

泡沫混凝土复合墙板抗冻性研究综述

牛思稳, 孙洪军

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年1月20日; 录用日期: 2025年2月19日; 发布日期: 2025年2月27日

摘要

泡沫混凝土(foam concrete, FC)与传统混凝土相比具备优良的保温隔热、隔音、耐火及抗震性能, 同时显著降低了建筑自重, 更契合现代建筑绿色发展理念。夹芯保温墙板在长期经历昼夜温差变化、冷热交替和冻融循环后会改变保温材料内部结构, 使其粘结强度逐渐下降, 导致保温层与结构层之间的粘结不牢固, 从而引发空鼓和脱落等质量问题, 因此对夹芯保温墙板进行抗冻性能的研究非常有必要。

关键词

夹芯复合墙板, 抗冻性能, 泡沫混凝土

A Review of the Frost Resistance of Foam Concrete Composite Wallboards

Siwen Niu, Hongjun Sun

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Jan. 20th, 2025; accepted: Feb. 19th, 2025; published: Feb. 27th, 2025

Abstract

Compared with traditional concrete, foam concrete (FC) has excellent thermal insulation, sound insulation, fire resistance and seismic resistance, and at the same time significantly reduces the weight of the building, which is more in line with the green development concept of modern buildings. After experiencing the temperature difference between day and night, alternating between cold and hot and freeze-thaw cycles for a long time, the internal structure of the insulation material will be changed, and the bonding strength will gradually decrease, resulting in the infirm bond between the insulation layer and the structural layer, which will cause quality problems such as hollowing and falling off, so it is very necessary to study the frost resistance of the sandwich insulation wallboard.

Keywords

Sandwich Composite Wallboard, Frost Resistance Performance, Foam Concrete

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

我国建筑运行能耗中采暖、空调和照明三大领域占比最大,达 50% [1],围护结构的热损失是导致能源浪费的关键原因。其中,墙体的传热损失约占建筑总热损失的 60%~70%。据统计,在住宅建筑中,通过围护结构的传热量占使用能耗的 70%~80%,外墙面积占总围护结构面积的 66%左右,而外墙热损失占围护结构总能耗的 48% [2]。此外,墙体材料在建筑材料的总量中占比高达 70% [3],在实施墙体节能的同时,传统混凝土外墙外保温或内保温做法已无法满足节能设计的要求,必须探索研究新型装配式混凝土墙板来满足新时期建筑节能的要求。

装配式复合夹芯墙板是在中间填充保温层,由连接件连接内外两侧混凝土面层组成,是一种集保温、隔声和承重能力为一体的整体保温墙板[4]。其应用初衷是通过结合保温性能优良的材料与混凝土的高强度特性,实现建筑围护结构的保温隔热功能,同时兼具承重与结构稳定性。这种设计有效解决了传统建筑材料中保温与结构性能分离的问题,极大地提高了建筑的整体热工性能。这类墙板在西方发达国家已有超过 50 年的使用历史,被广泛应用于学校、住宅、办公楼、工业厂房、医院建筑和温室等多种建筑类型中[5]。我国预制混凝土技术经历了从初期构件体系的建立到全装配时代,再到住宅建筑领域的衰退和土木工程快速发展。近年来,随着市场需求的提升,大型预应力混凝土构件和新型装配式结构体系的研究逐渐深入。然而,与国际先进水平相比,我国在理论与应用方面仍存在明显差距,亟需进一步发展和完善[6]。

2. GFRP 连接件

连接件在夹芯墙板中是内外叶混凝土墙板及保温材料形成整体的核心构件[7]。连接件的主要功能包括增强结构性能和优化热工性能。特别是在现代节能建筑中,连接件不仅要满足墙板的力学要求,还要有效减少热桥效应,以提高整体的能效水平。在结构性能方面,连接件与内外叶墙板的协同作用增强了墙板的抗拉、抗剪和抗弯能力[8],从而保证了墙体在外力作用下的安全性和稳定性。因此,选择合适的连接件对于提升夹芯墙板的综合性能至关重要。

目前,常见的夹芯墙板连接件根据材质和应用方式的不同,主要分为金属连接件和纤维增强复合材料(FRP)连接件。金属连接件包括普通钢筋连接件和不锈钢连接件。普通钢筋连接件成本低、施工方便、结构强度较高,适用于一般荷载要求的墙体。然而,这类连接件常常会破坏保温层的整体性,容易在连接区域形成热桥,从而导致墙板的保温效果明显下降[9]。相比之下,不锈钢连接件具有更好的抗腐蚀性和耐久性,能够提高抗剪性能,但由于其较高的导热性,仍然可能影响墙板的热工性能[10]。与金属连接件不同,纤维增强复合材料(FRP)连接件尤其是玻璃纤维增强复合材料(GFRP)连接件,由于其低导热系数、强度高、耐腐蚀等优势,近年来逐渐成为研究的重点[11],材料特性如表 1 所示。GFRP 连接件能够满足墙板的结构强度要求,并有效减少热桥效应,为现代节能建筑提供了一个优质的解决方案。

Table 1. Material properties
表 1. 材料特性

材料种类	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
增强材料	玻璃纤维	碳纤维	芳纶纤维	玄武岩纤维
密度(g/cm ³)	1.25~2.10	1.50~1.60	1.25~1.40	1.90~2.10
热膨胀系数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	纵向 6.0~10.0	-9.9~0.0	-6~-2	9~12
	横向 21.0~23.0	74.0~104.0	0.0~80.0	21~22
抗拉强度(MPa)	483~690	600~3690	1720~2540	≥ 1000
弹性模量(GPa)	35~51	120~580	41~125	40~45

目前, 国内外对用于 GFRP 连接件的夹芯墙板力学性能和耐久性进行了广泛研究, 研究结果表明连接件的选型与布置在很大程度上决定了墙体的力学性能和热工性能, 其优化设计对提高预制墙体的综合性能具有重要意义。

2.1. GFRP 连接件的形状



Figure 1. Thermomass MS/MC connector
图 1. Thermomass MS/MC 连接件

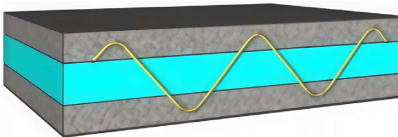


Figure 2. Aslan 700 FRP Nu-Tie connector
图 2. Aslan 700 FRP Nu-Tie 连接件

近年来, GFRP 连接件的形状和结构设计成为了研究的热点, 经典的连接件形状如图 1、图 2 所示。不同的形状能够显著影响夹芯墙板的力学性能与热工性能。He Z 等[12]提出的新型工字形 GFRP 连接件, 通过在两端预留孔道实现钢筋锚固, 其特点是具有高刚度和低导热性能, 尤其适用于厚保温层的被动式建筑。这种设计结合了结构强度与节能特性的需求, 针对需要承载高荷载且保温要求严格的墙板。然而, 与 Huang JQ 等[13]研究的波纹板和六角管连接件相比, 工字形连接件的变形能力受到一定限制。波纹板因其特殊几何形状表现出优异的变形能力, 特别是在 GFRP 层压板较薄的情况下, 波纹板的性能优势更加明显。而六角管连接件则在双向连接中的力学表现突出, 适用于需要双向力传递的墙板。因此, 工字形连接件更适合单向力传递和高保温性能需求的场景, 而波纹板和六角管连接件则更偏向于多向受力或结构变形需求较高的应用场景。Kim J 等[14]对网格 GFRP 连接件进行了研究, 发现网格连接件能够显著提高夹芯墙板的抗弯强度, 并增强墙板的剪切性能。对比而言, 网格连接件的复合作用更明显, 能够在墙板中提供更高的强度和稳定性。

进一步的试验研究中, Cox B 等[15]提出了星形 GFRP 连接件, 研究了不同保温层厚度、混凝土抗压强度对抗剪性能的影响。结果表明, 增加保温层的厚度有助于提升剪切性能, 尤其是在具有较厚保温层的墙板中, 剪切性能比无保温层的墙板提高了 17%, 这一结果表明, 星形连接件更适用于保温需求较高

的墙板设计中。另一方面, 刘卉等[16]提出的 W 型 GFRP 连接件在抗剪和抗弯能力方面表现突出, 其锚固能力和直锚性能与钢筋连接件相当, 但在重量和热工性能上具有优势, 适用于高强度、轻量化和低导热需求的墙板结构。

失效模式是评估连接件性能的重要指标。Woltman GD 等[17]的研究表明, 不同直径的 GFRP 连接件在夹芯墙板中的抗剪性能表现优异, 相较于聚丙烯连接件, GFRP 连接件具有更高的强度, 但延性较低, 如图 3 所示。研究发现, GFRP 连接件的失效模式呈现渐进性, 失效主要发生在较大的位移范围内, 并表现为逐步破坏。

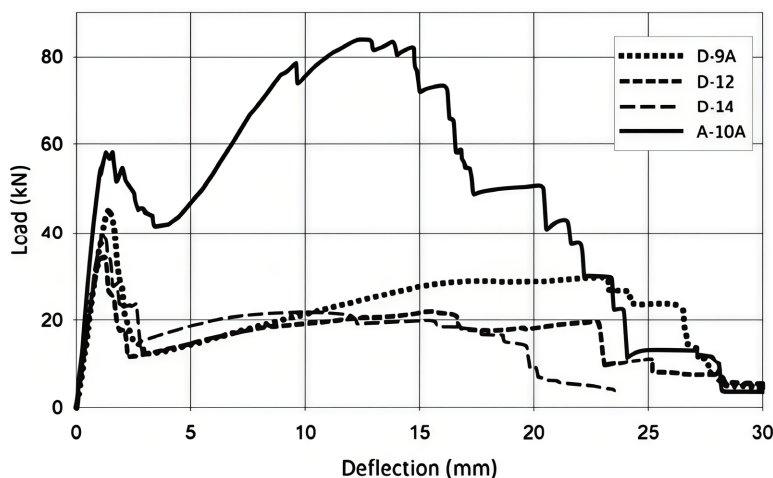


Figure 3. Comparison of test results of polypropylene connectors with different diameters and GFRP connectors [17]
图 3. 不同直径的聚丙烯连接件与 GFRP 连接件的试验结果对比[17]

2.2. GFRP 连接件的布置

连接件的布置对夹芯墙板的整体力学性能有着显著影响。Choi KB 等[18]研究了波纹 GFRP 剪切连接件与硬质泡沫隔热材料组合的面内剪切行为, 发现增加 GFRP 连接件的宽度可以有效提高试样的刚度和强度。当连接件宽度为 15 mm、嵌入长度为 30 mm 时, 试样在承受最大载荷后, 上部区域迅速发生分裂并表现出拉拔失效行为。这表明尽管增加连接件宽度能够提高承载能力, 但当嵌入长度不足时, 局部破坏模式仍可能导致连接件性能的局限性。Woltman G 等[19]则对比了 GFRP、钢筋连接件和聚合物连接件在夹芯墙板中的性能。研究表明, GFRP 连接件的抗剪强度介于 60 MPa 到 112 MPa 之间, 虽然其强度高于聚合物连接件, 但低于钢筋连接件。然而, 与钢筋连接件相比, GFRP 连接件的失效模式以纵向分层后的横向剪切断裂为主, 未发生拔出破坏, 展现出其良好的稳定性和适应性。此外, GFRP 连接件的尺寸、间距、截面形状和端部处理对其抗剪性能的影响相对较小, 但保温层厚度的增加却显著降低了连接件的力学性能。

Tomlinson D 等[20]研究了 GFRP 剪力连接件在预制混凝土保温夹芯墙板中的应用, 进行了四点弯曲试验。研究表明, 随着 GFRP 连接件配筋率的增加, 墙板的极限荷载从等效全复合板强度的 58% 提高到 80%。尽管 GFRP 连接件的嵌入长度较小, 但在实验过程中并未发生拔出破坏, 而是通过剪切断裂发生失效, 这进一步证明了 GFRP 连接件在实际应用中的优越性能。

综上所述, GFRP 连接件凭借其低导热系数、高强度和耐腐蚀等特性, 在夹芯墙板中的应用展现出了巨大的潜力。随着形状设计的不断优化, GFRP 连接件不仅能够提高墙板的结构性能, 还能有效减少热桥效应, 为节能建筑提供了理想的解决方案。未来, 进一步研究 GFRP 连接件的布置方式、失效模式和与

墙板的耦合作用, 将为提高预制墙体的综合性能和推动绿色建筑技术的应用提供有力支持。

3. FC 抗冻性能

泡沫混凝土在寒冷地区应用时, 由于其内部空隙较多, 吸水后容易发生冻胀和冻融现象。这会导致材料强度下降、裂缝产生与扩展、保温性能降低、耐久性减弱以及维护成本增加等问题[21]。为提高泡沫混凝土的保温和抗冻性能, 研究人员从多个方面进行了深入研究。

3.1. 水泥品种的影响

采用不同类型的水泥制备泡沫混凝土, 其冻融性能差异明显, 且这一差异不仅体现在强度损失率上, 还涉及孔隙结构、耐久性等方面。高志涵等[22]采用普通硅酸盐水泥制备了密度为 1000 kg/m^3 的泡沫混凝土。经 100 次冻融循环后, 孔隙率从 46.3% 增至 57.3%, 强度下降约 23.7%, 这一结果表明, 普通硅酸盐水泥制备的泡沫混凝土在面对冻融循环时, 表现出较大的强度损失, 且孔隙率的显著增加可能会导致其结构的脆化, 降低抗冻性能。相比之下, 郭雷等[23]利用硫铝酸盐水泥制备出干密度为 700 kg/m^3 、抗压强度 5.3 MPa 的泡沫混凝土, 其强度损失率仅为 2.06%, 硫铝酸盐水泥的化学成分和水化产物可能使其具有更强的抗冻能力, 尤其在低密度泡沫混凝土中, 能够有效减缓孔隙率的增大和强度的下降。利用工业废弃物如偏高岭土和粉煤灰与磷酸盐水泥结合, 不仅能够提高泡沫混凝土的抗冻性能, 还具有较好的环境友好性和资源利用价值。这种泡沫混凝土的良好表现归因于其在水化过程中形成的密实结构和强度较高的水化产物, 从而提高了其抗冻性。李崇智等[24]研究发现, 采用偏高岭土、粉煤灰与磷酸盐水泥制备的泡沫混凝土表现出优异抗冻性能, 强度保持系数达 0.86。Girts Bumanis 等[25]通过废黏土和铝盐渣制备地聚物胶凝材料制成的泡沫混凝土在 25 次冻融循环后, 强度损失率仅为 10%~16.7%, 地聚物泡沫混凝土在冻融环境下表现出较为稳定的抗冻性, 且地聚物作为水泥的替代品, 在减少水泥使用量的同时, 可能提供了比传统水泥更好的耐久性。地聚物的交联结构提高了材料的整体强度, 并减少了孔隙的数量和尺寸, 进而增强了其抗冻性能。

3.2. 发泡剂的影响

发泡剂类型在泡沫混凝土的抗冻性能中起着关键作用, 不同的发泡剂通过影响泡沫混凝土的孔隙结构和密度, 从而影响泡沫混凝土抗冻性。Qi Liu 等[26]使用阴离子表面活性剂(SDS)作为发泡剂, 制备了密度为 758 kg/m^3 的泡沫混凝土。经 30 次冻融循环后, 其抗压强度损失率达 68.85%, 质量损失为 1.9%, 这是因为 SDS 发泡剂形成的泡沫稳定性较差、孔隙较大, 导致泡沫混凝土在冻融循环过程中容易导致结构破坏和强度损失。相比之下, Chao Sun 等[27]研究了复合发泡剂(SS)、动物蛋白类发泡剂(AS)和植物蛋白类发泡剂(PS)的性能, 发现密度均为 600 kg/m^3 的泡沫混凝土中, SS 泡沫混凝土表现出最低的抗压强度损失率为 15.2%和质量损失率为 2.5%, 展现了优异的抗冻性能, 这是因为 SS 发泡剂能提供更均匀、更稳定的孔隙结构, 从而提高泡沫混凝土的抗冻性。相比之下, 动物蛋白类发泡剂(AS)和植物蛋白类发泡剂(PS)制备的泡沫混凝土表现略差, 尽管它们的抗冻性能优于 SDS, 但未能达到 SS 发泡剂的水平。此外, Sheng Li 等[28]研究表明, 随着双氧水比例的增加, 泡沫混凝土的干密度降低, 而孔结构得到优化。当双氧水含量为 5% 时, 孔形状因子最低, 表明孔隙结构更为稳定, 由于双氧水不仅降低了泡沫混凝土的密度, 还优化了其孔隙结构, 使其在冻融循环中表现出较为稳定的抗冻性能。Nadia Tebbal 等[29]则发现, 使用铝粉作为发泡剂会显著降低抗冻性能, 特别是当铝含量达到 7.5% 时, 冻融损伤加剧, 铝粉发泡剂在反应过程中会产生较大的气体量, 形成较大的孔隙, 这些大孔隙在冻融过程中容易引发材料的破裂和强度损失。虽然铝粉作为发泡剂有助于泡沫混凝土的轻质化, 但其对泡沫混凝土抗冻性能的负面影响不容忽视。

3.3. 掺合料的影响

掺合料的类型和比例在泡沫混凝土的抗冻性能中发挥着重要作用,不同类型的掺合料可以通过优化孔结构、改善水泥基体的性能、增强材料的抗裂性等途径,提高泡沫混凝土的抗冻性。Zhang Sulei 等[30]发现,适量粉煤灰的引入能够有效提升泡沫混凝土的抗冻性能。这是因为粉煤灰具有火山灰效应,能够与水泥中的水化产物反应,形成更致密的孔壁,从而改善材料的微观结构和密实性。通过引入适量的粉煤灰,可以增强泡沫混凝土的抗冻性能。然而,过量使用粉煤灰可能会导致水泥水化反应的不完全,形成较为松散的结构,反而降低抗冻性能。Bayraktar OY 等[31]的研究则关注了废轮胎橡胶掺合料对泡沫混凝土抗冻性能的影响。研究结果表明,掺入废轮胎橡胶的泡沫混凝土在冻融循环中表现出较好的抗冻性能。这主要得益于废轮胎橡胶的柔韧性和低密度特性,这些特性有助于缓解冻融循环中产生的微裂缝扩展。废轮胎橡胶的掺入能够增加材料的变形能力,吸收部分冻融循环中的应力,减缓微裂缝的形成和扩展。因此,废轮胎橡胶作为掺合料能够提高泡沫混凝土的抗冻性能,尤其适用于需要高韧性和耐久性的结构。Gencel O 等[32]研究发现随着稻壳灰和废大理石粉的掺入,泡沫混凝土的质量损失和强度损失率随取代量的增加而逐渐减小。这与稻壳灰的丰富硅铝矿物成分和废大理石粉的矿物质反应性有关,二者的联合使用能够改善泡沫混凝土的微观结构,增强水泥水化反应,提高材料的抗冻性能。孙赛炜等[33]指出,适量的偏高岭土掺量能够有效改善泡沫混凝土的抗冻性能。偏高岭土具有良好的矿物质组成,可以参与水泥的水化反应,形成密实的水化产物,从而提高泡沫混凝土的强度和耐久性。然而,过量使用偏高岭土会导致团聚现象的发生,影响水泥的水化反应和孔隙结构,从而降低泡沫混凝土的抗冻性能。特别是在偏高岭土掺量较高时,水泥水化反应受到抑制,导致泡沫混凝土的结构密实性差,抗冻性能明显下降。

综合上述研究,水泥品种、发泡剂类型以及掺合料的选择与配比均对泡沫混凝土的抗冻性能产生重要影响。通过优化材料组成与制备工艺,可提升泡沫混凝土在寒冷地区的应用性能。

4. 装配式复合夹芯墙板耐久性能

装配式复合夹芯墙板作为现代建筑中常用的建筑构件之一,因其轻质、高效的保温性能和良好的结构强度被广泛应用。然而,随着气候变化和环境条件的不同,尤其是在寒冷地区,冻融循环对夹芯墙板的影响逐渐显现。冻融循环导致墙板内部材料的破坏、强度下降以及热工性能恶化,直接影响建筑的耐久性和结构稳定性。因此,研究装配式复合夹芯墙板的耐久性能,尤其是其抗冻能力,成为当前建筑工程领域中的重要课题。

在过去的研究中,冻融循环对夹芯墙板的影响被广泛关注。Toubia EA 等[34]通过研究轻木和 PVC 泡沫作为夹芯材料的墙板,在盐溶液中的冻融环境下进行了长期性能的测试,结果表明轻木材料的强度在冻融循环中明显下降,压缩强度和模量分别降低了 36% 和 33%,而 PVC 泡沫芯材料在剪切模量上有所增加,但压缩模量却有所下降。这是因为轻木材料的吸水性和脆性使其在冻融循环中受损较严重,而 PVC 泡沫具有较好的抗冻性能,表现出更好的适应性。此研究揭示了不同类型夹芯材料在冻融环境下的不同表现,强调了对材料性能的针对性选择和优化。

Sfarra S 等[35]采用 Comsol Multiphysics 软件对冻融循环进行了数值模拟,并结合实验验证了结果的准确性。研究发现,冻融过程不仅改变了材料的形态,还可能引起材料内部的缺陷,如水分渗透导致纤维和树脂之间的分离。通过独立分量热成像(ICT)技术,研究者能够检测到水夹杂物的位置,进一步确认了冻融循环对复合材料的影响。这一结果为未来针对复合材料的抗冻设计提供了新的研究视角。

Li Y 等[36]等提出的纺织增强工程水泥基复合材料(TRE)面层的预制夹芯墙板(TRE-PSIWP)则展示了另一种优化夹芯墙板耐久性的途径。冻融循环后,尽管 TRE-PSIWP 的抗弯承载能力有所减弱,但其延展性有所增加。研究还发现,增加保温层和 TRE 面层的厚度可以有效提升墙板的抗弯性能,这一研究提供

了一种新的思路, 通过优化结构设计和材料搭配提高墙板在严寒环境下的耐久性。

此外, 程龙等[37]通过对 NaCl 和 Na₂SO₄ 溶液对夹芯墙板的影响进行研究, 发现 NaCl 溶液对墙板的冻害有加剧作用, 而 Na₂SO₄ 溶液则起到一定的缓解作用。这一发现为不同环境条件下的墙板设计提供了宝贵的参考。研究还表明, 墙板在清水环境下的冻融循环次数可达到 25 次, 符合现行轻质板材规范要求, 表明装配式复合夹芯墙板在清水环境下具有较好的冻融适应性。

殷明等[38]对保温材料与结构层之间抗拉强度随冻融循环次数变化的研究, 进一步揭示了保温材料对夹芯墙板耐久性的影响。经过 30 次冻融循环后, 硅质聚苯板、硬泡聚氨酯和挤塑板三种材料的抗拉强度依次表现为硅质聚苯板 > 硬泡聚氨酯 > 挤塑板, 其中部分挤塑板样本出现了与结构层脱落的现象, 显示出较差的冻融耐受性。这一研究表明, 选择合适的保温材料及优化设计是提升夹芯墙板耐久性的关键。

综合上述研究, 不同保温材料在冻融环境下的性能表现差异较大, 材料的选择和优化设计对于提升墙板的抗冻能力至关重要。随着材料性能的不不断提升和研究的深入, 装配式复合夹芯墙板的抗冻性能有望得到更好的改善, 满足寒冷地区建筑的耐久性需求, 确保建筑在极端气候条件下的安全性和舒适性。

5. 未来发展展望

(1) 泡沫混凝土复合墙板作为当下广泛应用的建筑材料, 既可以推进预制装配式构件的蓬勃发展, 又是实现未来绿色住宅工业化的研发方向的重要途径。

(2) 泡沫混凝土墙板对其冻融循环的研究既能满足墙板的结构强度需求, 又能有效减少热桥效应, 为现代节能建筑提供了一种更加优质的解决方案。

(3) 泡沫混凝土作为夹芯板面层材料, 虽具备优良的保温隔热性能, 但抗冻性能仍需进一步提升。深入研究夹芯板在冻融后的力学性能, 对于提升其在寒冷地区的服役稳定性和优化设计具有重要意义。

参考文献

- [1] 赵东来, 胡春雨, 柏德胜, 等. 我国建筑节能技术现状与发展趋势[J]. 建筑节能, 2015, 43(3): 116-121.
- [2] 郭娟利. 严寒地区保障房建筑工业化围护部品集成性能研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [3] 范丽龙. 基于高性能泡沫混凝土的复合自保温砌块的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [4] Tawil, H., Tan, C.G., Sulong, N.H.R., Nazri, F.M., Sherif, M.M. and El-Shafie, A. (2022) Mechanical and Thermal Properties of Composite Precast Concrete Sandwich Panels: A Review. *Buildings*, **12**, Article No. 1429. <https://doi.org/10.3390/buildings12091429>
- [5] 熊峰, 边钰, 刘烨, 等. 预制混凝土夹心保温墙板结构性能研究综述[J]. 建筑结构, 2022, 52(23): 26-34, 125.
- [6] 刘若南. 基于强度的预制混凝土夹芯保温墙板连接件设计研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [7] 杨佳林, 薛伟辰. 预制夹芯保温墙体 FRP 连接件应用进展[J]. 低温建筑技术, 2012, 34(8): 139-142.
- [8] 白正仙, 高佳伟, 刘学春, 等. 夹芯墙体玻璃钢连接件连接性能研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(2): 169-176, 183.
- [9] Liew, J.Y.R. and Sohail, K.M.A. (2010) Structural Performance of Steel-Concrete-Steel Sandwich Composite Structures. *Advances in Structural Engineering*, **13**, 453-470. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.3.453>
- [10] McCall, C.W. (1985) Thermal Properties of Sandwich Panels. *International Concrete Abstracts Portal*, **7**, 35-41.
- [11] Mosallam, A., Allam, K. and Salama, M. (2019) Analytical and Numerical Modeling of RC Beam-Column Joints Retrofitted with FRP Laminates and Hybrid Composite Connectors. *Composite Structures*, **214**, 486-503. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.032>
- [12] He, Z., Pan, P., Ren, J. and Wang, H. (2020) Experimental and Numerical Investigation of Novel I-Shaped GFRP Connectors for Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *Journal of Composites for Construction*, **24**, Article ID: 04020040. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001053](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001053)
- [13] Huang, J. and Dai, J. (2019) Direct Shear Tests of Glass Fiber Reinforced Polymer Connectors for Use in Precast Concrete Sandwich Panels. *Composite Structures*, **207**, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.017>

- [14] Kim, J. and You, Y. (2015) Composite Behavior of a Novel Insulated Concrete Sandwich Wall Panel Reinforced with GFRP Shear Grids: Effects of Insulation Types. *Materials*, **8**, 899-913. <https://doi.org/10.3390/ma8030899>
- [15] Cox, B., Syndergaard, P., Al-Rubaye, S., Pozo-Lora, F.F., Tawadrous, R. and Maguire, M. (2019) Lumped GFRP Star Connector System for Partial Composite Action in Insulated Precast Concrete Sandwich Panels. *Composite Structures*, **229**, Article ID: 111465. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111465>
- [16] 刘卉. 预制混凝土夹芯保温外挂墙板研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [17] Woltman, G.D., Tomlinson, D.G. and Fam, A. (2011) A Comparative Study of Various FRP Shear Connectors for Sandwich Concrete Walls. In: Ye, L.P., Feng, P. and Yue, Q.R., Eds., *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Springer, 237-240. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17487-2_50
- [18] Choi, K., Choi, W., Feo, L., Jang, S. and Yun, H. (2015) In-Plane Shear Behavior of Insulated Precast Concrete Sandwich Panels Reinforced with Corrugated GFRP Shear Connectors. *Composites Part B: Engineering*, **79**, 419-429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.056>
- [19] Woltman, G., Tomlinson, D. and Fam, A. (2013) Investigation of Various GFRP Shear Connectors for Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *Journal of Composites for Construction*, **17**, 711-721. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000373](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000373)
- [20] Tomlinson, D. and Fam, A. (2014) Experimental Investigation of Precast Concrete Insulated Sandwich Panels with Glass Fiber-Reinforced Polymer Shear Connectors. *ACI Structural Journal*, **111**, 595-605. <https://doi.org/10.14359/51686621>
- [21] Gong, J., Zhang, W. and Zhou, Z. (2021) Foam Concrete Pore Structure Effect on Drying Shrinkage and Frost Resistance. *Journal of Testing and Evaluation*, **49**, 3431-3443. <https://doi.org/10.1520/jte20190550>
- [22] 高志涵, 陈波, 陈家林, 等. 冻融环境下泡沫混凝土的孔结构与力学性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 827-838.
- [23] 郭雷, 关辉, 杨学春. 甲基硅烷类防水剂对泡沫混凝土抗冻性的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(12): 2075-2079.
- [24] 李崇智, 彭家蔓, 王会新, 等. 用于泡沫混凝土的磷酸镁水泥基胶凝材料研究[J]. 材料导报, 2023, 37(S2): 227-230.
- [25] Bumanis, G., Bajare, D., Korjaks, A. and Vaičiukynienė, D. (2022) Sulfate and Freeze-Thaw Resistance of Porous Geopolymer Based on Waste Clay and Aluminum Salt Slag. *Minerals*, **12**, Article No. 1140. <https://doi.org/10.3390/min12091140>
- [26] Liu, Q., Chen, H., Fang, S. and Luo, J. (2024) Effect of Mineral Powders on the Properties of Foam Concrete Prepared by Cationic and Anionic Surfactants as Foaming Agents. *Materials*, **17**, Article No. 606. <https://doi.org/10.3390/ma17030606>
- [27] Sun, C., Zhu, Y., Guo, J., Zhang, Y. and Sun, G. (2018) Effects of Foaming Agent Type on the Workability, Drying Shrinkage, Frost Resistance and Pore Distribution of Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, **186**, 833-839. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.019>
- [28] Li, S., Li, H., Yan, C., Ding, Y., Zhang, X. and Zhao, J. (2022) Investigating the Mechanical and Durability Characteristics of Fly Ash Foam Concrete. *Materials*, **15**, Article No. 6077. <https://doi.org/10.3390/ma15176077>
- [29] Tebbal, N. and Rahmouni, Z.E.A. (2019) Valorization of Aluminum Waste on the Mechanical Performance of Mortar Subjected to Cycles of Freeze-Thaw. *Procedia Computer Science*, **158**, 1114-1121. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.234>
- [30] Zhang, S., Qi, X., Guo, S., Zhang, L. and Ren, J. (2022) A Systematic Research on Foamed Concrete: The Effects of Foam Content, Fly Ash, Slag, Silica Fume and Water-to-Binder Ratio. *Construction and Building Materials*, **339**, Article ID: 127683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127683>
- [31] Bayraktar, O.Y., Soylemez, H., Kaplan, G., Benli, A., Gencil, O. and Turkoglu, M. (2021) Effect of Cement Dosage and Waste Tire Rubber on the Mechanical, Transport and Abrasion Characteristics of Foam Concretes Subjected to H₂SO₄ and Freeze-Thaw. *Construction and Building Materials*, **302**, Article ID: 124229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124229>
- [32] Gencil, O., Benli, A., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Sutcu, M. and Elabade, W.A.T. (2021) Effect of Waste Marble Powder and Rice Husk Ash on the Microstructural, Physico-Mechanical and Transport Properties of Foam Concretes Exposed to High Temperatures and Freeze-Thaw Cycles. *Construction and Building Materials*, **291**, Article ID: 123374. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123374>
- [33] 孙赛炜, 刘勇, 陈伟, 等. 偏高岭土对路基填料泡沫轻质土性能的影响研究[J]. 混凝土, 2020(1): 95-99.
- [34] Toubia, E.A., Emami, S. and Klosterman, D. (2017) Degradation Mechanisms of Balsa Wood and PVC Foam Sandwich Core Composites Due to Freeze/Thaw Exposure in Saline Solution. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, **21**, 990-1008. <https://doi.org/10.1177/1099636217706895>

- [35] Sfarra, S., Tejedor, B., Perilli, S., Almeida, R.M.S.F. and Barreira, E. (2020) Evaluating the Freeze-Thaw Phenomenon in Sandwich-Structured Composites via Numerical Simulations and Infrared Thermography. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **145**, 3105-3123. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09985-1>
- [36] Li, Y., Yin, S. and Feng, L. (2023) Experimental Investigation on Flexural Behavior of Prefabricated Sandwich Insulation Wall Panels with Textile Reinforced Engineered Cementitious Composites as the Wythes after Freeze-Thaw Cycles. *Advances in Structural Engineering*, **27**, 415-431. <https://doi.org/10.1177/13694332231222342>
- [37] 程龙. 装配式发泡混凝土填充墙耐久性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [38] 殷明. 冻融循环对外墙保温板与结构层粘结性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2017.