

文章编号: 1005-0523(2017)01-0028-06

# 隧道混凝土结构使用寿命评价

丁 杨<sup>1</sup>, 邓文武<sup>2</sup>, 孟 伟<sup>2</sup>, 陈 衍<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司城市轨道交通设计院, 天津 300308)

**摘要:** 针对隧道混凝土结构使用寿命评价问题, 以 Fick 第二定律为基础, 利用混凝土扩散理论, 运用相应的数学模型, 对影响隧道混凝土结构使用寿命的一些因素进行全面分析和思考。研究结果表明: 混凝土保护层厚度是 55 mm 时, 混凝土的预测使用寿命只有 102 年到 105 年, 而采用保护层厚度是 70 mm 时, 混凝土的预测使用寿命可达 209 年和 248 年, 因此必须严格控制施工的质量, 保证一定的保护层厚度。因此, 随着保护层厚度的递增, 混凝土的预测使用寿命增长则会加大, 说明增加保护层的厚度可以有效的提高钢筋混凝土结构的使用寿命。最后, 经过实验验证, 在混凝土中添加一定量的粉煤灰的基础上, 再添加一定数量矿渣, 可明显提高混凝土的使用寿命。研究结果可以提高隧道混凝土结构寿命的措施和技术, 具有很好的现实意义。

**关键词:** 隧道; 高性能混凝土; 寿命评价; 扩散

中图分类号: TU528 文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.005

在环境腐蚀介质如氯盐( $\text{Cl}^-$ )等作用下, 混凝土对钢筋的保护作用随着时间的推移而逐渐降低, 最终导致混凝土中的钢筋发生腐蚀。随着钢筋混凝土结构老化现象越来越明显, 维修改造费用也持续的递增, 因此, 国内外针对钢筋混凝土结构的使用寿命问题的进行了较多的研究。Morinaga<sup>[1]</sup>以氯离子引起钢筋锈蚀导致混凝土出现顺筋裂缝作为失效准则, 根据混凝土锈胀开裂时的钢筋锈蚀量与钢筋锈蚀速度之间的关系来预测构件的寿命。Amey 等<sup>[2]</sup>考虑混凝土表面环境状况、氯离子传输、周围介质温度、季节变换以及施工差异等因素的影响来预测处于不同环境中的混凝土构件的使用寿命。赵尚传等<sup>[3]</sup>提出了基于可靠性与经济优化相结合的在役混凝土结构剩余使用寿命评估准则, 并建立了相应的剩余使用寿命预测优化模型。本文结合苏埃通道隧道为背景, 采取以 Fick 第二定律进行使用寿命计算, 选用相应的数学模型, 所得的结果在苏埃通道隧道混凝土结构中较为符合, 提出的措施和技术对今后的实际工程也可采用。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

苏埃通道隧道工程是从汕头市龙湖区天山南路, 穿过苏埃湾海域, 在南岸的汕头跳水馆西面大概 200 m 处登岸。

### 1.2 工程难点

场地中地下水为孔隙水及基岩裂隙水, 孔隙水水量丰富, 基岩裂隙水较为贫乏。场地中普遍分布的软土及粘性土为相对隔水层; 粉细砂为中等透水层; 中粗砂及砾砂为强透水层, 皆为承压水。经由通风系统进入隧道的气流可能因风井靠近海岸而含有  $\text{Cl}^-$ , 以一定速度通过隧道的车辆也不可避免地将空气中的  $\text{Cl}^-$  带进隧道内部, 尤其是隧道的两个出口处, 从而加速钢筋锈蚀和缩短混凝土衬砌的使用寿命。隧道的不同部位干湿程度差异较大, 在隧道的两端, 混凝土往往要面临频繁的干湿交替作用, 从而加速  $\text{Cl}^-$  的扩散速度。

收稿日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(511680115)

作者简介: 丁杨(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为结构工程材料。

## 2 使用寿命预测的数学模型

### 2.1 现有的数学模型

环境中 Cl<sup>-</sup>侵入混凝土使钢筋腐蚀是导致海底隧道钢筋混凝土支护结构破坏,影响其使用寿命的关键因素<sup>[4]</sup>。因此 Cl<sup>-</sup>向混凝土的渗透的速率将决定混凝土的使用寿命,钢筋混凝土使用寿命的预测也是依据 Cl<sup>-</sup>在混凝土中渗透数学的模型进行的<sup>[5]</sup>。一般认为,Cl<sup>-</sup>通过混凝土内部的孔隙从周围环境向混凝土内部渗透,主要与环境条件(与混凝土接触的介质的浓度与接触时间的长短)、混凝土材料特性和结构设计等因素有关<sup>[6]</sup>。

Colleparidi 等提倡用 Fick 第二扩散定律来描述 Cl<sup>-</sup>在混凝土中的扩散行为,其数学表达式为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

可解得氯离子扩散方程有下列形式:

$$C = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $C$  为暴露时间; $t$  为距取样面; $x$  为深度处氯离子的含量。 $D_{\text{eff}}$ —氯离子在混凝土中的有效扩散系数。如果已知  $C_s$ , 就能通过测得  $t$  时间时  $x$  深度处的 Cl 含量  $C$ , 按公式算出  $D_{\text{eff}}$ 。通过对公式进行如下转化, 在已知混凝土 Cl 扩散系数  $D_{\text{eff}}$  时, 可预测一定保护层处 Cl 达到临界浓度 ( $C_{\text{cr}}$ ) 时所需时间  $t_1$ , 即使用寿命  $T$ 。

### 2.2 本文使用的数学模型<sup>[7]</sup>

在上述模型中, 仍然存在以下明显的不足, 没有考虑环境、运行条件等对 Cl<sup>-</sup>渗透的影响, 另外也没有考虑混凝土湿度和运行条件的影响。考虑应力和初期裂缝对 Cl<sup>-</sup>扩散系数的影响, 结构混凝土构件在一定的应力状态下运行, 而在试验室在混凝土试件上测得的 Cl<sup>-</sup>扩散系数是在无应力状态下进行的。在使用过程中的应力状态对混凝土中 Cl<sup>-</sup>扩散系数有一定的影响, 受拉状态下的扩散系数大, 受压状态下的扩散系数小, 且随应力水平的提高, 扩散系数的变化值增大。因此在有荷载作用时应应对 Cl<sup>-</sup>扩散系数进行修改。综合已有的数学模型所存在的问题和现有得研究成果, 本工程采用以下数学模型:

$$c(x, t) = c_0 + (c_s - c_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{kD_0 - \left(\frac{t_0}{t}\right)^m}} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $c(x, t)$  为  $t$  时刻距混凝土表面  $x$  深度的 Cl 浓度, %;  $c_0$  为混凝土内初始 Cl 浓度, %;  $c_s$  为混凝土表面 Cl 浓度, %;  $D_0$  为混凝土  $t_0$  时间的 Cl 扩散系数, 采用 RCM 方法测定,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $m$  为衰减指数;  $t$  为混凝土暴露持续时间;  $k$  为混凝土对 Cl<sup>-</sup>的结合能力系数。

对于已知一定龄期  $t_0$  扩散系数  $D_0$  及保护层的厚度  $b$  的混凝土结构在使用环境下的使用寿命  $T$  可按式 (3) 计算<sup>[8]</sup>。

### 2.3 数学模型中的参数的取值

本文参考国内外相关资料、试验研究成果及考虑腐蚀较严重的衬砌内侧的环境条件, 综合取值。并且在取值时, 认为工程不存在由于不同基础段间的不均匀沉降、荷载过大或地震等外力因素造成的结构性裂缝<sup>[9]</sup>。

#### 2.3.1 Cl<sup>-</sup>扩散系数及其衰减指数 $n$

Cl<sup>-</sup>扩散系数及其衰减指数  $n$  与混凝土配合比有明显的关系, 本文采用的 Cl<sup>-</sup>扩散系数通过实验室实验获得<sup>[10]</sup>。对于 Cl<sup>-</sup>衰减指数的取值目前国际上 3 个主要预测方法中都采用表 1 的参数。

#### 2.3.2 Cl<sup>-</sup>结合能力系数

混凝土中的氯可以不同的形式存在, 一部分是溶解于孔隙液中的游离 Cl<sup>-</sup>, 另一部分则通过

表 1 不同模型衰减指数取值  
Tab.1 Attenuation index of different models

Life-365	DuraCrete
	PFA: 水下区 0.69
	潮差和浪溅区 0.93
	大气区 0.66
0.2+0.4(%FA/50+%SG/70)	GGBS: 水下区 0.71
	潮差和浪溅区 0.60
	大气区 0.85

化学和物理作用结合于水化产物及其表面成为结合  $\text{Cl}^-$  [15]。混凝土的  $\text{Cl}^-$  结合性能非常重要, 因为对混凝土中的钢筋产生腐蚀的并非是扩散进混凝土的  $\text{Cl}^-$  总量, 而是混凝土孔液中的游离  $\text{Cl}^-$  量。在传输的  $\text{Cl}^-$  总量一定的条件下, 混凝土的  $\text{Cl}^-$  结合性能越强, 则孔液游离  $\text{Cl}^-$  浓度就越低, 钢筋钝化膜被损坏的危险就越小。Nilsson 等将混凝土的  $\text{Cl}^-$  结合能力定义为  $R$ 。

$$R = \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \quad (4)$$

式中:  $C_f$  为混凝土的自由  $\text{Cl}^-$  浓度;  $C_b$  为混凝土的结合  $\text{Cl}^-$  浓度。

混凝土的  $\text{Cl}^-$  结合能力主要与水泥品种、水灰比、掺合材料品种和掺量等因素有关。水泥中的  $C_3A$  和  $C_4AF$  含量越高、水灰比越小, 混凝土的  $\text{Cl}^-$  结合能力越强。 $\text{Cl}^-$  结合能力与  $\text{Cl}^-$  浓度有关, 由于在较低游离  $\text{Cl}^-$  浓度范围内, 混凝土中  $\text{Cl}^-$  的吸附关系表现为线性吸附, 此时  $\text{Cl}^-$  结合能力为常数, 在较高游离  $\text{Cl}^-$  浓度范围内, 混凝土中  $\text{Cl}^-$  的吸附属非线性关系 [12]。但为了有利于得到  $\text{Cl}^-$  扩散方程的解析解, 将结合能力系数视为常数 [13]。本文分别取  $k=0.1$ 。

### 3 盾构段高性能混凝土的寿命预测

设计配合比在保护层分别为 55, 60, 65, 70 mm 时的使用寿命预测结果见表 2~表 4, 通过对比所得结论如下:

1) 混凝土保护层厚度是 55 mm 时, 混凝土的预测使用寿命只有 102 年到 105 年, 而采用保护层厚度是 70 mm 时, 混凝土的预测使用寿命可达 209 年和 248 年, 因此必须严格控制施工的质量, 保证一定的保护层厚度 [14]。

2) 随着保护层厚度的递增, 混凝土的预测使用寿命增长则会加大, 说明增加保护层的厚度可以有效的提高钢筋混凝土结构的使用寿命 [15]。

3) 通过比较表 2 和表 4 的数据可以得知, 在混凝土中添加一定量的粉煤灰的基础上, 再添加一定数量矿渣, 可明显提高混凝土的使用寿命 [16]。所以在配置混凝土掺合料时, 应该结合实际情形, 选择最佳的掺合料方案。

表 2 20%粉煤灰掺合料混凝土使用寿命预测结果  
Tab.2 Service life prediction results for 20% fly ash concrete

试块编号	保护层厚度 /mm	扩散系数 ( $10^{-12}[\text{m}^2/\text{s}]$ )	养护天数 /d	预测寿命 /a	衰减系数 /m	结合系数 $k$	表面氯离子浓度 ( $10^{-12}[\text{m}^2/\text{s}]$ )	临界氯离子浓度 ( $10^{-12}[\text{m}^2/\text{s}]$ )
1	55	1.2	28	102	0.43	0.1	0.448	0.05
2	60	1.2	28	122	0.43	0.1	0.448	0.05
3	65	1.2	28	162	0.43	0.1	0.448	0.05
4	70	1.2	28	209	0.43	0.1	0.448	0.05

表 3 30%粉煤灰掺合料混凝土使用寿命预测结果  
Tab.3 Service life prediction results for 30% fly ash concrete

试块编号	保护层厚度 /mm	扩散系数 ( $10^{-12}[\text{m}^2/\text{s}]$ )	养护天数 /d	预测寿命 /a	衰减系数 /m	结合系数 $k$	表面氯离子浓度 ( $10^{-12}[\text{m}^2/\text{s}]$ )	临界氯离子浓度 ( $10^{-12}[\text{m}^2/\text{s}]$ )
1	55	3.2	28	105	0.56	0.1	0.448	0.05
2	60	3.2	28	123	0.56	0.1	0.448	0.05
3	65	3.2	28	177	0.56	0.1	0.448	0.05
4	70	3.2	28	248	0.56	0.1	0.448	0.05

表 4 10%矿渣和 20%粉煤灰混凝土使用寿命预测结果  
Tab.4 Service life prediction results for concrete of 10% slag and 20% fly ash

试块 编号	保护层厚度 /mm	扩散系数 ( $10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ )	养护天数 /d	预测寿命 /a	衰减系数 /m	结合系数 $k$	表面氯离子浓度 ( $10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ )	临界氯离子浓度 ( $10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ )
1	55	0.8	28	121	0.36	0.1	0.448	0.05
2	60	0.8	28	159	0.36	0.1	0.448	0.05
3	65	0.8	28	204	0.36	0.1	0.448	0.05
4	70	0.8	28	257	0.36	0.1	0.448	0.05

#### 4 结论

1) 钢筋混凝土结构的使用寿命主要是由混凝土结构的构造的要求,混凝土的性质和暴露的条件等所决定的。所处的环境对钢筋混凝土结构的使用寿命有着重要的影响。暴露环境的  $\text{Cl}^-$  浓度越大,所处的环境越糟糕,混凝土的使用寿命就越短。

2) 在 Fick 的第二扩散定律的基础上,引用混凝土的  $\text{Cl}^-$  结合能力性质,充分想到混凝土  $\text{Cl}^-$  扩散系数上的对于时间的依赖性,建立了钢筋混凝土结构在  $\text{Cl}^-$  环境中所使用寿命的预测模型, $\text{Cl}^-$  扩散理论模型。

3) 根据本文所研究的寿命预测措施,可对当今越来越多的混凝土结构的使用寿命来进行预测,因此可为隧道的设计提供一些参考根据。

#### 参考文献:

- [1] MORINAGAS. Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel[C]//BAKERJM, NIXON PJ, MAJUMDARAJ, et al. Proceedings of the 5th International Conference on Durability of Building Materials and Components. London: E & F. N, 1990: 5-16.
- [2] AMEYSL, JOHNSONDA, MIL TENBERGER MA, et al. Predicting the service life of concrete marine structures: An environmental methodology[J]. ACI Struct J, 1998, 95(2): 205-214.
- [3] 赵尚传, 赵国藩, 贡金鑫. 在役混凝土结构最优剩余使用寿命预测[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(1): 83-88.
- [4] 史波, 赵国藩. 基于可靠度的锈蚀钢筋混凝土结构使用寿命预测[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(1): 61-67.
- [5] 王强强, 蒋建华. 基于气候环境作用的混凝土材料与结构使用寿命预测方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3): 67-73.
- [6] 李志军. 海底环境下盾构隧道混凝土结构耐久性研究[D]. 北京交通大学, 2015: 16-17.
- [7] 余红发, 孙伟, 麻海燕, 鄢良慧. 盐湖地区钢筋混凝土结构使用寿命的预测模型及其应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2002, 32(4): 638-642.
- [8] 陈肇元. 混凝土结构的耐久性设计方法[J]. 建筑技术, 2003, 34(5): 328-333.
- [9] 刘超, 朱敏. 混凝土中钢筋锈蚀与结构耐久性[J]. 建筑技术开发, 2004, 31(6): 47-49.
- [10] 金伟良, 吕清芳, 赵羽习, 干伟忠. 混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1): 7-13.
- [11] 刘凯, 路新瀛. 混凝土结构耐久性设计与耐久性寿命预测[C]. 全国建筑腐蚀防护学术交流会, 2004.
- [12] 刘凯, 路新瀛. 混凝土结构耐久性设计与耐久性寿命预测[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(4): 77-79.
- [13] 罗文安. 混凝土结构耐久性设计及寿命预测[J]. 科海故事博览·科技探索, 2014.
- [14] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与结构物的耐久性[C]. 全国混凝土耐久性学术交流会, 2000: 66-69.
- [15] 陈定市, 胡大琳, 胡伟, 张凯. 钢筋混凝土拱桥极限承载力的参数分析[J]. 华东交通大学学报, 2015(2): 34-41.
- [16] 刘西拉, 苗澍柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算[J]. 土木工程学报, 1990(4): 69-78.

## Evaluation on Service Life of Tunnel Concrete Structure

Ding Yang<sup>1</sup>, Deng Wenwu<sup>2</sup>, Meng Wei<sup>2</sup>, Chen Kan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013; China; 2. Urban Rail

Transit Design Institute, Sixth Survey and Design Institute of China Railway Group Co., Ltd., Tianjing 300308, China)

**Abstract:** Focusing on the tunnel concrete structure service life evaluation, based on Fick's second law, the theory of concrete diffusion and the corresponding mathematics model, this study conducts a comprehensive analysis on factors affecting service life of the concrete tunnel structures. Results show that the predicted concrete service life is 102 to 105 years when the thickness of concrete protective layer is 55 mm; While the predicted concrete service life can reach 209 years and 248 years when the protective layer thickness is 70 mm. Therefore, it is necessary to strictly control the construction quality and guarantee the thickness of the protective layer. It suggests that the predicted service life of the concrete structure will increase with the increase of the protective layer thickness. Finally, the experimental results prove that adding a certain amount of fly ash in concrete and adding a certain amount of slag can significantly improve the service life of concrete. The results of the study are summarized to improve the life of the tunnel concrete measures and techniques, which has practical significance.

**Key words:** tunnel; high performance concrete; life evaluation; diffusion

(责任编辑 王建华)