

基于 AHP 的盐渍环境钢筋混凝土防腐方案

刘凯, 陈韬, 张文锋

(中交天津港湾工程研究院有限公司)

摘 要: 为解决盐渍环境下钢筋混凝土结构的防腐问题, 在总结其耐久性影响因素及主要防腐措施的基础上, 采取层次分析法(简称 AHP)筛选出适用的防腐方案。针对相关案例和应用场景, 提出防腐涂料+阻锈剂、镀锌钢筋、环氧涂层钢筋 3 种防腐方案, 同时建立了相应的结构模型及指标体系, 并通过 AHP 计算得到 3 种防腐方案的权重。结果表明, 在案例条件下, 防腐涂料+阻锈剂为最佳防腐方案。AHP 实现了方案的多指标综合分析, 避免了凭借单一指标筛选的局限性, 可供其他类似研究借鉴。

关键词: 盐渍土; 层次分析法(AHP); 腐蚀; 涂层; 钢筋混凝土

0 引言

我国盐渍土分布广泛, 盐渍土不仅分布于东北、黄淮海、甘新青区域, 还广泛分布于广大滨海区域。随着这些区域的开发, 越来越多的工程结构(如地铁、隧道、车库、地下建筑)暴露于盐渍环境中。近年来, 处于盐渍环境的钢筋混凝土腐蚀问题不断显现, 引起了从业人员的重视。其中由盐类在干湿循环条件下发生结晶引起盐胀的物理作用和酸碱溶液的腐蚀, 硫酸盐、氯盐等盐类侵蚀等造成的化学侵蚀均会引起钢筋混凝土的腐蚀。

混凝土结构的防腐措施很多, 既有提高混凝土密实度、增大混凝土保护层厚度等基本防腐措施, 也有采用表面涂层、钢筋阻锈剂等附加防腐措施。不同防护方式在防护效率、经济成本、使用寿命、施工适用性等方面存在较大的差异, 选择合适的防腐措施对于工程的顺利实施至关重要, 而目前针对盐渍环境钢筋混凝土的防腐问题尚未形成统一结论。

1 影响盐渍环境钢筋混凝土耐久性的因素

影响盐渍环境钢筋混凝土结构耐久性的因素可分为混凝土自身因素和外部环境因素。混凝土自身因素主要为材料类型、结构形式、保护层厚度、密实度、质量缺陷、应力情况等; 外部环境因素主要为化学侵蚀、盐类结晶、干湿交替、气候条件、杂散电流、外力破坏等。混凝土自身因素可影响腐蚀介质侵入混凝土的速度和劣化的发展速度。外部环境因素可通过改变混凝土自身因

素进一步对混凝土造成腐蚀破坏。

2 钢筋混凝土防腐措施技术特征分析

2.1 基本防腐措施

1) 提高混凝土的密实度。通过限制水灰比、掺加优质掺合料等措施, 保证混凝土的密实性, 减少腐蚀介质的渗入。但单纯提高密实度无法对混凝土结构裂缝或缺陷部位的钢筋提供有效保护。

2) 合理增加钢筋保护层厚度。通常钢筋的锈蚀是由渗透到钢筋表面的腐蚀介质引起的。适当增加保护层厚度可以延缓腐蚀介质到达钢筋表面的时间。但保护层厚度不可无限增大, 因为混凝土保护层厚度过大更易出现表面收缩裂缝, 反而会加速 Cl^- 渗入, 且会造成经济上的浪费。

3) 合理选材、设计有利结构形式, 降低腐蚀环境对结构的影响。

4) 采用高性能混凝土, 严格控制施工质量, 减少混凝土裂缝和拌合物中氯离子含量等。

2.2 附加防腐措施

2.2.1 表面涂层

混凝土表面涂层大致可分为 2 种: 一种附着在混凝土表面起到阻隔腐蚀介质的作用, 称为成膜型涂层; 另一种是通过渗透到混凝土基层内部一定厚度, 达到阻塞微孔、密实混凝土的作用, 称为渗透型涂层。表面涂层可有效阻隔环境腐蚀介质, 从而保护钢筋免受腐蚀^[1]。表面涂层施工简便、保护效果较好且直观, 得到了广泛的应用, 混凝土表面涂层的保护年限通常可达 15~20 a^[2], 涂层使用过程中应对失效部分及时修补。缺点是

涂层对混凝土本身的裂缝应变能力较差,涂层容易破损,破损后修复质量无法保证。

2.2.2 钢筋阻锈剂

钢筋阻锈剂可通过在钢筋表面生成钝化膜而提高引起腐蚀的离子浓度^[3]。通过添加钢筋阻锈剂可以有效提高盐渍土腐蚀环境下混凝土抵抗氯离子渗透的性能^[4]。在正常情况下,阻锈剂能起到保护钢筋的作用,但是钢筋阻锈剂难以解决裂缝或缺陷部位腐蚀介质造成的腐蚀。钢筋阻锈剂的种类繁多,应合理选择并注意与其他外加剂的相容性。钢筋阻锈剂的保护年限一般为25 a^[5],但对其长期有效性还存在争议,因而单纯使用钢筋阻锈剂其保护周期可能难以满足混凝土结构的设计寿命要求。

2.2.3 耐蚀筋材

1) 环氧涂层钢筋。环氧涂层可以紧密贴合在钢筋表面,同时化学稳定性高,耐腐蚀性强,可以切断氯离子通路,保护钢筋免受腐蚀侵害。与金属涂镀层相比,环氧涂层强度较低,在施工过程中很容易遭到破坏。在腐蚀环境下,受大阴极小阳极加速腐蚀的影响,涂层破损处局部腐蚀速度反而大于普通钢筋,因此,使用时需要最大限度的保护涂层。环氧涂层钢筋的成本约为普通钢筋的2倍,施工时需特殊处理,因而还会增加25%左右的费用。

2) 镀锌钢筋。镀锌层可隔绝钢铁基体和混凝土直接接触,并且镀锌层耐氯离子腐蚀能力高于普通钢筋,受碳化影响也较小,可有效延缓混凝土的开裂。同时其使用性能也较好,施工方便,一般不需特殊处理。在腐蚀环境下,镀锌层还可为钢筋提供阴极保护,但随着镀锌层的消耗,其保护作用也会降低。另外,混凝土水化初期,在钢筋和混凝土界面之间可能出现析氢现象,从而引起握持力的降低。镀锌钢筋成本约为普通钢筋的1.5倍,使用寿命与镀锌层的厚度和所处环境有关。

3) 不锈钢钢筋。不锈钢钢筋抗腐蚀性能优良,对比使用普通钢筋的结构物,使用不锈钢的结构物裂缝产生时间推迟6.5~13倍。但不锈钢钢筋材料成本很高,约为普通钢筋的6~10倍。

4) 不锈钢包覆钢筋。不锈钢包覆钢筋材料成本约为不锈钢钢筋的1/3。不锈钢表层确保了其优良的耐腐蚀性能,芯部碳钢确保其能满足钢结构

对强度的要求。使用过程中,应注意包覆层与碳钢芯避免脱开,同时做好端头碳钢芯的保护,避免发生腐蚀集中现象。

5) FRP筋。通过纤维胶合成型的复合纤维筋,具有较高的耐腐蚀性能,同时抗拉强度高、重量较轻,可提高构筑物的使用寿命^[6]。但其耐候性较差、弹性模量较低,目前应用还相对较少。

2.2.4 阴极保护

阴极保护技术通常防护效率较高,可为构筑物提供良好的腐蚀防护。按其技术特点可分为外加电流和牺牲阳极2种。外加电流施工中隐蔽工程数量多,质量较难控制,且一旦施工完成将无法对缺陷部位进行修复。因此系统的使用功能一般无法满足结构的长期需求,需定时进行维护和更换。此外,使用外加电流阴极保护时,很容易出现保护过当,过当保护可会导致析氢现象而引起钢筋握裹力降低和氢脆发生。外加电流系统需要专业化维护,安装维护成本较高。

牺牲阳极阴极保护法具有安装使用简便、免维护的特点。使用过程中应防止阴极和阳极之间电阻过大、阳极材料钝化等不利因素导致的防护系统耐久性降低,阴极保护的设计使用寿命一般为25~30 a。

综合对比可知,现在用于钢筋混凝土防腐的方式很多,每种方式适用的范围不尽相同,选择合适的保护方式,对于实现盐渍环境下钢筋的防护具有重要的意义。

3 防腐方案分析

3.1 案例分析

以某高速公路工程为例,探讨盐渍环境下钢筋混凝土结构防腐方法的选取规则。根据该工程的勘察报告,地下水 SO_4^{2-} 含量为1 400~2 500 mg/L,Cl⁻含量在4 200~12 000 mg/L,为保障通行,在冬季雨雪情况下,路面需施加化冰盐。工程主要涉及桥涵结构,具体构件含桩基、墩台、系梁、承台、防撞护栏等,其中部分构件处于干湿交替环境中。

根据JTG/T 3310—2019《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》^[7]要求盐渍土地区的混凝土结构,埋入土中的钢筋混凝土结构应按化学腐蚀环境考虑;露出地表的处于毛细吸附区内的钢筋混凝土结构应按盐结晶环境考虑。以 SO_4^{2-} 含量计,部分构件环境作用等级处于D、E,以Cl⁻含量计,部

分构件环境作用等级处于 E, 环境作用影响程度均为严重或非常严重等级, 必须采取合理措施以满足钢筋混凝土结构耐久性的设计要求。

需采用基础防腐措施结合附加防腐措施。其中基础防腐措施包括: 1) 优化结构构造, 采用合理的防水排水设计, 降低腐蚀环境对混凝土结构的影响; 2) 采用高性能混凝土, 提高混凝土基体的防腐能力; 3) 严控原材选择, 降低混凝土中水溶氯离子总量, 严控碱含量, 降低混凝土的自身缺陷; 4) 合理增加保护层厚度, 延长引起腐蚀的时间。

除此之外, 还需附加防腐措施, 结合各防护方法的技术特征和工程特点, 初选了 3 种附加防腐措施技术方案。

1) 防腐涂料+阻锈剂结合使用。对位于防撞护栏内侧和土中的桩基等结构件表面涂刷防腐涂料, 防腐涂料可采用底漆、中间漆、面漆配套涂膜组成。对下部桩基等结构件添加粉剂型钢筋阻锈剂。

2) 镀锌钢筋。位于防撞护栏内侧和土中的桩基等结构件采用镀锌钢筋, 注意钢筋加工、连接时保障镀锌层的连续性和有效性, 避免造成局部腐蚀。

3) 环氧涂层钢筋。对处于强腐蚀环境的桩基等构筑物, 全部采用环氧涂层钢筋; 对上部结构的外层采用环氧涂层钢筋。施工过程中应严格控制质量, 破损部位及时进行补涂。

由防腐措施技术特征分析可知, 各防腐方案存在明显的差异, 选择合适的防腐措施对工程的顺利实施和结构物的耐久性保障具有重要意义。通过层次分析法对其在本项目的适用性进行对比分析和筛选, 以提出最佳附加防腐措施。

3.2 层次分析法

层次分析法可利用较少信息使决策过程数学化, 尤其适用于决策目标较难准确计算的情况。通过对决策目标、影响因素的系统分析, 可利用简便算法为复杂问题提供决策。应用层次分析法时, 通过经验判断对各项因素的重要程度进行量化, 得出各因素对决策目标的权数, 再利用权数计算各方案的优劣次序^[9]。

层次分析法步骤为: 1) 建立层次结构模型, 明确决策目标、准则层因素和方案, 并按其相互关系绘制层次图; 2) 构造判断矩阵, 通过对各层

因素两两对比, 确定其相对重要的程度; 3) 层次单排序, 按照对上一层因素的重要性对本层次因素进行排序; 4) 一致性检验, 避免判断矩阵出现相互矛盾的情况; 5) 层次总排序, 通过计算对总目标重要性的权重进行方案层排序。

判断矩阵 A 的形式如式(1)所示。

$$A(a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n 为指标个数; a_{ij} 为指标 i 与 j 之间相对重要程度。本文采用九级标度法进行评定, 九级标度法的标度由数字 1~9 及其倒数组成, 数字越大代表指标 i 比指标 j 重要程度越高, 标度为 1 时代表两指标同等重要。

3.3 防腐方案建模分析

层次分析模型一般由方案层、准则层和目标层组成。经研究分析, 中间层决策准则设定为以下 4 个方面: 防护效率、经济成本、使用寿命、施工适用性。

1) 防护效率。防护效率即为相应保护方法对盐渍环境下钢筋的保护效率, 它代表钢筋在相应保护方法下的保护效果, 防护效率直接影响钢筋的腐蚀速度, 从而进一步影响结构的耐久性, 对保护方法的选择具有重要意义。

2) 经济成本。适用于强腐蚀环境下的保护技术很多, 如对于钢筋防护技术, 有不锈钢钢筋、钛合金钢筋等, 但是对于高速公路工程而言, 需要综合考虑经济成本。在满足使用要求的基础上, 应做到尽可能降低经济成本。因此经济成本也是影响防腐方案是否具有实用性的一个重要方面。

3) 使用寿命。高速公路工程的设计寿命很长, 在盐渍环境下需要采用合适的防护技术, 以保证高速公路主体结构耐久性的使用要求。如果使用寿命较短, 在使用过程中就需要经常维护, 从而进一步增加使用成本, 并且维护质量可能难以保障。因此, 防护方式的使用寿命对保障结构的长期保护具有重要意义。

4) 施工适用性。一项技术的应用不仅与其防护效率、经济成本等方面有关, 对于施工项目而言, 技术的施工适用性也同样重要。本项目具有工期紧, 施工程序繁琐、复杂的特点, 如果采用的防护技术严重影响施工进度, 或与其他施工程序存在冲突, 则其适用性就大打折扣。防护技术

必须同实际应用场景相结合,因此相关技术的施工适用性也是一项十分重要的参数。

层次结构模型见图1。

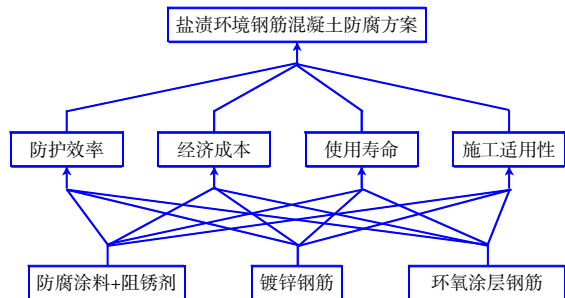


图1 层次结构模型

依据九级标度法对各指标进行两两相互比较,并构造判断矩阵,盐渍环境钢筋混凝土防腐方案判断矩阵及权重见表1,准则层各指标的重要性排序为施工适用性、防护效率、经济成本、使用寿命。

表1 防腐方案判断矩阵及权重

防腐方案	施工适用性	使用寿命	经济成本	防护效率	权重
施工适用性	1	7	5	1	0.441 1
使用寿命	1/7	1	1/5	1/6	0.047 6
经济成本	1/5	5	1	1/3	0.137 8
防护效率	1	6	3	1	0.373 5

对判断矩阵进行一致性检验,通常采用一次性比率 C_R 进行检验,一般认为当 $C_R<0.1$ 时,认为判断矩阵满足一致性。检验公式如式(2)所示。

$$C_R=\frac{C_I}{R_I} \tag{2}$$

式中: C_I 为一致性指标; R_I 为平均随机一致性指标,其中 R_I 可经查表获得,准则层有4个指标, $R_I=0.89$, C_I 定义如式(3)所示。

$$C_I=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{3}$$

式中: λ_{\max} 为矩阵的最大特征值, λ_{\max} 计算的常用方法有方根法和和积法,本文采用和积法计算,计算方法如式(4)、式(5)所示。

$$\omega_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^na_{kj}} \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^n\frac{(A\omega)_i}{n\omega_i} \tag{5}$$

式中: ω 为权重(特征向量); $\sum_{k=1}^na_{kj}$ 是判断矩阵按列求和的计算,它是求权重 ω 时的一个重要步骤,

n 为矩阵阶数。

经计算,防腐方案判断矩阵的 λ_{\max} 为4.174 5, C_I 为0.051 7, C_R 为0.065 4<0.1,满足一致性要求。

分别构建准则层的判断矩阵、计算方案层各因素相对准则层各因素的权重并经矩阵的一致性检验,再根据结果计算方案层相对目标层的组合权重,结果如表2所示。

表2 方案组合权重表

方案	权重				
	施工适用性	使用寿命	经济成本	防护效率	组合权重
防腐涂料+阻锈剂	0.747 1	0.134 9	0.732 4	0.215 8	0.517 5
环氧涂层钢筋	0.119 4	0.783 8	0.129 7	0.681 7	0.362 5
镀锌钢筋	0.133 6	0.081 3	0.137 8	0.102 5	0.120 1

计算分析结果表明,所述备选方案在高速公路盐渍环境下钢筋的防护技术适用性排序为:防腐涂料+阻锈剂,环氧涂层钢筋,镀锌钢筋。因此在此计算模型下,高速公路盐渍环境下钢筋的附加防腐措施的最佳防腐方案为防腐涂料+阻锈剂。

4 结语

针对盐渍环境下钢筋混凝土结构防腐方案进行研究,提出了基于层次分析法的防腐方案筛选方法。在案例条件下,钢筋的附加防腐措施的最佳防腐方案为防腐涂料和钢筋阻锈剂结合使用的方案。为复杂条件下钢筋混凝土结构防腐方案的筛选提供了参考。结果根据多指标构造判断矩阵进行计算所得,避免了凭借单一指标的局限性,并结合工程案例的建模分析,验证了方法的可行性。

参考文献:

[1] 余茂林,邓安仲,孙皓,等.盐渍环境下混凝土有机防护涂层的适用性研究[J].新型建筑材料,2021,48(10):90-94.

[2] 张利铨.海洋环境混凝土外加防腐蚀措施综述[J].科技与创新,2021(18):5-8,12-13.

[3] 陈明实.钢筋阻锈剂作用机理及效果研究[D].包头:内蒙古科技大学,2015.

[4] 张大利,宁作君,金恒刚,等.不同防护措施对南疆盐渍土环境C40混凝土耐久性影响的试验研究[J].混凝土,2022(6):157-160.

[5] 王朋杰,李树阳.钢筋混凝土外加电流阴极防护技术在长会口海湾大桥中的应用研究[J].价值工程,2010,29(2):202-203.

[6] 朵永玉.盐溶液和应力耦合作用下FRP筋混凝土梁短期耐久性研究[D].大连:大连理工大学,2019.

[7] JTG/T 3310—2019,公路工程混凝土结构耐久性设计规范[S].

[8] 汪湘晋,黄滢,蒋金琦,等.基于层次分析法的储能综合评估及类型选择[J].浙江电力,2022,41(11):1-8.