

基础防腐蚀设计在工程中的应用

熊凯

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 随着现代工程建设不断发展, 各种防腐蚀措施及方法在工程中的应用越来越广泛。基础工程是房屋建筑的根本, 基础工程的安全及耐久性显得尤为重要。论文着重介绍水和土对混凝土和钢筋腐蚀机理、基础混凝土的材料要求、构造要求以及内外部措施。重点介绍硫酸盐对混凝土的腐蚀和氯离子对混凝土中钢筋的腐蚀, 桩基础防腐蚀措施。

关键词: 腐蚀性等级; 保护层厚度; 水胶比; 碱含量; 氯离子迁移系数; 抗硫酸盐等级

The Application of Basic Anti-corrosion Design in Engineering

Kai Xiong

MCC Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract: With the continuous development of modern engineering construction, various anti-corrosion measures and methods are increasingly being applied in engineering. Basic engineering is the foundation of building construction, and the safety and durability of basic engineering are particularly important. The paper focuses on introducing the corrosion mechanism of water and soil on concrete and steel bars, the material requirements, structural requirements, and internal and external measures of foundation concrete. Emphasis will be placed on the corrosion of sulfate on concrete and the corrosion of chloride ions on steel bars in concrete, as well as anti-corrosion measures for pile foundations.

Keywords: corrosiveness level; thickness of protective layer; water cement ratio; alkali content; chloride ion migration coefficient; sulfate resistance level

1 水和土对混凝土和钢筋的腐蚀

1.1 腐蚀性评价

①岩土工程勘察单位提供的岩土工程勘察报告中, 会根据 GB 50021—2001 (2009 年版)《岩土工程勘察规范》提供水和土对混凝土和钢筋的腐蚀性评价, 包括氯离子(Cl^-)和硫酸盐(SO_4^{2-})含量(水、土中的含量单位分别为: mg/L 、 mg/kg)及腐蚀等级等, 应特别注意长期浸水和干湿交替的情况。

②勘察报告提供的水、土腐蚀性评价, 应查看其水样、土样的腐蚀离子含量是否均匀, 即分析其腐蚀等级结论是否合理。若腐蚀性离子含量很不均匀, 其腐蚀等级可能不具有代表性, 应分区进行评价。还要查看是否区分了长期浸水和干湿交替的腐蚀等级, 这两种条件下的结论会有较大的差别。如干湿交替为强腐蚀, 而长期浸水可能为弱腐蚀、微腐蚀。

1.2 腐蚀机理

1.2.1 氯离子

水、土中的氯离子通过扩散、渗透和吸附等途径自混凝土构件表面向混凝土内部迁移, 当钢筋周围的氯离子浓度达到某一临界值时, 钢筋表面的钝化膜开始破坏而丧失对钢筋的保护作用, 钢筋在水和氧的作用下发生持续的锈蚀。钢筋锈蚀可引起混凝土膨胀开裂, 尚可削弱钢筋的有效截面,

导致混凝土构件承载力的降低。

1.2.2 硫酸盐

水、土中的硫酸盐对混凝土的腐蚀机理有化学反应和物理作用两大类:

①化学反应。硫酸盐与混凝土中的水化铝酸三钙、氢氧化钙发生化学反应, 生成钙矾石和石膏, 两种反应均可对混凝土造成膨胀开裂, 同时破坏混凝土的内部结构和密实性而使腐蚀加剧。

②物理作用。硫酸盐进入混凝土内部后, 使得毛细孔隙中的硫酸盐溶液浓度不断升高, 超过饱和浓度后会析出盐结晶, 或混凝土中的硫酸盐溶液失水后也会析出盐结晶, 孔隙中盐结晶的膨胀压力会导致混凝土膨胀开裂。

1.2.3 干湿交替条件下的腐蚀

①氯离子对钢筋的腐蚀。根据港口调查分析, 钢筋锈蚀最严重的部位是在水位变动区段, 终年在水下的部位稍有腐蚀破坏现象。海港混凝土结构防腐蚀规范将海水环境混凝土部位分为大气区、浪溅区、水位变动区和水下区, 浪溅区—水下区对钢筋的腐蚀性逐渐减轻。

水和氧是钢筋发生锈蚀的主要因素, 长期浸水时, 由于水中缺氧使钢筋的锈蚀发展速度缓慢甚至停止。干湿交替时, 进入混凝土内部的氯离子浓度在不断的变化中, 浓度达到临界值时便会破坏钢筋的钝化膜。加之水和氧的交替作

用,使钢筋具备锈蚀发展的所有条件,更容易引起钢筋的锈蚀。

GB 50021—2001(2009 年版)《岩土工程勘察规范》第 12.2.4 条中,长期浸水和干湿交替条件下,划分腐蚀等级对应的水中氯离子含量范围差别很大(见表 1)。

表 1 腐蚀等级的划分

腐蚀等级	长期浸水	干湿交替
	水中 Cl ⁻ 含量 (mg/L)	水中 Cl ⁻ 含量 (mg/L)
微腐蚀	< 10000	< 100
弱腐蚀	10000~20000	100~500
中腐蚀	—	500~5000
强腐蚀	—	> 5000

②硫酸盐对混凝土的腐蚀。除了硫酸盐对混凝土的化学腐蚀外,因干湿交替的因素,混凝土内部会处于硫酸盐遇水溶解和失水结晶的反复作用中,自然会加剧混凝土的膨胀开裂。

GB 50021—2001(2009 年版)《岩土工程勘察规范》第 12.2.1 条中,当无干湿交替作用时,Ⅰ、Ⅱ类腐蚀环境,腐蚀等级划分的硫酸盐含量数值可提高,将干湿交替条件下的表中数值乘以 1.3。如Ⅱ类环境,干湿交替的强腐蚀 SO₄²⁻ 含量为 > 3000mg/L,无干湿交替时则为。

GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计规范》第 7.2.1 条,硫酸盐环境作用等级(见表 2)。

表 2 硫酸盐环境作用等级

环境作用等级	水中 SO ₄ ²⁻ 浓度 (mg/L)	土中 SO ₄ ²⁻ 浓度 (mg/L)
V~C	200~1000	300~1500
V~D	1000~4000	1500~6000
V~E	4000~10000	6000~15000

注:无干湿交替(长期浸没于地表或地下水中)时,可按表中的作用等级降低一级。

③基础的干湿交替范围。对基础而言,干湿交替范围包括地表附近及地下水位变化的区域。

干湿交替的深度范围一般取室外地面至最低地下水位的距离。最低地下水位根据勘察报告提供的水位确定。若已提供最低地下水位则可直接采用,若未提供可根据勘察期间的平均地下水位以下 2~4m 确定,雨季勘察取高值,旱季勘察取低值。

2 基础防腐蚀

GB 50046—2018 按《工业建筑防腐蚀设计规范》进行防腐蚀设计,包括下列内容:

①材料要求(必执行项)。

结构使用年限为 50 年的结构混凝土耐久性基本要求见表 3。

表 3 结构混凝土材料的基本要求

项目	腐蚀性等级		
	强	中	弱
最低混凝土强度等级	C40	C35	C30
最小胶凝材料用量 kg/m ³	340	320	300
最大水胶比	0.40	0.45	0.50
胶凝材料中最大氯离子质量比(%)	0.08	0.10	0.10
最大碱含量 kg/m ³	3.0	3.0	3.5

注:1.预应力混凝土构件最低强度等级应按表中提高一个等级,最大氯离子含量为胶凝材料用量的 0.06%。2.设计使用年限大于 50 年时,混凝土耐久性基本要求应按国家现行有关标准执行或进行专门研究。

②构造要求(必执行项)。

结构使用年限为 50 年的结构混凝土保护层最小厚度(mm)见表 4。

表 4 混凝土保护层最小厚度(mm)

构件类别	腐蚀性等级	
	强	中、弱腐蚀
板、墙等面型构件	30	30
梁、柱等条形构件	40	35
基础	50	50
与腐蚀性介质直接接触的地下室外墙及底板表面	50	50

注:设计使用年限为 25 年时,保护层厚度可减小 5mm,设计使用年限为 100 年时应参见有关标准或专门研究。

③外部措施(与内部措施选择一项)。

根据腐蚀性等级对基础、基础梁外表面涂刷防腐蚀材料,一般的小规模工程一般是采取外部措施,施工和验收的操作性较强。基础与垫层的防护要求详见表 5。

表 5 基础与垫层的防护要求

腐蚀性等级	垫层材料	基础的表面防护
强	耐腐蚀材料	①环氧沥青或聚氨酯沥青涂层,厚度 ≥ 500μm
		②聚合物水泥砂浆,厚度 ≥ 10mm
		③树脂玻璃鳞片涂层,厚度 ≥ 300μm
		④环氧沥青或聚氨酯沥青贴玻璃布,厚度 ≥ 1mm
中	耐腐蚀材料	①沥青冷底子油两遍,沥青胶泥涂层,厚度 ≥ 500μm
		②聚合物水泥砂浆,厚度 ≥ 5mm
		③环氧沥青聚氨酯沥青涂层,厚度 ≥ 300μm
弱	C20 混凝土	①沥青冷底子油两遍,沥青胶泥涂层,厚度 ≥ 500μm
		②聚合物水泥两遍

注:1.表中有多种防控措施时,可根据腐蚀性介质的性质和作用程度、基础的重要性等因数选择其中一种。2.埋入土中的混凝土结构或砌体结构,其表面应按本表进行防护。砌体结构表面应先用 1:2 水泥砂浆抹面找平。3.垫层材料可采用具有相应防腐蚀性能且强度等级 ≥ C20 的混凝土(厚 150mm)、聚合物水泥混凝土(厚 100mm)等。

基础梁的防护要求详见表 6。

表 6 基础与垫层的防护要求

腐蚀性等级	基梁表面防护
强	①环氧沥青或聚氨酯沥青贴玻璃布, 厚度 ≥ 1mm
	②树脂玻璃鳞片涂层, 厚度 ≥ 500μm
	③聚合物水泥砂浆, 厚度 ≥ 15mm
中	①环氧沥青或聚氨酯沥青涂层, 厚度 ≥ 500μm
	②聚合物水泥砂浆, 厚度 ≥ 10mm
	③树脂玻璃鳞片涂层, 厚度 ≥ 300μm
弱	①环氧沥青或聚氨酯沥青涂层, 厚度 ≥ 300μm
	②聚合物水泥砂浆, 厚度 ≥ 5mm
	③聚合物水泥两遍

注: 当表中有多种防护措施时, 可根据腐蚀性介质的性质和作用程度、基础梁的重要性等因素选用其中一种。

④内部措施 (与外部措施选择一项)。

采用抗硫酸盐硅酸盐水泥, 掺入抗硫酸盐外加剂、钢筋阻锈剂及矿物掺合料等。

内部措施的采用应经专题论证后采用, 应由业主方召集相关专家根据腐蚀环境等因素进行专题论证或委托专业机构研究后提出具体方案, 确定抗腐蚀材料的种类数量、品种选择、掺量 (如水泥品种、矿物掺合料品种、钢筋阻锈剂掺量、矿物掺合料掺量等), 设计单位将内部措施的论证结论或防腐报告的相关内容体现于施工图中。

较大规模的工程如采取防腐内部措施, 一般会进行专题研究, 统一提出材料品种和掺量等, 设计单位只是选用即可。较小规模工程限于工期、成本等因素一般不会进行专题研究, 一般是采取防腐外部措施。

⑤内部措施的材料及防腐机理。

第一, 抗硫酸盐水泥或抗硫酸盐外加剂。

抗硫酸盐腐蚀可采用抗硫酸盐水泥, 是限制可与硫酸盐发生化学反应而膨胀的铝酸三钙的含量。例如, GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计规范》的硫酸盐化学腐蚀环境, 当环境作用等级为 V~C、V~D 时, 水泥中的铝酸三钙含量应分别低于 8%、5%; 当使用大掺量矿物掺合料时, 可分别不大于 10%、8%; 当环境作用等级为 V~E 时, 应低于 5% 并同时掺入矿物掺合料。

GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计规范》第 B.1.5 条, 氯化物环境下不宜使用抗硫酸盐硅酸盐水泥。

抗硫酸盐腐蚀尚可掺入抗硫酸盐外加剂, 如抗硫酸盐类侵蚀防腐剂。

第二, 钢筋阻锈剂。

钢筋阻锈剂是通过抑制混凝土与钢筋界面的孔隙溶液中发生的阳极或阴极化学反应来保护钢筋。钢筋阻锈剂直接参与界面化学反应, 使钢筋表面形成钝化膜或吸附膜, 直接阻止或延缓钢筋的锈蚀。

钢筋阻锈剂分为内掺型和外涂型, 根据 GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计规范》规定的环境作用等级选用。

第三, 矿物掺合料。

矿物掺合料因粒径微小 (如 F 类 I 级粉煤灰, 方孔筛筛余不大于 12%)、比表面积大 (如硅灰的比表面积高达), 可改善混凝土的微观结构, 可使混凝土的孔隙减少并同时降低渗透性, 从而提高抗硫酸盐及氯离子腐蚀性能。

矿物掺合料混凝土抗氯离子侵蚀、抗硫酸盐腐蚀及抗碱骨料反应的能力均比单一硅酸盐水泥混凝土高得多, 因此当混凝土处于氯离子、硫酸盐或两者共存的腐蚀环境时, 不宜单独使用硅酸盐水泥作为胶凝材料。

矿物掺合料有粉煤灰 (煤粉炉排出)、硅灰 (硅铁冶炼排出)、粒化高炉矿渣粉 (炼铁高炉排出)、沸石粉 (天然沸石磨制)、石灰石粉 (天然石灰石磨制) 等。

3 桩防腐设计

按 GB 50046—2018《工业建筑防腐设计规范》进行防腐设计。

灌注桩、管桩一般不会采取防腐外部措施, 一般是采取防腐内部措施, 即采用抗硫酸盐硅酸盐水泥, 掺入抗硫酸盐外加剂、钢筋阻锈剂及矿物掺合料等, 应经专题研究提出, 不是设计单位能自行确定的。

宝钢广东湛江钢铁基地项目的管桩图集中, 氯离子中、强腐蚀时, 通过限制混凝土电通量或氯离子扩散系数满足防腐要求; 硫酸盐中腐蚀时, 通过保证管桩混凝土的抗硫酸盐等级满足防腐要求。因中、强腐蚀只在干湿交替条件下发生, 因此只有处于干湿交替范围 (自地面至最低水位以下 2m) 的顶节桩采用耐腐蚀管桩 (dPHC)。

混凝土电通量或氯离子扩散系数及抗硫酸盐等级, 其影响因素很多, 由管桩制作方通过调整混凝土配比材料、密实度抑或同时采用多种措施, 只要能满足耐久性指标即可 (见表 7)。

表 7 混凝土电通量或氯离子扩散系数及抗硫酸盐等级

类型		混凝土电通量 (C)	氯离子扩散系数 D_{RCM} ($10^{-12}m^2/s$)	抗硫酸盐等级	环境条件
II dPHC	沉桩前	≤ 850	≤ 4.5	-	氯离子环境对钢筋具有中等腐蚀性
	沉桩后	≤ 1200	≤ 5.5		
II dPHC	沉桩前	≤ 700	≤ 4.0	-	氯离子环境对钢筋具有强腐蚀性
	沉桩后	≤ 1000	≤ 5.0		
III dPHC	沉桩前	≤ 850	-	KS90	硫酸盐环境对混凝土具有中等腐蚀性

注: 当管桩处于氯离子和硫酸盐共同作用的腐蚀环境时, 应同时满足相应抗氯离子渗透性能指标和抗硫酸盐等级要求, 且电通量按较小值控制。

混凝土抗氯离子渗透及抗硫酸盐侵蚀的性能等级。

①混凝土抗氯离子渗透的性能等级。

混凝土抗氯离子渗透性能以氯离子迁移系数法或电通量法评定,选择其中的一种,GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》推荐采用氯离子迁移系数法。两者的试验方法按 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》。

第一,快速氯离子迁移系数法(RCM法)。

氯离子扩散系数是 D_{RCM} 以 $\phi 100 \times 50$ 混凝土试件,利用电源的阴阳极,让 Cl^- 从阴极往阳极迁移,即 Cl^- 往混凝土试件中渗透,试验时间与电流、电压有关,一般为 24h。

通过测量 Cl^- 在试件中的渗透深度,然后经计算得出氯离子扩散系数 D_{RCM} 。此系数越小,表明混凝土抗 Cl^- 渗透的性能越强。单位 $10^{-12}m^2/s$ 中的 m^2 是试件厚度与 Cl^- 渗透深

度相乘而产生的。

按 RCM 法,根据 JGJ/T 193—2009《混凝土耐久性检验评定标准》,混凝土抗氯离子渗透性能的等级划分见表 8。

第二,电通量法。

电通量法是以 $\phi 100 \times 50$ 混凝土试件,利用电源的阴阳极,让 Cl^- 从阴极往阳极迁移,即 Cl^- 往混凝土试件中渗透,测定每 30min 的电流值,试验时间为 6h。

以时间为横坐标,电流值为纵坐标,绘制 $I-t$ 曲线,对曲线作面积积分,得到 6h 通过试件的总电通量。电通量越小,表明混凝土抗 Cl^- 渗透的性能越强。

按电通量法,根据 JGJ/T 193—2009《混凝土耐久性检验评定标准》,混凝土抗氯离子渗透性能的等级划分见表 9。

②混凝土抗硫酸盐侵蚀性能等级。

表 8 混凝土抗氯离子渗透性能的等级划分

等级	RCM- I	RCM- II	RCM- III	RCM- IV	RCM- V
氯离子迁移系数 ($10^{-12}m^2/s$)	$D_{RCM} \geq 4.5$	$3.5 \leq D_{RCM} < 4.5$	$2 \leq D_{RCM} < 3.5$	$1.5 \leq D_{RCM} < 2.5$	$D_{RCM} < 1.5$

表 9 混凝土抗氯离子渗透性能的等级划分

等级	Q- I	Q- II	Q- III	Q- IV	Q- V
电通量 Q (C)	$Q \geq 4000$	$2000 \leq Q < 4000$	$1000 \leq Q < 2000$	$500 \leq Q < 1000$	$Q < 500$

混凝土抗硫酸盐侵蚀性能以能够经受的最大干湿循环次数来评定,试验方法按 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》。

试件为 100mm 立方体,在溶液中浸泡,然后烘干、冷却,每个干湿循环的总时间为 24h。如此再重复进行下一个干湿循环,直到规定的循环次数。达到规定的循环次数后进行抗压强度试验,按下式计算试件的抗压强度耐蚀系数:

$$K_f = \frac{f_{cn}}{f_{c0}} \times 100\%$$

式中, f_{cn} ——经 n 次干湿循环后受硫酸盐腐蚀试件的抗压强度;

f_{c0} ——同龄期未受硫酸盐腐蚀试件的抗压强度。

以耐蚀系数 $K_f \geq 75\%$ 的最大循环次数表示混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能等级,如 KS90,表示经 90 次干湿循环后,混凝土的抗压强度耐蚀系数 $K_f \geq 75\%$ 。

根据 JGJ/T 193—2009《混凝土耐久性检验评定标准》,抗硫酸盐侵蚀性能的等级划分为:KS30、KS60、KS90、KS120、KS150、> KS150。

4 结语

在腐蚀性环境中,在腐蚀性介质的长期作用下,建筑材料会逐渐劣化,建筑材料会发生质量损失、强度损失、外观变化,严重影响工程安全,基础防腐设计是基础设计的重中之重,论文着重介绍防腐设计的专业术语及材料、构造要求的作用机理,为防腐设计提供基本思路。

参考文献:

- [1] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
- [2] GB/T 50476—2019 混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [3] GB 50046—2018 工业建筑防腐设计规范[S].
- [4] GB 50164—2011 混凝土质量控制标准[S].
- [5] GB/T 50733—2011 预防混凝土碱骨料反应技术规程[S].
- [6] GB/T 51003—2014 矿物掺合料应用技术规范[S].
- [7] GB 50119—2013 混凝土外加剂应用技术规范[S].
- [8] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [9] JGJ/T 193—2009 混凝土耐久性检验评定标准[S].
- [10] JGJ/T 192—2009 钢筋阻锈剂应用技术规程[S].