

冷冻组合砂浆劈裂抗拉及抗压强度试验研究

刘昊飞, 毛江鸿, 夏银飞

四川大学建筑与环境学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年4月6日; 录用日期: 2026年4月26日; 发布日期: 2026年5月7日

摘要

针对功能梯度混凝土界面粘结薄弱的问题, 本文提出了一种基于冷冻工艺提升功能梯度混凝土界面粘结性能的技术, 核心目的是探明该工艺浇筑形成的组合块体界面形状对粘结性能的影响。试验采用液氮快速冻结新拌砂浆以暂停其水化反应, 随后与新拌砂浆共同浇筑成型; 在此基础上, 围绕方形界面的冷冻与普通砂浆组合试件(以下统称预冷冻组合块体)的界面粘结性能, 开展劈裂抗拉与抗压强度测试, 系统分析了其力学强度、破坏形态。结果表明: 界面形状会影响组合块体的粘结性能。

关键词

预冷冻组合块体, 界面粘结, 界面形状

Experimental Study on Splitting Tensile and Compressive Strength of Frozen Composite Mortar

Haofei Liu, Jianghong Mao, Yinfei Xia

College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Received: April 6, 2026; accepted: April 26, 2026; published: May 7, 2026

Abstract

Aiming at the problem of weak interfacial bonding in functionally graded concrete (FGC), this paper proposes a technology based on the freezing process to improve the interfacial bonding performance of FGC. The core objective is to investigate the influence of the interface shape of composite blocks formed by casting via this process on the bonding performance. In the experiment, fresh mortar was rapidly frozen by liquid nitrogen to suspend its hydration reaction, and then cast and molded together with fresh mortar. On this basis, splitting tensile and compressive strength tests

were conducted focusing on the interfacial bonding performance of composite specimens consisting of frozen mortar with square interface and ordinary mortar (hereinafter collectively referred to as pre-frozen composite blocks), and their mechanical strength and failure modes were systematically analyzed. The results show that the interface shape affects the bonding performance of composite blocks.

Keywords

Pre-Frozen Composite Block, Interfacial Bonding, Interfacial Geometry

Copyright © 2026 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

普通混凝土由于其材料均匀分布, 导致在实际使用过程中构件的某些部位材料特性无法充分发挥, 造成冗余和浪费[1]。对此, 功能梯度混凝土(Functionally graded concrete, FGC)是一种有效解决途径, 该技术指通过一定复合技术将两种或多种材料组合成一个功能梯度变化的整体, 在实际工程的设计中, 可以根据使用需求来决定其材料成分在空间上的分布, 以满足结构构件各区域不同的性能要求[1][2], 提高材料的使用效率。而目前功能梯度混凝土的主流浇筑工艺为硬化后浇筑, 即待首层混凝土浇筑并完全硬化后, 再浇筑第二层混凝土[3], 该工艺操作简便, 可精准控制各材料的尺寸与布设位置, 但浇筑的非连续性会引发界面缺陷, 直接关系到功能梯度混凝土整体结构的力学性能与耐久性。

对此问题, 传统的界面处理方法如开槽, 钻孔[4][5], 涂抹界面剂[6][7]等, 虽可在一定程度上缓解界面缺陷, 但均存在固有弊端, 如开槽、钻孔等会对基体本身造成损伤[8][9]; 涂抹界面剂容易失效[10]。而液氮冷冻工艺的出现为 FGC 的界面粘结问题提供了全新的技术路径, 有研究表明[11], 通过液氮冷冻可快速中止新拌水泥基材料的水化反应, 冻结后水泥砂浆块体为固体状态、不分散, 解冻后恢复流动性和水化活性, 且不会影响最终强度与耐久性。上述特性为功能梯度混凝土结构的现场施工带来如下技术优势: 一方面, 浇筑过程中冷冻块体的固态形态可起到物理分隔作用, 解决了连续浇筑中因材料密度、流动性差异引发的界面扰动问题, 可保证冷冻工艺两侧两种不同类型混凝土同时浇筑, 进而形成功能梯度混凝土结构。另一方面, 冷冻块体在两侧混凝土水化热的驱动下逐渐解冻, 与两侧混凝土协同水化并相互交融, 最终形成完整整体。上述技术思路构建了全新的功能梯度混凝土施工路线。尽管液氮冷冻工艺的基础性能已得到验证, 但其与普通混凝土之间的界面作用机理仍不明确, 仍待开展深入研究。

基于此, 本文聚焦冷冻砂浆与普通砂浆组合后的界面性能, 研究采用宏观力学性能测试包括劈裂抗拉测试以及抗压测试, 系统探究方形界面对组合块体性能的影响规律。

2. 原材料及试件制备

2.1. 原材料

本文旨在探究基于冷冻工艺的组合块体界面形状对界面粘结性能的影响, 核心聚焦界面处胶凝材料的水化交融。鉴于粗骨料不参与水泥水化反应, 为剔除骨料干扰, 本试验选取水泥砂浆作为研究基材。

砂浆配合比根据 GB/T17671-2021 [12]确定, 设定水灰比 1:2、胶砂比 1:3。试验原材料如下: 胶凝材料采用诸城阳春水泥有限公司生产的 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥; 细骨料选用厦门艾思欧标准砂有限公

司出品的 ISO 标准砂；拌合用水采用自来水。所用水泥的化学组成与物理性能指标，分别如表 1、表 2 所示。

Table 1. Chemical composition of cement (mass fraction, %)

表 1. 水泥的化学组成(质量分数, %)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	烧失量	碱含量
24.99	51.42	8.26	4.03	3.71	2.51	3.31	1.34

Table 2. Physical properties of cement

表 2. 水泥的物理性能

初凝时间/min	终凝时间/min	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		3 d	28 d	3 d	28 d
155	239	5.4	8.6	25.3	50.8

2.2. 试件制备流程

组合块体尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm，其中冷砂浆和普通砂浆的厚度分别为 50 mm，冷冻砂浆在下方，普通砂浆在上方。制备流程如图 1 所示：



Figure 1. Casting process of composite specimens

图 1. 组合试块浇筑流程

首先，于 100 mm × 100 mm × 100 mm 塑料模具内放置厚度为 40 mm 的光滑防水木制垫块，再在木制垫块上方放置高度 10 mm、定制方形塑料模具，具体尺寸见图 2；该模具表面光洁，浇筑前需均匀涂刷脱模剂。随后向装配完备的模具内浇筑新拌砂浆，振捣密实后抹平表面，制备得到尺寸为 100 mm × 100 mm × 50 mm 的具有不同界面形状的砂浆基体。

随后，将带模砂浆基体移入 -100℃ 液氮冷冻箱中快速冷冻 30 min，通过急冷中止砂浆水化进程，此时试块表面温度约为 -40℃。冷冻完成后，将砂浆基体脱模并移除木质垫块以及塑料模具，并将其重新装入 100 mm × 100 mm × 100 mm 模具中。

待基体温度稳定至 -10℃ 时，浇筑新拌砂浆成型组合试件。成型后的组合试件置于标准养护室(温度：20℃；湿度：95%)中进行养护。

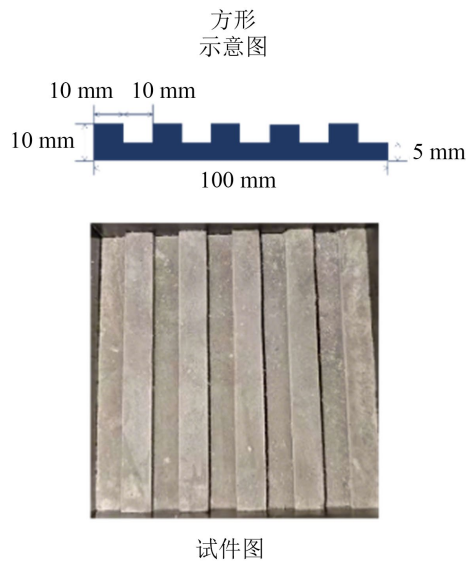


Figure 2. Schematic diagram of square plastic mold dimensions and specimen casting
图 2. 方形塑料模具尺寸及试件浇筑成型示意图

3. 试验方案与方法

3.1. 试验方案

预冷冻组合块体因浇筑先后顺序不同, 界面处骨料排布存在差异, 从而产生机械咬合力。而影响机械咬合力的主要因素为界面形态包含粗糙度、凹凸形状等[13][14]。这些形态特征对界面间的摩擦作用、剪切传递及力学行为有着重要影响。值得注意的是, 现有文献中粗糙表面的构建方式并不统一, 有随机粗糙面, 也有规则粗糙面, 且表面粗糙度形态各异, 包括三角形槽、方形槽、菱形凸起等设计[15][16]。同时利用冷冻工艺成型的试块具有很强的设计性, 在尺寸合适的前提下, 可以将混凝土冷冻为任意所需形状[11]。所以本研究采用填沙法[17]设计了形态为方形的冷冻砂浆表面。并在此基础上浇筑新拌砂浆形成拥有方形界面形状的预冷冻组合块体, 同时设置界面为平面的预冷冻组合试块进行对比, 来探究方形界面形状对预冷冻组合块体界面粘结性能的影响。具体测试手段为劈裂抗拉试验、抗压试验。

3.2. 试验方法

3.2.1. 劈裂抗拉强度测试

根据 GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》[18]测定预冷冻组合块体的劈裂抗拉强度。试验采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 立方体试件, 每组设置不少于 3 个平行试样, 以保障测试数据的可靠性。

加载设备选用 60 t 万能试验机; 在试件劈裂面上下两侧纵向布设等厚、平整的木质垫块, 并确保垫块与试件几何中心精准对齐。全程严格遵照规范要求, 以 500 N/s 的恒定速率连续加载, 实时采集力-位移曲线; 待试件出现贯通性劈裂裂缝、荷载下降至峰值荷载的 80% 时终止试验, 最终依托峰值荷载计算劈裂抗拉强度。

针对预冷冻组合试件, 统一控制加载方向与界面粘结面平行, 规避加载方向对界面抗拉性能测试结果造成干扰。试件在养护龄期为 28 d 时开展劈裂抗拉测试, 试验布置如图 3 所示。试件劈裂抗拉强度的

计算，遵循 GB/T 50081-2019 规范[18]执行，具体如下：

$$NTS = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A}$$

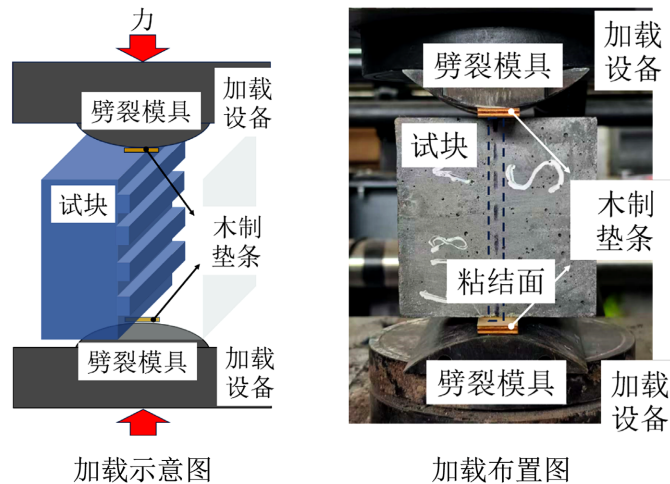


Figure 3. Splitting tensile test
图 3. 劈裂抗拉试验

3.2.2. 抗压强度测试

根据 GB/T17671-2021 《水泥砂浆强度检验方法》[12]开展纯砂浆、预冷冻及预凝结复合试件的抗压强度测试。试验采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体试件，每组设置 3 组平行试样，确保试验数据具备良好的可靠性。

抗压加载试验依托 60 t 万能试验机完成；试件安放时严格居中对中，保证试件轴心与试验机加载中心完全重合，有效规避偏心受压带来的测试误差。加载全程遵循规范要求，以 5000 N/s 的恒定速率施加轴向压力，同步实时采集力-位移曲线，最终依据峰值荷载计算试件抗压强度。针对预冷冻与预凝结复合块体，统一控制加载方向与界面粘结面保持平行。

所有试件均置于(20±2)℃、相对湿度 ≥ 95%的标准养护环境内养护，在 28 d 规定龄期开展抗压强度检测，试验装置布设如图 4 所示。



Figure 4. Schematic diagram of compression test
图 4. 抗压试验示意图

4. 试验结果

4.1. 破坏模式

4.1.1. 劈裂抗拉破坏模式

图 5 显示了试件的破坏模式。

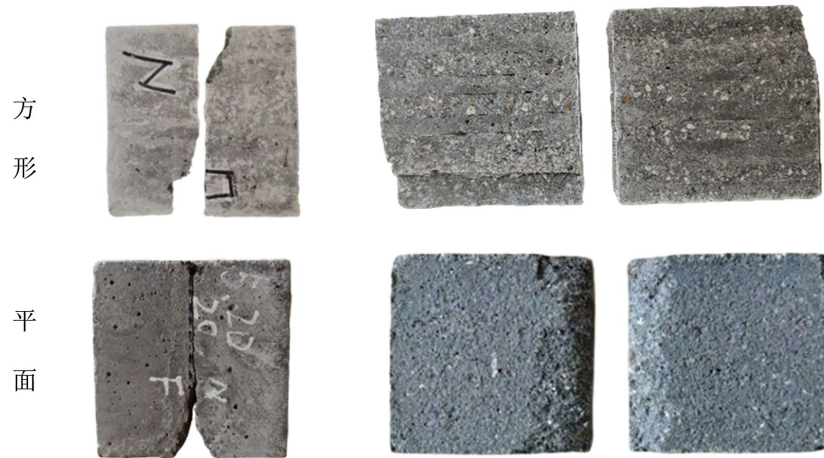


Figure 5. Splitting tensile failure mode
图 5. 劈裂抗拉破坏模式

图 5 中可以看出，方形与平面界面形状的组合块体，在劈裂抗拉试验中呈现出的破坏形态具备的规律性。本次试验中的试件，其裂缝均主要分布在试件中心线附近区域，该区域是劈裂抗拉试验中拉应力的集中区域[19]，内部拉应力持续累积并超过材料的抗拉极限后，便在此处导致裂缝的产生与逐步扩展。同时试件的上下端部均出现了凹陷破坏，试件上下端面为试验的直接加载部位，属于劈裂抗拉试验中压应力的集中区域[19]，局部压应力超出材料承压能力后，便形导致了凹陷破坏，这也是劈裂抗拉试验中较为常见的破坏表现。

方形交界面的组合块体裂缝呈一字型开裂，裂缝并非沿交界面发生开裂，而是沿冷冻块体的方形齿底位置萌生并持续扩展，最终形成贯通裂缝。而平面交界面的组合块体裂缝虽同样呈现一字型开裂，但其裂缝沿交界面开裂。

4.1.2. 抗压破坏模式

图 6 显示了各组中试件在抗压试验下的破坏模式。



Figure 6. Compressive failure mode
图 6. 抗压破坏模式

从图 6 的试验破坏形态对比中可以观察到：方形与平面交界面所制备的预冷冻组合块体，在单轴抗压荷载作用下，试件最终均呈现出标准的锥形破坏模式。且从破坏后块体的宏观形态上，未观察到任何与交界面几何形状相关的特征痕迹。

这一结果表明，在本试验所设定的条件下，交界面的几何形态并未对块体的抗压破坏模式产生影响。这一现象说明，试验所涉及界面几何形状对抗压破坏形态无影响。

4.2. 劈裂抗拉强度及界面开裂行为分析

劈裂抗拉结果

计算方法根据 GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》[18]如下：

$$NTS = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A}$$

图 7 为方形交界面的预冷冻组合块体劈裂抗拉强度结果，并与平面状交界面试块进行了对比。由图中数据可知，方形界面形状对预冷冻组合块体的劈裂抗拉强度存在影响：

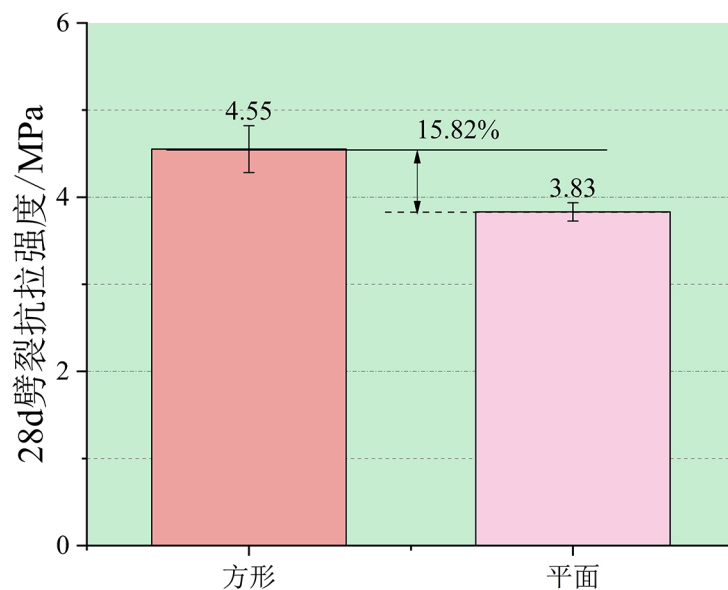


Figure 7. Splitting tensile strength of pre-frozen composite blocks with different interface shapes

图 7. 不同界面形状的预冷冻组合块体劈裂抗拉强度

在两种界面形状的组合块体中，方形交界面的劈裂抗拉强度最高，为 4.55 MPa，较平面交界面提升 15.82%。

上述差异本质上源于界面的机械咬合作用：方形界面的凹凸结构可提供更充分的机械咬合，从而增强界面粘结力。这一结果表明，方形交界面能有效增强机械咬合，进而改善预冷冻组合块体的界面粘结性能。

4.3. 抗压强度

图 8 呈现了方形、平面两种不同几何形态交界面预冷冻组合块体的单轴抗压强度试验结果，反映了交界面形状对该类组合块体抗压强度的影响规律。

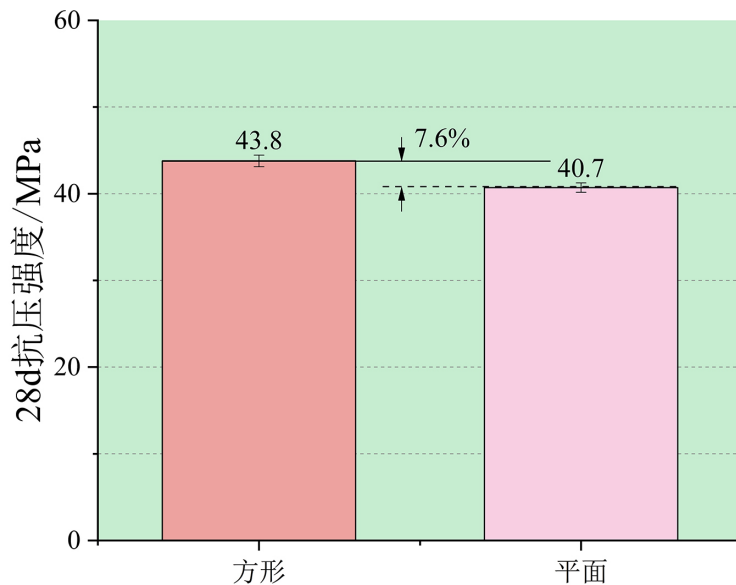


Figure 8. Compressive strength of pre-frozen composite blocks with different interface shapes

图 8. 不同界面形状的预冷冻组合块体抗压强度

由图 8 可知，方形界面的预冷冻组合块体的抗压强度比平面组合块体高 7.6%，表明方形交界面较平面对组合块体抗压强度有促进作用。

综合分析不同交界面形状组合块体的抗压强度数据可知，方形交界面组合块体对预冷冻组合块体的界面粘结性能有促进作用。

5. 结论

本文通过开展劈裂抗拉、抗压试验，系统研究了方形、平面两种交界面对预冷冻组合块体力学性能、破坏模式的影响规律，为预冷冻组合块体的界面设计提供了试验与理论依据。具体研究结论如下：

1) 界面形状影响预冷冻组合块体的破坏模式，平面组合块体沿交界面开裂，而方形组合块体沿着方形齿底破坏。

2) 界面形状对劈裂抗拉强度存在影响，在本试验设置下，方形界面组合块体粘结强度最高，强度为 4.55 MPa，较平面界面提升 15.82%。

3) 方形界面形状对组合块体的抗压强度有一定的促进作用，相比于平面交界面，方形界面预冷冻组合块体的抗压强度高约 8.3%，有一定促进作用。

参考文献

- [1] Torelli, G., Fernández, M.G. and Lees, J.M. (2020) Functionally Graded Concrete: Design Objectives, Production Techniques and Analysis Methods for Layered and Continuously Graded Elements. *Construction and Building Materials*, **242**, Article ID: 118040. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118040>
- [2] El-Sagheer, I., Abd-Elhady, A.A., Sallam, H.E.M., Naga, S.A.R. and Sayed, S.A.A. (2022) Flexural and Fracture Behaviors of Functionally Graded Long Fibrous Polymeric Composite Beam-Like Specimens. *Composite Structures*, **300**, Article ID: 116140. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116140>
- [3] Nes, L.G. and Øverli, J.A. (2016) Structural Behaviour of Layered Beams with Fibre-Reinforced LWAC and Normal Density Concrete. *Materials and Structures*, **49**, 689-703. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0530-9>
- [4] Guan, D., Peng, Z., Chen, Z. and Liu, J. (2023) Experimental Investigation of Interfacial Shear Behavior between

- Engineered Cementitious Composite and Normal Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, e02666. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02666>
- [5] Zhang, Y., Zhu, P., Liao, Z. and Wang, L. (2020) Interfacial Bond Properties between Normal Strength Concrete Substrate and Ultra-High Performance Concrete as a Repair Material. *Construction and Building Materials*, **235**, Article ID: 117431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117431>
- [6] Chen, P., Fu, X. and Chung, D.D.L. (1995) Improving the Bonding between Old and New Concrete by Adding Carbon Fibers to the New Concrete. *Cement and Concrete Research*, **25**, 491-496. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00037-d](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00037-d)
- [7] Momayez, A., Ehsani, M.R., Ramezani-pour, A.A. and Rajaie, H. (2005) Comparison of Methods for Evaluating Bond Strength between Concrete Substrate and Repair Materials. *Cement and Concrete Research*, **35**, 748-757. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.027>
- [8] Wang, B., Xu, S. and Liu, F. (2016) Evaluation of Tensile Bonding Strength between UHTCC Repair Materials and Concrete Substrate. *Construction and Building Materials*, **112**, 595-606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.149>
- [9] Wang, B., Li, Q., Liu, F., Wang, J. and Xu, S. (2018) Shear Bond Assessment of UHTCC Repair Using Push-Out Test. *Construction and Building Materials*, **164**, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.148>
- [10] Ouyang, J., Guo, R., Wang, X., Fu, C., Wan, F. and Pan, T. (2023) Effects of Interface Agent and Cooling Methods on the Interfacial Bonding Performance of Engineered Cementitious Composites (ECC) and Existing Concrete Exposed to High Temperature. *Construction and Building Materials*, **376**, Article ID: 131054. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131054>
- [11] Chen, C., Mao, J., Fang, K., Ren, J., Shi, S. and Dai, F. (2024) Liquid Nitrogen Frozen Cementitious Material and Its Potential Applications: Inspired by Refrigeration Industry. *Construction and Building Materials*, **440**, Article ID: 137448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137448>
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 17671-2021 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [13] Ayinde, O.O., Wu, E. and Zhou, G. (2022) Bond Behaviour at Concrete-Concrete Interface with Quantitative Roughness Tooth. *Advances in Concrete Construction*, **13**, 265-279.
- [14] Cheng, H., Wang, X., Zhang, J., et al. (2018) Effects of Roughness on Cyclic Shear Behavior of Red Clay-Concrete Interface. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, **46**, 146-152.
- [15] Martinez, A. and Frost, J.D. (2017) The Influence of Surface Roughness Form on the Strength of Sand-Structure Interfaces. *Géotechnique Letters*, **7**, 104-111. <https://doi.org/10.1680/jgele.16.00169>
- [16] Wang, X., Cheng, H., Yan, P., Zhang, J. and Ding, Y. (2021) The Influence of Roughness on Cyclic and Post-Cyclic Shear Behavior of Red Clay-Concrete Interface Subjected to up to 1000 Cycles. *Construction and Building Materials*, **273**, Article ID: 121718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121718>
- [17] Li, H., Fu, S., Zhu, D., Li, G. and Shen, S. (2023) Experimental Study on the Effects of Triangular Groove Inclination Angles on the Mechanical Behavior of Sand-Concrete Interfaces. *Journal of Materials Research and Technology*, **24**, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.208>
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. GB/T 50081-2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [19] 程炯. 立方体脆性材料劈裂抗拉强度解析解与数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.