

引用本文:陈琳,屈文俊,朱鹏,等.混凝土结构等耐久性设计方法[J].建筑科学与工程学报,2020,37(2):81-90.

CHEN Lin, QU Wen-jun, ZHU Peng, et al. Equal Durability Design Method for Concrete Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 81-90.

DOI:10.19815/j.jace.2019.03059

混凝土结构等耐久性设计方法

陈琳¹, 屈文俊², 朱鹏², 肖杰³

(1. 上海宝冶集团有限公司, 上海 200941; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092;

3. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:针对混凝土结构耐久性不能均衡的现象,在混凝土等截面耐久性设计的基础上提出了混凝土结构等耐久性设计方法,并明确了该方法的定义。首先将结构进行分层模块化划分,基于等耐久性原则确定各层次的目标使用寿命,然后进行使用寿命设计,使各层次的耐久性使用寿命达到目标要求;在构件截面层次上,对截面的角部采取措施避免截面角部钢筋提前锈蚀引起耐久性失效,实现截面的等耐久性。提出了结构分层模块化划分的规则和方法及基于等耐久性原则的目标使用寿命确定方法和过程;对于耐久能力严重不足的部位(角部),将钢筋替换为不锈钢的纤维增强复合材料(FRP)筋,避免过早使耐久性失效,其余部位通过调整保护层厚度使结构达到等耐久性的要求。由于局部环境不同,同种类型的构件需要设置不同的保护层厚度才能实现等耐久性的目标。提出了等耐久性设计的总体过程及不同耐久性等级的使用寿命安全系数取值范围,并通过一个混凝土桥算例说明了截面和结构层次等耐久性设计过程。结果表明:等耐久性设计可以优化选择各类构件的耐久寿命,合理安排初始投资,减少大修次数,降低结构后期维修成本,延长结构寿命,实现混凝土结构的可持续发展。

关键词:混凝土结构;等耐久性设计;使用寿命;保护层厚度

中图分类号:TU318

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)02-0081-10

Equal Durability Design Method for Concrete Structure

CHEN Lin¹, QU Wen-jun², ZHU Peng², XIAO Jie³

(1. Shanghai Baoye Group Corp., Ltd., Shanghai 200941, China; 2. Department of Structural Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil and Transportation Engineering,

Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: In view of the phenomenon that the durability of concrete structure was unbalanced, based on the durability design of concrete section, the durability design method of concrete structure was put forward, and the definition of equal durability design method was proposed. The component in concrete structure was classified and the service lives of different types of components were set to achieve the equal durability design method for sections. Firstly, the structure was divided into layers and modules. Based on the principle of equal durability, the target service life of each layer were determined, and then the service life was designed to make

收稿日期:2019-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51678430);国家自然科学基金青年科学基金项目(51208373)

作者简介:陈琳(1989-),女,河南濮阳人,工程师,工学博士,E-mail:chenlinpy@126.com.

the durability service of each layer meet the requirements. At the level of component interface, measures were taken to avoid the durability failure caused by the early corrosion of the reinforcement at the corner of the interface, so as to achieve the equal durability of the section. By using the rules and methods of hierarchical modular division of structure, the method and process of determining the target service life based on the principle of equal durability, the overall process of equal durability design and the range of service life safety factors of different durability levels were proposed. For the corners where the durability was seriously insufficient, the reinforcement was replaced with stainless FRP reinforcement to avoid premature failure of the durability, and the test parts needed to meet the requirements of equal durability by adjusting the thickness of the protective layer. Due to the different local environment, the same type of components needed to set different thickness of protective layer to achieve the goal of equal durability. The process of durability design such as interface and structure level was proved by an example of a concrete bridge. The results show that the durability design can optimize the service life of various components, reasonably arrange the initial investment, reduce the number of overhaul, reduce the maintenance cost in the later stage of the structure, extend the structure life, and realize the sustainable development of concrete structure.

Key words: concrete structure; equal durability design; service life; thickness of protective layer

0 引言

混凝土结构在使用荷载、环境的共同作用下会发生耐久性退化现象,这种耐久性退化现象在结构上不是同时出现的,某些部位发生耐久性损伤的时间会明显比其他部位要早,在混凝土结构上,耐久性能是不均衡的。混凝土结构的耐久性不均衡可以体现在构件截面和结构整体 2 个层次上。

在构件截面层次上,影响不同边、角部位耐久性能差异的因素包括角部双向碳化作用、角部氯离子双向传输、应力状态、风向等。在一般大气环境下,构件截面角部的碳化速度快于一般边部碳化速度^[1],角部耐久性寿命明显短于一般边部区域^[2],受拉边耐久性寿命短于受压边^[3],直接受风压面的混凝土碳化速度快于间接受风压面^[4]。在海洋区域,构件角部氯离子侵蚀速度明显快于一般边部^[5],背风面更容易产生氯离子积累^[6],耐久性寿命更短。

在结构层次上,耐久性能的不均衡性和结构类型、构件位置及环境作用的形式等因素有关。例如,挪威沿海开放式港口工程的调查表明,平板式结构的长期工作性能优于梁板式结构,这主要是因为相对于梁板式结构中的主次梁,平板在施工中更容易浇筑和捣实,施工质量容易保证^[7];相对于简支梁桥,连续梁桥的梁下盖梁的病害会比较少,这主要是因为桥面的连续避免了伸缩缝处水流的渗漏^[8];同样是桥梁的主梁,位于外部的主梁与环境直接接触

面比较多,更易发生耐久性损伤^[9]。

混凝土结构耐久性能不均衡可能带来的后果是:①从使用寿命角度来说,在结构或构件的某个部位发生耐久性失效时,需要对结构或构件进行大修或更换,而此时结构的其他部位还处于比较好的状态,这种耐久性能不均衡的现象意味着使用寿命的提前终结;②从经济角度来说,不同部位耐久性能不均衡,耐久性失效时间参差不齐,每次结构大修或更换行为都会产生一定的成本,其中一部分固定成本与维修规模无关,如机械使用费、用户成本等,多次大修或更换行为会产生多次固定成本,这种耐久性能不均衡现象意味着经济上的浪费。

基于以上两点,如果在结构设计初期就预先判断可能发生耐久性薄弱区的位置,并有针对性地采取措施提高薄弱区的耐久性能,则有助于优化结构整体的耐久性能,延长结构的使用寿命。这种在结构层次和构件层次上的耐久性能都相对均衡的结构称为等耐久性的结构,这种设计初期就采取措施使结构耐久性能相对均衡的设计方法称为等耐久性设计方法。

屈文俊等^[10-11]提出了混凝土截面的等耐久性设计概念,其基本思想是采取措施保护混凝土构件受拉区角部钢筋,延缓角部混凝土因锈胀裂时间,使混凝土截面各边、角部混凝土因锈胀裂时间的均值相等。构件层次的等耐久性设计采取的方法有:在混凝土受拉区角部设置涂覆材料^[11],将受拉区角部钢

筋置换成不锈的纤维增强复合材料(FRP)筋^[12],受拉区混凝土采用耐久性良好的活性粉末混凝土(RPC)^[13]等。

在混凝土截面等耐久性设计的基础上,本文提出了混凝土结构的等耐久性设计方法,明确了该方法的定义和思路,研究了该方法的主要过程,用算例说明了等耐久性设计的整个过程。

1 等耐久性设计的定义和思路

等耐久性设计方法是一种采用设计手段有针对性地加强薄弱区的耐久性能、改善混凝土结构耐久性能不均衡性的耐久性设计方法。使用寿命实质上是耐久性能的一种度量,实现混凝土结构耐久性能均衡就是使组成混凝土结构的各个部分的耐久性使用寿命保持一致。然而,混凝土结构是由不同类型的构件通过一定规则组成的复杂的整体,各类型构件的材料、功能、可更换性均不相同,所以将所有构件都设计成相同的使用寿命是不现实的。

等耐久性设计比较合理的思路是:对结构中的构件进行分类,根据等耐久性原则将不同类型构件的使用寿命进行匹配,分别确定各构件的目标使用寿命,再对各个构件进行耐久性设计以达到目标使用寿命的要求,在构件层次上,采取措施避免截面角部钢筋提前锈蚀引起耐久性失效,形成等耐久性截面。

混凝土结构等耐久性设计的定义为:将混凝土结构中构件进行分类,各类构件设计等同的耐久寿命,构件实现截面等耐久性的设计方法。其意义在于优化选择各类构件的耐久寿命,合理安排初始投资,减少大修次数,降低结构后期维修成本,延长结构寿命,实现混凝土结构的可持续发展。

2 目标使用寿命的确定

结构设计所要求的目标使用寿命是针对其结构主体而言的,组成结构的构件不一定都需要达到这个要求,由于构件的类型、材料等不同,有些构件需要在使用过程中加以更换。由于不同构件的使用寿命存在差异,为了实现结构的等耐久性设计,可以将结构看作“分层模块化体系”,对分层模块化体系中的不同模块、构件进行合理的目标使用寿命规划匹配设计。

2.1 结构的分层模块化划分

根据尺度、功能、环境条件等将结构体系划分为 7 个不同的层次:结构层、次结构层、一级模块层、二级模块层、构件层、次构件层、表面层,每个层次都有其划分规则(表 1),其中前面 4 个层次依结构的实际情况可以适当省略。需要特别指出的是,专门划分出“表面层”是因为混凝土结构的耐久性损伤多是从混凝土表面开始表现出来的,同一构件不同表面可能遭受到的环境作用不同,划分出表面层有助于实现截面的等耐久性设计。图 1 为结构分层模块化体系划分情况的一个树状示意图。

表 1 结构不同层次的划分规则

Tab. 1 Partition Rules for Different Levels of Structure	
层次	划分规则
结构层	指要设计的结构整体
次结构层	空间尺度或结构类型
一级模块层	构件的功能
二级模块层	明显的环境作用和构件材料类型
构件层	受同类环境作用和同类材料类型
次构件层	空间尺度上耐久性不均衡性
表面层	构件截面上不同表面可能遭受的环境作用

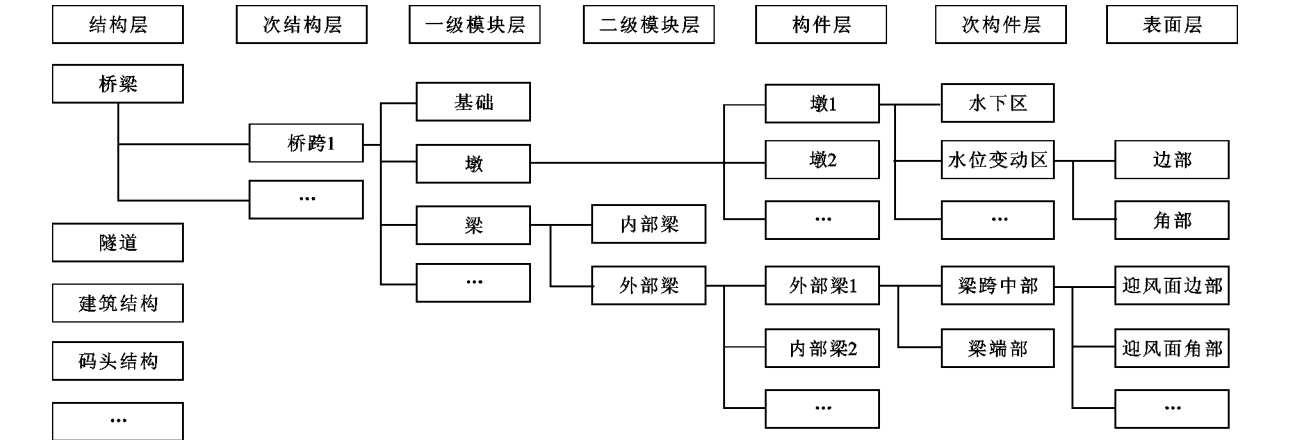


图 1 结构分层模块化体系

Fig. 1 Hierarchical Module System of Structures

为便于对结构进行耐久性设计和描述,对结构的分层模块化体系进行编号,编号示意如 I. A1. 001. 002. a,其规则如下:

(1)第 1 项罗马字母 I, II, III, …表示次结构的序号,如果体系中忽略次结构,则 I 表示结构整体。

(2)第 2 项大写字母 A, B, C, …表示一级模块层的序号,大写字母后所跟的数字表示二级模块层的序号,如果体系中忽略二级模块,则只有大写字母表示一级模块。

(3)第 3 项数字 001 表示模块中构件的编号。

(4)第 4 项数字 002 表示次构件的编号。

(5)第 5 项小写字母 a, b, c, …表示表面层的编号。

2.2 基于等耐久性原则的目标使用寿命确定

结构不同模块的功能和受力状态不同,目标使用寿命也是不同的。以桥梁结构为例,一般来说,基础、墩、主梁等的使用寿命被认为应当与结构整体的使用寿命相同,板、路面等被认为在使用期内可以维修和更换,其使用寿命可以短于结构整体使用寿命。结构构件的每一次维修或更换都会带来一部分的固定成本,多次维修不便于实现降低全寿命成本的目标;因此,从降低多次维修带来的固定成本的角度上看,实现模块间的使用寿命匹配变得比较重要。

等耐久性原则是使多个构件或模块在同一时间发生失效,一次性对多个构件或模块进行维修,降低由于失效时间参差不齐而必须进行多次维修带来的多次固定成本。具体可执行的目标寿命规划方法为:使一级模块的寿命值为倍数关系[式(1),(2)],使隶属于同一一级模块的二级模块的寿命值相等[式(3)]。

$$L_A = L_B = m L_D \quad (1)$$

$$L_D = L_E = n L_F \quad (2)$$

$$L_{D1} = L_{D2} \quad (3)$$

式中: L 为使用寿命; m, n 为正整数;A, B, D, E, F, D_1, D_2 等为模块序号。

在模块化的寿命规划过程中应当综合考虑环境技术水平、构件更换的难易程度、全寿命的经济性等因素。

2.3 目标使用寿命确定的过程

基于等耐久性原则的目标使用寿命确定过程如下:①对业主和使用者的需求进行调查;②对结构的用途和使用条件进行调查;③确定结构整体的目标使用寿命;④形成结构的初步设计方案;⑤将结构划分为分层模块化体系;⑥确定模块或构件的目标使

用寿命。

3 等耐久性设计方法

根据混凝土结构等耐久性设计思路,将使用寿命作为耐久性衡量和设计的目标参数^[8]。经过等耐久性设计的混凝土结构中每个构件的每个部位均应满足目标使用寿命的要求[式(4)]^[14]。结构等耐久性设计实质上就是目标使用寿命的设置和设计使用寿命的控制。

$$t_d \geq t_g \quad (4)$$

$$t_d = \mu(t_s) / \gamma_g \quad (5)$$

式中: t_g 为目标耐久性使用寿命,根据本文第 2 节的方法和步骤进行预先设定; t_d 为设计耐久性使用寿命,是设计方案在一定保证率下的寿命值; $\mu(t_s)$ 为预期使用寿命的均值; γ_g 为寿命安全系数,与耐久性等级、目标可靠指标等因素有关。

将公式(5)代入公式(4)可以得到,在进行耐久性设计时,预期使用寿命的均值应当满足公式(6)的要求。由此可见,通过寿命安全系数 γ_g ,将对设计使用寿命的要求(基于一定允许失效概率)转化为了对预期使用寿命均值的要求。

$$\mu(t_s) \geq \gamma_g t_g \quad (6)$$

3.1 使用寿命安全系数

使用寿命安全系数与耐久性要求和目标可靠指标直接相关,受业主和用户的要求、结构或构件的重要程度、修复损伤的可能性、失效产生的后果等因素影响。重要程度越高、破坏后可修复性越差、破坏造成损伤越严重的结构,其设计时的耐久性要求越高,允许失效概率越低,目标可靠指标越高,使用寿命安全系数也越大。

用耐久性等级来描述对耐久性的基本要求,即结构或构件在可能遇到的各种作用下容许破坏的最大程度。根据混凝土结构耐久性能影响因素和机理的分析,性能演变过程的分析 and 目前结构耐久性的研究成果,建议将混凝土结构耐久性水平划分为如表 2 所示的 3 个等级。由于结构在发生较为严重的耐久性损伤时会引起人们的重视,会对耐久性损伤进行修复,不会任由其发展至影响结构安全性的程度,因此这里定义的耐久性等级只停留在正常使用的范畴。

结构和构件的耐久性等级是在进行耐久性设计前应当明确的内容。类似于安全等级的要求,构件宜与结构整体采用相同的耐久性等级,但允许对部分结构构件根据其重要程度和综合经济效果进行调

表 2 混凝土结构耐久性等级

Tab. 2 Durability Levels of Concrete Structure

耐久性等级	耐久性要求
一级	要求钢筋不发生锈蚀
二级	要求不发生表面损伤(如不允许发生锈胀裂缝或表面混凝土破损)
三级	允许发生一定的表面损伤(如一定宽度的锈胀裂缝或局部的表面混凝土破损)

整。如某一构件在结构中属于重要的受力构件且维修成本较高,则可以将该构件的耐久性水平提高一级;相反,某构件在结构中的重要程度较低,同时维修更换简单且费用较低,则可以将该构件的耐久性水平降低一级。

耐久性等级从一级到三级,结构失效的后果越来越严重,维修成本越来越高,因此,目标可靠指标也应该越来越高。不同的耐久性等级下,目标可靠指标的建议取值如表 3 所示,具体的取值应考虑结构的重要程度和具体的极限状态来确定。

表 3 耐久性极限状态目标可靠指标

Tab. 3 Target Reliability Indexes of Durability Limit State

耐久性等级	耐久性要求	目标可靠指标	相应失效概率/%
一级	要求钢筋不发生锈蚀	0.84~1.28	10~20
二级	要求不发生表面损伤(如不允许发生锈胀裂缝或表面混凝土破损)	1.28~1.64	5~10
三级	允许发生一定的表面损伤(如一定宽度的锈胀裂缝或局部的表面混凝土破损)	1.64~2.32	1~5

使用寿命安全系数与目标可靠指标有关,同时与使用寿命的分布类型和变异系数有关。经过对一般大气环境和氯盐环境下耐久性使用寿命进行分析发现,使用寿命服从对数正态分布,在 2 种情况下使用寿命的变异系数变化范围分别为 0.32~0.41,0.38~0.52;可见,环境作用下使用寿命的变异系数较大。根据计算结果假定在一般大气环境下使用寿命的变异系数为 0.4,氯盐环境下使用寿命的变异系数为 0.5。在这种假定下计算不同耐久性等级的寿命安全系数,取值见表 4。这里仅给出了寿命安全系数的建议取值范围,具体取值应综合考虑结构的重要性、结构耐久性失效带来的损失及耐久性修复的难易程度来确定。重要程度较高的构件取建议范围中的较大值;重要程度一般的构件则取建议范围中的较小值。

表 4 使用寿命安全系数建议取值

Tab. 4 Recommended Values of Service Life Safety Factor

耐久性等级	使用寿命安全系数	
	一般大气环境	氯盐环境
一级	1.4~1.7	1.7~2.0
二级	1.7~2.0	2.0~2.4
三级	2.0~2.6	2.4~3.3

3.2 预期使用寿命的计算

预期使用寿命的计算预估首先要明确耐久性的技术指标和耐久性极限状态。表 5 给出了 3 种耐久性等级下使用寿命估计模型所使用的技术指标和极限状态。

表 5 使用寿命估计模型依据的技术指标和极限状态

Tab. 5 Technical Indexes and Limit States of Service Life Estimation Model

耐久性等级	极限状态	技术指标	
		碳化环境	氯盐环境
一级	钢筋开始锈蚀	碳化深度和碳化残量的和	到达钢筋表面的氯离子浓度
二级	钢筋锈蚀引起混凝土保护层开裂	钢筋锈蚀产物膨胀引起的保护层内的拉应力	钢筋锈蚀产物膨胀引起的保护层内的拉应力
三级	钢筋锈蚀引起混凝土裂缝达到极限裂缝宽度	钢筋锈蚀产物膨胀引起的裂缝宽度	钢筋锈蚀产物膨胀引起的裂缝宽度

基于耐久性的技术指标和相应的极限状态,可以根据试验或理论研究建立预期使用寿命的计算模型。董振平等^[15]提出了碳化速度系数的估算模型,屈文俊等^[4]研究了在风压作用下混凝土的碳化速度,El Maaddawy 等^[16]研究了从钢筋发生锈蚀到开始出现锈胀裂缝的时间模型,Mullard 等^[17]在试验数据的基础上给出了锈胀裂缝发展至最大裂缝宽度的经验模型,这些对材料退化规律的研究为预期使用寿命的计算预估提供了可能性。

预期使用寿命的计算模型中往往存在较多的随机变量,预期使用寿命的均值可以采用 Monte Carlo 模拟方法进行求解。在进行结构设计时,这种做法会过于复杂,也可以直接对预期使用寿命的均值进行计算。

假定使用寿命估计模型为 $Y=G(X_1,X_2,\cdots,X_n)$, G 为随机变量 X_1,X_2,\cdots,X_n 的函数, X_1,X_2,\cdots,X_n 相互独立且均服从正态分布,各随机变量的均值和标准差分别为 μ_{Xi} 和 σ_{Xi} ($i=1,2,\cdots,n$),以上基本假定对实际工程问题的影响很小,可以满足工程要求的精度。

为了得到使用寿命 Y 的均值 μ_Y , 将函数 $Y = G(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 在均值点 $\mu^* = (\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})$ 处展开成泰勒级数, 即 $Y = G(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) + \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_i) (\frac{\partial G}{\partial x_i} |_{\mu^*}) + \dots$, 当展开式仅保留线性项时, Y 的均值 $\mu_Y = G(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})$ 。经过验算, 直接计算预期使用寿命均值与模拟法均值之间的偏差在 5% 左右, 且在除以一个大于 1 的使用寿命安全系数后, 两者偏差会进一步缩小, 可以认为满足工程要求。

等耐久性使用寿命设计的主要过程如图 2 所示。

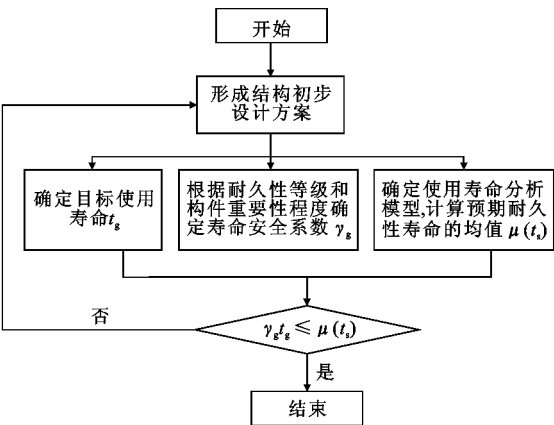


图 2 等耐久性设计过程
Fig. 2 Equal Durability Design Process

4 设计算例

4.1 截面层次等耐久性设计

某简支梁桥的边主梁为 T 形截面, 初始设计的跨中截面普通钢筋布置如图 3 所示, 截面中的预应力筋位于普通钢筋内部, 图中未显示。混凝土等级为 C50, 底部钢筋(图 3 中①)的直径为 25 mm, 其余钢筋均为 10 mm, 最外层横向钢筋的保护层厚度均为 20 mm。桥梁位于内陆地区, 年平均气温为 14.9℃, 平均湿度为 78%, 主导风向从图中左侧吹来, 不使用除冰盐。构件目标使用寿命为 100 年, 耐久性等级分别为一级、二级、三级时的使用寿命安全系数为 1.4, 1.7, 2.0, 即预期使用寿命的均值应当分别大于 140, 170, 200 年。

4.1.1 截面表面层划分和编号

为了方便说明和计算, 根据设计要求和构件布置, 对截面进行表面层划分和编号, 如图 4 所示。图 4 中 b, c, f, h 表示角部, 同一条边有折线的位置考虑为同一表面, 如 a, d, e, g, i, j, 由于构件右侧有另一主梁, 翼缘右侧有后浇带, 这里不对右侧表面进行

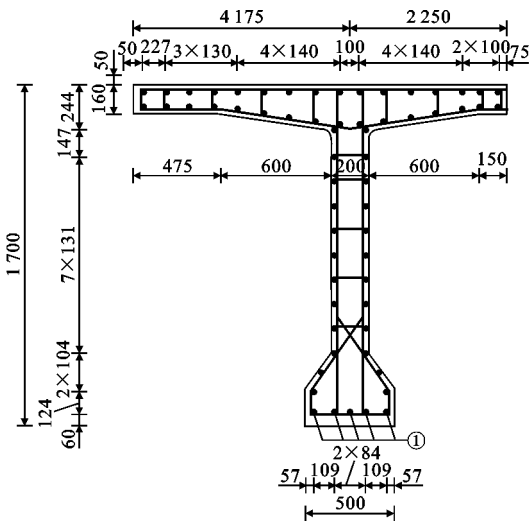


图 3 初始设计的 T 形梁截面梁跨中截面钢筋布置
(单位: mm)

Fig. 3 Layout of Mid-span Reinforcement of T-beam Section in Initial Design (Unit: mm)

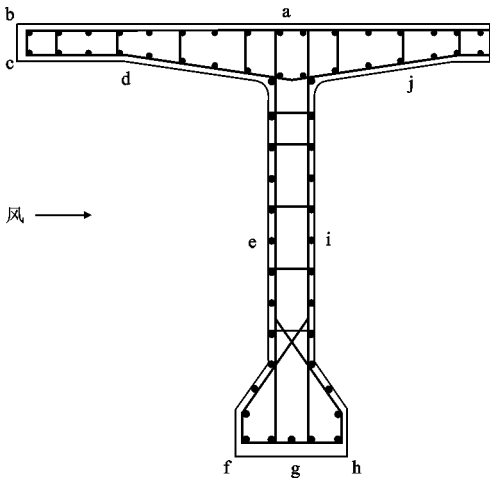


图 4 T 形梁截面表面层划分
Fig. 4 Surface Layer Division of T-beam Section

编号。

4.1.2 影响耐久性能的关键因素

桥梁位于内陆地区且不使用除冰盐, 因此造成结构耐久性性能退化的主要因素为碳化作用。

4.1.3 各表面层预期耐久性寿命均值计算

采用本文第 3.2 节中提到文献所给出的使用寿命估计模型, 根据初始设计混凝土强度和保护层厚度, 计算各表面层预期使用寿命均值, 如表 6, 7 所示。考虑到 a 层表面会设置铺装层, 故认为该层不会发生由于钢筋锈蚀引起的耐久性失效。

4.1.4 截面等耐久性设计

从表 6, 7 中可以看出, 考虑风压影响系数时, 初始设计的预期使用寿命大多不能满足目标使用寿命

的

表 6 初始设计的预期使用寿命均值(纵向钢筋)

Tab. 6 Expected Average Life in Initial Design (Longitudinal Reinforcements)				
表面层 编号	风压影响 系数	预期使用寿命均值/年		
		一级	二级	三级
b*	1.508	55.6	60.5	80.7
c*	1.508	55.6	60.5	80.7
d	1.323	143.8	148.7	175.0
e	1.185	148.1	153.0	179.3
f*	1.185	74.4	79.3	99.5
g	1.026	197.7	202.5	228.8
h*	1.230	69.1	73.9	94.2
i	1.230	137.5	142.4	168.7
j	1.245	162.4	167.3	193.6

注：* 表示角部。

表 7 初始设计的预期使用寿命均值(横向钢筋)

Tab. 7 Expected Average Life in Initial Design (Transverse Reinforcements)				
表面层 编号	风压影响 系数	预期使用寿命均值/年		
		一级	二级	三级
b* c* 边	1.508	72.8	5.5	86.3
d	1.323	94.6	97.3	108.1
e	1.185	97.5	100.1	110.9
g	1.026	130.0	132.7	143.5
i	1.230	90.5	93.1	103.9
j	1.245	106.8	109.5	120.3

要求,且角部不满足要求的情况更严重。不同风压面的预期使用寿命有较大的差异。根据等耐久性设计原则对截面进行等耐久性设计,主要采取的措施有 2 种:①对于严重不满足要求的部位(角部),将纵向钢筋替换为不锈钢的 FRP 筋材,角部箍筋也设置为 FRP 箍筋,如图 5 所示;②对于其他部位,增大保护层厚度,保护层厚度以最外层的横向钢筋为基准进行。调整后的保护层厚度如表 8 所示。从表 8 可知:对于不同的表面,满足计算要求的保护层厚度不

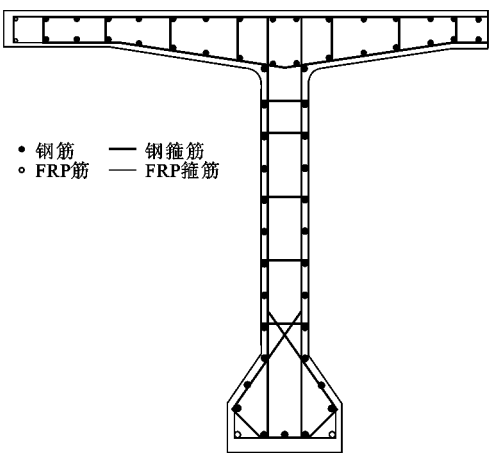


图 5 筋材替换区域

Fig. 5 Area for Reinforcement Replacement

同,通过这种不同的保护层厚度设置,可以实现截面的等耐久性;对于不同的耐久性等级,满足计算要求的保护层厚度也不同,由此可以看出进行耐久性设计时首先确定耐久性等级的重要性。实际设计时,为方便施工,可以将保护层厚度进行微调,使之遵循常用保护层厚度的模数规定,但是最小厚度不能小于表 8 的要求。

4.2 结构层次等耐久性设计

某简支梁桥主梁由 4 片 T 形梁组成,下部结构采用柱式桥墩,初始设计某支点处布置如图 6 所示。桥梁的使用环境与前一算例相同。桥梁目标使用寿命为 100 年。各类构件的初始设计参数如表 9 所示。

4.2.1 分层模块体系的划分和编号

根据图 6 中所包含的构件类别,对该部分结构进行划分,并对构件进行编号,如图 7 和表 10 所示。

4.2.2 各模块、构件目标使用寿命和寿命安全系数

由于在桥梁使用寿命期内上述各模块均不便于更换,所以所有构件的目标使用寿命都与桥梁整体的使用寿命相同,为 100 年。各模块和构件的寿命安全系数如表 11 所示。

表 8 不同表面保护层厚度调整值

Tab. 8 Adjustment Value of Different Surface Protective Layer Thickness							
表面层 编号	风压影响 系数	一级耐久性		二级耐久性		三级耐久性	
		保护层厚度/mm	预期使用寿命 均值/年	保护层厚度/mm	预期使用寿命 均值/年	保护层厚度/mm	预期使用寿命 均值/年
b* c* 边	1.508	37	142.0	42	174.9	39	204.2
d	1.323	30	143.8	34	172.2	33	200.4
e	1.185	29	142.6	33	171.2	33	205.3
g	1.026	22	142.4	26	172.8	27	200.6
i	1.230	31	142.8	35	170.9	34	200.7
j	1.245	27	144.6	31	173.8	31	202.4

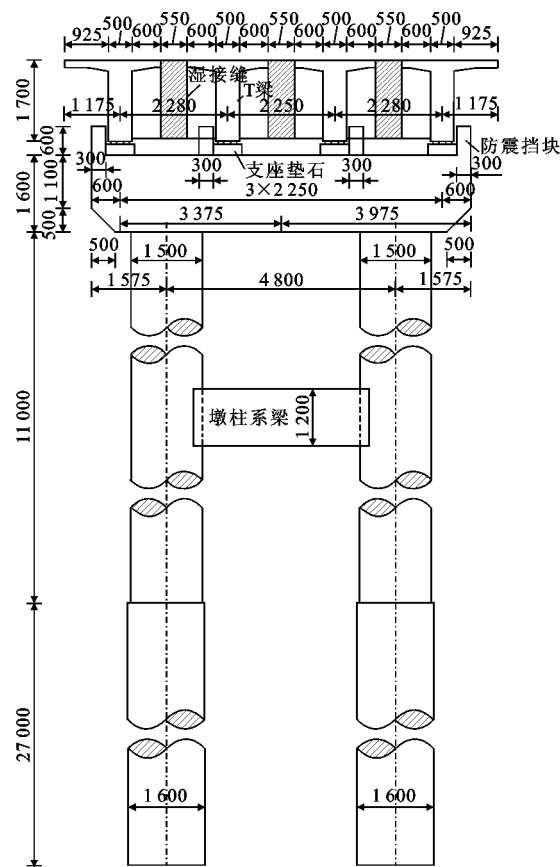


图 6 桥墩及上部结构布置(单位:mm)

Fig. 6 Layout of Piers and Superstructure (Unit:mm)

表 9 各类构件初始设计参数

Tab.9 Initial Design Parameters of
All Kinds of Components

构件	混凝土 强度	钢筋直径/mm		保护层厚度/mm	
		纵向 钢筋	横向 钢筋	纵筋保 护层	箍筋保 护层
主梁	C50	10,25	10	30	20
盖梁	C30	28	10	35	25
墩柱	C30	25	10	60	50
桩基础	C30	25	10	70	60
系梁	C30	25	12	47	35
支座垫石	C40	10	35		
抗震挡块	C30	25	20		

4.2.3 影响耐久性能的关键因素

桥梁位于内陆地区且不使用除冰盐,造成结构耐久性能退化的主要因素为碳化作用。

4.2.4 各构件预期耐久性寿命均值计算

根据上一个算例可知,角部钢筋锈蚀所确定的寿命远小于边部钢筋锈蚀所决定的寿命,可以通过特殊的保护措施来推迟角部耐久性退化过程,在计算各构件预期耐久性寿命均值时,只计算边部决定的预期使用寿命均值,且计算时以最外层钢筋为基

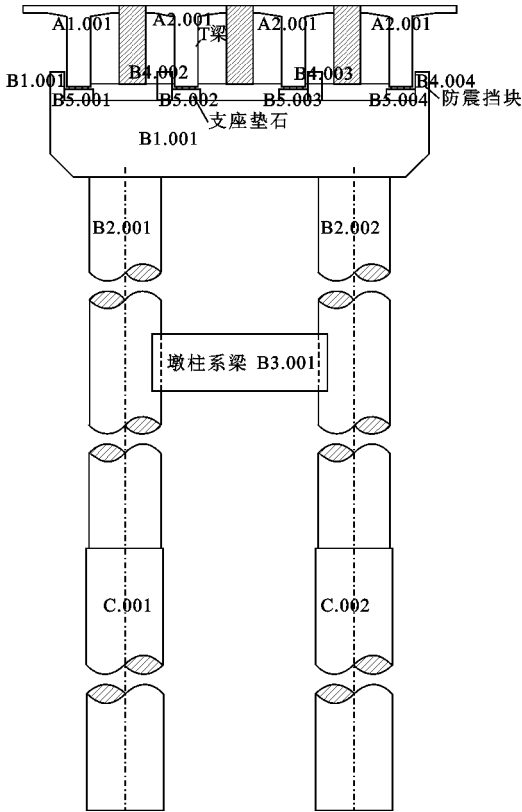


图 7 分层模块化体系及编号

Fig. 7 Hierarchical Modular System and Number

表 10 分层模块化体系及编号说明

Tab.10 Hierarchical Modular System and
Number Description

一级模块	二级模块	构件编号
主梁 A	边梁 A1	A1.001,A1.002
	内梁 A2	A2.001,A2.002
桥墩 B	盖梁 B1	B1.001
	墩柱 B2	B2.001,B2.002
	系梁 B3	B3.001
	抗震挡块 B4	B4.001,B4.002,B4.003,B4.004
	支座垫石 B5	B5.001,B5.002,B5.003,B5.004
基础 C		C.001,C.002

准进行计算,如表 12 所示,表 12 中均为耐久性最薄弱表面的预期使用寿命值。

4.2.5 结构等耐久性设计

从表 12 中可以看出,多种构件的预期使用寿命不能满足目标使用寿命的要求,对这部分结构进行等耐久性设计主要采取增加保护层厚度的措施,调整设计后的设计参数如表 13 所示。从表 13 中可以看出,对于不同构件,满足计算要求的保护层厚度不同,同为主梁的 A1 和 A2,由于局部环境不同,计算满足要求的保护层厚度相差 5 mm,边梁计算满足要求的保护层厚度大于内部梁。对于不同耐久性等

表 11 构件的寿命安全系数

Tab. 11 Service Life Safety Factors of Components

模块	构件编号	寿命安全系数		
		一级	二级	三级
主梁 A	A1. 001,A1. 002, A2. 001,A2. 002	1. 4	1. 7	2. 0
盖梁 B1	B1. 001	1. 7	2. 0	2. 6
墩柱 B2	B2. 001,B2. 002	1. 7	2. 0	2. 6
系梁 B3	B3. 001	1. 7	2. 0	2. 6
抗震挡块 B4	B4. 001,B4. 002, B4. 003,B4. 004	1. 7	2. 0	2. 6
支座垫石 B5	B5. 001,B5. 002, B5. 003,B5. 004	1. 7	2. 0	2. 6
基础 C	C. 001,C. 002	1. 7	2. 0	2. 6

表 12 初始设计的预期使用寿命均值

Tab. 12 Expected Average Service Life in Initial Design

模块	构件编号	预期使用寿命均值/年			目标使用寿命/年		
		一级	二级	三级	一级	二级	三级
主梁 A	A1. 001,A1. 002	72. 8	75. 5	86. 3	140	170	200
	A2. 001,A2. 002	102. 2	104. 9	115. 7	140	170	200
盖梁 B1	B1. 001	76. 7	78. 5	93. 2	170	200	260
墩柱 B2	B2. 001,B2. 002	246. 9	252. 0	283. 6	170	200	260
系梁 B3	B3. 001	133. 2	136. 1	158. 2	170	200	260
抗震挡块 B4	B4. 001,B4. 002,B4. 003,B4. 004	54. 3	55. 7	59. 6	170	200	260
支座垫石 B5	B5. 001,B5. 002,B5003,B5. 004	229. 6	234. 2	265. 8	170	200	260
基础 C	C. 001,C. 002				170	200	260

表 13 不同构件保护层厚度调整值

Tab. 13 Adjustment Value of Different Component Protective Layer Thickness

模块	构件编号	一级耐久性		二级耐久性		三级耐久性	
		保护层厚度/ mm	预期使用寿 命均值/年	保护层厚度/ mm	预期使用寿 命均值/年	保护层厚度/ mm	预期使用寿 命均值/年
主梁 A	A1. 001,A1. 002	37	142. 0	42	174. 9	39	204. 2
	A2. 001,A2. 002	29	142. 1	34	172. 8	35	201. 6
盖梁 B1	B1. 001	41	174. 5	45	205. 2	48	265. 1
墩柱 B2	B2. 001,B2. 002	41	174. 5	45	205. 2	48	265. 1
系梁 B3	B3. 001	41	174. 5	45	205. 2	48	265. 1
抗震挡块 B4	B4. 001,B4. 002, B4. 003,B4. 004	41	174. 5	44	201. 5	49	263. 3
支座垫石 B5	B5. 001,B5. 002, B5. 003,B5. 004	28	172. 5	31	202. 4	35	260. 1
基础 C	C. 001,C. 002						

等耐久性原则的目标使用寿命确定方法和过程。

(3)提出了等耐久性设计过程和不同耐久性等级的使用寿命安全系数建议取值范围。

(4)通过 2 个算例说明了混凝土结构等耐久性设计的过程。在截面层次进行耐久设计时,对于耐久性能严重不足的部位(角部),将钢筋替换为不锈

级,满足计算要求的保护层厚度也不同,因此进行耐久性设计时首先要确定各构件的耐久性等级。实际设计时,为方便施工,可以将保护层厚度进行微调,使之遵循常用保护层厚度的模数规定,但是最小厚度不能小于表 13 的要求。

5 结 语

(1)混凝土结构等耐久性设计的定义为:将混凝土结构中构件进行分类,各类构件设计等同的耐久寿命,构件实现截面等耐久性的设计方法。等耐久性设计的实质就是目标使用寿命的确定及使用寿命的设计。

(2)提出了结构分层模块化划分的方法及基于

的 FRP 筋材,避免其过早提前耐久性失效;其余部位通过调整保护层厚度来实现截面等耐久性要求。在结构层次进行耐久性设计时,通过调整保护层厚度来达到结构总体等耐久性的要求,实例表明,由于局部环境不同,同种类型的构件需要设置不同的保护层厚度才能满足等耐久性的要求。

参考文献:

References:

- [1] 屈文俊,郭 猛. 混凝土截面角区双向碳化的计算模型与试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(增 1): 687-690.
QU Wen-jun, GUO Meng. Calculation Model and Experimental Study of Two-way Carbonization of Concrete Section Corner [J]. Industrial Construction, 2005, 35(S1): 687-690.
- [2] 屈文俊. 既有混凝土桥梁的耐久性评估及寿命预测[D]. 成都: 西南交通大学, 1995.
QU Wen-jun. Durability Evaluating and Life Predicting on Existing Concrete Bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1995.
- [3] 田 浩, 李国平, 刘 杰, 等. 受力状态下混凝土试件碳化试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 200-204, 213.
TIAN Hao, LI Guo-ping, LIU Jie, et al. Experimental Research on Carbonation of Forced Concrete Specimens[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 200-204, 213.
- [4] 屈文俊,郭 猛. 风压影响混凝土碳化试验研究[J]. 混凝土, 2005(1): 49-51.
QU Wen-jun, GUO Meng. Testing Study on Concrete Carbonization Influenced by Wind Pressure[J]. Concrete, 2005(1): 49-51.
- [5] 张 伟,董志良,吕 黄. 混凝土氯离子二维扩散模型及工程验证[J]. 水运工程, 2009(6): 35-39.
ZHANG Wei, DONG Zhi-liang, LU Huang. Two-dimensional Model for Chloride Diffusion in Concrete and Engineering Verification[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(6): 35-39.
- [6] 赵 筠. 钢筋混凝土结构的工作寿命设计——针对氯盐污染环境[J]. 混凝土, 2004(1): 3-15, 21.
ZHAO Jun. Service Life Design of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chloride Environment [J]. Concrete, 2004(1): 3-15, 21.
- [7] GJORV O E. 严酷环境下混凝土结构的耐久性设计[M]. 2 版. 赵铁军, 译. 北京: 中国建材工业出版社, 2015.
GJORV O E. Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments[M]. 2nd ed. Translated by ZHAO Tie-jun. Beijing: China Building Materials Press, 2015.
- [8] 吴海军. 桥梁结构耐久性设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
WU Hai-jun. Durability Design Approaches for Bridge Structures[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [9] ENRIGHT M P, FRANGOPOL D. Survey and Evaluation of Damaged Concrete Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(1): 31-38.
- [10] 屈文俊, 车惠民. 混凝土桥梁的优化等耐久性设计[J]. 土木工程学报, 1998, 31(4): 23-30.
QU Wen-jun, CHE Hui-min. Design of Optimum Equal Durability About Concrete Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(4): 23-30.
- [11] 屈文俊, 张 誉. 混凝土桥梁的耐久性维护方法[J]. 铁道学报, 2001, 23(1): 98-102.
QU Wen-jun, ZHANG Yu. Method for Durability Maintenance of Concrete Bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(1): 98-102.
- [12] 屈文俊, 陈道普, 黄海群. 钢-GFRP 混合配筋混凝土梁抗弯承载力计算[J]. 建筑结构, 2006, 36(12): 22-24.
QU Wen-jun, CHEN Dao-pu, HUANG Hai-qun. Bending Moment Resistance Calculation of Steel-GFRP Reinforced Concrete Beam [J]. Building Structure, 2006, 36(12): 22-24.
- [13] 屈文俊, 顾俊颖, 秦宇航. RPC-NC 组合截面梁的耐久性试验研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(1): 106-108.
QU Wen-jun, GU Jun-jie, QIN Yu-hang. Experimental Study on the Durability of PRC-NC Combined Section Beams [J]. Structural Engineers, 2009, 25(1): 106-108.
- [14] 陈 琳, 屈文俊, 朱 鹏. 混凝土结构全寿命等耐久性设计的理论框架[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 93-103.
CHEN Lin, QU Wen-jun, ZHU Peng. Theoretical Framework of Life Cycle Equal Durability Design Method in Concrete Structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 93-103.
- [15] 董振平, 牛荻涛, 刘西芳, 等. 一般大气环境下钢筋开始锈蚀时间的计算方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(2): 204-209.
DONG Zhen-ping, NIU Di-tao, LIU Xi-fang, et al. Calculation Method of the Initial Time of Steel-bar Corrosion Under Atmospheric Environment [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2006, 38(2): 204-209.
- [16] EL MAADDAWY T E, SOUDKI K. A Model for Prediction of Time from Corrosion Initiation to Corrosion Cracking [J]. Cement & Concrete Composites, 2007, 29(3): 168-175.
- [17] MULLARD J A, STEWART M G. Corrosion-induced Cover Cracking of RC Structures; New Experimental Data and Predictive Models[R]. Newcastle: University of Newcastle, 2009.