

朱伟庆,张亚飞,张丽华,等. 盐冻环境下混凝土桥梁服役性能演变规律及耐久性评价指标综述[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025, 45(1): 69-91.

ZHU Wei-qing, ZHANG Ya-fei, ZHANG Li-hua, et al. Review on evolution law of service performance and durability evaluation indexes of concrete bridges in salt-frozen environment[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(1): 69-91.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.01.007

# 盐冻环境下混凝土桥梁服役性能演变规律及 耐久性评价指标综述

朱伟庆<sup>1</sup>, 张亚飞<sup>1</sup>, 张丽华<sup>2</sup>, 贾金青<sup>2</sup>, 殷天扬<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**为揭示盐冻环境下混凝土桥梁服役性能演变规律,对在役混凝土桥梁的耐久性设计与科学  
养护提供决策依据,总结盐冻环境下混凝土桥梁的典型病害和空间分布,分析盐冻环境下混凝土和  
钢筋材料、混凝土构件性能劣化规律与机理,并提炼出影响因子及影响规律,凝练出盐冻环境下混  
凝土桥梁服役状况演变的材料-构件-结构的关联特性,系统梳理规范中混凝土桥梁耐久性评价指  
标及其检测方法,在此基础上建立盐冻环境下混凝土桥梁的耐久性评价指标体系,并建议各指标的  
警戒阈值和极限阈值。研究表明:盐冻环境下混凝土桥梁典型病害为梁体和桥墩的混凝土剥  
落及钢筋锈蚀,且表现出显著的空间分布特征,北方寒冷和严寒地区,尤其是沿海与盐渍土地区混  
凝土桥梁的盐冻病害更加严重;盐冻环境下材料性能演变可以大致分为初始阶段、发展阶段与加速  
阶段,各阶段中混凝土构件的承载能力退化由混凝土与钢筋力学性能以及二者之间黏结性能下降  
共同导致;影响材料、构件性能劣化的因子可归结为水胶比、掺和料、外加剂、保护层厚度、钢筋种  
类、持载状态与初始裂缝等方面;混凝土桥梁的性能劣化主要表现为其关键混凝土构件的性能劣  
化,但其服役状况演变通过应力或受力状态在材料、构件、结构 3 个层面存在显著关联;规范中的耐  
久性指标可划分为材料属性、混凝土损伤、氯离子侵蚀、钢筋锈蚀 4 类;建立的耐久性评价指标体系  
充分考虑了指标的使用频率与可检测性,且可全面体现盐冻环境下混凝土桥梁典型病害特征;未来  
应进一步开展疲劳荷载和盐冻循环耦合作用下混凝土构件性能演变方面的研究,基于大数据和机  
器学习技术,建立理论和数据双驱动的盐冻环境下混凝土桥梁服役状态演变模型,并结合更深入的  
理论研究及先进技术,提出综合性评价指标和更精确、更效率的检测方法。

**关键词:**桥梁工程;服役性能;综述;混凝土桥梁;耐久性;评价指标;盐冻环境

中图分类号:U448.21

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2025)01-0069-23

## Review on evolution law of service performance and durability evaluation indexes of concrete bridges in salt-frozen environment

ZHU Wei-qing<sup>1</sup>, ZHANG Ya-fei<sup>1</sup>, ZHANG Li-hua<sup>2</sup>, JIA Jin-qing<sup>2</sup>, YIN Tian-yang<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Faculty of  
Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

收稿日期:2024-08-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2601000);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102214916)

作者简介:朱伟庆(1987-),男,湖南娄底人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhuweiqing@chd.edu.cn。

**Abstract:** In order to reveal the evolution law of the service performance of concrete bridges in salt-frozen environment and provide decision-making basis for the durability design and scientific maintenance of in-service concrete bridges, the typical diseases and spatial distribution of concrete bridges in salt-frozen environment were summarized. The deterioration law and mechanism of the performance of concrete and steel bar and concrete members in salt-frozen environment were analyzed, and the influencing factors and laws were extracted. The correlation characteristics of material-member-structure of the service condition evolution of concrete bridges in salt-frozen environment were extracted. The durability evaluation indexes and detection methods of concrete bridges in the specification were systematically sorted out. On this basis, the durability evaluation index system of concrete bridges in salt-frozen environment was established. The warning thresholds and limit thresholds of various detection indexes were proposed. The results show that the typical diseases of concrete bridges in salt-frozen environment are concrete spalling and steel corrosion of beams and piers, and show significant spatial distribution characteristics. The salt-frozen diseases of concrete bridges are more serious in northern cold and severe cold regions, especially in coastal and saline soil areas. The performance evolution of materials in salt-frozen environment can be roughly divided into initial stage, development stage and acceleration stage. The degradation of bearing capacity of concrete members in each stage is caused by the mechanical properties of concrete and steel bars, as well as the decrease of bonding performance between them. The factors affecting the performance degradation of materials and concrete members can be attributed to water-binder ratio, additive material, air entraining agent, protective layer thickness, steel bar type, loading state and initial cracks. The performance degradation of a concrete bridge is mainly manifested in the performance degradation of its key concrete members, but the evolution of its service status is significantly related to the three levels of material, component and structure through stress or stress state. The durability indexes in the specification can be divided into four categories, material properties, concrete damage, chloride ion erosion and steel corrosion. The established durability evaluation index system fully considers the use frequency and detectability of the index, and can fully reflect the typical disease characteristics of concrete bridges under salt-frozen environment. In the future, the research on the performance evolution of concrete members under the coupling of fatigue load and salt freezing cycle should be further carried out. At the same time, based on big data and machine learning technology, a theoretical and data-driven service state evolution model of concrete bridges in salt frozen environment should be established. Furthermore, combined with more in-depth theoretical research and advanced technology, a comprehensive evaluation index and a more accurate and efficient detection method should be proposed. 12 tabs, 12 figs, 86 refs.

**Key words:** bridge engineering; service performance; review; concrete bridge; durability; evaluation index; salt-frozen environment

## 0 引言

中国北方寒冷地区昼夜温差大,处于这些地区的混凝土桥梁常年受到冻融循环作用,导致结构发生表面混凝土酥化、砂浆剥落、骨料暴露的冻融病害。同时,各类盐蚀物质(包括环境中的盐分以及为

防止桥面结冰而播撒的除冰盐)会随着水分侵入结构内部,不仅会加重冻融病害,还会进一步腐蚀结构内部钢筋,从而加速混凝土桥梁结构服役性能的劣化进程。工程实践证明,盐冻环境中混凝土桥梁的服役寿命往往难以达到设计使用寿命。如中国北京西直门立交桥在使用 19 年后就因为盐冻耐久性病

害突出而拆除重建<sup>[1]</sup>;黄河大街立交桥在使用 13 年后,部分桥墩因盐冻循环保护层完全剥离,钢筋锈蚀严重,无法正常使用<sup>[2]</sup>。因此,盐冻环境下混凝土桥梁的服役性能演变问题已成为学术界和工程界的研究重点和关注热点。

盐冻环境下混凝土桥梁服役性能演变是受物理-化学-力学多因素耦合作用影响、涉及材料-构件-结构多层次关联变化的复杂研究课题。同时,中国桥梁行业已经由新建为主进入到建养并重的阶段,巨量的桥梁已经进入维修期,部分桥梁甚至因严重耐久性病害成为危桥,需进行各类养护和维修。发达国家的经验与教训表明,桥梁的养护和维修费用十分高昂,例如:美国 1992 年用于桥梁维修的费用高达 2 580 亿美元,是当初造价的 4 倍<sup>[1]</sup>。可以预见,不久的将来,中国桥梁管理与维养部门将不得不为北方盐冻环境混凝土桥梁的养护和维修投入越来越多的资金。因此,为提出合理有效的混凝土桥梁服役状况检测与评价方法,制定科学的混凝土桥梁维护和维修方案与策略,从而有效节省养护和维修费用,研究盐冻环境中混凝土桥梁的服役状况演变规律及影响因素,建立合理的耐久性评价指标体系至关重要。

鉴于此,为揭示盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变规律,对在役混凝土桥梁的耐久性设计与科学维养提供决策依据,本文综述盐冻环境下混凝土桥梁的典型病害和空间分布,分析盐冻环境下混凝土桥梁材料及构件的性能劣化规律与机理,并提炼出影响因子及影响规律,凝练出盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变材料-构件-结构

的关联特性,系统梳理规范中混凝土桥梁耐久性评价指标及其检测方法,在此基础上建立盐冻环境下混凝土桥梁的耐久性评价指标体系,并建议各指标的警戒國值和极限國值。

## 1 盐冻环境下混凝土桥梁病害与空间分布特征

盐冻环境下混凝土桥梁在盐冻循环的作用下会产生相应的耐久性病害,正确地认识病害特征是揭示盐冻环境下混凝土桥梁服役性能演变规律的前提,为此,众多学者对盐冻环境下混凝土桥梁病害特征进行了研究,在盐冻环境下混凝土桥梁典型病害和空间特征等方面取得了一定的成果。

### 1.1 盐冻环境下混凝土桥梁典型耐久性病害

盐冻环境中的混凝土桥梁首要面对冻融循环带来的混凝土酥化、剥落等耐久性病害问题。混凝土是多相复合材料,内部存在大量孔隙。孔隙内部的水在低温下结冰并发生体积膨胀,产生的结冰压会在孔隙边缘产生拉应力。当孔隙内部水分不多时,结冰压造成的孔隙边缘拉应力小于混凝土抗拉强度,不会导致孔隙边缘混凝土开裂;当孔隙内部饱水时,结冰压造成的拉应力会大于混凝土抗拉强度,导致孔隙边缘混凝土被拉裂,孔隙体积变大。此后,孔隙可容纳更多的水分,并在下一次冻融循环时形成更大的结冰压,造成更大的混凝土损伤。冻融循环对孔隙的损伤过程与机理如图 1 所示。在反复冻融循环后,混凝土中的孔隙会互相贯通形成裂缝,导致混凝土强度逐渐降低,最后甚至完全丧失。

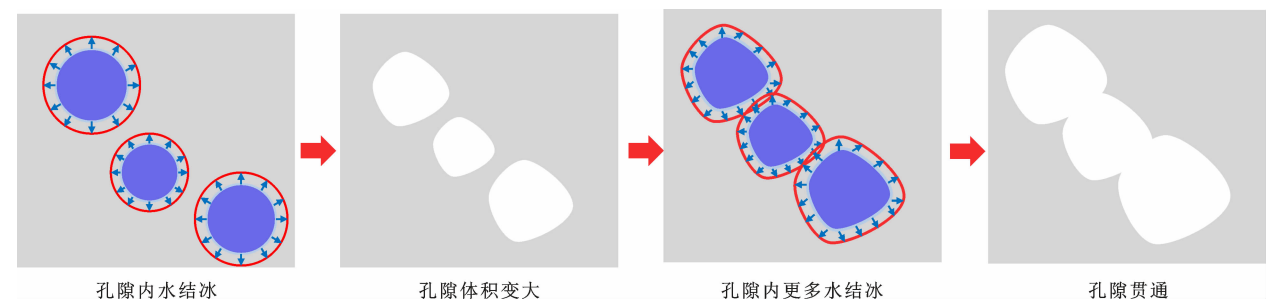


图 1 冻融循环过程中孔隙的演变机理

Fig. 1 Pore evolution mechanism of freeze-thaw cycle

对盐冻环境中的混凝土桥梁而言,盐蚀与冻融往往耦合发生并形成盐冻循环。盐冻循环需要盐离子的参与,其来源主要有:①中国北方冬季降雨与降雪天气常使用的用于加速道路积雪融化的融雪剂与除冰盐,其中含有大量盐离子;②中国西北地区分布

有广阔的盐渍土与盐湖,土壤中的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等盐离子会对混凝土桥墩直接造成损害<sup>[3]</sup>;③沿中国漫长海岸线分布的海洋和滨海环境,由于空气湿度大并漂浮着含有  $\text{NaCl}$  的液态水滴,故混凝土桥梁的上部结构处于盐雾环境,而下部结构则直接接触海

水,受到盐离子侵蚀。盐冻循环对混凝土桥梁作用机理复杂,目前尚未形成统一共识,相对主流的理论有结晶压理论<sup>[4]</sup>、临界饱水度理论<sup>[5]</sup>、黏结-剥落理论<sup>[6]</sup>等。普遍被认可的观点是盐离子加剧了混凝土的冻融破坏,导致盐冻循环作用下混凝土桥梁服役性能退化速率更快。

综上可知,混凝土桥梁发生盐冻病害的前提是混凝土结构或构件处于潮湿或饱水、盐离子侵蚀、气温在冰点附近上下波动的环境。梁体作为最直接接触降水且存在水平面的构件,降水或洒水后若排水设施不够完善则易造成梁顶面水的积留。对于空心板梁和箱梁,降水易渗透到空腔内部并造成梁体内部水的积留;对于板梁和 T 形梁,积水则可能沿构造缝隙下渗至梁底部,并导致梁底处于潮湿或饱水状态;混凝土在静水压力与渗透压的反复作用下逐渐冻损,强度降低、开裂,保护层逐渐受冻,酥松剥落,失去保护作用,钢筋暴露在空气中逐渐氧化锈蚀[图 2(a)],进而导致梁体刚度退化、受弯性能降低。除冰盐和雪水形成的盐溶液渗入混凝土内部参与盐冻循环,使混凝土损伤进一步加大。

对于河流、湖泊中的混凝土桥梁,其混凝土桥墩直接浸泡在水里,水面以下部分长期处于饱水状态,在冻融循环作用下混凝土保护层逐渐疏松剥蚀,脆弱的保护层在水流冲蚀、冰凌撞击作用下被破坏;而位于水面以上的部分(即潮汐区),除冻融破坏外还受到干湿循环的破坏作用,即使处于非饱水状态但破坏程度往往更大[图 2(b)]。处于盐碱地区和海洋环境的桥梁、墩柱受土壤、海水中硫酸盐、氯盐等复合盐蚀和冻融循环的耦合作用,保护层混凝土受损更快。

## 1.2 盐冻环境下混凝土桥梁耐久性病害空间分布特征

基于盐冻病害分析可知,环境因素(如温度、湿度、盐的种类以及质量浓度等)会显著影响混凝土桥梁盐冻病害的程度及性能劣化速率。这些因素随着地域不同存在明显分布差异,因此,中国混凝土桥梁结构盐冻病害存在明显的空间分布特征。

中国《建筑气候区划标准》(GB 50178—93)以平均气温、平均相对湿度等为主要指标,以年降水量、年日平均气温等为辅助指标,将中国划分为 7 个一级区和 20 个二级区反映建筑气候上差异;《公路自然区划标准》(JT/J 003—86)以气候、地理特点为主导因素,根据全年均温、潮湿系数、地势、地貌、水



(a) 梁体



(b) 桥墩

图 2 混凝土桥梁典型盐冻病害

Fig. 2 Typical salt-frozen diseases of concrete bridges

文和土质类型将中国进行了区域划分,并对各区提出了相应的设计原则。其中寒冷地区及严寒地区冬季平均气温低,需要考虑材料的抗冻性。

中国学者曾针对恶劣环境提出了耐久性区划思想,即结合各地温度、湿度、光照等因素将环境作用对混凝土结构的危害程度进行了分级。为掌握冻融环境下混凝土结构耐久性病害空间分布特征,金伟良基于中国各地年均气温、相对湿度和最冷月最低气温等因素获得了各地年冻融循环次数,结合各地降温速率将冻融环境对混凝土结构的侵蚀程度从弱到强分为 6 级<sup>[7]</sup>。在北方寒冷地区及严寒地区的混凝土桥梁遭受的冻融循环次数更多,同时冻融等级也更高,相应的冻融病害也更严重。如:位于不考虑冻融区域的华南某桥梁,在服役 12 年后,外观仍然良好,没有产生冻融引起的混凝土剥落现象<sup>[8]</sup>;而位于冻融环境 2 级区域的大连港某码头在服役 11 年后,其潮汐区混凝土存在轻微的冻融剥落现象<sup>[9]</sup>;位于冻融环境 6 级的松花江大桥,其混凝土材料最快在 6.3 年就达到耐久性极限状态需要进行维修<sup>[10]</sup>。

上述对冻融环境等级的划分并未考虑盐碱地



区、沿海近海地区中腐蚀性离子的影响。在青海、甘肃、新疆、内蒙古等冻土区域<sup>[11-12]</sup>分布有数百个盐湖,含有高浓度的钠、钾、镁的硫酸盐、氯盐和碳酸盐,同时在盐湖周围分布有广袤的盐渍土区域,含盐量(质量分数,下文同)达到 0.4%~30.0%,对混凝土结构造成严重威胁<sup>[13-15]</sup>。各种离子对混凝土与钢筋混凝土的破坏影响并非孤立存在,再结合冻融循环作用,其破坏机理更为复杂,造成的破坏效果也更加严重。对于这些地区,应当着重考虑盐冻循环对混凝土结构的危害。

中国大陆海岸线长度超过 25 000 km,而有近 25%海岸处于冻土线以北,因此,有大量沿海地区混凝土桥梁结构易遭受盐冻融循环作用而破坏。混凝土结构受氯盐影响程度随离海岸距离与高度变化而变化。《混凝土结构耐久性设计标准》(GB 50476—2019)(下文简称耐久性设计规范)规定,距离海岸 100~300 m 内或平均水位高度为 15 m 以上的海上大气区为轻度盐雾区域,距离海岸 100 m 内或平均水位高度为 15 m 及以下的水上大气区为重度盐雾区域。Wu 等建立了氯盐渗透深度  $X_{50}$  与距海面高度  $h$  和湿润周期比  $k_{JR}$  的关系(图 3),发现略高于海面的潮汐区和浪溅区的桥墩部位受侵蚀程度较其他部位更为严重<sup>[16]</sup>。

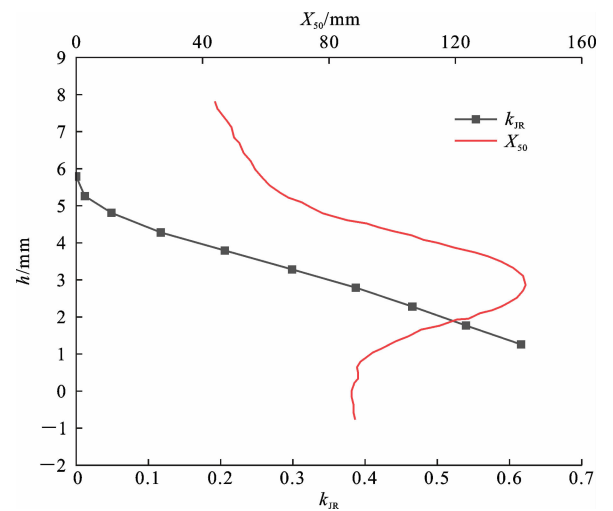


图 3  $X_{50}$ ,  $k_{JR}$  和  $h$  的关系<sup>[16]</sup>

Fig. 3 Relationship between  $X_{50}$ ,  $k_{JR}$  and  $h$ <sup>[16]</sup>

综上所述,中国北方地区桥梁普遍受到氯盐侵蚀与冻融循环的耦合作用。同时,中国地域辽阔,各地气候条件差异大,为掌握不同地区盐冻环境对桥梁结服役性能的具体影响程度,仍需综合考虑温度、湿度和盐离子浓度等因素,研究不同盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变规律,探究影响结构盐冻破

坏过程和程度的关键因素,进而对盐冻环境下混凝土桥梁耐久性做出综合评价。

## 2 盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变

盐冻环境下混凝土桥梁的病害严重影响了桥梁服役状况。在病害特征研究的基础上,盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变规律逐渐被揭示。同时,由于盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变是一个材料-构件-结构相互影响的过程,本节从这 3 个层次阐述演变规律。

### 2.1 盐冻环境下混凝土桥梁材料性能劣化规律与影响因子

#### 2.1.1 盐冻环境下混凝土桥梁材料性能劣化规律

盐冻环境下混凝土桥梁在服役过程中会受到冻融循环、氯盐侵蚀和外部荷载的耦合作用,其结构中混凝土及钢筋性能在三者的作用下会不断演变,主要可以分为 3 个阶段,如图 4 所示。

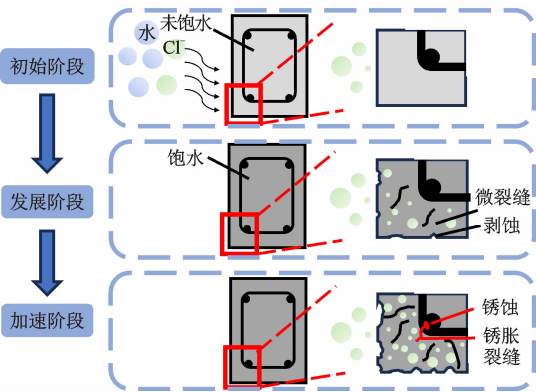


图 4 混凝土桥梁中混凝土及钢筋性能劣化演变

Fig. 4 Deterioration evolution of concrete and steel performance in concrete bridges

(1)初始阶段。在该阶段各种侵蚀物质开始向混凝土内部侵入,混凝土内部的损伤尚未产生。水和氯离子通过扩散作用、毛细作用、浓度压力作用进入混凝土内部,混凝土饱水度逐渐上升。氯盐的存在加速了混凝土的吸水速度,提高了混凝土的饱水度<sup>[17]</sup>。这一阶段虽然产生盐冻,但是由于饱水程度较低,冻融产生的拉应力小于混凝土孔隙的抗拉强度,混凝土内部不会发生损伤。

(2)发展阶段。该阶段钢筋尚未锈蚀,混凝土的破坏主要由盐冻循环造成。随着水分的侵入,外围混凝土率先达到饱和,内部孔隙中的水结冰,体积膨胀带来的结冰压大于混凝土抗拉强度,混凝土内部开始产生微裂缝,变得疏松,表面砂浆开

始剥落。在这些影响下,混凝土与钢筋的黏结性能开始下降<sup>[18-19]</sup>。这些微裂缝为氯离子的侵入提供了通道,氯离子侵入混凝土的速度在冻融循环的影响下不断上升。氯离子进一步进入混凝土内部,侵蚀深度不断加大<sup>[20-22]</sup>。氯盐与混凝土水化产物反应还不充分,只形成少量结晶,产生的结晶压加速了混凝土性能劣化。但此时钢筋表面的氯离子浓度还未达到临界氯离子浓度,钢筋尚未开始锈蚀。

(3)加速阶段。该阶段钢筋开始锈蚀,混凝土性能在盐冻循环和钢筋锈蚀的影响下快速下降。随着盐冻循环次数的增加,混凝土内部孔隙被胀裂,孔径扩大<sup>[23]</sup>,吸水率上升,内部可冻水含量(质量分数,下文同)和结冰率也因此上升<sup>[24]</sup>。损伤进一步发展,更深层的混凝土产生劣化,砂浆开始大幅剥落,骨料外露,在冻融损伤严重的部位,如构件角部,甚至发生骨料剥落。冻融循环产生的微裂缝进一步向内部发展,宽度增加。氯离子和水泥水化产物的化学反应更加充分,更多的结晶产生,分布在混凝土内部疏松孔隙处<sup>[25]</sup>。更多的氯离子侵入到了钢筋表面,使钢筋周围的碱性环境被破坏,pH 值不断下降<sup>[26]</sup>,钢筋表面的氯离子浓度达到临界浓度,钝化膜被破坏,开始锈蚀。这些锈蚀产物比较光滑,削弱了混凝土和钢筋之间的摩擦力,加上混凝土强度不断下降,黏结性能进一步下降。当锈蚀产物积累到一定程度时,体积膨胀产生的拉力超过混凝土抗拉强度,产生锈胀裂缝,黏结性能大幅下降<sup>[27-28]</sup>。锈胀裂缝会随着锈蚀产物的增加而不断发展,当其到达混凝土表面时,混凝土保护层受到极大损伤,钢筋和混凝土的黏结性能开始急剧下降。

### 2.1.2 盐冻环境下混凝土桥梁材料性能劣化影响因素

混凝土材料的性能劣化和其内部结构息息相关,内部结构受水胶比、掺合料、引气剂等因子影响。这些影响因子显著影响了混凝土材料性能劣化过程。

水胶比是混凝土材料中凝胶材料和水比值,对其抗氯离子渗透性能<sup>[29]</sup>和抗盐冻性能有着极大影响。一般来说,水胶比越低,混凝土强度也会越高,抗冻性能越好,在盐冻环境下表面剥落现象越轻,动弹性模量和相对抗压强度下降速度越慢,抗氯离子渗透性能越好<sup>[22,30-31]</sup>。

工程中常通过掺入硅灰、粉煤灰等矿物,以及引气剂等外加剂改善混凝土性能。这些掺合料和

外加剂会改变混凝土的内部化学成分组成和内部结构,并对其耐久性产生极大影响。掺入粉煤灰和硅灰均可以降低混凝土孔隙率,细化内部孔隙,优化孔结构,提高密实度<sup>[32-33]</sup>。但不同的是,硅灰使混凝土的水化诱导期提前,水化产物在前期就充满混凝土内部,有利于提高抗冻性,而粉煤灰使混凝土的水化诱导期延后,若在前期末充分水化时受到盐冻作用,盐冻损伤就会更严重。而且当粉煤灰掺量(质量分数,下文同)过大、水泥用量较低时,相应的水化产物减少,混凝土内部密实度下降,也不利于混凝土抗冻。因此,掺入硅灰可以提高混凝土抗盐冻性能,降低混凝土在盐冻循环作用下的质量损失率、相对动弹性模量损失、氯离子扩散系数<sup>[34]</sup>。而增加粉煤灰的含量会降低混凝土的抗盐冻性能,使其更早地出现砂浆剥落,骨料外露等现象,其含量不宜超过 30%<sup>[30]</sup>。

引气剂可以在混凝土中引入气泡,提高含气量(体积分数,下文同),优化混凝土孔结构。引气剂对盐冻环境下混凝土构件服役性能演变的影响主要体现在 2 个方面:一方面,混凝土的抵抗氯离子侵入能力随着含气量的增加先增加后减小。在小于最佳含气量时,随着含气量增加,混凝土内部的气泡增多,分布更加均匀,有害大孔含量减小,引气剂引入的独立气泡有效切断了孔通道,降低了氯离子在混凝土内的传输速度。当大于最佳含气量时,较多的气泡相互兼并,大孔数量开始增加,切断孔通道的作用减弱,抵抗氯离子侵入的能力开始下降。最佳含气量一般在 4%~6%<sup>[34-35]</sup>。另一方面,根据 Powers 的静水压理论,气泡间距越小,冻融循环产生的静水压力越小,同时当气泡间距小于  $2.5 \times 10^{-4}$  m 时,混凝土表现出良好的抗冻性<sup>[36]</sup>。引气剂引入细密气泡,缩短了混凝土气泡间距,这些气泡可以吸收由大孔结冰挤出的溶液,对冻融循环产生的结冰压和静水压起到缓冲作用,提高混凝土的抗冻性。在这两方面的影响下,加入适量引气剂的混凝土在盐冻循环后,内部有更少的裂缝,质量损失率更低,力学性能和相对动弹性模量降低更少<sup>[37]</sup>。

## 2.2 盐冻环境下混凝土桥梁构件性能劣化规律及影响因子

### 2.2.1 盐冻环境下混凝土桥梁构件性能劣化规律及机理

由于材料劣化的不断发展,在整个混凝土桥梁服役过程中,受盐冻循环影响的混凝土构件承载力随着盐冻循环次数的增加而下降<sup>[38-41]</sup>。混凝土构

件的承载力由钢筋、混凝土各自的承载力以及二者之间的黏结性能组成,其承载力退化由混凝土、钢筋的材性退化和黏结性能退化三者共同导致,退化机理如图 5 所示。在初始阶段,构件虽然受到了一定环境作用,但是其混凝土和钢筋并未产生劣化,故而构件承载力并未产生变化。到了发展阶段,构件的混凝土内部因盐冻损伤产生了微裂缝,混凝土性能开始退化<sup>[42]</sup>,钢筋-混凝土界面黏结性能也开始下降。构件表面开始出现砂浆剥落的现象,有效截面面积开始减小,构件承载能力开始下降。最后在加速阶段,构件的钢筋开始锈蚀,力学性能受到损伤,表面产生锈坑,截面受力面积开始下降。锈蚀产物

的出现及混凝土性能的进一步劣化大幅改变钢筋和混凝土之间黏结性能,黏结性能随着锈胀裂缝的发展和钢筋锈蚀率的增加而降低<sup>[43-44]</sup>。同时盐冻产生的损伤也进一步破坏了混凝土内部结构,混凝土性能进一步退化。盐冻产生的剥落、裂缝和锈胀裂缝也破坏了构件混凝土的完整性,其有效截面面积进一步下降。构件整体力学性能在这些因素的影响下加速退化。更有甚者,构件的破坏形态会因为材料劣化而发生改变,如在盐冻损伤达到一定程度后,受压构件在偏心荷载作用下的破坏形态由小偏心破坏转变为大偏心破坏<sup>[45-46]</sup>,梁在弯曲荷载作用下由适筋破坏转变为超筋破坏<sup>[40]</sup>。

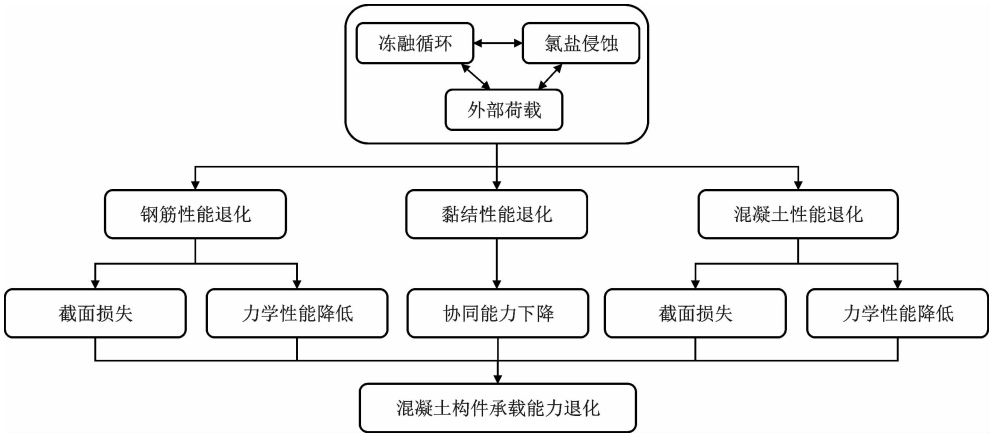


图 5 混凝土构件承载力退化机理

Fig. 5 Degradation mechanism of bearing capacity of concrete members

Zaghian 等采用加拿大蒙特利尔的气候条件对实际服役桥墩进行了服役性能模拟<sup>[47]</sup>,其模拟了 3 种工况的服役性能:①服役 10 年时,经历了 22 次冻融循环,冻融损伤仅在保护层区域,钢筋轻微锈蚀;②服役 40 年时,经历了 113 次冻融循环,冻融损伤发展到混凝土核心区域,钢筋中等程度锈蚀;③服役 60 年时,经历了 165 次冻融循环,冻融损伤极其严重,保护层全部剥落,核心混凝土性能大幅下降,钢筋严重锈蚀。从 3 种工况可以看出,服役过程中,混凝土冻融损伤由表向里,服役年限较短时,外层的混凝土保护层饱水程度较高,率先受到影响,服役年限较长时,水分侵入到混凝土核心区域,核心区域混凝土也开始受到冻融损伤,最后在冻融损伤和钢筋锈蚀的影响下,外层混凝土全部剥落,核心混凝土性能大幅下降。从结果来看,工况 1 的承载力下降了 2%左右,这是因为该工况下混凝土和钢筋损伤较轻,性能没有显著下降。工况 2 的承载力下降了 19%左右,这时混凝土和钢筋的损伤已经很严重,二者的黏结性

能也受到影响,故而构件的承载力有了明显下降。工况 3 的承载力下降了 42%左右,此时保护层全部剥落,钢筋严重锈蚀,削弱了对核心混凝土的约束作用,混凝土与钢筋黏结性能接近消失,受力面积也大幅下降,同时核心混凝土的性能也严重退化,导致构件承载力大幅下降。

2.2.2 盐冻环境下混凝土桥梁构件性能劣化影响因素

目前对混凝土构件状态演变影响因子的研究主要集中在保护层厚度、钢筋种类、持载状态、初始裂缝等方面,掌握混凝土构件服役性能劣化的影响因素及其影响规律可以更好地指导混凝土桥梁耐久性设计与科学维养。

(1)保护层厚度

混凝土保护层对盐冻环境下混凝土构件服役性能的影响主要体现在隔绝侵蚀物质,使其无法直接接触混凝土构件内的钢筋,即保护层对侵蚀物质存在抗性。这种抗性取决于两方面:①保护层密实度(主要影响侵蚀物质在混凝土中的传输速度)②保护

层厚度(主要影响侵蚀物质的传输距离)。在盐冻循环过程中,保护层的混凝土损伤程度逐渐加大,内部微裂缝不断发展,材料性能不断劣化,其密实度和抵抗氯离子侵入的能力不断下降;表面的水泥砂浆不断剥落,有效保护层厚度也在逐渐下降。因此,保护层对侵蚀物质的抗性在服役过程中不断下降。随着抗性下降,钢筋开始锈蚀的时间会提前,钢筋锈蚀速度也会加快<sup>[48]</sup>。因此,提高混凝土保护层的密实度,增加混凝土保护层厚度,可以有效提高保护层抗性,延后钢筋开始锈蚀的时间,降低钢筋锈蚀的速度<sup>[49]</sup>。

(2)钢筋种类

钢筋种类和直径作为构件重要的参数,影响了钢筋和混凝土之间的黏结性能和钢筋承载力,对构件的耐久性也有着重要影响。工程中常见的钢筋有光圆钢筋和螺纹钢筋。在盐冻循环作用下,光圆钢筋和混凝土之间的极限黏结强度下降速度与峰值滑移扩大速度均更快,盐冻循环对其黏结性能影响远大于对螺纹钢筋和混凝土之间黏结性能的影响。因此,在易受到盐冻循环作用的部位应避免使用光圆钢筋作为受力钢筋<sup>[18]</sup>。除此之外,钢筋直径对钢筋和混凝土之间的黏结性能也有较大影响。钢筋直径越大,相对黏结面积越小,盐冻循环作用后的黏结强度损失速度越快<sup>[50]</sup>,峰值滑移也随之减小<sup>[18]</sup>。

(3)持载状态

桥梁服役过程中,构件会受到自重等恒载以及车辆荷载等活载作用。在荷载和环境作用下结构耐久性劣化并不是单一因素的简单叠加,其破坏机理更为复杂<sup>[51]</sup>。为此,诸多学者开展了各类持续荷载状态下的混凝土构件耐久性研究。

混凝土梁在桥梁服役过程中主要承受弯矩,因此,在梁的服役性能研究中常用图 6 所示的装置施加持续弯曲荷载。在持续弯曲荷载作用下,混凝土梁的极限承载力和刚度随着盐冻循环次数增加而下降,且持续荷载越大,下降速度越快<sup>[52-53]</sup>。同时,当盐冻损伤严重到一定程度时,由于混凝土的严重劣化,梁的弯曲破坏形态由延性破坏变为脆性破坏。从微观上看,混凝土梁在受到弯曲荷载作用时,下部混凝土受拉,在荷载和盐冻循环产生的拉应力共同作用下,混凝土更易产生裂缝。裂缝在这种共同作用下不断发展,导致混凝土损伤速度加快,氯离子扩散系数增大<sup>[54]</sup>。且持续弯曲荷载越大,混凝土内部裂缝扩展和结晶越明显<sup>[55]</sup>。导致宏观上持续荷载

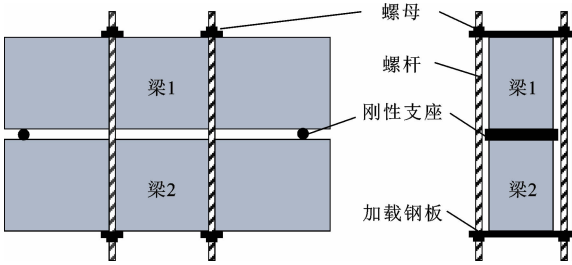


图 6 混凝土梁弯曲荷载施加装置

Fig. 6 Bending load applying device for concrete beam

越大,混凝土梁表面混凝土剥落越严重<sup>[56]</sup>,构件内部钢筋脱钝时间越早<sup>[57]</sup>,锈蚀率和锈蚀的不均匀程度越大<sup>[48]</sup>。综上,持续弯曲荷载加速了盐冻循环对混凝土梁的损伤<sup>[31]</sup>。

混凝土墩柱在服役期间易受到轴压荷载和偏压荷载的作用,故常用如图 7 所示装置施加轴压荷载和偏心荷载<sup>[58-60]</sup>。一方面,在轴压荷载作用下,混凝土会被压实。在这种压实效应作用下,外界侵蚀介质在混凝土内的传输速度会下降。另一方面,轴压荷载对混凝土产生的压应力对孔隙内结冰压有一定抵消作用,抑制了盐冻裂缝的产生。这二者均对混凝土桥墩的抗盐冻性能有利。因此,在盐冻损伤较轻时,适当轴压荷载可以提高混凝土桥墩的抗盐冻性能。但是,当盐冻损伤较严重时,外部压荷载会加速混凝土受压裂缝的产生,这时轴压荷载会使混凝土氯离子扩散系数提高,这对混凝土桥墩的抗盐冻性能不利<sup>[58]</sup>。在某盐冻循环次数下,混凝土的氯离子扩散系数、盐冻损伤程度随轴压荷载的增加先减小后增大,混凝土桥墩的极限承载力也呈现出相同规律<sup>[61]</sup>。

在偏心荷载作用下,混凝土桥墩可能会在受拉侧形成初始裂缝,且偏心荷载越大,初始裂缝宽度越大。在盐冻循环过程中,初始裂缝宽度不会产生明显变化,但是沿长度方向会不断向桥墩内部延伸。裂缝的存在大幅缩短了钢筋开始锈蚀的时间<sup>[59]</sup>。偏心荷载越大,初始裂缝越大,混凝土柱表面损伤和钢筋锈蚀程度越严重,开裂荷载、破坏荷载和极限承载力越低<sup>[61]</sup>。

目前在盐冻环境下钢筋-混凝土界面黏结性能的研究中,常用如图 8 所示装置施加持续荷载<sup>[50,62]</sup>。该装置可以视为给钢筋一个向外拔出的荷载,同时给混凝土一个轴压荷载。在盐冻循环对混凝土的损伤较轻时,和轴心受压混凝土墩柱一样,轴压荷载使混凝土内部密实度提高,抑制了微裂缝发展,增强了对冰胀力的抵抗能力,从而提



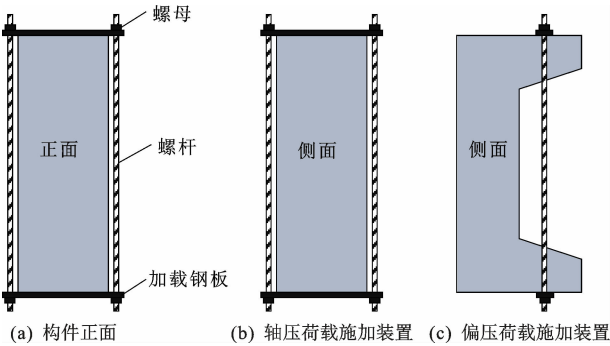


图 7 混凝土墩柱持续荷载施加装置

Fig. 7 Continuous load applying device of concrete pier column

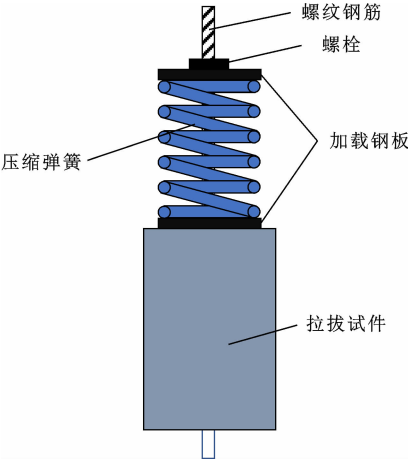


图 8 钢筋-混凝土黏结性能试件持载装置

Fig. 8 Continuous load applying device for reinforced concrete bond performance specimen

高了混凝土的抗冻性。此时钢筋-混凝土界面黏结性能有一定上升。当盐冻循环对混凝土损伤较重时,外部施加的持续荷载加速了钢筋-混凝土界面裂缝产生,削弱了二者之间的机械咬合力<sup>[62]</sup>。此时,持续荷载越大,黏结强度下降越多,峰值滑移越大。

(4)初始裂缝

由于设计、施工、受力、服役环境及材料自身等原因,混凝土桥梁的构件可能会在带裂缝状态下服役<sup>[63]</sup>。裂缝为水分、氧气、氯离子等侵蚀物质提供了向混凝土内部加速扩散的通道,使得其更易进入混凝土内部,大幅缩短了其到达钢筋表面的时间,因此,会大幅加速盐冻循环对混凝土桥梁的侵蚀。反过来,盐冻循环形成的冰胀力和结晶压以及其对裂缝内混凝土的剥蚀作用加速了裂缝扩展和延伸。裂缝和盐冻循环是一个相互加速的作用,二者之间的作用如图 9 所示<sup>[64]</sup>。

当前研究中引入裂缝主要有 2 种方法:人工裂缝和天然裂缝。人工裂缝是通过浇筑前固定设计宽

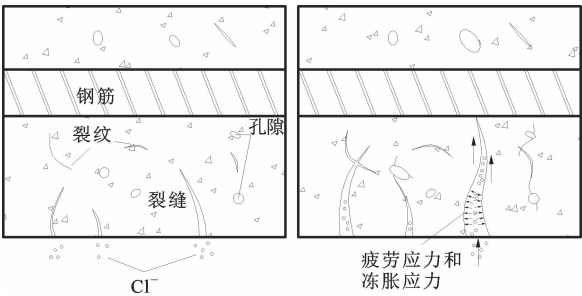


图 9 裂缝和盐冻循环相互作用<sup>[64]</sup>

Fig. 9 Interaction between cracks and salt frozen cycles<sup>[64]</sup>

度的插片(一般为不锈钢片或铜片)在特定位置,待浇筑完成后 2~4 h 内拔出形成。这种裂缝可以很好控制裂缝的宽度、深度来研究二者对混凝土材料和构件耐久性的影响。但是,相对于实际裂缝,人工裂缝宽度上下相对一致,裂缝表面光滑平整。天然裂缝则是通过特定方式给试件施加荷载,在荷载作用下天然形成。这种裂缝相比人工裂缝更加接近真实裂缝,但是不容易控制裂缝的数量、宽度、深度、形状等<sup>[65]</sup>。

目前裂缝对于盐冻环境下混凝土耐久性影响的研究主要集中在裂缝宽度。带裂缝的混凝土在盐冻循环后,劣化速度明显快于无裂缝混凝土,盐冻循环对其质量损失、抗压强度、峰值应力、弹性模量的影响更大,且裂缝宽度越大、数量越多,劣化效果越明显<sup>[66-69]</sup>。裂缝长度及裂缝间距对盐冻环境下混凝土耐久性影响的研究还比较薄弱。

由于墩柱在服役中较少出现裂缝,故目前裂缝对混凝土构件服役性能演变的影响研究集中在裂缝对梁。研究裂缝对混凝土梁耐久性影响时常采用四点弯曲法引入天然裂缝。经历盐冻循环后的带裂缝混凝土梁在静载试验时,一般不产生新裂缝,而是初始裂缝不断发展、并逐渐向内部延伸。裂缝对于试件质量损失的影响较低,但是对试件内部钢筋锈蚀程度和试件承载能力影响较大。裂缝宽度越大、锈蚀程度越高、极限承载力越低<sup>[70]</sup>。

研究盐冻环境下带裂缝钢筋-混凝土界面黏结性能时常采用引入人工裂缝法(图 10)。裂缝对于钢筋-混凝土界面在盐冻循环作用下的黏结性能劣化有加速作用,且宽度越大,加速作用越明显。因此,在同等盐冻循环次数下,带裂缝的钢筋-混凝土界面最大滑移比无裂缝的更大、黏结强度更小、疲劳寿命更低<sup>[71]</sup>。

2.3 材料-构件-结构性能演变关联特性

结合第 2.1 节及第 2.2 节分析可知,盐冻环境

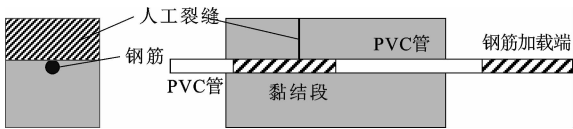


图 10 钢筋-混凝土拉拔试件裂缝引入方法  
Fig. 10 Crack introduction method of reinforced concrete pull-out specimen

下混凝土桥梁的性能劣化主要表现为其关键混凝土构件的性能劣化,但是,混凝土桥梁服役过程中,材料、构件与结构的性能演变并不孤立,而是彼此关联、且相互影响。材料-构件-结构性能演变关联特性如图 11 所示。在冻融和氯盐侵蚀的作用下,在

材料层面,混凝土性能劣化、钢筋锈蚀、钢筋-混凝土间黏结性能变弱、协同工作的能力变差;由此导致在构件层面上,混凝土梁的刚度及受弯承载能力、混凝土桥墩的刚度及受压承载力相应地下降;导致在结构层面上,混凝土桥梁的挠度变大,自振频率也会降低。从另一个角度看,混凝土桥梁的结构特性发生变化会使各构件间发生内力重分配,混凝土构件受力状态的改变导致其自身服役状态演变也相应发生变化;构件受力状态的改变最终会改变材料应力状态,甚至引起构件产生裂缝或者导致原有裂缝变宽变深,进一步加剧材料性能的劣化。

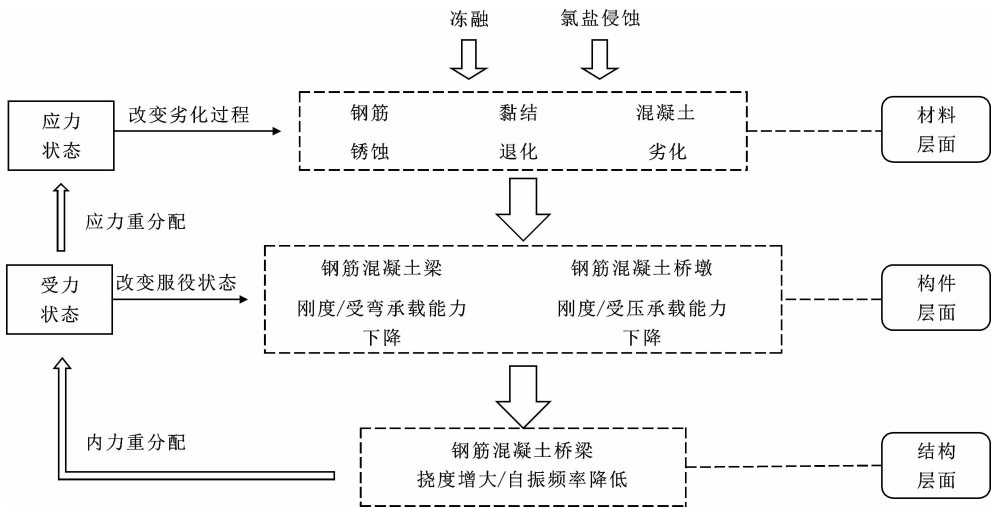


图 11 材料-构件-结构性能演变关联特性  
Fig. 11 Correlation characteristics of material-member-structure performance evolution

2.4 盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变研究现状及未来展望

总体而言,诸多学者针对盐冻环境下混凝土桥梁的材料、构件的耐久性和服役状况演变开展了系列研究,得到盐冻环境中持载状态下材料与典型构件服役状况的劣化规律与机理、影响因子及影响规律。然而,混凝土桥梁除承受盐冻循环作用外,还承受汽车荷载等疲劳荷载的作用,针对盐冻环境中混凝土构件疲劳性能的劣化规律与机理、盐冻和疲劳荷载耦合作用下混凝土构件服役性能演变规律与机理、初始裂缝的影响规律与机制等研究还很欠缺。未来可以对以下几点进行重点突破:①混凝土桥梁实际服役过程受疲劳荷载和盐冻循环耦合作用,但是受制于试验条件,现有学者多采用先盐冻循环试验后疲劳性能试验的顺序或是盐冻循环试验和疲劳性能试验交替进行<sup>[64]</sup>。这些方法和桥梁实际服役状态有偏差,无法准确揭示混凝土桥梁实际服役过程中的状态演变规律,未来应设计开发可实现疲劳

荷载和盐冻循环耦合作用的试验方法和数值模拟方法。②桥梁服役过程中会出现不同长度、间距、宽度的裂缝,对其服役状态造成影响。当前的研究主要集中在裂缝宽度上,未来应当设计有不同裂缝长度、裂缝间距构件的服役性能试验来进一步研究二者对其产生的影响。再者,采用如 CT、X-射线、扫描电镜的手段研究微观结构,揭示裂缝对构件性能的影响机制。

同时,已有针对盐冻环境下混凝土桥梁服役性能演变的研究多数采用理论驱动的方法,其优势是能解释和揭示相关机理和规律,但实际混凝土桥梁服役性能演变的影响因素及参数水平众多,几乎难以通过理论驱动的方法建立混凝土桥梁服役性能预测模型。因此,借助大数据与机器学习技术,建立基于理论与数据双驱动的混凝土桥梁服役性能预测模型也是未来需要重点突破的方向。为提高模型预测的精确度,可以在以下方面进行进一步探索:①建立更丰富的桥梁服役性能数据库,用来支撑机器学习

的学习过程。将中国海量的桥梁检测监测数据仿照美国 NBI 数据库<sup>[72]</sup>整合起来,建立更符合中国地理气候条件的数据库,为建立更精确的预测模型提供数据支撑。②开发应用更先进算法处理和训练数据。改进如随机森林、卷积神经网络等传统经典算法的同时,结合新型算法形成更先进算法处理和训练数据,缩短训练时长,提高训练效率。③结合更深入的桥梁服役性能演变理论建立预测模型,把未来更深入的桥梁服役性能理论结合到数据模型中,提高数据模型的解释性和准确性,建立更符合客观发展的理论-数据双驱动混凝土桥梁服役性能预测模型。

### 3 盐冻环境下混凝土桥梁耐久性评价指标

为准确把握发生耐久性病害混凝土桥梁的服役状况,更好地进行相关管理养护决策,需要采用耐久性评价指标对混凝土桥梁的耐久性进行评价。

#### 3.1 混凝土桥梁耐久性评价指标

自中国土木工程学会在 2004 年颁布《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES01—2004)以来,中国颁布了许多与结构耐久性相关的规范,其中涉及了众多耐久性评价指标。本节对耐久性设计规范、《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)(下文简称“混凝土试验规程”)、《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2017)(下文简称“水工混凝土试验规程”)、《水运工程混凝土试验检测技术规范》(JTS/T 236—2019)(下文简称“水运混凝土试验规范”)、《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344—2019)(下文简称“建筑检测规范”)、《混凝土结构现场检测技术标准》(GB/T 50784—2013)(下文简称“混凝土检测规范”)、《建筑与桥梁结构监测技术规范》(GB 50982—2014)(下文简称“结构监测规范”)、《公路桥梁安全检测系统技术规程》(JT/T 1037—2016)(下文简称“桥梁安全检测规范”)、《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)(下文简称“耐久性评定规范”)、《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)(下文简称“技术状况评定规范”)、《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)(下文简称“承载力评定规范”)中的耐久性指标进行了汇总,同时根据第 1.1 节描述的混凝土桥梁典型病害及第 2 节中的影响因子把这些指标分为材料属性、混凝土损伤、氯盐侵蚀、钢筋锈蚀 4 类,结果

如表 1 所示。

材料属性方面的指标包括混凝土最低强度等级、最大水胶比、含气量、气泡间距系数。结合第 2.1 节分析可知,强度等级、水胶比是影响混凝土材料抗盐冻性能最重要的指标。对于盐冻作用较为严重的地区,混凝土中需添加引气剂,气泡含量和气泡间距系数是反映混凝土引气效果的重要指标。在混凝土桥梁设计时,满足这些指标的限值是保证桥梁耐久性和服役性能的基本要求。

混凝土损伤方面的指标中,裂缝宽度、保护层厚度、抗压强度在设计、试验、检测、评定几类规范中都有出现,且出现次数最为频繁。强度均质系数和抗压强度类似,在 2 个桥梁状态评定规范中用来反映混凝土桥梁服役过程中混凝土材料抗压强度的变化。由不同试验方法得到的几个指标反映了混凝土抗冻性的强弱。相对动弹性模量和质量损失率对应快冻法,当相对动弹性模量下降到 60%或者质量损失率下降到 5%时的冻融循环次数称为抗冻等级;质量损失率和抗压强度损失率对应慢冻法,当质量损失率达到 5%或者抗压强度损失率达到 25%时的冻融循环次数称为抗冻标号;表面剥落物质量和动弹性模量对应单面盐冻法。抗冻耐久性指数和抗冻等级、抗冻标号比较相似,该指标由快冻法冻融循环 300 次后的相对动弹性模量计算得出。抗冻性能检测值是由实际结构的取样混凝土经过对应方法获得的冻融循环次数。混凝土性能受影响厚度和剩余使用年限推定值在建筑检测规范、混凝土检测规范被提出,用来体现冻融环境对混凝土材料和结构的影响。表面剥落面积、剥落深度、最大剥落深度用来反映盐冻环境下混凝土剥落严重程度。

在氯盐侵蚀方面,氯离子扩散系数可以反映氯离子侵入混凝土的快慢,是出现次数最多的指标。耐久性设计规范中规定了混凝土材料该指标的上限,保证结构在设计使用年限内钢筋不产生锈蚀。多个混凝土试验规范规定了该指标的测量方法,混凝土检测规范利用该指标对氯离子侵入剩余年限进行计算。耐久性评定规范则是利用该指标计算钢筋初蚀时间。氯离子侵入混凝土的快慢还可以通过电通量反映,但是该指标出现的次数明显低于氯离子扩散系数。氯离子侵入深度和氯离子含量通过深度和质量来体现氯离子侵入混凝土的程度。

在钢筋锈蚀方面,主要有 2 类指标:一类指标通过表征钢筋的电化学特性对钢筋的锈蚀程度进行侧面反映;一类则是通过表征钢筋本身的参数对钢筋

表 1 规范中耐久性指标汇总  
Tab. 1 Summary of durability indexes in specifications

指标类型	指标名称	出现规范
材料属性	混凝土最低强度等级	耐久性设计规范
	最大水胶比	耐久性设计规范
	含气量	耐久性设计规范、水工混凝土试验规程、水运混凝土试验规范
	气泡间距系数	耐久性设计规范、水工混凝土试验规程、水运混凝土试验规范
混凝土 损伤	裂缝宽度	耐久性设计规范、建筑检测规范、混凝土检测规范、结构监测规范、桥梁安全检测规范、耐久性评定规范、技术状况评定规范
	保护层厚度	耐久性设计规范、建筑检测规范、混凝土检测规范、耐久性评定规范技术状况评定规范、承载力评定规范
	抗压强度	建筑检测规范、混凝土检测规范、耐久性评定规范、技术状况评定规范、承载力评定规范
	强度均质系数	技术状况评定规范、承载力评定规范
	相对动弹性模量	混凝土试验规程、水工混凝土试验规程、水运混凝土试验规范、混凝土检测规范
	质量损失率	混凝土试验规程、水工混凝土试验规程、水运混凝土试验规范、混凝土检测规范
	抗压强度损失率	混凝土试验规程、混凝土检测规范
	表面剥蚀率	混凝土试验规程
	抗冻等级	混凝土试验规程、水工混凝土试验规程、混凝土检测规范
	抗冻标号	混凝土试验规程、混凝土检测规范
	抗冻耐久性指数	耐久性设计规范
	抗冻性能检测值	建筑检测规范、混凝土检测规范
	混凝土性能受影响厚度	建筑检测规范、混凝土检测规范
	冻融损伤剩余年限	建筑检测规范、混凝土检测规范
	表面剥落面积	耐久性评定规范、技术状况评定规范
	剥落深度	耐久性评定规范
	最大剥落深度	耐久性评定规范
氯盐侵蚀	氯离子扩散系数	耐久性设计规范、混凝土试验规程、水工混凝土试验规程、水运混凝土试验规范、混凝土检测规范、耐久性评定规范
	氯离子侵入剩余年限	建筑检测规范
	电通量	混凝土试验规程、混凝土检测规范
	氯离子侵入深度	水运混凝土试验规范、建筑检测规范、混凝土检测规范、桥梁安全检测规范
	氯离子含量	水运混凝土试验规范、混凝土检测规范、建筑检测规范、承载力评定规范
钢筋锈蚀	钢筋电位	建筑检测规范、混凝土检测规范、结构监测规范、技术状况评定规范
	混凝土电阻率	建筑检测规范、混凝土检测规范、技术状况评定规范
	锈蚀电流	建筑检测规范、混凝土检测规范、结构监测规范
	钢筋质量损失率	混凝土试验规程、水工混凝土试验规程、水运混凝土试验规范
	锈蚀深度	建筑检测规范、混凝土检测规范、耐久性评定规范
	钢筋锈积率	水工混凝土试验规程、水运混凝土试验规范
	截面损失率	混凝土检测规范

锈蚀程度进行直接反映。第 1 类指标中应用最多的是钢筋电位,其次是混凝土电阻率、锈蚀电流。技术状况评定规范中通过钢筋电位和混凝土电阻率对钢筋锈蚀情况进行评定。钢筋的锈蚀电流则是在结构监测规范中被要求进行监测。第 2 类指标有钢筋质量损失率、钢筋锈蚀率、锈蚀深度、截面损失率。其中钢筋质量损失率和钢筋锈率更多的是在试验规范中用来反映混凝土对钢筋锈蚀的保护作用。而锈蚀深度和截面损失率则多在检测规范中用来反映实际

结构中的钢筋的锈蚀情况。

3.2 常见指标检测方法

在服役期对混凝土桥梁的耐久性指标进行检测,是准确把握和评价混凝土桥梁当前服役状态的基础,因此,指标的检测方法及其易检测性十分重要。

3.2.1 混凝土损伤类指标

盐冻环境下混凝土桥梁的混凝土损伤主要可以分为 4 种:混凝土表面的剥落、内部劣化、裂缝发展、力学性能下降。针对混凝土表面剥落,实验室环境



中常使用表面剥蚀率和质量损失率描述。表面剥蚀率是指单位面积构件的剥蚀量,由式(1)进行计算

$$m_n = \mu_n / A \quad (1)$$

式中: $m_n$ 为盐冻循环 $n$ 次后的表面剥蚀率; $\mu_n$ 为盐冻循环 $n$ 次后的剥蚀量,通过盐冻后滤纸和剥落物质量之和减去滤纸质量得到; $A$ 为构件试验面的面积。

在慢冻法中,盐冻循环 $n$ 次后的质量损失率 $W_n$ 的检测方法如下:在构件盐冻前进行称重,记录初始质量 $M_0$ ;达到设计盐冻循环次数 $n$ 后再对构件进行称重,记录质量 $M_n$ ;用二者的差值除以原始值即可得质量损失率,具体计算见式(2)

$$W_n = \frac{M_n - M_0}{M_0} \quad (2)$$

表面剥蚀率和质量损失率越高,构件在盐冻循环作用下的表面剥蚀越严重。上述指标均应用于实验室环境中,实际服役的构件则常使用保护层厚度这个指标。混凝土表面的剥落会使保护层厚度减小,保护层厚度的变化可以侧面体现混凝土表面剥落的现象。保护层厚度的检测方法主要有2种:①利用钢筋检测仪检测;②凿除钢筋表面的混凝土直接测量。耐久性评定规范中规定采用表面剥落面积、剥落深度、最大剥落深度对混凝土剥落现象进行描述。前者更注重保护层作用,后者更注重外观上的损伤及构件尺寸的损失,二者可以相互转换,用设计保护层厚度减去剥落深度即可得到实测的保护层厚度。

混凝土构件中混凝土在盐冻循环后的内部劣化常通过相对动弹性模量体现。水工混凝土试验规程和混凝土试验规程中规定,基于共振法测得构件横向基频计算出对应的动弹性模量与相对动弹性模量。Zhao等采用该方法测量了盐冻后混凝土构件的1阶频率和2阶频率,指出2阶频率比1阶频率对盐冻后内部的损伤更加敏感,更适合作为评价盐冻损伤的指标<sup>[48]</sup>。此外,混凝土试验规程中提供了另一种动弹性模量的测量方法,即采用超声波装置测量超声波在构件中的传播速度来计算动弹性模量。Hanjar等提出超声波速度对盐冻循环造成的损伤更加敏感,测量结果比横向基频更加稳定<sup>[73]</sup>。

对于裂缝发展,主要通过裂缝长度、裂缝宽度、裂缝面积等指标进行反映。这些指标在常规检测中需要借助检测支架、裂缝测宽仪、钢尺、相机等工具。近年来,图像识别技术逐渐应用到裂缝测量中,该方法通过提取图像特征,对裂缝指标进行检测<sup>[74]</sup>。

混凝土桥梁服役过程中,混凝土材料的力学性能随盐冻循环的发展不断下降,工程中更加关注服役过程混凝土抗压性能的变化,并常采用抗压强度、强度均质系数、混凝土性能受影响厚度这3个指标来反映。在实验室条件下,可以对盐冻后的试块直接进行抗压试验,确定抗压强度,并利用盐冻前后的抗压强度差值计算抗压强度损失率。在实际工程中,常见的混凝土抗压强度检测方法有钻孔取芯法、回弹法、超声-回弹综合法、射钉法等。钻孔取芯法自1981年开始在中国推广,是目前最可靠的抗压强度检测方法,同时也是其他检测方法的验证手段<sup>[74]</sup>。回弹法通过回弹仪锤击混凝土表面的反弹值推定混凝土强度,其操作简便,在工程中应用广泛。超声-回弹法联合非金属超声仪和回弹仪进行工作,用声时值和回弹值表征混凝土抗压强度,弥补了单一参数的不足,但是水工混凝土试验规程中规定该方法不适用于因冻害已造成表面疏松、剥落的混凝土。射钉法通过将特制射钉射入混凝土,根据射钉外露长度估算混凝土抗压强度,一般适用于强度等级C10~C40的混凝土。将混凝土测区抗压强度推定值测量出后除以设计强度等级即可得到强度均质系数。混凝土性能受影响厚度的检测方法分为2种:原位检测、取样检测。原位检测一般采用超声法,混凝土损伤越严重,超声波的波速越慢。利用这一原理,通过换能器测量不同厚度处混凝土的传播速度即可得到混凝土性能受影响厚度。关斌等采用该方法对混凝土损伤层厚度进行了测量,拟合了损伤层厚度随冻融循环次数变化的公式<sup>[75]</sup>。取样检测一般采用湿润深度法或者里氏硬度法。将取样的混凝土处理后,测量不同深度的湿润度和里氏硬度,湿润度和里氏硬度突变的地方即为混凝土受影响层厚度。混凝土受影响层厚度虽然能体现出服役过程混凝土力学性能的下降,但不如抗压强度直观,且测量方法较为复杂。

规范中描述混凝土损伤最特殊的指标(冻融损伤剩余年限)通过取样对比试验的方法进行检测。首先将取样的混凝土切成2个试件,表面的为测试试件,深层的为对比试件;然后将所有试件一同进行冻融试验;最后通过测试试件的里氏硬度确定试件的当量冻融循环次数,再用试验停止时的冻融循环次数除以当量冻融循环次数即可得到冻融损伤剩余年限。该方法较为复杂,且通过里氏硬度计算当量冻融循环次数有一定偏差。

3.2.2 氯盐侵蚀类指标

氯盐侵蚀类指标主要分为 2 类:衡量氯离子侵入程度的指标与衡量混凝土构件抵抗氯离子侵入能力的指标。衡量氯离子侵入程度的指标有氯离子最大侵入深度和氯离子含量。氯离子侵入的最大深度一般采用将构件切开,在切面上涂抹特定显色指示剂和氯离子发生反应,测量反应产生的颜色距构件表面距离。氯离子含量通常采用化学滴定法确定,将硝酸银溶液加入到处理后距离混凝土表面特定深度的混凝土粉末溶液中直至砖红色,通过消耗的硝酸银溶液体积计算该深度样品的氯离子含量。

构件抵抗氯离子侵入的能力一般通过氯离子扩散系数进行评价。氯离子扩散系数越大,氯离子侵入构件的速度就越快,抵抗能力就越差。规范中常用电迁移试验法(radial capillary migration,RCM)进行测量。除此之外,还可以采用电通量来评价构件抵抗氯离子侵入的能力。单位时间内通过构件的电通量越多,构件抵抗氯离子侵入的能力越弱<sup>[76]</sup>。然而规范方法对构件的形状要求严格,只能对特定形状的构件进行测量。因此,工程中常在测量出氯离子含量之后,利用 Fick 第二定律[式(3)]反推出氯离子扩散系数。获得氯离子扩散系数后,即可计算钢筋处氯离子浓度达到临界氯离子浓度的时间,用该时间减去检测时间即可得到氯离子侵入剩余年限,可用式(3)可表示为

$$C(x,t)=C_0+(C_s-C_0)\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right]$$
 (3)

式中: $C(x,t)$ 为距离混凝土表面  $x$  处、暴露于盐溶液  $t$  时的氯离子浓度; $C_s$  为混凝土表面氯离子含量; $C_0$  为混凝土初始氯离子含量; $\operatorname{erf}(\cdot)$  为误差函数; $D$  为氯离子扩散系数。

3.2.3 钢筋锈蚀类指标

钢筋锈蚀类指标可以分为直接描述钢筋锈蚀程度的指标和通过电化学特征侧面反映钢筋锈蚀程度的指标。第 1 类指标通常需要把钢筋从构件中取出进行检测,虽然对原结构造成了损伤,但是测量效果最直接,最具真实性。在实验室环境中,钢筋锈蚀率和质量损失率是最常用指标。前者是用玻璃纸描绘钢筋锈蚀面积,用锈蚀面积除以钢筋表面积计算得出。后者是通过酸洗钢筋前后的质量对比计算得到,被学者广泛应用于钢筋锈蚀程度的研究<sup>[77]</sup>。在工程中,常采用的指标是截面损失率和锈蚀深度。用游标卡尺测量钢筋样品即可得到钢筋直径实测值和锈蚀深度,之后利用钢筋直径实测值和公称直径

即可计算截面损失率。然而该方法测量精度较低,误差较大。近年来,新兴的 3D 扫描技术逐渐应用到了钢筋锈蚀程度的检测上,该方法比起传统方法对于钢筋锈蚀情况反映的更加直观,更加准确。Tahershamsi 等利用此技术扫描了不同构件取出的钢筋,建立了锈蚀钢筋的可视化图像模型,并对其锈蚀程度进行了检测和评价<sup>[78]</sup>。

第 2 类指标通常采用无损检测的方法,不需要把钢筋从构件中取出,对构件不产生破坏,但是只能对钢筋锈蚀程度做定性检测,不如损伤检测的数据直观。这类指标中,钢筋电位应用最广泛。该指标采用半电池电位法进行测量,这种方法利用半电池对钢筋施加电流,之后检测电压,即可对钢筋锈蚀程度进行评价,锈蚀程度判定如表 2 所示。混凝土电阻率也是常用指标之一,通常采用四电极混凝土电阻率检测仪进行检测。然而混凝土电阻率是混凝土材料属性的指标,只能侧面反映钢筋的锈蚀情况。

表 2 水工混凝土试验规程中的半电池电位  
评价钢筋锈蚀性状的判据

Tab. 2 Criterion for evaluating corrosion behavior of steel bars by half-cell potential in hydraulic concrete test specification			
电位水平/mV	(-600,-350)	[-350,-200]	(-200,0)
钢筋锈蚀性状	发生锈蚀的概率大于 90%	锈蚀形状不确定	不发生锈蚀的概率大于 90%

3.3 盐冻环境下混凝土桥梁耐久性评价指标体系建立及建议阈值

考虑到盐冻病害及机理的复杂和多样,单个耐久性评价指标无法全面评价在役混凝土桥梁的服役状态。因此,在充分考虑混凝土桥梁盐冻病害特征、服役状态演变规律及影响因子的基础上,建立盐冻环境下混凝土桥梁耐久性指标体系、提出相关指标阈值是进行混凝土桥梁服役状态评价与科学维养决策的前提。虽然国内外学者相继提出了相应的混凝土桥梁耐久性评价指标体系<sup>[79-82]</sup>,但是这些指标体系存在指标数量多、检测难度及工作量大,或者病害体现不全面及针对性不足等问题。为此,结合性能劣化影响因子及第 3.1 节对耐久性指标的统计与分析结果,充分考虑指标的可检测性,建立如表 3、表 4 所示的盐冻环境下混凝土桥梁耐久性评价指标体系。

参照耐久性设计规范,同时结合第 2 节中混凝土构件性能劣化影响因子的分析,在材料层面选取混凝土强度等级、水胶比、含气量、气泡间距系数、抗冻耐久性指数(抗冻等级、抗冻标号)、氯离子扩散系

表 3 盐冻环境下混凝土桥梁设计指标体系

Tab. 3 Design index systems of concrete bridge in salt-frozen environment

指标层面	指标名称
材料层面	混凝土强度等级
	水胶比
	含气量及气泡间距系数
	氯离子扩散系数
	抗冻耐久性指数(抗冻标号、抗冻等级)
构件层面	保护层厚度

表 4 盐冻环境下混凝土桥梁检测指标体系及阈值

Tab. 4 Detection index systems and thresholds of concrete bridge in salt-frozen environment

指标类型	指标名称	警戒阈值	极限阈值
影响因子	裂缝宽度/mm	0.05	规范限值
混凝土损伤	保护层厚度系数	0.90	0.55
	相对动弹性模量/%	85	60
	平均强度均质系数	0.95	0.85
	氯离子含量/%	0.15	0.40
氯离子侵蚀	钢筋锈蚀电位/mV	−200	−300

数作为设计指标,在构件层面选取保护层厚度作为设计指标,旨在从设计上保证混凝土桥梁在服役期内的耐久性。这些指标对混凝土桥梁在盐冻环境中的服役性能劣化有重要影响,在设计阶段满足规范要求可以在其服役期内避免或减轻耐久性病害,保障混凝土桥梁在盐冻环境下的服役性能。特别是规范中对混凝土在冻融环境下的抗冻耐久性指数进行了规定,然而抗冻耐久性指数仅考虑了快冻法中混凝土相对动弹性模量的变化,忽略了混凝土试验规程中其他试验方法的混凝土抗冻性能指标。因此,建议根据具体的抗冻性试验方法选择对应的指标(快冻法对应抗冻等级,慢冻法对应抗冻标号)。

检测指标旨在通过检测这些指标,反映盐冻环境下混凝土桥梁服役状态及其演变过程。裂缝作为混凝土构件性能劣化的重要影响因子,会对混凝土构件服役性能劣化速度产生巨大影响,需要对此进行密切关注。在混凝土损伤方面,对应盐冻环境下混凝土的几种病害类型,选取保护层厚度系数、相对动弹性模量、平均强度均质系数。针对混凝土表面的剥落,选取保护层厚度系数为检测指标。保护层厚度系数是保护层厚度检测值和设计值的比值,既可以体现表面剥落情况,还可以体现保护层对钢筋保护作用的降低程度。针对内部劣化,采用相对动弹性模量为检测指标,该指标是各种混凝土材料抗冻性研究中重点关注的指标,同时作为损伤变量在

各种研究中用来计算冻融后的黏结性能、承载能力等<sup>[83-84]</sup>。针对力学性能下降,采用平均强度均质系数为检测指标,该指标直观体现了盐冻环境下混凝土力学性能的损伤。由于重要结构不允许钢筋发生锈蚀,无需对钢筋的锈蚀程度、速度进行检测,只需对钢筋是否锈蚀做定性判断,因此,选取氯离子含量和钢筋电位来反映氯盐侵蚀造成的耐久性病害。氯离子含量既可以反映氯离子侵蚀程度,又可以定性反映钢筋锈蚀程度。同时,钢筋电位在钢筋锈蚀相关指标中应用最为广泛,且检测方法对原结构的损伤较小。该指标体系可以作为桥梁耐久性检测方案的检测项目,来全面反映盐冻环境下混凝土桥梁耐久性变化及其趋势。

提出指标阈值是进行混凝土桥梁科学维养决策的基础。针对维养决策的目标,在上述评价指标体系的基础上,提出警戒阈值和极限阈值 2 种阈值。当指标状态超过警戒阈值时,结构耐久性与服役状态虽然满足规范要求,但混凝土桥梁后续服役状态发展趋势会发生较大改变,应当提高警惕,适当缩短桥梁耐久性检测周期;而当指标状态超过极限阈值时,结构即达到耐久性极限状态,应当采取必要的加固或修复手段保证桥梁的安全和适用。

裂缝宽度对盐冻环境下混凝土桥梁的影响已被众多学者研究。当裂缝宽度超过 0.05 mm 时,随着盐冻循环的进行,混凝土的力学性能,混凝土-钢筋界面的静力性能、疲劳性能和构件的承载能力快速下降<sup>[66,71,73]</sup>。因此,选取裂缝宽度的警戒阈值为 0.05 mm。耐久性设计规范中对裂缝宽度的限值进行了规定,如表 5 所示。裂缝宽度的极限阈值可以根据其规定进行确定。

表 5 耐久性设计规范中表面裂缝计算宽度限值

Tab. 5 Limit values of crack width in standard for design of durability mm

环境作用等级	严重	非常严重、极端严重
钢筋混凝土构件	0.20	0.15

保护层厚度系数阈值的确定主要依据耐久性评定规范及承载力评定规范,相关规定见表 6、表 7。耐久性评定规范中对最大剥落深度进行了等级划分,将最大剥落深度转换为保护层厚度系数  $a$ ,结果如表 6 所示。从表 6 可知,耐久性评定规范将 0.9 作为 A 级和 B 级的分界线、0.5 作为 B 级和 C 级的分界线,因此,根据该规范可取混凝土保护层系数的警戒阈值为 0.9,极限阈值为 0.5。从表 7 可知,当保

表 6 耐久性评定规范中保护层厚度系数的耐久性等级

Tab. 6 Durability grade of protective layer thickness coefficient in specification for detection of durability

A 级	B 级	C 级
$0.9 < a \leq 1.1$	$0.5 \leq a \leq 0.9$	$0 < a < 0.5$

表 7 承载力评定规范中保护层厚度系数的评定标准

Tab. 7 Evaluation standard of protective layer thickness coefficient in specification for detection bearing capacity

$a$	对结构的影响	评定标度
$(0.95, 1.10]$	影响不显著	1
$(0.85, 0.95]$	有轻度影响	2
$(0.70, 0.85]$	有影响	3
$(0.55, 0.70]$	有较大影响	4
$(0, 0.55]$	钢筋易失去碱性保护,发生锈蚀	5

护层厚度系数小于 0.85 时,对结构的影响从有轻度影响变为有影响,当保护层厚度系数小于 0.55 时,钢筋失去保护,易发生锈蚀,因此,根据该规范可取混凝土保护层厚度系数的警戒阈值为 0.85,极限阈值为 0.55。对比发现,根据耐久性评定规范确定的警戒阈值比根据承载力评定规范确定的警戒阈值大,极限阈值则更小。这是因为保护层厚度对耐久性和承载力的影响不同。然而,承载力的满足应当优先于耐久性。故确定警戒阈值为 0.9,极限阈值为 0.55。

文献中相对动弹性模量随冻融循环的变化规律如图 12 所示<sup>[84-86]</sup>。从图 12 可以看出,当相对动弹性模量下降超过 85%时,相对动弹性模量的下降趋势会有所加快,因此,将 85%设为警戒阈值。而在水工混凝土试验规程、混凝土试验规程、水运混凝土试验规范中都规定当相对动弹性模量下降到 60%时,即认为混凝土材料冻坏,可以停止抗冻性试验,故而将 60%设定为相对动弹性模量的极限阈值。

平均强度均质系数阈值主要依据承载力评定规范和技术状况评定规范确定。表 8、表 9 分别为承载力评定规范及技术状况评定规范中混凝土平均强度均质系数的评定标准。从表 8、表 9 可以看出:当平均强度均质系数小于 0.95 时,混凝土强度状况从较好变为较差,承重构件会出现缺损现象,因此,将平均强度均质系数的警戒阈值定为 0.95;当平均强度均质系数小于 0.85 时,混凝土强度状态非常差,会显著影响承载能力,因此,将平均强度均质系数的极限阈值定为 0.85。

承载力评定规范中给出了氯离子含量的评定标准,如表 10 所示。由表 10 可知,当氯离子含量超过

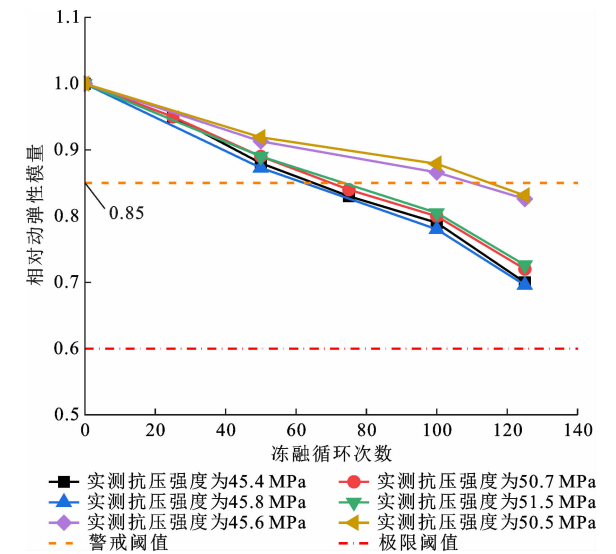


图 12 相对动弹性模量和冻融循环次数的关系

Fig. 12 Relationship between relative dynamic elastic modulus and number of freeze-thaw cycles

表 8 承载力评定规范中桥梁混凝土强度评定标准

Tab. 8 Bridge concrete strength evaluation standard in specification for detection bearing capacity

平均强度均质系数	强度状况	评定标度
$[1.00, 1.20]$	很好	1
$[0.95, 1.00)$	较好	2
$[0.90, 0.95)$	较差	3
$[0.85, 0.90)$	差	4
$(0, 0.85)$	危险	5

表 9 技术状况评定规范中的混凝土强度评定标准

Tab. 9 Concrete strength evaluation standard in standard for technical condition evaluation

标度	定性描述	平均强度均质系数定量描述
1	承重构件混凝土强度处于良好状态	$[1.00, 1.20]$
2	承重构件混凝土强度处于较好状态	$[0.95, 1.00)$
3	承重构件混凝土强度处于较差状态,造成承重构件出现缺损现象	$[0.90, 0.95)$
4	承重构件混凝土强度处于很差状态,造成承重构件出现严重缺损现象	$[0.85, 0.90)$
5	承重构件混凝土强度处于非常差状态,造成承重构件有严重的变形、位移、失稳等现象,显著影响承载力和行车安全	$(0, 0.85)$

0.15%时,诱发钢筋锈蚀的可能性从很小变为不确定,因此,确定氯离子含量的警戒阈值为 0.15%。根据耐久性设计规范中单位体积混凝土凝胶材料用量的最大值以及耐久性评定规范中临界氯离子浓度的建议值可以算出当氯离子含量大于 0.4%时,钢筋处的氯离子浓度达到临界氯离子浓度,钢筋发生



表 10 承载力评定规范中氯离子含量评定标准

Tab. 10 Evaluation standard of chloride ion content in specification for detection bearing capacity

氯离子含量/% (占水泥含量的百分比)	诱发钢筋锈蚀的可能性	评定标度
(0,0.15)	很小	1
[0.15,0.40)	不确定	2
[0.40,0.70)	有可能诱发钢筋锈蚀	3
[0.70,1.00)	会诱发钢筋锈蚀	4
[1.00,3.00]	钢筋锈蚀活化	5

锈蚀,达到极限状态。因此,确定氯离子含量警戒阈值为 0.15%,极限阈值为 0.40%。

钢筋电位的阈值主要根据承载力评定规范及技术状况评定规范确定,其中对钢筋锈蚀电位的评定标准如表 11、表 12 所示。综合表 2、表 11、表 12 可知:当锈蚀电位小于-200 mV 时,钢筋可能发生锈蚀;当锈蚀电位小于-300 mV 时,钢筋大概率发生锈蚀。因此,确定警戒阈值为-200 mV,极限阈值为-300 mV。

表 11 承载力评定规范中钢筋锈蚀电位评定标准

Tab. 11 Evaluation standard for corrosion potential of steel bar in specification for detection bearing capacity

电位水平/mV	钢筋状况	评定标度
[-200,0)	无锈蚀活动或锈蚀活动不确定	1
[-300,-200)	有锈蚀活动,但是锈蚀状态不确定,可能坑蚀	2
[-400,-300)	有锈蚀活动,发生锈蚀概率大于 90%	3
[-500,-400)	有锈蚀活动,严重锈蚀可能性极大	4
[-600,-500)	构件存在锈蚀开裂区域	5

表 12 技术状况评定规范中钢筋锈蚀电位评定标准

Tab. 12 Evaluation standard of corrosion potential of steel bar in standards for technical condition evalution

标度	定性描述	钢筋锈蚀电位 定量描述/mV
1	完好	[-200,0)
2	承重构件有轻微锈蚀现象	[-300,-200)
3	承重构件钢筋发生锈蚀,混凝土表面有沿钢筋的裂缝或混凝土表面有锈迹	[-400,-300)
4	承重构件钢筋锈蚀引起混凝土剥落,钢筋裸露,表面膨胀性锈层显著	[-500,-400)
5	承重构件大量钢筋锈蚀引起混凝土剥落,部分钢筋屈服或锈断,混凝土表面开裂,影响结构安全	[-600,-500)

3.4 盐冻环境下混凝土桥梁耐久性评价指标研究现状及未来展望

综上所述,已有的耐久性评价指标已经可以较好地评价混凝土桥梁的耐久性,本文针对盐冻环境

建立了混凝土桥梁耐久性评价指标体系,并提出了检测指标的警戒阈值及极限阈值,可以用于维修养护策略的制定。然而现有的指标只能体现病害的一方面,相互之间比较独立,检测方法上也较为传统。针对这些不足,未来可以结合更深入的盐冻循环机理和盐冻环境下混凝土桥梁服役性能演变规律,提出综合性指标来全面体现桥梁整体耐久性;可以通过新型机械技术、计算机技术改进指标检测方法,提高检测效率和精度。

4 结 语

(1)盐冻环境下混凝土桥梁典型病害为梁体和桥墩的混凝土疏松、剥落及钢筋锈蚀,并且表现出显著空间分布特征。在空间分布上,中国北方区域年冻融循环次数较南方区域更多,冻融等级也更高,同时该区域还分布着面积巨大的盐渍土环境及海洋环境,在氯盐侵蚀和冻融循环耦合作用下,混凝土桥梁的服役性能下降更为迅速。

(2)盐冻环境下混凝土桥梁的服役状态演变涉及材料-构件-结构相互影响。混凝土材料和钢筋性能劣化演变大致可以分为 3 个阶段:初始阶段,病害发生前水分、氯离子积累的阶段;发展阶段,混凝土在盐冻循环作用下产生剥落的阶段;加速阶段,钢筋产生锈蚀、混凝土进一步劣化的损伤速度加快阶段。各阶段构件承载能力下降由混凝土性能、钢筋性能及二者之间的黏结性能下降共同导致。其性能劣化影响因子可归结为水胶比、掺和料、外加剂、保护层厚度、钢筋种类、持载状态与初始裂缝等方面。混凝土桥梁服役过程中,材料、构件与结构的性能演变并不孤立,而是通过应力或受力状态相互关联。

(3)规范中的耐久性指标数量众多,主要可以分为材料属性、混凝土损伤、氯离子侵蚀、钢筋锈蚀 4 类指标。在总结常见指标检测方法的基础上,结合混凝土桥梁的典型病害、性能劣化影响因子,充分考虑指标的使用频率、可检测性以及混凝土桥梁病害体现的全面性,建立了涵盖设计、检测的盐冻环境下混凝土桥梁耐久性评价指标体系,并提出了对应指标的警戒阈值和极限阈值。该指标体系及阈值可以用于桥梁运维过程中耐久性评价方法及养护维修策略的制定。

(4)为了更深刻把握盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变规律,评价其服役状态,未来应该开展关于盐冻环境下混凝土构件在疲劳荷载作用下及疲劳荷载和盐冻循环耦合作用下性能演变等方面的研

究;基于大数据和机器学习技术,建立理论和数据双驱动的混凝土桥梁服役性能预测模型;结合更深入的盐冻循环机理和盐冻环境下混凝土桥梁服役状况演变规律,应用新型综合性指标和检测方法提高服役状态评价的准确度。

## 参考文献:

## References:

- [1] 杨全兵,黄士元.对混凝土结构抗冻融及盐冻侵蚀耐久性设计的建议[C]//同济大学.混凝土结构耐久性设计与施工论文集.北京:中国建筑工业出版社,2004:53-65.
- YANG Quan-bing, HUANG Shi-yuan. Suggestions on the durability design of concrete structures against freeze-thaw and salt-freeze erosion[C]// Tongji University. Proceedings of durability Design and Construction of Concrete Structures. Beijing: China Building Industry Press, 2004: 53-65.
- [2] 张云清,余红发,孙伟,等.城市混凝土桥梁盐冻病害调查与研究[J].建筑材料学报,2012,15(5):665-669,689.
- ZHANG Yun-qing, YU Hong-fa, SUN Wei, et al. Investigation and study of durability of bridge under salt scaling[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(5): 665-669, 689.
- [3] 余红发,孙伟,王甲春,等.盐湖地区混凝土的长期腐蚀产物与腐蚀机理[J].硅酸盐学报,2003,31(5):434-440.
- YU Hong-fa, SUN Wei, WANG Jia-chun, et al. On attack product and corrosion mechanism of ordinarily concrete after long-term exposure to salt lakes[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(5): 434-440.
- [4] SCHERER G W. Freezing gels[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1993, 155(1): 1-25.
- [5] 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.
- YANG Quan-bing. Mechanisms of deicer-frost scaling of concrete (I): Capillary-uptake degree of saturation and ice-formation pressure[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5): 522-527.
- [6] VALENZA J J, SCHERER G W. Mechanism for salt scaling of a cementitious surface[J]. Materials and Structures, 2007, 40(3): 259-268.
- [7] 金伟良.氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M].北京:科学出版社,2011.
- JIN Wei-liang. Durability theory and design method of concrete structure in chloride environment [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [8] 杨海成,胡正涛,于方,等.海水环境粉煤灰混凝土结构耐久性现场检测与评估分析[J].海洋工程,2019,37(2):104-111.
- YANG Hai-cheng, HU Zheng-tao, YU Fang, et al. Field test and evaluation analysis on durability of fly ash concrete structures in seawater environment[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(2): 104-111.
- [9] 许梅,麻海燕,余红发,等.大连港服役50年混凝土的力学性能与耐久性[J].材料科学与工程学报,2018,36(3):470-477.
- XU Mei, MA Hai-yan, YU Hong-fa, et al. Mechanical properties and durability of wharf concrete after 50 years' service in Dalian Port[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36(3): 470-477.
- [10] SONG Z P, REN S B, YUAN C F. The damage test research and durability predict of Songhuajiang highway bridge with freeze-thaw condition[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 2783-2786.
- [11] 赵宇琴,徐湘田,张洪伟,等.内蒙古岛状多年冻土区公路冻害特征研究[J].内蒙古工业大学学报(自然科学版),2023,42(6):542-548.
- ZHAO Yu-qin, XU Xiang-tian, ZHANG Hong-wei, et al. Research on frost damage characteristics of highways in patchy permafrost region of Inner Mongolia[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 42(6): 542-548.
- [12] 王瑛,刘俊芳.交通荷载作用下高温冻土动弹性模量影响因素研究[J].内蒙古工业大学学报(自然科学版),2023,42(2):174-177.
- WANG Ying, LIU Jun-fang. Study on influence factors of dynamic elastic modulus of high temperature frozen soil under traffic load[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 42(2): 174-177.
- [13] 兰素恋,张红日,李红明.硫酸盐侵蚀下改性钢渣骨料混凝土性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(5):115-125.
- LAN Su-lian, ZHANG Hong-ri, LI Hong-ming. Study on the properties of modified steel slag aggregate concrete under sulfate erosion[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Sci-

- ence),2023,20(5):115-125.
- [14] 许耘嘉.白城地区盐渍土工程特性的试验研究[D].长春:吉林大学,2019.
- XU Yun-jia. Experimental research on engineering characteristics of saline soil in Baicheng area[D]. Changchun:Jilin University,2019.
- [15] 陈宗芳.吉林西部盐渍土冻结温度预测及水盐迁移规律研究[D].长春:吉林大学,2020.
- CHEN Zong-fang. Study on freezing temperature prediction and water-salt migration of saline soil in western Jilin[D]. Changchun:Jilin University,2020.
- [16] WU H R,LYU Q F,JIN W L. Durability related environmental zonation and design methodology for marine RC structures[J]. Journal of South University (English Edition),2018,34(1):78-86.
- [17] 杨全兵.冻融循环条件下氯化钠浓度对混凝土内部饱水度的影响[J].硅酸盐学报,2007,35(1):96-100.
- YANG Quan-bing. Effects of sodium chloride concentration on saturation degree in concrete under freezing-thawing cycles[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2007,35(1):96-100.
- [18] 贡金鑫,何世饮,郭育霞.盐环境中冻融循环对钢筋与混凝土粘结性能影响[J].大连理工大学学报,2005,45(3):405-409.
- GONG Jin-xin,HE Shi-yin,GUO Yu-xia. Influence of freezing and thawing cycles on bond characteristics of steel bar and concrete in salt environment[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45 (3): 405-409.
- [19] 冀晓东.冻融后混凝土力学性能及钢筋混凝土粘结性能的研究[D].大连:大连理工大学,2007.
- JI Xiao-dong. The experimental study and theoretical analysis on the mechanical performance of concrete and bond behaviour between concrete and steel bar after freezing and thawing[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2007.
- [20] ZHANG P,YUAN C G,VOGEL M,et al. Steel reinforcement corrosion in concrete under combined actions:The role of freeze-thaw cycles,chloride ingress, and surface impregnation[J]. Construction and Building Materials,2017,148:113-121.
- [21] JIANG W Q,SHEN X H,XIA J,et al. A numerical study on chloride diffusion in freeze-thaw affected concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018,179:553-565.
- [22] JIANG W Q,SHEN X H,HONG S X,et al. Binding capacity and diffusivity of concrete subjected to freeze-thaw and chloride attack: A numerical study [J]. Ocean Engineering,2019,186:106093.
- [23] 万小梅,张同波,赵铁军,等.盐冻环境下混凝土的微结构和氯离子渗透性[J].建筑材料学报,2015,18(4):633-639.
- WAN Xiao-mei,ZHANG Tong-bo,ZHAO Tie-jun, et al. Microstructures and chloride permeability of concretes under salt frost[J]. Journal of Building Materials,2015,18(4):633-639.
- [24] 李林洁,刘清风.冻融循环下混凝土内部结冰及氯离子传输规律的数值研究[J].硅酸盐学报,2022,50(8):2245-2256.
- LI Lin-jie, LIU Qing-feng. Numerical analysis on freezing rate and chloride transport in concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2022,50(8):2245-2256.
- [25] 耿 娇,刁 波,陈圣刚.冻融与侵蚀作用下引气混凝土劣化微观机理[J].北京航空航天大学学报,2013,39(10):1392-1396.
- GENG Jiao,DIAO Bo,CHEN Sheng-gang. Degradation mechanism of air-entrained concrete under alternative actions of freeze-thaw cycles and seawater immersion[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2013,39(10):1392-1396.
- [26] 迟守慧,牛景轶,张 磊,等.混凝土在氯盐冻融过程中的 pH 值演变[J].混凝土,2014(4):28-30.
- CHI Shou-hui,NIU Jing-yi,ZHANG Lei,et al. pH value of concrete subjected to freeze-thaw cycles in chloride solution[J]. Concrete,2014(4):28-30.
- [27] ZHANG S H,TIAN B,CHEN B F,et al. The influence of freeze-thaw cycles and corrosion on reinforced concrete and the relationship between the evolutions of the microstructure and mechanical properties[J]. Materials,2022,15(18):6215.
- [28] LU X C,GUAN B,CHEN B F,et al. The effect of freeze-thaw damage on corrosion in reinforced concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2021,2021:9924869.
- [29] 郭寅川,申爱琴,王 剑,等.高寒地区桥梁混凝土抗氯离子渗透性能研究[J].建筑材料学报,2014,17(3):425-429,436.
- GUO Yin-chuan,SHEN Ai-qin,WANG Jian,et al. Resistance to chloride ion permeation to concrete bridges in alpine regions[J]. Journal of Building Materials,2014,17(3):425-429,436.

- [30] 冯 博,刘 青,钱永久.高性能混凝土在氯盐侵蚀和冻融循环作用下的耐久性分析[J].西南交通大学学报,2023,58(5):1083-1089.  
FENG Bo, LIU Qing, QIAN Yong-jiu. Durability analysis of high-performance concrete under chloride salt erosion and freeze-thaw cycles [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(5): 1083-1089.
- [31] GONG F Y, WANG Z, XIA J, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of reinforced concrete beams under the effect of frost damage and sustained load[J]. Structural Concrete, 2021, 22(6): 3430-3445.
- [32] 张 涛,朱 成.水泥-硅灰/粉煤灰体系强度、收缩性能与微观结构研究[J].硅酸盐通报,2022,41(3): 903-912.  
ZHANG Tao, ZHU Cheng. Strength, shrinkage performance and microstructure of cement-silica fume/fly ash system[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(3): 903-912.
- [33] 马艳霞,聂思凡,郭佳庆.硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(1):64-72.  
MA Yan-xia, NIE Si-fan, GUO JIA-qing. Experimental research on mechanical properties of fly ash concrete in sulfate saline soil area[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 64-72.
- [34] 吴泽媚,陈东丰,高培伟,等.氯盐和冻融双重作用对混凝土抗盐冻性的影响[J].硅酸盐通报,2011,30(6):1244-1248.  
WU Ze-mei, CHEN Dong-feng, GAO Pei-wei, et al. Effects of chloride salt and freezing-thawing on deicer-scaling resistance of concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(6): 1244-1248.
- [35] 李 丹,吴建伟,张 鹏,等.引气混凝土抗氯离子渗透性及其微观孔结构[J].硅酸盐通报,2017,36(11): 3797-3802.  
LI Dan, WU Jian-wei, ZHANG Peng, et al. Resistance of chloride ion penetration and the microstructure of air-entrained concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(11): 3797-3802.
- [36] 张家科,袁 捷,刘文博,等.基于工业扫描分析混凝土气泡结构与抗盐冻性能[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(1):53-59.  
ZHANG Jia-ke, YUAN Jie, LIU Wen-bo, et al. Application of industrial computerized tomography to analyze air voids structure and salt scaling resistance of concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(1): 53-59.
- [37] 闫西乐,张 萍,秦鸿根,等.混凝土抗盐冻性能试验[J].水利水电科技进展,2016,36(2):42-45,94.  
YAN Xi-le, ZHANG Ping, QIN Hong-gen, et al. Experimental study of frost-salt resistance of concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 42-45, 94.
- [38] 段桂珍.海洋环境下混凝土桥墩的冻融耐久性研究[D].上海:上海交通大学,2013.  
DUAN Gui-zhen. The research on freeze-thaw durability of concrete pier in the marine environment [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [39] 孙红运.冻融环境下钢筋混凝土桥墩抗压性能研究[D].上海:上海交通大学,2017.  
SUN Hong-yun. Compressive behavior of reinforced concrete piers under freeze-thaw cycles [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [40] CAO D F, ZHOU K F, ZHOU M, et al. Study on the shear behaviors of RC beams after freeze-thaw cycles [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 488/489: 750-754.
- [41] WANG Z, HAYASHIDA H, ZHANG D W, et al. Structural behaviors evaluation of RC beam under frost damage: A methodology with meso-macro material/bond simulation and integrating into structural analysis[J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110162.
- [42] DABAS M, MARTÍN-PÉREZ B, ALMANSOUR H. Combined effects of freeze-thaw and corrosion on performance of RC structures: State-of-the-art review [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, 35(5): 03121002.
- [43] LIU G R, DOU X X, QU F L, et al. Bond behavior of steel bars in concrete confined with stirrups under freeze-thaw cycles[J]. Materials, 2022, 15(20): 7152.
- [44] WANG Z H, LI L, ZHANG Y X, et al. Bond-slip model considering freeze-thaw damage effect of concrete and its application[J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109831.
- [45] 曹大富,马 钊,葛文杰,等.冻融循环作用后钢筋混凝土柱的偏心受压性能[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(1):188-193.  
CAO Da-fu, MA Zhao, GE Wen-jie, et al. Eccentric compressive behaviors of RC columns after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(1): 188-193.



- [46] PENG R X, QIU W L. Research on freeze-thaw damage to RC column based on incompatibility deformation from pores [J]. *Engineering Structures*, 2021, 241:112462.
- [47] ZAGHIAN S, MARTÍN-PÉREZ B, ALMANSOUR H, et al. Nonlinear finite element modeling of bridge piers under the combined effect of corrosion, freeze-thaw cycles, and service load [J]. *Structural Concrete*, 2023, 24(4):5215-5232.
- [48] ZHAO P, XU G, WANG Q, et al. Impact of sustained load on damage characteristics of reinforced concrete beams under the combined action of salt freeze-thaw cycles and corrosion [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273:121744.
- [49] ZHU F Z, MA Z M, ZHAO T J. Influence of freeze-thaw damage on the steel corrosion and bond-slip behavior in the reinforced concrete [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016:9710678.
- [50] 孙 洋,刁 波. 混合侵蚀与冻融环境下钢筋与混凝土粘结强度退化的试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(增 1):242-246.
- SUN Yang, DIAO Bo. Experimental study on bond degradation between reinforcement and concrete in multi aggressive and freeze-thaw environment [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28 (S1): 242-246.
- [51] 罗大明,牛荻涛,苏 丽. 荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展 [J]. *工程力学*, 2019, 36(1):1-14,43.
- LUO Da-ming, NIU Di-tao, SU Li. Research progress on durability of stressed concrete under environmental actions [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(1):1-14,43.
- [52] 刁 波,孙 洋,马 彬. 混合侵蚀和冻融交替作用下持续承载钢筋混凝土梁试验 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(增 2):281-286.
- DIAO Bo, SUN Yang, MA Lin. Experiment of persistent loading reinforced concrete beam under alternative actions of a mixed aggressive solution and freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(S2):281-286.
- [53] DUAN A, LI Z Y, ZHANG W C, et al. Flexural behaviour of reinforced concrete beams under freeze-thaw cycles and sustained load [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(10):1350-1358.
- [54] 熊建波,苏达根,黎鹏平,等. 弯曲荷载下浪溅区混凝土中氯离子的扩散规律 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(2):127-132,138.
- XIONG Jian-bo, SU Da-gen, LI Peng-ping, et al. Flexural load-affected diffusion rules of chloride through concrete in splash zone [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(2):127-132,138.
- [55] KOSIOR-KAZBERUK M, BERKOWSKI P. Surface scaling resistance of concrete subjected to freeze-thaw cycles and sustained load [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 172:513-520.
- [56] 刘建忠,孙 伟,缪昌文,等. 弯曲荷载与盐溶液复合作用下混凝土冻融损伤 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(增 2):243-247.
- LIU Jian-zhong, SUN Wei, MIU Chang-wen, et al. Freeze-thaw damage of concrete under flexural load and salt solution [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2006, 36(S2):243-247.
- [57] 王阵地,姚 燕,王 玲. 冻融循环-氯盐侵蚀-荷载耦合作用下混凝土中钢筋的锈蚀行为 [J]. *硅酸盐学报*, 2011, 39(6):1022-1027.
- WANG Zhen-di, YAO Yan, WANG Ling. Corrosion behavior of steel bar embedded in concrete subject to freeze-thaw cycles-chloride attack-flexural load [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(6): 1022-1027.
- [58] 叶 林. 盐蚀及冻融循环作用下持载钢筋混凝土轴心受压承载力的损伤研究 [D]. 长春:长春工程学院, 2020.
- YE Lin. Study on the damage of load bearing reinforcement concrete under axial compression capacity coupled effects of salt corrosion and freeze-thaw cycles [D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2020.
- [59] WU J Q, FAYE P N, ZHANG W M, et al. Chloride diffusivity and service life prediction of RC columns with sustained load under chloride environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158:97-107.
- [60] SHEN B, YE Y H, DIAO B, et al. Mechanical performance and chloride diffusivity of cracked RC specimens exposed to freeze-thaw cycles and intermittent immersion in seawater [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016:5973467.
- [61] ZAGHIAN S, MARTÍN-PÉREZ B, ALMANSOUR H. Nonlinear finite element modeling of the impact of reinforcement corrosion on bridge piers under concentric

- loads[J]. *Structural Concrete*, 2022, 23(1):138-153.
- [62] MA Z M, ZHU F Z, BA G Z. Effects of freeze-thaw damage on the bond behavior of concrete and enhancing measures[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 196:375-385.
- [63] 马昆林, 王中志, 龙广成, 等. 动荷载-水-冻融共同作用下混凝土宏观裂缝扩展与演变的研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(19):19091-19098.  
MA Kun-lin, WANG Zhong-zhi, LONG Guang-cheng, et al. Propagation and evolution of macroscopic crack of concrete under dynamic load-water-freeze-thaw action: A review[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(19):19091-19098.
- [64] YIN T Y, ZHU W Q, XU B, et al. Deterioration law of flexural performance of RC beams with initial cracks under alternating action of salt freeze-thaw cycles and fatigue[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 409:134052.
- [65] GU C P, YE G, SUN W. A review of the chloride transport properties of cracked concrete: experiments and simulations[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2015, 16(2):81-92.
- [66] 黄俊博, 宁宝宽, 李明烁, 等. 既有裂缝混凝土的冻融劣化及损伤特性分析[J]. *工业建筑*, 2020, 50(1):142-147.  
HUANG Jun-bo, NING Bao-kuan, LI Ming-shuo, et al. Analysis of freeze-thaw deterioration and damage characteristics of existing cracked concrete[J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(1):142-147.
- [67] CHENG Y C, ZHANG Y W, JIAO Y B, et al. Quantitative analysis of concrete property under effects of crack, freeze-thaw and carbonation[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 129:106-115.
- [68] 陈有亮, 刘明亮, 蒋立浩. 含宏观裂纹混凝土冻融的力学性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(增 2):230-233.  
CHEN You-liang, LIU Ming-liang, JIANG Li-hao. Experimental study on mechanical properties of concrete with cracks after freeze-thaw cycles[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(S2):230-233.
- [69] LIU G Y, MU S, CAI J S, et al. Influence of crack on concrete damage in salt-freezing environment[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 2021:5543286.
- [70] WANG H, HE S Q, FEI C H. Deterioration performance of damaged concrete beams under freezing-thawing cycle and chloride environment in coastal cities[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 83(S1):295.
- [71] SHI J R, ZHU W Q, ZHANG L H, et al. Deterioration laws of static and fatigue bond performance between rebar and concrete with initial cracks under salt-freeze conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 452:138754.
- [72] MIA M M, KAMESHWAR S. Machine learning approach for predicting bridge components' condition ratings[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2023, 9:1254269.
- [73] 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.
- [74] 贺拴海, 赵祥模, 马建, 等. 公路桥梁检测及评价技术综述[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(11):63-80.  
HE Shuan-hai, ZHAO Xiang-mo, MA Jian, et al. Review of highway bridge inspection and condition assessment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(11):63-80.
- [75] 关虢, 牛荻涛, 肖前慧. 考虑残余强度修正的混凝土冻融损伤层及轴心受压模型研究[J]. *铁道学报*, 2021, 43(3):175-182.  
GUAN Xiao, NIU Di-tao, XIAO Qian-hui. Study on concrete freezing-thawing damage layer considering residual strength correction and constitutive model under axial compression[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(3):175-182.
- [76] 朱红光, 易成, 孙辅延, 等. 氯盐浓度对混凝土中氯离子渗透的影响规律[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(4):725-729.  
ZHU Hong-guang, YI Cheng, SUN Fu-yan, et al. Influence of chloride concentration on chloride ion penetration in concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(4):725-729.
- [77] LIU S, DU M H, TIAN Y B, et al. Bond behavior of reinforced concrete considering freeze-thaw cycles and corrosion of stirrups[J]. *Materials*, 2021, 14(16):4732.
- [78] TAHERSHAMSI M, FERNANDEZ I, LUNDGREN K, et al. Investigating correlations between crack width, corrosion level and anchorage capacity[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(10):1294-1307.
- [79] 郝伟, 魏雪萍. 基于灰色关联度的高寒地区混凝土梁桥耐久性评估[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(5):

1889-1897.

HAO Wei, WEI Xue-ping. On the durability evaluation of the concrete beam bridges in alpine region based on the grey relation degree[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(5): 1889-1897.

[80] 郝伟, 韦丽, 陶泽, 等. 除冰盐与冻融环境下在役混凝土桥梁耐久性评估[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1207-1216.

HAO Wei, WEI Li, TAO Ze, et al. Durability evaluation of in-service concrete bridges under deicing salt and freeze-thaw environment[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1207-1216.

[81] 张永良, 郑大为. NRS 下多证据融合的混凝土桥梁耐久性评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 169-176.

ZHANG Yong-liang, ZHENG Da-wei. Durability assessment model of concrete bridge based on multi-evidence fusion under NRS[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1): 169-176.

[82] 郑一峰, 李龙, 房玮, 等. 基于信息熵-未确知测度理论的公路桥梁耐久性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(8): 1206-1210, 1216.

ZHENG Yi-feng, LI Long, FANG Wei, et al. Durability assessment of highway bridges based on information entropy and uncertainty measurement theory[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(8): 1206-1210, 1216.

[83] 张艺欣, 郑山锁, 荣先亮, 等. 考虑粘结滑移的冻融损伤纤维梁柱模型研究[J]. 工程力学, 2020, 37(9): 208-216.

ZHANG Yin-xin, ZHENG Shan-suo, RONG Xian-liang, et al. Research on freeze-thaw damage model of fiber beam column considering reinforcement slip effect[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(9): 208-216.

[84] 曹大富, 富立志, 杨忠伟, 等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. 混凝土, 2013, 16(1): 17-23, 32.

CAO Da-fu, FU Li-zhi, YANG Zhong-wei, et al. Study on constitutive relations of compressed concrete subjected to action of freezing-thawing cycles[J]. Concrete, 2013, 16(1): 17-23, 32.

[85] 郭容邑. 冻融环境下混凝土受弯构件的试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011.

GUO Rong-yi. Experimental research on reinforced concrete bending members under freeze-thaw cycles[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011.

[86] 杨忠伟. 冻融循环作用下混凝土单轴受压性能试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.

YANG Zhong-wei. Research about uniaxial compression performance of concrete under freeze-thaw cycles[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010.