

文章编号:1005-9865(2022)05-0139-08

跨海地铁盾构管片混凝土耐久性及其寿命预测分析

王金龙¹, 刘伟宝², 杨 虎², 陆采荣²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘 要:根据某跨海地铁 2 号线的工况, 确定跨海区间盾构管片的环境类别和作用等级, 由各原材料氯离子含量计算推荐配合比混凝土氯离子含量, 并对推荐配合比混凝土开展氯离子扩散系数试验和抗压强度试验。分别使用《海港工程高性能混凝土质量控制标准》(JTS 257-2—2012)、《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007) 中的评定方法及多因素耦合评价 (MFC) 方法, 基于钢筋开始锈蚀阶段 t_i 、混凝土保护层锈胀开裂阶段 t_c 、混凝土功能明显退化阶段 t_d 对混凝土结构使用年限 t_e 进行预测。结果表明, 以上 3 种耐久性预测模型预测跨海地铁 2 号线推荐配合比使用年限的计算结果均大于 100 年, 能够满足使用 100 年的要求。

关键词:轨道交通; 盾构管片; 跨海区间; 混凝土; 寿命预测; 耐久性; 配合比; 氯离子

中图分类号: P755.3

文献标志码: A

DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.05.015

Analysis of concrete durability and life prediction of shield segment in cross-sea metro

WANG Jinlong¹, LIU Weibao², YANG Hu², LU Cairong²

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 2. State Key Lab of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: According to the working condition of Xiamen Metro Line 2, the environmental category and action grade of the shield segment in transoceanic section were determined. The chloride ion content of the recommended mix concrete was calculated from the chloride ion content of each raw material, and the chloride ion diffusion coefficient test and the compressive strength test were carried out for the recommended mix concrete. Based on the initial corrosion stage of steel bar t_i , the stage of rust expansion and cracking of concrete cover t_c , and the stage of obvious deterioration of concrete function t_d , the service life of concrete structure t_e was predicted. The assessment methods in the *Quality control standard for high performance concrete in harbour engineering* (JTS 257-2—2012), the *Assessment standard for durability of concrete structures* (CECS 220:2007) and the multi-factor coupled evaluation (MFC) method were used respectively. The results show that the service life of recommended mix proportion of Xiamen Metro Line 2 is greater than 100 years, which can meet the requirements of 100 years.

Keywords: rail traffic; shield segment; transoceanic section; concrete; life prediction; durability; mix proportions; chloride ions

厦门轨道交通 2 号线为厦门市第一条穿越海底的轨道交通线路, 线路全长 39.1 km, 全线设车站 30 座, 平均站间距 1.6 km, 设计推荐采用盾构法施工。轨道交通 2 号线所穿越的厦门西港海域, 海岸线较顺直。厦

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 厦门市科技计划项目“跨海地铁建设与运营期结构安全保障关键技术” (3502Z20151006)

作者简介: 王金龙 (1975—), 男, 湖北钟祥人, 正高级工程师, 主要从事城市轨道交通勘测设计等相关研究。

E-mail: jinlongwang@126.com

通信作者: 刘伟宝。E-mail: wblu@nhri.cn

门轨道交通 2 号线跨海段地质情况复杂多变,基岩面波动起伏大,基岩构造复杂,岩土层种类较多,岩土层的埋深、厚度及性能变化较大,且有多条风化槽,属于国内首个跨海地铁的实施方案,工程风险大,其成败直接关系到整个 2 号线的成败,成为 2 号线的重点和难点工程。

厦门轨道交通 2 号线跨海区间混凝土耐久性设计关系到百年大计。依据初勘阶段水质分析成果,结合地铁盾构隧道混凝土工况,按照设计使用年限 100 年的目标,对关键技术参数进行分析并提出初步建议。在此基础上通过开展混凝土配合比优化试验确定了智欣、三航、芜湖等 3 种原材料方案的盾构管片混凝土配合比,文中采用 3 种海洋环境混凝土寿命预测模型分别计算了推荐配合比混凝土的预测寿命。

1 环境类别和作用等级

综合《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)^[1]和《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005—2010)^[2]对环境作用等级的划分以及地铁 2 号线跨海区间实际环境条件,为了满足 100 年的耐久性设计要求,对于一侧接触海水或含有海水土体,另一侧接触空气的海中或海底隧道配筋混凝土结构构件(如盾构管片、车站混凝土结构),其环境作用等级不宜低于Ⅲ-E。受施工扰动引起车站混凝土构件接触海水或含海水土体时,其环境作用等级也不宜低于Ⅲ-E。若结构构件所处环境的年平均温度高于 20℃ 时,还应按炎热地区考虑,其环境作用等级为Ⅲ-F。当混凝土构件所在位置地下水或受施工扰动后的地下水含有氯离子质量浓度在 500~5 000 mg/L 时按Ⅲ-D 考虑。对于周边永久浸没于海水或埋于土中的构件按Ⅲ-C 考虑。

2 常见的混凝土寿命预测方法

混凝土的使用寿命预测方法主要有对比预测法、经验预测法、数学模型预测法、加速试验预测法以及随机预测法等^[3-9]。

- 1) 对比预测法
- 该方法的假定条件是:混凝土如果在某一期限内是耐久的,则相似环境下的相似混凝土也将有同样的寿命。显然,由于材料、形状、施工质量、荷载和环境的变异性,每一种混凝土结构往往是独一无二的,不同的气候条件也会影响混凝土的使用寿命。所以即便有相似的使用条件,将过去的经验直接用来比较不太合理。因此该方法使用甚少。
- 2) 经验预测法
- 该方法根据既有工程经验和研究基础,制定一系列保证结构在环境作用下达到期望使用年限的技术措施与要求,一般也叫做定性预测法。现行规范和标准经常使用这种方法预估混凝土结构的使用寿命,其基本思路是如果混凝土结构能严格按标准的要求去实施,那么结构将会达到所需的寿命。当结构的寿命要求较低或周围环境比较简单时,可以采用这种方法预测;但是当结构使用寿命要求较高或周围环境比较复杂多变时,这种预测方法会因缺乏相应的工程经验而不能准确预测。
- 3) 数学模型预测法
- 该方法是根据结构具体的环境作用,使用耐久性数学模型对构件的材料指标或者结构指标提出量化的要求,称为定量预测方法。目前采用数学模型预测使用寿命是应用比较广泛的一种方法,这种预测的准确程度与模型选取是否合理以及材料环境与模型参数选取是否准确有很大关系。
- 4) 加速试验预测法
- 在实验室进行混凝土的耐久性试验大多采用加速试验,例如采用较高腐蚀浓度、较高温度或湿度加速混凝土的劣化过程。进行加速试验的突破点在于确定室内加速系数,这需要通过大量的调查研究和多年的工作积累,从而收集相似环境下实际混凝土结构长期暴露的相关数据。随着自然暴露试验越来越多,加速试验预测方法有望成为今后预测混凝土结构使用寿命的重要方法。
- 5) 随机预测法
- 上面介绍寿命预测方法都属于确定性的方法,即将结构使用寿命的所有影响因素作为确定的值,由此得到的结构使用寿命也是一个确定的值。但是在进行混凝土结构使用寿命预测时,无论采用哪一种寿命预测准则,由于影响结构使用寿命的因素很多,都不可能是个定值,而是一个随机变量。如混凝土保护层厚度往

往会有施工误差,在工程实际中是服从正态分布的随机变量,扩散系数也不是一个定值,因此计算出的结构使用寿命也应该是一个满足一定概率分布的随机变量,因此采用随机变量概率法进行混凝土使用寿命预测是比较科学合理的,但相对来说使用起来非常复杂,还需要大量研究积累。

3 厦门轨道交通混凝土寿命预测方法

3.1 《海港工程高性能混凝土质量控制标准》(JTS 257-2—2012) 评定方法

《海港工程高性能混凝土质量控制标准》(JTS 257-2—2012) 评定方法(简称 JTS 评定方法)是主流的寿命预测方法之一,给出了明确的极限状态划分标准和每个阶段时间的计算公式。方法将海洋环境下混凝土结构钢筋锈蚀劣化进程所经历的时间,分为 3 个阶段:混凝土中钢筋开始锈蚀阶段 t_i 、混凝土保护层锈胀开裂阶段 t_c 、混凝土功能明显退化阶段 t_d ,混凝土结构使用年限 t_e 是这 3 个阶段时间和。即:

$$t_e = t_i + t_c + t_d \tag{1}$$

钢筋开始锈蚀阶段所经历的时间 t_i 按式(2)计算:

$$t_i = \frac{c^2}{4D_i \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr} - C_0}{\gamma C_s - C_0} \right) \right]^2} \tag{2}$$

式中: c 为混凝土保护层厚度,mm; D_i 为混凝土氯离子有效扩散系数, $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;erf 为误差函数; C_{cr} 为混凝土中钢筋开始发生锈蚀的临界氯离子浓度,%; C_0 为混凝土中的初始氯离子浓度,%; γ 为氯离子双向渗透系数,角部区取 1.2,非角部区取 1.0; C_s 为混凝土表面氯离子浓度,%。

混凝土有效扩散系数 D_i 按式(3)计算:

$$D_i = D_{ref} \times \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \times \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^n \tag{3}$$

式中: D_i 为混凝土氯离子有效扩散系数, $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$; D_{ref} 为快速试验方法测定的混凝土氯离子扩散系数, $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$; t_{ref} 为参考试验时间,a; t 为混凝土氯离子扩散系数衰减期,a; n 为混凝土氯离子扩散系数的衰减系数; U 为混凝土氯离子扩散过程的活化能,取 $35\,000 \text{ J/mol}$; R 为理想气体常数,取 $8.314 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$; T_0 为参考温度,取 293 K ; T 为环境温度。

混凝土保护层锈胀开裂阶段所经历的时间 t_c 按式(4)计算:

$$t_c = \frac{0.012 \frac{c}{d} + 0.000\,84f_{cu,k} + 0.018}{\lambda_1} \tag{4}$$

式中: c 为混凝土保护层厚度,mm; d 为钢筋原始直径,mm; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值,MPa; λ_1 为保护层开裂前钢筋平均腐蚀速度,mm/a。

混凝土功能明显退化阶段所经历的时间 t_d 按式(5)计算:

$$t_d = \left(1 - \frac{3}{\sqrt{10}} \right) \times \frac{d}{2\lambda_2} \tag{5}$$

式中: t_d 为自保护层开裂到钢筋截面积减小到原截面积 90%所经历的时间,a; d 为钢筋原始直径,mm; λ_2 为保护层开裂后钢筋平均腐蚀速度,mm/a。

3.2 《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007) 评定方法

与 JTS 评定方法相比,《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007) 评定方法(简称 CECS 评定方法)^[10]考虑了氯离子扩散的时间依赖性,钢筋开始锈蚀时间 t_i 的预测公式见式(6):

$$t_i = \left\{ \frac{c^2 \times 10^{-6}}{4D_0 \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{M_{cr}}{M_s} \right) \right]^2} \right\}^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{6}$$

式中: D_0 为氯离子扩散系数, m^2/a ; t_i 为钢筋开始锈蚀的时间, a ; α 为氯离子扩散系数时间依赖系数, 可按 $\alpha = 0.2 + 0.4(w_{\text{FA}}/50 + w_{\text{SG}}/70)$ 计算, 其中 w_{FA} 为粉煤灰掺量, %; w_{SG} 为矿渣粉掺量, % (质量百分数); M_{cr} 为钢筋锈蚀的临界氯离子浓度, kg/m^3 ; M_{s} 为混凝土表面氯离子浓度, kg/m^3 。

3.3 多因素耦合评定方法 (MFC)

多因素耦合评定方法^[11]基于大量的试验数据, 通过简化的理论模型开发出的考虑混凝土材料参数 (水胶比、粉煤灰掺量、氯离子结合能力、扩散系数的时间依赖性)、结构构造参数 (扩散维数、保护层厚度) 和环境参数 (干湿循环、温度、冻融等) 的多因素耦合寿命预测模型。钢筋开始锈蚀时间 t 的预测公式见式 (7):

$$t \leqslant \left\{ \frac{x_c^2}{4D_0t_0^m} \frac{1}{\left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{\text{cr}}}{C_s} \right) \right]^2} \frac{(1+R)(1-m)}{K_{\sigma_s} K_C K_D K_E K_T} \right\}^{\frac{1}{1-m}} \quad (7)$$

式中: x_c 为混凝土保护层厚度, mm ; t_0 为结构建成至确定 D_0 的时间, a ; m 为时间依赖性常数, $m = 0.62$; R 为氯离子结合能力, 可按 $R = (1.3 + 0.06w_{\text{FA}} - 28.5 \times 10^{-4}w_{\text{FA}}^2 + 28.5 \times 10^{-6}\omega_{\text{FA}}^3)(0.49 - 0.92W/B)$ 计算, 其中 W/B 为水胶比; K_{σ_s} 为应力碳化加速因子, 可按 $K_{\sigma_s} = 1 + 0.51 \sigma_s^{0.6}$ 计算; K_C 为养护龄期影响因子, $K_1 = 2.6$, $K_3 = 1.9$, $K_7 = 1.3$, $K_{28} = 1.0$; K_D 为氯离子扩散维数影响因子, $K_{1\text{D}} = 1.00$, $K_{2\text{D}} = 2.01$, $K_{3\text{D}} = 2.27$; K_E 为环境影响因子, 对于浸泡, $K_E = 1.0$, 对于干湿循环, $K_E = 2.6$; K_T 为温度影响因子, 可按 $K_T = \frac{T}{T_0} e^{q(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})}$ 计算, q 为活化常数, 可按 $q = 10\,475 - 10\,750W/B$ 计算; T_0 为常数, $T_0 = 293\text{ K}$; T 为结构混凝土暴露环境的温度, K 。

4 寿命预测结果

4.1 《海港工程高性能混凝土质量控制标准》(JTS 257-2—2012) 预测结果

分别对采用智欣料、三航料、芜湖料的混凝土推荐配合比进行耐久性预测。混凝土推荐配合比如表 1 所示, 通过试验获得推荐配合比的初始氯离子含量、氯离子扩散系数和立方体抗压强度, 作为预测模型的部分基本参数取值, 如表 2 所示。

地铁隧道环境温度相对于外部气温更稳定, 在秋冬季节, 地铁隧道内环境温度会比室外气温高。外界大气温度与区间隧道环境温度之差, 随着外界大气温度的降低而增大, 特别是进入冬季以后, 外界大气温度急剧下降, 而区间隧道环境温度由于土壤的蓄热效应和列车运行等影响, 下降幅度并不明显。厦门市區年平均气温 $20.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此取环境温度 $T = 294\text{ K}$ 。

推荐配合比双掺粉煤灰和矿渣粉, 因此取 D_{ref} 为 90 d 实测值。

表 1 混凝土推荐配合比
Tab. 1 Recommended concrete mixes

料源	编号	水胶比 W/B	掺合料 掺量/%	砂率/ %	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	矿渣粉/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纤维/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂 含量/%
智欣	DX145	0.335	45	38	140	230	63	125	—	0.9
	DX245	0.315	45	37	140	244	67	133	—	0.9
	DP123	0.315	45	42	140	244	67	133	1.5	1.1
三航	SX245	0.330	45	38	140	233	64	127	—	0.9
	SXP123	0.315	45	42	140	244	67	133	1.5	1.1
	WX145	0.335	45	42	135	222	60	121	—	0.6
芜湖	WX245	0.315	45	42	135	236	64	129	—	0.7
	WP123	0.315	45	44	140	244	67	133	1.5	0.8

注: 掺合料掺量、砂率、减水剂含量均指其质量百分数

表 2 推荐配合比的混凝土性能取值
Tab. 2 Concrete performance values for recommended mixes

料源	编号	初始氯离子 浓度/%	氯离子扩散系数 $D_{RCM}/(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		立方体抗压强度/MPa			立方体抗压 强度标准值 /MPa
			28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	
智欣	DX145	0.054	2.5	1.6	51.0	59.7	65.2	49.8
	DX245	0.051	2.3	1.4	59.0	65.8	70.5	55.9
	DP123	0.051	3.8	1.8	59.1	69.9	72.5	60.0
三航	SX245	0.052	2.9	1.9	55.6	65.9	71.2	56.0
	SXP123	0.050	3.7	1.9	60.4	71.6	73.3	61.7
	WX145	0.056	2.1	1.7	52.2	62.7	68.7	52.8
芜湖	WX245	0.053	2.0	1.6	58.8	65.6	72.5	55.7
	WP123	0.051	3.1	1.9	55.5	69.8	69.9	59.9

t_i 的计算依据式(2)进行,各参数的取值依据混凝土所处的环境按相应规定取值和计算得出。各参数取值及 t_i 的计算结果见表 3。

表 3 t_i 计算参数取值及结果
Tab. 3 Calculation parameter values and results of t_i

料源	编号	c/mm	$D_i/(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_{et}/\%$	$C_0/\%$	γ	$C_s/\%$	t_i/a
智欣	DX145	55	0.180	0.5	0.054	1.2	5.4	89
	DX245	55	0.157	0.5	0.051	1.2	5.4	102
	DP123	55	0.202	0.5	0.051	1.2	5.4	79
三航	SX245	55	0.213	0.5	0.052	1.2	5.4	75
	SXP123	55	0.213	0.5	0.050	1.2	5.4	75
	WX145	55	0.191	0.5	0.056	1.2	5.4	84
芜湖	WX245	55	0.180	0.5	0.053	1.2	5.4	89
	WP123	55	0.213	0.5	0.051	1.2	5.4	75

t_c 的计算依据式(4)进行,各参数取值及 t_c 的计算结果见表 4。

表 4 t_c 计算参数取值及结果
Tab. 4 Calculation parameter values and results of t_c

料源	编号	c/mm	d/mm	$f_{\text{cuk}}/\text{MPa}$	$\lambda_1/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	t_c/a
智欣	DX145	55	22	49.8	0.002 9	31
	DX245	55	22	55.9	0.002 9	33
	DP123	55	22	60.0	0.002 9	34
三航	SX245	55	22	56.0	0.002 9	33
	SXP123	55	22	61.7	0.002 9	34
	WX145	55	22	52.8	0.002 9	32
芜湖	WX245	55	22	55.7	0.002 9	33
	WP123	55	22	59.9	0.002 9	34

t_d 的计算依据式(5)进行,各参数取值及 t_d 的计算结果见表 5。

表 5 t_d 计算参数取值及结果
Tab. 5 Calculation parameter values and results of t_d

料源	编号	d/mm	$\lambda_2/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	t_d/a
智欣	DX145	22	0.06	9
	DX245	22	0.06	9
	DP123	22	0.06	9
三航	SX245	22	0.06	9
	SXP123	22	0.06	9
	WX145	22	0.06	9
芜湖	WX245	22	0.06	9
	WP123	22	0.06	9

因此,由 JTS 评定方法预测的各推荐配合比的使用年限 t_e 如表 6 所示。

表 6 JTS 评定方法预测的各推荐配比使用年限
Tab. 6 Predicted service life for recommended mixes by the JTS method 单位:a

料源	编号	t_i	t_c	t_d	t_e
智欣	DX145	89	31	9	129
	DX245	102	33	9	144
	DP123	79	34	9	122
三航	SX245	75	33	9	117
	SXP123	75	34	9	118
	WX145	84	32	9	125
芜湖	WX245	89	33	9	131
	WP123	75	34	9	118

由表 6 可知,推荐配合比使用年限 t_e 的预测结果在 117~144 a,均大于 100 a,能够满足使用 100 a 的要求。

4.2 《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007) 预测结果

由 CECS 评定方法预测的各推荐配合比的使用年限 t_e 如表 7 所示。由表 7 可知,推荐配合比使用年限 t_e 的预测结果在 136~172 a,均大于 100 a,能够满足使用 100 a 的要求。

表 7 CECS 评定方法预测的各推荐配比使用年限
Tab. 7 Predicted service life for recommended mixes by the CECS method 单位:a

料源	编号	t_i	t_c	t_d	t_e
智欣	DX145	110	31	9	150
	DX245	130	33	9	172
	DP123	101	34	9	144
三航	SX245	94	33	9	136
	SXP123	97	34	9	140
	WX145	101	32	9	142
芜湖	WX245	111	33	9	153
	WP123	96	34	9	139

4.3 多因素耦合 (MFC) 预测结果

由多因素耦合 (MFC) 方法预测的各推荐配合比的使用年限 t_e 如表 8 所示。由表 8 可知,推荐配合比使用
年限 t_e 的预测结果在 103~139 a,均大于 100 a,能够满足使用 100 a 的要求。

表 8 多因素耦合评定方法预测的各推荐配比使用年限
Tab. 8 Predicted service life for recommended mixes by multi-factor coupling evaluation method 单位:a

料源	编号	t_i	t_e	t_d	t_e
智欣	DX145	71	31	9	111
	DX245	97	33	9	139
	DP123	60	34	9	103
三航	SX245	65	33	9	107
	SXP123	73	34	9	116
	WX145	68	32	9	109
芜湖	WX245	77	33	9	119
	WP123	60	34	9	103

4.4 预测结果分析

如图 1 所示,采用 CECS 方法预测得出的寿命最长,在 136~172 a,采用 MFC 方法预测得出的寿命最短,
为 103~139 a,3 种预测模型计算得出的混凝土寿命均大于 100 a。CECS 方法计算得出的 t_i 值比 JTS 方法计
算出的 t_i 值高 17~28 a,这是由于 CECS 考虑了氯离子扩散的时间依赖性,即考虑了氯离子侵入混凝土结构
的能力随着时间的增长不断降低的影响。MFC 方法计算得出的 t_i 值比 JTS 方法算出的 t_i 值低 2~15 a,这是由
于 MFC 模型充分考虑了多因素耦合作用下材料的劣化影响导致性能衰退速度明显加快,因此计算得出的钢
筋开始锈蚀时间也会相应缩短。

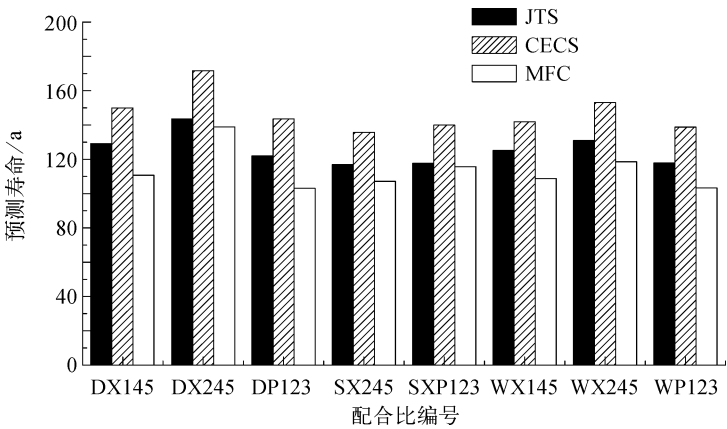


图 1 三种预测模型计算结果对比
Fig. 1 Comparison of the calculation results of the three prediction models

5 结 语

综合《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)和《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005—2010)对环境作用等级的划分以及地铁 2 号线跨海区间实际环境条件,按混凝土中钢筋开始锈蚀阶段 t_i 、混凝土保护层锈胀开裂阶段 t_e 、混凝土功能明显退化阶段 t_d 三个阶段考虑,分别使用《海港工程高性能混凝土质量控制标准》(JTS 257-2—2012)、《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007)、多因素耦合评价 (MFC) 等 3 种预测方法对混凝土结构使用年限进行预测,预测结果表明,厦门轨道交通地铁 2 号线盾构管片混凝土使用年限在 103~172 a。推荐配合比使用年限即使按最保守的计算模型,其计算结果仍大于 100 年,能够满足使用 100 年的要求。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of concrete structures durability: GB/T 50476—2019[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁路混凝土结构耐久性设计规范: TB 10005—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011. (Ministry of Railways of the People's Republic of China. Specification for durability design of railroad concrete structures: TB 10005—2010[S]. Beijing: China Railway Press, 2011. (in Chinese))
- [3] 宋以深. 盾构隧道管片混凝土抗氯离子侵蚀耐久性与寿命预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015. (SONG Yishen. Research on durability and life prediction of shield tunnel pipe sheet concrete against chloride ion erosion[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 海港高性能混凝土质量控制标准: JTS 257-2—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Quality control standard for high performance concrete in seaports: JTS 257-2—2012[S]. Beijing: People's Traffic Press, 2012. (in Chinese))
- [5] 付燕弟, 范宏, 王鹏刚. 氯离子环境下钢筋混凝土结构的使用寿命预测[J]. 青岛理工大学学报, 2011, 32(4): 18-22. (FU Yandi, FAN Hong, WANG Penggang. Prediction of service life of reinforced concrete structures under chloride ion environment[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2011, 32(4): 18-22. (in Chinese))
- [6] 李镜培, 李鹤. 海洋环境下混凝土方桩使用寿命预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1371-1376. (LI Jingpei, LI He. Service life prediction model of concrete square piles in marine environment[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 1371-1376. (in Chinese))
- [7] 余波, 喻泽成, 范志宏, 等. 海洋混凝土结构环境作用等级与耐久性设计参数的中外规范对比[J]. 海洋工程, 2021, 39(3): 156-166. (YU Bo, YU Zecheng, FAN Zhihong, et al. Comparison of environmental action classes and durability design parameters of marine concrete structures between Chinese and Foreign Codes[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(3): 156-166. (in Chinese))
- [8] 杨晓明, 吴天宇, 陈永林. 人工加速锈蚀钢筋混凝土构件中钢筋锈蚀率与锈蚀电流的关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(10): 3410-3416. (YANG X M, WU T Y, CHEN Y L. Study on the relationship between corrosion rate and corrosion current of reinforcement in artificially accelerated rusting reinforced concrete members[J]. Silicate Bulletin, 2016, 35(10): 3410-3416. (in Chinese))
- [9] 王晓舟, 金伟良, 金立兵. 基于广义扩散方程海工混凝土结构耐久寿命概率评估方法[J]. 海洋工程, 2009, 27(3): 85-90. (WANG Xiaozhou, JIN Weiliang, JIN Libing. A probabilistic approach of life prediction of marine concrete structures based on GDF[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(3): 85-90. (in Chinese))
- [10] 中国工程建设标准化协会. 混凝土结构耐久性评定标准: CECS 220: 2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for durability assessment of concrete structures: CECS 220: 2007[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2007. (in Chinese))
- [11] 吉林, 缪昌文, 孙伟. 结构混凝土耐久性及其提升技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (JI L, MIAO C W, SUN W. Structural concrete durability and its enhancement technology[M]. Beijing: People's Traffic Press, 2011. (in Chinese))