

Effect of Density Grade on Pore Structure and Mechanical Properties of Foamed Concrete

Xixi Xu¹, Xin Zhang², Kai Wang³, Run Xu⁴, Huaqiang Yuan¹

¹Qilu Transportation College, Shandong University, Jinan Shandong

²Jinan City Highway Administration, Jinan Shandong

³Qilu Transportation Development Group, Jinan Shandong

⁴Shandong Provincial Transportation Planning and Design Institute, Jinan Shandong

Email: 1057437307@qq.com

Received: Aug. 5th, 2019; accepted: Aug. 20th, 2019; published: Aug. 27th, 2019

Abstract

The performance of foamed concrete is greatly affected by its wet density grade. In this paper, the pore structure characteristics of foamed concrete with different wet density grades are analyzed by means of scanning electron microscope and image analysis software Image Pro Plus. The influence of density grade on the mechanical properties and California bearing ratio of foamed concrete is studied. The results show that the distribution of pores in the foamed concrete is uniform, and most of them are independent and disconnected spherical pores. With the increase of wet density, the surface density of the pores decreases, and the reduction law basically conforms to the linear relationship. The unconfined compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus of the foamed concrete increase with the increase of wet density. The CBR values of the foamed concrete with different wet densities are all higher than 100% at the age of 7 days, which means strong resistance to deformation. The compressive strength of foamed concrete has a good linear correlation with its splitting tensile strength, elastic modulus and CBR value.

Keywords

Foamed Concrete, Pore Structure, Compressive Strength, Splitting Tensile Strength, Elastic Modulus

密度等级对泡沫混凝土孔结构及力学性能的影响

徐茜茜¹, 张欣², 王凯³, 徐润⁴, 袁化强¹

¹山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

²济南市公路管理局, 山东 济南

³齐鲁交通发展集团, 山东 济南

⁴山东省交通规划设计院, 山东 济南

Email: 1057437307@qq.com

收稿日期: 2019年8月5日; 录用日期: 2019年8月20日; 发布日期: 2019年8月27日

摘要

泡沫混凝土的性能受其湿密度等级影响较大, 此文利用扫描电子显微镜和图像分析软件Image Pro Plus分析了不同湿密度等级泡沫混凝土内部孔结构特征, 研究了密度等级对泡沫混凝土力学性能和路用性能加州承载比(CBR)的影响规律。研究表明: 泡沫混凝土内部气孔分布均匀, 且基本为独立不连通的球形孔, 随着湿密度增大, 气孔的面密度减小, 并且减少规律基本符合线性关系; 泡沫混凝土无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量均随着湿密度增加而增大; 四种不同湿密度的混凝土7 d CBR值均高于100%, 具有很强的抵抗局部变形能力。泡沫混凝土的抗压强度与其劈裂抗拉强度、弹性模量和CBR值具有良好的线性相关性。

关键词

泡沫混凝土, 孔结构, 抗压强度, 抗劈裂抗拉强度, 弹性模量

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

泡沫混凝土是由水泥、水和泡沫等材料按照一定的比例混合制成的轻型填土材料[1] [2]。具有质量轻、流动性高、自立性好、保温性能良好等特点。可以用于软基处理, 桥梁台背填筑, 挡土墙背填筑, 道路拓宽等, 很好地解决了路基不均匀沉降和道路冻胀等问题, 具有广泛的应用前景[3] [4] [5] [6]。

自上世纪 80 年代后期, 日本等国家研发了泡沫混凝土后[7], 各国展开了对泡沫混凝土的研究。Kearsley & Wainwright [8] [9] [10]研究了泡沫混凝土强度、孔隙特征、渗透特性及强度模型, 建立了强度与干密度的关系式。Nambiar & Ramamurthy [11] [12] [13] [14] [15]用水泥、砂、粉煤灰、水和泡沫制成泡沫混凝土, 研究了不同掺合料和干密度对强度的影响, 并得到了抗压强度和干密度的拟合关系式。张磊蕾[16] [17] [18]对泡沫混凝土孔结构进行了研究, 结果表明随着水料比增大, 其孔径在 100~200 μm 范围内的比率增加, 孔径呈增大的趋势; 改变硅灰、增稠剂和稳泡剂的掺量能实现对泡沫混凝土气孔孔径控制。

密度等级是影响泡沫混凝土性能的重要因素, 对泡沫混凝土孔结构和力学性能影响较大, 并且由于泡沫混凝土密度可调性, 现有研究中泡沫混凝土的密度差别较大, 本文选取 600 级~900 级四个密度等级的泡沫混凝土, 利用图像分析软件分析泡沫混凝土内部孔径大小、孔径分布以及孔的面密度, 研究密度等级对孔结构的影响。此外建立了抗压强度值与劈裂抗拉强度值、弹性模量和 CBR 值的拟合关系式, 可用于预测和检验试验结果, 具有一定的工程实际意义。

2. 试验

2.1. 试验原材料

水泥采用山水公司水泥厂生产的 P.O42.5 级水泥；发泡剂选取稀释倍率 40~50 倍的复合型发泡剂，发泡倍率为 800~1000 倍，标准泡沫密度 40~50 kg/m³，试验测得 30 min 泌水率 15.93%，符合 TJJ F10 01-2001《现浇泡沫混凝土路基设计施工设计规程》中对发泡剂性能要求；水为自来水。

2.2. 试验方法

2.2.1. 试样制备

泡沫混凝土配合比如表 1 所示，按照所需质量称量各种材料，依次将材料加入水泥发泡搅拌一体机，将胶凝材料搅拌均匀。然后将水泥发泡搅拌一体机制备好的泡沫加入浆体中，并将泡沫均匀搅拌进浆体。测试泡沫混凝土的湿密度和流值，达到目标值后浇注试件，在浇筑完的试模表面覆盖薄膜，于自然状态下养护 24 h 后拆模，将试件装入密封塑料袋中在标准养护室中养护至龄期。

Table 1. Foam concrete mix ratio

表 1. 泡沫混凝土配合比

湿密度/(kg/m ³)	配合比			流值/mm
	水泥/(kg/m ³)	水/(kg/m ³)	泡沫/(kg/m ³)	
600	353	212	36	163.1
700	417	250	34	181.5
800	491	276	32	180.5
900	561	309	30	188.5

2.2.2. 试验方法

本试验中抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量的测定均参照 GB/T11969-2008《蒸压加气混凝土性能试验方法》。加州承载比试验参照 JTG E40-2007《公路土工试验规程》。

孔结构特征参数测定，先用切割机将养护 28 天的试件由中间剖开，用砂纸对剖面进行打磨，然后在水下冲洗并用毛刷轻轻刷洗，用高压气枪清理孔内的残留物，用电子显微镜扫描剖面并拍摄照片。利用 Image Pro Plus 软件对图片进行处理，调整图像灰度值、对比度、亮度等使气孔与基体对比更为鲜明，然后用 Irregular 工具来选择照片的测量区域，最后确定要测量的参数——平均孔径、气孔数量等，计算并导出数据进行处理。

3. 试验结果分析

3.1. 密度等级对孔结构的影响

用扫描电子显微镜(SEM)对湿密度为 700 级、800 级、900 级的泡沫混凝土分别在 20 倍、40 倍、100 倍的倍率下观察内部孔结构并拍摄照片，图 1 是 700 级泡沫混凝土在 3 个倍率下拍摄的孔结构形貌，图 2 是在 20 倍率下拍摄的 3 个密度等级泡沫混凝土的孔结构形貌。从图 1 和图 2 中可以观察到，气孔基本为独立不连通的球形孔，且分布较均匀，一方面球形气孔更有利于泡沫混凝土受力，不会出现应力集中现象，提高泡沫混凝土强度[19]。另一方面大多数孔独立完整，说明本试验采用的泡沫稳定性好，泡沫混凝土制备工艺良好，泡沫基本不产生消融或聚合现象。

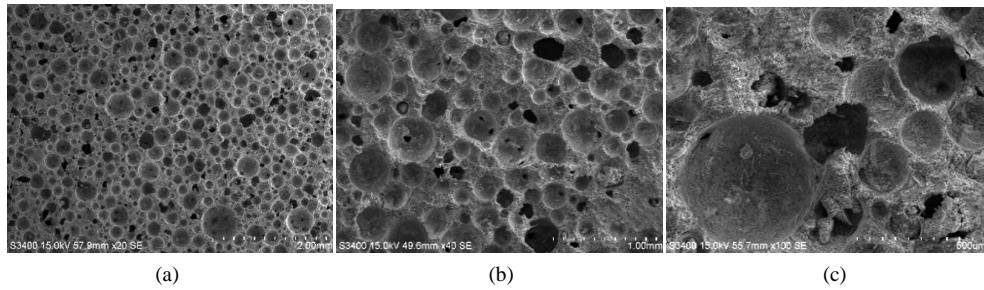


Figure 1. SEM photograph of 700 grade foam concrete at different magnifications. (a) 20 times; (b) 40 times; (c) 100 times

图 1. 700 级泡沫混凝土不同倍率下的 SEM 照片。(a) 20 倍; (b) 40 倍; (c) 100 倍

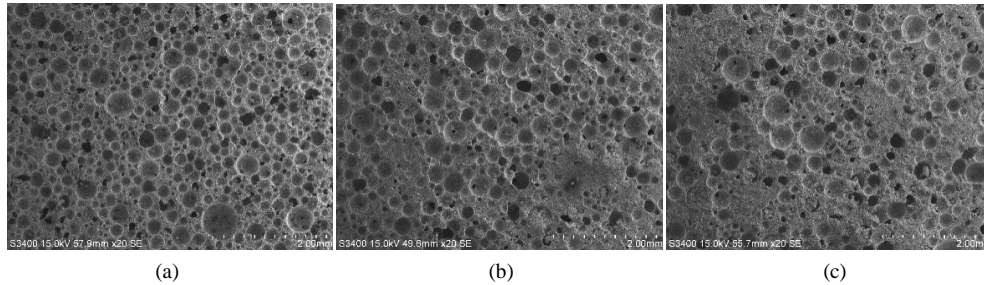


Figure 2. SEM photograph of foam concrete at 20 times. (a) Class 700; (b) Class 800; (c) Class 900

图 2. 泡沫混凝土 20 倍率下的 SEM 照片。(a) 700 级; (b) 800 级; (c) 900 级

泡沫混凝土的孔结构特征如表 2 所示, 其中孔隙率为体积分数, 气孔面密度指单位面积(1 mm^2)上气孔个数。孔隙率测试方法采用直接计算法, 计算公式为 $\theta = m_f / \rho_f * (1/v)$, 式中: m_f 为泡沫的质量; ρ_f 为泡沫的密度; v 为泡沫混凝土体积。从表 2 中可看到, 随着湿密度等级增大, 孔隙率降低, 气孔面密度明显减少, 气孔平均直径相差较小。从图 2 中也可以直观地看出随着湿密度等级增大, 气孔面密度减小。

700 级湿密度混凝土内部气孔的面密度为 17.7 个/mm^2 , 而 900 级孔的面密度仅为 12.0 个/mm^2 , 这是因为随着湿密度的增加, 泡沫混凝土的泡沫含量降低, 气泡占据的体积减小, 故孔隙率降低。即单位体积的泡沫混凝土中, 气孔的数量减小, 所以气孔的面密度减小。

Table 2. Pore structure parameters of foam concrete

表 2. 泡沫混凝土的孔结构参数

湿密度(kg/m^3)	孔隙率(%)	孔面密度(个/ mm^2)	平均孔径(μm)
700	62.4%	17.7	177
800	59.0%	14.0	192
900	54.4%	12.0	194

800 级和 900 级泡沫混凝土的内部气孔的平均孔径值约为 $190 \mu\text{m}$, 700 级泡沫混凝土的平均孔径略小, 但与 900 级仅相差 $17 \mu\text{m}$ 。本试验 700 级~900 级泡沫混凝土均采用同种机械发泡产生的泡沫, 泡沫初始状态一致, 而三种密度等级泡沫混凝土内部孔径基本一致, 说明泡沫在搅拌过程中没有发生破坏, 泡沫形态保持较好。

图 3 为不同密度等级下泡沫混凝土的孔径分布图及孔径累计分布图, 从图 3(a)中可知 700 级、800 级及 900 级泡沫混凝土的孔径均主要分布在 $100\sim 300 \mu\text{m}$ 之间, 孔径分布均匀, 且孔径较小。对于泡沫混

凝土, 孔径分布越均匀, 其力学性能越好。观察图 3(b)可见, 三种密度等级的泡沫混凝土孔径累计分布曲线基本重合, 说明孔径分布规律一致, 泡沫在搅拌过程中, 形态保持良好, 基本未产生泡沫消融或聚合现象, 拌合工艺较好。

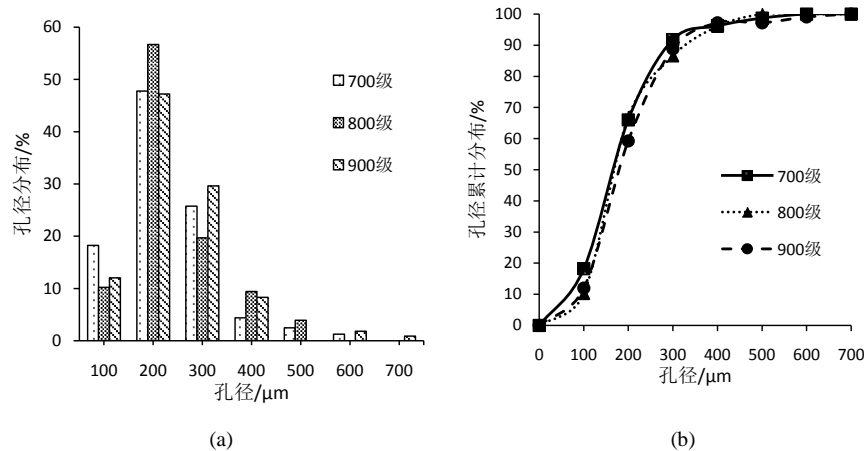


Figure 3. Pore size distribution and pore size cumulative distribution of foam concrete under different density levels. (a) Pore size distribution; (b) Cumulative distribution of aperture

图 3. 不同密度等级下泡沫混凝土的孔径分布及孔径累计分布。(a) 孔径分布; (b) 孔径累计分布

3.2. 密度等级对无侧限抗压强度的影响

湿密度等级与抗压强度的关系如图 4 所示, 对于四种不同湿密度的泡沫混凝土, 试件同一龄期的抗压强度随着湿密度的增加逐渐增大。湿密度 600 级试件的 56 d 抗压强度值为 2.07 MPa, 而湿密度为 900 级试件的 56 d 抗压强度值达到 5.06 MPa, 强度提高了 144%。这是因为 600 级的胶凝材料量要远小于 900 级, 仅为 900 级胶凝材料量的 62.7%, 随着湿密度等级增加, 胶凝材料的用量变大, 同时泡沫质量降低。由表 2 可知, 高密度等级泡沫混凝土的气孔面密度小, 内部孔隙率小, 泡沫混凝土更为密实。因此抗压强度值会随着湿密度的增加而增大。

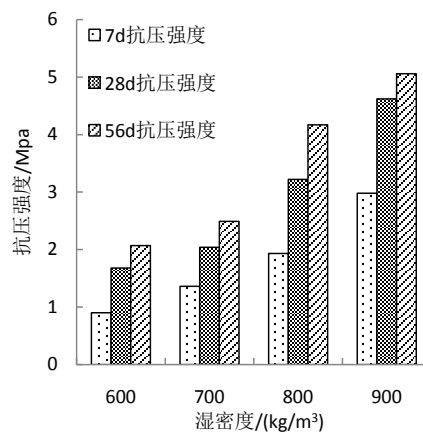


Figure 4. Relationship between compressive strength and wet density

图 4. 抗压强度与湿密度关系

3.3. 密度等级对劈裂抗拉强度的影响

湿密度等级对劈裂抗拉强度的影响规律如图 5 所示。由图 5 可见, 试件 28 d 的劈裂抗拉强度值随着湿密度等级的增长而变大。湿密度 600 级泡沫混凝土的劈裂抗拉强度值为 0.35 MPa, 900 级的劈裂抗拉强度值为 0.92 MPa, 劈裂抗拉强度值增长了 165.7%。可见湿密度等级增加, 由于胶凝材料含量的增多, 水泥水化硬化后, 泡沫混凝土的劈裂抗拉强度增加。

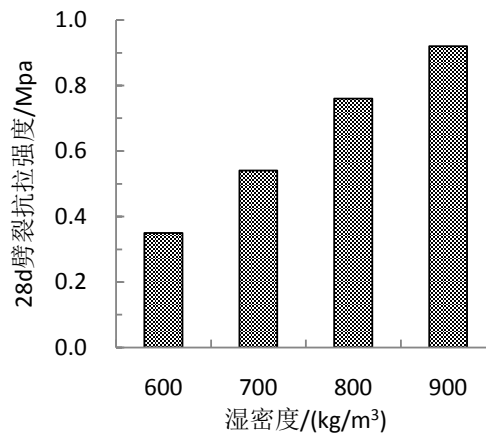


Figure 5. Relationship between splitting tensile strength and wet density

图 5. 劈裂抗拉强度与湿密度关系

3.4. 密度等级对弹性模量的影响

试验依据蒸压加气混凝土性能试验方法中的规定, 制备了 100 × 100 × 300 mm 的小梁试件, 采用应力循环加载的方式进行弹性模量试验。泡沫混凝土弹性模量与湿密度的关系曲线见图 6。

由图 6 可见, 随着湿密度增大, 泡沫混凝土的弹性模量逐级增大。当湿密度由 600 级增大到 900 级时, 弹性模量从 1.31 Gpa 增加到 3.11 Gpa, 模量提高了 237%。并且 600 级泡沫混凝土弹性模量为 1.31 Gpa, 已高于规范中对于路基材料变形模量的要求。可见泡沫混凝土的刚度较大, 抵抗变形的能力较强。

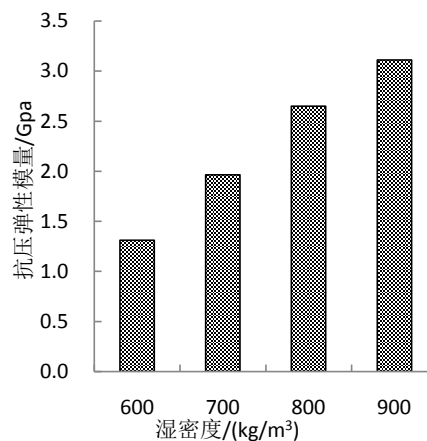


Figure 6. Relationship between static compression modulus and wet density level

图 6. 静力受压弹性模量与湿密度等级关系

3.5. 密度等级对 CBR 的影响

泡沫混凝土的 CBR 值与密度等级关系如图 7 所示。图 7 中显示四种湿密度等级泡沫混凝土的 7 d CBR 值均高于 100%，600 级为 156.7%，900 级最大已达到 503.5%，完全满足规范中对于路基材料 CBR 值的要求。因为随着湿密度的增加，水泥泡沫混凝土孔结构的孔壁变厚，孔结构承载能力更大，即泡沫混凝土抵抗局部变形的能力更大，因此湿密度越大的泡沫混凝土 CBR 值越大。

泡沫混凝土泡水后膨胀量与密度等级关系如图 8 所示。由图 8 可见，泡沫混凝土泡水 4 d 后未发生膨胀，反而产生了微缩，并随着湿密度的增加，微缩量增长，但微缩量非常小，600 级微缩量为 $25 \mu\epsilon$ ，900 级微缩量最大仅为 $58 \mu\epsilon$ 。这是由于水泥浆水化过程中会产生自收缩、化学收缩等现象，所以泡沫混凝土产生了微缩，并且随着湿密度的增加，泡沫混凝土中水泥含量同比增加，故微缩量有所增长。

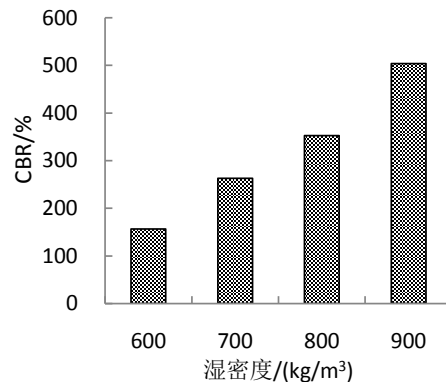


Figure 7. Relationship between CBR value and wet density

图 7. CBR 值与湿密度关系

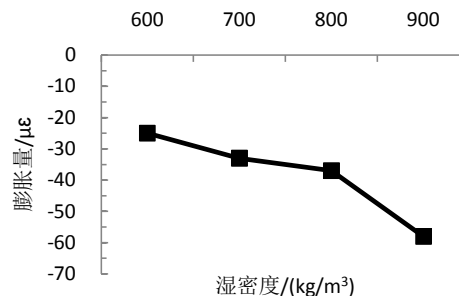


Figure 8. Relationship between expansion amount and wet density

图 8. 膨胀量与湿密度关系

3.6. 抗压强度与劈裂抗拉强度、弹性模量及 CBR 值的关系

由上述湿密度等级对泡沫混凝土力学性能和路用性能的影响规律可知，抗压强度值、劈裂抗拉强度值、弹性模量和 CBR 值均与湿密度等级有良好的线性关系。由于在混凝土设计和质量控制中，抗压强度是要明确规定的，且混凝土的许多其他性质被认为取决于抗压强度并可以由抗压强度数据推导出来，故本文预探究泡沫混凝土抗压强度与其他性能指标的关系。对抗压强度值和其他试验数据进行拟合分析，拟合结果见图 9。由图 9 可知，抗压强度值与劈裂抗拉强度值、弹性模量和 CBR 值拟合关系式的拟合优

度 R^2 分别为 0.93、0.98、0.99，说明抗压强度值与劈裂抗拉强度值、弹性模量和 CBR 值均具有很好的线性关系。本文得到的 3 个拟合关系式，可用于预测和检验试验结果。

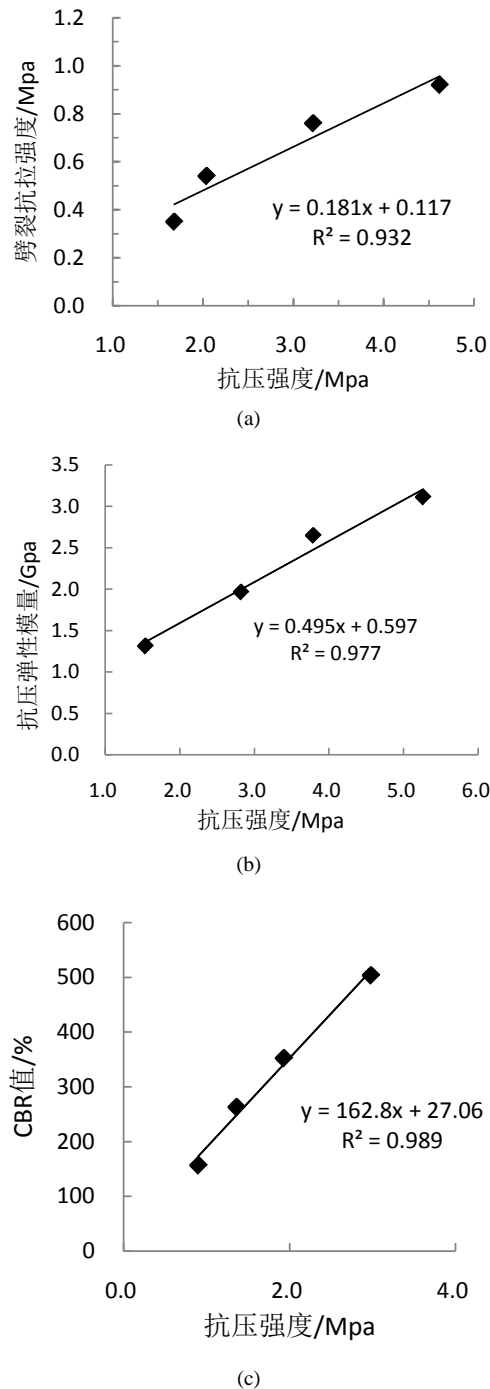


Figure 9. Relationship between compressive strength and split tensile strength, elastic modulus and CBR value. (a) Relationship between split tensile strength and compressive strength; (b) Relationship between elastic modulus and compressive strength; (c) Relationship between CBR value and compressive strength

图 9. 抗压强度与劈裂抗拉强度、弹性模量及 CBR 值关系。(a) 劈裂抗拉强度与抗压强度关系; (b) 弹性模量与抗压强度关系; (c) CBR 与抗压强度关系

4. 结论

1) 不同湿密度等级的泡沫混凝土内部气孔平均孔径相同, 且孔径分布规律基本一致。但随着湿密度增大, 气孔的面密度减小。

2) 随着泡沫混凝土湿密度的增加, 混凝土中胶凝材料用量增加, 无侧限抗压强度和劈裂抗拉强度均逐级增大。劈裂抗拉强度与抗压强度具有较好的线性相关性, 劈裂抗拉强度约为同龄期抗压强度值的 0.2 倍。

3) 泡沫混凝土的弹性模量随着湿密度增大而提高, 湿密度越大, 混凝土的刚度越大, 材料抵抗变形能力越大。

4) 四种不同湿密度等级的泡沫混凝土其 7 d CBR 值均高于 100%, 具有很强的抵抗局部变形能力。水泥泡沫混凝土浸水不会发生膨胀, 会产生微量的收缩。

参考文献

- [1] 李硕, 杨军宏. 泡沫混凝土在高速公路改扩建工程中的应用[J]. 公路交通科技, 2018, 35(S1): 5-10.
- [2] 戴智敏. 气泡混合轻质土的应用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [3] 蔡力, 陈忠平, 吴立坚. 气泡混合轻质土的主要力学特性及应用综述[J]. 公路交通科技, 2005, 22(12): 71-74.
- [4] 陈忠平, 王树林. 气泡混合轻质土及其应用综述[J]. 中外公路, 2003, 23(5): 117-120.
- [5] 肖礼经. 泡沫水泥轻质土在公路建设中的应用与研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2003.
- [6] 陈忠平. 气泡混合轻质填土新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [7] 刘楷. 水泥、地聚合物泡沫混凝土工程特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.
- [8] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. (2001) The Effect of High Fly Ash Content on the Compressive Strength of Foamed Concrete. *Cement and Concrete Research*, **31**, 105-112. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00430-0)
- [9] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. (2001) Porosity and Permeability of Foamed Concrete. *Cement and Concrete Research*, **31**, 805-812. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00490-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00490-2)
- [10] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. (2002) The Effect of Porosity on the Strength of Foamed Concrete. *Cement and Concrete Research*, **32**, 233-239. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00665-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00665-2)
- [11] Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K. (2008) Fresh State Characteristics of Foam Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **20**, 111-117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:2\(111\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:2(111))
- [12] Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K. (2006) Influence of Filler Type on the Properties of Foam Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **28**, 475-480. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001>
- [13] Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K. (2006) Models Relating Mixture Composition to the Density and Strength of Foam Concrete Using Response Surface Methodology. *Cement and Concrete Composites*, **28**, 752-760. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.06.001>
- [14] Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K. (2007) Sorption Characteristics of Foam Concrete. *Cement and Concrete Research*, **37**, 1341-1347. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.010>
- [15] Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K. (2008) Models for Strength Prediction of Foam Concrete. *Materials and Structures*, **41**, 247-254. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9234-0>
- [16] 张磊蕾. 泡沫混凝土的组成与性能、微结构的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2011.
- [17] 张磊蕾, 王武祥. 水料比对泡沫混凝土孔结构和性能的影响研究[J]. 建材技术与应用, 2011(5): 1-3.
- [18] 张旭, 王武祥. 超轻泡沫混凝土孔结构和抗压强度的相关性研究[J]. 墙材革新与建筑节能, 2019, 243(2): 21-25.
- [19] 张旭, 王武祥, 杨鼎宜, 等. 泡沫混凝土孔结构特征及其影响因素研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(7): 63-68.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org