

围压作用下碱激发混凝土的本构模型与破坏准则

刘 杉¹, 石晓贝¹, 郝逸飞²

(1. 天津大学, 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350;

2. 河北工业大学, 天津市装配式建筑与智能建造重点实验室, 天津 300400)

摘 要: 作为一种极具潜力的可持续建筑材料, 碱激发混凝土(AAC)可能处于复杂应力状态, 但是目前 AAC 三轴压缩性能的研究所考虑的约束率较低且忽略了试件强度影响。针对不同强度的 AAC 开展常规三轴压缩试验(约束率范围为 0~1.4), 研究 AAC 在围压作用下的破坏模式、力学性能、本构模型和破坏准则。结果表明: 随着围压增加, AAC 的破坏模式由脆性转变为伪延性。AAC 强度越高, 三轴压缩强度提高地更显著, 但变形能力较弱。现有硅酸盐水泥混凝土(PCC)的三轴压缩本构模型会极大高估 AAC 在峰值应力时的轴向应变。基于试验数据, 提出了 AAC 的三轴压缩本构模型和破坏准则。

关键词: 碱激发混凝土; 三轴压缩; 本构模型; 破坏准则

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)08-1920-08

网络出版时间: 2023-04-28



Constitutive Model and Failure Criteria of Alkali-Activated Concrete Under Confining Pressure

LIU Shan¹, SHI Xiaobei¹, HAO Yifei²

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Prefabricated Buildings and Intelligent Construction, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China)

Abstract: As a promising sustainable building material, alkali-activated concrete (AAC) is subjected to complex stresses. However, current investigations on the triaxial compression performance of AAC have restricted confinement ratios and do not account for specimen strength effects. In this work, conventional triaxial compression tests were conducted for AAC to investigate the damage mode, mechanical properties, constitutive model and failure criterion under confining pressure. The confinement ratio range is 0–1.4. The results show that the damage mode of AAC transforms from brittle to pseudo-ductile as the confining pressure increases. The triaxial compression strength increases significantly with AAC strength, attaining the deformation capacity with lower strength. A triaxial compression constitutive model available for Portland cement concrete (PCC) can substantially overestimate the axial strain of AAC at peak stress. Based on the experimental results, the triaxial compression constitutive model and failure criterion for AAC were proposed.

Keywords: alkali-activated concrete; triaxial compression; constitutive model; failure criterion

碱激发混凝土(AAC) (商业中也常被称为地聚合物混凝土)作为一种极具潜力的绿色建筑材料, 近年来受学术界和建筑行业的广泛关注^[1]。利用碱激发技术, 具有潜在水硬性或火山灰活性的硅铝酸盐固体废弃物均可作为制备 AAC 的前驱体^[2]。与硅酸盐

水泥混凝土(PCC)相比, AAC 具有相似甚至更优异的力学性能、耐腐蚀和耐火性能^[3], 最高可降低 PCC 生产中 80%以上的碳排放^[4]。

目前, 国内外学者主要关注 AAC 的无侧限基本力学性能^[5–9], 但是混凝土常常处于复杂应力状

收稿日期: 2022-10-08。 修订日期: 2022-10-22。

基金项目: 河北省自然科学基金(E2020402079); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U20A20313)。

第一作者: 刘 杉(1995—), 男, 博士研究生。

通信作者: 郝逸飞(1985—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-10-08. Revised date: 2022-10-22.

First author: LIU Shan (1995–), male, Doctoral candidate.

E-mail: shan_liu@tju.edu.cn

Correspondent author: HAO Yifei (1985–), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yifei.hao@hebut.edu.cn

态。钢管混凝土、螺旋箍混凝土、纤维增强聚合物混凝土管等的核心部位,隧道和矿井等地下混凝土空间结构均可能遭受约束率(围压与单轴压缩强度的比值)为 0.01~0.40 的约束作用^[10]。在冲击和爆炸荷载作用下,混凝土内部可能会产生约束率更高的复杂应力^[11]。此外,复杂应力状态下混凝土的失效参数是建立材料本构模型及失效准则的基础^[12]。因此,复杂应力状态下的力学性能对混凝土结构安全经济的设计与应用具有重要作用。

目前国内外学者针对碱激发材料三轴力学性能的研究集中在净浆和砂浆层次。Lyu 等^[13]和 Nasvi 等^[14]发现碱激发净浆在围压下的应力-应变曲线和破坏模式与碱激发反应程度和凝胶产物含量有关。Haider 等^[15]提出了碱激发净浆的应力-应变本构模型。Khan 等^[16]研究了高强碱激发砂浆和混杂纤维高强碱激发复合材料的三轴压缩性能和破坏准则。

此外,混凝土是一种具有各向异性的多相复合材料,骨料和骨料-浆体间的薄弱界面会影响其非线性破坏行为^[17]。一般地,在围压作用下砂浆中的裂纹连续平滑,而混凝土中由于粗骨料的存在会改变裂纹传播路径^[18],材料间失效机制的差异性在高围压下更加显著^[18]。因此,AAC 的破坏模式、本构模型及失效准则无法采用上述研究结论^[13-16]进行推论。王怀亮^[19]研究了 AAC 双轴压缩力学性能并提出相应的强度准则。Gholampour 等^[20]研究了高炉矿渣(GGBFS)含量和养护条件对 AAC 三轴压缩性能的影响,揭示了 PCC 与 AAC 三轴压缩性能的异同^[21],但是他们没有提出适用于 AAC 的三轴压缩本构模型,并且考虑的约束率较低(0~0.5)。与更高约束率的试验结果相比,低约束率下的试验结论可能会导致对材料行为的错误预测^[22]。另一方面,

Gholampour 等^[20]的研究仅采用单一强度的 AAC。然而,围压对混凝土力学性能的影响具有强度敏感性^[23]。

因此,为系统地揭示围压作用下 AAC 的力学特征,本工作针对不同强度 AAC,在 0~1.4 的约束率范围内开展三轴压缩试验,探究围压对 AAC 破坏模式、应力-应变曲线、三轴压缩强度和变形能力的影响,提出 AAC 的三轴压缩本构模型与失效准则,为其在土木、水利和建筑等领域的设计和应用奠定理论基础。

1 实验

1.1 材料和混凝土配比

GGBFS 和 I 级粉煤灰(FA)作为 AAC 的前驱体,化学组成与物理性质如表 1 所示。碱激发剂为模数为 1.2 的 Na_2SiO_3 溶液 [$w(\text{Na}_2\text{O})=21.44\%$, $w(\text{SiO}_2)=25.09\%$, $w(\text{H}_2\text{O})=53.47\%$, w 为质量分数],由模数为 2.5 的市售 Na_2SiO_3 溶液 [$w(\text{Na}_2\text{O})=12.17\%$, $w(\text{SiO}_2)=29.3\%$, $w(\text{H}_2\text{O})=58.53\%$]经过 NaOH 颗粒(质量分数>95%)调配而成。由于 AAC 抗碳化性能弱,可能会导致包裹其中的钢筋发生腐蚀并膨胀,这一缺陷很大程度上限制了 AAC 的结构应用。因此,本工作将煅烧水滑石粉末作为抗碳化添加剂,AAC 的抗碳化能力可提升 80%以上^[24-25]。采用河砂和最大粒径为 10 mm 的碎石分别作为细骨料和粗骨料。一般地,在相同含量激发剂下,FA 与 GGBFS 的质量比与 AAC 的抗压强度负相关^[2]。本工作 2 种强度 AAC 的 FA 与 GGBFS 质量比分别为 9(AAC18)和 1(AAC42),配比如表 2 所示。

1.2 试件制备

首先将 FA、GGBFS、煅烧水滑石粉末以及粗

表 1 粉煤灰(FA)和高炉矿渣(GGBFS)性质
Table 1 Properties of flash ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS)

Material	Mass fraction/%											Particle size $D_{50}/\mu\text{m}$	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	Na_2O	SO_3	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Other		
FA	49.46	34.53	3.57	0.52	6.35	0.42	1.14	1.38	0.40	1.92	0.31	56.423	2.6
GGBFS	22.94	11.37	52.16	6.80	0.57	0.50	2.09	0.39	0.15	2.33	0.7	9.876	2.8

表 2 碱激发混凝土(AAC)配合比
Table 2 Mixing proportions of alkali-activated concrete (AAC)

Sample No.	FA	GGBFS	Na_2SiO_3 solution	Water	Sand	Gravel	Calcined hydrotalcite
AAC18	392.73	43.63	182.66	138.50	654.55	1 003.64	26.18
AAC42	220.18	220.18	184.34	112.47	660.55	1 012.84	26.42

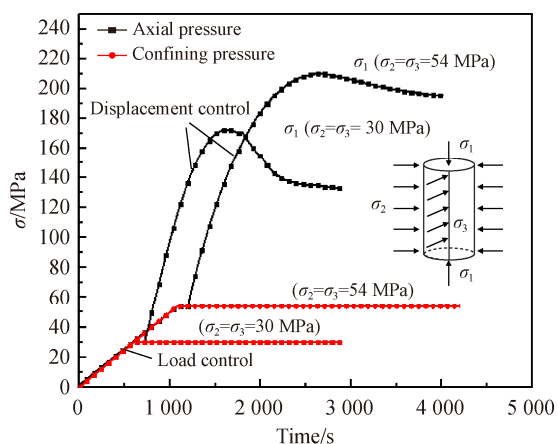
Note: Number behind the AAC represents the compressive strength of cylinder sample.

细骨料放入强制式搅拌机混合 3 min, 随后将提前 1 d 制备的复合碱激发剂缓慢加入干料并搅拌 5 min, 随后分层装入钢模(ϕ 50 mm $\times$ 100 mm)并振动 30 s 以排除浆体中多余空气。试件在实验室环境覆膜养护 1 d 后拆模, 标准养护[(20 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C, 相对湿度 95%] 28 d。在试验前磨平硬化试样端面, 保持试件高度为(98 $\pm$ 1) mm。为减小试件差异性并保证试验结果的稳定性, 采用混凝土超声波检测仪剔除初始缺陷较大的试样。AAC18 和 AAC42 的 28 d 龄期的圆柱体轴心抗压强度(f_c)分别为 17.6 MPa 和 42.1 MPa。

1.3 方法

三轴试验采用 MTS815 多功能岩石试验系统。该仪器具有足够的刚度并提供最大 4 600 kN 的轴向压力。位移计分别固定在试样两侧和中部, 测量其轴向和横向变形。特别地, 为保证试验结果的客观性, 试验前需在试样表面绑扎两层热塑管, 防止加压过程中液压油向试样内部渗透。

正式加载前应先施加 3 kN 的预压荷载, 保证加载板与试样充分接触, 确保变形测量的准确性。基于 Khan 等^[16]的常规三轴试验, 应力路径分为以下步骤, 如图 1 所示(以 AAC42 在围压水平为 30 MPa 和 54 MPa 为例)。首先采用应力控制模式实现围压(σ_2 , σ_3)和轴压(σ_1)同步加载, 速率为 0.05 MPa/s, 达到目标围压值后持荷 120 s 维持压力稳定。随后采用位移控制模式继续施加轴向应力, 加载速率为 0.002 mm/s, 围压控制精度为 $\pm$ 0.5%。由于围压水平超过 24 MPa 时, AAC18 的轴向位移计超采集量程, 因此 AAC18 和 AAC42 施加的围压水平范围分别为 0~24 MPa 和 0~60 MPa。



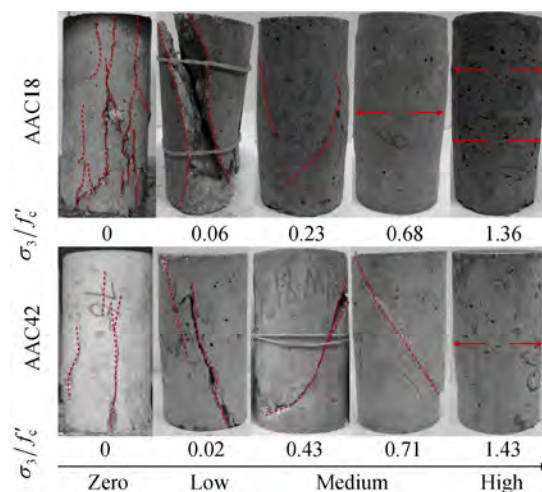
Note: σ_1 is the axial stress, σ_2 and σ_3 are confining stresses.

图 1 三轴试验加载程序
Fig. 1 Loading procedure of triaxial test

2 结果与讨论

2.1 破坏模式

围压作用下不同强度 AAC 的典型破坏模式如图 2 所示。结果表明, AAC 的破坏模式与约束率和试件强度有关, 强度越低围压对 AAC 破坏模式的影响越显著。基于约束率水平, AAC 的失效模式可分为 3 种类型。从无侧限到低约束率, AAC 从纵向破裂转变为斜剪破坏, 斜截面通长的裂缝使 AAC 丧失承载能力, 这种典型的破坏模式与碱激发砂浆^[16]和 PCC^[26]的相同。随着约束率逐渐增加, 试件破坏时出现挤压膨胀现象。一般地, 当混凝土在冲击或爆炸作用下, 材料内部可能产生较强的约束作用^[11], 材料的动态响应可能与高约束率导致的破坏模式转变有关, 相关机制值得进一步研究。此外, Kan 等^[16]认为当约束率大于 0.8 时, 碱激发砂浆的顶部和底部边缘将出现磨损, 然而本工作中没有观察到类似现象, 这是由于粗骨料能使试样保持更大的完整性。



Note: f'_c is axial compressive strength, AAC18 represents the sample with an axial compressive strength of 18 MPa, AAC42 represents the sample with an axial compressive strength of 42 MPa.

图 2 AAC 三轴压缩破坏模式

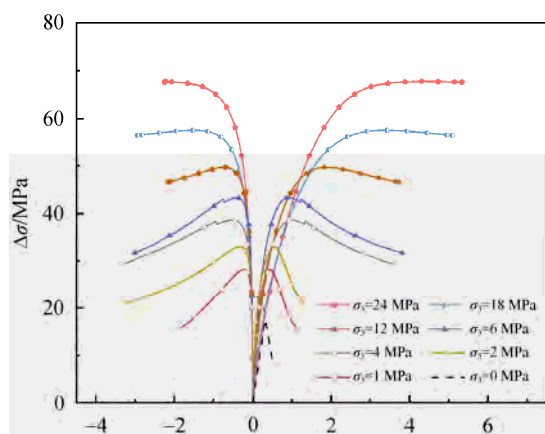
Fig. 2 Failure modes of AAC under triaxial compressive loading

2.2 围压作用下 AAC 的压缩性能

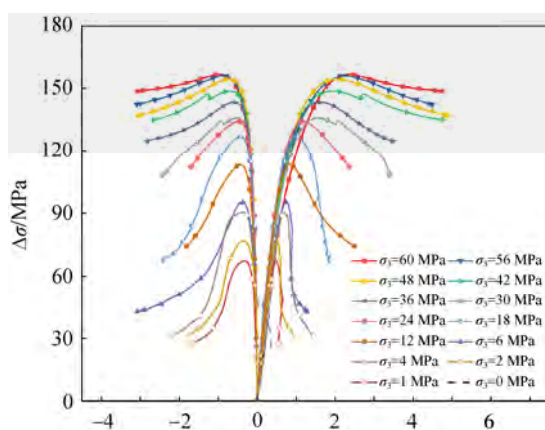
AAC 的偏应力($\Delta\sigma=\sigma_1-\sigma_3$)–应变曲线如图 3 所示。在极限应力之前, AAC 具有弹塑性特征, 当 $\Delta\sigma$ 超过极限应力后, AAC 的应力–应变行为受围压水平和单轴压缩强度的耦合影响。当 AAC18 和 AAC42 的围压分别超过 6 MPa 和 36 MPa 时, 试件

由应变软化转变为伪延性, 这可能是 AAC 出现挤压膨胀破坏的原因。当围压水平超过 18 MPa 时, AAC18 展现出应变硬化特征。

2.2.1 峰值应力 峰值应力是构成混凝土本构模型的重要参数之一。AAC 的归一化峰值应力(σ_u/f'_c)与约束率的关系如图 4 所示, 其中 σ_u 为 AAC 的三轴压缩峰值应力。从图 4 可以发现, 围压对 AAC 峰值应力的增强作用与其单轴抗压强度正相关。这是由于低强试件具有较高的孔隙率, 在围压作用下会伴随更多孔隙的坍塌破坏, 从而影响力学性能发展^[27]。与 Gholampour 等^[19]的试验结果相比, AAC42 在低围压水平下的轴向应力峰值更大, 这可能是因为试件中骨料尺寸越大, 抗压强度提升更显著^[28]。这也是碱激发净浆^[15]在低围压水平时峰值应力比碱激发砂浆^[16]和 AAC 低的原因。Feng 等^[18]在 PCC 中也发现了相似现象。



(a) AAC18

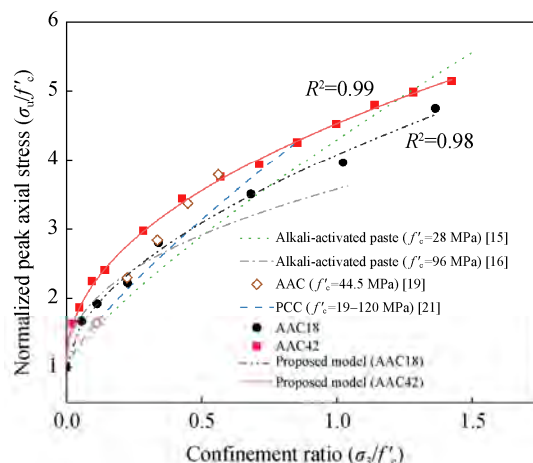


(b) AAC42

Note: $\Delta\sigma$ is deviatoric stress.

图 3 围压作用下 AAC 偏应力-应变关系

Fig. 3 Deviatoric stress-strain behavior of AAC under various confining pressures



Note: PCC represents the Portland cement concrete, R^2 represents the correlation index, σ_u represents the peak axial stress.

图 4 归一化峰值应力与约束率关系

Fig. 4 Normalized peak axial stress versus confinement ratio

与 PCC^[17]相比, 低约束率时 AAC 的峰值应力受围压的增强作用显著, 但随着围压继续增加, AAC 的峰值应力增长趋势较 PCC 降低。硬化的碱激发材料主要由 N-A-S-H 和 C-A-S-H 凝胶组成, 两者比 PCC 中的水化产物(C-S-H)具有更稳定和致密的微观结构^[29], 这是 AAC 在低约束率时高围压敏感性的原因。另一方面, 基于 AAC 中凝胶的化学合成原理^[30], 水是反应产物之一。在高约束率下, 混凝土中自由水的存在会降低甚至阻止混凝土应力的增长^[27]。因此, AAC 峰值应力在更高的约束率下增长趋势放缓。基于试验数据和 Xiao 等^[31]的模型, AAC18 和 AAC42 的归一化的峰值应力和约束率的关系可用式(1)描述。

$$\frac{\sigma_u}{f'_c} = 1 + (0.019 f'_c + 2.75) \left(\frac{\sigma_3}{f'_c} \right)^{-0.004 f'_c + 0.62} \quad (1)$$

$$(0 \leq \frac{\sigma_3}{f'_c} \leq 1.4, 18 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 42 \text{ MPa})$$

2.2.2 变形能力 归一化的峰值应力对应的轴向应变(ϵ_u/ϵ'_c)与约束率的关系如图 5 所示。其中 ϵ'_c 为无限峰值应力对应的轴向应变, ϵ_u 为三轴压缩峰值应力对应的轴向应变。从图 5 可以看出, AAC 的变形能力随围压的增加而增加, 强度越低变形能力越大。与碱激发净浆相比, 砂浆和 AAC 的变形能力较小, 这可能是由于浆体内部缺乏骨料支撑, 试样内部的孔隙和基体更易塌陷破坏并萌生裂纹。此外, PCC 模型^[21]的预测值极大地高估了 AAC 的变形能力。基于 Lee 等的研究^[32], 无侧限状态的 AAC 的变形比 PCC 的大。这表明 AAC 的变形能力受围压

的约束作用显著。基于试验数据, 提出描述约束率与 2 种强度 AAC 变形能力的关系, 如式(2)所示:

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon'_c} = 1 + (-0.078 f'_c + 8.24) \left(\frac{\sigma_3}{f'_c} \right)^{-0.014 f'_c + 1.36} \quad (2)$$

$$(0 \leq \frac{\sigma_3}{f'_c} \leq 1.4, 18 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 42 \text{ MPa})$$

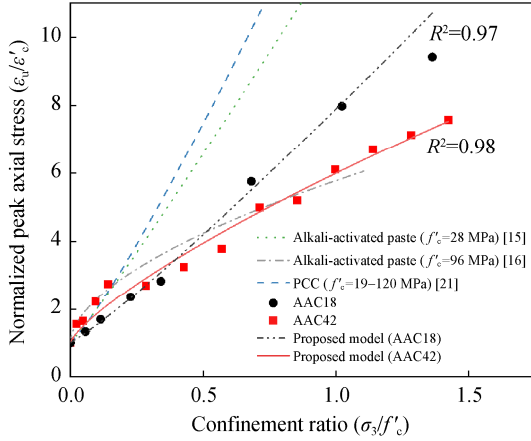


图5 归一化峰值轴向应变与约束率关系

Fig. 5 Normalized peak axial strain versus confinement ratio

2.3 应力-应变本构模型

AAC 的应力-应变本构模型的上升和下降段分别采用《国际混凝土结构设计规范》[33]和 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》[34]进行拟合。为便捷地描述不同围压水平的本构模型, 将偏应力峰值 $\Delta\sigma_u$ 及其应变 ε_u 均经过归一化处理。该方法在 Meng 等[35]的研究中得到较好的应用。基于此, AAC 的应力-应变本构模型可采用式(3)表示:

$$y = \begin{cases} \frac{Ax - x^2}{1 + (A-2)x} & (x \leq 1) \text{ Ascent stage} \\ \frac{x}{B(x-1)^2 + x} & (x > 1) \text{ Descent stage} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $y = \Delta\sigma/\Delta\sigma_u$; $x = \varepsilon/\varepsilon_u$; A 和 B 分别为模型上升和下降段的拟合系数。基于试验数据和最小二乘法, 2 种强度 AAC 的拟合系数 A 和 B 与围压的关系如式(4)~式(6)所示, 其中 R^2 为拟合相关性系数。

$$A = (-0.038 f'_c + 2.86) + (-0.022 f'_c + 0.93) \sigma_3 + (0.002 f'_c - 0.07) \sigma_3^2 + (-0.00004 f'_c + 0.002) \sigma_3^3 \quad (4)$$

$$(0 \leq \frac{\sigma_3}{f'_c} \leq 1.4) R^2 = 0.97$$

AAC18:

$$B = \begin{cases} -0.219 \sigma_3 + 1.058 (1 \leq \sigma_3 < 4 \text{ MPa}) \\ R^2 = 0.99 \\ -0.005 \sigma_3 + 0.203 (4 \leq \sigma_3 \leq 24 \text{ MPa}) \\ R^2 = 0.97 \end{cases} \quad (5)$$

AAC42:

$$B = \begin{cases} -0.302 \sigma_3 + 3.942 (1 \leq \sigma_3 < 12 \text{ MPa}) \\ R^2 = 0.99 \\ -0.007 \sigma_3 + 0.559 (12 \leq \sigma_3 \leq 60 \text{ MPa}) \\ R^2 = 0.94 \end{cases} \quad (6)$$

图6为 Wang 等[36]的试验数据与本工作提出的 AAC 压缩本构模型的对比。Wang 等[36]采用的 AAC 强度为 29.2 MPa, 因此拟合系数 B 基于式(5)和式(6)线性插值计算得出。从图6可以看出, 模型计算结果与 Wang 等[36]的试验结果较为接近, 证明了该模型的适用性。

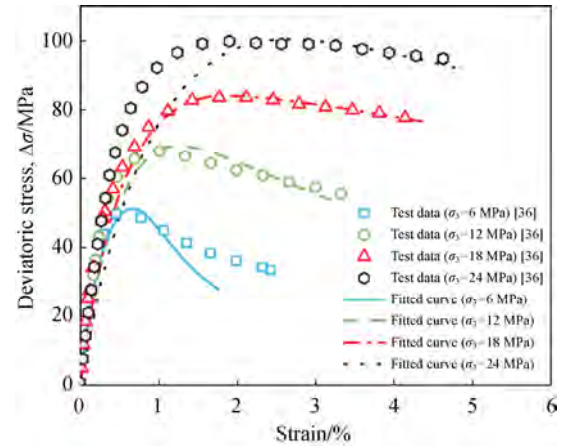


图6 本构模型验证

Fig. 6 Validation of constitutive model

2.4 破坏准则

破坏准则可用于预测试件的屈服失效状态, 选取最常见的 2 种描述混凝土类材料的破坏准则, 分别为 Mohr-Coulombic 线性破坏准则和 William-Warnke 五参数破坏准则, 并且基于试验数据推导 AAC 三轴压缩强度包络线, 为揭示 AAC 在复杂应力下的损伤机理, 开发数值模拟的材料模型奠定理论基础。

2.4.1 Mohr-Coulombic 线性破坏准则 Mohr-Coulombic 线性破坏准则是一个依赖应力的理论, 是主应力空间中的一组线性方程, 描述了材料发生失效的状态。归一化的峰值应力与约束率的关系采用式(7)~式(11)表示:

$$\frac{\sigma_u}{f'_c} = a + b \left(\frac{\sigma_3}{f'_c} \right) \quad (7)$$

$$a = \frac{2c \cos \varphi}{(1 - \sin \varphi) f'_c} \quad (8)$$

$$b = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{b-1}{b+1} \right) \quad (10)$$

$$c = a \frac{(1 - \sin \varphi) f'_c}{2 \cos \varphi} \quad (11)$$

式中: a 和 b 代表 Mohr-Coulombic 模型系数; c 和 φ 分别代表混凝土的黏聚力和内摩擦角。

根据实验数据, AAC 的 Mohr-Coulombic 破坏准则拟合结果如图 7 所示。AAC18 和 AAC42 的黏聚力 c 分别为 10.2 MPa 和 27.3 MPa, 内摩擦角 φ 分别为 22.95° 和 24.67° 。一般地, 根据屈服准则, 混凝土强度分为 2 部分, 分别为与围压无关的粘结强度和与围压有关的摩擦强度。Imran 和 Pantazopulu 发现 PCC ($f'_c=21$ 和 43 MPa)^[37] 的黏聚力分别为 5.4 MPa 和 11.4 MPa。2 种材料的差异与胶凝基体类型有关。在 PCC 中, 层状水化产物 C-S-H 间作用力以 van der Waals 力为主, 而 AAC 中的反应产物含有由硅铝氧原子以共价键连接成的 N-A-S-H 凝胶。在微观层次, 共价键间的作用力大于 van der Waals 力, 这是 AAC 黏聚力较大的原因。另一方面, 内摩擦角代表着混凝土发生剪切破坏时错位表面的倾斜角度, 反映了颗粒摩擦特性和剪切强度。在 PCC ($f'_c=21 \sim 165$ MPa) 中^[38], 内摩擦角范围为 $31.1^\circ \sim 44.1^\circ$ 。但是, AAC18 和 AAC42 的内摩擦角仅为 22.95° 和 24.67° 。除胶凝材料的差异, 也受骨料级配和间距的影响^[39]。

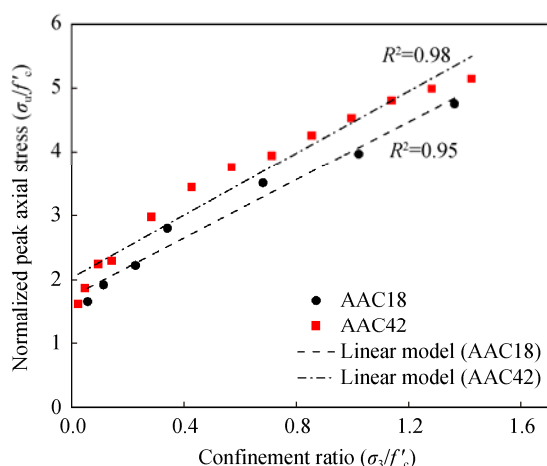


图 7 Mohr-Coulombic 失效准则
Fig. 7 Mohr-Coulombic failure criteria

$$\frac{\sigma_u}{f'_c} = 0.012 f'_c + 1.524 + (0.007 f'_c + 2.155) \left(\frac{\sigma_3}{f'_c} \right) \quad (12)$$

$$(0 \leq \frac{\sigma_3}{f'_c} \leq 1.4, 18 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 42 \text{ MPa})$$

2.4.2 William-Warnke 五参数破坏准则 该模型通过拉伸($\theta=0^\circ$)和压缩子午线($\theta=60^\circ$)描述混凝土的极限强度面, 归一化形式可表示为:

$$\frac{\tau_m}{f'_c} = a + b \left(\frac{\sigma_m}{f'_c} \right) + c \left(\frac{\sigma_m}{f'_c} \right)^2 \quad (13)$$

式中: $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别表示在

3 个方向的主应力, σ_m 为平均正应力, 也称为静水

压力; $\tau_m = \frac{1}{\sqrt{15}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$, τ_m 为平均剪切应力; a 、 b 和 c 分别是 3 个 William-Warnke 材料模型系数。

基于三轴压缩试验数据, William-Warnke 破坏准则表达式为:

$$\frac{\tau_m}{f'_c} = -0.0016 f'_c + 0.18 + (0.0065 f'_c + 0.65) \left(\frac{\sigma_m}{f'_c} \right) - (0.0015 f'_c + 0.11) \left(\frac{\sigma_m}{f'_c} \right)^2 \quad (14)$$

$$(0.3 \leq \frac{\sigma_m}{f'_c} \leq 2.7, 18 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 42 \text{ MPa})$$

AAC 的 William-Warnke 五参数破坏准则如图 8 所示。从图 8 可以看出, 碱激发材料与 PCC 的压缩子午线几何特征的差异性显著。PCC 的压缩子

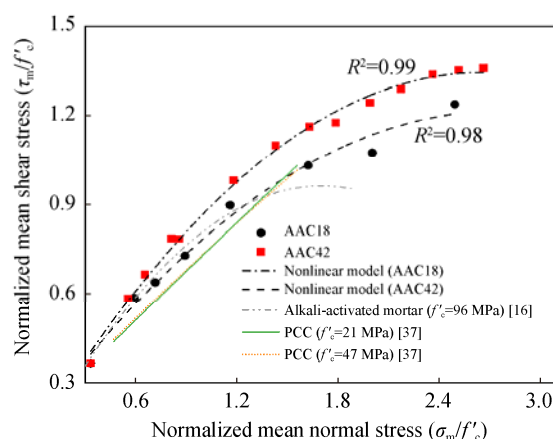


图 8 William-Warnke 五参数破坏准则
Fig. 8 William-Warnke five-parameter failure criteria

午线^[37]类似于直线且几乎不受单轴抗压强度影响,而 AAC 的压缩子午线的非线性关系明显。在相似的归一化平均应力下, AAC 的归一化平均剪应力高于 PCC 的。与 AAC 相比,碱激发砂浆^[16]的压缩子午线在较小的名义平均应力下即出现增速放缓的趋势。

3 结论

为了探究 AAC 的三轴压缩本构模型和破坏准则,针对 2 种强度 AAC 在约束率范围为 0~1.4 下开展了常规三轴压缩试验,结论如下:

1) AAC 的三轴压缩破坏模式受约束率和强度影响。随着约束率增加, AAC 的破坏模式由纵向破裂转变为斜向剪切和挤压膨胀破坏,低强 AAC 的破坏模式更易受围压影响。

2) AAC 的峰值应力和变形能力与围压正相关,围压对 AAC 力学性能的影响具有强度敏感性。AAC 强度越高,三轴压缩强度更易提升,而 AAC 的变形能力与强度负相关。

3) 提出的 AAC 三轴压缩本构模型适用于现有试验结果的预测。与 Mohr–Coulomb 线性破坏准则相比,William–Warnke 五参数破坏准则可更准确地描述 AAC 在三轴状态下的屈服失效状态。

参考文献:

- [1] GÖKÇE H S, TUYAN M, NEHDI M L. Alkali-activated and geopolymer materials developed using innovative manufacturing techniques: a critical review[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 303: 124483.
- [2] 史才军, 巴维尔·克利文科(P. V. Krivenko), 黛拉·罗伊(Della Roy)著. 史才军, 郑克仁, 译. 碱—激发水泥和混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [3] PASUPATHY K, SINGH CHEEMA D, SANJAYAN J. Durability performance of fly ash-based geopolymer concrete buried in saline environment for 10 years[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 281: 122596.
- [4] BATUECAS E, RAMÓN-ÁLVAREZ I, SÁNCHEZ-DELGADO S, et al. Carbon footprint and water use of alkali-activated and hybrid cement mortars[J]. *J Clean Prod*, 2021, 319: 128653.
- [5] 覃丽芳, 曲波, 史才军, 等. 钙硅比对铝硅酸盐凝胶形成与特性的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(12): 12057–12063.
QIN Lifang, QU Bo, SHI Caijun, et al. *Mater Rep(in Chinese)*, 2020, 34(12): 12057–12063.
- [6] 朱绘美, 张煜雯, 迁晨, 等. 微波养护阶段碱激发粉煤灰胶凝材料的力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(6): 558–564.
ZHU Huimei, ZHANG Yuwen, YU Chen, et al. *J Build Mater(in Chinese)*, 2022, 25(6): 558–564.
- [7] 童国庆, 张吾渝, 高义婷, 等. 碱激发粉煤灰地聚物的力学性能及微观机制研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(4): 129–134.
TONG Guoqing, ZHANG Wuyun, GAO Yiting, et al. *Mater Rep(in Chinese)*, 2022, 36(4): 129–134.
- [8] NATH P, SARKER P K. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 130: 22–31.
- [9] PAN Z, SANJAYAN J G, RANGAN B V. Fracture properties of geopolymer paste and concrete[J]. *Mag Concr Res*, 2011, 63(10): 763–771.
- [10] CHEN P, CUI X M, ZHENG H J, et al. A mesoscale study on the dilation of actively confined concrete under axial compression[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(18): 6490.
- [11] LIU P F, LIU K, ZHANG Q B. Experimental characterisation of mechanical behaviour of concrete-like materials under multiaxial confinement and high strain rate[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 258: 119638.
- [12] 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. *J Build Mater(in Chinese)*, 2020, 23(2): 454–459.
- [13] LYU S J, HSIAO Y H, WANG T T, et al. Microstructure of geopolymer accounting for associated mechanical characteristics under various stress states[J]. *Cem Concr Res*, 2013, 54: 199–207.
- [14] NASVI M C M, RANJITH P G, SANJAYAN J. A numerical study of triaxial mechanical behaviour of geopolymer at different curing temperatures: an application for geological sequestration wells[J]. *J Nat Gas Sci Eng*, 2015, 26: 1148–1160.
- [15] HAIDER G M, SANJAYAN J G, RANJITH P G. Complete triaxial stress–strain curves for geopolymer[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 69: 196–202.
- [16] KHAN M Z N, HAO Y F, HAO H, et al. Mechanical properties of ambient cured high-strength plain and hybrid fiber reinforced geopolymer composites from triaxial compressive tests[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 185: 338–353.
- [17] ZHENG J J, LI C Q, ZHOU X Z. Characterization of microstructure of interfacial transition zone in concrete[J]. *ACI Mater J*, 2005, 102(4): 265–271.
- [18] FENG M Y, WANG Z, WU L C. Experimental study on high-strength concrete, ultrahigh-strength concrete and corresponding mortar under triaxial compression[J]. *Arab J Sci Eng*, 2021, 46(11): 11179–11194.
- [19] 王怀亮. 碱激发混凝土单双轴压强度和变形特性研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1): 40–47.
WANG Huailiang. *J Build Mater(in Chinese)*, 2020, 23(1): 40–47.
- [20] GHOLAMPOUR A, OZBAKKALOGLU T, NG C T. Ambient- and oven-cured geopolymer concretes under active confinement[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 228: 116722.
- [21] LIM J C, OZBAKKALOGLU T. Stress–strain model for normal- and light-weight concretes under uniaxial and triaxial compression[J].

- Constr Build Mater, 2014, 71: 492–509.
- [22] FARNAM Y, MOOSAVI M, SHEKARCHI M, et al. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(11): 1571–1581.
- [23] ANSARI F, LI Q. High-strength concrete subjected to triaxial compression[J]. ACI Mater J, 1998, 95(6): 747–755.
- [24] LIU S, HAO Y F, MA G W. Approaches to enhance the carbonation resistance of fly ash and slag based alkali-activated mortar-experimental evaluations[J]. J Clean Prod, 2021, 280: 124321.
- [25] 刘杉. 常温养护高强高抗碳化地聚物混凝土研制及梁受力性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- LIU Shan. Research of high strength and high anti-carbonate ambient cured geopolymer concrete and mechanical properties of beams(in Chinese, dissertation). Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [26] CHEN Y L, CHEN Z P, XU J J, et al. Performance evaluation of recycled aggregate concrete under multiaxial compression[J]. Constr Build Mater, 2019, 229: 116935.
- [27] 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.
- [28] TIJANI I A, WU Y F, LIM C W. Aggregate size effects and general static loading response on mechanical behavior of passively confined concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 205: 61–72.
- [29] WANG Y R, CAO Y B, ZHANG Z H, et al. Study of acidic degradation of alkali-activated materials using synthetic C-(N)-A-S-H and N-A-S-H gels[J]. Compos B Eng, 2022, 230: 109510.
- [30] DAVIDOVITS J. Geopolymers[J]. J Therm Anal, 1991, 37(8): 1633–1656.
- [31] XIAO Q G, TENG J G, YU T. Behavior and modeling of confined high-strength concrete[J]. J Compos Constr, 2010, 14(3): 249–259.
- [32] LEE N K, LEE H K. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature[J]. Constr Build Mater, 2013, 47: 1201–1209.
- [33] International Federation For Structural Concrete. Fib Model Code for Concrete Structures[M]. Lausanne, Switzerland, Wiley, 2013: 75–82.
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [35] MENG E C, YU Y L, ZHANG X G, et al. Experimental and theoretical research on the mechanical performance of totally recycled concrete under triaxial compression after high temperatures[J]. Constr Build Mater, 2020, 261: 120012.
- [36] WANG H L, WU Y H, WEI M, et al. Hysteretic behavior of geopolymer concrete with active confinement subjected to monotonic and cyclic axial compression: an experimental study[J]. Materials (Basel), 2020, 13(18): 3997.
- [37] IMRAN I, PANTAZOPOULOU S J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress[J]. ACI Mater J, 1996, 93(6): 589–601.
- [38] BABANAJAD S K, FARNAM Y, SHEKARCHI M. Failure criteria and triaxial behaviour of HPFRC containing high reactivity metakaolin and silica fume[J]. Constr Build Mater, 2012, 29: 215–229.
- [39] YU F, SUN D Q, SUN G Q, et al. A modified mix design method for pervious concrete based on Mohr-Coulomb failure criterion[J]. Constr Build Mater, 2021, 269: 121801.