

DOI: 10.7672/sgjs2026100145

多因素影响下泡沫混凝土收缩开裂试验研究*

商怀玺¹, 孙振鹏², 陈焕斌², 王 聪², 张传民²

(1. 宁津房开建设投资有限公司, 山东 德州 253400;

2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

[摘要] 通过选取不同的养护温度、湿度、水灰比, 制定 6 种养护条件, 测量泡沫混凝土试块的收缩变形、最大裂缝宽度, 并记录开裂时间。对比各组试验结果, 分析养护温度、湿度及水灰比对泡沫混凝土收缩和抗裂性能的影响, 研究影响泡沫混凝土干燥收缩的 3 个因素的主次顺序。结果表明: 温度是影响泡沫混凝土收缩的最主要因素, 其次为水灰比, 最后为湿度, 且 3 种因素的两两交互作用不明显。提出分级策略: $25^{\circ}\text{C} + \text{RH} \geq 75\% + \text{水灰比} 0.4$ 组合可实现收缩率 $\leq 1\ 600 \times 10^{-6}$ 与开裂时间 $\geq 70.8\text{h}$ 的协同优化; 温带干燥区推荐 $40^{\circ}\text{C} + \text{RH} = 60\% + \text{水灰比} 0.4$ 的平衡方案。

[关键词] 泡沫混凝土; 水灰比; 干燥收缩; 开裂; 养护; 耦合效应

[中图分类号] TU755

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0145-06

Experimental Study on Shrinkage Cracking of Foam Concrete Under the Influence of Multiple Factors

SHANG Huaixi¹, SUN Zhenpeng², CHEN Huanbin², WANG Cong², ZHANG Chuanmin²

(1. Ningjin Real Estate Development Investment & Construction Co., Ltd., Dezhou, Shandong 253400, China;

2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: Different curing temperature, humidity and water-cement ratio were selected to formulate 6 kinds of curing conditions. The shrinkage deformation and maximum crack width of foam concrete test block were measured, and the cracking time was recorded. By comparing the test results of each group, the effects of curing temperature, humidity and water-cement ratio on the shrinkage and crack resistance of foamed concrete were analyzed, and the primary and secondary order of the three factors affecting the drying shrinkage of foamed concrete was studied. The results show that temperature is the most important factor affecting the shrinkage of foamed concrete, followed by water-cement ratio, and finally humidity, and the interaction of the three factors is not obvious. A grading strategy was proposed: $25^{\circ}\text{C} + \text{RH} \geq 75\% + \text{water-cement ratio } 0.4$ can achieve synergistic optimization of shrinkage rate $\leq 1\ 600 \times 10^{-6}$ and cracking time $\geq 70.8\text{h}$. The balance scheme of $40^{\circ}\text{C} + \text{RH} = 60\% + \text{water-cement ratio } 0.4$ is recommended for the temperate dry zone.

Keywords: foam concrete; water-cement ratio; drying shrinkage; cracking; curing; coupling effect

0 引言

泡沫混凝土与传统混凝土材料相比具有质轻、保温、抗震、自流平等优良性能^[1-3], 适用于道路^[4]、隧道填充^[5]、地下室外墙回填^[6]、墙体保温隔热等工程。另一方面, 泡沫混凝土存在收缩大、易开裂、强度低、吸水率高等问题^[7-12], 由于泡沫混凝土的抗

裂性能差, 会导致构件中出现裂缝, 这些裂纹会随时间发展成较宽的贯穿裂缝, 从而影响整个结构的功能、缩短使用寿命。因此, 对泡沫混凝土收缩、开裂的研究很有必要。

关于控制泡沫混凝土的收缩开裂, 学者们进行了不同角度的研究。邓均等^[13]研究了聚乙烯醇纤维的长度、掺量对泡沫混凝土收缩的影响, 试验表明聚乙烯醇可有效提高泡沫混凝土的抗裂性能, 并抑制泡沫混凝土的早期收缩。詹炳根等^[14]研究了

* 陕西省科技厅重点研发计划(2025SF-YBXM-138)

[作者简介] 商怀玺, 副高级工程师, E-mail: 70851008@qq.com

[收稿日期] 2025-10-21

混杂纤维的掺量、长度对泡沫混凝土裂缝的影响,试验表明加入纤维能控制裂缝的扩展,延长泡沫混凝土的脆性破坏。马一平等^[15]研究了表观密度对混凝土收缩开裂的影响,发现表观密度低的泡沫混凝土孔隙率大,水分蒸发快,抗收缩变形能力差,所以收缩率大,且泡沫混凝土的干燥收缩率随表观密度的降低呈线性提高。徐徐等^[16]研究了聚苯乙烯颗粒对泡沫混凝土强度和收缩性能的影响,研究表明泡沫影响混凝土的收缩,复掺 EPS 颗粒可降低泡沫混凝土的表观密度,在同等密度条件下,抗压强度比单掺泡沫更高。Yavuz 等^[17]研究了废大理石粉(WMP)和磨砂高炉矿渣(GGBFS)对泡沫混凝土干燥收缩性能的影响,结果表明 WMP 作为细骨料加入减少了泡沫混凝土在干燥时间内的干燥收缩,用 GGBFS 替代水泥增加了收缩率,添加玄武岩纤维(BF)降低了所有混合物的收缩率。

目前对于控制泡沫混凝土收缩开裂的问题,多见于对外加剂、材料配合比、纤维等的研究。基于此,本试验制定 6 种养护制度,选取 2 种水灰比,得到泡沫混凝土在不同养护条件、水灰比下的收缩开裂性能,旨在系统总结温度、湿度及水灰比对泡沫混凝土收缩开裂的影响,为泡沫混凝土的填充及施工提供理论指导。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,其物理性能指标如表 1 所示。I 级粉煤灰主要化学组成如表 2 所示。拌合物用水采用实验室用自来水。1m³ 泡沫混凝土基准配合比如表 3 所示。

表 1 水泥物理性能指标

Table 1 Physical performance index of cement								
初凝时 间/min	终凝时 间/min	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
			3d	7d	28d	3d	7d	28d
70	242	1 137	18.5	28.0	47.0	3.6	5.1	7.3

表 2 粉煤灰主要化学组成

Table 2 Main chemical composition of fly ash							
成分	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	烧失量
含量/%	0.66	1.09	3.53	4.04	30.37	50.76	3.32

表 3 泡沫混凝土基准配合比

Table 3 Base mix ratio of foam concrete					
序号	水灰比	粉煤灰/ kg	水泥/ kg	水/kg	HTFC 矿物 掺合料/kg
1	0.4	202	552	368	166
2	0.5	202	552	460	166

1.2 试验方案

为了正确反映泡沫混凝土在工程中的工作状

况,该试验选取 6 种温度、相对湿度(RH)养护条件,如表 4 所示。

表 4 泡沫混凝土养护条件

Table 4 Curing conditions of foam concrete	
组号	养护条件
1	温度(25±1)℃,RH=75%±5%
2	温度(25±1)℃,RH=15%±5%
3	温度(45±1)℃,RH=75%±5%
4	温度(45±1)℃,RH=15%±5%
5	温度(65±1)℃,RH=75%±5%
6	温度(65±1)℃,RH=15%±5%

水灰比作为调控泡沫混凝土收缩开裂的关键参数,其取值需平衡材料工作性与结构稳定性。当水灰比低于常规阈值 0.45~0.6^[18]时,体系内自由水不足将制约水泥充分水化,同时引发固相组分争夺泡沫膜壁水分,致使初凝阶段气泡结构失稳破裂,最终削弱混凝土强度。反之,过高的水灰比则易引发浆料离析,同样不利于材料强度发展。基于此双效作用机制,本研究突破常规下限设置 0.4,0.5 两梯度参数,通过对比分析探究水灰比阈值效应及其对开裂行为的调控规律。

1.3 测试方法

干燥收缩试验采用 40mm×40mm×160mm 的三联模,24h 后时拆除外模,将试件置于恒温、恒湿的养护箱内养护至试验要求的时间后,使用比长仪测量收缩值并计算收缩率。

早期开裂测试采用椭圆模具(内尺寸为 210mm×90mm×45mm,外尺寸 250mm×130mm×45mm),成型后在(25±1)℃,RH=75%±5%的养护室中养护 18h,脱去外模。采用 100 倍带光源读数显微镜观测泡沫混凝土椭圆环的裂缝宽度。

2 试验结果与讨论

2.1 不同养护制度对泡沫混凝土干燥收缩的影响

2.1.1 泡沫混凝土干燥收缩试验数据

使用比长仪记录泡沫混凝土 28d 龄期内的收缩变形数据,如表 5 所示。

2.1.2 各因素对泡沫混凝土干燥收缩影响的方差分析

用数学统计软件 SPSS (statistical product and service solutions)对试验数据进行多因素方差分析,结果如表 6 所示。

由表 6 可知,对于影响泡沫混凝土收缩率的 3 种因素中,温度的离均方差和为 58 129.167,大于其他因素,同时对应的 F 值也最大,显著性 Sig 最小,可知温度对泡沫混凝土干燥收缩影响最大,其次为水灰比,最后为湿度。从 3 种因素之间的两两交互

表 5 不同养护环境下的干燥收缩率

Table 5 Drying shrinkage in different curing environments

组号	水灰比	试件各龄期收缩率(×10 ⁻⁶)					
		3d	5d	7d	14d	21d	28d
1	0.4	521	1 014	1 208	1 391	1 492	1 588
	0.5	547	1 065	1 225	1 415	1 556	1 607
2	0.4	601	1 075	1 248	1 450	1 585	1 633
	0.5	679	1 132	1 350	1 587	1 788	1 833
3	0.4	624	1 080	1 325	1 543	1 680	1 740
	0.5	650	1 195	1 380	1 576	1 725	1 794
4	0.4	605	1 125	1 330	1 510	1 664	1 712
	0.5	691	1 205	1 420	1 630	1 785	1 860
5	0.4	730	1 316	1 605	1 745	1 789	1 807
	0.5	750	1 378	1 680	1 793	1 830	1 850
6	0.4	760	1 446	1 638	1 685	1 743	1 778
	0.5	870	1 524	1 730	1 784	1 827	1 896

分析可以看出,显著性最小的是湿度×水灰比, Sig 值大于 0.05,因此 3 种因素的两两交互作用不明显。

2.1.3 温度与水灰比对泡沫混凝土干燥收缩的影响

建立温度与水灰比对泡沫混凝土干燥收缩的定量关系,如图 1 所示。温度梯度与泡沫混凝土收缩率呈显著正相关,其作用机制主要源于高温加速水分迁移引发的毛细管应力增大及水化产物重构效应。值得注意的是,湿度调控会显著改变水灰比的收缩敏感性,在 RH = 75%的条件下,水灰比 0.4、0.5 试件的收缩时程曲线基本一致(最终收缩率差异<5%),这可能是由于适度环境湿度补偿了配合比差异造成的水分势能梯度;而在 RH = 15%的干燥工况下,水灰比每降低 0.1 单位可减少约 7%的收缩应变,验证了低水灰比通过优化孔隙结构(孔径分布集中度提升 5.7%)抑制失水变形的有效性。该现象符合毛细管张力理论,即干燥环境中低水灰比体系通过提高水化产物分布密度^[19]及界面过渡区强化,显著降低孔溶液蒸发引发的收缩驱动力。

2.1.4 湿度对泡沫混凝土干燥收缩的影响

不同养护湿度下泡沫混凝土的干燥收缩率如图 2 所示。由图 2 可知,各组泡沫混凝土在低湿度条件下的收缩更大,提高养护环境湿度,能控制泡

沫混凝土水分的散失速率,进而降低干燥收缩率。另外,温度不同时,由湿度差异造成的干燥收缩有所区别。温度为 25℃时,RH = 15%与 RH = 75%下的收缩率差值较大,为 96×10⁻⁶;温度为 65℃时,不同湿度下的泡沫混凝土收缩率差值为 66×10⁻⁶。

2.2 不同养护制度对泡沫混凝土早期开裂的影响

2.2.1 泡沫混凝土早期开裂试验数据

6 种养护制度下的泡沫混凝土初始开裂时间如表 7 所示。

表 7 不同养护环境下初始开裂时间

Table 7 Initial cracking time under different curing environments

组号	水灰比	
	0.4	0.5
1	70.8	68.3
2	45.3	41.7
3	48.2	46.5
4	16.4	11.3
5	39.8	35.7
6	8.3	7.2

2.2.2 温度与湿度对泡沫混凝土早期开裂的影响

由表 7 可知,泡沫混凝土初始开裂时间随温度的升高而缩短,初始开裂时间最长为 70.8h。环境温度的升高显著加剧了泡沫混凝土的开裂敏感性。具体而言,高温加速了材料的早期水化进程并增大了体积收缩,从而诱发裂缝提前萌生。此外,环境湿度亦是影响其初始开裂时间的关键因素。在同一温度条件下,湿度不同造成的初始开裂时间差距最大达 35h。随着湿度的下降,泡沫混凝土的初始开裂时间减小。

2.2.3 水灰比对泡沫混凝土早期开裂的影响

对比两组水灰比的试验结果发现:水灰比不同造成初始开裂时间的变化。水灰比为 0.4 时,初始开裂时间较长;水灰比增大为 0.5 时,初始开裂时间缩短 1~5h。说明水灰比增大会使泡沫混凝土拌合物凝结时间延长,进而导致泡沫混凝土抵抗塑性收缩的力产生时间延长,导致抵抗塑性收缩的力减弱,易产生裂缝。

表 6 各因素对泡沫混凝土 28d 收缩率影响方差分析

Table 6 Analysis of variance on the influence of various factors on the 28d shrinkage rate of foam concrete

方差来源	离均方差和	自由度	均方差	F	显著性 Sig
温度	58 129.167	1	29 064.583	36.395 0	0.027
湿度	28 856.33	1	8 856.33	31.090 0	0.030
水灰比	28 227.000	1	28 227.000	35.346 0	0.027
温度×湿度	9 937.167	2	4 960.583	6.222 2	0.138
湿度×水灰比	10 208.333	1	10 208.333	12.783 0	0.070
温度×水灰比	444.500	2	222.250	0.278 0	0.782

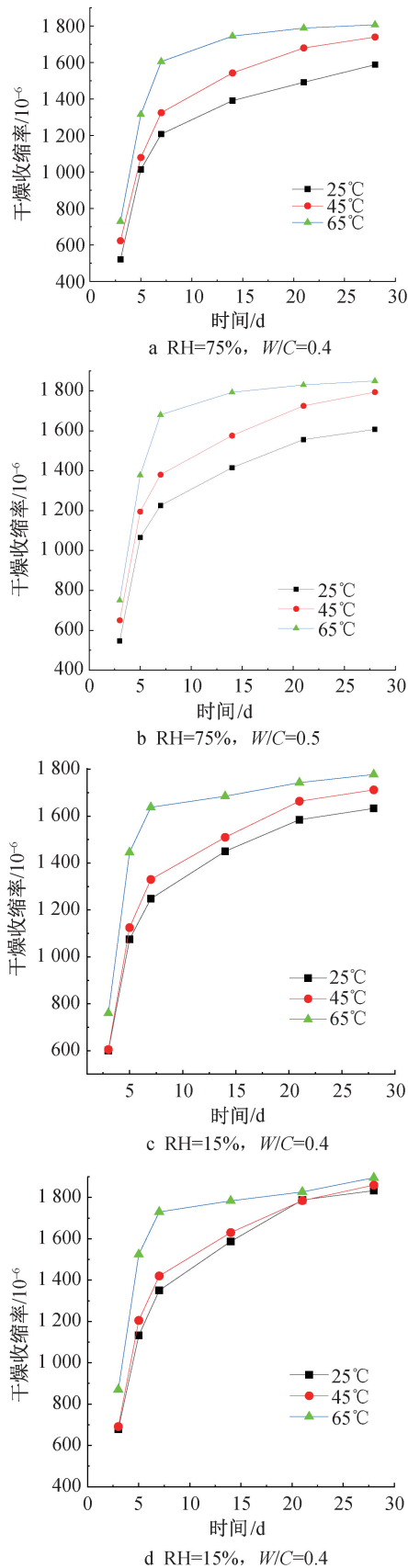


图 1 不同养护温度下泡沫混凝土的干燥收缩率
Fig. 1 Drying shrinkage rate of foam concrete under different curing temperatures

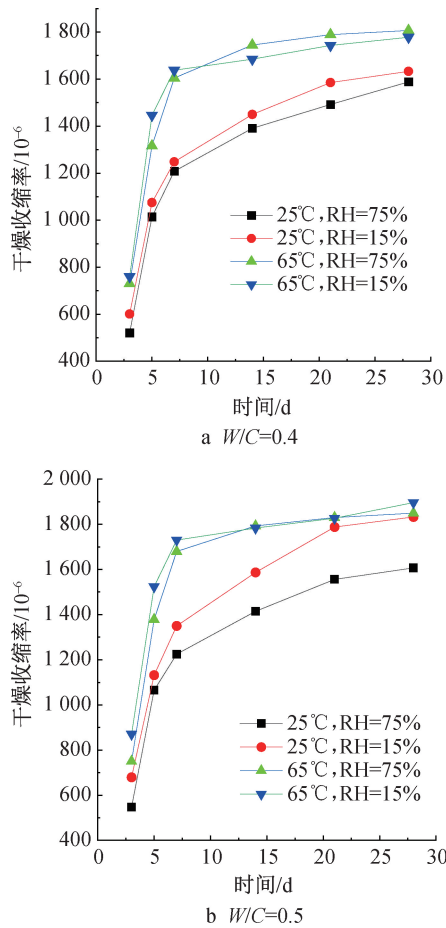


图 2 不同养护湿度下泡沫混凝土的干燥收缩率
Fig. 2 Drying shrinkage rate of foam concrete under different curing humidity

2.2.4 温度与湿度对泡沫混凝土最大裂缝宽度的影响

不同养护环境下泡沫混凝土最大裂缝宽度如图 3 所示。由图 3 可知,随着温度升高,泡沫混凝土最大裂缝宽度增大。 $RH=75\%$ 、温度为 $25\sim 65^{\circ}\text{C}$ 时,最大裂缝宽度随温度近似线性增加。增大环境湿度,裂缝宽度进一步扩展。温度为 65°C ,相对湿度 75% 时,最大裂缝宽度达到最不利情况,为 3.3mm 。

3 交互作用分析

试验数据表明,水灰比与养护条件存在显著的交互作用,共同影响泡沫混凝土的干燥收缩与早期开裂行为。

3.1 水灰比与养护条件的耦合效应分析

温度与水灰比的协同效应表现为:在 65°C 高温环境下,水灰比从 0.4 增至 0.5 可使 28d 收缩率平均提升 9.2% ,而 25°C 低温条件下同等水灰比变化仅引起 1.2% 差异。这是由于高温加速孔溶液迁移,高水灰比试件的开放孔隙结构加剧了毛细管应

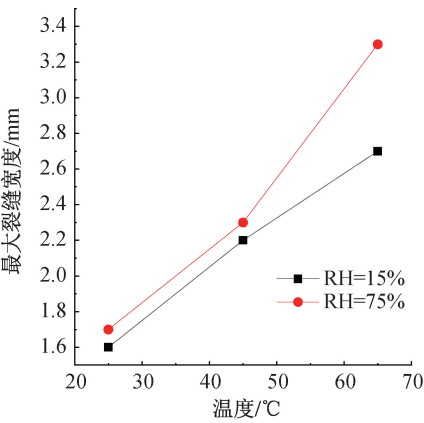


图3 不同养护环境下泡沫混凝土最大裂缝宽度

Fig. 3 Maximum crack width of foam concrete under different curing environments

力效应。湿度则显著调控水灰比的收缩敏感性:在RH=15%低湿度环境中,水灰比每降低0.1可减少7%收缩应变;而在RH=75%高湿度条件下,不同水灰比试件的收缩率差异<5%,表明适度湿度可补偿配合比差异引发的水分势能梯度。

温度-湿度-水灰比3个因素共同控制开裂进程:温度为65℃,RH=15%低湿度环境为最不利工况,水灰比为0.5试件的开裂时间仅7.2h,最大裂缝宽度达3.3mm;当温度>45℃时,水灰比每增加0.1导致开裂时间缩短10%~15%,而在25℃时该影响减弱至3.5%,此现象归因于高温加速水化放热与水分蒸发,叠加高水灰比导致的界面过渡区弱化,显著降低材料抵抗收缩应力的能力。

3.2 最优组合条件分析

基于收缩与开裂协同优化目标的分级控制策略研究表明:当采用25℃+RH≥75%+水灰比0.4组合时,既可实现收缩最小化(28d收缩率≤1 600×10⁻⁶),又能达成最优抗裂性能;对于温带季节性干燥气候区,推荐工程平衡方案为40℃+RH=60%+水灰比0.4,在可接受范围内控制收缩率≈1 700×10⁻⁶的同时维持开裂时间≥16.4h,兼顾材料性能与地域环境适配性。

3.3 工程应用建议

在干旱高温地区,建议采用水灰比0.4并实施覆盖保水养护,以抑制毛细管应力引发的收缩变形及早期开裂风险;对于高湿温和地区,可放宽至水灰比0.5以改善施工和易性,此时湿度补偿效应可消除水灰比差异影响。关键控制阈值为:当温度超过45℃时,应强限制定水灰比≤0.4;若RH低于40%,则须采取外部保湿措施。通过上述策略优化孔隙结构与界面过渡区,最终实现材料服役性能的

协同提升。

4 结语

1)随着温度的升高,泡沫混凝土28d干燥收缩增大。随着相对湿度的降低,泡沫混凝土的干燥收缩不断增长,且低湿度条件比高湿度条件下的收缩明显要大;随着养护温度和水灰比的提高,湿度的差异对泡沫混凝土干燥收缩产生的影响减弱。

2)湿度的降低和温度的升高会引起泡沫混凝土开裂时间提前,最大裂缝宽度增大。水灰比对泡沫混凝土开裂具有较大影响,水灰比减小,泡沫混凝土的开裂性提高。

3)水灰比与养护制度的交互作用显著影响泡沫混凝土服役性能。通过控制温度≤25℃、湿度≥75%、水灰比0.4的组合,可实现收缩与开裂双控目标;高温干燥工况下水灰比0.4为刚性需求,其通过增强水化产物密度与界面过渡区,降低失水变形驱动力。

参考文献:

[1] 田国鑫,黄俊. 浅谈国内外泡沫混凝土的发展与应用[J]. 混凝土,2017(3):124-128.
TIAN G X, HUANG J. Discussion on the development and application of foamed concrete[J]. Concrete, 2017(3):124-128.

[2] 宋国林,王在杭,于咏妍. 泡沫混凝土材料的研究与应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(5):56-58.
SONG G L, WANG Z H, YU Y Y. Research and application of foamed concrete materials [J]. Journal of highway and transportation research and development (application technology edition), 2019, 15(5):56-58.

[3] 侯明显,朱先昌,李国青,等. 泡沫混凝土的研究与应用概述[J]. 硅酸盐通报,2019,38(2):410-416.
HOU M Y, ZHU X C, LI G Q, et al. Review on the research and application of foam concrete[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(2):410-416.

[4] 黄朝良. 泡沫混凝土在道路工程中的应用研究[J]. 福建建筑,2021(3):100-104.
HUANG C L. Research on application of foam concrete in road engineering[J]. Fujian architecture & construction, 2021(3):100-104.

[5] 赵武胜,陈卫忠,谭贤君,等. 高性能泡沫混凝土隧道隔震材料研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(8):1544-1552.
ZHAO W S, CHEN W Z, TAN X J, et al. High-performance foam concrete for seismic-isolation materials of tunnels [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(8):1544-1552.

[6] 高健. 地下室侧壁回填材料比选研究——以湖州市长兴县太湖古镇某高层酒店项目为例[J]. 建筑科技, 2024, 8(3):58-62.
GAO J. Research on basement sidewall backfill material comparison and selection—an example of a high-rise hotel project in Taihu Ancient Town, Changxing County, Huzhou City [J]. Building technology, 2024, 8(3):58-62.

[7]

周利睿,耿飞,林辉,等. 细砂对泡沫混凝土物理力学性能及孔结构的影响[J]. 建筑节能,2018,46(5):135-138,145.
ZHOU L R,GENG F,LIN H,et al. Effect of fine sand on strength and pore structure of foam concrete [J]. Building energy efficiency,2018,46(5):135-138,145.

[8]

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):836-839,846.
CUI Y L,HE H Z. Influence of temperature on performances of foam concrete[J]. Journal of building materials,2015,18(5):836-839,846.

[9]

杨之璋,詹炳根. 外加剂对泡沫混凝土早期收缩开裂的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(9):1234-1239.
YANG Z Z,ZHAN B G. Effect of admixture on early shrinkage cracking of foam concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science),2020,43(9):1234-1239.

[10]

吴森宝,宗琦,王军国,等. 低温下泡沫混凝土的动态力学性能[J]. 硅酸盐通报,2022,41(1):76-87.
WU S B,ZONG Q,WANG J G,et al. Dynamic mechanical properties of foamed concrete at low temperature[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2022,41(1):76-87.

[11]

张鑫. 浅谈外加剂和配合比对泡沫混凝土降低吸水率的影响[J]. 建材发展导向,2021,19(24):73-75.
ZHANG X. Discussion on the influence of admixture and mixing ratio on reducing water absorption of foam concrete [J]. Development guide to building materials,2021,19(24):73-75.

[12]

龚建清,周孜豪. 纤维和外加剂对泡沫混凝土收缩性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(5):76-85.
GONG J Q,ZHOU Z H. Effects of fiber and admixture on shrinkage performance of foamed concrete[J]. Journal of Hunan University (natural sciences),2019,46(5):76-85.

[13]

邓均,霍冀川,宋言红,等. 聚乙烯醇纤维泡沫混凝土的性能试验[J]. 混凝土与水泥制品,2012(2):41-44.
DENG J,HUO J C,SONG Y H,et al. Properties experimeilt on foamed concrete with polyvinyl alcohol fibre[J]. China concrete and cement products,2012(2):41-44.

[14]

詹炳根,李建勋,林涛. 混杂纤维对泡沫混凝土收缩开裂的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(3):400-405.
ZHAN B G,LI J X,LIN T. Effect of hybrid fiber on shrinkage cracking of foam concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science),2020,43(3):400-405.

[15]

马一平,李国友,杨利香,等. 表观密度和聚丙烯纤维对泡沫混凝土收缩开裂的影响[J]. 材料导报,2012,26(6):121-125.
MA Y P,LI G Y,YANG L X,et al. Effect of the apparent density and polypropylene fiber on drying shrinkage cracking properties of foam concrete[J]. Materials review,2012,26(6):121-125.

[16]

徐徐,徐怡,蒋林华. 聚苯乙烯改性泡沫混凝土的强度和收缩性能研究[J]. 混凝土,2020(1):69-73,77.
XU X,XU Y,JIANG L H. Study on strength and shrinkage of EPS modified foam concrete[J]. Concrete,2020(1):69-73,77.

[17]

YAVUZ BAYRAKTAR O,KAPLAN G,GENCEL O,et al. Physico-mechanical,durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag [J]. Construction and building materials,2021,288:123128.

[18]

宋强,张鹏,鲍玖文,等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J]. 硅酸盐学报,2021,49(2):398-410.
SONG Q,ZHANG P,BAO J W,et al. Research progress and application of foam concrete[J]. Journal of the Chinese ceramic society,2021,49(2):398-410.

[19]

丰土根,杨航,张箭. 水灰比对泡沫混凝土性能的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2024,41(2):1-6.
FENG T G,YANG H,ZHANG J. Study on the effect of water/cement ratio on the performance of foamed concrete[J]. Journal of Hebei University of Engineering (natural science edition),2024,41(2):1-6.

(上接第 102 页)

[7]

刘宗彬,黄均,白旭辉,等. 城市轨道交通工程施工噪声影响分析及降噪管理措施研究[J]. 工程管理学报,2024,38(3):76-81.
LIU Z B,HUANG J,BAI X H,et al. Research on construction noise monitoring and noise reduction measures of urban rail transit projects[J]. Journal of engineering management,2024,38(3):76-81.

[8]

张振华,白永厚,郭春,等. 钻爆法施工隧道噪声传播特性研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(6):821-826.
ZHANG Z H,BAI Y H,GUO C,et al. Noise propagation characteristics of tunnel construction by drilling and blasting method[J]. Tunnel construction,2020,40(6):821-826.

[9]

电子工业部第三研究所,中国科学院声学研究所,北京大学,等. 声学 户外声传播的衰减第 2 部分:一般计算方法:GB/T 17247.2—1998[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
The Third Research Institute of the Ministry of Electronic Industry, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Peking University, et al. Acoustic attenuation of outdoor sound propagation Part 2: general calculation method: GB / T 17247.2—1998 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1998.

[10]

中国环境科学研究院,北京市环境保护监测中心,广州市环境监测中心站. 声环境质量标准:GB 3096—2008[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing Environmental Protection Monitoring Center, Guangzhou Environmental Monitoring Center Station. Acoustic environmental quality standard: GB 3096—2008 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.

[11]

黄文强. 智能监测系统在建筑施工噪声与污染控制中的作用研究[J]. 绿色建造与智能建筑,2024(10):56-58,82.
HUANG W Q. Research on the role of intelligent monitoring system in controlling construction noise and pollution[J]. Green construction and intelligent building,2024(10):56-58,82.