

ICS

CCS

T/GXDSL

团 体 标 准

T/GXDSL — 2026

水利工程混凝土抗冻耐久性提升技术规范

Technical Specification for Enhancing the Frost Resistance and Durability of
Concrete in Water Conservancy Projects

（工作组讨论稿）

（本草案完成时间：2026-01-22）

2026 - - 发布

2026 - - 实施

广西电子商务企业联合会 发布

目 次

前 言 II

1 引言 1

2 范围 1

3 规范性引用文件 1

4 术语和定义 2

5 总则 3

6 原材料技术要求 3

7 配合比设计 4

8 施工工艺控制 5

9 质量检验与评定 6

10 运行维护 6

11 附则 6

前 言

本文件依据GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广西产学研科学研究院提出并宣贯。

本文件由广西电子商务企业联合会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

水利工程混凝土抗冻耐久性提升技术规范

1 引言

水利工程混凝土结构长期处于水位变动区、浪溅区及严寒环境，遭受冻融循环作用是导致其性能劣化、服役寿命缩短的主要因素之一。在我国北方、高海拔及部分季节性冻土地区，混凝土冻害问题尤为突出，直接影响到水工建筑物的安全运行、功能发挥与长期经济效益。混凝土冻融破坏是一个复杂的物理力学过程，主要表现为表面剥落、砂浆流失、骨料暴露，进而削弱结构断面、加速钢筋锈蚀，最终危及整体稳定。提升混凝土抗冻耐久性，是保障水利基础设施在全生命周期内安全可靠、降低维护成本、实现可持续发展的关键工程技术挑战。当前，在工程实践中仍存在对冻融环境认识不足、材料选择不当、配合比设计不合理、施工质量控制不严、防护措施缺乏等问题，亟需制定统一、科学、可操作的技术规范予以系统指导。本规范基于水工混凝土冻融破坏机理，充分吸纳国内外最新研究成果与工程实践经验，对混凝土原材料选择、配合比设计与优化、生产与施工全过程工艺控制、质量检验评定及运行维护等关键环节的抗冻耐久性提升技术作出全面规定。本规范由广西产学研科学研究院联合水利行业科研院所、工程设计单位、施工企业及材料生产商共同研制。

2 范围

本规范规定了提升水利工程混凝土抗冻耐久性的原材料技术要求、配合比设计方法、生产与施工工艺控制、质量检验与评定以及运行维护措施。本规范适用于大坝、水闸、溢洪道、输水渡槽、隧洞衬砌、渠道衬砌、泵站、桥涵等水工建筑物中遭受冻融循环作用的新建、改建与加固混凝土工程的设计、施工与质量控制。其他涉水及寒冷地区的混凝土工程可参照执行。

3 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 50476-2019 混凝土结构耐久性设计标准

GB/T 50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

SL 191-2008 水工混凝土结构设计规范

SL 677-2014 水工混凝土施工规范

DL/T 5144-2015 水工混凝土施工规范（电力行业）

GB 175-2020 通用硅酸盐水泥

GB/T 1596-2017 用于水泥和混凝土中的粉煤灰

GB/T 18046-2017 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉

GB/T 18736-2017 高强高性能混凝土用矿物外加剂

GB/T 8076-2008 混凝土外加剂

JGJ 55-2011 普通混凝土配合比设计规程（相关原则参考）

GB/T 50080-2016 普通混凝土拌合物性能试验方法标准

ASTM C666/C666M-15 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing（试验方法参考）

4 术语和定义

4.1 混凝土抗冻耐久性：指混凝土在饱水状态下，能够抵抗冻融循环作用而保持其原有性能（如强度、动弹性模量、质量）不显著降低的能力。

4.2 快速冻融循环试验：指在实验室标准条件下，使混凝土试件在规定的温度区间（通常为 $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 至 $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ）的水中或盐溶液中反复快速冻结和融化，用以加速评价其抗冻性能的试验方法。

4.3 抗冻等级：表示混凝土抗冻性能的等级，以经受快速冻融循环的次数来划分，如F50、F100、F150、F200、F250、F300、F400等，其中F后的数字表示混凝土能承受且满足相关判定指标的冻融循环次数。

4.4 气泡参数：指硬化混凝土中由引气剂引入的微小、独立、稳定的气泡系统的特征参数，主要包括含气量、气泡间距系数和平均气泡直径。气泡间距系数是指硬化混凝土中任意点到最近气泡边缘的最大距离，是评价引气效果、预测抗冻性的关键指标。

4.5 耐久性指数：指混凝土试件经受规定次数（如 300 次）快速冻融循环后，其动弹性模量与初始动弹性模量的百分比值（DF 值）。

4.6 盐冻环境：指混凝土接触或可能接触除冰盐、海水、盐湖水或其他含有害盐分的溶液，并同时遭受冻融循环作用的恶劣环境，其破坏机理和严重程度均不同于纯水冻融。

4.7 水位变动区：指水工建筑物在运行期间，由于水位升降变化而周期性干湿交替的区域，此区域混凝土饱水程度高，是冻融破坏最严重的部位。

4.8 引气剂：指在混凝土搅拌过程中能引入大量均匀分布、稳定封闭的微小气泡，以改善混凝土拌合物和易性、提高硬化混凝土抗冻耐久性的外加剂。

5 总则

水利工程混凝土抗冻耐久性提升应遵循“以防为主、源头控制、系统提升、全周期管理”的原则。应基于工程所处的具体环境条件（包括气候分区、最低月平均气温、冻融循环次数、是否接触盐分等）、结构部位的重要性及设计使用年限，科学合理地确定混凝土的抗冻等级设计目标。所有技术措施应贯穿于混凝土结构的设计、材料选择、配合比设计、生产施工、质量检验及运行维护的全过程，形成完整的技术链。在材料选择与配合比设计上，应确保混凝土具备高密实度、高抗渗性以及优化的含气量系统（即适宜的气泡参数）。在施工过程中，应严格控制各工序质量，确保混凝土的均质性与施工质量，特别是保证引入的气泡系统在振捣和养护过程中不被破坏。应积极采用经工程验证的新材料、新技术与新工艺，但必须进行充分的试验论证。抗冻耐久性提升工作应与结构整体耐久性设计相协调，并符合 GB/T 50476 及 SL 191 的相关规定。

6 原材料技术要求

水泥宜选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，强度等级不宜低于 42.5。水泥的化学组成和矿物组成应稳定，铝酸三钙（C3A）含量宜控制在 6%-8%以内，以降低水化热、提高抗硫酸盐侵蚀能力，并有利

于与高效减水剂和引气剂的相容性。在严重冻融或盐冻环境下，可优先选用中热硅酸盐水泥或低热硅酸盐水泥。

矿物掺合料的合理使用是提升混凝土抗冻耐久性的重要技术途径。粉煤灰应选用品质稳定的 I 级或 II 级 F 类低钙灰，其烧失量不宜大于 5.0%，需水量比不宜大于 105%。粒化高炉矿渣粉宜选用 S95 级或 S105 级。硅灰的二氧化硅含量不应低于 85%，比表面积不宜小于 15000 m²/kg。复合使用矿物掺合料时，应通过系统的试验确定最优掺量和组合比例。对于有抗冻要求的混凝土，单掺粉煤灰时，掺量不宜超过胶凝材料总量的 30%；单掺矿渣粉时，掺量不宜超过 50%；掺用硅灰时，掺量宜为 5%~10%。复合掺用时，总掺量应根据试验确定，并注意其对早期强度、碳化性能及气泡稳定性的影响。

骨料的质量对抗冻性影响显著。粗骨料应选用质地坚硬、致密、洁净、级配良好的碎石或卵石，岩石的饱和抗压强度不应低于混凝土设计强度的 1.5 倍。粗骨料的最大粒径不宜超过 40mm，且不应超过钢筋最小净间距的 3/4 或结构断面最小尺寸的 1/4。粗骨料的吸水率应严格控制，对于抗冻等级不低于 F150 的混凝土，粗骨料吸水率不宜大于 1.5%；对于 F250 及以上的混凝土，不宜大于 1.0%。粗骨料的坚固性（硫酸钠溶液法 5 次循环后的质量损失）不应超过 5%（严寒地区）或 8%（寒冷地区）。细骨料宜选用级配良好的中粗河砂或机制砂，细度模数宜在 2.3~3.0 之间。含泥量（按质量计）不应超过 2.0%，泥块含量不应超过 0.5%。当使用机制砂时，应严格控制石粉含量和颗粒形态。

外加剂的选择与复配至关重要。必须掺加高效引气剂，且应选用气泡性能优良、质量稳定的产品。引气剂引入的气泡应细小（平均气泡直径宜在 50~200 μm）、均匀、稳定，在混凝土拌和、运输、浇筑过程中含气量损失小。高效减水剂（或高性能减水剂）应与水泥和引气剂具有良好的相容性，以在低水胶比下保证混凝土的工作性。在盐冻环境下，可考虑掺加能改善混凝土抗盐冻剥蚀性能的有机硅类憎水剂或其他表面防水材料。所有外加剂的品种和掺量必须通过混凝土试配试验确定，并符合 GB 8076 等相关标准。

拌和与养护用水应符合《水工混凝土施工规范》的要求，不得使用海水、污水或含有影响水泥正常凝结硬化及对钢筋有腐蚀作用杂质的水。

7 配合比设计

混凝土配合比设计应在满足强度、工作性等基本要求的前提下，以实现设计要求的抗冻等级为核心目标。设计抗冻等级应根据环境类别与作用等级确定。对于严寒和寒冷地区重要工程的水位变动区、浪溅区混凝土，抗冻等级不应低于 F300；温和地区同类部位不应低于 F200；对于接触盐分的盐冻环境，

抗冻等级应较纯水冻融环境提高一个等级。

配合比设计的关键参数必须严格控制。水胶比是影响混凝土抗冻性的决定性因素之一。对于有抗冻要求的混凝土，最大水胶比必须满足 GB/T 50476 的规定。建议对于设计抗冻等级为 F150、F200、F250、F300 及以上的混凝土，其最大水胶比分别不宜超过 0.50、0.45、0.42、0.40。胶凝材料用量应在满足工作性和强度要求的前提下确定，不宜过低，以保证混凝土的密实性，对于抗冻混凝土，最小胶凝材料用量不宜低于 300 kg/m^3 （对于大体积内部混凝土可适当降低）。砂率应通过试验确定，在保证混凝土拌合物粘聚性和保水性的前提下，选择最优砂率。

含气量的控制是抗冻混凝土配合比设计的核心。适宜的含气量能显著缓冲冻融过程中产生的静水压力和渗透压力。含气量应根据骨料最大粒径、混凝土抗冻等级及环境条件确定。对于采用最大粒径为 20mm 的骨料，建议含气量控制范围为 4.5%-6.0%；对于最大粒径为 40mm 的骨料，建议为 4.0%-5.5%。在盐冻环境下，含气量可取上限或略高于上限。必须通过试验确定引气剂的准确掺量，并在配合比设计中明确。除了控制新拌混凝土的含气量，更重要的是保证硬化混凝土具有优良的气泡参数体系。硬化混凝土的气泡间距系数是评价其抗冻潜力的关键指标，对于抗冻等级 F300 及以下的混凝土，气泡间距系数不宜大于 $250 \mu\text{m}$ ；对于 F300 以上或严酷盐冻环境，不宜大于 $200 \mu\text{m}$ 。这需要通过选择优质引气剂和优化配合比与工艺来实现。

8 施工工艺控制

施工质量是实现设计抗冻目标的关键环节。混凝土拌制必须采用强制式搅拌机，搅拌时间应比普通混凝土适当延长，确保引气剂分布均匀，拌合物匀质性好。搅拌过程中应监测拌合物的温度，冬季施工时，拌合物出机温度不宜低于 10°C ；夏季施工时，不宜高于 30°C ，以利控制开裂。

运输与浇筑过程应防止离析和含气量损失。运输工具应密闭，尽量减少转运次数。浇筑前应检查模板内是否清洁、无积水。混凝土应分层浇筑，分层厚度不宜超过振捣棒作用部分的 1.25 倍。振捣密实与养护是保证混凝土实际抗冻性能的重中之重。必须采用合理的振捣工艺，既保证混凝土密实，又不过度振捣导致引入的宝贵气泡大量逸出。一般使用插入式振捣器，应快插慢拔，振捣时间以混凝土表面泛浆、无明显气泡冒出为准，通常每个点振捣时间为 15-30 秒。严禁长时间在同一位置振捣。

混凝土浇筑完毕后，必须及时进行保温保湿养护。养护对于保证水泥充分水化、减少塑性收缩和温度裂缝、提高混凝土表层密实度和强度至关重要。养护开始时间应在混凝土终凝前（浇筑完毕后 6-12 小时内），洒水或覆盖保湿养护。养护时间对于抗冻混凝土应不少于 14 天，对于掺用大量矿物掺合料

的混凝土，应不少于 21 天。养护期间应保持混凝土表面持续湿润。冬季施工应采取有效的保温措施，防止混凝土早期受冻。混凝土构件在达到足够强度（通常为设计强度的 40%以上，且不低于 5MPa）前，不得遭受冻害。

9 质量检验与评定

混凝土抗冻耐久性的质量检验应贯穿于施工全过程。原材料进场应按批次检验，检验项目和频率应符合相关标准规定。应对每盘或每批次混凝土拌合物进行坍落度、含气量的检测，其中含气量允许偏差应为设计值的 $\pm 1.0\%$ 。硬化混凝土的质量检验主要包括抗压强度、抗渗等级和抗冻等级。抗冻性能检验应按 GB/T 50082 规定的快冻法执行。评定批混凝土的抗冻等级应以标准养护 28 天的试件试验结果为准。当设计有要求时，也可进行气泡间距系数的测定，作为辅助评价指标。对于重要工程或抗冻等级要求较高（F300 及以上）的混凝土，宜在施工初期进行现场钻取芯样，对实际结构混凝土的抗冻性能进行验证性试验。

10 运行维护

工程运行期间，应对水工混凝土结构的冻融损伤状况进行定期检查与监测。检查周期宜为每年汛前和汛后各一次，严寒地区应在春季融冻后增加一次专项检查。检查重点为水位变动区、浪溅区、阴面等易冻部位，观察是否有表面剥落、砂浆流失、裂缝扩展等迹象。对于发现的局部冻融损伤，应及时进行修补。修补材料应选用抗冻性能不低于原设计要求的专用修补材料，并严格按修补工艺施工。在可能的情况下，对处于严重冻融和盐冻环境的重要结构，可考虑采取表面涂层防护、增设防冰撞设施等附加防护措施，以延长结构使用寿命。

11 附则

11.1 本规范自发布之日起实施。

11.2 各相关单位在水利工程混凝土抗冻耐久性提升的设计、施工与质量控制中，可参照本规范执行。

11.3 本规范所引用的国家标准和行业标准，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

11.4 随着材料科学与施工技术的进步，本规范将适时进行修订。
