

粉煤灰陶粒混凝土三轴受压破坏机制及强度准则

陈宇良^{1,2}, 朱 玲¹, 张绍松¹, 叶培欢¹, 吴辉琴¹

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

摘 要: 为研究粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的三轴受压破坏机理, 以强度等级、侧向围压为变化参数, 共设计 78 个试件进行常规三轴试验。观察分析了三轴受压下粉煤灰陶粒混凝土试件的破坏形态和应力-应变全曲线, 揭示了其破坏机理。结果表明: 三轴受压下, 粉煤灰陶粒混凝土随围压的增大出现竖向劈裂破坏、斜向剪切破坏、无明显裂缝 3 种破坏现象, 并呈现良好的延性性能; 应力-应变全曲线随围压的增大存在明显平台流塑现象, 围压 σ_w 大于 12 MPa 以后, 曲线基本不出现下降段; 建立的莫尔-库伦、八面体剪应力破坏准则及 Rendulic 平面破坏准则通用式, 均能较好反映粉煤灰陶粒混凝土的三轴受压状态。

关键词: 轻骨料混凝土; 三轴受压; 破坏机理; 破坏准则

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2196-09

网络出版时间: 2022-07-01



Failure Mechanism and Strength Criterion of Fly Ash Ceramsite Concrete Under Triaxial Compression

CHEN Yuliang^{1,2}, ZHU Ling¹, ZHANG Shaosong¹, YE Peihuan¹, WU Huiqin¹

(1. School of Civil Architecture Engineering, Guang Xi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The failure mechanism of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete under triaxial compression was investigated via conventional triaxial tests at different strength grades and lateral confining pressures. The failure morphology and stress-strain curve of fly ash ceramsite concrete specimens under triaxial compression were analyzed, and the failure mechanism was revealed. The results show that under triaxial compression, the fly ash ceramsite concrete has three failure phenomena as the applied confining pressure increases, i.e., vertical splitting failure, oblique shear failure, and no obvious cracks. There exists a platform flow plastic phenomenon in the full strain curve with the increase of confining pressure. The triaxial compression of fly ash ceramsite concrete can be properly described by an established general formula for the Mohr-Coulomb, octahedral shear stress failure criterion and the Rendulic plane failure criterion.

Keywords: lightweight aggregate concrete; triaxial compression; failure mechanism; failure criterion

粉煤灰是当前我国排量较大的工业废渣之一, 其含有大量对环境对人体有害的物质, 粉煤灰的处理和应用已经引起了人们的广泛关注^[1], 其中将粉煤灰回收利用制成粉煤灰陶粒应用于建筑中具有变害为利、节能环保等诸多优点^[2]。粉煤灰陶粒质轻、保温、隔热、耐火、耐腐蚀、抗震性好, 是制成轻

骨料混凝土(LC)最理想的材料之一。轻骨料混凝土具有质轻、耗能低、抗爆炸冲击及保温隔热等诸多优点, 具有良好的应用前景^[3]。

目前, 在绿色建筑与建筑工业化技术领域, 大力推广应用轻骨料混凝土, 各国学者对轻骨料混凝土的特性及受压、受弯、抗剪等工作性能展开了研

收稿日期: 2021-11-23。 修订日期: 2022-04-18。

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, AD19245131); 广西科技大学博士基金项目(校科博 18Z09)。

第一作者: 陈宇良(1987—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 叶培欢(1989—), 男, 硕士, 高级实验师。

Received date: 2021-11-23. Revised date: 2022-04-18.

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

E-mail: ylchen@gxust.edu.cn

Correspondent author: YE Peihuan (1989—), male, Master, Senior Experimentalist.

E-mail: peihuan.ye@gxust.edu.cn

究,取得了丰硕的研究成果^[4-6]。由于轻骨料混凝土普遍存在脆性大、强度低等特点,郑秀华等^[7]研究发现预湿轻骨料能提高轻骨料混凝土的后期抗压强度增长率;叶艳霞等^[8]发现细微钢纤维对轻骨料混凝土单轴抗压强度具有较好的改善作用。在工程中常常利用钢管、螺旋箍筋等约束轻骨料混凝土^[9-10]从而改善其力学性能上的缺陷,这就使得轻骨料混凝土处于多轴受力状态下,目前已有学者对于多轴状态下轻骨料混凝土的性能研究展开了研究^[11-13],但有限的试验数据尚不足以阐述轻骨料混凝土的受力性能,且其破坏机理及破坏准则尚未完全明确。课题组前期研究也表明,混凝土处于多轴状态下的力学性能与单轴受力不同,延性和承载能力均有所改善^[14]。

因此,为了进一步揭示三轴应力状态下轻骨料混凝土的力学性能及破坏准则,本工作以粉煤灰陶粒轻骨料混凝土为研究对象,以强度等级、围压值

为变化参数,设计 78 个粉煤灰陶粒混凝土试件进行常规三轴受压试验,研究其三轴受压破坏机制,并基于试验数据提出粉煤灰陶粒混凝土三轴受力下的破坏准则。

1 实验

1.1 材料

粗骨料采用粉煤灰高强陶粒,粒径为 2~10 mm,其中 5~8 mm 粒径的陶粒占 93.86%,陶粒中粉煤灰含量为 80%,堆积密度为 650 kg/m³,筒压强度为 7.2 MPa,饱和吸水率为 17.22%。陶粒符合《轻集料及其试验方法 第 1 部分:轻集料》^[15]中优等品的标准。细骨料采用中粗河砂,细度模数为 2.56,表观密度为 2 581 kg/m³;粉煤灰采用 I 级粉煤灰,筛余量为 18.4%;水泥为 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,其主要技术指标见表 1,水泥及制备陶粒的粉煤灰化学成分见表 2;拌和水为自来水。

表 1 水泥的主要性能指标

Table 1 Main technical indicators of cement

Standard consistency water consumption/%	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa		Setting time/min	
		3 d	28 d	3 d	28 d	Initial	Final
27.8	3 100	27.6	55.8	5.3	8.6	153	223

表 2 水泥及粉煤灰的主要化学成分

Table 2 Main chemical composition (mass fraction, *w*) of cement and fly ash

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MnO
Cement	21.54	5.65	60.58	1.46	3.14	2.63	4.19
Fly ash	53.80	30.76	2.61	0.64	0.33	1.87	

1.2 轻骨料混凝土配合比

由于陶粒具有高吸水率的特性,所以为保证混凝土的工作性能,在浇筑前将陶粒在水中浸泡 1 h 后取出沥干,此时陶粒的含水率基本达到饱和吸水率的 90%。轻骨料混凝土配合比设计参照 JGJ/T 12—2019《轻骨料混凝土应用技术标准》^[16],共设计 3 种强度等级,详细配合比见表 3,表中配合比用水不包括陶粒的预吸水量。

1.3 试件设计及制作

考虑不同强度等级、不同侧向围压值,设计并

制作了 78 个直径 $D=100$ mm、高度 $H=200$ mm 的圆柱体试件。强度等级设置 LC20、LC30、LC40 3 种;围压值从 0~42 MPa 之间变化,中间级差为 3 或 6 MPa。每组试件设置 3 个试块,每组试件的编号及详细的参数取值见表 4,表中, σ_w 为侧向围压值。试件编号 LCX-Y 中, X 为强度等级, Y 为围压值。

1.4 加载装置及加载制度

加载试验在中科院和 SIMENS 公司联合研发的 RMT-301 试验机上完成。该设备设有精密的传感装置、2 个液压油泵和三轴压力装置,两个液压油泵分别提供竖向荷载和稳定的侧向围压。轴向变形与荷载均由数据采集系统同步记录,变形测量精度为 0.5 μ m。采用荷载和位移混合控制的加载制度,首先按预设参数施加侧向围压值,同时按 1:1 比例同步施加竖向荷载,使试件始终处于静水压力状态。在侧向围压达到设计值后,保持侧向围压值恒定,

表 3 轻骨料混凝土配合比

Table 3 Mix proportion of lightweight aggregate concrete

Strength level	Cement	Fly ash ceramicsite	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
LC40	450	392.0	609.7	22.2	170	0.36

表 4 试件的设计参数

Table 4 Parameters of specimens

Specimen No.	Strength level	σ_w/MPa	Specimen No.	Strength level	σ_w/MPa	Specimen No.	Strength level	σ_w/MPa
LC20-00	20	0	LC30-03	30	3	LC30-30	30	30
LC20-06	20	6	LC30-06	30	6	LC30-33	30	33
LC20-12	20	12	LC30-09	30	9	LC40-00	40	0
LC20-18	20	18	LC30-12	30	12	LC40-03	40	3
LC20-24	20	24	LC30-15	30	15	LC40-06	40	6
LC20-30	20	30	LC30-18	30	18	LC40-09	40	9
LC20-36	20	36	LC30-21	30	21	LC40-12	40	12
LC20-42	20	42	LC30-24	30	24	LC40-15	40	15
LC30-00	30	0	LC30-27	30	27			

采用位移控制的加载制度施加竖向荷载，竖向加载的速率为 0.01 mm/s，直至试件破坏。

2 结果与讨论

2.1 试件破坏形态

粉煤灰陶粒轻骨料混凝土在常规三轴受压下的破坏形态如图 1 所示。试件的破坏形态受围压的影响较大，受其他参数的影响较小：当 $\sigma_w=0$ MPa 时，试件发生纵向劈裂破坏，在加载过程中，首先在试件中部出现细微的竖向裂缝，随着荷载的增加，侧向的拉应变超过轻骨料混凝土的极限拉应变，竖向裂缝数量逐渐增多，宽度逐渐增大，并且向试件两端迅速延伸，形成平行于竖向荷载方向的通缝，构成分离的短柱群，试件破坏，试件体积由于纵向劈裂裂缝的发展延伸发生略微膨胀；当 $0<\sigma_w\leq 12$ MPa 时，试件发生斜向剪切破坏，且产生的斜向裂缝与水平方向的角度随着围压值的增大而减小，角度在

$55^\circ\sim 75^\circ$ 之间变化；当 $\sigma_w>12$ MPa 后，试件受到的侧向约束较大，表面不再出现明显裂痕，存在明显的变短变粗现象，该现象随着围压值增大愈发明显。三轴受压状态下，由于围压的存在，加载行程较单轴加载时大，试件高度下降明显，且随着围压的增大，试件逐渐出现挤压流动现象，存在较大的塑性变形，即试件呈现为高度下降，直径增大的现象，体积变化明显。

图 1i 和图 1j 分别给出了粉煤灰陶粒轻骨料混凝土在单轴和三轴受压下的劈裂破坏面图。由图 1i 和图 1j 可见，单轴受压下的破坏截面存在较多的完整骨料，这是因为陶粒的返水特性，从粉煤灰陶粒内部释放了一部分自由水，导致粉煤灰陶粒和水泥基体黏结界面局部水灰比增大，促使粉煤灰陶粒和水泥基体的黏结界面强度降低。而在三轴受压下的破坏截面骨料几乎全部被剪断，且三轴状态下试件的破坏截面较单轴的破坏截面更为密实。

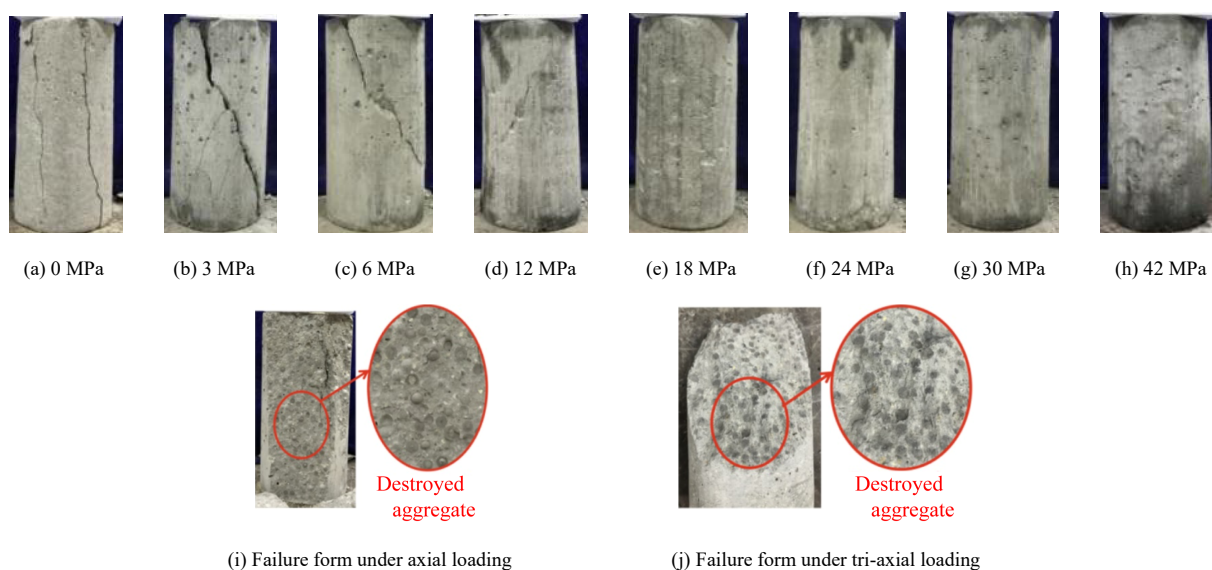
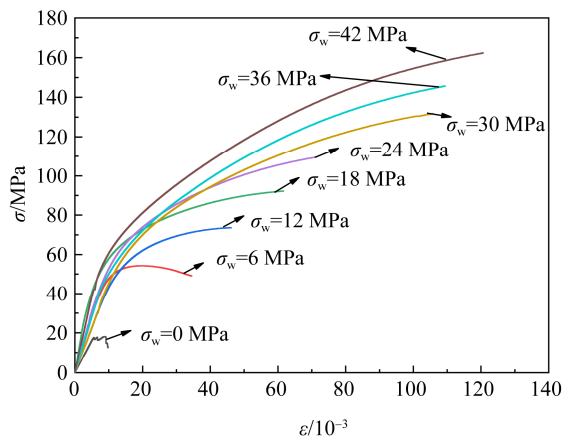


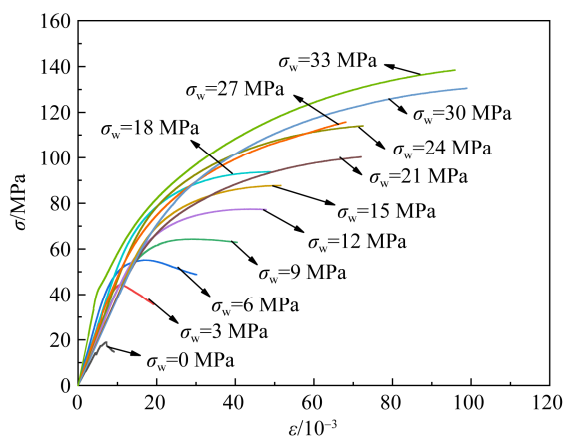
图 1 试件典型的破坏形态
Fig. 1 Typical failure form of specimens

2.2 三轴应力-应变曲线

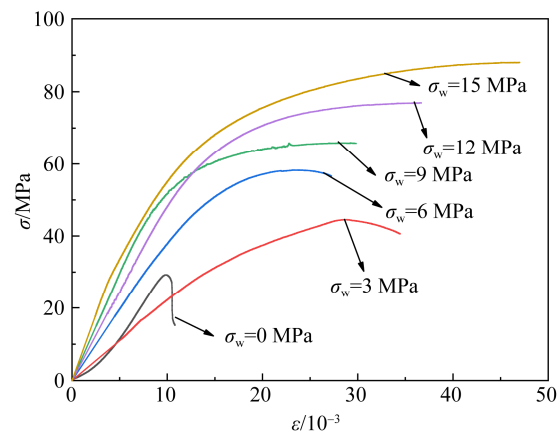
图 2 为不同围压值下各试件的轴向应力-应变全过程曲线。由图 2 可知: 试件在 $\sigma_w=0$ MPa 时, 曲线的斜率较小, 峰值应力较有围压的试件要低, 峰值点明显, 且曲线到达峰值点后下降迅速, 脆性特征显著; 当 $0 \text{ MPa} < \sigma_w \leq 12 \text{ MPa}$ 时, 应力-应变曲线的峰值应力和峰值应变随着围压的增大而增大,



(a) LC20 series



(b) LC30 series



(c) LC40 series

图 2 试件应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of specimens

曲线的下降段随着围压值的增加变得不明显; 当 $\sigma_w > 12 \text{ MPa}$ 时, 应力-应变曲线峰值点不明显, 基本不出现下降段, 表现出良好的延性。随着围压值的增大, 应力-应变曲线所包围的面积明显增大, 但比例极限与极限强度之比减小, 说明粉煤灰陶粒轻骨料混凝土在三轴受压状态下, 塑性变形量成倍增加, 其在围压作用下的破坏显然不是单轴受力的脆性破坏。

2.3 特征值参数

表 5 给出了各试件的峰值应力、峰值应变、初始弹性模量等特征点参数, 均取同组 3 个试件的平均值。表 5 中: E 为初始弹性模量; σ_u 为峰值应力; ε_u 为峰值应变。

轻骨料混凝土在三轴受压下应力-应变曲线存在明显的“应力平台”, 即应力保持不变或略有增加, 应变急剧增长。当围压值小于 12 MPa, 曲线到达平台区时, 试件开始出现不稳定的裂缝破坏, 变形快速增长, 过此平台区后出现软化阶段(下降段), 平台区随围压的增大越明显; 当围压值大于 12 MPa 时, 在高围压下, 在应力平台区, 试件内部结构早已破坏, 粉煤灰陶粒被压碎, 因此产生大幅度压缩, 随着荷载持续增大, 陶粒的内部孔洞被填充, 以致试件在“密实”状态下进一步提高承载力, 应力-应变曲线呈“应力强化”状态持续升高, 且围压值越大曲线峰值点越高, 这和真三轴状态下的现象是一致的^[17]。

2.4 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土破坏机制分析

2.4.1 内部应力传递机制及微观分析

粉煤灰陶粒由于内部多孔, 强度较天然骨料低, 因此粉煤灰陶粒轻骨料混凝土在三轴受压状态下的内部应力传递机制不同于普通混凝土。

图 3a 和图 3b 为常规三轴下试件内部应力传递机制图。由图 3a 和图 3b 可知, 在施加围压过程中结构内部始终处于静水压力状态, 当开始施加竖向荷载时, 如图 3a 天然骨料的弹性模量和刚度大于水泥浆体, 且天然碎石由于“墙壁效应”, 自由水在骨料表面聚集, 导致骨料和水泥基体过渡区 C-S-H 凝胶含量降低, 削弱了界面过渡区的强度, 故裂缝一般从骨料与水泥基的粘结界面开始发展延伸, 最后的结构破坏形态为大部分骨料保存完整。而粉煤灰陶粒的弹性模量和刚度一般较水泥浆体要小, 内部应力如图 3b, 由于粉煤灰陶粒具有返水特性, 陶粒周围水泥基体可持续水化, 导致界面过渡区的 C-S-H 凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量不断增大, 促使界面过

表 5 试件的特征值参数

Table 5 Parameters of feature points of specimens

Specimen No.	E/GPa	σ_u/MPa	$\varepsilon_u/10^{-3}$	Specimen No.	E/GPa	σ_u/MPa	$\varepsilon_u/10^{-3}$	Specimen No.	E/GPa	σ_u/MPa	$\varepsilon_u/10^{-3}$
LC20-00	3.03	18.10	5.60	LC30-03	4.40	44.43	10.97	LC30-30	4.15	130.57	98.88
LC20-06	4.29	54.30	22.02	LC30-06	6.20	56.01	16.66	LC30-33	6.12	138.43	95.86
LC20-12	4.42	75.92	40.54	LC30-09	4.06	64.34	29.73	LC40-00	4.07	29.27	7.72
LC20-18	4.93	101.93	51.79	LC30-12	4.29	77.45	44.24	LC40-03	2.20	44.55	28.79
LC20-24	5.57	115.61	72.54	LC30-15	4.13	87.76	49.88	LC40-06	4.60	58.26	23.74
LC20-30	8.05	133.65	85.62	LC30-18	5.51	93.79	48.95	LC40-09	5.97	65.95	29.24
LC20-36	8.66	151.90	102.79	LC30-21	7.53	100.36	71.99	LC40-12	4.74	76.98	36.56
LC20-42	7.79	167.17	107.20	LC30-24	7.20	114.11	72.47	LC40-15	6.41	88.06	46.98
LC30-00	3.26	19.03	7.23	LC30-27	8.32	115.75	68.10				

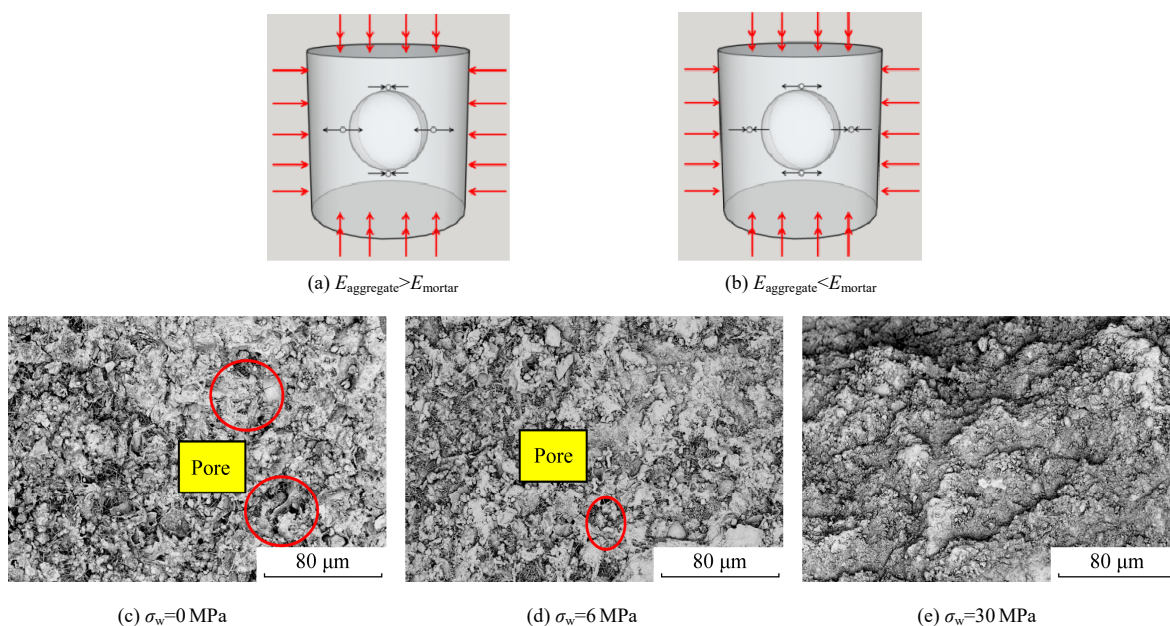


图 3 常规三轴下试件内部应力传递机制及陶粒微观结构

Fig. 3 Internal stress transfer mechanism of specimens under conventional triaxial and ceramicsite microstructure

渡区强度。得到提高，且在围压的约束下，陶粒多孔会被压实，这时骨料的内部结构早已破坏，因此在三轴受力状态下，裂缝会贯穿陶粒。

图 3c~图 3e 是围压分别为 0、6、30 MPa 时粉煤灰陶粒的微观结构图。由图 3 可见， $\sigma_w=0$ MPa 时粉煤灰陶粒内部多孔，组织结构较为疏松； $\sigma_w=6$ MPa 时，由于围压的存在，试件破坏时内部的粉煤灰陶粒被压实，陶粒内部结构破坏，相对于 $\sigma_w=0$ MPa 时的陶粒内部孔洞少而小，组织结构更为致密，但由于围压相对较小，故陶粒内部依然存在少部分孔洞； $\sigma_w=30$ MPa 时，粉煤灰陶粒内部原有孔洞挤压破碎，陶粒相对低围压时更为致密，内部基本不存在孔洞，粉煤灰陶粒混凝土发生大幅度变形，试件在密实状态下进一步被外部荷载压缩，导致试件应力-应变曲线呈现“强化”现象。

2.4.2 单轴受力下破坏过程 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土在单轴受压下的破坏过程如图 4a 所示，经历了弹性变形阶段、内部裂缝开展(稳定裂缝发展)、可见裂缝开展(不稳定裂缝发展)、试件破坏等阶段，最终发生竖向柱状劈裂破坏。当荷载达到峰值应力的 40%~50%之前(OA 段)，应力随应变呈线性关系增加，试件内部仅有少量原始裂缝，陶粒骨料完整；随着荷载的进一步增加(AB 段)，试件进入稳定裂缝发展时期，此时外部荷载所引起的侧向拉应变超过粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的极限拉应变，在试件中部开始出现细小竖向裂缝；当荷载接近峰值应力时(BC 段)，裂缝迅速发展、延伸，试件进入不稳定裂缝扩展阶段，试件表面出现大量的可视裂缝；当荷载超过峰值荷载后(CD 段)，由于粉煤灰陶粒多孔、强度低等性质，在陶粒-水泥基体的粘结界面及部分

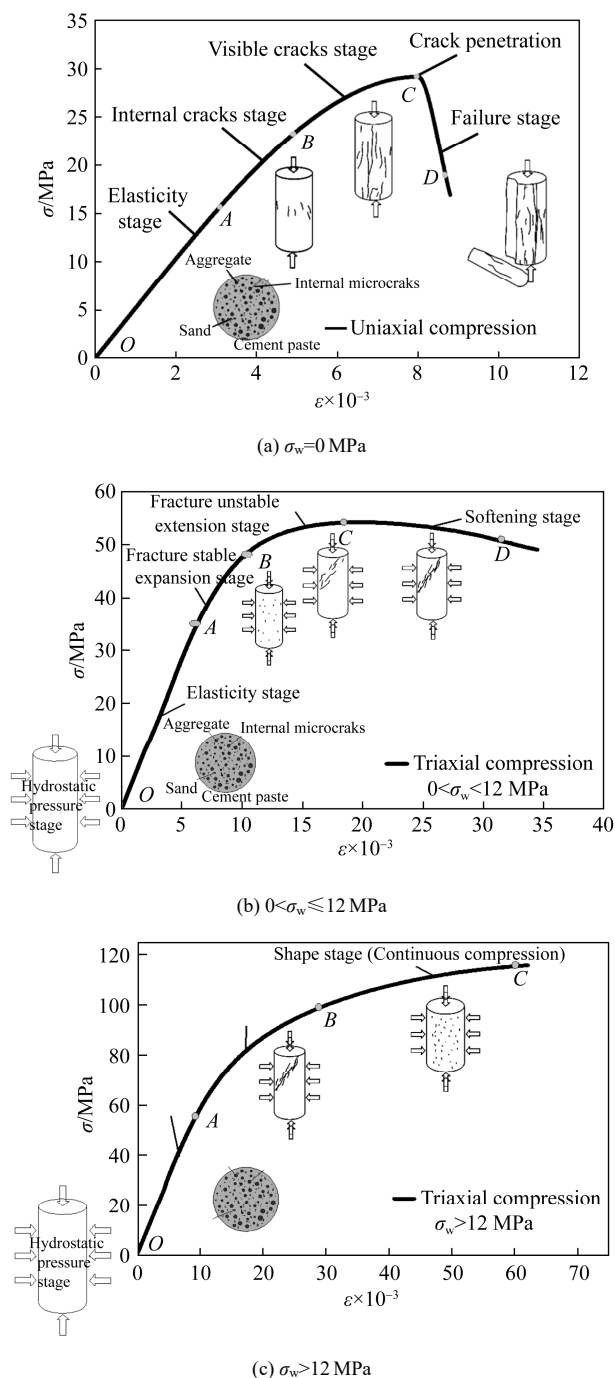


图 4 试件破坏过程

Fig. 4 Failure process of specimens

陶粒骨料本身发生剪断, 裂缝贯穿形成通缝, 轻骨料混凝土发生竖向劈裂破坏。

2.4.3 常规三轴受力下破坏过程 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土在三轴受压状态下呈现出斜剪破坏和挤压流动等破坏行为, 其破坏机理随着围压值的不同表现出不一样的本质特征:

三轴受压加载初期, 试件处于静水压力状态。在 $0 < \sigma_w \leq 12 \text{ MPa}$ 时, 试件随着竖向荷载的施加, 由

压应变逐渐变成由拉应变控制的破坏形态, 如图 4b 所示, 根据试件卸载后的破坏形态、应力-应变曲线及三轴状态下混凝土的破坏理论, 可以推断, 在弹性阶段(OA 段)时, 试件处于变形可恢复状态, 应力随应变呈线性增长, 仅存在少量原始裂纹; 随竖向荷载增加, 粉煤灰陶粒骨料与砂浆均发生一定程度的挤压流动, 产生部分不可逆的塑性变形, 稳定裂缝开始发展(AB 段), 试件表面开始出现细小裂纹; 细小裂缝随着荷载的增大迅速扩展延伸, 发展成不稳定裂缝(BC 段), 贯穿砂浆和骨料, 形成通缝, 随着裂缝数量的增加体积发生膨胀, 破坏截面轻骨料几乎全部被剪坏, 在此期间由于围压的存在阻止了试件发生柱状压破坏, 则呈现出斜剪破坏的形态, 并随着围压的增大, 斜剪角度越接近水平; 试件破坏后, 因围压束缚作用, 轻骨料混凝土处于疲软状态(CD 段), 这时侧向围压越大, 已形成的裂缝压缩变形程度越大, 流塑平台越明显, 下降段越平缓。

当 $\sigma_w > 12 \text{ MPa}$ 时, 侧向围压值产生的预压应变值较大, 轴向荷载所产生的拉应变值难以达到轻骨料混凝土的极限拉应变, 说明围压值越大, 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的极限承载力越大, 如图 4c 所示, 在弹性阶段(OA 段), 应力-应变呈线性变化, 内部存有初始微裂纹; 到达弹塑性阶段(AB 段)后, 轻骨料混凝土内部塑性变形增加, 水泥基体和轻骨料内部均开始出现裂缝, 但由于围压束缚大, 裂缝无法发展成可视裂缝; 试件最终随荷载增加持续处于塑性压缩状态(BC 段), 这是由于粉煤灰陶粒结构多孔、强度较低的特点, 单位应变能较一般混凝土要高, 根据第四强度理论, 这时三轴状态下的材料形状改变比能难以达到单轴应力状态下的极限值, 导致试件表面基本不出现裂缝, 而主要表现为水泥砂浆和骨料被持续压紧压实、耗散能量, 内部塑性流动较大, 以及骨料的相对滑移和剪切变形, 导致组织结构发生塑性变形, 流塑平台区随着围压的增大越不明显, 表现出持续的塑性挤压流动状态。

宋玉普等^[18]对真三轴状态下的轻骨料混凝土进行了试验研究, 试件在卸载后内部大部分骨料被压碎, 发现了轻骨料混凝土主压向应力-应变曲线存在明显的“应力平台”区, 且说明了轻骨料混凝土的内部结构就已遭到了大范围的破坏。解释其现象原因为: 在加载时对轻骨料混凝土的强度起主要作用的砂浆骨架在高压应力作用下首先破坏, 随后轻骨料挤压破碎, 则导致了试件大幅度的压缩变形而使应力-应变曲线呈平台流塑, 当应力重新分布后, 轻

骨料内部的空隙被压实, 且试块在“密实”的状态下进一步承受压应力而使曲线呈上升的强化状, 且此时试件与普通混凝土不同, 已不可恢复到原来的组织机构。宋玉普等建议在实际工程设计中, 应把应力平台流塑段作为多轴压状态轻骨料混凝土的极限强度, 而不能应用强化阶段的强度。常规三轴试验所得机理变化结论与此相似。

3 轻骨料混凝土强度准则

强度准则是指将混凝土的破坏包络面通过数学函数及模型来表达, 并作为判断材料是否达到破坏状态或极限状态的条件。多年来, 国内外学者对混凝土强度理论进行了大量的研究和分析, 并且得出了一大批关于复杂应力状态下混凝土的强度准则。这些强度准则总体上可分为 3 类: 第 1 类是经验型, 如 Willam-Wamke 五参数模型和 Kotsovos. Pavlovic 模型; 第 2 类基于混凝土的物理力学性能, 如 Mohr-Coulomb 模型等; 第 3 类基于试验结果分析, 如 Ottosen 四参数模型等。这些混凝土强度理论研究复杂应力状态下产生破坏的规律, 为工程结构设计提供指导, 具有重要意义。基于试验数据的常规三轴状态下粉煤灰陶粒轻骨料混凝土强度准则鲜有报道, 本文通过试验数据进行回归整理, 结合现有的强度理论, 从宏观角度对常规三轴状态下的轻骨料混凝土破坏准则进行探讨。

3.1 Mohr-Coulomb 库伦破坏准则

Mohr-Coulomb 破坏理论是从正应力角度出发, 以破坏应力状态的应力圆包络线来表示破坏准则, 主要取决于切应力 τ , 即当代表某一点应力状态的最大应力圆恰好与包络线相接触时, 则说明材料正好达到极限状态, 当最大应力圆在包络线以内时, 则表示材料没有达到极限状态。

按幂函数关系对每组圆族包络线的 τ - σ 关系式进行拟合:

$$\tau = a + b\sigma^c \quad (1)$$

式中: a 为包络线与 y 轴交点(即轻骨料混凝土粘着力); b 、 c 为试验拟合数据。

为消除试验数据的偶然性, 给后续相关研究提供参考, 采用无量纲形式对上述关系式进行处理, 将切应力 τ 和正应力 σ 对单轴受压时的峰值应力 σ_0 进行归一化, 其关系见图 5, 归一化的拟合函数式为:

$$\tau/\sigma_0 = 0.15 + 0.99(\sigma/\sigma_0)^{0.75} \quad R^2 = 0.989 \quad (2)$$

由图 5 可见, 拟合结果与试验结果吻合程度较好。

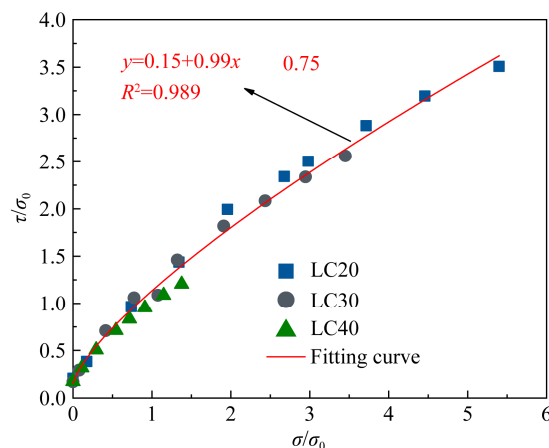


图 5 τ - σ 归一化关系

Fig. 5 Normalized τ - σ diagram

3.2 八面体剪应力空间破坏准则

在常规三轴受压状态下, 中间主应力的影响不可忽视, 八面体剪应力破坏准则是以 3 个主应力轴为坐标的空间破坏曲面来表示, 一般用八面体的正应力和剪应力作为横坐标来表示拉、压子午线以及偏平面上的包络线, 其空间对角线上各点 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, 因此也称为静水压力线。将与空间对角线相垂直的平面称为八面体主应力平面, 该平面上正应力 σ_{oct} 与剪应力 τ_{oct} 计算公式如下:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4)$$

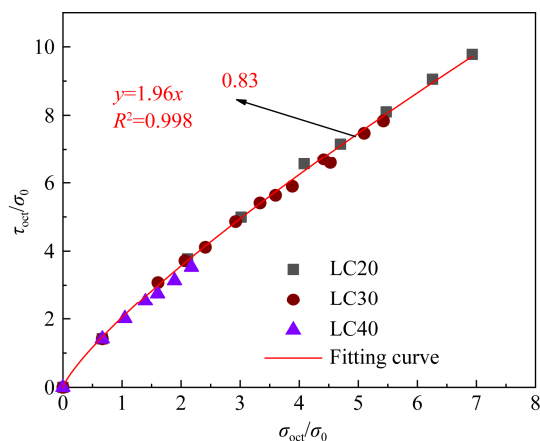
将试验数据代入公式(3)、式(4)后, 分别与峰值应力 σ_0 进行归一化处理, 得到无量纲关系曲线如图 6 所示, 曲线呈幂函数关系式, 拟合求得关系式为:

$$\sigma_{oct} / \sigma_0 = 1.96 (\tau_{oct} / \sigma_0)^{0.83} \quad R^2 = 0.998 \quad (5)$$

由拟合结果可知方程相关系数为 0.998, 表现出较好的相关性。说明采用八面体应力理论表示轻骨料混凝土的破坏时, 不受各种变化参数的影响, 因此描述轻骨料混凝土常规三轴受压破坏均可用式(5)表示。

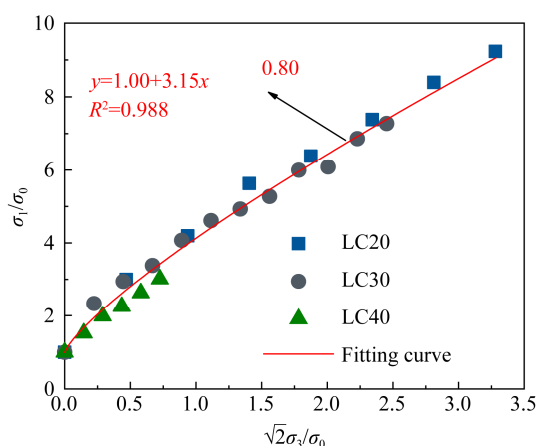
3.3 Rendulic 平面上的破坏应力曲线

在常规三轴($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_w$)状态下, 将实测结果绘制成轻骨料混凝土的三轴压缩破坏曲面, 在三维坐标系中, 实际上就是 σ_1 和直线 $\sigma_2 = \sigma_3$ 所组成的平面与破坏曲面的交线, 即包含一个主应力轴和空间对角线的平面, 称为 Rendulic 平面亦称为压力子午线。

图 6 τ - σ 归一化曲线Fig. 6 Normalized τ - σ curves

对试验实测结果进行归纳整理, 将 σ_1 与 $\sqrt{2}\sigma_3$ 对 σ_0 分别进行无量纲化, 得到如图 7 所示的压力子午线, 并采用一元回归分析求得函数关系式为:

$$\sigma_1 / \sigma_0 = 1.00 + 3.15 \left(\sqrt{2}\sigma_3 / \sigma_0 \right)^{0.80} \quad R^2 = 0.988 \quad (6)$$

图 7 $\sigma_1 - \sqrt{2}\sigma_3$ 归一化曲线Fig. 7 Normalized curves of $\sigma_1 - \sqrt{2}\sigma_3$ curves

综上 3 种破坏准则公式可见, Mohr-Coulomb 破坏准则、八面体剪应力破坏准则、Rendulic 平面破坏准则都能较好的模拟粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的破坏曲线。由于粉煤灰陶粒内部结构孔隙率较大, 其强度远小于天然骨料强度, 而骨料在受力时对应力状态和材料性能影响较大, 所以常常导致骨料内部以及骨料与胶凝体结合面容易产生裂缝。而且粉煤灰陶粒的密度较水泥浆体密度小, 在搅拌振捣过程中容易上浮或离析, 这也会导致粉煤灰陶粒轻骨料混凝土工作性能较差。因此粉煤灰陶粒轻骨料混凝土在三轴受力作用下, 由于材料的先天不足, 骨

料和水泥基体因围压的作用都发生塑性变形, 最终骨料和水泥基体均被剪坏。另外, 轻骨料混凝土在多轴受力下破坏时, 破坏面与加力方向的夹角并不是最大切应力方向。由此说明, 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的破坏机制是由于斜截面的内部剪应力大于其界面承载力导致的。而 Mohr-Coulomb 破坏准则、八面体剪应力破坏准则以及 Rendulic 平面上的破坏准则中, Mohr-Coulomb 理论多用于平面问题, 且当压应力过大, 会出现下降段; 八面体剪应力空间准则考虑了中间主应力的影响, 且模型相关系数最优; Rendulic 平面破坏准则是从特定的条件 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 考虑了混凝土的破坏, 所以选用八面体剪应力空间准则能较好的反应在三轴受力状态下的粉煤灰陶粒轻骨料混凝土的破坏。但从其多轴应力状态下的破坏机理和组成来看, 仍需要做进一步研究。

4 结论

1) 随着围压的增大, 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土发生竖向柱状破坏 ($\sigma_w = 0$ MPa)、斜向剪切破坏 ($0 < \sigma_w \leq 12$ MPa)、无明显破坏现象 ($\sigma_w > 12$ MPa) 3 种破坏形态变化。

2) 在三轴受压状态下应力-应变曲线受侧向围压值影响较大, 受混凝土强度等级的影响较小, 并存在明显的应力平台区, 当围压值为 $0 < \sigma_w \leq 12$ MPa 时, 平台区随围压值增大越明显, 当围压值 $\sigma_w > 12$ MPa, 随围压值的增大越不明显。

3) 随着围压值的不同, 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土表现出 3 种不同的破坏机理特征: 单轴受压发生由竖向荷载产生侧向拉应力主导的破坏; 围压值为 $0 < \sigma_w \leq 12$ MPa 发生由侧向拉应力和围压束缚共同作用导致斜剪破坏; 围压值 $\sigma_w > 12$ MPa 则发生由侧向围压束缚无可视裂痕, 试件持续被压紧压实形成中部鼓起破坏。

4) 经试验结果无量纲化后拟合可得, 库伦-莫尔理论通用包络线经验式: $\tau/\sigma_0 = 0.15 + 0.99(\sigma/\sigma_0)^{0.75}$ 、八面体剪应力理论通式: $\sigma_{oct}/\sigma_0 = 1.96(\tau_{oct}/\sigma_0)^{0.83}$ 和 Rendulic 平面理论通式: $\sigma_1/\sigma_0 = 1.00 + 3.15(\sqrt{2}\sigma_3/\sigma_0)^{0.80}$, 3 个强度准则与粉煤灰陶粒轻骨料混凝土常规三轴下受力状态吻合较好。

参考文献:

- [1] 刘定鹏, 秦军, 吕晴, 等. 以粉煤灰为原料制备镁铝水滑石[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1341-1347.
LIU Dingpeng, QIN Jun, LV Qing, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1341-1347.

- [2] 时宇, 朱金华, 和德亮, 等. 矿物掺合料对混凝土力学性能与开裂趋势的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(11): 1605–1610.
SHI Yu, ZHU Jinhua, HE Deliang, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(11): 1605–1610.
- [3] 叶列平, 孙海林, 陆新征. 高强轻骨料混凝土结构: 性能、分析与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [4] JIN Y Y, JAE H K. Mechanical properties of preplaced lightweight aggregates concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 216: 440–449.
- [5] SANG-YEOP C, MOHAMED A E, DIETMAR STEPHAN, et al. The influence of different concrete additions on the properties of lightweight concrete evaluated using experimental and numerical approaches[J]. Constr Build Mater, 2018, 189: 314–322.
- [6] AGGELIS D G, SUTTER S D, VERBRUGGEN S, et al. Acoustic emission characterization of damage sources of lightweight hybrid concrete beams[J]. Eng Fracture Mech, 2019, 210: 181–188.
- [7] 郑秀华, 张宝生. 页岩陶粒预湿处理对轻集料混凝土的强度和抗冻性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005(6): 758–762.
ZHENG Xiuhua, ZHANG Baosheng. J Chin Ceram Soc, 2005(6): 758–762.
- [8] 叶艳霞, 王宗彬, 彭琼武, 等. 微细钢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 Qiongwu, et al. J Build Mater (in Chinese), 2020, 23(4): 955–962.
- [9] 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 Xiacong, et al. J Huazhong Univ Sci Tech: Nat Sci Ed (in Chinese), 2020, 48(5): 61–67.
- [10] 吴涛, 孙艺嘉, 刘喜, 等. GFRP 筋钢纤维高强轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(4): 129–139, 159.
WU Tao, SUN Yijia, LIU Xi, et al. J Build Struct (in Chinese), 2020, 41(4): 129–139, 159.
- [11] 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 Zhengpeng, HUANG Qiao, XIE Xinghua. J Build Mater (in Chinese), 2019, 22(3): 371–377.
- [12] YU Z P, TANG R, CAO P, et al. Multi-axial test and failure criterion analysis on self-compacting lightweight aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 215: 786–798.
- [13] REN Y, YU Z P, HUANG Q, et al. Constitutive model and failure criteria for lightweight aggregate concrete: A true triaxial experimental test[J]. Constr Build Mater, 2018, 171: 759–769.
- [14] 陈宇良, 吉云鹏, 陈宗平, 等. 钢纤维再生混凝土三轴受压力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2021, 39: 1–11.
CHEN Yuliang, JI Yunpeng, CHEN Zongping, et al. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2021, 39: 1–11.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17431. 1-2010, 轻集料及其试验方法 第 1 部分: 轻集料[S]. 中国标准出版社, 2010
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 17431. 1-2010, Lightweight aggregates and its test methods—Part 1: Lightweight aggregates[S]. China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd. 2010. (in Chinese)
- [16] 中国国家标准化管理委员会. JGJ/T 12-2019. 轻骨料混凝土应用技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standardization Administration of the People's Republic of China. JGJ/T 12-2019. Technical standard for application of lightweight aggregate concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [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(3): 344–351.
SONG Yupu, ZHAO Guofan, PENG Fang, et al. J Dalian Univ Technol (in Chinese), 1994(3): 344–351.
- [18] 宋玉普, 赵国藩, 彭放, 等. 三轴受压状态下轻骨料混凝土的强度特性[J]. 水利学报, 1993(6): 10–16.
SONG Yupu, ZHAO Guofan, PENG Fang, et al. J Hydraul Eng (in Chinese), 1993(6): 10–16.