

文章编号: 1674—8247(2022)05—0049—04

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.05.010

# 铁路混凝土桥梁耐久性设计研究

李晓波

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

**摘要:**随着服役年限的增加,铁路钢筋混凝土桥梁面临的耐久性问题日益突出。本文基于现场调研并结合国内外研究成果,分别论述了6种不同环境类别下钢筋混凝土结构的腐蚀机理,研究了水灰比、矿物掺合料等影响因素对混凝土结构耐久性能的作用机理和影响效果,提出了不同环境类别作用下混凝土桥梁的耐久性设计要求及强化措施,并对耦合环境作用给出了具体的设计建议。研究成果可为设计者开展桥梁混凝土结构耐久性设计提供借鉴。

**关键词:**钢筋混凝土桥梁; 耐久性; 环境类别; 腐蚀机理

中图分类号: U448.33 文献标识码: A

## Study on Durability Design of Concrete Bridge of the Railway

LI Xiaobo

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** With the increase in service life, reinforced concrete bridges of railway show increasingly prominent problems with durability. Based on the field investigation and the research results at home and abroad, this paper discusses the corrosion mechanism of reinforced concrete structures under 6 different environmental categories, studies the action mechanism and impact effect of impact factors such as water-cement ratio and mineral admixtures on the durability of concrete structures, and puts forward the durability design requirements and strengthening measures of concrete bridges under different environmental categories. It also gives specific design suggestions for the environment coupling action. The research results can provide a reference for the designers to carry out the durability design of bridge concrete structures.

**Keywords:** reinforced concrete bridge; durability; environmental category; corrosion mechanism

铁路钢筋混凝土桥梁结构在设计使用年限内很少因强度不足而影响结构使用功能,但由于耐久性问题不满足设计使用要求的情况却时有发生,造成巨额的加固维修费用,大大增加了钢筋混凝土桥梁全寿命周期成本,因此有必要开展铁路混凝土桥梁耐久性设计研究。

TB 10005-2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》<sup>[1]</sup>针对铁路混凝土结构耐久性设计归纳了6种不同的环境类别,本文对不同环境类别下混凝土结构的腐蚀机理以及腐蚀影响因素进行了系统的论述。研

究成果可为铁路钢筋混凝土桥梁结构耐久性设计提供参考。

## 1 混凝土腐蚀机理

### 1.1 碳化环境

混凝土碳化是指CO<sub>2</sub>气体渗透到孔隙水中与水泥的水化产物氢氧化钙(Ca(OH)<sub>2</sub>)等发生持续的中和反应,导致孔隙周围混凝土pH降低;当混凝土碳化发生在钢筋附近时会破坏钢筋钝化膜,引起钢筋脱钝,加速钢筋混凝土结构的退化。

收稿日期:2021-11-24

作者简介:李晓波(1992-),男,工程师。

引文格式:李晓波. 铁路混凝土桥梁耐久性设计研究[J]. 高速铁路技术,2022,13(5):49-52.

LI Xiaobo. Study on Durability Design of Concrete Bridge of the Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5):49-52.

## 1.2 氯盐环境

环境中氯离子不断向混凝土内部渗透扩散引起钢筋表面 pH 降低,造成钢筋脱钝并处于电化学活化状态,与钝化膜尚未破坏区域产生电势差,在水和氧气的共同参与下,即可发生钢筋的电化学腐蚀反应。当阳极的氧化反应和阴极的还原反应相距较远时,发生宏电池反应,表现为钢筋的坑蚀;当两个反应相距较近或处于同一位置时,发生微电池反应,表现为钢筋的均匀腐蚀。混凝土桥墩氯盐环境下侵蚀破坏如图 1 所示。



图 1 混凝土桥墩氯盐环境下侵蚀破坏图

## 1.3 化学侵蚀环境

硫酸盐侵蚀按照有无化学反应可分为化学侵蚀环境作用和盐类结晶破坏环境作用,这两种侵蚀类型往往同时存在。化学侵蚀是指硫酸盐与混凝土中水化产物发生化学反应,生成钙矾石( $\text{CA}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_3\text{O}$ )、石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )等膨胀性矿物,最终导致混凝土膨胀开裂。

## 1.4 盐类结晶破坏环境

盐类结晶破坏是指硫酸盐溶液渗透扩散进入到结构内部,孔隙溶液蒸发导致硫酸盐结晶析出,当产生的结晶压力超过混凝土抗拉强度时,会在混凝土孔隙壁上形成内部裂纹。内部裂纹形成后会导致硫酸盐介质更易进入混凝土内部,内部裂纹产生和发展将更加迅速,最终加速混凝土结构的宏观劣化。

## 1.5 冻融破坏环境

混凝土冻融破坏是北方严寒地区常见病害,主要由于混凝土在施工过程中残留在孔隙中的游离水,在温度急剧变化的情况下,孔隙之间产生的膨胀压力及渗透压力大于混凝土抗拉强度,引起混凝土产生微观损伤裂纹,且在频繁的冻融循环作用下混凝土内部损伤逐渐积累,使得裂纹不断扩大,从而产生由内向外的剥蚀,最终导致混凝土服役性能下降。混凝土桥墩冻融破坏如图 2 所示。



图 2 混凝土桥墩冻融破坏图

## 1.6 磨蚀环境

磨蚀环境包含风沙吹蚀和水沙冲磨两种环境。风蚀主要是指挟沙风对桥梁混凝土表面产生撞击作用,从而引起混凝土表面的物理性损伤破坏;水沙冲磨导致混凝土表面冲磨破坏原因由两部分组成:第一部分为冲击作用导致的混凝土表面的变形,第二部分为颗粒的切削作用导致的混凝土材料的剥落。混凝土桥墩水沙冲蚀破坏如图 3 所示。



图 3 混凝土桥墩水沙冲蚀破坏图

## 2 影响因素

### 2.1 水灰比

水灰比是混凝土结构耐久性设计的关键指标,对不同腐蚀环境下混凝土耐久性能均有显著影响。水灰比越大,渗透性越强,氯离子以及硫酸盐等腐蚀介质侵蚀速度越快,试验表明降低水灰比进而增加混凝土的密实度可以延缓钢筋锈蚀的发生以及锈蚀发展的速率<sup>[2-3]</sup>。冻融环境下,水灰比越大,混凝土中大孔隙的数量越多,孔隙中游离水在冻融循环作用下产生的冻胀压力也越大。试验研究表明,碳化速率与水灰比呈正比关系,而混凝土耐磨性能与水灰比呈反比关系<sup>[4-5]</sup>。

### 2.2 矿物掺合料

矿物掺合料粉煤灰、磨细矿渣等能提高水泥浆体的均匀性和致密性,对混凝土提升耐久性能起着重要

作用。但 Colleparidi 等<sup>[6]</sup>利用加速碳化试验证实,加入过量矿物掺合料会造成混凝土碱度降低,降低了混凝土抗碳化能力储备。国内相关试验表明,过量粉煤灰的掺入将会降低混凝土的抗冻性能。但在试验室模拟氯盐环境与化学侵蚀环境作用,电化学测试的结果表明矿物掺合料能够大幅度地提高混凝土抗氯盐以及抗化学侵蚀的能力<sup>[7-8]</sup>。

### 2.3 其它材料因素

水泥组份中的  $C_3A$  将会与硫酸盐化学反应,生成钙矾石、石膏等膨胀性产物<sup>[9]</sup>,可显著影响混凝土结构抗硫酸侵蚀性能。

混凝土中含气量会显著影响混凝土抗冻性能,谭克峰<sup>[10]</sup>通过试验研究发现,适量的引气剂可在混凝土内部产生大量的封闭微气泡,这些气泡位于混凝土孔隙中间可显著减小气泡间距,切断孔隙之间原有的毛细管,缓解混凝土中孔隙水冻结时由于体积膨胀而产生的膨胀压力。在盐类结晶破坏环境下,混凝土中适当引气同样可以释放硫酸盐结晶造成的破坏压力。

### 2.4 环境影响因素

桥梁结构所处环境的温度、相对湿度以及腐蚀介质的浓度均会对混凝土结构的腐蚀速率产生显著影响。在化学侵蚀环境下,硫酸盐中  $SO_4^{2-}$  的浓度以及阳离子的种类均会对硫酸盐侵蚀的产物造成影响,宏观上混凝土结构表现为不同的耐久性问题。上述环境影响因素难以规避,只能通过混凝土配合比设计以及其它防腐措施来应对。而针对磨蚀环境,冲磨速率和角度均会显著影响混凝土磨蚀损伤,且相关研究表明磨蚀角度在  $90^\circ$  损伤最为显著<sup>[11]</sup>。

## 3 耐久性设计及强化措施

### 3.1 耐久性设计要求

控制混凝土的水灰比是保证混凝土质量的重要环节,在混凝土结构耐久性设计中,依据不同环境类别和环境作用等级严格确定水灰比参数限值。通常北方桥梁混凝土水灰比不大于  $0.45$ <sup>[12]</sup>,对于海洋环境以及硫酸盐侵蚀环境,水灰比宜控制在  $0.40$  以下,对于极端环境,水灰比不宜超过  $0.36$ ,以增加混凝土的密实度。

对于矿物掺合料通常采用最大值进行控制,混凝土桥梁通常粉煤灰的掺量不宜超过  $30\%$ ,磨细矿渣不宜超过  $40\%$ ;对于冻融环境,矿物掺合料宜控制在  $20\%$  以下。而在氯盐环境与化学侵蚀环境的混凝土制备时必须添加足够量的矿物掺合料,因此,在混凝土制备

时粉煤灰的掺量应大于  $30\%$ ,或磨细矿渣的掺量大于  $50\%$ 。

对于其它材料因素,在硫酸盐化学侵蚀环境下,需严控水泥中  $C_3A$  含量,通常高抗硫水泥  $C_3A$  含量  $\leq 3\%$ ,中抗硫水泥  $C_3A$  含量  $\leq 5\%$ 。在冻融及盐类结晶破坏环境下,含气量不低于  $4\%$ ,硬化混凝土气泡间距系数应小于  $300 \mu\text{m}$ ,但引气剂并不是越多越好<sup>[13]</sup>,含气量的增加会降低混凝土强度,对抗冻有要求的混凝土含气量最高不能超过  $7\%$ 。

对于环境影响因素,在桥梁工程设计中应避免攻角  $90^\circ$  情况出现;合理的墩形同样可有效减少磨蚀作用,研究表明桥墩表面形态抗磨蚀损伤能力:圆形墩柱  $>$  圆端型墩柱  $>$  方形墩柱<sup>[14]</sup>,因此在磨蚀损伤严重地区尽量采用圆形桥墩。

### 3.2 腐蚀强化措施

严重腐蚀环境下,仅依靠混凝土配合比设计以及其它构造措施难以保证混凝土桥梁结构在设计使用期内耐久性要求,须采取防腐强化措施来进一步提升结构的耐久性能。表面硅烷浸渍利用硅烷渗入混凝土毛细孔数个毫米并与水泥发生化学反应,形成牢固憎水屏障,阻止水和氯化物渗透,憎水效果可达  $15$  年以上<sup>[15]</sup>。渗透结晶涂料涂刷在混凝土表面,能向混凝土内部逐渐渗透达  $300 \text{mm}$ ,遇水结晶并对裂缝具有自愈合封闭作用。表面硅烷浸渍以及渗透结晶涂层适用于各种恶劣腐蚀环境。对于氯盐侵蚀环境,还可采用涂层钢筋以及钢筋阴极保护措施,此类措施在沿海混凝土桥梁工程中得到广泛应用,有效减少了氯离子侵蚀破坏。我国东部沿海分布大量的盐渍土,西北地区有上千个内陆盐湖,混凝土桥梁建设面临严重的化学侵蚀与盐类结晶侵蚀,必要时可采用降低地下水位和换填土的方法来减少环境作用。

### 3.3 腐蚀环境耦合作用

实际工程中,混凝土桥梁破坏往往是多种环境共同耦合作用导致。北方海洋环境中混凝土桥梁在冻融-氯盐耦合作用下,极易发生盐冻破坏。为满足混凝土在海洋环境中的抗冻性要求,混凝土水灰比不宜大于  $0.4$ ,并建议将气泡间隔  $200 \sim 250 \mu\text{m}$  作为混凝土抗盐冻性能的含气量设计值。硫酸盐侵蚀与冻融破坏之间有相互促进作用,采用低水灰比、低掺量矿物掺合料混凝土抗侵蚀性好,且在此基础上添加高效引气剂、混杂纤维和膨胀剂后能显著提高混凝土的抗侵蚀性<sup>[16]</sup>。在硫酸盐 + 干湿循环双重因素作用下,干湿循环会加速硫酸盐的扩散,因此除采用大掺量矿物掺合料外,还可以引入混杂纤维来进一步提升混凝土

耐腐蚀性能<sup>[17]</sup>。

## 4 结束语

本文论述了6种不同环境类别下钢筋混凝土结构的腐蚀机理,结合国内外研究成果,阐述了水灰比、矿物掺合料等不同影响因素对混凝土结构耐久性能的影响,提出了不同环境类别作用下混凝土桥梁的耐久性设计要求以及强化措施,并针对实际工程中常见的耦合环境作用给出了具体的设计建议,为设计者开展桥梁混凝土结构耐久性设计提供了借鉴。

## 参考文献:

- [1] TB 10005-2010 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S].  
TB 10005-2010 Code for Durability Design on Concrete Structure of Railway[S].
- [2] 施惠生, 郭晓璐, 张贺. 水灰比对水工混凝土中钢筋锈蚀的影响[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1500-1505.  
SHI Huisheng, GUO Xiaolu, ZHANG He. Influence of Ratio of Water to Cement on Corrosion of Steel Bar in Hydraulic Concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1500-1505.
- [3] 申春妮, 黄林青, 陈明政, 等. 混凝土硫酸盐侵蚀影响因素的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3): 38-42.  
SHEN Chunni, HUANG Linqing, CHEN Mingzheng, et al. Experimental Study on Influence Factors of Sulfate Attack of Concrete[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(3): 38-42.
- [4] 吴国坚, 翁杰, 俞素春, 等. 混凝土碳化速率多因素影响试验研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(6): 33-40.  
WU Guojian, WENG Jie, YU Suchun, et al. Experimental Study on Carbonation Rate of Concrete with the Influence of Multiple Factors[J]. New Building Materials, 2014, 41(6): 33-40.
- [5] 杨宁, 王崇革, 赵美霞. 再生混凝土耐磨性影响因素研究[J]. 公路, 2011, 56(6): 171-174.  
YANG Ning, WANG Chongge, ZHAO Meixia. Research on Influence Factors of Abrasion Resistance for Recycled Aggregate Concrete[J]. Highway, 2011, 56(6): 171-174.
- [6] Collepardi M, Collepardi S, Ogoumah Olagot J J, et al. The Influence of Slag and Fly Ash on the Carbonation of Concrete [C]//Eighth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Las Vegas: American Concrete Institute, 2004: 483-494.
- [7] SANGOJU B, GETTU R, BHARATKUMAR B, et al. Chloride-Induced Corrosion of Steel in Cracked OPC and PPC Concretes: Experimental Study [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011(23): 1057-1066.
- [8] 刘芳, 尤占平, 汪海年, 等. 不同环境中矿物掺合料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的研究进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33(11): 682-688.  
LIU Fang, YOU Zhanping, WANG Hainian, et al. Research Progress on Sulfate Resistance of Concrete with Mineral Admixture in Different Environments [J]. Materials China, 2014, 33(11): 682-688.
- [9] KURTIS K, SHOMGLIN K, MONTEIRO P, et al. Accelerated Test for Measuring Sulfate Resistance of Calcium Sulfoaluminate, Calcium Aluminate, and Portland Cements [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001(13): 216-221.
- [10] 谭克锋. 水灰比和掺合料对混凝土抗冻性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(3): 58-60.  
TAN Kefeng. Effect of Water-Cement Ratio and Mineral Admixture on the Frost Resistance of Concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(3): 58-60.
- [11] 蔡新华, 何真, 查进, 等. 冲磨速率和角度对海工混凝土抗冲磨性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 782-786.  
CAI Xinhua, HE Zhen, ZHA Jin, et al. Influences of Impinging Velocities and Impinging Angles on Abrasion-Erosion Resistance of Marine Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 782-786.
- [12] 穆松, 李化建, 王育江, 等. 铁路混凝土耐久性理论与提升方法[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11): 20-25.  
MU Song, LI Huajian, WANG Yujiang, et al. Durability Theory and Improvement Method of Concrete in Railway Engineering [J]. Railway Engineering, 2018, 58(11): 20-25.
- [13] 张鸿雁. 混凝土抗冻耐久性研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2009.  
ZHANG Hongyan. The Research of Frost-Resisting Durability of Concrete [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2009.
- [14] 余志祥, 张蓬勃, 赵雷, 等. 山区桥梁墩柱水沙磨蚀损伤调查与仿真分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6): 919-926.  
YU Zhixiang, ZHANG Pengbo, ZHAO Lei, et al. Investigation and Numerical Calculation of Bridge Pier in Mountain Area under Erosion of Flow and Sediment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(6): 919-926.
- [15] 陈思孝, 袁明, 陈列. 氯盐环境下混凝土结构防腐蚀措施研究[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(4): 24-27.  
CHEN Sixiao, YUAN Ming, CHEN Lie. Study on Anti-Corrosion Measure for Concrete Frame in Chloride Environment [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(4): 24-27.
- [16] 姜磊, 牛获涛. 硫酸盐与冻融复合作用下混凝土劣化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3208-3216.  
JIANG Lei, NIU Ditao. Damage Degradation Law of Concrete in Sulfate Solution and Freeze-Thaw Environment [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9): 3208-3216.
- [17] 杨礼明, 余红发, 麻海燕, 等. 混凝土在碳化和干湿循环作用下的抗硫酸盐腐蚀性能[J]. 复合材料学报, 2012, 29(5): 127-133.  
YANG Liming, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Resistance of Concrete to Magnesium Sulfate Attack under Combined Action of Carbonation and Dry-Wet Cycles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 127-133.