

# 混凝土冻融循环破坏机理及规律研究现状

王稷良<sup>1,2</sup>, 孟 赞<sup>1,2</sup>, 谢来坤<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;

3. 广西贵岑高速公路有限公司, 广西 南宁 530000)

**摘 要:** 在我国北方、西北等严寒地区冻融循环是造成混凝土强度损失和结构破坏的主要因素,且混凝土冻融循环损伤过程复杂,其评价机制相对简单,改善措施难于完全满足实际需求。基于此,本文对混凝土冻融循环损伤过程进行深入分析,首先对冻融环境下混凝土的破坏机理、冻融试验方法和标准进行归纳与梳理,并对在不同条件下混凝土冻融循环后性能演变规律进行分类和总结,同时概述了利用数值模拟软件对混凝土冻融循环过程进行模拟,最后提出提高混凝土抗冻性的建议和方法。结果表明:冻融循环导致的水相变化是混凝土破坏的关键因素,混凝土内部的孔结构和气泡间距系数对其抗冻融性能起着至关重要的作用。通过提高混凝土强度等级、添加纤维、纳米材料和地聚物等对混凝土改性,优化水灰比、掺入外加剂等方式提高抗冻性能。可为现役混凝土结构的力学特性评估及其耐久性检验提供参考。

**关键词:** 混凝土;冻融循环;冻融机理;试验方法;性能演变;数值模拟

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)04—0001—09

## Research Progress of Mechanism and Laws of Freeze-thaw Cycle Failure of Concrete

WANG Jiliang<sup>1,2</sup>, MENG Zan<sup>1,2</sup>, XIE Laikun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Highway Science Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

3. Guangxi Guicen Expressway Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China)

**Abstract:** In the severe cold areas of northern and northwestern China, the freeze-thaw cycle is the main factor leading to the loss of concrete and structural damage. Moreover, the damage process of concrete caused by freeze-thaw cycles is complex, and its evaluation mechanism is relatively simple, and the improvement measures are difficult to meet the actual environmental needs. Based on this, this paper makes an in-depth analysis of the damage process of concrete caused by freeze-thaw cycles, and firstly summarizes and out the damage mechanism of concrete under freeze-thaw conditions, the test methods and standards of freeze-thaw, and the evolution laws of concrete properties after freeze-thaw under different conditions. At the same time, the simulation of the freeze-thaw cycle process of concrete by using numerical simulation software is outlined, and finally the suggestions and methods to the frost resistance of concrete are proposed. The results show that the water phase change caused by the freeze-thaw cycle is the key factor leading to the damage of concrete, and pore structure inside the concrete and the air bubble spacing coefficient play a vital role in its frost resistance. By improving the concrete strength grade, adding fibers, nano-materials and polymers, and optimizing the water-binder ratio and adding admixtures, the frost resistance can be improved. It can provide reference for the mechanical property evaluation and durability inspection the existing concrete structure.

**Keywords:** concrete; freeze thaw cycles; freezing thawing mechanism; test method; performance evolution; numerical simulation

在地球气候变迁及极端气候现象日益增多的大背景下,研究低温条件下混凝土结构的稳定性成为了热点议题。特别是混凝土在经历冻融循环后的性能变化及其内在机理,已成为建筑行业急需解决的科研课题。冻融过程会破坏混凝土的微观结构,进而削弱其力学特性和耐久性。因此,探究混凝土经历冻融后的性能变化规律和作用机理,对于增强其抗低温能力、延长建筑寿命以及确保结构安全极为关键。

混凝土遭受冻融破坏的情形包括以下两个主要条件:①水分侵入并使得混凝土内部水分饱和;②气温在零上与零下之间交替波动。因此,在气候寒冷且干湿交替明显的区域,混凝土更易受到冻融作用的损害。鉴于初期设计标准的不完善,以及冻融破坏机理的多样性和不确定性,设计过程中往往未

充分考虑冻融作用对混凝土力学性能的潜在影响,造成了理论预测与实际状况之间的不一致。针对这一问题,有必要深入探究混凝土冻融损伤的基本原理,并对冻融检测方法进行评估,系统梳理冻融影响下混凝土不同力学性能变化规律及其与钢筋黏结强度的影响,同时研发包含所有相关因素在内的数值模拟方法,从而为防止混凝土结构冻融损伤提供坚实的理论支撑。

1 混凝土冻融损伤机理

目前关于混凝土遭受冻融损伤的机理,学术界已经积累了大量的研究成就,这些成果的理论及相关原理如表 1 所示。在这方面的研究中,Powers 提出的静水压力<sup>[1]</sup>和渗透压力<sup>[2]</sup>理论受到了广泛的关注认可。这两个理论的核心差异在于未冻结状态

表 1 混凝土水冻及盐冻条件下冻融损伤理论

| 时间   | 学者                        | 理论及相关原理                                                                                                                                                                                                                                   |
|------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1945 | Powers <sup>[1]</sup>     | 提出了静水压力理论,认为冻结过程首先是在混凝土的表面结冰,造成了混凝土的孔隙结构的闭合。随着气温的降低,冰晶的数量不断增加造成内部体积膨胀。在这种情况下,未冻结的水会顺着毛细孔进入到混凝土中,产生静水压力,使混凝土结构发生破坏。                                                                                                                        |
| 1953 | Powers 等 <sup>[2]</sup>   | 提出了渗透压力理论,认为当温度过低时,大孔隙内的水先结冰,导致剩余水分的浓度提高,这种浓度差使得微细孔隙中的水分向较大孔隙移动,形成渗透压力,进而作用于水泥浆体,引起混凝土开裂。                                                                                                                                                 |
| 1973 | Litvan <sup>[5]</sup>     | 提出蒸气压力假说,水泥内部的水只有经过重新分布才有向固体转化的可能性。当处于较低温度时,冷水的蒸气压力大于冰的蒸气压力,使其内部的水分子发生了向外运移,从而在混凝土表层结冰。                                                                                                                                                   |
| 1975 | Fagerlund <sup>[6]</sup>  | 提出了临界水饱和值理论,认为当混凝土内部的空气泡吸收水分增多时,气泡间的平均距离会相应减小,从而推测出混凝土的水饱和度将对应一个临界点,只有当混凝土内部孔隙的水分饱和度和介于 0.75 至 0.90 之间时,其结构才会遭受冻融作用的破坏。                                                                                                                   |
| 1992 | Mihta 等 <sup>[7]</sup>    | 提出了混凝土冻融温度应力差假说,认为由于骨料与水泥基体之间热膨胀系数的差异,在经历冻融循环时,两者之间的应变差异显著,这种差异产生的应力最终可能引起混凝土结构的损伤。                                                                                                                                                       |
| 2001 | Setzer <sup>[8]</sup>     | 根据多孔固体中未冻水、冰和蒸汽三相条件的稳定性判据,提出了微孔冰晶理论,认为当混凝土遭受冷冻,未冻结的水分会被迫从凝胶状孔隙向正在形成的微冰晶区域转移;而在温度升高时,它还会吸收周围环境中的水分。经过多次的冻融循环,这种作用会使混凝土孔隙中的水分饱和度逐步上升,一旦饱和度超过了混凝土的极限充水程度,混凝土就会开始出现破坏。                                                                        |
| 2006 | Penttala <sup>[9]</sup>   | 提出了超压理论,认为孔隙中的固体冰比其附近的溶液具有更低的化学势,这种不同导致了水分向冰体区迁移。在有限的空间内,新生的冰晶会对孔隙内壁产生压力,从而加快裂缝的产生与扩展。                                                                                                                                                    |
| 2007 | Valenza 等 <sup>[10]</sup> | 提出了粘结-剥落理论,认为在盐冻条件下,当混凝土表面的水分凝结成冰后,在表面生成冰-混凝土结合物。随着温度降低,表面冰层产生较混凝土 5 倍的收缩,冰层遭受拉应力的影响。随着温度的进一步下降,裂纹开始形成,特别是在冰层边缘区域由于应力集中现象,微小的裂纹逐步向混凝土的深处扩展,最终引发混凝土表面的脱落。                                                                                  |
| 2010 | Kang <sup>[11]</sup>      | 基于热力学提出了低温吸附理论,认为外部水分主要通过低温吸附作用渗透到混凝土表层区域,这一过程促进了毛细孔洞中冰晶的连续生长。然而,这样的现象引起了孔隙内部压力的升高,最终造成了表面的结垢现象。随着温度的下降,混凝土表面的低温吸附能力也相应增强。                                                                                                                |
| 2012 | 杨全兵 <sup>[12-13]</sup>    | 提出饱水度-结冰压耦合理论,认为混凝土遭受盐冻破坏的过程是一个多因素相互作用的复杂现象,发现在盐溶液冻融条件下,盐溶液对混凝土表面的侵蚀既有促进也有抑制的双重影响。NaCl 能显著增加混凝土内部的水饱和度,从而加剧其盐冻损伤;同时,在 100% 的饱水状态下,随着 NaCl 浓度的逐步上升,尤其是当质量分数 6% 之后,溶液的冰冻膨胀率以及冰冻压力明显减小,这有利于减轻盐冻带来的损害,最后进一步验证了 NaCl 质量分数在 3% 左右时,盐冻的破坏作用最为剧烈。 |
| 2022 | Zheng 等 <sup>[14]</sup>   | 提出盐冻结理论,认为盐冻带来的损害主要是由冰晶生成与盐分结晶两个相变引起的。在这个过程中,大孔隙的部分水分首先凝固成冰,体积膨胀导致内部水压升高。由于渗透压的影响,小孔隙的 CH 和 NaCl 成分随着水分向较大孔洞移动。同时,水中所含的 Cl <sup>-</sup> 和 Ca <sup>2+</sup> 离子反应形成弗里德尔盐晶体,这些晶体与膨胀的冰一起施加压力,引发基质的开裂。                                         |

下孔隙溶液的流动路径。静水压力理论认为,孔隙溶液会从冰晶周边被排出,由大孔隙向小孔隙流动;渗透压力理论认为,孔隙中溶液会从较细的孔隙向冰晶迁移。两种差异化的应力作用使得孔隙液体在特定浓度下出现显著的孔隙内压。这一观点有效地阐明了 3% 盐溶液对混凝土造成最大冻融损伤的机理<sup>[3]</sup>。然而,渗透压理论研究至今尚未发展出相应的数学模型和推算公式,这限制了冻融损伤的量化分析。这两种理论各自针对不同配和比的混凝土展现出独特的适用性,静水压力理论在较低强度、高水胶比混凝土的耐冻性能方面较适用,而渗透压力理论则在高强度混凝土,受盐分侵蚀中的环境更为适用<sup>[4]</sup>。

混凝土在低温环境下的冻融损伤机理涉及一系列错综复杂的物理反应。尽管关于这一损伤机理的

研究成果颇为丰富,但自从 Powers 提出关于静水压力与渗透压力的理论以来,该领域的研究并未取得显著性的突破,也尚未形成一套完整的理论体系。在过去二十至三十年间,不少研究者基于 Powers 的理论框架,从混凝土孔隙水分的三态变化、混凝土的内在结构特性以及不同材质的性能区别等方面出发研究对混凝土冻融破坏的影响。鉴于此,冻融损伤机理的研究仍需不断加强。

## 2 混凝土冻融循环试验与评价方法

国内外目前评价混凝土抗冻性能的试验方法有很多,如今主要现行的试验方法如表 2 所示。以下将进一步从不同角度对这些冻融试验方法进行对比、评价和总结。

表 2 冻融循环主要试验方法

| 不同国家试验方法                                     |       | 适用范围                            | 循环制度                                        | 冻融介质                        | 试验特点         | 评价指标                   |
|----------------------------------------------|-------|---------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|--------------|------------------------|
| 美国<br>ASTM<br>C666 <sup>[15]</sup>           | A 法   | 用以测定混凝土试件抵抗快速冻融的能力              | -18℃~4℃,每个冻融循环在 2 h~5 h 内完成                 | 水                           | 水冻水溶<br>气冻水溶 | 质量损失,相对动弹性模量           |
|                                              | B 法   |                                 |                                             |                             |              |                        |
| 美国<br>ASTM C672 <sup>[16]</sup>              |       | 可以测试表面受除冰盐侵蚀的混凝土的抗冻性            | -17℃~23℃,每个冻融循环在 22 h~26 h 内完成              | 4% 浓度的 CaCl <sub>2</sub> 溶液 | 单面接触试验液体     | 表面剥落量                  |
| 国际材料<br>协会<br>RILEM <sup>[17-18]</sup>       | CIF 法 | 用来测定冻融循环作用下混凝土的内部破坏程度及其表面剥落量    | -20℃~20℃,每个冻融循环在 12 h 内完成                   | 水或 3% 浓度的 NaCl 溶液           | 单面接触试验液体     | 相对动弹性量为,表面剥落量<br>表面剥落量 |
|                                              | 平板法   |                                 | -20℃~24℃,每个冻融循环在 24 h 内完成                   |                             |              |                        |
| 瑞典<br>SS 13 72 44 <sup>[19]</sup>            |       | 可以测试表面受除冰盐侵蚀的混凝土的抗冻性            | -20℃~20℃,每个冻融循环在 24 h 内完成                   | 3% 浓度的 NaCl 溶液              | 单面接触试验液体     | 单位面积剥落量                |
| 中国<br>GB/T<br>50082—<br>2009 <sup>[20]</sup> | 慢冻法   | 适用于评价未直接浸泡在水中的混凝土的抗冻性           | -20℃~-18℃~18℃~20℃,每次冻融循环中冷冻时间和融化时间均不应小于 4 h | 水                           | 气冻水溶         | 质量损失,抗压强度损失            |
|                                              | 快冻法   | 适用于评价混凝土在长期浸水和饱水条件下的抗冻性         | -16℃~3℃,每次冻融循环应在 2 h~4 h 内完成                | 水                           | 水冻水溶         | 质量损失,相对动弹性模量           |
|                                              | 单面冻融法 | 适用于评价混凝土在自然暴露条件下与盐类物质接触时的抗冻性能表现 | -20℃~20℃,每个冻融循环在 12 h 内完成                   | 3% 浓度的 NaCl 溶液              | 单面接触试验液体     | 表面剥落量,相对动弹性模量          |

### 2.1 试件和冻融介质接触方式

美国材料试验协会标准的 ASTM C666 中有 A 法和 B 法两种,A 法和我国的快冻法相似,是将试样完全浸入水中进行冻融;B 法和我国的慢冻法相似,是先将试样置于大气中冻结后溶于水。ASTM C672 方法将试件四周密封,仅在试件顶部使用 4% 浓度的 CaCl<sub>2</sub> 溶液进行冻融试验。欧洲国际材料协会 RILEM 推荐的 CIF 试验方法,试件除顶部和底部密封,底部浸泡在水或 3% 的 NaCl 溶液中进行冻融。平板法和瑞典规范 SS 13 72 44 则是将试件除顶部和底部外密封,在试件的上端部放置盐溶液以实施

冻融循环测试。

### 2.2 降温速率

我国的快冻法和美国 ASTM C666 试验的降温速率介于 10℃/h~15℃/h;ASTM C672 试验降温速率约为 3℃/h;而 CIF 方法在混凝土的冷却与加热过程中,均保持 10℃/h 的速率,且在低于冰点的温度下维持约 7 h。至于 SS 13 72 44 标准,其早期、中期和晚期的冷却速率大约是 5.2℃/h~6.7℃/h、1.7℃/h 以及 0~0.5℃/h。快速降温以及较低的温度会导致更严重的冻融损害,同时低温的持续时间增长也会提升混凝土冻融的严重性。这一现象的出

现是因为在冷冻过程中,如果冷却速度过快,混凝土内部的孔隙水分无法迅速排出,导致冰冻压力升高。温度下降越低,冷冻时间越长,形成的冰量越多,冰冻压力也随之增加。

### 2.3 评价参数

在众多评估混凝土抗冻性能的试验手段中,所使用的评价指标各异。在我国,慢冻法通过检测质量变化和抗压强度的降低来评定混凝土的抗冻能力;相较之下,快冻法以及 ASTM C666 中的 A 法则侧重于质量变化和动态弹性模量的测量。ASTM C672 标准则是观察每 5 次盐冻循环的试件表面侵蚀情况,将侵蚀程度划分为 6 个等级,以此来判定混凝土的抗冻性能;平板法通过测量 56 次循环后的平板表面的剥落质量来评估混凝土的抗冻性<sup>[21]</sup>;SS 13 72 44 法通过测量试件表面的单位面积剥落量来评估混凝土的抗冻性;CIF 方法则是结合动态弹性模量的变化率和表面剥落量来评估混凝土的抗冻性。通过动弹性模量和表面剥落量这两个指标,能够在不同维度上直观、全方位、精准地展现混凝土受到的冻融影响及其耐冻性能。尽管如此,在盐冻环境下的试验中,盐分加速了试件表面的磨损,使得骨料暴露并造成表面粗糙,这会导致动弹性模量的测定结果无法准确体现试件的损伤状况。

### 2.4 不同试验方法评价

现行混凝土的抗冻性试验方法各有优点和不足,并且混凝土的抗冻性试验根据冻融介质的不同可以分为普通冻融试验和盐冻试验。我国的快冻法和慢冻法、美国的 ASTM C666 和 CIF 法属于普通冻融试验。慢冻法存在试验周期长、操作繁琐、误差率高和混凝土在冻融过程中的抗压强度变化不显著等问题,所以用抗压强度来评估其抗冻性能并不恰当。美国 ASTM C666 标准中的 A 法与我国的快冻法特点是:冻融循环时间短,评定指标明确,量化,但冷却速度太快,仅适用于全浸于水的混凝土。而 CIF 试验方法,首先,其单面检测以及降温速度与实际低温条件下混凝土的情境更为契合;其次,在评估冻融造成的损害时,它综合考量了表面的剥落与内部的损伤情况;最后是试验周期短,试验结果具有较高的准确性、重复性和再现性,但不足的是试验设备的造价较高。盐冻试验有我国的单面冻融法、美国 ASTM C672、平板法和瑞典 SS 13 72 44 试验方法。单面冻融法检测手段简化了操作流程,缩短了检测时间,更贴近实际工程中混凝土受冻的情况,还可以从表面的剥蚀和内部的损伤等多个维度进行评估。

美国 ASTM C672 试验,测试时不再使用试件的整个表面积,而是仅将试件的顶部暴露于测试液体中,这一变化对于抵御寒冷气候下混凝土道路所面临的除冰盐侵蚀问题更为有效。同时,ASTM C672 规定的降温速度较为平缓,但在实际应用中,每日的降温速度却呈现出极大的波动性。相较之下,瑞典标准 SS 13 72 44 试验的冻融循环制度更接近日常实际情况,并且适用性更为广泛,但其采用剥落量作为判定指标,相较于快冻法所使用的相对动态弹性模量,其精确度有所不足。

## 3 冻融循环对混凝土性能的影响

### 3.1 混凝土冻融循环后力学性能的变化

邹超英等<sup>[22]</sup>通过试验研究了混凝土进行冻融循环后主要基本力学性能的变化,结果表明,随着冻融循环次数的增加,混凝土试件在轴向压缩、拉伸劈裂以及循环荷载作用下的力学性能呈现递减趋势,且高强度混凝土的下降速度相对较慢。孟令彤等<sup>[23]</sup>试验结果表明,随着冻融循环次数的增加,混凝土的拉伸强度和断裂韧性有所下降,而基于边界效应模型得到的拉伸强度更能精确反映冻融作用后混凝土的损伤程度。赵琦<sup>[24]</sup>对再生混凝土进行冻融循环试验和 CT 扫描试验,研究表明,随着再生骨料替代率的提高和冻融循环次数的增加,再生混凝土的质量损失和抗压强度降低率都呈现上升趋势,而内部孔隙尺寸、密实度和球体度则有所下降,说明微观结构特征对再生混凝土在冻融循环下的宏观性能退化有着显著影响。段安等<sup>[25]</sup>对具有不同配箍特性的混凝土棱柱试件进行冻融循环试验,结果表明,在相同的冻融循环次数条件下,混凝土强度较高的试样,其峰值应力的降幅以及峰值应变的增幅均小于混凝土强度较低的试样。徐存东等<sup>[26]</sup>研究了在不同介质条件下,即清水、3% NaCl 溶液以及 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液,混凝土试件在冻融作用下的力学特性变化情况,试验发现,随着冻融循环次数的增加,试件的抗压强度和相对动态弹性模量持续降低,其降低的速率与冻融的次数及介质种类紧密相关,在整个冻融循环期间,处于 3% NaCl 中的混凝土试件最先出现质量损失率到达 5%,并且其相对动态弹性模量最先降至 60% 以下。张利军<sup>[27]</sup>研究发现,随着冻融循环次数的增加,不同应力水平的预应力混凝土试件的抗压能力以及动弹性模量持续下降,在应力水平较低的情况下,试件的质量损失率与冻融循环的次数呈现反比关系;但试件的应力水平超出

0.3,其质量损失率便随着冻融循环次数的增多而上升。张燕燕<sup>[28]</sup>对添加及未添加钢纤维的超高性能混凝土(UHPC)进行了冻融试验,研究发现,相较于普通混凝土,无论是添加了钢纤维还是未添加钢纤维的UHPC,均展现出卓越的抗冻融能力,钢纤维的加入显著增强了普通UHPC的抗压和抗拉能力,与普通UHPC相较,UHPC-3%在抗压和抗拉强度上分别提升了72.4%和178.7%,在经历800次冻融循环后,其质量损失较低,相对动弹性模量也相对较高。刘方等<sup>[29]</sup>研究发现,纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土经历了硫酸盐侵蚀和碳化作用之后,在冻融循环的影响下,15 nm粒径和30 nm粒径SiO<sub>2</sub>的质量损失率随着冻融次数的上升而上升,相对动态弹性模量表现为下降,但15 nm粒径SiO<sub>2</sub>的质量损失率及相对动态弹性模量的降低程度均小于30 nm粒径SiO<sub>2</sub>,特别是0.6%的15 nm粒径SiO<sub>2</sub>掺入时,试件的损伤程度相对较低,这表明冻融循环对较小粒径纳米改性混凝土造成的损伤相对较轻。Özdağ等<sup>[30]</sup>采用铬铁废渣与粒化高炉矿渣制备的地聚物混凝土抗冻性能进行了研究,结果表明,在相同冻融次数下,粒化高炉矿渣所占比例越高,地聚物混凝土的抗冻能力就越显著提升;当混凝土中铬铁废渣含量分别为100%和75%时,其在150次和200次冻融循环后出现破坏。刘玉霞等<sup>[31]</sup>研究发现,偏高岭土-粉煤灰基地聚合物混凝土在冻融循环次数未超过10次时,混凝土的质量损失率及相对动弹性模量变化并不显著;冻融次数超过10次,混凝土的质量损失率便呈现出显著增长,同时相对动弹性模量的下降速度也明显加快。戈雪良等<sup>[32]</sup>在模拟-40℃低温冻害的条件下制备F300高抗冻等级混凝土冻结应力演变规律进行了研究,研究发现,混凝土遭受冻结时产生的应力与常用的评估混凝土抗冻性能的两个指标质量损失率及相对动弹性模量存在明显的相关性,在混凝土的质量损失率不超过4%时,其冻结应力呈现上升趋势,而当质量损失率介于4%~5%时,冻结应力则达到转折点,之后便开始走低。至于相对动弹性模量,在保留值高于55%的条件下,冻结应力同样呈现出上升的态势;一旦该保留值降至55%以下,冻结应力同样出现转折,由上升转为下降。

综上所述,随着冻融循环次数的递增,混凝土的基本力学性能包括抗压强度、抗拉强度、相对动弹性模量等指标均表现出逐渐下降的趋势,峰值应变显示出递增的趋势。值得注意的是,对于高强度混凝土,其力学性能的下降幅度以及峰值应变的增长速

度相对较小,显示出其在冻融环境下的稳定性相对较好,混凝土在氯盐环境中的损伤程度比在水中的损伤程度更大。针对此种情况,通过添加钢纤维、纳米材料、地聚物等改性手段,可以显著提高混凝土的抗冻融性能。

### 3.2 混凝土冻融循环后与钢筋间黏结性能的变化

Shih等<sup>[33]</sup>在棱柱拉拔试样的重复和单次载荷试验中发现,试样的初始黏结强度、最大黏结强度和残余黏结强度都随冻融循环次数的增加而不断降低;同时,在最大黏结应力影响下,样本的位移增长幅度逐渐加大;特别是在经历冻融破坏之后,高强度混凝土表现出了更为优异的黏结特性。冀晓东<sup>[34]</sup>开展了冻融后钢筋-混凝土界面黏结特性的试验研究,结果表明,在冻融循环条件下光圆钢筋出现拉拔损伤,且随冻融次数增多而加剧。Hanjari等<sup>[35]</sup>通过试验研究了不同的冻融条件下,混凝土和钢筋之间的粘结强度变化规律,结果表明,加固后钢筋与混凝土之间的粘结强度降低,滑移量持续增大。Ma等<sup>[36]</sup>研究了冻融循环与持续荷载共同作用下的钢筋混凝土黏结表现,试验显示,冻融损伤使得混凝土的黏结性能减弱,在冻融损伤较轻微的情况下,持续荷载对普通混凝土的黏结性能影响不大,但当混凝土受到严重冻融损伤及持续荷载影响时,其黏结性能明显降低。曹芙波<sup>[37]</sup>通过对各类冻融循环作用下的再生混凝土试件进行中心拉拔试验,并观察钢筋与再生混凝土结合面的扫描电镜图像,结果表明,在锚固长度相同的情况下,钢筋的直径越大,其能达到的最大承载力越高,但相应的最大黏结应力却会下降,若保持钢筋直径不变,增加锚固长度会导致最大承载力上升,而最大黏结应力则会相应降低。胡孔亮等<sup>[38]</sup>研究了冻融循环与氯离子侵蚀双重作用下,钢筋与混凝土黏结性能的变化情况。研究发现,对于光圆钢筋,其试件呈现出拉拔破坏的特征;而对于带肋钢筋,试件则呈现劈裂破坏的特征。在冻融循环次数较少的情况下,钢筋与混凝土的黏结性能在氯盐侵蚀作用下略有上升;但当冻融循环次数达到或超过25次后,随着氯盐浓度的上升,黏结性能反而降低。赵娟等<sup>[39]</sup>运用扫描电镜技术,对冻融循环作用下钢筋与混凝土交界面的微观构造变化进行了探究,研究发现,冻融作用对钢筋与混凝土交界部的微观形态产生了显著影响,这种影响与界面和钢筋的相对位置密切相关。在冻融作用前结构较为致密的钢筋顶端界面区域,冻融作用后出现了众多细微且密集的冻胀裂缝;而原本较为松散的钢筋底部

界面区域,在经历冻融后形成了取向性更强的凝胶状水化产物。这两种界面的初始致密程度以及水化产物的形成状态,共同决定了在冻融条件下界面损伤的演变过程。余自若等<sup>[40]</sup>在对 UHPC 黏结试件经过冻融循环的黏结特性进行研究,研究发现,在冻融循环完成后,各黏结试件内的 UHPC 未出现任何损伤迹象;UHPC 中钢纤维的含量越多,经历冻融循环后的黏结试件抗劈拉性能的下降速度越缓慢。邓芃等<sup>[41]</sup>进行的地聚物混凝土与螺纹钢筋在复合作用下的拉拔试验分析,研究发现,无论是盐冻循环还是水冻循环处理的试件,其破坏形态与未经历冻融的试件一致,表现为劈裂型破坏;但与未受冻融影响的试件比较,其极限黏结强度普遍有所下降。具体来看,经历 50 次循环的盐冻和水冻试件,其极限黏结强度仅相当于未冻融试件的 56%~67% 和 80%。

综上所述,随着冻融循环次数的增多,钢筋-混凝土界面黏结强度包括极限黏结强度、残余黏结强度下降,高强度混凝土和 UHPC 在冻融环境下表现出更好的黏结特性,而钢筋的直径和锚固长度对黏结性能也有重要影响,在设计中考虑增加钢筋的锚固长度,以提高最大承载力,但需注意最大黏结应力可能会相应降低。在氯盐侵蚀环境中,采取有效的防护措施,减少冻融循环和氯离子侵蚀对黏结性能的叠加影响。另外,关于钢筋与混凝土间的黏结特性,从微观层面的探究目前尚显不足,未来有必要开展更加详尽的分析。

### 3.3 混凝土荷载-冻融循环耦合作用后耐久性的变化

混凝土的耐久性混凝土抵抗外界环境、荷载等因素作用的能力。在实际应用中,混凝土不仅承受冻融环境因素的影响,还要承受来自外部的各种荷载作用,当二者耦合作用时往往会导致混凝土的耐久性发生不同程度的下降。

余红发等<sup>[42]</sup>对混凝土在遭受弯曲荷载、冻融循环以及遭受氯盐侵蚀这三种破坏因素的共同作用下,对其耐久性进行了深入探讨,研究发现,在经过 1 600 次作用后,混凝土试件的抗压强度普遍出现了不同幅度的降低,同时观察到,弯曲荷载对混凝土抗压强度造成的影响存在一个临界值。黄鹏飞等<sup>[43]</sup>研究发现,当多种因素共同作用时,产生的损伤效应超过单一因素所造成的损伤,尤其是当施加弯曲荷载时,混凝土的动弹性模量衰减速度显著提升。在相同试验环境下,观察到高强度混凝土相较于普通混凝土,其损伤发展速度更慢,反映出普通混凝土在

抗损伤能力上逊色于高强度混凝土。慕儒等<sup>[44]</sup>在荷载和冻融循环共同作用下,针对高性能混凝土(HPC)的损伤及抑制损伤进行了深入的试验探究,结果表明,随着施加的应力比的增加,HPC 样本能够承受的冻融循环次数及其抗冻性能均会相应减少,且应力比的增加会导致混凝土损伤和劣化的加剧。张楠等<sup>[45]</sup>研究了在冻融循环与疲劳荷载共同作用下的混凝土性能退化现象,结果表明,在冻融循环次数超过 50 次的情况下,试样的抗压强度衰减及峰值应变损伤速度均呈现出加剧的趋势。龙广成等<sup>[46]</sup>研究发现,自密实混凝土(SCC)在 1/3 应力水平的轴向压力与冻融循环共同影响下,SCC 的劣化速度明显加快,难以承受超过 300 次的冻融循环。孙杰等<sup>[47]</sup>研究表明,纤维混凝土在持续荷载与冻融循环共同作用初期时,耦合应力对减轻纤维混凝土的冻融损伤有积极作用。随着冻融循环次数的增加,当应力水平达到 0.5 时,其与冻融循环的叠加效应显著,导致纤维混凝土的冻融损伤程度加重,而在应力水平为 0.3 的情况下,耦合作用依旧可以有效地减轻由冻融循环引起的损伤。雷斌等<sup>[48]</sup>试验结果表明,在荷载与冻融的共同作用下,随着应力水平从 0 逐步增至 70% 的过程中,再生混凝土的抗压强度衰减率为 27.2%,而普通混凝土的衰减率高达 100%,这证明了在相同环境下,再生混凝土的耐用性能更为出色。同时,较高的应力水平对混凝土性能的退化速度有明显的促进作用。田立宗等<sup>[49]</sup>研究了混凝土在冻融循环和疲劳荷载共同作用下耐久性的劣化规律,结果表明,在荷载-冻融不同种联合作用影响下混凝土相对动弹性模量均表现出下降的趋势。当冻融循环次数与疲劳荷载次数一致时,经历疲劳后再受冻融的混凝土,其相对动弹性模量明显低于先受冻融再疲劳的混凝土,这表明疲劳荷载对混凝土的抗冻性能有显著的削弱作用。

综上所述,应力会加重混凝土劣化进程及破坏水平,并伴随着应力比例的增大而加快,在荷载与冻融循环耦合下,其破坏速度将远远超过单独影响。主要原因是混凝土所承受的荷载与其在冻融过程中的损伤原理有所区别,冻融影响下,试件较早形成微小裂缝,荷载引发的弯曲应力在微裂缝处产生应力集中,从而加速裂缝的迅速扩张。裂缝的加速蔓延不仅加速了自身的扩展和破坏进程,而且进一步加剧了混凝土的冻融损伤。

## 4 混凝土冻融损伤数值模拟研究

在深入分析混凝土在经历冻融循环过程中的损

伤机制时,采用了与试验条件相对应的有限元分析程序进行数值模拟。通过细致地对比模拟结果与试验数据,确保结论的科学性和合理性。当前,这种对比分析方法已被广泛认可,并成为研究混凝土冻融损伤特性的常规技术路径。周禹辛和周晶<sup>[50]</sup>利用 ABAQUS 软件,对各强度等级混凝土在不同的冻融作用下的应力-应变过程进行了数值模拟。研究发现,随着混凝土强度等级的提高,其峰值应力呈上升趋势;但高强度混凝土经过多次冻融循环后,应力-应变曲线的下降趋势更为明显。马德群<sup>[51]</sup>利用 ANSYS 软件对完全饱水状态下的混凝土在冻融过程中的温度场及温度应力进行了仿真模拟,结果表明,在冻融循环的影响下,混凝土内部的冻胀应变呈现出规律性的周期变化,同时在冻融的影响下,混凝土的角部节点承受了最大的拉应力,此应力值超过了设计的抗拉强度,导致了材料的损坏。郜旭<sup>[52]</sup>运用独立单元的有限元分析和离散裂隙分布模型,对混凝土结构进行了细致的划分,包括骨料、砂浆和界面过渡区等主要部分,并且深入研究了在冻融循环过程中,冻胀效应及微小裂痕对混凝土各部分在整体力学性能上的具体影响,然后将经历冻融循环作用后的各个部分重新整合,对整体经历冻融过程的混凝土的宏观力学性能进行了测试。根据模拟数据分析,发现裂缝扩展会使混凝土的非线性特征显著加剧。段安等<sup>[53]</sup>根据热力学及孔隙弹性力学原理,改进已有的冻融损伤数学模型,推导出考虑冻融损伤影响的数学表达式,利用 COMSOL Multiphysics 软件对饱和砂浆受冻试件进行建模,得到了与试验相符的孔隙压力与温度的变化规律。李伟民<sup>[54]</sup>通过热应力耦合原理,采用 ANSYS 软件对结构模型实施热力学与力学性能的双重评估。在模拟过程中,将计算出的温度分布映射至模型,进而生成应力分布图。结合试验与模拟数据得出,加入引气剂可在混凝土中生成大量分布均匀、密闭的微小气泡,可有效减轻孔隙压力,提高抗冻融能力。孟智田等<sup>[55]</sup>构建了一个针对混凝土在冻融循环作用下混凝土水热力损伤耦合模型,以展现其力学性能的变化,模拟发现,当试件中心区域最低温度下降、降温速度加快以及初始孔隙率提高时,混凝土的累计损伤量呈现出上升的趋势。张益多等<sup>[56]</sup>运用 ANSYS 软件模拟研究发现,在反复冻融和疲劳应力共同作用下预应力混凝土受弯构件弯曲挠度和上边缘的应变与试验结果吻合较好,为在冻融循环条件下对预应力混凝土疲劳性能进行数值预测提供了一种实用技术手段。

颀玉龙<sup>[57]</sup>通过多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 模拟混凝土冻融破坏过程,在不同水灰比和含气量条件下,随着冻融循环的累积,混凝土的抗压能力及其相对动弹模量的模拟数值表现出与实际试验结果的一致性,有效填补了传统冻融试验的不足。

综上所述,数值模拟方法在混凝土冻融循环损伤研究中的应用取得了显著的成果。冻融循环数值模拟不仅通过多场耦合、细观分析揭示了混凝土损伤机制,为优化材料配比、改进结构设计和延长服役寿命提供了有力的理论支持,也为混凝土的冻融防护提供了科学的指导方法。然而,由于混凝土冻融循环损伤的复杂性和不确定性,数值模拟方法在实际应用中仍然存在一些挑战和问题,需要进一步的研究和探讨。

## 5 结论与建议

冻融循环对混凝土性能的影响一直是学者们关注的焦点,国内外大量学者开展了混凝土冻融循环后的力学性能、耐久性以及微观结构的研究,取得了大量成果,但仍存在一些不足和局限性,主要是混凝土冻融损伤现有研究主要集中在小范围内进行,缺乏大规模实际工程的数据支持,对于混凝土冻融循环后的性能演变规律及机制的认识还不够全面和准确。且现有研究多数采用试验方法,而对于理论模型和计算方法的研究相对较少,这限制了对混凝土冻融循环后性能变化规律的深入理解和预测能力。

针对以上不足和局限性,未来的研究可以从以下几个方向展开:

(1) 混凝土材料优化与改性。高强度混凝土通常具有更好的抗冻融性能,因此在设计时应考虑使用高强度等级的混凝土;还可以通过添加钢纤维或聚合物纤维、纳米材料和地聚物对混凝土改性,进一步提升抗冻性能。

(2) 优化混凝土配合比。通过降低水胶比可以减少混凝土内部的孔隙率,提高密实度,从而增强抗冻性;使用优质、低吸水性率的骨料,避免使用含泥量高或易风化的骨料,以减少冻融过程中产生的内部应力;掺入粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料,可以改善混凝土的微观结构,减少有害孔隙,提高抗冻性。

(3) 添加抗冻外加剂。在混凝土中掺入引气剂,形成均匀分布的微小气泡,可以有效缓解冻融过程中产生的膨胀压力,提高抗冻性;在低温环境下施

工时,掺入防冻剂可以降低混凝土的冰点,防止早期冻害;高效减水剂可以降低水胶比,提高混凝土的密实度和强度,从而增强抗冻性。

(4) 扩大研究范围,开展更多大规模实际工程的调查和研究,以获取更加全面和准确的数据支持。

(5) 加强理论模型和计算方法的研究,建立更加完善的数学模型和计算框架,以提高对混凝土冻融循环后性能变化规律的预测能力。

## 参考文献:

- [1] Powers T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. Journal of The American Concrete Institute, 1945,16(4):245-272.
- [2] Powers T C, Helmuth R. Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing[J]. Proceedings of the Highway Research Board Proceedings, 1953,32:285-297.
- [3] 刘剑辉,王猛生,杨玉柱,等. 混凝土抗冻融破坏性能研究进展[J]. 硅酸盐学报,2025,53(1):190-211.
- [4] 孟智田. 混凝土冻融损伤过程数值模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024.
- [5] Litvan G Q. Frost action in cement paste [J]. Materials and Structure, 1973,6(34):293-298.
- [6] Fagerlund G. Prediction of the service life of concrete exposed to frost action. Study on concrete technology[M]. Sweden: Cement and concrete Research Institute, 1979.
- [7] Mihta P K, Schiessl P, Raupaeh M. Performance and durability of concrete systems[J]. Proceedings of 5th International Congress on the Chemistry Cement, 1992(1):571-659.
- [8] Setzer M J. Microicelens formation in porous solid[J]. J Colloid Interface Sci, 2001,243(1):193-201.
- [9] Penttala V. Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze-thaw loads [J]. Cement and Concrete Research, 2006,36:921-928.
- [10] Valenza J J, Scherer G W. A review of salt scaling: II. Mechanisms[J]. Cem Concr Res, 2007,37(7):1022-1034.
- [11] Kang Y. Surface scaling mechanism and prediction for concrete [D]. University of Michigan, 2010.
- [12] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理 (I): 毛细管饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报,2007,10(5):522-527.
- [13] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理 (II): 冻融饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报,2012,15(6):741-746.
- [14] Zheng Xinye, Wang Yingrui, Zhang Shaoqi, et al. Research progress of the thermophysical and mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Constr Build Mater, 2022,330:127254.
- [15] American Society of Testing Materials. Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing: ASTM C666—2003[S]. Pennsylvania: American Society of Testing Materials International, 2003.
- [16] American Society of Testing Materials. Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals: ASTM C672—2003 [S]. Pennsylvania: American Society of Testing Materials International, 2003.
- [17] Setzer M J, Auberg R, Kasperek S, et al. Test methods of frost resistance of Concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test reference method and alternative methods A and B[J]. Materials and Structures, 2004,37(10):743-753.
- [18] Tang L, Petersson P E. Freeze/thaw resistance of concrete internal deterioration [J]. Materials and Structures, 2004,37(10):754-759.
- [19] Sweden Institute of Standards. Concrete testing-hardened concrete-scaling at freezing: SS 13 72 44 [S]. Stockholm: Sweden Institute of Standards International, 2005.
- [20] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [21] 闫西乐. 孔结构对水泥基材料抗盐冻性能影响规律的研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [22] 邹超英,赵娟,梁锋,等. 冻融作用后混凝土力学性能的衰减规律[J]. 建筑结构学报,2008,29(1):117-123,138.
- [23] 孟令彤,杨树桐,杨松. 冻融循环条件下混凝土的拉伸强度与断裂韧度研究[J]. 混凝土与水泥制品,2022(10):17-21.
- [24] 赵琦. 基于细观结构表征的再生混凝土冻融性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2022.
- [25] 段安,钱稼茹. 冻融环境下约束混凝土应力-应变全曲线试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3015-3022.
- [26] 徐存东,王海若,陈家豪,等. 盐冻循环对混凝土力学性能的影响及寿命预测[J]. 水电能源科学,2023,41(9):134-138.
- [27] 张利军. 预应力混凝土构件冻融损伤行为[J/OL]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2025:1-7[2025-02-13]. <http://cnki2.699wx.cn/kcms/detail/61.1295.TU.20241024.1000.002.html>.
- [28] 张燕燕. 冻融作用下超高性能混凝土细观结构损伤研究[J]. 混凝土,2023(10):221-224.
- [29] 刘方,张昆昆,罗滔,等. 复杂环境因素下纳米改性混凝土冻融损伤研究[J]. 材料导报,2022,36(8):

- 116-122.
- [30] Özdal M, Karakoç M B, Özcan A. Investigation of the properties of two different slag-based geopolymer concretes exposed to freeze-thaw cycles[J]. *Structural Concrete*, 2021, 22(S1):332-340.
- [31] 刘玉霞, 逯静洲, 田飞翔, 等. 地聚物混凝土在盐水与冻融作用下的损伤研究[J]. *工业建筑*, 2020, 50(4):76-81.
- [32] 戈雪良, 柯敏勇, 刘伟宝, 等. 混凝土冻融作用下冻结应力演化规律及对抗冻性能的影响[J]. *材料导报*, 2024, 38(12):111-115.
- [33] Shih T S, Lee G C, Chang K C. Effect of freezing cycles on bond strength of concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1988(114):717-726.
- [34] 冀晓东. 冻融后混凝土力学性能及钢筋混凝土黏结性能的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
- [35] Hanjari K Z, Utgenannt P, Lundgren K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(3):244-254.
- [36] Ma Zhiming, Zhu Fangzhi, Ba Guangzhong. Effects of freeze-thaw damage on the bond behavior of concrete and enhancing measures[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 196:375-385.
- [37] 曹芙波. 冻融循环后再生混凝土力学性能及与钢筋黏结试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [38] 胡孔亮, 范超, 胡大琳, 等. 冻融循环和氯盐侵蚀作用下钢筋与混凝土的粘结性能[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(4):237-243.
- [39] 赵娟, 巴恒静, 邹超英, 等. 冻融环境下钢筋混凝土间粘结界面的显微结构[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(19):78-80.
- [40] 余自若, 沈捷, 贾方方, 等. 超高性能混凝土与普通混凝土的黏结抗冻性能[J]. *材料导报*, 2017, 31(23):138-144, 176.
- [41] 邓芃, 宋晓晓, 张丽群, 等. 冻融环境下地聚物混凝土和螺纹钢钢筋粘结性能[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(11):4547-4555.
- [42] 余红发, 孙伟, 李美丹. 荷载对混凝土在腐蚀-冻融作用下强度的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(2):297-301.
- [43] 黄鹏飞, 包亦望, 姚燕. 在盐冻循环、钢锈与弯曲荷载协同作用下钢筋混凝土的损伤失效研究[J]. *工业建筑*, 2005(5):63-67.
- [44] 慕儒, 严安, 严捍东, 等. 冻融和应力复合作用下HPC的损伤与损伤抑制[J]. *建筑材料学报*, 1999, 2(4):359-364.
- [45] 张楠. 疲劳荷载与冻融循环多次交互作用下混凝土损伤特性试验研究[D]. 烟台:烟台大学, 2018.
- [46] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性及其损伤模型[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(7):855-864.
- [47] 孙杰, 冯川, 吴爽, 等. 持续荷载与冻融循环耦合作用下纤维混凝土损伤性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(8):2728-2738.
- [48] 雷斌, 李召行, 邹俊, 等. 荷载与腐蚀冻融耦合作用下再生混凝土耐久性性能试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(20):169-174.
- [49] 田立宗, 逯静洲, 朱孔峰, 等. 冻融循环与疲劳荷载作用下混凝土损伤研究[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(2):140-144, 150.
- [50] 周禹辛, 周晶. 冻融循环下混凝土的动态数值模拟分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(5):181-184, 189.
- [51] 马德群. 冻融循环作用下混凝土内部变形监测及模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [52] 郜旭. 混凝土受压和冻融循环过程的ANSYS模拟[D]. 北京:北京交通大学, 2010.
- [53] 段安, 钱稼茹. 混凝土冻融过程数值模拟与分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, 49(9):1441-1445.
- [54] 李伟民. 混凝土冻融循环的试验研究与数值模拟[D]. 保定:河北农业大学, 2017.
- [55] 孟智田, 李宗利. 基于损伤模型的混凝土冻融循环过程数值模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(4):136-143, 152.
- [56] 张益多, 汪鑫, 史康. 预应力混凝土构件冻融环境下疲劳数值模拟[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(5):733-738.
- [57] 颜玉龙. 混凝土冻融破坏的数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.