温度变化速率与混凝土冻融破坏关联性研究

摘要：在寒冷地区或季节性冻融环境下，冻融破坏是影响混凝土结构耐久性的关键因素。本文研究热点是温度变化速率与混凝土冻融破坏之间的关系，通过理论分析，实验研究，数值模拟等方法，对不同温度变化速率下混凝土内部物理化学过程，微观结构演变，宏观性能劣化规律进行深入的研究。研究表明，温度变化速率对混凝土冻融破坏的影响是显著的，较快的温度变化速率会加速混凝土内部损伤积累，降低混凝土的抗冻融性能。本文研究成果为混凝土结构在冻融环境下的耐久性设计与评估提供了重要理论依据和技术支持。

关键词：温度变化速率；混凝土；冻融破坏；微观结构；宏观性能

1 引言

混凝土是目前现代土木工程中使用最广泛的建筑材料，混凝土的耐久性关系到结构安全与使用寿命。在寒冷地区，混凝土结构长期处在正负温相互交替的环境中，冻融循环作用是造成混凝土性能劣化的最主要因素之一。据统计，在严寒地区，由于冻融破坏混凝土结构的维修或重建费用占总维护费用的相当一部分。温度变化速率是冻融循环过程中的一个重要参数，对混凝土内部水分的迁移，冰晶的生长，孔隙压力变化等过程都有很大的影响。然而，目前关于温度变化速率与混凝土冻融破坏的关联性研究还很少，也还没有形成系统的理论体系。深入研究温度变化速率对混凝土冻融破坏的影响规律，对准确评价混凝土结构在冻融条件下的耐久性、制定合理的抗冻融设计标准、开发有效的防护措施具有重要的理论和实际意义。

2 混凝土冻融破坏基本理论

2.1 混凝土的微观结构特征

混凝土是多相复合材料，它的微观结构主要由水泥石，骨料以及水泥石，骨料三者之间的界面过渡区组成。水泥石中存在大量孔径不等的孔隙，孔隙的种类有凝胶孔，毛细孔，大孔等。凝胶孔孔径小，一般在 10nm 以下，毛细孔孔径在 10nm-1000nm 之间，大孔大于 1000nm。骨料是混凝土的骨架，界面过渡区是水泥石与骨料的薄弱环节，孔隙率大，结构松散。

2.2 混凝土冻融破坏的主要理论

2.2.1 静水压理论

当混凝土中水冻结成冰，体积膨胀约 9%。封闭孔隙中的冰晶膨胀会产生静水压，当静水压超过混凝土抗拉强度时，混凝土内部就会产生微裂缝。随着冻融循环次数的增加，微裂缝不断扩展、连通，直至混凝土结构破坏。

2.2.2 渗透压理论

混凝土冻融过程中，由于孔隙中的水分冻结，造成孔隙溶液中溶质浓度的升高，形成浓度差。在浓度差作用下，未冻结的水分向冻结区迁移，生成渗透压。渗透压与静水压共同作用加剧混凝土内部的损伤。

2.3.3 冰晶生长压力理论

混凝土孔隙中水分随着温度的降低逐渐冻结成为冰晶。冰晶在生长过程中会对周围的水泥石形成压力，当压力超出水泥石的承受能力时，就会造成水泥石结构破坏。同时冰晶生长可引起水分迁移重分布，从而进一步加速混凝土冻融破坏。

2.3 温度变化速率对冻融破坏过程的影响途径

温度变化速率主要是通过混凝土内部水分的迁移速度，冰晶的生长速率以及孔隙压力的变化速率对冻融破坏过程的影响。当温度变化速率较高时，水分还来不及充分迁移，使水在局部地区形成较大的冰晶，形成较大的膨胀压力；孔隙压力的快速变化，也将使混凝土内部应力集中，加速微裂缝的产生和扩展。

3 实验研究

3.1 实验材料与配合比

本实验所用水泥为普通硅酸盐水泥，强度等级严格按照 42.5R 标准。该类水泥水化特性好，凝结时间适中，能为混凝土提供稳定可靠的强度发展基础。在实际工程应用中，通常所用水泥为 5R 普通硅酸盐水泥，其各项性能参数经过长期的实践证明，完全适合本次混凝土冻融破坏特性研究的实验需要。粗骨料采用连续级配碎石，最大粒径精心控制在 20mm。连续级配可使骨料在混凝土中堆积牢固，有效地减少孔隙率，增强混凝土的密实性和力学性能。碎石质地坚硬，强度高，能承受较大荷载作用，且抗磨损性能好，有助于模拟混凝土在复杂环境下的实际受力情况。细骨料采用河砂，细度模数为 2.6 中砂。河砂颗粒形状圆润，表面洁净，对水泥浆体黏结性能好，有利于提高混凝土的工作性能与耐久性。减水剂采用聚羧酸系高性能减水剂，具有良好的分散性能。在混凝土搅拌过程中，大大降低了水泥颗粒之间的团聚，使水泥颗粒均匀地分散在浆体中，这样在不增

加用水量的前提下，可以有效地提高混凝土的流动性。同时聚羧酸系减水剂还可以降低混凝土内孔数，改善孔隙结构，提高混凝土强度和抗渗性能。引气剂是松香热聚物，它能在混凝土中加入微小、均匀、稳定的气泡，在混凝土冻融循环过程中起到缓冲作用，能够缓解由于水分冻结膨胀产生的内部压力，提高了混凝土的抗冻融性能。混凝土配合比经过严谨设计，水胶比确定为 0.45。该水胶比既能使水泥充分水化，又使混凝土具有适宜的工作性能与强度。水泥用量为 350kg/m³，为混凝土提供必要的胶凝作用。砂用量 650kg/m³，石子用量 1150kg/m³，两者配合成骨架结构。水泥水化反应和混凝土工作性用水量 157.5kg/m³。减水剂掺量为 0.8%，引气剂掺量为 0.02%，严格控制外加剂的掺量，使之在混凝土中发挥最大的性能。

3.2 实验设计与方法

3.2.1 温度变化速率

为研究温度变化速率对混凝土冻融破坏的影响，特设置了三组不同的温度变化速率。分别为 0°C/min，1°C/min，2°C/min。选用具备高精度温控能力的专业设备对混凝土试件进行冻融循环试验。冻融温度范围严格控制在-20°C-20°C，模拟寒冷地区实际环境温度的大幅波动情况。每一个冻融循环周期设定为 4 h，周期时长，综合考虑了实际环境中的温度变化的周期性以及实验研究的可操作性与效率，能够较为真实地反映混凝土在长期冻融循环作用下的性能变化。

3.2.2 试件制备与养护

将上述精挑细选的混凝土原材料按预定配合比准确称量后，投入强制式搅拌机内充分搅拌。搅拌时严格控制搅拌时间及转速，确保各种原材料的均匀混合，使混凝土拌和物具有良好的和易性。随后，将搅拌均匀的混凝土拌合物小心浇筑到 100mm×100mm×100mm 的立方体试模中，在浇筑过程中用振捣棒进行振捣，排除混凝土内部的气泡，保证试件的密实度。浇筑结束后，试模在 20±2°C，相对湿度 95%以上的标准养护条件下养护 28d。在这个标准养护期内，混凝土能够充分的水化反应，发展强度与性能，为后面的冻融循环试验提供稳定的、有代表性的试件基础。28 天养护期满后，小心取出试件，编号标记，准备冻融循环试验。为充分监测混凝土试件在冻融循环过程中性能的变化，定期对其进行多维度性能测试。主要测试指标有质量损失率、动弹模量和抗压强度。通过高精度电子

天平称量试件不同冻融循环次数后的质量，并与初始质量对比计算。精确的称量过程能反映混凝土在冻融循环过程中由于表面剥落、内部结构破坏等原因所引起的质量变化情况。

动弹模量采用共振法测定，通过专用的动弹模量测定仪，激发试件产生共振，根据共振频率与试件尺寸等参数计算出动弹模量。该方法能有效反映混凝土内部微观结构的损伤程度。抗压强度试验是严格按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)测试，将达到预定冻融循环次数的试件置于压力试验机上，按规定的加载速率加压，直至试件破坏，记录破坏荷载，计算出抗压强度，直观体现冻融循环作用后的混凝土承载能力变化。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 质量损失率与冻融循环次数的关系

随着冻融循环次数的增加，混凝土试件的质量损失率逐渐增大。同一冻融循环次数下，温度变化速率越大，混凝土试件质量损失率越大。这是因为温度变化速率较快，导致混凝土内部水分迁移和冰晶生长剧烈，对混凝土结构破坏作用更强，因而使更多的水泥石和骨料颗粒脱落，质量损失增大。

3.3.2 动弹模量随冻融循环次数的变化

混凝土试件的动弹模量随冻融循环次数增加而逐渐降低，温度变化速率对动弹模量的影响较大，温度变化速率为 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的试件动弹模量下降速度最快，50次冻融循环后动弹模量下降约40%；温度变化速率为 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的试件动弹模量下降相对较慢，相同冻融循环次数下动弹模量下降约25%。这说明较快的温度变化速率，会加速混凝土内部微裂缝的产生和扩展，使混凝土内部结构损伤加剧，动弹模量快速降低。

3.3.3 抗压强度随冻融循环次数的变化

混凝土试件的抗压强度随冻融循环次数的增加而降低。温度变化速率越快，抗压强度下降幅度越大。温度变化速率对冻融循环初期抗压强度的影响较小，随着冻融循环次数的增加，影响越来越显著。这是因为在冻融循环初期，混凝土内部损伤积累较小，抗压强度主要由混凝土的初始强度决定；而冻融循环进行中，温度变化速率较大，混凝土内部微裂缝发展较快，混凝土结构承载能力降低，抗压强度大大降低。

4 温度变化速率对混凝土冻融破坏的微观机制

4.1 微观结构观测方法

采用扫描电子显微镜 SEM 对不同冻融循环次数，温度变化速率下的混凝土试件进行微观结构观测。把混凝土试件从中间劈开，选取有代表性的部位进行喷金处理，在 SEM 下观察其微观结构特征，分析水泥石，骨料及界面过渡区的变化情况。

4.2 温度变化速率下微观结构演变规律

4.2.1 水泥石微观结构变化

水泥石中的孔隙结构，在较低的温度变化速率下，如在 $0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温度变化速率下，经过一定次数的冻融循环后，虽有微裂缝出现，但较少，且较窄。随着温度变化速率的增加， $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 和 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 水泥石中的孔隙结构遭到严重的破坏，形成大量的微裂缝并互相连通，形成较为复杂的裂缝网络。同时，水泥石表面粗糙、部分水泥颗粒脱落，表明水泥石结构完整性受到较大影响。

4.2.2 骨料与界面过渡区微观结构变化

骨料与界面过渡区，在冻融循环过程中是混凝土内部薄弱环节。在较小的温度变化速率下，界面过渡区与骨料间的粘结相对较好，仅在界面处出现少量微裂缝。但当温度变化速率比较快时，界面过渡区的微裂缝数量明显增多，且裂缝的宽度较大，部分骨料与水泥石之间脱粘现象明显。这是因为较快的温度变化速率导致界面过渡区水分迁移和冰晶生长不均匀，产生较大的应力集中，从而破坏了骨料与水泥石之间的黏结。

4.2.3 微观结构变化对宏观性能的影响

混凝土的宏观性能与其微观结构密切相关。微观结构中水泥石的破坏、骨料与界面过渡区的脱粘等现象，导致混凝土内部孔隙率增加，结构完整性遭到破坏，从而使得混凝土的质量损失率增大、动弹模量降低、抗压强度下降。因此，温度变化速率通过影响混凝土的微观结构演变，进而对其宏观性能产生显著影响。

5 数值模拟分析

5.1 数值模型的建立

基于有限元软件，建立混凝土冻融过程的数值模型。考虑温度场、湿度场以及应力场的耦合作用，采用多孔介质理论描述混凝土内部的水分迁移，利用热传

导方程求解温度场分布，通过力学平衡方程计算混凝土内部的应力应变。模型中考虑了混凝土的材料参数、孔隙结构特征以及温度变化速率等因素。

5.2 模拟参数的确定

根据实验所用混凝土材料的性能测试结果，确定数值模型中的材料参数，如弹性模量、泊松比、热膨胀系数、导热系数等。孔隙结构参数通过压痕试验等方法测定，包括孔隙率、孔径分布等。温度变化速率按照实验设定的值进行输入。

5.3 模拟与实验对比验证

数值模拟得到的混凝土质量损失率、动弹模量和抗压强度随冻融循环次数的变化结果与实验结果做一比较。从对比结果看，数值模拟结果与实验结果具有较好的一致性，能较好地反映温度变化速率对混凝土冻融破坏的影响规律。这说明所建立的数值模型具有一定的可靠性，可以用于混凝土在不同冻融条件下的性能劣化过程的进一步研究。

5.4 基于数值模拟的影响因素分析

利用数值模型，进一步分析温度变化速率、冻融循环次数、混凝土初始饱和度等对混凝土冻融破坏的影响。结果表明，温度变化速率和冻融循环次数对混凝土的损伤发展具有显著的协同作用，较高的温度变化速率和较多的冻融循环次数会造成混凝土内部损伤的快速累积。混凝土初始饱和度越高，冻融循环过程中受损越多。

结论

本文通过理论分析，实验研究，数值模拟等方法，系统地研究了温度变化速率与混凝土冻融破坏之间的关联性，得出主要结论：温度变化速率对混凝土冻融破坏的影响很大，温度变化速率越快，会加速混凝土内部水分迁移，冰晶生长及孔隙压力变化，从而导致混凝土质量损失率增大，动弹模量降低，抗压强度下降。微观结构观测表明，温度变化速率通过影响水泥石、骨料与界面过渡区的微观结构演变，进而对混凝土的宏观性能产生影响。较快的温度变化速率会使水泥石中孔隙结构破坏加剧，骨料与界面过渡区出现大量微裂缝和脱粘现象。数值模拟结果与实验结果具有较好的一致性，所建立的数值模型能够有效模拟温度变化速率对混凝土冻融破坏的影响过程，为进一步研究混凝土在复杂冻融环境下的性能劣化提供了有力工具。

参考文献

- [1]屈春来,王晓阳,刘世伟.变化温度下岩石混凝土界面剪切损伤特征[J].水电能源科学,2024,42(06):102-105+133.
- [2]关薇;康智明.水电站混凝土预冷预热技术研究与应用[M].中国水利水电出版社:202112.238.
- [3]李俊广.大体积混凝土承台温度监控与理论对比探讨[J].智能城市,2020,6(07):209-210.
- [4]胡川,李玉杰,黄海涛,王渊,李诗昊.高寒高海拔特长公路隧道温度场分布效应[J].筑路机械与施工机械化,2020,37(Z1):10-16.