

doi :10.3969/j.issn.1005-3026.2016.06.029

# 泡粒混凝土的力学性能与本构关系

徐爽<sup>1</sup>,朱浮声<sup>1</sup>,张俊<sup>1</sup>,褚小溪<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819;2. 辽宁省强制隔离戒毒所,辽宁 沈阳 110098)

**摘 要:**考虑聚苯颗粒体积比及湿密度等级两个影响因素,配制了共计25组不同配比的泡粒混凝土.研究了加载速率对泡粒混凝土应力-应变曲线的影响情况,结果表明其应变率效应不明显;并研究了不同聚苯颗粒含量以及不同湿密度等级对泡粒混凝土的应力-应变曲线的影响情况,结果表明此材料的密度以及聚苯颗粒含量对其力学性能影响均很大,并表现出不同的规律性.通过对其弹性模量、压溃应力、压溃应变等参数的分析,结合试验结果,建立了该材料的单轴压缩唯象本构模型,通过试验结果与预测结果的比较,唯象本构模型与试验结果吻合较好.

**关 键 词:**泡粒混凝土;弹性模量;压溃应力;压溃应变;唯象本构模型

中图分类号: TU 528.01      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2016)06-0899-05

## Mechanical Property and Constitutive Relation of Foamed Particles Concrete

XU Shuang<sup>1</sup>, ZHU Fu-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, CHU Xiao-xi<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Province Compulsory Isolation Detoxification Institute, Shenyang 110098, China. Corresponding author: XU Shuang, E-mail: xushuangemail@163.com)

**Abstract:** Considering two factors of the polystyrene particle content and wet density, 25 groups of foamed particles concrete with different proportions were prepared. The strain rate effect is not obvious by studying the loading speed on stress-strain curve of foamed particles concrete. The effect of different polystyrene particles content and different wet density on stress-strain curve of foamed particles concrete was also studied. The results show that the influence of polystyrene particles content and wet density on mechanical properties was obvious. Through the analysis of modulus of elasticity, crushing stress, crushing strain and other parameters, combining with test results, a phenomenological uniaxial compressive constitutive model of foamed particles concrete is established. Comparing test results with modeling predictions, good agreements are obtained between the phenomenological constitutive model and test results.

**Key words:** foamed particles concrete; modulus of elasticity; crushing stress; crushing strain; phenomenological constitutive model

随着对建筑节能要求的标准不断提高<sup>[1]</sup>,泡粒混凝土应运而生.由于泡粒混凝土的性能优于泡沫混凝土和胶粉聚苯颗粒保温浆料<sup>[2]</sup>,已经得到大面积的应用,因此对泡粒混凝土的基础理论研究也迫在眉睫.众多学者对泡沫混凝土<sup>[3-6]</sup>和EPS混凝土<sup>[7-8]</sup>均做了大量的系统研究,而对于泡

粒混凝土的基础理论研究,目前还未见相关文献.

泡粒混凝土的力学行为表现出泡粒混凝土多孔材料的受力破坏特征,破坏过程具有明显的应力跌落阶段,具有一定的抗压缩韧性,变形性能较好,具有较好的吸能功能.本文通过对泡粒混凝土进行试验研究,进行低加载速率(10,20,30,

收稿日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51008053);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120401005;N140104006).

作者简介: 徐爽(1978-),男,辽宁沈阳人,东北大学博士研究生;朱浮声(1948-),男,黑龙江齐齐哈尔人,东北大学教授,博士生导师.

40 mm/min)加载的单轴压缩试验,并系统地分析了试验得到的应力-应变曲线等结果,研究了加载速率、苯粒体积比、密度等因素对材料性能的影响,建立了泡粒混凝土在低加载速率下的单轴压缩本构模型,为该新型材料在今后的研究与应用提供参考依据。

## 1 试验研究

本文研究内容是聚苯颗粒(以下简称苯粒)含量以及湿密度对泡粒混凝土应力-应变曲线的影响情况,试验中的苯粒体积比选取 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7  $\text{m}^3/\text{m}^3$  5 个等级,湿密度选取 200、250、300、350、400  $\text{kg}/\text{m}^3$  5 个等级,共计设计 25 组不同配合比的泡粒混凝土。

试验中所用的试件为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件,所有试验均在 MAS-500 型框架式电液伺服加载系统上进行。

### 1.1 试验过程

在加载的初始阶段,由于应力水平较低,泡粒混凝土中包裹较大气泡的水泥壳体会首先破碎,此时,应力-应变曲线表现为线弹性。随着加载的持续增加,裂缝会从最先破碎的水泥壳体处向外扩展,并沿聚苯颗粒边缘扩展,当达到压溃应力时,贯通为明显的裂缝。当加载继续进行,进入塑性压溃平台阶段,破碎的水泥浆体逐渐增多,但由于贯通的裂缝已经形成,应力得到了释放,因此,贯通的新裂缝不再出现,水泥壳体逐渐破碎压实,形成了压溃平台阶段。在实际工程中,出于安全起见,取平台阶段的强度为泡粒混凝土的正常使用极限状态。当加载进一步增加,由于水泥壳体基本完全破裂,且由于聚苯颗粒的存在,仍会产生较小的应变,但应力迅速增加,应力-应变曲线进入了密实加强阶段。

### 1.2 加载速率的影响

图 1 为两种湿密度等级的泡粒混凝土在低加载速率下进行单轴压缩试验的应力-应变曲线。从试验得到的结果可以看出,其应力-应变曲线显现出明显的三段性:弹性阶段、塑形平台阶段和密实加强阶段。由应力-应变曲线还可以看出,泡粒混凝土的应变率效应不明显,因此,在本文的研究范围中将不考虑应变率对材料的影响。

### 1.3 苯粒体积比的影响

从试验得到的应力-应变曲线(图 2)可以看出,湿密度等级为 200  $\text{kg}/\text{m}^3$  的泡粒混凝土,随苯粒体积比的增加,其应力-应变曲线逐渐上升,即

在相同应变的情况下,其强度随苯粒体积比的增加而增加。而在湿密度等级达到 250 和 300  $\text{kg}/\text{m}^3$  时,表现出其应力-应变曲线在随苯粒体积比的增加而逐渐上升,当苯粒体积比达到 0.5  $\text{m}^3/\text{m}^3$  之后,其应力-应变曲线又逐渐下降的现象。当湿密度等级达到 350 和 400  $\text{kg}/\text{m}^3$  时,同样表现出应力-应变曲线随苯粒体积比的增加而逐渐上升,在苯粒体积比达到 0.6  $\text{m}^3/\text{m}^3$  后,其应力-应变曲线才逐渐下降。可见,苯粒体积比对于泡粒混凝土的应力-应变曲线的影响较为复杂。

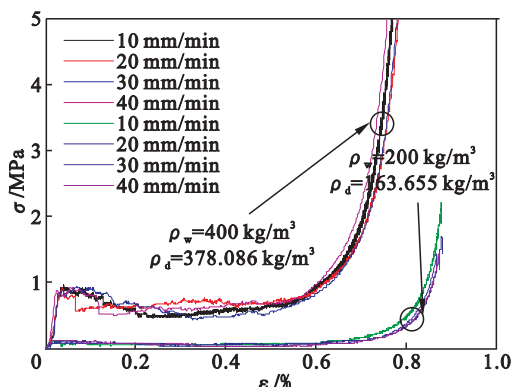


图 1 两种湿密度等级的泡粒混凝土在不同加载速率下的应力-应变曲线

Fig. 1 The stress-strain curves of foamed particles concrete with different wet densities under different loading speeds

### 1.4 湿密度的影响

从试验得到的应力-应变曲线(图 3)可以看出,在相同苯粒体积比的情况下,湿密度等级越高,泡粒混凝土的应力-应变曲线越高,即相同苯粒体积比的泡粒混凝土在应变相同时,湿密度等级越高的,其强度也越高。可见,湿密度对泡粒混凝土应力-应变曲线的影响较为简单。

## 2 泡粒混凝土本构模型研究

材料本构关系是掌握材料的力学特性和物理性能的基础,并对材料的应用有指导意义<sup>[9-10]</sup>。为有效区分应力-应变曲线中的 3 个阶段,将弹性阶段与塑性压溃平台阶段交接处的应力及应变定义为压溃应力  $\sigma_{cr}^*$  和压溃应变  $\varepsilon_{cr}^*$ ,并采用分段函数来表述本构关系  $f(\sigma) = f(\rho_d, C_{bp}, \varepsilon)$ 。

在弹性阶段,可以认为泡粒混凝土的应力应变呈线弹性,因此,其弹性模量  $E$  可以简单表示为  $E = \sigma/\varepsilon$ 。通过对试验数据的整理计算,可以得到各个组次的试件的弹性模量,并对这些结果进行分析,采用式(1)表示:

$$E = a + b\rho_d + cC_{bp}^2 + d\rho_d C_{bp}. \tag{1}$$

通过对试验结果的弹性模量  $E$  进行分析,得到式(2):

$$E = -9.76 + 0.07\rho_d - 26.45C_{bp}^2 + 0.12\rho_d C_{bp}. \tag{2}$$

图 4 给出了试验结果得到的弹性模量与式(2)预测值的比较,从中可以看出,式(2)可以较

好反应干密度  $\rho_d$  及苯粒体积比  $C_{bp}$  对弹性模量  $E$  的影响. 因此,当  $\varepsilon \leq \varepsilon_{cr}^*$  时,泡粒混凝土在弹性阶段的本构关系可表征为

$$\sigma = E\varepsilon = (-9.76 + 0.07\rho_d - 26.45C_{bp}^2 + 0.12\rho_d C_{bp})\varepsilon. \tag{3}$$

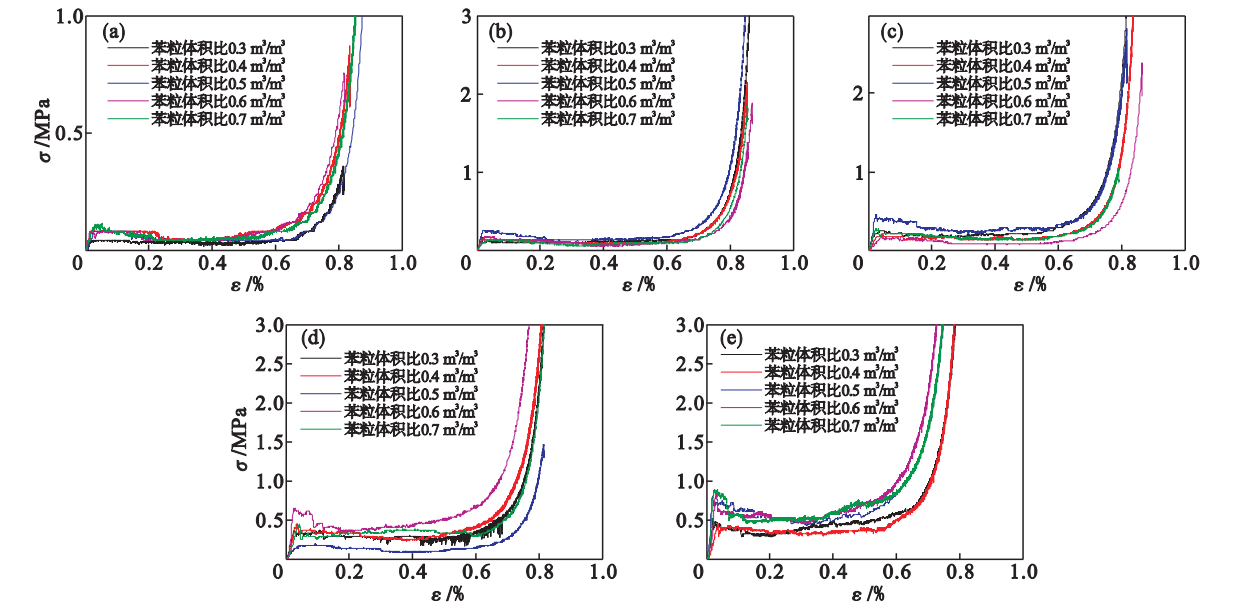


图 2 不同苯粒体积比的泡粒混凝土在相同湿密度等级情况下的应力 - 应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curves of foamed particles concrete with different polystyrene particle content under the same wet density  
(a)—湿密度等级为 200 kg/m³ ; (b)—湿密度等级为 250 kg/m³ ; (c)—湿密度等级为 300 kg/m³ ;  
(d)—湿密度等级为 350 kg/m³ ; (e)—湿密度等级为 400 kg/m³ .

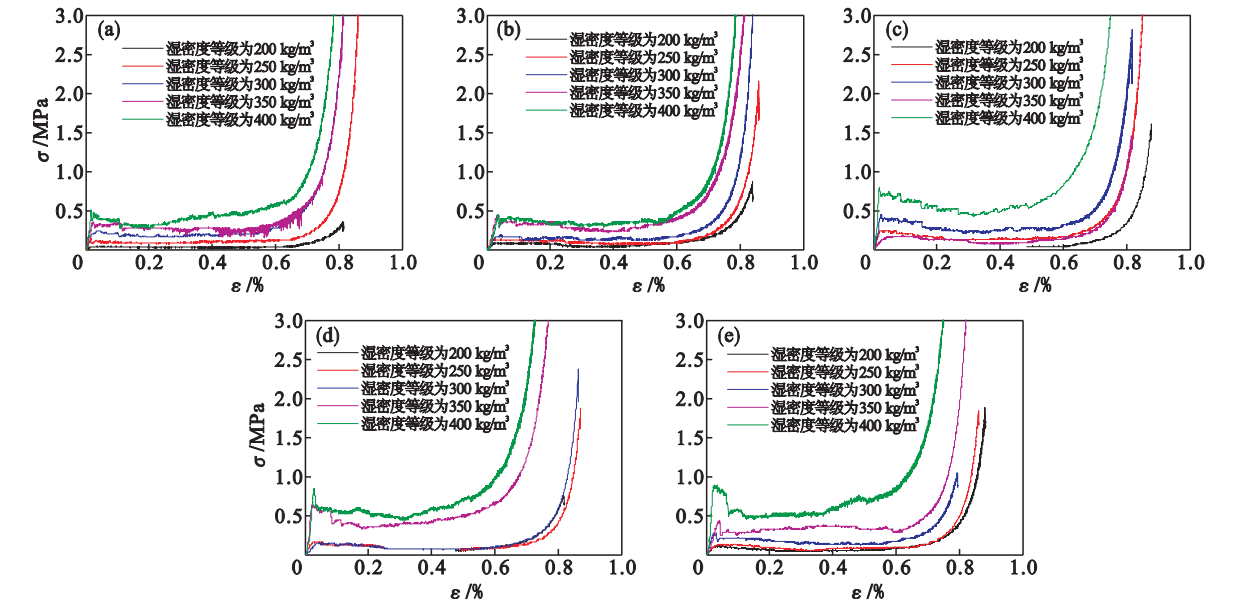


图 3 不同湿密度等级的泡粒混凝土在相同苯粒体积比情况下的应力 - 应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curve of foamed particles concrete with different wet densities under the same polystyrene particle content  
(a)—苯粒体积比为 0.3 m³/m³ ; (b)—苯粒体积比为 0.4 m³/m³ ; (c)—苯粒体积比为 0.5 m³/m³ ;  
(d)—苯粒体积比为 0.6 m³/m³ ; (e)—苯粒体积比为 0.7 m³/m³ .

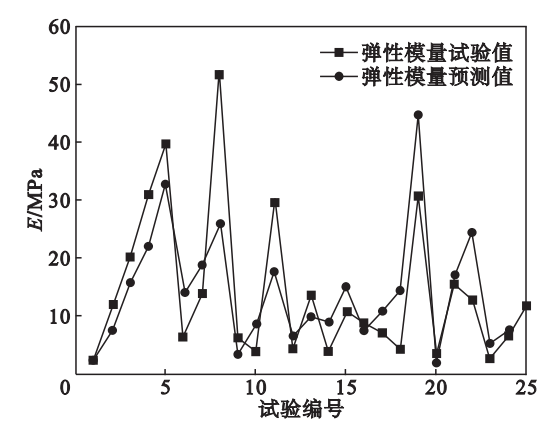


图 4 试验得到的弹性模量与公式预测值对比图  
Fig. 4 Comparison chart of the elasticity modulus obtained by experiments and equation predictions

泡粒混凝土的压溃应力可表征为

$$\sigma_{cr}^* = -0.341 + 0.002\rho_d - 0.266C_{bp}^2 + 0.002\rho_d C_{bp}. \quad (4)$$

图 5 给出了试验结果得到的压溃应力  $\sigma_{cr}^*$  与式 (4) 预测值的比较, 从中可以看出, 式 (4) 可以

$$\varepsilon^* = \left( \frac{-9.76 + 0.07\rho_d - 26.45C_{bp}^2 + 0.12\rho_d C_{bp}}{(12\,690.86 + 2.24\rho_d^{1.01} - 13\,165.09C_{bp}^{0.01}) \wedge 18.98 - 5.12 \times 10^{14} \rho_d^{-6.3} C_{bp}^{0.45}} \right)^{\frac{1}{17.98 - 5.12 \times 10^{14} \rho_d^{-6.3} C_{bp}^{0.45}}}. \quad (5)$$

对于塑性平台阶段以及密实阶段, 即当  $\varepsilon > \varepsilon_{cr}^*$  时, 应力-应变曲线采用式 (6) 表示:

$$\sigma = (A + B\rho_d^C + dC_{bp}^e) + (f + g\rho_d^h + iC_{bp}^j)\varepsilon^{k + l\rho_d^q C_{bp}^r}. \quad (6)$$

结合本文的试验结果, 得到式 (4) 中各待定系数的具体数值, 即泡粒混凝土在压溃平台阶段

$$\sigma = (-9.76 + 0.07\rho_d - 26.45C_{bp}^2 + 0.12\rho_d C_{bp})\varepsilon, \quad \left. \begin{aligned} &\varepsilon \leq \varepsilon_{cr}^* \\ &\sigma = (-0.81 + 0.04\rho_d^{0.61} - 5\,665.98C_{bp}^{3.640.84}) \wedge (12\,690.86 + 2.24\rho_d^{1.01} - 13\,165.09C_{bp}^{0.01}) \varepsilon^{18.98 - 5.12 \times 10^{14} \rho_d^{-6.3} C_{bp}^{0.45}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

图 6 中给出了泡粒混凝土的应力-应变曲线与本文提出的单轴压缩本构模型预测结果的比较. 可以看出, 本文提出的本构模型较好地反映了

较好地反映干密度  $\rho_d$  及苯粒体积比  $C_{bp}$  对压溃应力  $\sigma_{cr}^*$  的影响.

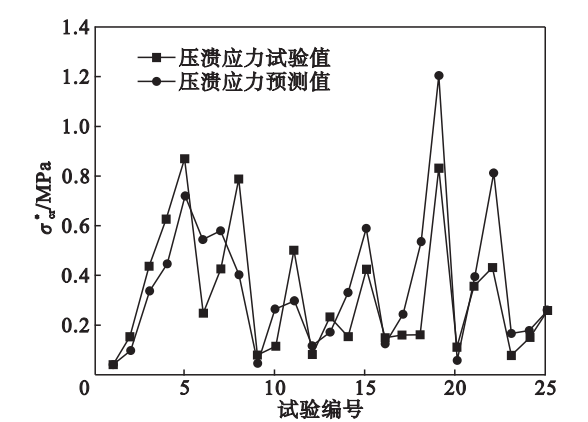


图 5 试验得到的压溃应力与公式预测值对比图  
Fig. 5 Comparison chart of the crushing stresses obtained by experiments and equation predictions

压溃应变也是一个重要的力学指标, 根据式 (3) 和式 (4) 可以得到式 (5) 压溃应变表达式:

以及密实阶段的本构模型式 (7), 式 (8):

$$\sigma = (-0.81 + 0.04\rho_d^{0.61} - 5\,665.98C_{bp}^{3.640.84}) + (12\,690.86 + 2.24\rho_d^{1.01} - 13\,165.09C_{bp}^{0.01}) \cdot \varepsilon^{18.98 - 5.12 \times 10^{14} \rho_d^{-6.3} C_{bp}^{0.45}}. \quad (7)$$

即泡粒混凝土的本构模型可以表示为

$$\sigma = (-9.76 + 0.07\rho_d - 26.45C_{bp}^2 + 0.12\rho_d C_{bp})\varepsilon, \quad \left. \begin{aligned} &\varepsilon \leq \varepsilon_{cr}^* \\ &\sigma = (-0.81 + 0.04\rho_d^{0.61} - 5\,665.98C_{bp}^{3.640.84}) \wedge (12\,690.86 + 2.24\rho_d^{1.01} - 13\,165.09C_{bp}^{0.01}) \varepsilon^{18.98 - 5.12 \times 10^{14} \rho_d^{-6.3} C_{bp}^{0.45}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

泡粒混凝土的压缩特性, 预测结果与试验结果较为吻合.

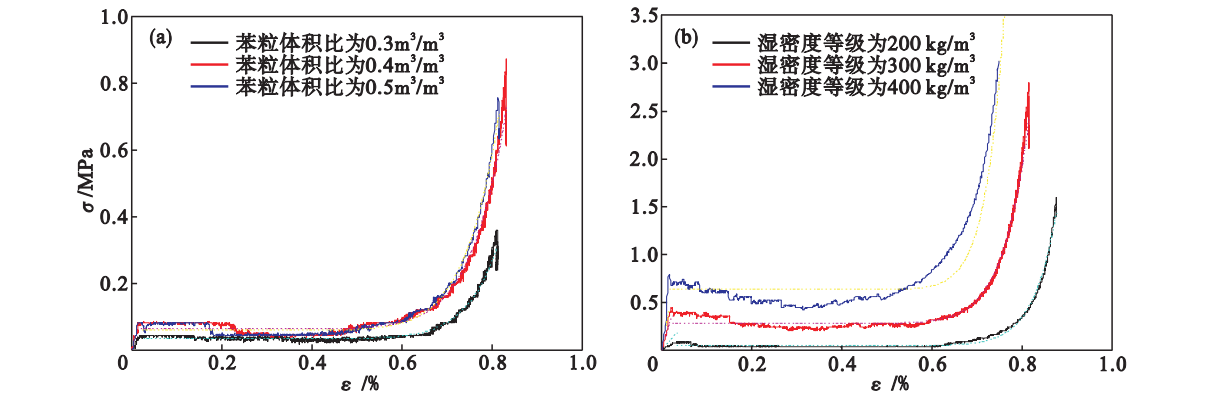


图 6 泡粒混凝土应力-应变曲线与本构模型预测结果的比较  
Fig. 6 The comparison of the stress strain curves of formed particles concrete with predictions results of constitutive model

(a) —不同苯粒体积比; (b) —不同湿密度.

### 3 结 论

- 1 ) 泡粒混凝土的应变率效应不明显.
- 2 ) 苯粒体积比对泡粒混凝土的强度影响较为复杂 ,两者呈抛物线关系.
- 3 ) 密度对泡粒混凝土强度的影响较为简单 ,密度越大 ,强度越高 ,压溃平台应力升高范围变窄.
- 4 ) 通过对试验结果的分析 ,同时考虑苯粒体积比、干密度对泡粒混凝土的影响 ,建立了泡粒混凝土的分段本构模型 ,此模型可以较好地预测在低加载速率情况下的泡粒混凝土的单轴压缩力学性能.

#### 参考文献：

[ 1 ] 中华人民共和国建设部. 公共建筑节能设计标准 :GB 50189 - 2005[ S ]. 北京 :中国建筑工业出版社 ,2005.  
( Ministry of Construction of the People's Republic of China. Design standard for energy efficiency of public buildings GB 50189—2005[ S ]. Beijing :China Architecture & Building Press ,2005. )

[ 2 ] 鲁永明 ,何纯涛 ,信会鹏 ,等. 现浇泡粒混凝土的配制及其性能研究 [ J ]. 混凝土 ,2014( 6 ) :147 - 150.  
( Lu Yong-ming ,He Chun-tao ,Xin Hui-peng ,et al. Preparation

of foamed particle concrete and study of its performance[ J ]. *Concrete* ,2014( 6 ) :147 - 150. )

[ 3 ] Jones M R ,McCarthy A. Behavior and assessment of foamed concrete for construction applications[ M ]. Dhir R K , Newlands M D ,McCarthy A eds. Use of foamed concrete in construction. London :Thomas Telford ,2005 :61 - 88.

[ 4 ] Ramamurthy K ,Kunhanandan Nambiar E K ,Indu Siva Ranjani G. A classification of studies on properties of foam concrete[ J ]. *Cement & Concrete Composites* ,2009 ,31 :388 - 396.

[ 5 ] Kearsley E P ,Wainright P J. The effect of porosity on the strength of foamed concrete[ J ]. *Cement and Concrete Research* ,2002 ,32 :233 - 239.

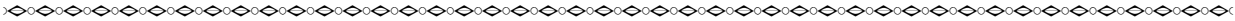
[ 6 ] Roy R L ,Parant E ,Boulay C. Taking into account the inclusions ' size in lightweight concrete compressive strength prediction[ J ]. *Cement and Concrete Research* ,2005 ,35 :770 - 775.

[ 7 ] Cook D J. Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete[ J ]. *Precast Concrete* ,1973 ,4( 4 ) :691 - 693.

[ 8 ] Cook D J. Expanded polystyrene concrete[ C ]// *Concrete Technology and Design :New Concrete Materials*. London :Surrey University Press ,1983 :41 - 69.

[ 9 ] Chen W F. Plasticity in reinforced concrete[ M ]. New York :McGraw-Hill ,1982.

[ 10 ] Chen W F. Concrete plasticity past ,present and future[ C ]// *Strength Theory :Application ,Development and Prospect for the 21st Century*. Beijing :Science Press ,1998 :7 - 8.



( 上接第 898 页 )

### 3 结 论

干湿循环作用下 ,普通混凝土和混杂纤维混凝土受硫酸盐侵蚀后 ,抗压强度和劈裂抗拉强度随侵蚀龄期的变化趋势基本一致 ,均在侵蚀前期存在一个强度增长期 ,之后下降 ,但混杂纤维混凝土变化趋势较为平缓 ,相对动弹性模量均先上升后下降 ,但普通混凝土相对动弹性模量的劣化更快 ,在相同侵蚀龄期和侵蚀深度下 ,混杂纤维混凝土  $n(\text{SO}_4^{2-})$  均小于普通混凝土 .表明纤维混掺从不同层次上改善纤维三维分布的均衡性以及集料与纤维的协调作用 ,使得混凝土内部更加致密 ,对混凝土抗硫酸盐侵蚀有明显改善作用 .

#### 参考文献：

[ 1 ] Florian M ,Moien R ,Andre B ,et al. Sulfate resistance of cement-reduced eco-friendly concretes[ J ]. *Cement and Concrete Composites* ,2015 ,55( 1 ) :364 - 373.

[ 2 ] Wei Y O ,Jian K C ,Min Q J. Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack[ J ]. *Construction and Building Materials* ,2014 ,53( 2 ) :419 - 424.

[ 3 ] Siad H ,Kamali B S ,Mesbah H A ,et al. Characterization of the degradation of self-compacting concretes in sodium sulfate environment influence of different mineral admixtures [ J ]. *Construction and Building Materials* ,2013 ,47( 10 ) :

1188 - 1200.

[ 4 ] 温世臣 ,赵顺波 ,史长城. 离心成型钢纤维混凝土力学及耐腐蚀性能试验研究[ J ]. 工业建筑 ,2005 ,36( sup 1 ) :695 - 698.  
( Wen Shi-chen ,Zhao Shun-bo ,Shi Chang-cheng. Experimental study on mechanical and anti-corrosion properties of steel fiber reinforced concrete made by spun-cast method[ J ]. *Journal of Industrial Construction* ,2005 ,36( sup 1 ) :695 - 698. )

[ 5 ] 孔琳洁 ,欧阳东 ,傅浩 ,等. 聚丙烯纤维对混凝土耐硫酸盐腐蚀性能的影响[ J ]. 硅酸盐通报 ,2013 ,32( 8 ) :1650 - 1655.  
( Kong Lin-jie ,Ouyang Dong ,Fu Hao ,et al. Effect of performance on the resistance with concrete hybrid fiber to sulfate corrosion[ J ]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society* ,2013 ,32( 8 ) :1650 - 1655. )

[ 6 ] Manu S ,Menashi D ,Cohen J. Mechanism of sulfate attack :a fresh look. Part 1 :summary of experimental results[ J ]. *Cement and Concrete Research* ,2002 ,32( 5 ) :915 - 921.

[ 7 ] Manu S ,Menashi D ,Cohen J. Mechanism of sulfate attack :a fresh look. Part 2 :proposed mechanisms[ J ]. *Cement Concrete Research* ,2003 ,33( 6 ) :341 - 346.

[ 8 ] Shannag M J ,Shaia H A. Sulfate resistance of high-performance concrete[ J ]. *Cement and Concrete Composites* ,2003 ,25( 3 ) :363 - 369.

[ 9 ] Neville A. The confused world of sulfate attack on concrete[ J ]. *Cement and Concrete Research* ,2004 ,34( 8 ) :1275 - 1296.

[ 10 ] 高润东. 复杂环境下混凝土硫酸盐侵蚀微 - 宏观劣化规律研究 [ D ]. 北京 :清华大学 ,2010.  
( Gao Run-dong. Micro-macro degradation regularity of sulfate attack on concrete under complex environments[ D ]. Beijing :Tsinghua University ,2010. )

[ 11 ] Li Y ,Dong J X ,Zhang S ,et al. Analysis of crack resistance for hybrid fiber mortar[ J ]. *Advanced Materials Research* ,2013 ,279 :222 - 225.