

文章编号:1007-9629(2021)01-0207-09

陶粒泡沫混凝土的力学性能及吸能特性

王小娟, 刘路, 贾昆程, 周宏元

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:以快硬硫铝酸盐水泥为结合剂,与陶粒、预制泡沫混合制备得到陶粒泡沫混凝土.探讨了泡沫混凝土密度与陶粒粒径匹配关系对陶粒泡沫混凝土在静态单轴压缩下的破坏模式、抗压强度、压实应变和能量吸收的影响.结果表明:随着泡沫混凝土密度的提高或陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土发生非界面破坏的现象逐渐显著,由此确定出与3种粒径陶粒相匹配的泡沫混凝土的密度范围;随着泡沫混凝土密度的提高,陶粒泡沫混凝土的抗压强度和能量吸收能力均显著提高,压实应变随之减小;随着陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土的抗压强度先增后减,压实应变先减后增,能量吸收能力逐渐增强.

关键词:陶粒泡沫混凝土;强度匹配;破坏模式;抗压强度;压实应变;能量吸收

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.027

Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of Ceramsite Foam Concrete

WANG Xiaojuan, LIU Lu, JIA Kuncheng, ZHOU Hongyuan

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Ceramsite foam concrete was produced by mixing fast-hardening sulphoaluminate cement with precast foam and ceramsite. The effects of foam concrete density and ceramsite particle size on the failure mode, compressive strength (peak stress), densification strain and energy absorption of ceramsite foam concrete subjected to static uniaxial compression was investigated. The experiment results indicate that remarkable non-interfacial failure is observed with higher density of foam concrete and larger particle size of ceramsite, from which the density range of foam concrete with matched strength of the three corresponding ceramsite is determined. With increasing density of foam concrete, the compressive strength and energy absorption of ceramsite foam concrete are remarkably improved, while the densification strain decreases. In addition, with increasing ceramsite particle size, the densification strain decreases first then increases, the compressive strength increases first then decreases, and the energy absorption capacity gradually increases.

Key words: ceramsite foam concrete; strength match; failure mode; compressive strength; densification strain; energy absorption

收稿日期:2019-08-14; 修订日期:2019-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808017, 51778028);北京市自然科学基金资助项目(8184063);北京市教委科技计划项目(KM201810005019)

第一作者:王小娟(1982—),女,湖南常德人,北京工业大学副教授,硕士生导师,博士.主要从事建筑材料力学性能研究. E-mail: xiaojuan-wang@bjut.edu.cn

通讯作者:周宏元(1981—),男,河北香河人,北京工业大学教授,博士生导师,博士.主要从事结构抗爆抗冲击研究. E-mail: hzhou@bjut.edu.cn

全球能源消耗日益严重,节能问题逐渐成为人类关注的焦点. 建筑行业是一种高耗能的产业,在建材生产和使用过程中均会大量消耗能源. 泡沫混凝土作为建筑保温材料之一,近年来对它的研究与应用^[1-5]进展迅速,然而其在工程应用中存在强度较低、易收缩开裂等问题,因此在一定程度限制了使用范围. 鉴于普通泡沫混凝土的不足,复合材料陶粒泡沫混凝土近年来受到广泛关注与研究.

陶粒泡沫混凝土是以水泥基胶凝材料、水、泡沫和陶粒为主要组分,按一定配合比混合,搅拌、浇筑、养护而成的轻质多孔混凝土,具有轻质高强、耐火性好、环保性能好和保温隔热等优势. 国内外关于陶粒泡沫混凝土的研究已取得一定成果,主要集中在其配合比^[6-7]、收缩性^[8]、力学性能^[9]、热力学性能^[10]、导热系数^[11]、陶粒预处理机制^[12]和纤维增强对其性能的影响^[13]. 近年来,泡沫混凝土的抗压性能和能量吸收性能已应用于如飞机拦阻^[14]和爆炸防护^[15]等工程中. 性能更优的陶粒泡沫混凝土相关性能的研究变得愈发迫切,但未见相关报道.

鉴于此,本文采用 3 种粒径的陶粒与 4 种密度的泡沫混凝土组合制备陶粒泡沫混凝土,研究了泡沫混凝土密度和陶粒粒径对陶粒泡沫混凝土在静态单轴压缩下的破坏模式、抗压强度、压实应变和能量吸收的影响,并就破坏模式进一步对陶粒粒径与泡

沫混凝土强度的匹配问题进行了讨论.

1 试验

1.1 原材料

水泥为山东泗水产中联牌快硬硫铝酸盐水泥 R. SAC 42.5,其 28 d 抗压强度为 42.5 MPa,基本参数见表 1;3 种陶粒均为安徽恒运节能科技有限公司提供的页岩陶粒,粒径分别为 0~10、10~20、20~30 mm,主要性能指标见表 2;发泡液采用动物型蛋白质类泡沫混凝土用发泡剂,与水按体积比 1:40 稀释后得到. 陶粒泡沫混凝土的配合比见表 3.

表 1 水泥的基本参数
Table 1 Basic parameters of cement

Brand model	Specific surface area/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	Main component	Final setting time/min
R. SAC 42.5	325	Sulphoaluminate	28

表 2 陶粒的主要性能指标
Table 2 Main properties of ceramsite

Specification	Particle size/mm	Cylindrical compressive strength/MPa	Apparent density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Bulk density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	0-10	1.2	700	540
2	10-20	1.2	700	480
3	20-30	1.2	700	421

表 3 陶粒泡沫混凝土的配合比
Table 3 Mix proportion of ceramsite foam concrete

Series No.	Sample No.	Target apparent density of foam concrete/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Mix proportion/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				$\varphi(\text{foam})/\%$
			Cement	Water	Water reducer	Ceramsite	
I	I-1	400	233.000	116.000	0.699	210.000	53.6
	I-2	600	327.000	163.000	0.981	210.000	45.3
	I-3	800	420.000	210.000	1.260	210.000	37.0
	I-4	1 000	513.000	257.000	1.539	210.000	28.8
II	II-1	400	233.000	116.000	0.699	210.000	53.6
	II-2	600	327.000	163.000	0.981	210.000	45.3
	II-3	800	420.000	210.000	1.260	210.000	37.0
	II-4	1 000	513.000	257.000	1.539	210.000	28.8
III	III-1	400	233.000	116.000	0.699	210.000	53.6
	III-2	600	327.000	163.000	0.981	210.000	45.3
	III-3	800	420.000	210.000	1.260	210.000	37.0
	III-4	1 000	513.000	257.000	1.539	210.000	28.8

Note: The particle size of ceramsite mixed in series I, series II and series III is 0-10, 10-20 and 20-30 mm respectively.

1.2 陶粒泡沫混凝土试件的制备

本研究采用预制泡沫的方法进行陶粒泡沫混凝土试件的制备.具体制备工艺如下:(1)先将水泥和减水剂放在刻度桶中干拌1 min,再加水搅拌2 min;(2)搅拌浆料的同时,先用发泡机将按比例混合的水和发泡剂制成泡沫,再将泡沫通入搅拌均匀的浆料中,继续搅拌,待泡沫混凝土的体积达到通过目标干密度预估的体积时,停止通入泡沫;(3)将已称量、预湿并晾干至饱和面干状态的陶粒倒入泡沫混凝土浆体中搅拌均匀,即可获得陶粒泡沫混凝土;(4)将陶粒泡沫混凝土浇注到试模中,并用抹子刮平表面,在室内静置3 h,脱模,再将其置于 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度大于90%的养护箱中养护3 d.

1.3 测试方法

将制备的尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的陶粒泡沫混凝土立方体试件用于单轴压缩试验,每组3个.该单轴压缩试验在北京工业大学结构实验室的MTS Exceed E45 万能试验机(300 kN)上进行.为提高试件在压缩过程中的受力均匀性,在试件上下两端分别放置2块平整且尺寸稍大于试件尺寸的钢板.压缩过程中,试件下端被下金属压盘限制竖向位移,上端由上压盘施加速率为 5 mm/min (名义应变率为 $0.000\ 83\text{ s}^{-1}$)的竖向压缩,直至位移为70 mm时停止加载.

1.4 统计方法

由于在相同应变率情况下,重复性测试获得的试件应力-应变曲线具有一定离散性,使用平均曲线不合理^[16],因此本研究在每组测量的3个曲线中,选取具有中间抗压强度值的应力-应变曲线来统计试件的抗压强度、压实应变和能量吸收.

Miltz等^[17]提出用能量吸收效率 E_f 来评价泡沫材料的吸能特性.能量吸收效率的表达式为:

$$E_f(\epsilon_a) = \frac{1}{\sigma_a} \int_0^{\epsilon_a} \sigma(\epsilon) d\epsilon, 0 \leq \epsilon_a \leq 1 \quad (1)$$

式中: $\sigma(\epsilon)$ 是描述泡沫材料在受压状态下的应力-应变函数关系; ϵ_a 为任意应变; σ_a 为与 ϵ_a 相对应的应力.

材料的最佳吸能工作状态是指能量吸能效率达到极大值时的状态,与吸能效率极大值所对应的应变即为压实应变 ϵ_D ^[18].通常各试件能量吸能效率的极大值会有2个或2个以上,需结合其应力-应变曲线的走势来综合判断其 ϵ_D .本文采用比能量吸收 $w(\text{J}/\text{cm}^3)$ 来评价陶粒泡沫混凝土试件的吸能特性. w 是指单位体积陶粒泡沫混凝土的能量吸收能力,计算公式为:

$$w = \int_0^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 破坏模式

2.1.1 破坏模式的定义

陶粒泡沫混凝土静态单轴压缩有2种破坏模式:界面破坏和非界面破坏.其中,界面破坏模式是陶粒泡沫混凝土在压缩过程中泡沫混凝土被压坏,而被泡沫混凝土包裹的陶粒不发生破坏,裂缝存在于泡沫混凝土内部或者陶粒与泡沫混凝土的交界区域;非界面破坏是指陶粒和泡沫混凝土两者均被压坏,裂缝存在于泡沫混凝土和陶粒两者内部.

2.1.2 分析与讨论

当泡沫混凝土密度较低时,泡沫混凝土与陶粒间的机械啮合力较小,压缩过程中,被泡沫混凝土包裹的陶粒不发生破坏,只有部分泡沫混凝土被压碎,无法充分发挥陶粒的强度效用;当泡沫混凝土密度较高时,泡沫混凝土与陶粒间的机械啮合力足够高,压缩过程中,虽然陶粒和泡沫混凝土均被压碎,但因泡沫混凝土的强度远高于陶粒,陶粒只相当于在泡沫混凝土中引入了初始缺陷.以上2种情况均被认为是陶粒与泡沫混凝土的强度不匹配所造成的.当陶粒泡沫混凝土受压时,最理想的情况是当泡沫混凝土密度提高到某一临界值时,恰好使陶粒泡沫混凝土的界面破坏现象消失,仅存在非界面破坏一种破坏模式,达到充分利用2种材料抗压强度的目的,以实现两者间的强度匹配.考虑到泡沫混凝土的密度很难精确控制,通过试验找出这一临界值不现实,本研究将泡沫混凝土密度临界值所处范围作为与陶粒强度匹配的密度范围,以此来保证试验得到的泡沫混凝土密度范围与实际密度临界值在一定误差范围之内.

图1为粒径为0~10 mm陶粒与4种密度泡沫混凝土制备得到的陶粒泡沫混凝土的破坏情况.由图1可见:当泡沫混凝土密度为 $400, 600\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,陶粒泡沫混凝土均为界面破坏;当泡沫混凝土密度为 $800\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,陶粒泡沫混凝土既有界面破坏,又有非界面破坏;当泡沫混凝土的密度为 $1\ 000\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,陶粒泡沫混凝土仅发生非界面破坏.由此说明,与粒径为0~10 mm陶粒强度相匹配的泡沫混凝土密度范围为 $800 \sim 1\ 000\text{ kg}/\text{m}^3$.

图2为粒径为10~20 mm陶粒与4种密度泡沫混凝土组合而成的陶粒泡沫混凝土的破坏情况.由图2可见:当泡沫混凝土密度为 $400\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,陶粒泡沫混凝土仅发生界面破坏;当泡沫混凝土密度为 $600\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,陶粒泡沫混凝土中既有界面破坏,

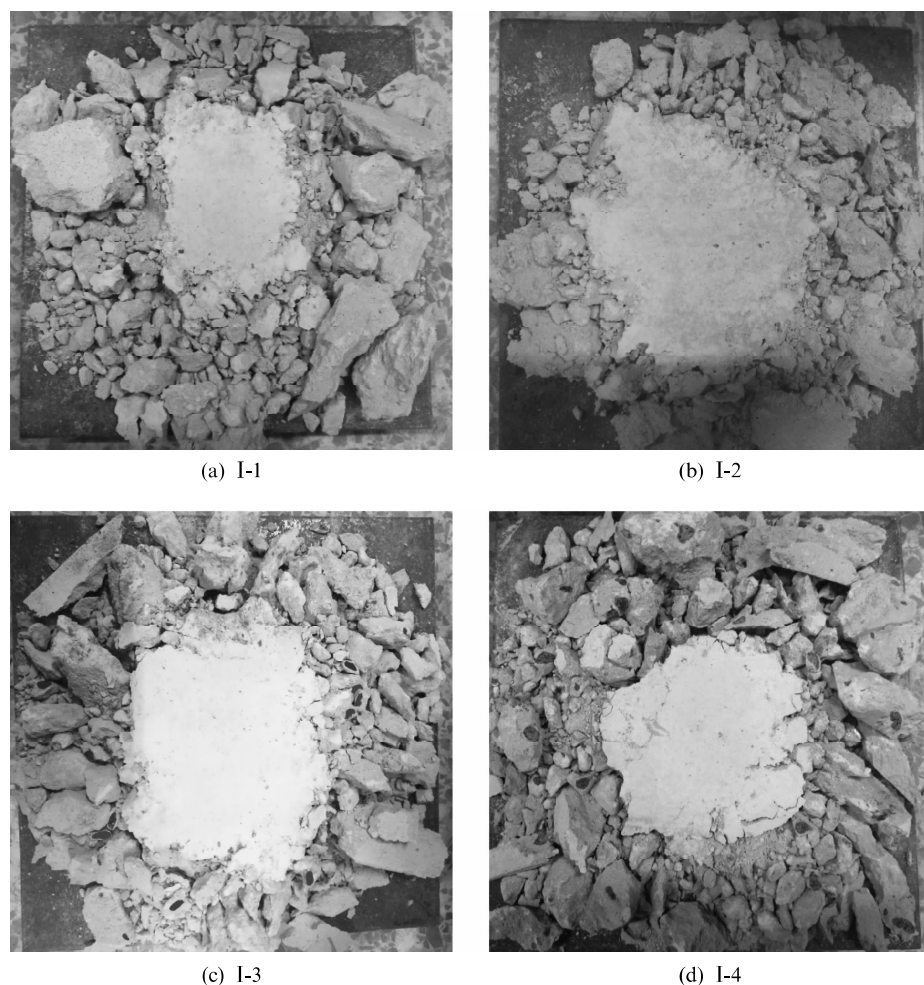


图1 I组陶粒泡沫混凝土的破坏模式
Fig. 1 Failure modes of series I ceramsite foam concrete

也有非界面破坏;当泡沫混凝土密度为 $800, 1\,000\text{ kg/m}^3$ 时,陶粒泡沫混凝土仅存在非界面破坏.由此说明,与粒径为 $10\sim 20\text{ mm}$ 的陶粒强度相匹配的泡沫混凝土密度范围为 $600\sim 800\text{ kg/m}^3$.

图3为粒径为 $20\sim 30\text{ mm}$ 陶粒与4种密度泡沫混凝土组合而成的陶粒泡沫混凝土的破坏情况.由图3可知:当泡沫混凝土密度为 400 kg/m^3 时,陶粒泡沫混凝土既存在界面破坏,又存在非界面破坏;当泡沫混凝土的密度为 $600, 800, 1\,000\text{ kg/m}^3$ 时,陶粒泡沫混凝土仅发生非界面破坏.由此说明,与粒径 $20\sim 30\text{ mm}$ 的陶粒强度相匹配的泡沫混凝土密度范围为 $400\sim 600\text{ kg/m}^3$.

2.2 泡沫混凝土密度对试件抗压强度、压实应变、能量吸收的影响

2.2.1 泡沫混凝土密度对试件抗压强度的影响

图4为陶粒泡沫混凝土抗压强度与泡沫混凝土密度的关系.由图4可见,当陶粒粒径范围一定时,

陶粒泡沫混凝土抗压强度随着泡沫混凝土密度的增加而逐渐增长.当陶粒泡沫混凝土的制作工艺和配合比一定时,泡沫混凝土抗压强度主要受其密度因素的影响,密度越高,泡沫混凝土强度越高^[19].泡沫混凝土作为陶粒泡沫混凝土的主要组成部分,也是压缩荷载的主要承担者,泡沫混凝土的密度越大,即泡沫混凝土强度越高,陶粒泡沫混凝土的抗压强度也越高.

2.2.2 泡沫混凝土密度对试件压实应变的影响

图5为陶粒泡沫混凝土压实应变与泡沫混凝土密度的关系.由图5可见,随着泡沫混凝土密度的提高,3种陶粒粒径范围的陶粒泡沫混凝土的压实应变均呈下降趋势.陶粒泡沫混凝土被压缩的过程实质上是其内部孔壁坍塌,气孔被挤压破碎、叠合至密实的过程.随着泡沫混凝土的密度的增大,陶粒泡沫混凝土内部的孔隙度逐渐减小,孔隙从开始被挤压到完全挤压消失所需要的应变也会减小.

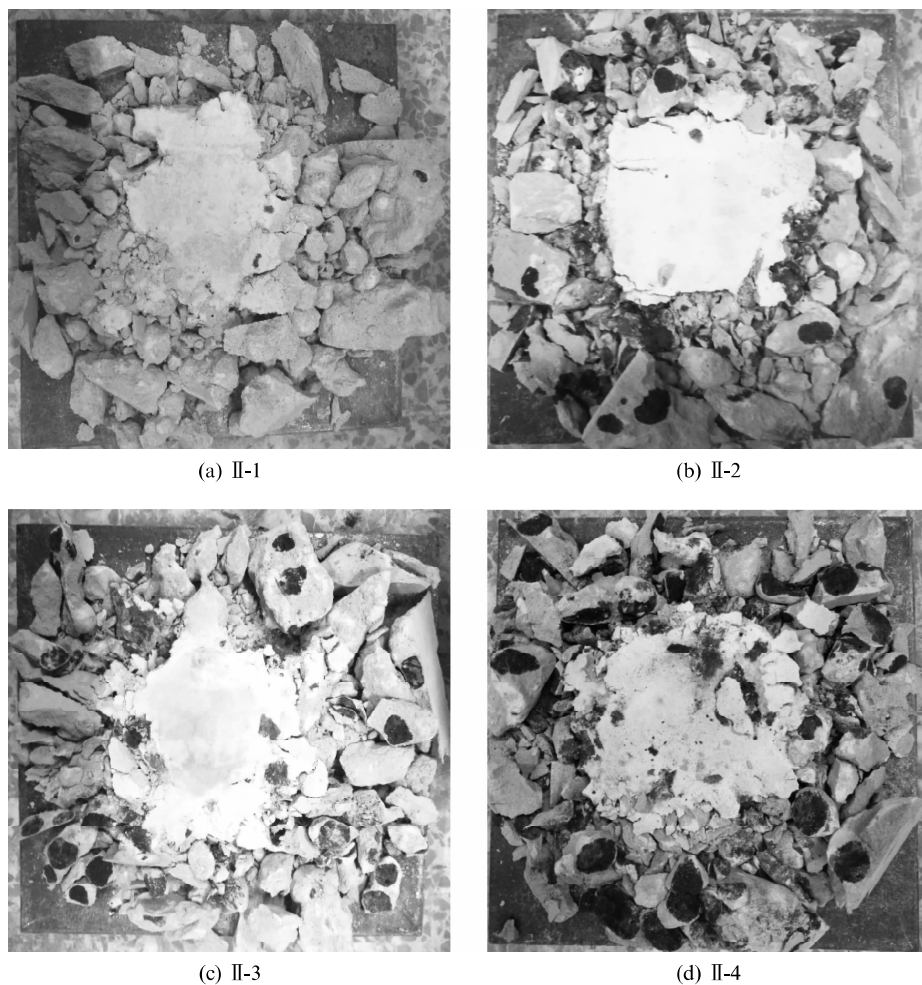


图2 II组陶粒泡沫混凝土的破坏模式

Fig. 2 Failure modes of series II ceramsite foam concrete

2.2.3 泡沫混凝土密度对试件比能量吸收的影响

图6为陶粒泡沫混凝土比能量吸收与泡沫混凝土密度的关系.由图6可见,当陶粒的粒径范围一定时,随着泡沫混凝土密度的提高,陶粒泡沫混凝土在静态单轴压缩下的能量吸收能力也随之提高.在此荷载下,陶粒泡沫混凝土破坏的本质是内部微裂缝的产生、发展和聚集过程,进而在混凝土内部形成多个宏观裂缝和缺陷,致使内部孔壁破碎坍塌,最终导致陶粒泡沫混凝土被压溃.加载板传递给试件的能量主要依靠陶粒泡沫混凝土内部微裂缝的产生、发展及孔壁的破裂坍塌来耗散,进而达到吸收能量的效果.泡沫混凝土是陶粒泡沫混凝土的主要组成部分,试件吸收的大部分能量主要通过泡沫混凝土内部产生并发展微裂缝来耗散.随着泡沫混凝土密度的提高,一方面,其孔隙度降低,内部孔壁增厚^[20],在其内部产生和发展微裂缝所耗散的能量增大,且压缩过程中裂缝数目逐渐增多,导致比能量吸收逐渐提高;另一方面,当泡沫混凝土的密度较低

时,陶粒泡沫混凝土在静态压缩过程中发生界面破坏,微裂缝的产生与发展仅存在于泡沫混凝土内部,不能渗透到陶粒内部.随着泡沫混凝土密度的提高,陶粒泡沫混凝土在静态压缩过程中逐渐发生非界面破坏,微裂缝的产生和发展存在于陶粒内部的比例逐渐提高,由内部陶粒破坏所耗散的能量逐渐增大,这也是陶粒泡沫混凝土能量吸收能力较强的原因之一.

2.3 陶粒粒径对试件抗压强度、压实应变、能量吸收的影响

2.3.1 陶粒粒径对试件抗压强度的影响

图7为陶粒泡沫混凝土抗压强度与陶粒粒径的关系.由图7可见,当泡沫混凝土的密度一定时,随着陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土的抗压强度呈现先升后降趋势.泡沫混凝土与陶粒接触区域的泡沫混凝土通常不能充分水化,强度偏低,导致泡沫混凝土与陶粒的接触界面出现薄弱面.当掺入的陶粒体积一定时,陶粒粒径越小,比表面积越大,陶粒与

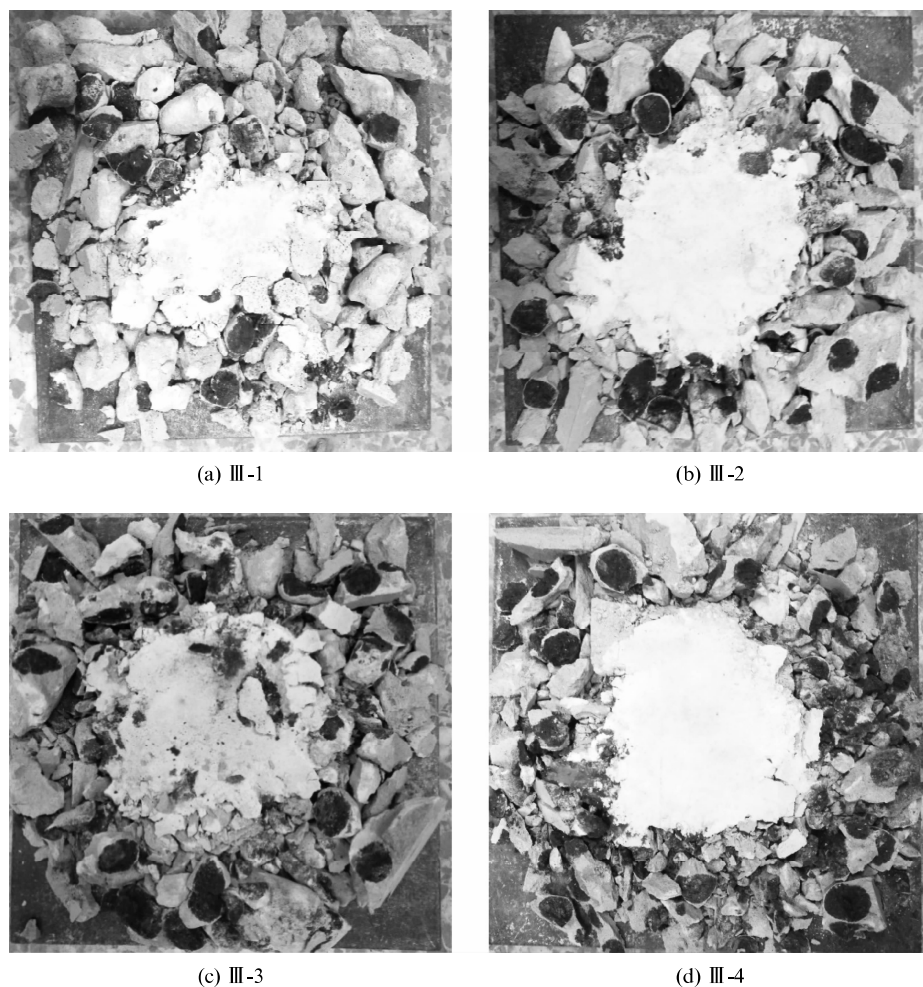


图3 Ⅲ组陶粒泡沫混凝土的破坏模式

Fig. 3 Failure modes of series III ceramsite foam concretet

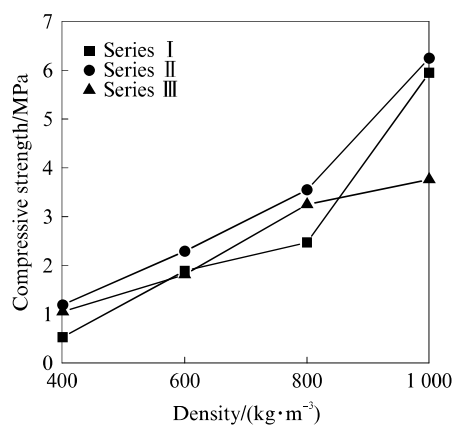


图4 陶粒泡沫混凝土抗压强度与泡沫混凝土密度的关系
Fig. 4 Relationship between compressive strength of ceramsite foam concrete and foam concrete density

泡沫混凝土的接触区域就越大,也就是陶粒泡沫混凝土内部存在的薄弱面也就越多,会降低陶粒泡沫混凝土的抗压强度.当陶粒粒径较大时,陶粒内部存

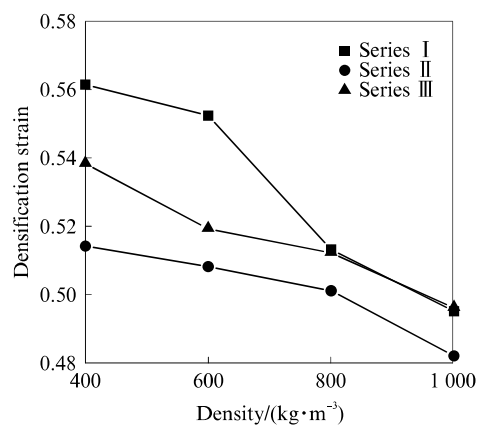


图5 陶粒泡沫混凝土压实应变与泡沫混凝土密度的关系
Fig. 5 Relationship between densification strain of ceramsite foam concrete and foam concrete density

在缺陷的概率也就越大,如陶粒内部的裂缝和有害气孔会增多,受力时容易造成应力集中,从而导致抗压强度降低.此外,当陶粒粒径较大时,在泡沫混凝

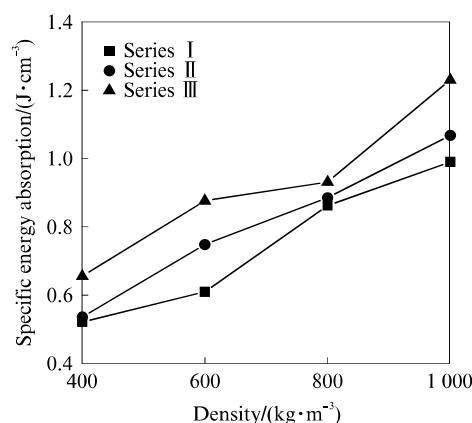


图6 陶粒泡沫混凝土比能量吸收与泡沫混凝土密度的关系
Fig. 6 Relationship between specific energy absorption of ceramsite foam concrete and foam concrete density

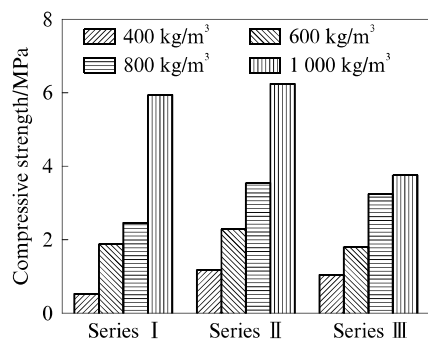


图7 陶粒泡沫混凝土抗压强度与陶粒粒径的关系
Fig. 7 Relationship between compressive strength of ceramsite foam concrete and ceramsite particle size

土制备和搅拌成型的过程中,由于泡沫混凝土和陶粒之间存在密度差的影响,通常会出现上浮和下沉2种情况,造成陶粒泡沫混凝土内部陶粒颗粒分布极其不均匀,恶化受力形式,也会造成陶粒泡沫混凝土抗压强度下降。

2.3.2 陶粒粒径对试件压实应变的影响

图8给出了陶粒泡沫混凝土压实应变与陶粒粒径的关系。由图8可以看出,当泡沫混凝土的密度一定时,随着陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土的压实应变呈现出先减小后增大的变化趋势。在静态轴向压缩过程中,陶粒泡沫混凝土试件中间部分逐渐被压实,而外围部分的混凝土向四周溃散。因此,陶粒泡沫混凝土的压实应变与泡沫混凝土密度、压缩过程中的溃散程度有关。当泡沫混凝土的密度一定时,陶粒泡沫混凝土的压实应变主要与其在压缩过程中的溃散程度有关,溃散程度越严重,中间压实区域越小,压实应变越大,反之,压实应变越小。当陶粒掺量一定时,粒径越小,陶粒与泡沫混凝土的接触面积越大,陶粒泡沫混凝土内部会存在较多的薄弱面,在压

缩过程中,裂缝沿薄弱面迅速开展,溃散程度较为严重。当陶粒粒径较大时,陶粒上浮或下沉现象较为严重,在试件上下两端分布极不均匀,因此陶粒泡沫混凝土试件的一端往往存在初始缺陷,在压缩作用下,此端容易出现应力集中现象,所以试件破坏往往从有初始缺陷的一端开始,然后逐渐扩展到另一端,溃散程度也相对比较严重。当陶粒粒径较小或较大时,压实应变都会偏大。

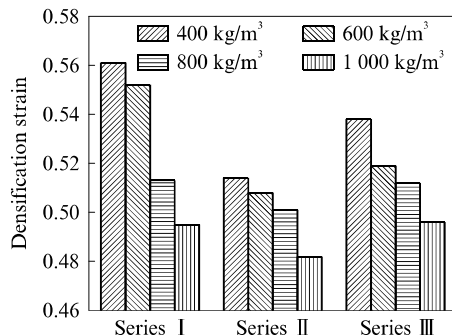


图8 陶粒泡沫混凝土的压实应变与陶粒粒径的关系
Fig. 8 Relationship between densification strain of ceramsite foam concrete and ceramsite particle size

2.3.3 陶粒粒径对试件比能量吸收的影响

图9为陶粒泡沫混凝土比能量吸收与陶粒粒径的关系。

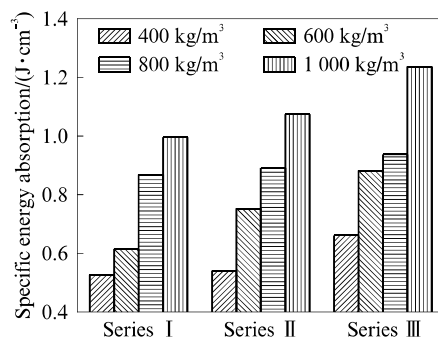


图9 陶粒泡沫混凝土的比能量吸收与陶粒粒径的关系
Fig. 9 Relationship between specific energy absorption of ceramsite foam concrete and ceramsite particle size

由图9可见,当泡沫混凝土密度一定时,随着陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土在轴向压缩作用下的能量吸收能力逐渐增强。陶粒泡沫混凝土进行能量耗散主要分为2个部分:一是通过泡沫混凝土中裂缝的产生和发展进行能量耗散,二是通过被包裹的陶粒内部产生和发展的裂缝来耗散能量。从陶粒泡沫混凝土的破坏模式可以看出,随着陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土发生界面破坏过渡到非界面破坏的临界泡沫混凝土密度逐渐降低,即泡沫混凝土的密度一定时,随着陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混

凝土发生非界面破坏的比例上升.在以上4种泡沫混凝土中,掺入较大粒径陶粒的陶粒泡沫混凝土发生非界面破坏的比例要高于陶粒粒径较小的陶粒泡沫混凝土,大粒径陶粒泡沫混凝土中裂缝在陶粒内部产生和发展所耗散的能量要远远高于小粒径陶粒泡沫混凝土.因此,当泡沫混凝土密度一定时,随陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土的比能量吸收逐渐提高.

当泡沫混凝土密度一定时,与粒径为0~10、10~20 mm陶粒泡沫混凝土相比,粒径为20~30 mm的陶粒泡沫混凝土抗压强度较低,而且能量吸收能力较强,单轴压缩下的应力-应变曲线形状更接近于泡沫金属,意味着此材料在较低的应力下就可以进入屈服吸能状态,并具有较高的耗散能,更适用于吸能防护领域.另外,与泡沫金属类吸能材料相比,陶粒泡沫混凝土造价很低且可以现浇,因此其在经济性和可模性方面具有突出优势.

3 结论

(1)随着泡沫混凝土密度的提高或陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土出现非界面破坏的现象逐渐显著,与粒径为0~10、10~20、20~30 mm的陶粒相匹配的泡沫混凝土密度范围分别为800~1 000、600~800、400~600 kg/m³.

(2)随着泡沫混凝土密度的提高,陶粒粒径为0~10、10~20、20~30 mm的3种陶粒泡沫混凝土的抗压强度和能量吸收均有显著提高,而压实应变随之减小.

(3)当泡沫混凝土密度一定时,随着陶粒粒径的增大,陶粒泡沫混凝土的抗压强度先增后减,压实应变先减后增,而能量吸收能力逐渐提高.粒径为20~30 mm的陶粒泡沫混凝土更适用于吸能防护领域.

参考文献:

- [1] 陈兵,刘睫.纤维增强泡沫混凝土性能试验研究[J].建筑材料学报,2010,13(3):286-290.
CHEN Bing, LIU Jie. Experimental research on properties of foamed concrete reinforced with polypropylene fibers [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(3): 286-290. (in Chinese)
- [2] 竺万发,张业红,苏英,等.我国泡沫混凝土的研究进展及工程应用[J].材料导报,2013,27(增刊1):317-320.
ZHU Wanfa, ZHANG Yehong, SU Ying, et al. Study progress and engineering applications of foamed concrete in China [J]. Materials Reports, 2013, 27(Suppl 1): 317-320. (in Chinese)
- [3] 崔玉理,贺鸿珠.温度对泡沫混凝土性能影响[J].建筑材料学报,2015,18(5):836-839.
- CUI Yuli, HE Hongzhu. Influence of temperature on performances of foam concrete [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 836-839. (in Chinese)
- [4] 崔玉理,贺鸿珠.发泡剂利用率对泡沫混凝土性能影响研究[J].建筑材料学报,2015,18(1):12-16.
CUI Yuli, HE Hongzhu. Influence of utilization efficiency of foaming agent on foam concrete performances [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 12-16. (in Chinese)
- [5] 刘军,齐玮,刘润清,等.粉煤灰对泡沫混凝土物理力学性能的影响[J].材料导报,2015,29(16):111-114.
LIU Jun, QI Wei, LIU Runqing, et al. Effect of fly ash on physical and mechanical properties of foam concrete [J]. Materials Reports, 2015, 29(16): 111-114. (in Chinese)
- [6] 鹿健良,孙晶晶.陶粒泡沫混凝土配合比试验研究[J].混凝土与水泥制品,2012(9):60-62.
LU Jianliang, SUN Jingjing. Experimental study on mix proportion of ceramsite foam concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2012(9): 60-62. (in Chinese)
- [7] 田雨泽,耿玲,李娜.基于正交设计的陶粒泡沫混凝土配合比试验研究[J].混凝土,2017(12):169-172.
TIAN Yuze, GENG Ling, LI Na. Experimental study on the mixture ratio of ceramic foam concrete based on orthogonal design [J]. Concrete, 2017(12): 169-172. (in Chinese)
- [8] 刘文斌,张雄.陶粒泡沫混凝土收缩性能研究[J].混凝土,2013(11):105-107.
LIU Wenbin, ZHANG Xiong. Research on performance of shrinkage of ceramsite foam concrete [J]. Concrete, 2013(11): 105-107. (in Chinese)
- [9] 孙文博,李家和,张志春.陶粒泡沫混凝土强度及其影响因素研究[J].哈尔滨建筑大学学报,2002,35(3):69-83.
SUN Wenbo, LI Jiahe, ZHANG Zhichun. Strength of ceramsite foam concrete and factors having effect on it [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(3): 69-83. (in Chinese)
- [10] 王康,陈国新.化学发泡陶粒泡沫混凝土力学及热工性能研究[J].广西大学学报(自然科学版),2016,41(2):339-345.
WANG Kang, CHEN Guoxin. Mechanical and thermal properties of ceramsite foamed concrete prepared with chemical foaming method [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(2): 339-345. (in Chinese)
- [11] 陆晓燕,陈宇峰,朱爱东,等.全淤泥陶粒泡沫混凝土砌块墙体的热工性能研究[J].混凝土,2012(12):96-99.
LU Xiaoyan, CHEN Yufeng, ZHU Aidong, et al. Thermal performance study of the whole sludge ceramsite foam concrete block wall [J]. Concrete, 2012(12): 96-99. (in Chinese)
- [12] 贾兴文,吴洲,何兵,等.陶粒预处理对陶粒泡沫混凝土物理力学性能的影响[J].材料导报,2013,27(12):131-135.
JIA Xingwen, WU Zhou, HE Bing, et al. Effect of ceramsite pretreatment on the mechanical properties of ceramsite foam concrete [J]. Materials Reports, 2013, 27(12): 131-135. (in Chinese)
- [13] 张丙鹏.耐碱玻璃纤维增强陶粒泡沫混凝土物理力学性能试验及应用研究[D].泰安:山东农业大学,2018.

- ZHANG Bingpeng. Experimental study on physical and mechanical properties of alkali-resistant glass fiber reinforced cement foamed concrete and its application[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [14] ZHANG Z Q, YANG J L, LI Q M. An analytical model of foamed concrete aircraft arresting system[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 61: 1-12.
- [15] TIAN X B, LI Q M, LU Z Y, et al. Experimental study of blast mitigation by foamed concrete[J]. International Journal of Protective Structures, 2016, 8(1): 1-14.
- [16] LI H N, LIU P F, LI C, et al. Experimental research on dynamic mechanical properties of metal tailings porous concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 20-31.
- [17] MILTZ J, GRUENBAUM G. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements[J]. Polymer Engineering & Science, 1981, 21(15): 1010-1014.
- [18] TAN P J, HARRIGAN J J, REID S R. Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam[J]. Materials Science and Technology, 2002, 18: 480-488.
- [19] MASTALI M, KINNUNEN P, ISOMOISIO H, et al. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 371-381.
- [20] 刘海燕, 李然. 泡沫混凝土吸能机理试验研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 166-167.
- LIU Haiyan, LI Ran. Experimental study on energy absorbing mechanism of foam concrete[J]. Journal of Chengdu University(Natural Science), 2010, 29(2): 166-167. (in Chinese)