

自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能

余振鹏¹, 黄侨^{*1}, 赵志青², 谢兴华³

(1. 东南大学 交通学院, 南京 211102; 2. 河海大学 工程管理部, 南京 211100; 3. 南京水利科学研究所, 南京 210029)

摘要: 为探究自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能,应用液压伺服机和材料压-剪试验机,对自密实轻骨料混凝土进行单轴受压、单轴劈裂抗拉和压-剪复合受力试验研究,通过试验得到不同加载工况下自密实轻骨料混凝土破坏形态和力-变形曲线,引用文献对普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪复合受力研究数据,对比分析自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力性能。研究表明:自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力破坏形态与普通混凝土和轻骨料混凝土相类似,随着轴压比的提高,剪切破坏断面摩擦痕迹逐步明显,混凝土碎渣也逐步提高,自密实轻骨料混凝土剪切破坏强度、残余荷载和剪切破坏位移也随之提高;剪切破坏强度提高幅度高于普通混凝土和轻骨料混凝土,残余荷载受轴压比影响提高幅度高于普通混凝土,但略低于轻骨料混凝土。基于主应力空间结合普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪试验数据,提出混凝土压-剪复合受力统一破坏准则,同时基于八面体应力空间,提出自密实轻骨料混凝土破坏准则,所提出的破坏准则具有良好的适用性。

关键词: 自密实轻骨料混凝土; 压-剪试验; 剪切特征值; 试验分析; 破坏准则

中图分类号: TU528.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)08-1984-11

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

YU Zhenpeng¹, HUANG Qiao^{*1}, ZHAO Zhiqing², XIE Xinghua³

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211102, China; 2. Engineering Management Department, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear loading, hydraulic servo machine and material compression-shear testing machine were used to study the uniaxial compression, uniaxial splitting tension and compression-shear composite loading of self-compacting lightweight aggregate concrete. The failure modes and force-deformation curves of aggregate concrete were compared with those of ordinary concrete and lightweight aggregate concrete under combined compression-shear loading. The results show that the failure modes of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear loading are different from those of ordinary concrete and lightweight aggregate concrete. Similarly, with the increase of axial compression ratio, the frictional trace of shear failure section is gradually obvious, and the concrete slag is also increased. At the same time, the shear failure strength, residual load and shear failure displacement of self-compacting lightweight aggregate concrete are gradually increased, and the shear failure strength affected by axial compression ratio is higher than that of ordinary concrete and concrete. While its residual load by axial compression ratio increases more than ordinary concrete, slightly lower than lightweight aggregate concrete. Based on the principal stress space and the compression-shear test data of ordinary concrete and lightweight aggregate concrete, the unified failure criterion equation of concrete under combined compression-shear loading was pro-

收稿日期: 2018-08-28; 录用日期: 2018-10-20; 网络出版时间: 2018-11-02 10:57

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20181030.1122.008.html>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(KYCX_170132); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX_170132); 国家重点研发计划(2016YFC0401804)

通讯作者: 黄侨, 博士, 教授, 研究方向为组合结构、桥梁养护管理和混凝土强度理论 E-mail: qhuanghit@126.com

引用格式: 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).

posed, and the failure criterion of self-compacting lightweight aggregate concrete was proposed based on octahedron stress space. The proposed failure criterions have good applicability.

Keywords: self-compacting lightweight aggregate concrete; compression-shear test; shear characteristic value; experimental analysis; failure criterion

自密实轻骨料混凝土目前属于混凝土领域较为新颖衍生类别，它不仅具备自密实混凝土无需振捣即密实、良好的耐久性和工作性能等优势，同时还兼备轻骨料混凝土轻质高强的特性，结合自密实混凝土和轻骨料混凝土共同优势而形成的一种新型混凝土材料，具有一定的研究意义和工程应用价值^[1-5]。

对于自密实轻骨料混凝土相关学者展开了广泛的研究，目前相关研究主要集中在自密实轻骨料混凝土的配合比、工作性能、力学性能和耐久性能^[6-8]。Müller等^[9-11]提出了自密实轻骨料混凝土配合比设计方法，同时研究发现自密实轻骨料混凝土有较好的工作性能；Hwang等^[12]对自密实轻骨料混凝土氯离子渗透性能进行研究。Choi等^[13]针对自密实轻骨料混凝土引进了压缩系数 P_f 来计算配合比中轻骨料的含量；Shi等^[14]不仅对自密实轻骨料混凝土的配合比设计进行研究，同时从基本力学性能和抗冻性等角度进行分析。在实际工程中混凝土的受力不仅是单轴受压、受拉和纯剪作用，更多的是复合受力状态，如多轴受力状态^[15-18]。然而，针对自密实轻骨料混凝土多轴受力相关研究文献相对不足，对自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力状态的研究鲜见公开报道，实际工程中混凝土应用在混凝土深梁、牛腿和道路等位置均处于压-剪复合受力状态，因此有必要对轻骨料混凝土压-剪复合受力状态进行研究。

根据上述综述，本文对自密实轻骨料混凝土多轴受力状态下的压-剪复合受力性能进行试验研究，

考虑4种不同的轴压比，应用液压伺服机和材料压-剪试验机得到自密实混凝土单轴受压、单轴劈裂抗拉和不同轴压比下剪力作用下的破坏形态和力-变形曲线，通过引用普通混凝土和轻骨料混凝土试验研究数据，对比分析自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力学性能，并从主应力空间和八面体应力空间提出自密实轻骨料混凝土破坏准则。

1 试验方案

1.1 自密实轻骨料混凝土配合比

本文对自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力性能进行试验研究，自密实轻骨料混凝土设计强度为30 MPa (Self-compacting lightweight aggregate concrete, SCLC30)，根据JGJ/T283—2012^[19]确定自密实轻骨料混凝土配合比，其中混凝土材料所用水泥为普通硅酸盐水泥P.O 42.5，粗骨料为粒径范围为4~16 mm的页岩陶粒(Lightweight aggregate, LWA)，细骨料为最大粒径为5 mm的天然河砂(其中河沙细度模数为2.5，平均粒径为0.35~0.5 mm，表观密度为2 650 kg/m³)，粉煤灰和减水剂(萘磺酸甲醛缩合物减水剂，减水剂掺量为水泥质量的1.0%~2.0%，相应减水率为20%~30%)，自密实轻骨料混凝土配合比如表1所示，所用页岩陶粒轻骨料物理特性如表2所示。自密实轻骨料混凝土浇筑方法不同于普通混凝土和轻骨料混凝土，首先将水泥、细骨料和矿粉倒入搅拌机中搅拌，待搅拌均匀后将伴有减水剂的城市自来水倒入搅拌机中充分搅拌，最后将页岩陶粒倒入其中，搅拌适时后倒入试模。

表 1 设计强度为 30 MPa 的自密实轻骨料混凝土配合比

Concrete grade	Quality of each component of concrete per cubic meter						kg/m ³
	Cement	Water	Lightweight aggregate	Fine aggregate	Mineral powder	Water reducing agent	
SCLC30	388	197	300	710	166	8.32	

Note: SCLC30—Self-compacting lightweight aggregate concrete with design strength of 30 MPa.

表 2 页岩陶粒(轻骨料)物理特性

Table 2 Physical properties of Shale ceramsite (lightweight aggregate)

Cylinder strength/MPa	Bulk density/(kg•m ⁻³)	Apparent density/(kg•m ⁻³)	Hygroscopic coefficient(1 h)/%	Hygroscopic coefficient(24 h)/%	Porosity/%	Maximum particle size D_{max} /mm
6.9	789	1 398	2.18	3.28	48.2	16

1.2 试验加载工况

为对自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力状态力学性能进行研究,设定三种不同的加载方式分别为:单轴受压、单轴劈裂抗拉和压-剪复合受力,其中压-剪复合受力考虑设置四种不同的轴压比分别为 $0\% f_c A_s$ 、 $1\% f_c A_s$ 、 $2\% f_c A_s$ 和 $3\% f_c A_s$ (其中: f_c 为自密实轻骨料混凝土单轴抗压强度; A_s 为剪切破坏断面面积),自密实轻骨料混凝土加载工况如表3所示,由于混凝土材料存在随机性和离散性特征,每组工况加工3个试件,取均值分析。

考虑混凝土尺寸效应影响,文献[20-21]对于混凝土力学性能研究设计尺寸和试验设备限制原因三方面因素,本文自密实轻骨料混凝土单轴抗压试验和单轴劈裂抗拉试验试件设计尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,压-剪试验试件设计尺寸为 $205\text{ mm}\times 205\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ (剪切破坏断面尺寸为 $205\text{ mm}\times 205\text{ mm}$) [20-21]。

1.3 试验加载设备与加载方案

自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力性能试验设定3个部分:单轴受压、单轴劈裂抗拉和压-剪试验。其中单轴受压和单轴劈裂抗拉采用同一装置液压伺服机,该设备装备荷载传感器和位移传感器,荷载传感器最大误差为最大量程的1%,位移传感器最大误差为0.00005 mm,混凝土单轴劈裂抗拉试验采用西安力创SYS-1000液压伺服机和劈裂抗拉装置完成,能够满足试验要求。混凝土单轴受压和单轴劈裂抗拉采用位移控制加载方式,其加载速

率为1 mm/min,试件破坏即停止加载。

自密实轻骨料混凝土压-剪试验采用西安力创16122-372-1材料压-剪试验机,该设备不同于其它剪切试验,采用直接剪切方式得到混凝土的剪切荷载,材料压-剪试验机在轴向和横向均装备独立的荷载传感器和位移传感器,传感器精度与液压伺服机相同,能够满足试验要求。本文压-剪试验采用定侧向加载方式,即在轴向以0.5 MPa/min加载速率进行加载到设定轴压比时,横向施加剪切荷载,采用位移控制方式控制加载速率为1 mm/min,直至试件破坏,停止加载[20]。横向正式加载时,传感器开始采集数据。图1为自密实轻骨料混凝土压-剪加载设备与加载示意图。

2 结果分析

2.1 自密实轻骨料混凝土破坏形态

自密实轻骨料混凝土单轴受压、单轴劈裂抗拉和不同轴压比下的剪切破坏形态如图2所示。

自密实轻骨料混凝土单轴受压破坏机制与普通混凝土和轻骨料混凝土相同,轴向荷载作用下,泊松比效应影响在垂直于轴向方向形成拉应变,随着轴向荷载的提高,当拉应变大于自密实轻骨料混凝土极限拉应变值时,试件发生破坏。如图2(a)所示,自密实轻骨料混凝土单轴受压破坏形态为斜剪破坏形态,该破坏形态不同于普通混凝土和轻骨料混凝土,普通混凝土和轻骨料混凝土破坏后在侧面形成裂缝面,分析原因在于自密实轻骨料混凝土中

表 3 自密实轻骨料混凝土加载工况

Table 3 Loading conditions of self-compacting lightweight aggregate concrete

No.	Loading schemes	Axial pressure/kN	No.	Loading schemes	Axial pressure/kN
SCLC30-C	Compression	—	SCLC30-1%	Compression-shear	$1\% f_c A_s$
SCLC30-T	Splitting	—	SCLC30-2%	Compression-shear	$2\% f_c A_s$
SCLC30-0%	Compression-shear	0	SCLC30-3%	Compression-shear	$3\% f_c A_s$

Notes: f_c —Uniaxial compression strength; A_s —Section area of shear failure.

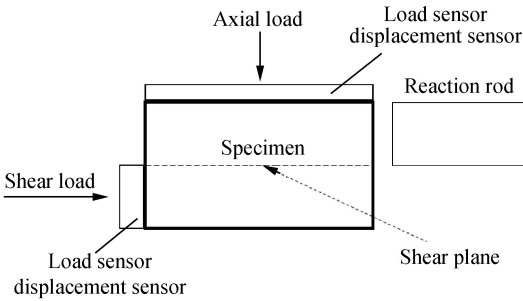


图 1 自密实轻骨料混凝土压-剪加载设备与加载示意图

Fig. 1 Compression-shear loading equipment and loading indication of self-compacting lightweight aggregate concrete

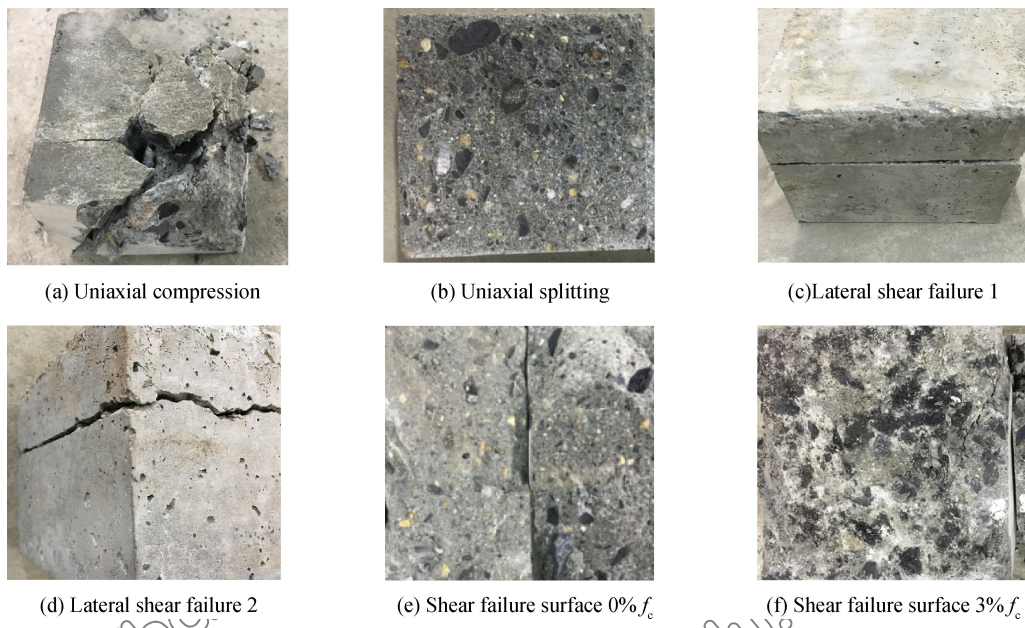


图 2 自密实轻骨料混凝土受力破坏形态
Fig. 2 Failure modes of self-compacting lightweight aggregate concrete

粗骨料含量较少且材料具有较高的密实性, 最终导致试件形成斜剪破坏形态^[3, 16]。自密实轻骨料混凝土单轴劈拉破坏形态如图 2(b)所示, 在劈裂抗拉荷载作用下, 试件劈裂抗拉应变达到极限拉应变时拉断破坏, 破坏断面水泥胶凝层和页岩陶粒均发生拉断破坏, 该破坏形态不同于普通混凝土仅水泥胶凝层破坏, 但与轻骨料混凝土劈裂抗拉破坏形态相同。这主要与混凝土采用的粗骨料有关, 由于自密实轻骨料混凝土采用页岩陶粒的筒压强度低于普通混凝土所用新料碎石。

图 2(c)~2(f)为不同轴压比下自密实轻骨料混凝土的破坏形态。横向荷载的作用下, 在自密实轻骨料混凝土剪切断面上形成剪切荷载, 当试件剪切断面的化学胶着力、范德华力和机械咬合力达到最大值时, 试件发生剪切破坏, 在垂直于剪切方向形成如图 2(c)所示剪切线破坏形态, 该笔直的剪切线是由于剪力盒之间的上下错动所形成。平行于剪切方向的剪切破坏线如图 2(d)所示, 由于混凝土材料破坏发展的随机性原因, 试件平行于剪切方向的剪切破坏线较为不规则。随着轴压比提高, 剪切破坏断面摩擦痕迹越发明显, 同时所形成的混凝土碎渣也逐步增多。分析原因在于试件受到剪切荷载作用完全破坏的后阶段, 上下剪切破坏断面的相互摩擦作用提供了横向剪切荷载的反力, 随着轴压比的提高, 试件剪切破坏断面

相互摩擦作用逐步提高, 最终导致剪切破坏断面摩擦痕迹变得明显。自密实轻骨料混凝土剪切破坏形态与轻骨料混凝土相同, 水泥胶凝层和页岩陶粒均发生剪切破坏, 而与普通混凝土仅水泥胶凝层发生剪切破坏不同^[20]。

2.2 自密实轻骨料混凝土荷载-位移曲线

根据 GB 50081—2002^[2] 规范规定, 应用液压伺服机和劈裂抗拉装置得到自密实轻骨料混凝土单轴受压曲线和单轴劈拉曲线, 如图 3~4 所示。其中单轴劈裂破坏荷载转化为拉应力如下式:

$$f_t = \frac{2F}{\pi A} \tag{1}$$

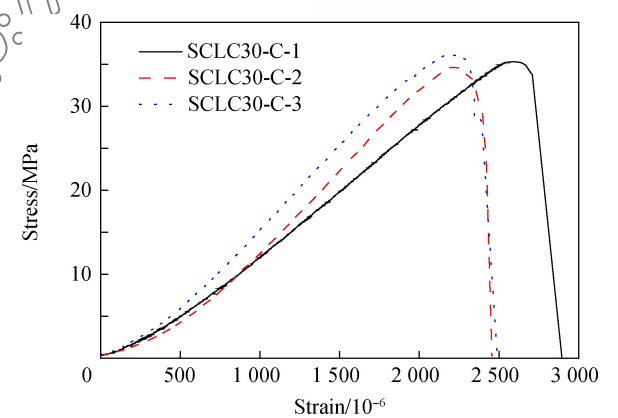


图 3 自密实轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of self-compacting light mass aggregate concrete under uniaxial compression

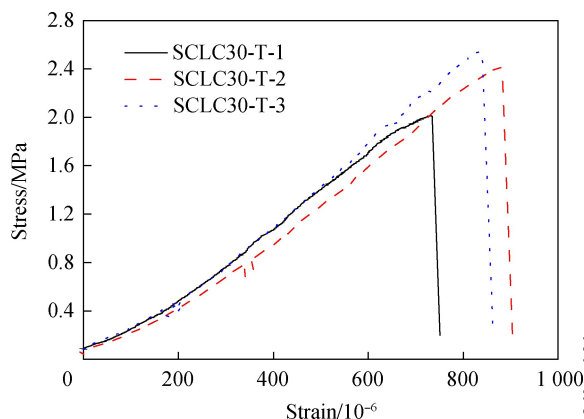


图4 自密实轻骨料混凝土单轴劈裂抗拉应力-应变曲线
Fig. 4 Splitting stress-strain curves of self-compacting light mass aggregate concrete

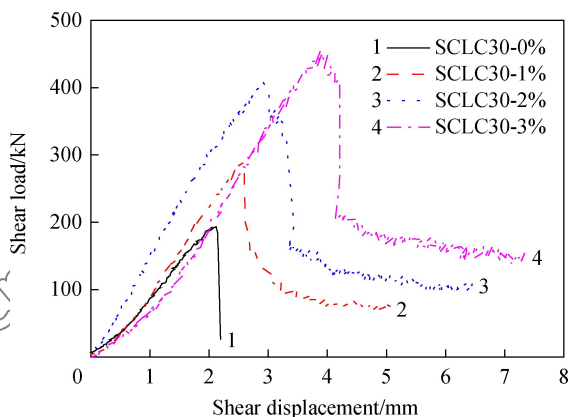


图5 自密实轻骨料混凝土剪切荷载-位移曲线
Fig. 5 Shear load-displacement curve of self-compacting light mass aggregate concrete

式中: f_t 为自密实轻骨料混凝土劈裂抗拉强度; F 为自密实轻骨料混凝土劈裂破坏荷载; A 为自密实轻骨料混凝土劈裂面面积(100 mm×100 mm)。

如图3所示,自密实轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线发展趋势与普通混凝土和轻骨料混凝土相同,曲线发展分为弹性阶段、弹塑性阶段和下降段,单轴受压应力-应变曲线具有良好的连续性和光滑性,存在不同的地方在于自密实轻骨料混凝土在曲线发展的下降段脆性破坏特征明显,塑性变形能力相对不足,曲线下降段下降变化幅度较大,需要说明的是受设备荷载传感器和位移采集仪在加载初期出现采集波动影响,在受压应力-应变曲线的初期出现曲线软化现象,但曲线整体发展趋势符合混凝土本构关系,故采集仪和传感器初期波动不影响试验结果整体分析。自密实轻骨料混凝土单轴劈拉应力-应变曲线如图4所示,该曲线发展趋势与普通混凝土和轻骨料混凝土完全相同,没有明显差别,单轴劈裂抗拉荷载作用下,试件的破坏形态相比于单轴受压表现出更为明显的脆性破坏特征。

应用材料压-剪试验机,考虑不同轴压比作用(0% f_c 、1% f_c 、2% f_c 和3% f_c),得到自密实轻骨料混凝土横向剪切荷载-位移曲线,如图5所示。可知,自密实轻骨料混凝土横向剪切荷载-位移曲线发展趋势与普通混凝土和轻骨料混凝土发展趋势相同,曲线发展分为3个阶段,分别为荷载上升阶段、荷载下降阶段和荷载相对稳定阶段。其中第三阶段横向荷载主要是由于剪切破坏断面相互作用形成的摩擦作用所提供的反力作用,当轴压比为0%

f_c 时,残余荷载(相对稳定荷载)为0,随着轴压比的提高,剪切破坏断面残余荷载逐步提高。同时随着轴压比的提高,自密实轻骨料混凝土横向剪切破坏荷载逐步提高,横向剪切破坏位移(破坏荷载对应的位移值)也随之提高。分析原因在于轴向荷载的作用,使混凝土试件骨料界面之间的机械咬合力得到有效的提高,从而使横向剪切荷载随着轴压比的增大而增大。

2.3 自密实轻骨料混凝土特征强度

为进一步探究自密实轻骨料混凝土压-剪复合作用,根据自密实轻骨料混凝土横向剪切荷载-位移曲线,提取峰值荷载值和残余荷载值,分析轴压比对自密实轻骨料混凝土剪切荷载的作用影响,引用文献[20]中普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪试验数据进行对比研究,同时深化分析文献[20]普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪复合受力试验数据,如表4所示。文献[20]针对普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪试验研究所采用的粗骨料、细骨料原材料和城市自来水、试件尺寸和试验设备与本文自密实轻骨料混凝土压-剪试验完全相同,具有一定的可比性。

2.3.1 抗剪强度

根据表4自密实轻骨料混凝土压-剪作用特征强度值,并引用文献对普通混凝土与轻骨料混凝土压-剪试验数据,得到如图6所示的轴压强度与剪切强度关系。可知,随着轴压比的提高,自密实轻骨料混凝土剪切强度也随之提高,这与普通混凝土(C30)和轻骨料混凝土LC30变化趋势相同。应用莫尔-库伦准则,提出自密实轻骨料混凝土压应力-

表 4 自密实轻骨料混凝土压-剪作用特征值

Table 4 Characteristic values of self-compacting lightweight aggregate concrete under compression-shear

No.	Shear peak strength/kN	Shear stress/MPa	Relatively stable strength/kN	Shear peak displacement/mm
SCLC30-0%	193.36	4.60	0	2.12
SCLC30-1%	288.35	6.86	85.02	2.56
SCLC30-2%	407.43	9.69	124.67	2.92
SCLC30-3%	454.23	10.81	182.32	3.88

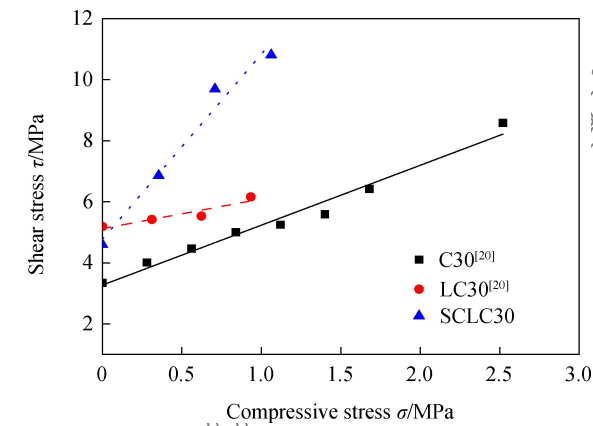


图 6 自密实轻骨料混凝土轴压强度与剪切强度的关系
Fig. 6 Relationship between axial compressive strength and shear strength of self-compacting lightweight aggregate concrete

剪应力方程：

$$\tau = a + b\sigma \quad (2)$$

其中： τ 为混凝土剪应力； σ 为混凝土压应力。

根据本文自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力压应力与剪应力试验数据，并与普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪试验数据应用式(2)进行数学回归分析，得到表 5 所示系数。

表 5 自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力数学

回归方程系数(式(2))

Table 5 Mathematical regression equation coefficients of self-compacting lightweight aggregate concrete compression-shear loading (Eq. (2))

Types of concrete	a	b	Correlation coefficient R^2
C30 ^[20]	3.27	1.96	0.9719
LC30 ^[20]	5.12	0.97	0.8244
SCLC30	4.77	6.06	0.9629

Notes: C—Plain concrete; LC—Lightweight aggregate concrete.

基于莫尔-库伦准则对普通混凝土、轻骨料混凝土和自密实轻骨料混凝土进行数学回归分析，得到如图 6 自密实轻骨料混凝土轴压强度与剪切强度的关系及其如表 5 所示的数学回归方程系数，根据图示分析和数学回归方程系数 R^2 分析，莫尔-库伦准则方程能较好地描述混凝土压-剪复合受力破坏

规律。考虑将混凝土剪应力和轴向压应力进行无量纲化处理，提出如下式所示混凝土压-剪复合受力 $\sigma/f_c - \tau/f_t$ 关系式：

$$\frac{\tau}{f_t} = c + d \frac{\sigma}{f_c} \quad (3)$$

根据式(3)，应用本文试验研究数据和文献引用数据，进行数学回归方程无量纲化分析，得到如图 7 所示的自密实轻骨料混凝土轴压比与剪切系数的关系和表 6 所示的数学回归方程系数。

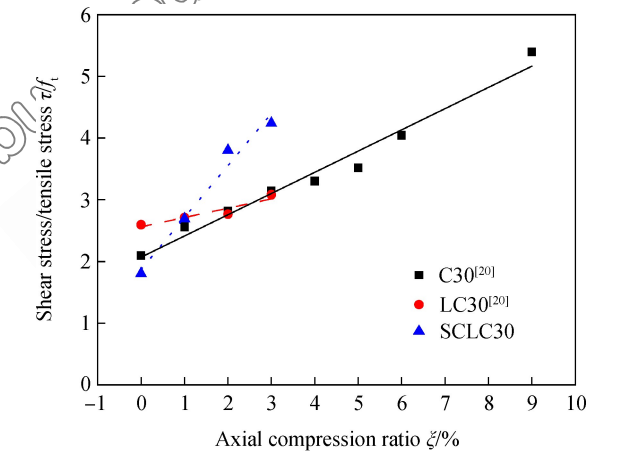


图 7 自密实轻骨料混凝土轴压比与剪切系数的关系
Fig. 7 Relationship between axial compression ratio and shear coefficient of self-compacting lightweight aggregate concrete

表 6 自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力数学

回归方程系数(式(3))

Table 6 Mathematical regression equation coefficients of self-compacting lightweight aggregate concrete compression-shear loading (Eq. (3))

Types of concrete	c	d	Correlation coefficient R^2
C30 ^[20]	2.07	0.34	0.9719
LC30 ^[20]	2.56	0.15	0.8244
SCLC30	1.87	0.84	0.9629

由图 7 和表 6 可知，所提出的式(3)能较好地描述 3 种不同混凝土破坏规律，同时基于系数 d 分析，自密实轻骨料混凝土受侧向轴压比影响明显高于普通混凝土和轻骨料混凝土，轻骨料混凝土受轴

压比影响最小。原因在于:相比于同强度等级普通混凝土和轻骨料混凝土,自密实轻骨料混凝土水灰比系数较高,由于水灰比较大导致自密实轻骨料混凝土界面过渡区较为薄弱,在轴向荷载作用在自密实轻骨料混凝土上,导致在其界面过渡区域容易产生微裂纹,它们的存在和发展减小了粗骨料与粗骨料之间的间距,使材料间的机械咬合作用提高幅度相对较大,即最终导致自密实轻骨料混凝土横向剪切强度受轴压比影响提高幅度高于普通混凝土和轻骨料混凝土。

2.3.2 残余强度

混凝土在压-剪复合作用下,横向剪切荷载作用在剪切荷载-位移曲线第三阶段主要是由剪切破坏断面间的摩擦作用提供反力,即在第三阶段横向剪切荷载值由轴压荷载值和剪切破坏断面间的摩擦系数确定,根据本文试验研究数据,并引用普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪复合作用的数据值作对比,得到如图8所示的自密实轻骨料混凝土残余荷载与轴向荷载关系。

分析可知,自密实轻骨料混凝土残余荷载随着轴向荷载的提高逐步提高,该变化趋势与普通混凝土和轻骨料混凝土相类似,由于轴向荷载作用,提高了剪切破坏断面的摩擦作用,最终使横向剪切荷载值的提高。但自密实轻骨料混凝土残余荷载随轴向荷载变化幅度高于普通混凝土,与轻骨料混凝土变化幅度相接近。根据文献[20]对普通混凝土与轻骨料混凝土压-剪复合作用研究,在剪切破坏断面存在稳定的摩擦系数,如下式所示:

$$\tau = \mu \xi f_c$$
 (4)

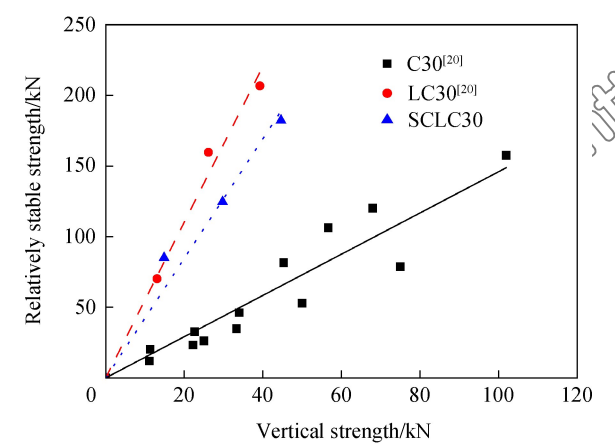


图8 自密实轻骨料混凝土残余荷载与轴向荷载的关系
Fig.8 Relationship between residual load and axial load of self-compacting lightweight aggregate concrete

式中: μ 为剪切破坏断面摩擦系数值; ξf_c 为混凝土轴向荷载值。

基于文献[20]普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪复合受力残余荷载值和本文试验研究数据进行数学回归对比分析得到如表7所示的剪切破坏断面摩擦系数值。

表7 自密实轻骨料混凝土剪切破坏断面摩擦系数数学回归方程值

Table 7 Mathematical regression equation of friction coefficient of self-compacting lightweight aggregate concrete shear failure section			
Types of concrete	C30 ^[20]	LC30 ^[20]	SCLC30
Friction coefficient μ	1.46	5.51	4.23
Correlation coefficient R^2	0.9544	0.9939	0.9874

分析可知,自密实轻骨料混凝土与普通混凝土和轻骨料混凝土相同,在其剪切破坏断面中,存在稳定的摩擦系数值,其中普通混凝土摩擦系数值低于轻骨料混凝土和自密实轻骨料混凝土,自密实轻骨料混凝土摩擦系数与轻骨料混凝土相对较为接近,但略低于轻骨料混凝土摩擦系数。分析原因在于自密实轻骨料混凝土剪切破坏断面与轻骨料混凝土相同,均为水泥胶凝层和页岩陶粒的剪切破坏,不同于普通混凝土剪切破坏断面仅水泥胶凝层的剪切破坏。在本文研究中自密实轻骨料混凝土摩擦系数略低于轻骨料混凝土,是由于自密实轻骨料混凝土配合比所用页岩陶粒的量低于轻骨料混凝土,最终导致其剪切破坏断面摩擦系数略低于轻骨料混凝土。

2.4 自密实轻骨料混凝土的变形

2.4.1 横向变形

根据本文自密实轻骨料混凝土不同轴压比作用下的横向剪切荷载-位移曲线,提取剪切破坏荷载对应的位移值分析自密实轻骨料混凝土压-剪复合作用下的位移变化关系,并引用普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪复合作用的变形参数进行对比分析,如图9所示。

可知,随着轴向荷载的提高,自密实轻骨料混凝土剪切破坏荷载对应的位移值逐步提高,该变化规律与普通混凝土和轻骨料混凝土相类似,但自密实轻骨料混凝土剪切破坏荷载对应的位移值高于普通混凝土,从整体规律分析与轻骨料混凝土位移变化关系较为接近。原因在于自密实轻骨料混凝土与轻骨料混凝土所用粗骨料页岩陶粒的变形能力高于

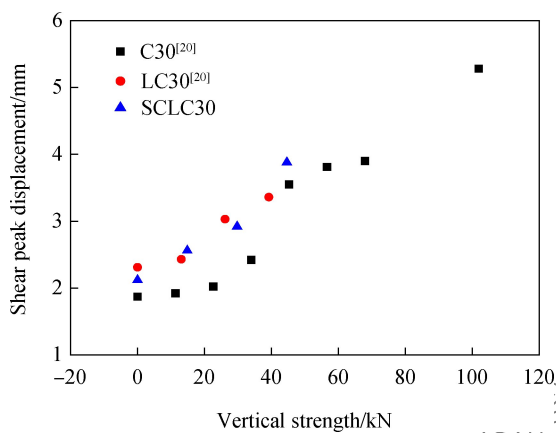


图 9 自密实轻骨料混凝土剪切破坏位移与轴向荷载的关系
Fig. 9 Relationship between shear failure displacement and axial load of self-compacting light weight aggregate concrete

普通混凝土所用粗骨料新料碎石, 即导致自密实轻骨料混凝土剪切变形能力高于普通混凝土。

2. 4. 2 轴向变形

对混凝土压-剪复合受力作用下的轴向变形时程曲线的分析, 可有效地验证混凝土在压-剪复合受力作用下的旋转效应和弯曲效应对试验的影响,

同时可从轴向变形的角度分析混凝土剪切破坏过程。需要说明的是当轴压比为 $0\% f_c$ 时, 由于设备限制原因, 未能采集到轴向变形值, 本文对轴压比大于 0 的工况进行分析, 根据本文自密实轻骨料混凝土试验研究数据和增加采集文献[20]普通混凝土和轻骨料混凝土轴向变形时程曲线数据进一步对比分析, 得到普通混凝土、轻骨料混凝土和自密实轻骨料混凝土轴向变形时程曲线, 如图 10 所示。

分析可知, 混凝土轴向变形曲线随时间变化关系分为两个阶段: (1) 位移稳定阶段, 该阶段轴向位移不随时间变化, 维持在零左右, 说明混凝土剪切破坏面尚未错动, 试件尚未破坏, 同时该阶段轴向位移稳定在零左右说明了混凝土受到剪切荷载作用未发生旋转效应和弯曲效应; (2) 位移提高阶段, 该阶段位移随着时间的变化逐步提高, 说明该阶段混凝土剪切破坏, 剪切破坏面发生了错动, 导致混凝土轴向变形增大。由此分析, 混凝土压-剪试验过程中旋转效应和弯曲效应未影响到本文试验研究数据采集精度, 试验数据分析具有一定的可信性, 同时随着轴压比的提高, 普通混凝土、轻骨料混凝土

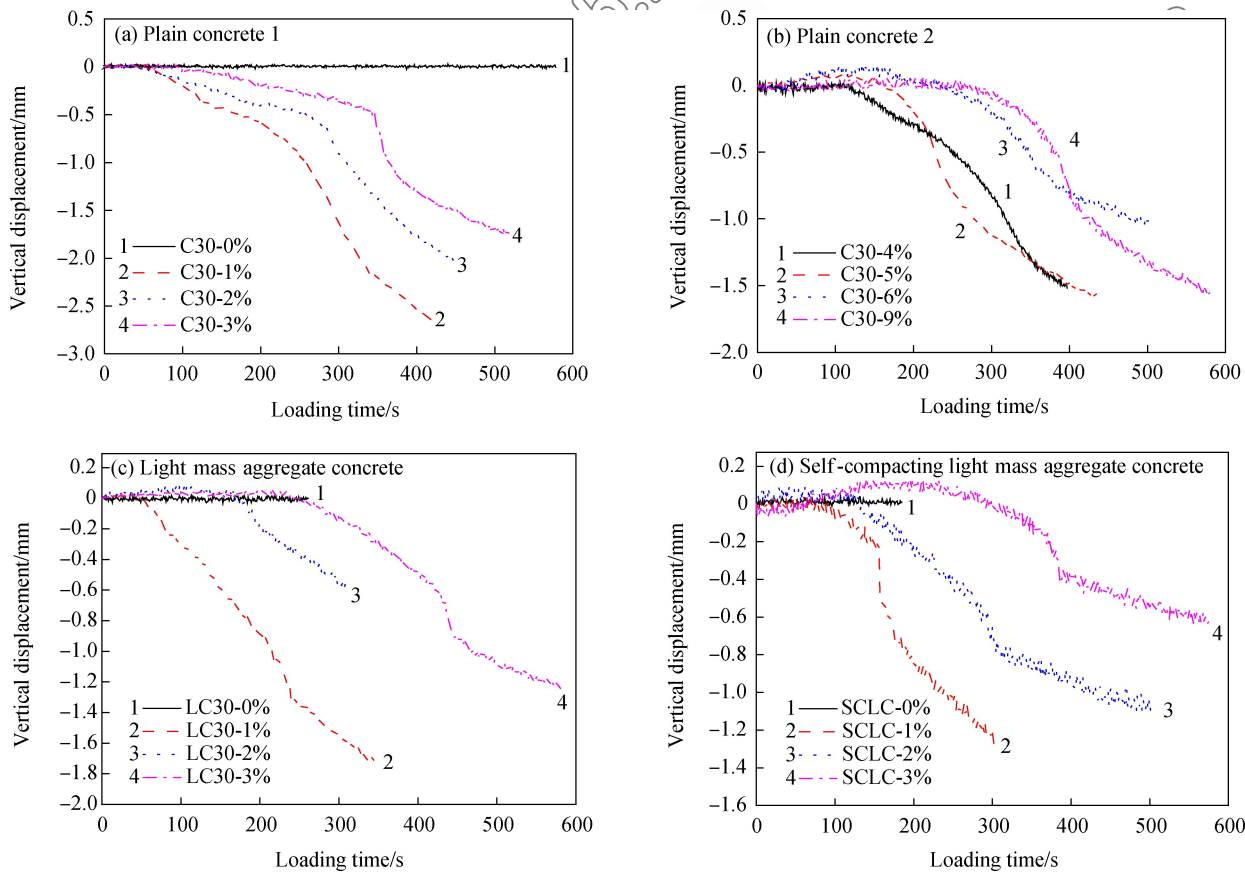


图 10 三种不同混凝土轴向变形时程曲线

Fig. 10 Time history axial deformation curves of three kinds of concrete

土和自密实轻骨料混凝土剪切破坏所需要的时间也逐步提高。

3 混凝土破坏准则

混凝土受到压-剪复合作用时，其压应力 σ 和剪应力 τ 可通过下式转化为第一主应力 σ_1 、第二主应力 σ_2 和第三主应力 σ_3 ^[8, 20]：

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \tag{5}$$

$$\sigma_2 = 0 \tag{6}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \tag{7}$$

3.1 混凝土主应力空间

主应力空间是将本文压-剪复合受力转化为三个主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 ，通过分析3个主应力之间的关系，得到混凝土压-剪复合作用的破坏准则关系式。针对混凝土压-剪复合受力特性，其 $\sigma_2=0$ ，即可简化分析 σ_1 和 σ_3 关系，得到该受力方式的破坏规律。为研究自密实轻骨料混凝土主应力空间破坏准则，本文将自密实轻骨料混凝土压-剪试验数据应用式(5)~(7)计算空间主应力。同时为深入分析普通混凝土和轻骨料混凝土主应力空间破坏规律并与自密实轻骨料混凝土破坏准则方程对比，对文献普通混凝土荷轻骨料混凝土压-剪试验数据进行相关转化并计算，得到如图 11 所示的混凝土压-剪复合作用下主应力空间破坏准则。

可知，自密实轻骨料混凝土第一主应力无量化处理系数与第三主应力无量纲化处理系数呈线性变化关系，同时普通混凝土和轻骨料混凝土变化系数关系与自密实轻骨料混凝土相类似。普通混凝土、轻骨料混凝土和自密实轻骨料混凝土第一主应力无

量化处理系数与第三主应力无量纲化处理系数变化趋势、变化规律和变化幅度相近，即提出如下式所示的三种混凝土压-剪复合受力主应力空间统一破坏准则方程：

$$\frac{\sigma_3}{f_c} = a_1 + a_2 \frac{\sigma_1}{f_c} \tag{8}$$

由本文自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力第一主应力和第三主应力试验研究数据和文献[20]普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪复合受力试验数据进行数学回归分析，得到如图 11 和下式所示的主应力空间统一破坏准则图示与方程：

$$\frac{\sigma_3}{f_c} = -0.03828 - 0.69545 \frac{\sigma_1}{f_c} \quad R^2=0.9015 \tag{9}$$

由图 11 和式(9)可知，基于式(8)主应力空间提出的破坏准则方程即能较好地描述自密实轻骨料混凝土破坏规律，同时也适用于普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪复合受力状态下主应力空间的破坏规律。

3.2 混凝土八面体应力空间

八面体应力表示在三个主应力轴成等倾斜面上的应力，分别为正应力 σ_{oct} 和切应力 τ_{oct} ，以此来推导混凝土破坏准则方程^[3]。混凝土多轴受力状态中，基于八面体应力空间破坏准则能够较好的表述混凝土空间应力关系，其中正应力 σ_{oct} 和剪应力 τ_{oct} 表达式如下^[8]：

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{10}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{11}$$

根据文献[20]对普通混凝土与轻骨料混凝土压-剪复合受力破坏准则研究，在低轴压比下，混凝土基于八面体应力空间破坏准则应用一次函数关系相比于二次函数关系能够更简洁地说明混凝土的破坏准则规律，同时，基于八面体应力空间能够较好的表述混凝土压-剪复合受力作用下破坏准则关系，即提出如下关系式：

$$\frac{\tau_{oct}}{f_c} = a + b \left[\frac{\sigma_{oct}}{f_c} \right] \tag{12}$$

根据本文自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力下的试验研究数据，由式(12)进行数学回归分析，得到如图 12 和下式所示的自密实轻骨料混凝土八面体应力空间破坏准则。

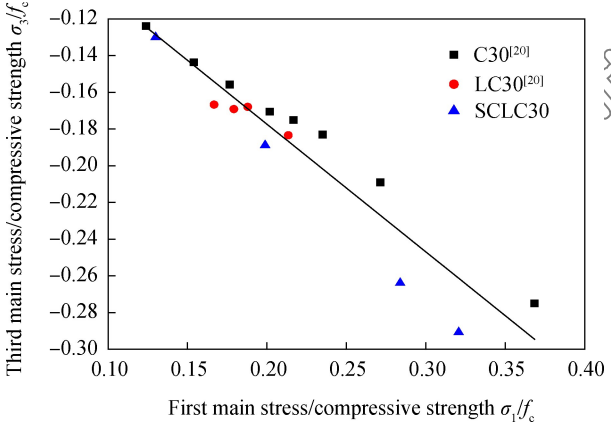


图 11 压-剪复合作用下混凝土主应力空间破坏准则
Fig. 11 Failure criterion of principal stress of concrete under combined compression-shear stress

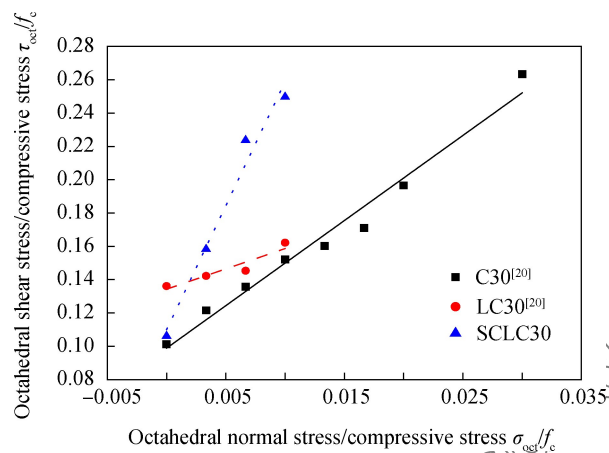


图 12 压-剪复合作用下混凝土八面体应力空间破坏准则
Fig. 12 Octahedral stress space failure criterion of concrete under combined compression shear

$$\frac{\tau_{oct}}{f_c} = 0.11001 + 144.88909 \left[\frac{\sigma_{oct}}{f_c} \right] \quad R^2 = 0.96325 \quad (13)$$

分析图 12 和公式 (13) 可知，基于八面体应力空间提出的一次方程破坏准则方程不仅能够很好地表述普通混凝土与轻骨料混凝土压-剪复合作用下的破坏准则关系，同时对自密实轻骨料混凝土压-剪复合作用下的破坏准则关系具有较好的适用性。

本文基于主应力空间和八面体应力空间提出两种不同形式表达式的自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力破坏准则方程。其中，主应力空间表达式较为直观，但适用于混凝土双轴受力和压-剪受力形式的多轴受力方式；八面体应力空间通过正应力 σ_{oct} 和切应力 τ_{oct} 表达混凝土破坏准则，具有较高的适用性，不仅适用于双轴和压-剪受力，同时对三轴受力破坏规律表达具有较好的适用性。对于多轴受力表达可将空间破坏包络面进行简化，便于分析和应用^[3]。

4 结 论

根据自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力作用下的试验研究，并引用普通混凝土和轻骨料混凝土压-剪复合受力下的试验数据作对比分析，得出如下主要结论。

(1) 自密实轻骨料混凝土单轴受压主要为斜剪破坏形态，与普通混凝土和轻骨料混凝土单轴受压破坏形态不同。其单轴劈裂抗拉和压-剪破坏形态与普通混凝土和轻骨料混凝土相同。随着轴压比提高，剪切断面受轴压比影响，剪切破坏断面摩擦痕

迹逐步加深，混凝土碎渣也随之增多。

(2) 自密实轻骨料混凝土压-剪复合作用下，剪切破坏荷载、残余荷载和剪切破坏位移均随着轴压比的提高逐步提高，该变化趋势与普通混凝土和轻骨料混凝土相同，但剪切破坏荷载受轴压比影响提高幅度高于普通混凝土和轻骨料混凝土；残余荷载提高幅度和剪切破坏位移高于普通混凝土，与轻骨料混凝土相近。

(3) 基于主应力空间，结合普通混凝土、轻骨料混凝土和自密实轻骨料混凝土压-剪试验数据，提出了混凝土压-剪复合作用统一破坏准则方程。同时基于八面体应力空间，提出了自密实轻骨料混凝土破坏准则方程，所提出的破坏准则方程能够较好地描述混凝土压-剪复合受力破坏规律。

参考文献：

[1] SATHYAN D, ANAND K B, PRAKASH A J, et al. Modeling the fresh and hardened stage properties of self-compacting concrete using random kitchen sink algorithm[J]. International Journal of Concrete Structures & Materials, 2018, 12(1): 24.

[2] 权长青, 焦楚杰, 苏永亮, 等. 钢纤维及陶粒掺量对轻质混凝土基本力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1306-1314.

QUAN Changqing, JIAO Chujie, SU Yongliang, et al. Influence of steel fibre and hardite adding content on the basic mechanical properties of lightweight concrete[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2018, 35(5): 1306-1314 (in Chinese).

[3] 过镇海. 混凝土的强度和变形：试验基础和本构关系[M]. 北京：清华大学出版社，1997.

GUO Zhenhai. Strength and deformation of concrete: Basis and constitutive relationship of test[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997 (in Chinese).

[4] 王磊. 自密实轻骨料混凝土性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.

WANG Lei. Research on properties of self-compacting lightweight concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).

[5] YUN W C, YONG J K, SHIN H C, et al. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2006, 36(9): 1595-1602.

[6] YANG S, WANG L, YANG S, et al. Effect of internal curing on characteristics of self-compacting concrete by using fine and coarse lightweight aggregates[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(10): 04017186.

- [7] TANG P, BROUWERS H J H. The durability and environmental properties of self-compacting concrete incorporating cold bonded lightweight aggregates produced from combined industrial solid wastes[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 167: 271-285.
- [8] PUTHIPAD N, OUCHI M, ATTACHAIYAWUTH A. Effects of fly ash, mixing procedure and type of air-entraining agent on coalescence of entrained air bubbles in mortar of self-compacting concrete at fresh state[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 180: 437-444.
- [9] MÜLLER H S, HAIST M. Self-compacting lightweight concrete-technology and use[J]. *Concrete Plant Precast Technology*, 2002, 71(2): 29-37.
- [10] MÜLLER H S, MECHTCHERINE V. Self-compacting lightweight concrete[J]. *Concrete Plant Precast Technology*, 2002, 18 (2): 36-39.
- [11] MÜLLER H S, HAIST M. First general technical approval self-compacting lightweight concrete[J]. *Concrete Plant Precast Technology*, 2004, 70(12): 8-17.
- [12] HWANG C L, HUNG M F. Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2005, 19(8): 619-626.
- [13] YUN W C, YONG J K, SHIN H C, et al. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete[J]. *Cement & Concrete Research*, 2006, 36(9): 1595-1602.
- [14] SHI C, WU Y. Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder [J]. *ACI Materials Journal*, 2005, 102(59): 355-363.
- [15] 姜海波, 陈颖, 李佳航, 等. 聚丙烯纤维增强混凝土干接缝的抗剪性能[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(7): 1963-1974.
JIANU Haibo, CHEN Ying, LI Jiahang, et al. Shear strength of polypropylene fiber reinforced concrete dry joints [J]. *Acta Materice Compositae Sinica*, 2018, 35(7): 1963-1974 (in Chinese).
- [16] REN Y, YU Z, HUANG Q, et al. Constitutive model and failure criterions for lightweight aggregate concrete: A true triaxial experimental test[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 171: 759-769.
- [17] WU Z M, WU X, ZHENG J J, et al. An experimental study on the performance of self-compacting lightweight concrete exposed to elevated temperature[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2013, 65(13): 780-786.
- [18] SHI L, WANG L, SONG Y, et al. Dynamic multiaxial strength and failure criterion of dam concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 66(1): 181-191.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 自密实混凝土应用技术规程: JGJ/T283—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical specification for application of self-compacting concrete: JGJ/T283—2012 [S]. Beijing: China Standards Press, 2012 (in Chinese).
- [20] 余振鹏, 黄乔, 谢兴华, 等. 普通与轻骨料砼压-剪复合受力性能试验研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(24): 4269-4275.
YU Zhenpeng, HUANG Qiao, XIE Xinghua, et al. Comparative study on compressive-shear behavior of ordinary concrete and lightweight aggregate concrete[J]. *Materials Review*, 2018, 32(24): 4269-4275 (in Chinese).
- [21] WONG R C K, MA S K Y, WONG R H C, et al. Shear strength components of concrete under direct shearing[J]. *Cement & Concrete Research*, 2007, 37(8): 1248-1256.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Standards Press, 2002 (in Chinese).