3 围压值对峰值应力的影响

图7给出了不同侧向围压下粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应力的变化情况。可见，围压值对峰值应力影响显著，随着围压值的增大，峰值应力呈线性增大。将试验数据进行拟合，得到轻骨料混凝土峰值应力与围压值的计算公式：

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_0} = 1 + 3.81 \frac{\sigma_w}{\sigma_0}, R^2 = 0.992 \quad (1)$$

式中： σ_u 为对应的轴向峰值应力； σ_0 为试件单轴受压时的峰值应力。

此外，为分析侧向围压对轻骨料混凝土峰值应力的影响效果，在图中引入文献[25]中普通混凝土的试验数据进行比较，图中拟合曲线的斜率越大，表示在同围压值下，该类混凝土的峰值应

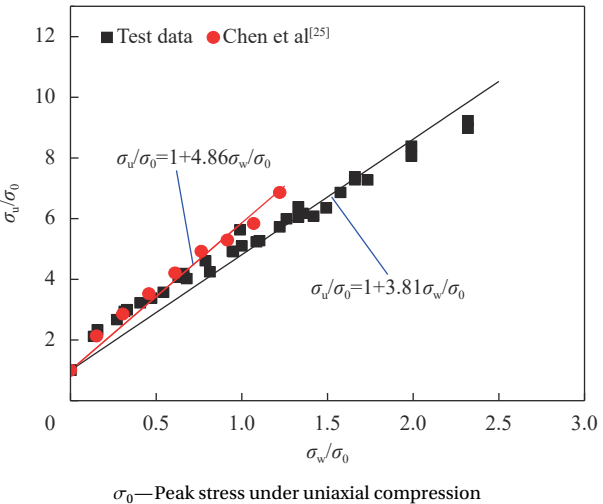


图7 侧向围压值与粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应力的关系
Fig. 7 Relationship between peak stress of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete and confining pressure

力越大。观察发现,轻骨料混凝土在三轴受压状态下的承载能力明显低于普通混凝土,且围压值越大,两种混凝土的强度差异越明显。结合三轴受压时轻骨料混凝土试件断面骨料尽数破坏的试验现象可知,由于轻骨料结构多孔且强度远低于普通碎石,因此在三轴受压状态下,陶粒强度成为制约轻骨料混凝土峰值应力的重要因素,且围压值越大,陶粒的强度缺陷越明显。

3.2 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应变

3.2.1 骨料浸泡时间对峰值应变的影响

图 8 为在不同陶粒浸泡时间下试件的峰值应变变化情况。可见,在 LC20 强度等级下,骨料浸泡 12 h 试件的峰值应变总体上略大于骨料浸泡 1 h 的试件;在 LC30 强度等级下,骨料浸泡 1 h 试件与骨料浸泡 12 h 试件的峰值应变相差不大。为便于对比,在图 8(c) 中分别列出了不同浸泡时间下两种强度等级混凝土峰值应变的归一化数据,可以看出,LC20 试件在两种浸泡时间下峰值应变的平均比值为 0.89,LC30 试件的平均比值为 1.04,说明骨料浸泡时间对峰值应变的影响受混凝土强度等级的影响较大。当混凝土强度较低时,浸泡时间越长,峰值应变的增幅越大;当混凝土强度增大后,浸泡时间对峰值应变的影响逐渐减弱。这可能是由于混凝土强度较低时,其对应水胶比增大,所以陶粒的反水速率缓慢,导致陶粒对其周围水泥基体的反哺作用更加持久;而在混凝土强度增大后,水胶比降低,陶粒内部水分更容易流失,容易导致陶粒周围的局部水胶比增大,对峰值应变产生负面影响,并且当陶粒水分流失速率加快的同时,其对水泥基体的持续养护作用也在逐渐减弱。

3.2.2 强度等级对峰值应变的影响

图 9 为粉煤灰陶粒轻骨料浸泡 12 h 下不同强度等级试件的峰值应变变化情况。可见,LC20 试件的峰值应变整体明显高于 LC30 试件的峰值应变,混凝土强度由 LC20 增至 LC30 后,不同围压下峰值应变的降幅平均值为 14.6%,该现象符合混凝土的强度等级越高脆性特征越明显的一般规律,其主要原因为混凝土的强度增长部分主要为水泥基体强度和骨料-砂浆粘结界面的强度,所以当该部分强度接近或超过陶粒强度时,裂缝在发展延伸时会更容易直接贯穿骨料而非避开骨料发展,导致裂缝发展途径剪短。同时,混凝土强度

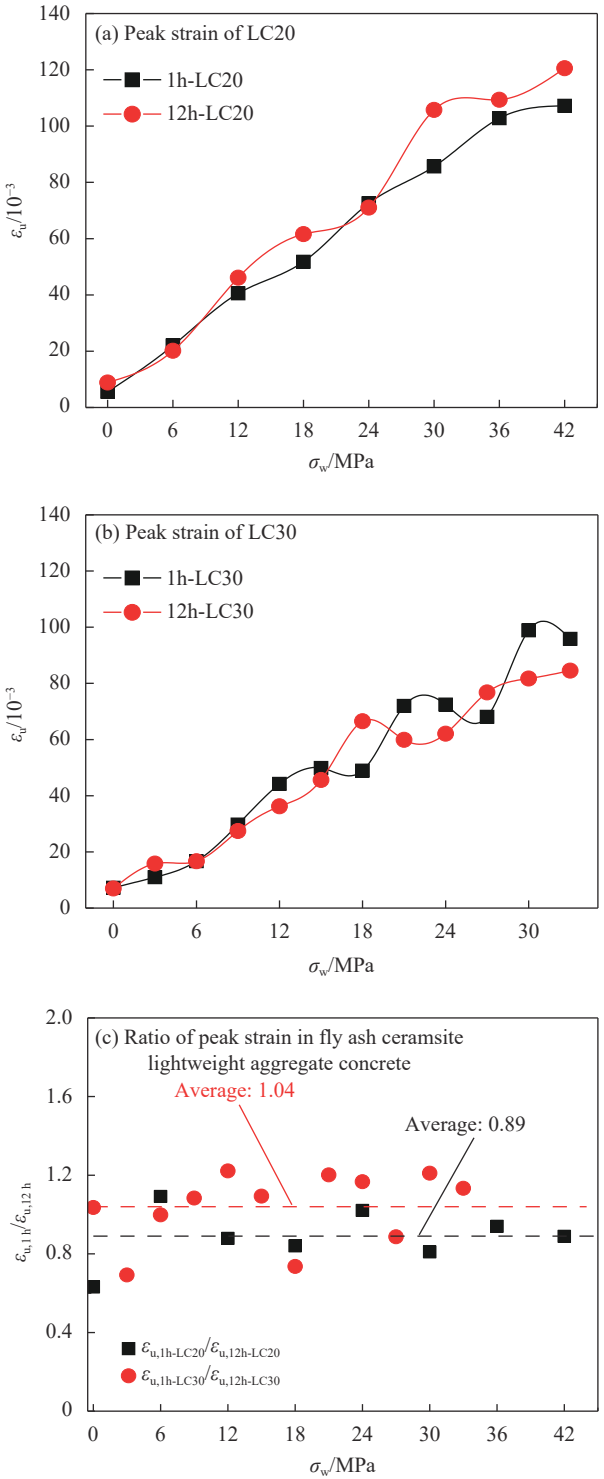


图 8 浸泡时间与粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应变的关系

Fig. 8 Relationship between peak strain of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete and different soaking time

越高,其在开裂瞬间所耗散的能量也越大,导致其破坏更加突然。

3.2.3 围压值对峰值应变的影响

图 10 给出了粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应

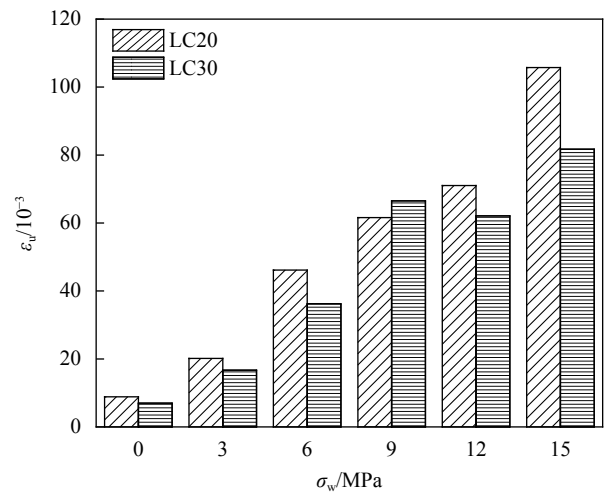


图9 不同强度等级粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应变对比
Fig. 9 Comparison of peak strain of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under strength grades

变随侧向围压值的变化情况。可见，峰值应变随侧向围压值增大而线性增长。这一方面是由于在侧向围压的约束状态下，试件的弹性区间逐渐增大；另一方面，在三轴应力状态下，混凝土在弹塑性阶段其内部挤压流动现象更加明显，所以其峰值应变逐渐增大。

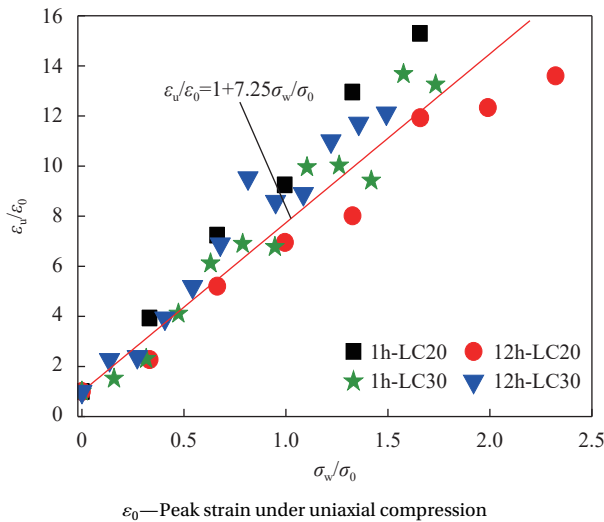


图10 侧向围压值与粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应变的关系
Fig. 10 Relationship between peak strain of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete and lateral confinement

根据试验数据，拟合得到峰值应变与围压值的函数关系式：

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_0} = 1 + 7.25 \frac{\sigma_w}{\sigma_0}, \quad R^2 = 0.975 \quad (2)$$

式中： ε_0 为无围压时的峰值应变； ε_u 为峰值应变。

3.3 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土弹性模量

3.3.1 陶粒浸泡时间对弹性模量的影响

图 11(a) 给出了不同粗骨料浸泡时间下试件的弹性模量对比情况。可见，在围压值增大的过程中，两骨料浸泡时间对应试件的弹性模量交替上升，弹性模量与骨料浸泡时间之间并未表现出明显规律。因此，同样对弹性模量进行归一化处理，得到图 11(b) 所示的弹性模量比值，除侧向围压值为 27 MPa 和 30 MPa 时弹性模量比值存在较大波动外，其他围压下两种骨料浸泡时间对应弹性模量的比值基本稳定且平均值接近于 1，说明骨料浸泡时间对混凝土弹性模量的影响较小。其主要由于试件在弹性阶段其内部损伤尚未发展，且由于侧向围压对试件刚度具有增强效果，因此骨料浸泡时间在试件内部引起的差异尚不明显。

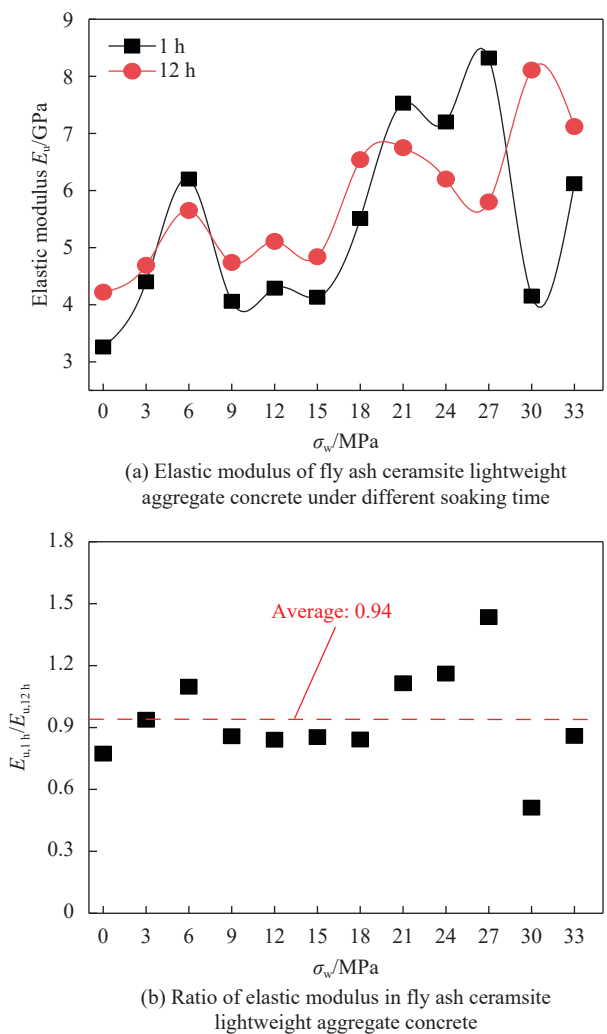


图11 不同浸泡时间下粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的弹性模量对比
Fig. 11 Comparison of elastic modulus of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under different soaking time

3.3.2 强度等级对弹性模量的影响

图 12 给出了相同浸泡时间下两种强度等级试件弹性模量的比值。可见，在多数围压下，LC30 试件与 LC20 试件之间的弹性模量比值均大于 1，且平均值达到了 1.18。说明提高强度等级可有效提高试件的弹性模量。这是由于强度等级越高，混凝土中水泥基体的分子黏聚力越强，导致混凝土承压时水泥基体的抗变形能力提高。

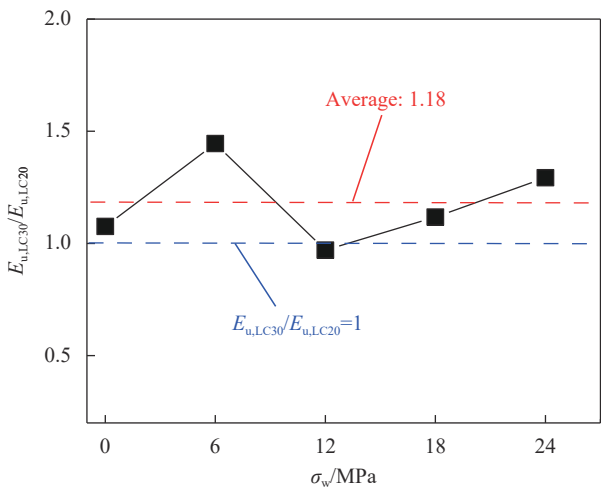


图 12 不同强度等级粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的弹性模量比值
Fig. 12 Ratio of elastic modulus of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete with different strength grades

3.3.3 围压值对弹性模量的影响

图 13 给出了弹性模量随侧向围压值的变化关系。随围压值增大，各工况对应试件的弹性模量均显著增大，这是由于侧向围压可有效约束试件

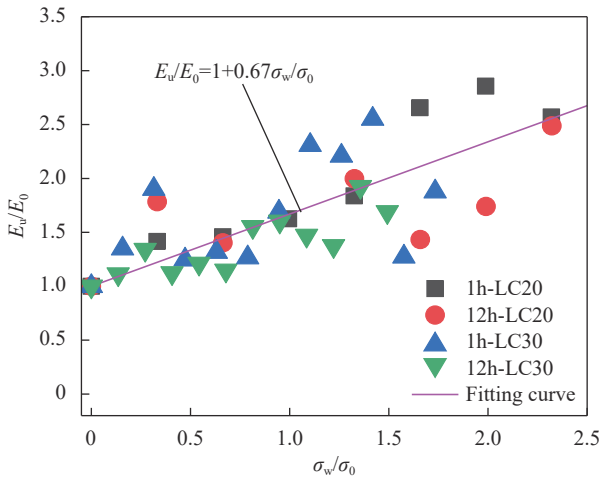


图 13 侧向围压值与粉煤灰陶粒轻骨料混凝土弹性模量的关系
Fig. 13 Relationship between elastic modulus of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete and lateral confinement

的横向变形，导致试件的轴向抗变形能力显著提高。此外，弹性模量在增长过程中存在一定的波动，这主要是由于试件在加载前其上下表面虽然进行了磨平处理，但仍无法实现绝对平整，因此试件在加载过程中容易出现应力集中及偏心受压现象，并对试验结果产生一定的影响。

根据试验数据，拟合得到弹性模量与侧向围压之间的函数关系式：

$$\frac{E_u}{E_0} = 1 + 0.67 \frac{\sigma_w}{\sigma_0}, \quad R^2 = 0.96 \tag{3}$$

式中： E_u 为弹性模量； E_0 为单轴受压时的弹性模量。

4 结论

(1) 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土在三轴受压状态下的破坏形态主要与围压值有关，围压值 $\sigma_w = 0$ MPa 时，试件发生竖向劈裂破坏；当 $0 \text{ MPa} < \sigma_w \leq 12 \text{ MPa}$ 时，试件发生斜向剪切破坏；当 $\sigma_w > 12 \text{ MPa}$ 后，试件加载结束后表面无明显破坏现象且塑性变形严重。

(2) 侧向围压值对应力-应变曲线的变化影响显著。随着围压增大，曲线峰值应力和斜率增大，下降段斜率减小。当 $\sigma_w > 12 \text{ MPa}$ 时，曲线下降段基本消失。

(3) 增大陶粒浸泡时间可略微提高试件的峰值应力，但对峰值应变及弹性模量的影响较小。

(4) 试件的强度等级由 LC20 增至 LC30 后，峰值应变平均降低了约 14.6%，弹性模量平均增大了约 18%，峰值应力的增长幅度随围压值增大逐渐减小。

(5) 侧向围压值增大后，峰值应力、峰值应变和弹性模量均呈线性增大，基于试验数据，建立了侧向围压分别与粉煤灰陶粒轻骨料混凝土峰值应力、峰值应变、弹性模量之间的函数关系式，该关系式可为该类混凝土在钢管、螺旋箍筋等约束混凝土构件中的应用提供理论参考。

(6) 虽然在三轴受压状态下粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的峰值应力略低于普通混凝土的峰值应力，但由于粉煤灰陶粒轻骨料混凝土具有良好的变形性能 ($\sigma_w > 12 \text{ MPa}$ 后尤为显著) 且自重较轻，因此该类混凝土在地震设防烈度较高的地区或钢管、螺旋箍筋等约束混凝土构件中具有较高的推广价值。

参考文献：

[1] 刘喜, 吴涛, 魏慧, 等. 箍筋约束轻骨料混凝土轴心受压应力-应

- 变曲线研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(3): 134-143.
- LIU Xi, WU Tao, WEI Hui, et al. Axial compressive stress-strain relationship of confined lightweight aggregate concrete with stirrups[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(3): 134-143(in Chinese).
- [2] 余振鹏, 黄侨, 赵志青, 等. 自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1984-1994.
- YU Zhenpeng, HUANG Qiao, ZHAO Zhiqing, et al. Mechanical property of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear stress[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1984-1994(in Chinese).
- [3] 梁圣, 崔宏志, 徐丹玥. 纳米SiO₂改性轻骨料混凝土性能[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(2): 498-505.
- LIANG Sheng, CUI Hongzhi, XU Danyue. Properties of nano-SiO₂ modified lightweight aggregate concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(2): 498-505(in Chinese).
- [4] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary on building code requirements for structural concrete: ACI 318-14[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute Publisher, 2014.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 轻骨料混凝土结构技术规程: JGJ/T 12—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical specification for lightweight aggregate concrete structures: JGJ/T 12—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [6] SANTHA K G, MISHRA A K. Influence of granite fine powder on the performance of cellular Light weight concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 40(11): 102707.
- [7] 王万祯, 郭鸣鸣, 吴晓聪. 主方支圆钢管轻骨料混凝土K型节点承载力[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(5): 61-67.
- WANG Wanzhen, GUO Mingming, WU Xiaocong. Bearing capacity of K-joint of light-aggregate concrete steel tube with main square branch[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(5): 61-67(in Chinese).
- [8] 王万祯, 李华, 吴晓聪. 方钢管轻骨料混凝土加劲TY型节点承载力研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(8): 33-38.
- WANG Wanzhen, LI Hua, WU Xiaocong. Study on the bearing capacity of TY-type joints reinforced with square steel tube lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(8): 33-38(in Chinese).
- [9] FEDEROWICZ K, TECHMAN M, SANYTSKY M, et al. Modification of lightweight aggregate concretes with silica nanoparticles-A review[J]. *Materials*, 2021, 14(15): 4242.
- [10] 吴涛, 魏慧, 刘喜, 等. 箍筋约束高强轻骨料混凝土柱轴压性能试验研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(2): 203-213.
- WU Tao, WEI Hui, LIU Xi, et al. Experimental study on axial compression performance of high-strength lightweight aggregate concrete columns confined by stirrups[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(2): 203-213(in Chinese).
- [11] 吴涛, 杨雪, 刘喜. 钢-聚丙烯混杂纤维自密实轻骨料混凝土性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2): 268-275, 282.
- WU Tao, YANG Xue, LIU Xi. Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with hybrid steel and polypropylene fibers[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2): 268-275, 282(in Chinese).
- [12] 王新堂, 周明, 王万祯, 等. 轻骨料钢管混凝土短柱受火后力学性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(12): 34-41.
- WANG Xintang, ZHOU Ming, WANG Wanzhen, et al. Experimental study on mechanical properties of lightweight aggregate concrete-filled steel tube short columns after exposure to fire[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(12): 34-41(in Chinese).
- [13] 任鹏飞, 王新堂, 梧松. 轻骨料混凝土-薄壁钢梁组合楼板受火后承载性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(4): 56-63.
- REN Pengfei, WANG Xintang, WU Song. Experimental study on post-fire bearing capacity of composite floor of lightweight aggregate concrete-thin walled steel beam[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(4): 56-63(in Chinese).
- [14] 叶艳霞, 王宗彬, 谢夫林, 等. 碳纤维增强高强轻骨料混凝土的力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1): 63-70.
- YE Yanxia, WANG Zongbin, XIE Fulin, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1): 63-70(in Chinese).
- [15] 叶艳霞, 王宗彬, 彭琼, 等. 微细碳纤维高强轻骨料混凝土静力试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(4): 955-962.
- YE Yanxia, WANG Zongbin, PENG Qiong, et al. Static test of micro steel fiber high-strength lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(4): 955-962(in Chinese).
- [16] 苏洁, 池寅, 孟宽. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土的真三轴强度试验研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51(1): 40-46, 59.
- SU Jie, CHI Yin, MENG Kuan. Experimental study of strength of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete subjected to true triaxial compression[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, 51(1): 40-46, 59(in Chinese).
- [17] 余振鹏, 黄侨, 谢兴华. 普通混凝土和轻骨料混凝土双轴加载试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(3): 371-377.
- YU Zhenpeng, HUANG Qiao, XIE Xinghua. Experimental

- study on mechanical properties of ordinary concrete and lightweight aggregate concrete based on biaxial loading[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(3): 371-377(in Chinese).
- [18] 赵东拂, 高海静, 杨健辉. 混凝土双轴拉压、三轴拉压压变幅疲劳性能研究[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 154-160.
ZHAO Dongfu, GAO Haijing, YANG Jianhui. Research on variable amplitude fatigue performance of concrete in biaxial tension and compression and triaxial tension and compression[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(8): 154-160(in Chinese).
- [19] 王四巍, 孙逢涛, 吴华. 三轴应力下再生粗骨料塑性混凝土的力学性能和破坏准则[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 454-459.
WANG Siwei, SUN Fengtao, WU Hua. Mechanical properties and failure criteria of recycled coarse aggregate plastic concrete under triaxial stress[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 454-459(in Chinese).
- [20] CHEN Y L, CHEN Z P, XU J J, et al. Performance evaluation of recycled aggregate concrete under multiaxial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116935.
- [21] XU J J, CHEN Y L, XIE T Y, et al. Prediction of triaxial behavior of recycled aggregate concrete using multivariable regression and artificial neural network techniques[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 534-554.
- [22] DENG Z H, WANG Y M, SHENG J, et al. Strength and deformation of recycled aggregate concrete under triaxial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156: 1043-1052.
- [23] 周甲佳, 潘金龙, 姚少科, 等. 高强高性能混凝土三轴拉压压力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 144-150.
ZHOU Jiajia, PAN Jinlong, YAO Shaoke, et al. Experimental study on triaxial compression and tension properties of high strength and high performance concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(4): 144-150(in Chinese).
- [24] 李毅, 程桦, 张亮亮. 不同围压下C60混凝土三轴压缩过程能量分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2086-2093, 2326.
LI Yi, CHENG Hua, ZHANG Liangliang. Energy analysis of C60 concrete under triaxial compression under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(5): 2086-2093, 2326(in Chinese).
- [25] 陈宗平, 陈宇良, 姚侃. 再生混凝土三轴受压力学性能试验及其影响因素[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(12): 72-81.
CHEN Zongping, CHEN Yuliang, YAO Kan. Experimental research on mechanical behavior and influence factor of recycled coarse aggregate concretes under triaxial compression[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(12): 72-81(in Chinese).