

文章编号:1673-2049(2008)01-0001-09

# 崇明长江隧道盾构管片衬砌结构的耐久性设计

孙 钧<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室,上海 200092;  
2. 上海城建集团公司 院士工作室,上海 200092)

**摘要:**为了研究盾构法隧道管片衬砌结构强度的历时老化和衰减及其服务寿命的预测问题,提出了对其进行耐久性设计的一种基本方法。主要讨论的内容有:钢筋混凝土管片结构的腐蚀机理;影响隧道混凝土结构耐久性的主要因素;管片接头螺栓和防水材料的耐久性;钢筋混凝土管片结构耐久性设计方法;隧道结构服务寿命预测,以及提高隧道管片衬砌耐久性的工程措施——综合防治。该研究成果已在崇明长江隧道工程中得到了初步应用。

**关键词:**盾构法隧道;管片衬砌;结构耐久性设计;隧道服务寿命;综合防治

**中图分类号:**TU528.33 **文献标志码:**A

## Durability Design of Segment Lining Structure in Chongming Yangtze River Shield Tunnel

SUN Jun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education,  
Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Academician Studio, Shanghai Urban  
Construction Group Corporation, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to understand the long-term strength attenuation and material ageing of tunnel structures, the author presented an explorative study on the durability design and service life prediction of the under-river tunnel lining segments constructed by shield driving method. The main topics under discussion here were: corrosion mechanism of RC segment lining structures, main factors affecting the durability of RC tunnel structures, durability of bolts connected segment joints and water-proofing materials, durability design method for segment linings, prediction of the service life on tunnel structures and the comprehensive prevention and cure measures which were intended to improve the durability of tunnel segment lining structures in engineering aspects. The results obtained here have been preliminarily used in Chongming Yangtze River Tunnel engineering project.

**Key words:** shield tunnel; segment lining; durability design of structure; tunnel service life; comprehensive prevention and cure measure

## 0 引言

中国工程部门经常提到“百年大计,质量第一”,

这一要求在工程设计和施工中如何具体反映和体现,已日益引起业界人士的迫切关注,隧道与地下工程结构的耐久性问题已经成为当前的一项研究热

收稿日期:2008-01-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)项目(0230235033)

作者简介:孙 钧(1926-),男,浙江绍兴人,教授,博士生导师,中国科学院院士,E-mail:junsunk@online.sh.cn。

点。现行城市轨道交通设计规程中规定了地铁主体结构的设计基准期(使用年限)为 100 年;而越江和海底隧道的服务寿命则可能要求更长。对结构耐久性的定义和内涵,《混凝土耐久性设计规范》(GB/T—200X)征求意见稿(待颁布实施)中已写明:在设计确定的环境——引起混凝土结构材料性能劣化的环境因素(工程周围大气温湿度变化,CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、氯盐、酸碱等有害化学离子施加于结构主体等)的作用和在正常维修、使用条件下,结构构件在规定期限内保持其适用性和安全性的能力,即工程结构的耐久性。但是,在相应的工程设计中如何进行其耐久性设计,迄今尚未很好地解决,如现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002),虽提出了耐久性要求,但其标准似乎偏低,新拟的耐久性设计规范则多原则性要求,尚不够具体实用。在规范适用范围内,虽包含了城市桥梁、隧道,但又提到对低周反复荷载和持久荷载作用,也能引起材料性能劣化的耐久性问题,它与荷载作用下的结构强度设计有关,有别于环境作用下的耐久性设计,不属该规范考虑的范畴,有关隧道方面的内容也都尚未纳入其中。

多年来,对混凝土材料耐久性方面的研究已有很多<sup>[1-15]</sup>,但本文中所探讨的水底隧道衬砌结构的耐久性问题,则与单纯材料方面的研究有着质的不同,其差异主要可归结为以下各点:①长江水底隧道衬砌最大需承受约 70 m 高水头的渗透压力,以及深厚土层围压的长期持续作用;②通过江床下伏的各层性质各异的土体,江水以地下水渗流的方式作用并长期腐蚀管片衬砌的后背;③要求先对江水(和涨潮时长江口外海水的倒灌作用)及土层矿物质组成进行物化分析,考察江水(海水)与土层各组份间的物化反应过程,进而探究这种变性(变质)江水(海水)对管片衬砌的腐蚀效应;④衬砌钢筋混凝土结构随不同截面位置和各种不利荷载组合,分别呈大、小偏心受压作用,若干控制截面还将局部承受不利的拉弯受力,并处于允许的限裂和裂控状态;⑤要研究最不利工况和不同受力状态下混凝土材料抗渗性能的变化及其衬砌腐蚀后强度的时程恶化,即对混凝土腐蚀损伤(带有早期裂纹的初始损伤)的积累与演化;⑥要研究隧道内部在接近恒温与夏季高温、秋冬干燥的环境条件下,由于隧道内外部温湿度交替反复变化使衬砌材料的腐蚀随时间而加剧,从而引起结构耐久性呈变加速持续恶化的情况。在该项研究中,需要配合以上各复杂因素条件,进行一系列的试验和测试,以求获得大量有参考价值的数据和

第一手资料,进而才能有根据地做出隧道结构的耐久性设计。

目前,仅在结构设计中提出了诸如结构选材(优选高性能混凝土、高品质钢材等)、适当加厚混凝土保护层厚度、结构表面和钢筋上增敷防腐涂层、优化施工工艺等工程措施。众所周知,作为一个完整的工程结构耐久性设计,仅提出上述几个方面是远远不够的。研究认为,在耐久性问题中,采用何种理论预测并经试验修正与验证,以求定量地对隧道服务寿命做出有一定依据的合理预测及做好结构耐久性设计,并进而探讨如何采用综合性的工程处治措施,使对结构的耐久性做出更加具有针对性的技术保障等,都是现时亟待研究解决的问题。由于隧道工程(特别如本文中探讨的长大越江隧道等)属于一项难于日后再做大手术加固和修复的、隐蔽性很强的水下和地下重大工程项目,对其耐久性方面决策的可靠性和有依据性问题就更突出而具有相当大的难度和复杂性。影响工程耐久性的主要环境场合有:化工和油品类等毒害物污染;海水和海洋环境、江口水域潮流影响等含盐氯离子腐蚀;隧道受含放射性物质地下水长期浸泡入渗;道路隧道内车流尾气中 CO<sub>2</sub> 对混凝土的碳化作用;高寒地域气候变化、冻融、南方地区冬夏温湿度交替;其他氯化物和各种化学腐蚀环境等。在本文中讨论的长江水底隧道结构的诸环境侵蚀场合中,上述众多因素的不少方面都与其耐久性研究密切相关。

隧道结构耐久性设计存在的问题和困难主要在于:设计中认为土层、地下水和隧道内外环境中腐蚀性介质的含量未超标,而不主动采取保证耐久性的措施,这是一个误区。此外,混凝土材料随时间呈劣化(老化)也是一个变加速的过程。再则,耐久性研究需要做长时间的试验和测试,这在客观上是不可能的。这些困难和问题在很大程度上制约了耐久性研究工作的进展。

## 1 管片衬砌结构的腐蚀机理

### 1.1 腐蚀情况

从 19 世纪后期开始,球墨铸铁隧道管片使用 100 多年迄今仍然完好(伦敦地铁和泰晤士河上一些老时代的盾构隧道等);而 20 世纪中叶后,钢筋混凝土管片出现的问题却不少,以中国香港 20 世纪 70 年代建成的地铁为例,到了 20 世纪 90 年代,衬砌结构的内排钢筋、连接螺栓的外露部分和钢拉杆都有不少锈蚀,多处管片的混凝土保护层剥落。采

用的修复方案一般都是喷钢筋纤维混凝土(植筋)后再添扎内排钢筋,用聚合物混凝土补强。上海市 20 世纪 70 年代初建成的打浦路隧道,现在除需增设复线外,同时也面临第 2 次的全面大修。以上的例子说明:采用服务年限 100 年作为耐久性要求,如果不经完善的耐久性设计,很少能满足使用合格的条件。

### 1.2 钢筋混凝土材料的腐蚀机理

(1)混凝土碳化。水泥集料中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与空气中的  $\text{O}_2$  及地下水中的  $\text{CO}_2$ ,经水化反应生成  $\text{CaCO}_3$ ,以及汽车尾气中的  $\text{CO}_2$  引起碳化作用,混凝土碳化使  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  减少及混凝土含碱量(碱度)和 pH 值降低,从而导致混凝土受碳化腐蚀;同时,  $\text{CO}_2$  入渗混凝土保护层后,使钢筋表面钝化膜剥蚀而锈烂。此外,碳化使混凝土收缩,在混凝土表面产生拉应力而出现收缩微裂纹,降低了混凝土的抗渗能力,而钢筋锈胀进一步使混凝土保护层剥落。

(2)混凝土碱骨料(碱-硅)反应。在混凝土浇筑成型若干年后,其中的水泥、结合水和外加剂中的碱与混凝土集料中的活性成分发生碱骨料反应,其反应生成物吸水膨胀,使混凝土胀裂。

(3)侵蚀性环境中的有害化学离子入渗混凝土的腐蚀作用。工程环境和地下水中的酸、盐介质( $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  积聚)以及含硫酸、氯盐的腐蚀性地下水入渗混凝土,与水泥水化物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应,使碱度降低,混凝土强度下降;酸性介质入渗,则使酸根离子被吸附到钢筋钝化膜表面而产生破损,从而导致钢筋锈蚀、铁锈体积膨胀,使混凝土保护层胀裂和剥落。

(4)高寒地区混凝土冻融,南方夏季温湿度交替循环变化使混凝土开裂而剥落。

(5)电气化地铁中杂散电流对钢筋的电腐蚀。

(6)混凝土道面磨蚀、江中管片因受土层内的砂及地下水流长时期冲刷,使其表面性能劣化。

(7)近年来一些地区的雨中酸度加大、频率增大,酸雨使地下水质受污染,进而引起管片结构腐蚀。

(8)意外因素作用,以隧道内火灾最为常见,因受高温烟火持续炙烤使混凝土表面产生大量发细裂纹、裂缝,进而引起混凝土剥落和爆裂,其附近部位强度则急剧降低。

## 2 影响耐久性的主要因素

(1)钢筋锈蚀。受海水(地下水)氯离子入渗(在混凝土内,氯离子向低浓度区扩散)控制,氯离子与地下水作用发生化学腐蚀,如第 1 节所述,混凝土碳

化也使钢筋层表面钝化膜破坏。

(2)混凝土保护层剥落。受混凝土碳化腐蚀影响和钢筋锈蚀后体积膨胀而使混凝土保护层胀裂。

(3)混凝土表面龟裂(发细裂纹宽度一般小于 0.02 mm,湿润时方可见)。其为遇干湿、冷热交替的不均衡环境作用时,因混凝土碳化收缩与冬季干缩相互叠加所引起的一种破坏。

(4)混凝土裂缝(受缝宽和裂缝数控制)。使腐蚀介质中的氯和硫酸盐离子与地下水及氧气等入渗到混凝土内部。

(5)混凝土抗入渗性能不足。处于腐蚀性地下水和土壤中的含水溶性硫酸盐环境下,容易因腐蚀而影响结构的耐久性。

(6)预制管片在生产、运输和安装过程中的裂缝(缝宽有时已达到 0.2 mm,需做控制)及其边角受撞击而破损(表 1)。因此,进一步提高管片混凝土的抗冲击和抗拉性能是当务之急。

表 1 管片裂缝、破损原因及所占比例	
Tab. 1 Reasons of Fissures and Ruptures in Lining Segments and Their Occupied Proportions	
管片裂缝、破损原因	所占比例/%
管片制作质量欠佳	9.9
搬运堆放和吊装碰撞(边角缺损)	5.3
管片在盾构内拼装时碰撞和承拉超限	38.2
盾构行进姿态与管片就位不一致、纠偏与错台	21.6
掘进时管片顶力分布不均匀	18.5
同步注浆量分布不理想	6.5

(7)意外灾害(火灾、地震、战祸、海啸、恐怖袭击等)。

耐久性设计的要点在于如何有效地减缓和控制钢筋混凝土管片结构的劣化进程,这是一项重要而又复杂难解的问题。

## 3 接头螺栓和填缝防水材料的耐久性

(1)影响管片环缝和纵缝橡胶性水密材料耐久性的主要因素有:①耐热、耐低温;②耐酸、碱和化学腐蚀与第 1.2 节所述的电腐蚀;③隧道内车辆往复循环运行作用下的耐动力疲劳;④耐干、湿交替环境影响的材料疲劳;⑤耐水;⑥耐地层土体与结构的历时蠕变与应力松弛变化;⑦水胀性材料接触面处膨胀压力的长期保持等。

(2)针对水密封材料的功能要求做出其耐久性评价——接触面应力和止水效果间的有关耐久性指标:①接触面初压应力从 0.6 MPa 松弛至 0.2~0.3 MPa 的时效降低,以此作为一种管片接头寿命

老化的阈值标准来度量;②采用温度加速试验,按 Arrhenius 建议的化学反应速度方法以及外延法做推演分析,算得在隧道环境温度下的服务寿命。

(3)管片接头螺栓的耐久性试验研究的主要工作有:①研究对象——经防腐涂层敷后的普通高强度钢螺栓的外露部分(含螺帽和钢拉杆等);②灌缝砂浆受有害化学离子和含腐地下水入渗而栓杆锈蚀;③高强螺栓的应力腐蚀;④接头螺栓经热浸镀锌层的点状腐蚀——研究防腐涂层对螺栓寿命的影响;⑤有条件时再做经其他 2 种涂层(锌粉酪酸保护膜和氯化乙烯树酯涂层)处理后的螺栓,论证其耐硫酸盐腐蚀能力,并通过 90 d 盐水喷雾试验,以做比较选择。

从管片结构的整体工作性能方面看,接头的耐久性应与管片主体结构的耐久性基本等同。

## 4 耐久性设计方法

### 4.1 设计观点和思想方法

崇明长江隧道作为特大型的地下建筑结构物,通过隧道管片衬砌结构的耐久性设计来定量保证其 100 年的设计使用年限,具有重要的经济意义和工程实用价值。钢筋混凝土结构的耐久性设计至今尚未形成统一的、比较合理可行的方法,对越江、跨海隧道结构的耐久性设计而言就更是如此。传统的经验方法和简化计算方法看来都不能很好地解决问题,所以,必须对其进行专项研究。

混凝土结构耐久性设计的传统方法,是将环境作用按其对环境影响的严重程度定性地划分成几个作用等级,在工程经验类比的基础上,对于不采用环境作用等级做评估的混凝土结构构件,可由规范直接规定混凝土材料的耐久性质量要求和钢筋保护层厚度等构造措施以满足结构的耐久性要求。在另外的一种简化计算方法中,其环境作用需要定量表示,然后选用适当的材料劣化模型求出环境作用效应,列出耐久性极限状态下的环境作用效应与结构耐久性抗力之间的关系式,进而求得与耐久性极限状态相对应的设计使用年限。研究认为,传统方法中的经验性所占比重过大,具有相当的随机性,对于像长江隧道管片衬砌结构这样比较复杂的环境作用,传统方法将不能胜任;而上述定量的简化计算方法,则尚未成熟到能在工程中普遍应用的程度。

本文中考虑的是在计入影响混凝土结构耐久性的内、外荷载与环境因素二者共同作用进行混凝土结构耐久性设计时,需沿时间坐标轴展开,使所设计

结构的可靠性在规定的目标使用期内不低于规范要求,即无需投入巨额费用进行彻底大修和全面加固。笔者认为,就隧道结构的耐久性设计而言,一种应用性强的设计方法应该包括 2 大部分内容:一是计算和验算部分;二是构造要求部分。基于上述观点,本文中提出了一种基于近似概率法的对隧道管片衬砌结构进行耐久性设计的方法。

### 4.2 设计要求

(1)现行的隧道衬砌结构设计,主要只考虑了在外荷载作用下对结构承载力的安全性,并计入了因约束结构过度变形、沉降和控制裂缝开展等对结构使用性能的影响。现行设计中未能计入由于环境因素侵蚀致使材料耐久性持续损伤,进而为谋求提高其长期工作性能,制定一种评估其服务寿命的方法,后者在传统的隧道结构设计中尚未做定量体现和反映。

(2)内、外部工作环境因素作用引起的隧道结构耐久性损伤主要有:①钢筋锈蚀,其有效截面积减小;②钢筋锈蚀,其设计强度持续降低;③混凝土截面积损伤而强度劣化、裂缝扩展和表面剥落;④混凝土与钢筋间的握裹作用(黏结力)持续降低,从而使管片衬砌的承载力(抗力)随时间变化而逐步降低,直至小于外界荷载与环境损伤的联合效应,最终使结构正常使用失效,直至其承载力完全丧失,而断裂破坏。

(3)如何定量描述荷载长期持续的不利作用,以及长期外部环境因素侵蚀对隧道衬砌结构耐久性的损伤(劣化)进程,即本文中笔者探讨的耐久性设计。

### 4.3 设计内容

设计内容主要有:①理论计算或对已有结构做验算;②构造措施(对一般混凝土结构,已有新规范可以参照,但对隧道管片衬砌,尚未见相关规定);③设计上对结构材料及其施工工艺的要求;④有条件时,可再辅以必要的试验和测试,即对理论计算所得的服务寿命再做必要的修正。

### 4.4 基于近似概率法的结构耐久性设计

在混凝土结构的耐久性设计中,其对承载力极限状态的功能要求可以表述为一种随机过程,而结构功能函数  $Z(t)$  的表达式则可写为

$$Z(t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 为混凝土结构抗力(强度)随服役时间而持续降低的随机过程变量; $S(t)$ 为混凝土结构在荷载作用与环境效应两者相互作用下产生的内力值;因相关统计参数值缺乏,且相对结构抗力  $R(t)$  而言其变化值一般不会太大,故其随时间的变化现暂改

用随机变量来表述。

本文中设定:结构刚建成投入运营时( $t=0$ ),其可靠度指标为 $\beta_0$ (定值);随后,因结构功能衰化而可靠度指标 $\beta(t)$ 亦将随时间变化而降低。这样,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)通用表达式,基于近似概率法其耐久性设计的极限状态方程可写为

$$\gamma_0 S \leq \eta R \quad (2)$$

式中: $\gamma_0$ 为结构安全等级分项系数; $\eta$ 为混凝土结构耐久性设计系数,即结构可靠度指标历时降低随机过程 $\beta(t)$ 的函数

$$\eta = f[\beta(t)] \quad (3)$$

对于大气环境下的混凝土结构,式(3)可表述为

$$\eta = \frac{\beta_0}{\beta_0 + \beta_t - \beta(t)} \quad (4)$$

式中: $\beta_0$ 为《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)规定的可靠度指标,可根据规范并按照结构的安全等级查得; $\beta_t$ 为耐久性设计中,在达到目标使用年限终了时按规范标准取所要求的可靠度指标的确定值,一般情况下取 $\beta_t = \beta_0$ ,或二值相近。由此可知, $\beta(t)$ 为由极限状态功能衰化随机过程表达式求得的结构可靠度指标的历时降低过程,为时间 $t$ 的函数;在考虑结构抗力和荷载与环境效应历时变化的基础上, $\beta(t)$ 按照现有可靠度指标计算方法求得。

由于受诸多因素的影响,结构内力 $S(t)$ 随时间的衰变过程可以采用多因素综合法或实测统计法确定。荷载随时间的变化过程对永久荷载可以按现行标准取值;而可变荷载则采取以现行规范标准乘以修正系数折减的方法得到。在目前统计样本数据十分匮乏的情况下,式(4)中的环境因素效应在本文中未予计入,待日后工作深化后再给予补充。

耐久性设计的计算内容有:①结构抗力随机过程 $R(t)$ 的统计特征、变化规律及其统计参数的计算;②结构荷载作用与环境效应所产生的结构内力随机变量 $S(t)$ 的统计特征及其统计参数的计算;③结构可靠度指标 $\beta(t)$ 随机过程的计算。

#### 4.5 崇明长江隧道管片衬砌结构耐久性设计计算

基本参数:衬砌厚 $\delta=65$  cm;C50 钢筋混凝土;截面为对称配筋,每侧配筋为 $10\Phi 22$ ;按平面应变问题计算,其设计控制截面的最大轴力 $N=4\,506$  kN,呈小偏心受压状态,其截面偏心距 $e=6.8$  cm。

结构建成初期,设计控制截面的可靠度指标 $\beta_0$ 根据规范取3.87。根据建设单位要求,结构达到设计使用年限终了时的可靠度指标取确定不变值 $\beta_t =$

3.7(按规范标准取值),与上述 $\beta_0$ 的值接近。

荷载与环境效应的统计特征:从有限元分析取均值 $N=4\,506$  kN;其变异系数,按几种不同方法计算后取其平均值 $\delta_N=0.438$ ,再经程序计算得 $\beta_{100}=2.885$ 。则由式(4)可得

$$\eta = 0.826 < 1.0$$

而式(2)中, $S \leq 0.826R$ ,且结构设计内力 $S$ 和材料抗力(设计强度) $R$ 均暂取其均值计算(表2);而结构安全等级分项系数暂取 $\gamma_0 \approx 1$ 。

从上述的简化计算可知:①与常规荷载作用下的极限状态设计表达式相比,只是在式(2)中右端抗力项 $R$ 的一侧,要乘以小于1的耐久性设计系数 $\eta$ 。这样是为了结构耐久性需要,人为地提高结构设计的安全等级,从而改善结构设计中应予考虑计入的耐久性能;②由于环境损伤对耐久性的影响因素复杂多变,而隧道各有关统计参数又十分匮乏,由以上计算可知,在结构抗力和荷载,特别是环境腐蚀影响效应处理方面的近似性都很大,本文中的方法还亟待进一步深化和完善。

#### 4.6 按正常使用年限考虑的结构耐久性设计

在要求结构达到设计使用年限终了时仍需保持安全、适用的状态,新规范中规定,应仍不致对结构的承载能力产生过多的损害——正常使用极限状态可表述为材料仅轻微劣化。此时,在据此进行的耐久性设计中要求:①钢筋只发生适量锈蚀(钢筋截面锈蚀深度达到0.1 mm,而远未锈烂到完全丧失其结构承载力);②混凝土只表面轻微损伤(剥落)并只有少量细微裂缝;③混凝土构件开始出现因钢筋锈蚀引起的顺筋裂缝;④状态③应能满足结构的可修复性要求。其中,隧道管片衬砌设计时对变形刚度的限制条件为:水平直径 $D$ 处的相对位移 $\delta \leq 4\% D$ ;管片接头张开度 $\theta \leq 4$  mm。对管片混凝土的限裂条件为:缝宽小于或等于0.2 mm;裂缝数小于或等于5条 $\cdot \text{m}^{-1}$ 。

#### 4.7 隧道结构耐久性设计的构造和材料措施

隧道结构耐久性设计的构造和材料措施现有研究相对比较丰硕,但针对隧道管片衬砌的有关内容却仍然很少。借鉴相关文献的成果,笔者认为,隧道衬砌结构耐久性设计的构造措施主要应包括:①设法隔绝或减轻有毒害地下水、气等带腐蚀性物质的入侵,如设置各种可靠的防水层和表面涂层等;②管片混凝土保护层要求有足够的厚度;③在氯离子污染环境,混凝土保护层的裂缝成为氯离子较快入渗混凝土的通道,应该严格控制裂缝宽度及其扩展;

④混凝土结构的形式应便于对其关键部位进行检测和维修,对处于腐蚀较严重部位的构件,应考虑便于更换的可能性,或采取涂敷防腐剂等附加措施,如混凝土表面涂层、混凝土表面硅烷浸渍等加以保护,或在混凝土中掺加一定量的阻锈剂或局部要害处采用环氧涂层钢筋。每种防腐附加措施均要满足相关标准和施工工艺要求。此外,隧道结构耐久性设计有关质量控制方面的内容还应包括施工要求:采用高性能混凝土,具备抗裂、防渗措施和其他的附加防护设施等;对其运营要求则需定期做隧道结构耐久性监测,即材料性能监测、结构裂缝和渗水状况监测等,以及各项维护要求。

上海市某轨道交通管片生产厂对钢筋混凝土预制管片的耐腐要求规定,混凝土的主要成分:C55 水泥,粉煤灰(替代 20%水泥),高效减水外加剂,拌制高性能混凝土;抗渗标号达到 1.0 MPa。钢模浇筑 3 次抹面,蒸气养护脱模后水养 7 d,再在堆场内自然养生 21 d 后出场。关于提高隧道管片衬砌结构耐久性的若干工程措施,从谋求综合防治方面看,可以归结如下。

(1)只按防水规范单一依靠提高混凝土的抗渗指标和加厚混凝土保护层是不够的,即使 S12 级,其渗透系数约为  $10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,仍非完全水密。

(2)综合防治的设计思想为:①设法延长钢筋混凝土起裂和钢筋起锈的时间,加做结构限裂与裂控设计;②设法降低混凝土劣化阶段的发展速率;③对隧道管片的耐久性做定期检测(检漏、保证混凝土较小的渗透系数和降低  $\text{Cl}^-$  和  $\text{O}^{2-}$  扩散系数,提高混凝土的抗冻标号和耐冻融循环次数等);④进行全寿命经济分析,使经优选后的总费用为最佳的设计方案费用,即除初期投资外,要另含维修、加固、检测费用,尽量减少后期投资,使长期效益最大化;⑤制定本地区耐久性设计规程;⑥加强行业自律与技术管理等。

(3)在提高混凝土管片材料的耐久性方面,应采取的对策措施有:①采用粉煤灰、矿渣、硅粉做水泥混合料或复掺外加剂,以有效减少混凝土早期干缩及因表面碳化收缩而开裂的情况,提高抗  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的渗透能力;②在国外,管片混凝土内采用了高熔点钢纤维和低熔点聚丙烯纤维的复合纤维掺加剂,以改善高性能混凝土的抗突发爆裂性,如英法海峡隧道延伸段一期及近年来其他欧洲大陆许多地铁与越江隧道还采用了复合纤维管片以替代部分钢筋,并节约水泥约 15%;③提高混凝土抗渗性能指

标;④增加混凝土密实度,改进级配(非碱活性骨料)、降低水胶比(小于 0.35)、优选水泥品种、减少水泥用量(小于 130 kg)、选用含少量侵蚀性离子的拌和水,掺入硅粉(约为 10%水泥量),可降低混凝土渗透系数 1 个量级,并能将混凝土中氧的扩散率降低 4 倍,添加活性粉料(高炉矿渣微粉与优质粉煤灰双掺)、混凝土中掺加阻锈剂,蒸气养护与水养护时做到正确温控;⑤管片外侧涂刷保护膜(对氯盐环境的屏障层而言)做硅烷溶液防水处理,施做焦油氯磺化聚乙烯与焦油酸性环氧复合型涂料,可降低混凝土渗透系数 2 个量级,降低氧和氯扩散率从而延缓钢筋脱钝使其锈蚀率降低并延缓混凝土碳化。钢筋保护膜可选用:环氧沥青类、水泥基渗透结晶类(无机涂料),对管片施做绝缘保护以防电化作用而锈蚀钢筋;⑥适当增厚钢筋保护层等。

英国 BS8110 标准则规定:①衬砌混凝土保护层厚度较建筑结构规范再提高 10~20 mm,管片外侧为 40 mm,内侧为 30 mm,以防止混凝土碳化而锈蚀钢筋;②对钢筋面层做直接保护,先喷砂除锈去污后,钢筋笼做热浸锌处理或高压静电喷涂环氧处理,以防钢筋锈蚀而与混凝土间的握裹力下降;③改进管片生产工艺和质量管理,如真空吸盘脱模工艺和钢筋笼  $\text{CO}_2$  保护焊接技术等;④有条件时,要定期清洗运营中管片内表面的盐类沉淀物;⑤防止电气化地铁中杂散电流对钢筋的电腐蚀,提高钢筋与轨枕间的绝缘质量,保持轨枕清洁和干燥。

## 5 崇明长江隧道结构服务寿命预测

### 5.1 管片衬砌结构的耐久性设计

管片衬砌结构的耐久性设计结果见表 2。

表 2 隧道结构耐久性设计结果

Tab. 2 Results of Durability Design of Tunnel Structures

计算项目		计算结果
结构最小抗力 $R$ (极限承载力)/kN		6 850
荷载和环境效应引起 的结构内力 $S$ /kN	截面大偏心情况下	3 329
	截面小偏心情况下	4 506
耐久性设计系数 $\eta$		0.826

根据表 2 中数据验算  $S$  是否小于等于  $\eta R$ 。此时  $S$ 、 $R$  暂取随机变量(随机过程的均值),由于 3 329、4 506 均小于  $0.826 \times 6\,850 = 5\,658$ ,因此满足设计要求。

### 5.2 管片结构服务寿命的理论预测

管片结构服务寿命的理论预测见表 3。

表 3 隧道服务寿命的理论预测

计算项目		计算结果
钢筋无锈 工作年限 $t_i$ /年	①混凝土碳化腐蚀 $t_{F-tanhua}$ (按 Fick 第一定律求得)	74
	②钢筋氯离子侵蚀 $t_{F-Cl^-}$ (按 Fick 第二定律求得)	58
	③取①、②年限中的小者	58
钢筋起锈到混凝土表面起裂的年限 $t_{cr}$ /年		52
混凝土表面起裂到缝宽达限值的年限 $t_{cra}$ /年		26
按衬砌裂缝控制的服务寿命 ( $T_1 = t_{F-Cl^-} + t_{cr} + t_{cra}$ )/年		$58+52+26=136>100$
钢筋无锈工作年限 $t_i$ /年		58
钢筋起锈到结构承载力完全丧失的年限 $t$ /年		121
按衬砌极限承载力控制的服务寿命 ( $T_2 = t_i + t$ )/年		$58+121=179>100$

注:所有公式及其符号说明参见文献[10]、[12]、[13];计算得出的  $T_1=136$  年可作为按第 4.6 节所述根据项目适用性和安全性准则进行耐久性设计时的理论预测值。

5.3 室内模型试验与检测

本文中的试验研究采用了钢筋经电化学快速锈蚀然后按照国外经验沿用其较自然环境侵蚀作用下的“加速倍率”法做近似换算,得出的自然环境腐蚀条件下钢筋实际锈蚀时间的试验测定方法,作为对上项服务寿命理论计算预测值的修正,最后可求得隧道管片衬砌结构按承载力完全丧失条件经试验修正后预测得的服务寿命,从而检验是否满足设计基准期(100 年)的要求。如果按比较严格的、限于满足结构正常使用期适用性与安全性的设计准则,则其服务寿命要短许多,但用本文所述的原理和方法,也同样是是可以计算预测的,表 3 中的  $T_1=136$  年,可作为改按管片衬砌裂缝控制条件的服务寿命理论预测值。该试验研究工作正在进行中,其阶段性成果因尚不够完整,本文中未列出。

5.4 模型试件服务寿命的试验预测

5.4.1 室内试验的基本构思

结构服务寿命定量预测值的分析和试验过程的具体步骤如下。

步骤 1:从理论分析计算,先预测得理论计算的结构服务寿命(表 3);室内模型试验,模拟与实际结构同样受力性态的小尺寸试件。

步骤 2:通电。使试件内钢筋快速锈蚀,测出其锈蚀速率(分时刻称质量)和达到试件完全丧失承载力的天数。

步骤 3:求加速倍率

$$K=\frac{v_q}{v_n}$$

式中: $v_q$  为试件钢筋快速锈蚀的平均速率; $v_n$  为海洋环境条件下试件钢筋的自然锈蚀速率。

步骤 4:求试件自然锈蚀的服务寿命

$$a_n=K\frac{t_c}{365}$$

式中: $t_c$  为试件快速丧失承载力的时间。

步骤 5:经试验得到对试件理论预测寿命的修正系数

$$K_{modi}=\frac{a_n}{a_p}$$

式中: $a_p$  为试件理论预测的服务寿命。

步骤 6:步骤 5 中设定结构与试件具有惟一的相似性,则可得结构经试验修正后的服务寿命

$$a_m=K_{modi}a_p$$

5.4.2 钢筋锈蚀效应对偏心短柱承载力的影响

按钢筋预测锈蚀率和实际锈蚀率,偏心短柱的理论承载力(按第 4.4 节中耐久性设计方法计算)与试验承载力的对比见表 4。

表 4 各偏心短柱试件的理论承载力与实测锈蚀率

Tab. 4 Corrosion Ratios by Lab Test and Theoretical Bearing Capacities of Eccentric Short Column Specimens

试件编号	CZ00	CZ10	CZ20	CZ30	CZ40	CZ50
锈蚀时间/h		240	480	720	960	1 200
锈蚀电流/A		1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
预测锈蚀率/%		7.02	13.78	20.28	26.53	32.52
实测锈蚀率/%		6.48	11.37	16.45	22.38	27.54
理论承载力/kN	266.84	252.02	239.85	228.75	214.59	202.07
实测承载力/kN	520.40	497.44	496.07	485.26	465.37	454.92

对于服务寿命很长的高性能混凝土,如采用实物在自然环境腐蚀(损伤)作用下研究其耐久性年限,则几乎需要几代人的跟踪试验和持续不断地观察才能得出真实有效的结果,这不仅耗费巨大的人力物力,而且失去了对目前工程建设给予指导和建议的可行性。本文中采用试件钢筋通电锈蚀加速试验的结果进行对自然环境腐蚀实际条件的换算,以预测钢筋混凝土构件长期使用的服务寿命,这是一个难度很大的工作。这种方法可靠性的关键在于如何合理建立试件钢筋短期加速锈蚀试验与自然环境条件腐蚀间二者结果的相关关系,以达到推定结构长期服务寿命的目的,在目前的可能条件下应认为是比较可行的。

对于混凝土结构中的钢筋锈蚀,通过室内电化学加速锈蚀虽然能够实现在短时间内达到钢筋深度



腐蚀以至试件丧失承载能力的目的;但从钢筋电化学加速试验结果来看,电化学加速锈蚀试验与自然环境条件下的钢筋腐蚀并不完全等同,二者在钢筋锈蚀的内、外部环境和锈蚀速度及其表现形式等客观条件上都存在着差异。对于钢筋室内快速锈蚀与其自然锈蚀之间的相关关系,目前仅能局限于通过室内快速锈蚀速度与自然锈蚀平均速度二者的比值(加速倍率)来描述,显然,这种简单的线性倍率关系具有一定的不合理性。因此,要做到混凝土结构服务寿命的准确预测,还需从试验方法、试验模型及试验设备和仪器等方面研究钢筋短期加速锈蚀与自然环境锈蚀间的相关关系与演变规律,以及钢筋锈蚀引起混凝土结构承载力随工作环境及时间变化对耐久性产生的损伤机理,这对于完善和发展现有混凝土结构寿命预测的理论及其相应的耐久性设计方法都具有重要的科学意义和实用价值。

5.5 模型试件试验分析

模型试件试验分析见表 5,所采用的公式见第 5.4 节。

表 5 模型试件试验分析结果

Tab. 5 Experimental Analysis Results of Model Specimens

计算或试验项目		计算或试验结果
试件钢筋无锈工作年限(试件第 1 工作阶段) $T_{\text{model-1}}/\text{年}$		45.2
试件相 关系数	氯离子在混凝土内的扩散系数 $C_{\text{Cl}^-}$ (可暂按 90 d 保守估计)/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$7.35 \times 10^{-12}$
	沿试件表面的氯离子浓度 $C_s$	0.30~0.44 (对不同试件)
由试验计算试件钢筋起锈到承载力完全丧失的 年限(试件第 2 工作阶段) $T_{\text{model-2}}/\text{年}$		
试件钢筋快速锈蚀平均速率 $V_1/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$		1 000
自然环境下试件钢筋自然锈蚀速率 $V_2/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$		根据国外 资料暂取 4
钢筋锈蚀速率换算时的加速倍率 $K=V_1/V_2$		250
试件第 2 工作阶段,钢筋快速锈蚀所用时间(由 室内试验测得) $T_{\text{model-2-ele}}/\text{d}$		45.96
试件内钢筋的自然锈蚀时间( $T_{\text{model-2-nature}} =$ $K T_{\text{model-2-ele}})/\text{年}$		$250 \times 45.96 /$ $365 = 31.48$
试件第 2 工作阶段的理论服务寿命(同表 3,同样 做理论计算得出) $T_{\text{model-2-theory}}/\text{年}$		28.74
试验修正系数(一般均大于 1.0) $K_{\text{modi}} =$ $T_{\text{model-2-nature}} / T_{\text{model-2-theory}}$		$\frac{31.48}{28.74} = 1.095$

5.6 经试验修正后的结构服务寿命

经试验修正后的结构服务寿命见表 6。

6 结 语

(1)近年来,工程结构物的耐久性问题已日益引

表 6 修正模型试件试验分析结果

Tab. 6 Experiment Analysis Results of Modified  
Model Specimens

计算或试验项目	计算或试验结果
衬砌在自然腐蚀条件下,第 2 阶段的服务寿命 ( $T_{\text{lining-2-nature}} = K_{\text{modi}} T_{\text{lining-2-theory}} = T_2)/\text{年}$	$1.095 \times 121 =$ 132.5
经试验修正后,衬砌结构按丧失承载力要求、总 的预测服务寿命( $T = t_i + T_2)/\text{年}$	$58 + 132.5 =$ 190.5 大于 100

起业界人士的普遍关注,并成为各类重大工程建设项目论证和结构设计中不可或缺的一项主要内容。在中国跨越江海的特大型水下隧道工程已有多座正在兴工修建,由于它的投资浩大及不可修复性,对其耐久性和服务寿命的定量预测就更显迫切而需要。本文中笔者对崇明长江隧道结构耐久性设计问题的一些主要方面进行了研讨,并得出了其服务寿命能达到 100 年设计基准期的基本要求;这方面的试验工作尚在进行中,因而它只是阶段性的初步成果。

由于环境侵蚀作用引起材料和结构耐久性的持续损伤具有很多、也很分散的随机性因素,建议采用概率极限状态(分别按安全、适用性丧失和承载力丧失的 2 种极限条件)的耐久性设计方法是比较可取和合理的。这方面当前研究工作上的困难在于:环境作用(含腐蚀性大气、地下水 and 岩土体介质)对结构腐蚀效应的试件样本取之不易,且测试更加费时,导致第一手的相关资料极度匮乏,并使之按随机过程(随机变量)为基础的结构抗力(内力)的统计取值难以获得。此外,在对结构服务寿命的理论预测值做试验修正时,由于材料和结构性能的劣化是一种呈非线性变加速度历时衰减的长期过程而难于进行,因此本文中采用的以钢筋电化学快速锈蚀试验做换算,则只是一种不得已的近似构思,其与自然环境条件下的腐蚀作用之间的定量关系,采用加速倍率法则换算只是国外从少数统计样本所得的实测参变量,故有相当的局限性和任意性。再则,混凝土结构早期裂纹(初始损伤)对后续耐久性损伤累积与演变的影响也尚未涉及。因此,笔者认为,在中国对结构材料(但往往未考虑施加于所研究材料的各种受力性态和材料受力前已有的初始裂纹和变形)已有相对丰硕成果的基础上,今后如何讨论其具体受力结构的耐久性问题研究,将是一项长期并亟待深化的课题。

参考文献:

References:

[1] 王启耀,赵均海.地铁区间隧道衬砌结构耐久性研究



- [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(增1): 726-729.
- WANG Qi-yao, ZHAO Jun-hai. Research on Durability Design of Subway Tunnel Lining Structures[J]. Journal of Building Structure, 2006, 27(S1): 726-729.
- [2] 黄 慷. 水底盾构隧道结构的耐久性 & 可靠度设计的理论与方法[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- HUANG Kang. Theory and Practice of Durability and Reliability Analysis for Structural Design of Subaqueous Shield Tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [3] 朱 江, 许清风, 王孔藩. 提高混凝土结构耐久性的设计建议[J]. 上海建设科技, 2006, 27(6): 15-17.
- ZHU Jiang, XU Qing-feng, WANG Kong-fan. Design Suggestions on Increasing the Durability of Concrete Structure[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2006, 27(6): 15-17.
- [4] EDVARDSEN C K, KIM Y J, DARK S J, et al. Busan-geoje Fixed Link Concrete Durability Design for the Bridges and Tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(3): 432.
- [5] 张 颖, 张庆贺, 韩伟勇. 影响隧道衬砌管片耐久性的原因及解决方法研究[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(增1): 101-105.
- ZHANG Ying, ZHANG Qing-he, HAN Wei-yong. Research on the Factors Influencing the Durability of Tunnel Segment Lining Structure and Its Solutions[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(S1): 101-105.
- [6] 孙富学, 张 莉. 基于近似概率的衬砌结构耐久性设计研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(4): 46-49.
- SUN Fu-xue, ZHANG Li. Study on Durability Design Based on Approximate Probability of Tunnel Linings[J]. Journal Railway Science and Engineering, 2006, 3(4): 46-49.
- [7] 梁本亮, 孙富学. 基于粒子群演化算法的混凝土碳化预测[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(增1): 723-725.
- LIANG Ben-liang, SUN Fu-xue. Prediction of Concrete Materials Based on PSO Algorithm[J]. Journal of Building Structure, 2006, 27(S1): 723-725.
- [8] 孙富学, 梁本亮. 隧道衬砌结构耐久性寿命影响因素敏感性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 214-216.
- SUN Fu-xue, LIANG Ben-liang. Sensitivity Analysis of Influence Factors in Predicting the Service Life of Tunnel Linings[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 214-216.
- [9] 孙富学, 荣 耀. 隧道衬砌耐久性寿命预测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 358-360.
- SUN Fu-xue, RONG Yao. Study on Tunnel Lining Service Life Prediction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 358-360.
- [10] 孙富学. 海底隧道衬砌结构寿命预测理论与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- SUN Fu-xue. Theoretical and Experimental Studies on Predicting the Service Life of Subsea Tunnel Lining Structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [11] 孙 钧. 地铁与江底隧道管片衬砌结构耐久性设计的若干问题[R]. 上海: 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 2007.
- SUN Jun. Durability Design Problems of Subway and Sub-river Tunnel Segment Lining Structures [R]. Shanghai: Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, 2007.
- [12] CHANG P K, PENG Y N, HWANG C L. A Design Consideration for Durability of High-performance Concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(4): 375-380.
- [13] SUN Jun. Study on Durability/Service-life Prediction for Subsea Tunnels—a Research Project for Xiang'an Subsea Tunnel in Xiamen, China[C]//YUAN Yong. Proceeding of the 1st International Workshop on Service Life Design for Underground Structures. Shanghai: Tongji University Press, 2006.
- [14] YUAN Yong, JOOST W, GUANG Y. Serviceability of Underground Structures[C]//YUAN Yong. Proceeding of the 1st International. Workshop on Service Life Design for Underground Structures. Shanghai: Tongji University Press, 2006.
- [15] THOMAS M D A, BENTZ E C. Life-365: Computer Program for Predicting the Service Life and Life-cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides [M]. St. Paul: Cortec Corporation, 2001.