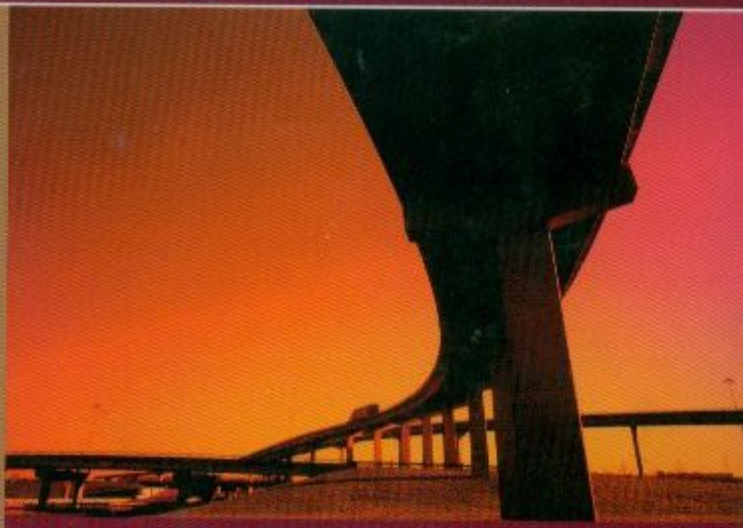
YANHAIDIQUHUNNINGTUJIEGOU
NAIJIUXINGJIQISHEJIFANGFA

邢 锋 明海燕 主 编
曹征良 邹离湘 副主编

沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法



人民交通出版社

需要全本请访

沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法

邢　锋　　明海燕　　主　编
曹征良　　邹离湘　　副主编

人民交通出版社

内 容 提 要

2004年沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法科技论坛和全国第六届混凝土耐久性学术交流会，由中国工程院土木、水利与建筑工程学部、中国土木工程学会混凝土耐久性专业委员会和深圳大学共同主办，在深圳大学召开，会后精选主题特邀报告和部分论文，汇编成本书，主要目的是供业内同行参考，以推动混凝土结构耐久性设计水平的提高。。

图书在版编目（CIP）数据

沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法/邢锋，明海燕主编. —北京：人民交通出版社，2004.10
ISBN 7-114-05299-5

Ⅰ.沿… Ⅱ.①邢…②明… Ⅲ.①混凝土结构－耐用性－文集②混凝土结构－结构设计－文集
Ⅳ.TU37-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第104020号

书　　名：沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法
主　　编：邢　锋　明海燕
副 主 编：曹征良　邹离湘
责任编辑：陈志敏
出版发行：人民交通出版社
地　　址：(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网　　址：http://www.ccpress.com.cn
销售电话：(010)85285838,85285995
总 经 销：北京中交盛世书刊有限公司
经　　销：各地新华书店
印　　刷：北京鑫正大印刷有限公司
开　　本：787×1092　1/16
印　　张：36.75
字　　数：920千
版　　次：2004年10月第1版
印　　次：2004年10月第1版　第1次印刷
书　　号：ISBN 7-114-05299-5
印　　数：0001－1000册
定　　价：65.00元
（如有印刷、装订质量问题，由本社负责调换）

沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法科技论坛与全国第六届混凝土耐久性学术交流会论文集

（2004年5月28日至30日　中国　深圳）

主办单位：中国工程院土木、水利与建筑工程学部
中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会混凝土耐久性专业委员会
深圳大学

承办单位：深圳市土木工程耐久性重点实验室（深圳大学）

学术委员会

主　任：赵国藩

副主任：凤懋润　金德钧　刘西拉

委　员：（按姓名拼音字母顺序）

巴恒静　陈蔚凡　陈肇元　邸小坛　范立础　方　璟　冯乃谦　傅　智
韩宁旭　洪定海　洪乃丰　黄士元　李金玉　李荣强　李宗津　梁坚凝
林宝玉　刘建航　马孝轩　牛荻涛　潘德强　钱稼茹　覃维祖　茹继平
施仲衡　孙　伟　王培铭　文梓云　吴智深　谢永江　邢　锋　徐　强
徐有邻　阎培瑜　吴科如　徐培福　姚　燕　张仁瑜　赵铁军

组织委员会

主　任：陈肇元

秘书长：邢　锋

委　员：曹征良　陈改新　丁小波　李金玉　明海燕　邹离湘

前　言

由于历史原因，我国工程结构设计在安全性和耐久性上的设置水准一直偏低。鉴于这一问题对当前大规模基础设施工程建设可能产生的严重后果，中国工程院土木、水利与建筑工程学部先后在2001年和2002年两次发起主持了工程科技论坛进行研讨。为进一步推进这项活动，由中国工程院土木、水利与建筑工程学部、中国土木工程学会混凝土耐久性专业委员会和深圳大学一起商定，共同主办“沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法科技论坛”，作为前两次工程科技论坛的延续，并与中国土木工程学会混凝土耐久性专业委员会的“全国第六届混凝土耐久性学术交流会”同时举行，会议由设置在深圳大学内的深圳市土木工程耐久性重点实验室承办，并于2004年5月28日至30日在深圳成功召开。

本次会议共有250多名来自国内高校、科研院所和设计、施工及生产企业单位的代表参加，多名来自美国、德国、瑞典、荷兰的专家学者也参加了会议。会议共收到论文103篇，为了扩大交流，决定选取其中的主题特邀报告和部分论文，汇编为《沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法》论文集。

由于时间仓促，书中难免会有错误和不当之处，敬请读者批评指正。

感谢人民交通出版社为本书的出版提供帮助。

编　者

2004年6月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第 1 部分　主题和特邀报告

水底盾构法公路隧道耐久性设计…… 乔宗昭　朱祖熹　范益群　陆　明(3)
东海大桥结构混凝土耐久性策略及混凝土 Cl^- 渗透数学模型的建立
…… 徐　强　俞海勇　王　琼(17)
以性能和可靠度理论为基础的钢筋混凝土基础设施使用寿命设计及其原理和应用
…… 韩宁旭(24)
中东地区钢筋混凝土的电化学修补原理及应用
…… N. Davison　G. Glass　D. Aldridge　A.C. Roberts(34)
我国工程结构耐久性问题面临的处境和难点 …… 刘西拉(41)
我国氯盐腐蚀环境与混凝土结构的耐久性 …… 洪乃丰(50)
青藏铁路高性能混凝土的配制技术及其耐久性
…… 谢永江　仲新华　朱长华　张　勇　杨富民(56)
氯离子在混凝土中的输运——测试、模拟及应用…… 唐路平(62)
混凝土耐久性研究和应用的新进展 …… 李金玉(71)
混凝土结构在冻融等特殊环境作用下的寿命预测 …… 许学锦　M.J.赛策(75)

第 2 部分　结构与材料的耐久性研究

低质粉煤灰混凝土耐久性试验研究 …… 蒋林华　刘振清　叶义群(87)
混凝土成熟度的研究与应用 …… 张万庆　郑石林　朱　红(92)
中等强度等级混凝土高性能化的研究 …… 王　玲　姚　燕　高春勇　贾祥道　阎锐晋(97)
煅烧活化煤矸石火山灰活性对水泥基材料的影响…… 冯　奇　王培铭(104)
高贝利特水泥及混凝土耐久性的研究…… 隋同波　王　晶　文寨军　范　磊　张忠伦(113)
硫铝酸盐水泥耐腐蚀性能探讨…… 齐冬有　嵇　琳　赵海洋　韩桂华　何　丹(120)
三峡工程混凝土骨料碱活性检验研究…… 王秀军(124)
风压加速混凝土碳化试验研究…… 屈文俊　郭　猛(134)
矿物掺合料对混凝土抗压强度和氯离子渗透性能的影响
…… 刘建忠　刘加平　邓　敏　缪昌文　顾国庆(140)
浸泡方式对混凝土腐蚀性的研究…… 肖海英　葛　勇　张宝生　袁　杰　季洪雷(147)

养护方式对混凝土抗氯离子渗透性能的影响…… 邹离湘 邢 锋 谭传利(152)
混凝土冻融破坏面研究…… 唐光普 刘西拉(156)
冻融条件下混凝土破坏的无损判断…… 罗 昕 朱锦章 卫 军 罗晓辉(164)
混凝土早期约束变形裂缝的探讨与分析…… 侯景鹏 袁 勇(169)
混凝土氯离子渗透扩散性试验方法的评价研究
…… 蒋林华 Zhang M.H. Malhotra V.M.(177)
含氯环境下混凝土中钢筋腐蚀速度模型研究…… 宋晓冰 刘西拉(182)
聚丙烯纤维高性能混凝土的抗裂性能研究及应用
…… 陈爱芝 黄 辉 周明臣 熊建波 王胜年 黄明东(194)
大体积粉煤灰混凝土水闸墙的配合比设计和温度控制
…… 杨思光 周淑春 吴晓锁 柏培峰 刘 伟(199)
近海地区"双掺"高性能混凝土桥的耐久性研究
…… 吴晓锁 平树江 蔡长松 周淑春 朱方之 朱晓文(206)
酸雨对水泥混凝土强度影响的模拟及其腐蚀的化学机理分析
…… 张 倩 赵 洁 成 华(215)
补偿收缩混凝土提高沿海地区建筑耐久性的研究与应用
…… 游宝坤 黄春江 董同刚 柯穗城(220)
采用不同防腐措施的海工钢筋混凝土长期暴露试验研究…… 林宝玉 蔡跃波(230)
亚硝酸盐在含氯盐钢筋混凝土中阻锈作用的研究…… 柳俊哲 单 炜(239)
湛江港铁矿石码头混凝土结构防腐蚀措施探讨
…… 黄君哲 张宝兰 曾志文 廖荣国 岑文杰 陈华新 何华平(248)
高性能混凝土在盐田港三期工程中的应用…… 熊建波 黄明东 陈爱芝(253)
海水对钢筋混凝土采油平台的腐蚀研究与评估…… 冯士明(261)
干湿循环条件下混凝土的氯离子渗透及钢筋锈蚀…… 赵铁军 高 倩(268)

第 3 部分 结构检测评估鉴定与耐久性设计

混凝土结构耐久性设计方法综述…… 屈文俊 张 翔(279)
国内外混凝土表面层渗透性现场测试技术现状:综述 …… 朋改非 刘叶锋 郝挺宇(287)
基于抗震承载力和改进能力谱法的钢筋混凝土结构耐久性设计…… 侯 爽 欧进萍(297)
基于 Bayes 方法的钢筋混凝土结构时变可靠性研究 …… 刘西拉 王 剑(306)
盐冻、钢锈与弯曲应力协同作用下钢筋混凝土耐久性评估方法
…… 黄鹏飞 姚 燕 包亦望 赵顺增 王 玲 刘 立 吴 勇 曹淑萍(315)
锈损钢筋混凝土结构耐久性修复材料试验研究…… 郭小华 惠云玲 郝挺宇(321)
钢筋锈蚀混凝土梁正截面承载力计算方法探讨…… 刘兴远 林文修 易 珂(331)
在役结构的可靠性分析、剩余寿命的预测 …… 孙文静 李永和(339)
建筑结构损伤的改进模态参数估计法…… 唐 坤 刘保东(348)
钢筋混凝土桥梁耐久性问题及对策研究…… 孙家瑛 黄成华(355)
基于动态可靠度的服役桥梁维修加固风险决策…… 黄承逵 孙晓燕 赵国藩 于 健(361)
澄海市外砂桥闸重建工程的耐久性措施
…… 莫海鸿 梁 松 杨医博 陈尤雯 茹建辉 何承伟(369)

火灾对于沿海地区混凝土结构耐久性的影响…… 金伟良 张 奕(375)
海港工程混凝土耐久性设计与寿命预测…… 王胜年 黄君哲 潘德强(381)
海港高桩码头破坏状况及耐久性对策与建议
…… 方 璟 张燕迟 朱雅仙 潘德强 王胜年(387)
连云港苏港商厦地下室混凝土结构耐久性设计…… 黄 杰 程积昕 吴 瑾(401)
水闸建筑物老化的多层次模糊综合评判…… 王珊红 李永和(408)
地震强度对 Upper San Fernando 土坝流动变形的影响 …… 明海燕 李葙嵚(417)

第 4 部分 结构修复补强

偶联剂能显著改善新老混凝土修补界面层的性能吗?
…… 熊光晶 李毅强 邬 翔 罗白云 李庚英(429)
环氧树脂混凝土粘钢板加固组合梁力学特性研究
…… 吕恒林 周淑春 秦海兰 柏培峰 刘 伟(435)
锈损钢筋混凝土结构阻锈试验研究…… 惠云玲 郭小华 郝挺宇 周神为(445)
纤维复合材料加固混凝土的若干重要问题…… 熊光晶 傅剑波 马晓升(453)
GFRP 加固的钢筋混凝土梁梁端锚固试验研究 …… 王文炜 叶见曙(458)
混凝土桥梁的病害分析与碳纤维补强加固技术…… 蒋雪梅 雷俊卿(465)
电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的试验研究…… 蒋正武 孙振平 王培铭 林宝玉(473)
既有海工混凝土结构耐久性问题及维修加固对策…… 陈奋健(480)
适用于水工混凝土结构的高性能修补材料的研究…… 张静宜 吕子义 黄淑贞(487)
东港市黄旗闸淡、海水交汇处闸墩混凝土破损冬季快速修复
…… 吴丽华 赵海南 孙 峰 孙永春(492)

第 5 部分 其 他

提高渠系混凝土抗硫酸盐侵蚀的措施…… 纪国晋 陈改新 鲁一晖 田军涛(499)
关于建立我国水工混凝土耐久性研究创新体系的探讨…… 雷爱中 李金玉 陈改新(503)
《混凝土结构耐久性修复与防护技术规程》简介…… 郝挺宇 惠云玲 岳清瑞(511)
结构混凝土抗冻性能设计方法…… 邸小坛 陶 里 周 燕(515)
某浴室钢筋混凝土梁板的喷射混凝土加固…… 孙跃东(518)
混凝土结构中 FRP 筋的耐久性研究 …… 张新越 欧进萍(522)
阻锈剂及硅粉、阻锈剂联合应用对防钢筋锈蚀效果的研究
…… 祝烨然 李克亮 王 冬 卢安琪 王昌义(529)
耐腐蚀混凝土外加剂…… 李固华 杨彦克 李晓和(537)
硅烷对海工高性能混凝土防腐蚀性能的影响研究…… 蒋正武 孙振平 张 欣(543)
在海洋工程中大力推广应用高性能混凝土…… 李积平(553)
海洋混凝土结构的劣化防止措施及混凝土的高性能化…… 张 勇 张 虎(557)
严寒地区热电厂冷却塔混凝土破坏状况调查与原因分析…… 葛 勇 葛兆明(563)
青岛市混凝土结构破坏原因与防护技术…… 范 宏 赵铁军(569)

第1部分

主题和特邀报告

水底盾构法公路隧道耐久性设计

乔宗昭　朱祖熹　范益群　陆　明

（上海市隧道工程轨道交通设计研究院，上海　200070）

摘　要　本文首先通过对水底隧道工程所在地的环境条件分析，提出本工程耐久性设计的总体要求、设计构思及具体设计要求；而后参考国内外相关规范及工程实例，提出本工程项目的耐久性设计方案，包括材料的设计、施工要求、不良环境下的特殊措施等；接着，以基于劣化模型的设计方法，计算混凝土结构的使用寿命，并调整耐久性设计方案，从而确保设计方案满足100年的使用寿命要求。除此以外，还考虑了接缝密封材料、金属构件等的耐久性设计；最后，给出了耐久性设计方案的风险水平方案。

关键词　盾构法隧道　结构耐久性设计　基于性能的可靠度计算　结构使用寿命预测　混凝土结构侵蚀　弹性密封垫老化　金属构件锈蚀　风险水平评估

1　概述

本文以即将兴建的长江口越江隧道为例。该隧道为采用盾构法施工的双向六车道特长、大直径隧道，全长8945m，隧道外径15.0m，内径13.7m，设计时速为80km/h。由于该工程距离长江入海口较近，受水流、潮汐、波浪和季风影响较大，建设条件较为恶劣，然而隧道设计使用年限要求达到100年，因此在水底（尤其是在长江口）修建盾构法公路隧道，其结构耐久性是隧道设计、建设和管理中的重要内容。

对隧道工程的耐久性有影响的外界环境因素主要包括：自然环境条件、江水的腐蚀性及隧道各结构部分所处位置的特点等。由于该隧道结构的出现和存在，原来的（没有建造结构前）总体气候环境就受到了这些结构的影响而形成了微气候。各个结构部件材料的退化机理又和这种微气候有关。结构的整体耐久性设计必须考虑这些影响因素。日益严重的酸雨和风携带的各种污染物质，如氯离子、硫酸盐等，会粘附于暴露在大气中的构件表面，也为这部分构件的腐蚀劣化创造条件。同时，每天通过隧道的机动车辆排放的大量尾气和隧道引道路面下雨时的径流水的水质也是应该考虑的因素。

根据隧道所处江河的地理位置、气候条件以及隧道结构部位的不同，水底公路隧道的结构构件大致处于以下四种工程区域环境条件：外部大气区、内部大气区、浪溅和水位变动区及水下和泥下区。

（1）外部大气区——这个特定的微气候属于近海河口大气环境。对长江口而言，由于江水低潮位时Cl^-含量为34.2～56.1 mg/L，远低于1000～2000 mg/L弱等环境标准。因此，江面空

气环境 Cl^- 含量也为弱等评级。这种环境因素覆盖了所有直接暴露于雨水及其冲刷中的混凝土结构物的外表面。

(2)内部大气区——一方面,隧道内部的空气压力和速度是变化不定的、暖和的、潮湿的、被污染的(包括含有柴油烟雾)及可能有油类和化学物的溢出漏洒。这些恶劣的环境条件可以通过采取严格的管理措施及良好的通风条件降低其影响,防止结构物的劣化变质。另一方面,由于结构内部通气条件较差,氧气和二氧化碳都不易进入,而通风系统的送入新风又采自江面,空气环境中 SO_4^{2-}、Mg^{2+}、Cl^- 等含量相对较低,因而隧道内部空气环境中对混凝土和金属有腐蚀作用的侵蚀性介质含量较低,属弱等评级,处于这种环境中的结构混凝土碳化和钢筋的锈蚀速度都较外部大气条件下缓慢。

(3)浪溅和水位变动区——处于浪溅和水位变动区的结构部分,在浪花飞溅区的干湿交替过程中,钢的阴极电流比在海水中的阴极电流大。在海水中钢的阴极反应是溶解氧的还原反应,而在浪花飞溅区中钢由于锈层自身氧化剂的作用使阴极电流变大。考虑到其所处环境相对最为恶劣,受冲刷磨损影响较大,是水底公路隧道混凝土和钢结构中最易受腐蚀的部分。

(4)水下和泥下区——在长江口隧道线位处,江边底泥中氯离子的含量最高约为1558.3mg/L,远小于混凝土中氯离子的临界浓度,属弱等评级。

本文的耐久性设计主要是针对处于不同工程区域环境条件的结构,采取不同的耐久性措施。一般,水底公路隧道结构耐久性措施的总体目的在于:明确设计与施工要求,建立完善和可靠的监控、检测、养护和维修机制,以确保规定的隧道设计使用寿命。建立一套完整而有效的耐久性评价指标体系,最大限度地减少可预见的隧道寿命期间内的维修要求,并通过有成本效益的管理来实现该目标。从而使建设成本和终身成本达到符合中国现阶段国情的较为合理的平衡。

2　工程结构耐久性设计总则

2.1　总体要求

(1)以混凝土结构耐久性设计为核心,确保设计使用年限100年,同时根据不同的环境类别及其环境作用等级进行设计。

(2)在设计使用年限内,根据关键部位动态跟踪检测结果,必要时进行耐久性再设计,并辅之相应的防腐蚀措施。

(3)通过钢筋锈蚀过程的预测,估算隧道混凝土结构使用寿命。

2.2　设计构思

有别于早先上海的越江公路隧道只是考虑混凝土的耐久性配比和金属防腐蚀,以及近来在回避了使用寿命要求情况下,根据环境类别作相应的耐久性设计,工程采取了如下几点设计构思。

(1) 参考欧洲最新的混凝土耐久性设计思路[欧洲最新 DuraCrete《混凝土设计指南》(2000年版)的设计],以基于材料劣化模型的设计方法,计算混凝土结构及构件的耐久性。

(2)选择最恰当的混凝土材料、配比、施工方法、结构构造以及裂缝控制措施等,并针对不利工况采取特殊防腐蚀措施来有效抵御危害结构的劣化作用。

(3)建立再设计理念,即设计使用年限内,应根据关键部位动态跟踪检测结果,必要时进行

需要全本请访问 www.ertongbook.com

耐久性再设计并辅之相应的防腐蚀措施。

(4)通过耐久性设计,确定各部分构件的合理使用寿命,并通过后期检查、养护、维修、更换,使隧道整体结构达到预期的使用寿命。

由上述几点构思可见,耐久性措施已贯穿到设计、施工、维修保养的整个动态过程中来进行考虑。在设计时应充分考虑混凝土拉应力限制和最大裂缝宽度限制;施工中,应确保保护层厚度达到设计要求以及混凝土振捣的密实程度,在运营中及时地维修保养。

3 设计原则、设计技术要求

3.1 设计原则

(1)综合考虑结构材料的耐久性设计、施工工艺以及施工质量控制和管理,通过合理设计和采取相对应的施工措施对其进行恰当控制以保证混凝土结构的整体耐久性能,尽可能延长结构的劣化变质初始阶段或降低劣化变质发展阶段的劣化速度,以满足结构设计寿命的要求。

(2)对隧道及时进行检测、养护和维修,尽早发现其材料退化和结构缺陷并采取及时和相应的维修、养护措施,最大程度地降低结构的劣化速度,延缓结构物失效时间,降低结构耐久性失效的风险。

3.2 设计技术要求

耐久性极限状态一般由适用性(正常使用极限状态)或可修复性控制。主要技术要求为:

(1)混凝土结构在设计基准期内钢筋不发生锈蚀。即钢筋表面 Cl^- 浓度不超过设计氯离子临界浓度;碳化前沿达到钢筋表面,但钢筋钝化膜未发生破裂。

(2)工程使用一段时间后,应进行现场实测,依据实测氯离子浓度和二氧化碳浓度(沿混凝土构件截面)的分布,按时间变化预测构件的使用寿命,必要时及时予以修复。

4 混凝土结构耐久性设计

4.1 隧道结构环境作用等级分析与劣化作用分析

4.1.1 环境作用等级分析

(1)结构重要性系数

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)第 3.2.3 条规定,"重要性系数:对于安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件,不应小于 1.1"。以长江口隧道工程为例,该工程的设计使用年限为 100 年(其中个别可更换混凝土构件如路面板为 25 ~ 50 年),而且该工程为重要交通要道,按照规范,其建筑结构安全等级属于一级,因此本工程的结构重要性系数应取大于等于 1.1 的数值。

(2)混凝土结构的环境类别

混凝土结构的环境类别直接影响到耐久性设计的方方面面。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002),并参考《混凝土结构耐久性设计与施工指南》,本工程使用环境按照二类考虑。

4.1.2 混凝土结构的劣化作用

水底公路隧道结构常分为敞开段、暗埋段、工作井和江中段几部分。暗埋段、工作井的结构计算中均将内衬结构与地下墙作为复合结构来考虑,而江中段只分析由管片所构成的隧道

段。隧道内的空间又分为车道孔、排烟通道及连接通道等。

从耐久性考虑，岸边段地下连续墙及盾构隧道衬砌管片外侧与地下水接触，内侧与烟气接触。而入口段侧墙、中隔墙及顶板底面直接暴露于空气中。由于可能出现的渗漏，入口段侧墙、隔墙下部及隧道衬砌底部都可能与地下水中腐蚀性介质接触；连接通道内侧与空气接触，外侧也可能与地下咸水接触；排烟通道中由于污染空气的浓度较高，也较易于遭受侵蚀。这些部位都是耐久性设计要考虑的重点。

影响盾构法隧道耐久性的主要因素有冻融作用、化学和生物侵蚀对隧道结构的危害、碱-硅反应(ASR)潜在的侵蚀作用、碳化和氯离子扩散对钢筋的侵蚀等。通过工程气侯、环境等条件分析可知，冻融作用、化学和生物侵蚀对隧道结构的危害是次要的甚至是无关的，而通过选择适当的水泥可避免碱－硅反应(ASR)潜在的侵蚀作用。所以，对隧道结构耐久性构成威胁并引起劣化的主要因素是碳化和氯离子扩散对钢筋的侵蚀。

(1)岸边段墙、板

地下连续墙外侧永久暴露于含氯离子地下水中，环境条件类似海水浸没条件。

内衬结构内侧永久暴露于空气中，主要威胁是碳化作用以及 NO_x、SO_2 等侵蚀，由于可能渗漏，岸边段隧道内侧底板、顶板也可能受氯离子渗透侵蚀，根据与侵蚀介质接触的特点，该部分环境条件可按浪溅区考虑。

(2)隧道衬砌

隧道衬砌受碳化和氯离子侵蚀的影响，这两类侵蚀作用根据管片所处的环境条件确定。如图 1，混凝土管片外侧永久暴露于含氯离子地下水中，环境条件类似海水浸没条件。混凝土管片内侧永久暴露于空气中，主要威胁是碳化作用，由于可能的渗漏，隧道内侧底部管片也不排除受氯离子渗透侵蚀的可能性，根据与侵蚀介质的接触特点，该部分环境条件可按浪溅区考虑。

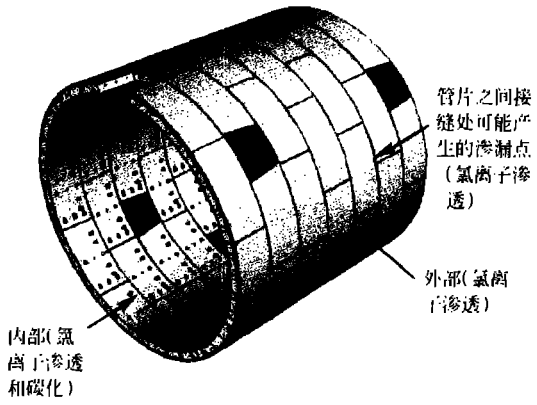


图 1　隧道衬砌受碳化和氯离子侵蚀

管片接缝密封垫外侧永久暴露于含氯离子地下水中，该部分可按浸没条件考虑，密封垫内侧由于渗漏也可能与含氯离子地下水接触，其环境影响条件可看作浪溅区。

密封垫由于长期的压缩和剪切作用，以及环境温度影响和化学污染物的侵蚀，橡胶材料会

发生蠕变、应力松弛等老化现象。

(3)排烟道及连接通道

排烟道内侧永久暴露于高浓度的污染空气中,使得该结构遭受比其他部位更为严重的碳化作用威胁。

连接通道内侧永久暴露于空气中,受到碳化作用,由于可能渗漏,通道混凝土也可能受氯离子渗透侵蚀,根据与侵蚀介质接触的特点,该部分环境条件可按浪溅区考虑。

以上对环境劣化作用的分析与荷兰绿色心脏(Green Heart)隧道、西谢尔德(Western Scheldt)隧道耐久性设计中的环境劣化分析观点是一致的。

4.2 隧道结构不同部位混凝土材料设计

现行规范对于工作于一类、二类和三类环境且设计使用年限为50年,以及一类环境中设计使用年限为100年的结构混凝土耐久性基本要求作出了比较明确的规定,这些规定实际是对于混凝土材料的一些具体要求。

根据规范和国内外的试验研究成果,建议水底盾构法公路隧道工程结构混凝土耐久性按以下表格进行设计(见表1)。

表1 隧道混凝土耐久性设计

工程部位	圆隧道管片	连接通道	工作井
部位环境	外为饱和粘性土和粉性土,内有车道排气	饱和粘性土和粉性土	地下部位为饱和粘性土和粉性土,地上部位外受含盐海风、内受烟道废气侵蚀
混凝土抗渗等级	≥S12	≥S12	≥S12(2号井),≥S10(3号井)
混凝土强度等级	≥C60	≥C40	≥C35
保护层厚度	内表面:- 外表面:-	内表面:- 外表面:-	内表面:- 外表面:-
构件受力情况的估计	存在受拉区,有裂纹	存在受拉区,有裂纹	存在受拉区,有裂纹
防腐方案	1.高性能混凝土; 2.封闭所有手孔与嵌缝槽; 3.对靠近风井侧约100环范围的排风道内涂布硅烷类涂料; 4.泵房施作环氧砂浆防腐蚀层加强处理	1.高性能混凝土; 2.PVC或EVA防水板	1.高性能混凝土; 2.内表面涂布硅烷类防腐蚀涂层; 3.外表面涂布聚氨酯防腐涂料与聚氨酯、环氧树脂经化学互穿组成的防腐涂料共同组成的防腐层

续上表

工程部位		圆隧道管片	连接通道	工作井
胶凝材料的控制	胶凝材料类型	强度等级≥42.5MPa的低水化热PⅠ或PⅡ型水泥+优质粉煤灰(≥Ⅱ级灰)等超细矿物掺合料	强度等级≥42.5MPa的低水化热PⅠ或PⅡ型水泥+优质粉煤灰(≥Ⅱ级灰)+矿渣微粉(比表面积≥380 m^2/kg)等超细矿物掺合料	强度等级≥42.5MPa的低水化热PⅠ或PⅡ型水泥+优质粉煤灰(≥Ⅱ级灰)+矿渣微粉(比表面积≥380 m^2/kg)等超细矿物掺合料
	胶凝材料用量(kg/m^3)	—	—	—
	水胶比	—	—	—
混凝土氯离子扩散系数(m^2/s)		—	—	—
碱含量(kg/m^3)		≤2.5	≤2	≤2
氯离子含量(%)		不超过胶凝材料质量的0.1	不超过胶凝材料质量的0.1	不超过胶凝材料质量的0.1
预测混凝土寿命(年)		约150	约135	约110(指排烟通道)

注:①岸边段仅强调采用高性能混凝土,其选材、配合比和耐腐蚀特性同工作井;

②由于 D_{Cl^-} 扩散系数的检测方法有很多,以及隧道结构 D_{Cl^-} 的积累数据有限,因此表中的数据与"指南"中的 D_{RCM} 法提出的值有较大的差距,三类结构的差值也偏大,这在以后工作中有待调整。

4.3　隧道结构不同部位构造措施与裂缝控制设计

(1)结构的构造应有利于减少因变形而引起的约束应力,应仔细、合理设置施工缝、变形缝的位置和构造。结构的施工缝和变形缝应尽量避开可能遭受最不利局部侵蚀环境的部位。

(2)设计时就应考虑合理的结构布局和构造细节,强调使结构各部件易于接近,使检查、维护和修理工作能够最方便地开展,而对交通的影响又最小。

(3)混凝土保护层。

混凝土保护层不单直接关系到钢筋与周围介质之间的距离,同时也会影响到钢筋混凝土结构的裂缝控制配筋量。

提高混凝土保护层厚度是提高钢筋混凝土使用寿命的最为直接、简单而且经济有效的方法。但是保护层厚度不能不受限制地任意增加。当保护层厚度过厚时,由于混凝土材料本身的脆性和收缩就会导致混凝土保护层出现裂缝反而削弱其对钢筋的保护作用。

具体而言,对于圆隧道衬砌结构,主筋的净保护层应取50mm。

(4)裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值

最大裂缝宽度直接关系到结构的耐久性,因此规范对此作出了明确的规定。根据规范规定,本工程环境类别为二级,相应的裂缝控制等级为三级,最大裂缝宽度限值为0.2mm。

4.4 与耐久性有关的施工要求及不良环境下的特殊措施

4.4.1 与耐久性有关的施工要求

(1)施工采用的混凝土配比及其原材料,应在正式施工前的混凝土试配工作中通过混凝土抗裂性能的对比试验进行优选,从中选取抗裂性能良好的混凝土。混凝土抗裂性能的对比试验,通常可采取约束状态下的环形试件或板式试件来进行。

(2)应设置保护层定位夹,其尺寸应该保证混凝土保护层厚度的准确性,其形状应有利于钢筋的定位。在浇筑混凝土前,应仔细检查保护层定位夹位置、数量及其紧固程度,以提高施工质量保证率。

(3)暴露于大气中的新浇混凝土表面应尽可能采用注水或浇水养护。此外还应保证模板连接缝不至于失水干燥。对于大面积构件在浇筑完成后立即抹平,并用塑料薄膜紧密覆盖防止表面水分蒸发。墙板宜采用有蓄水内膜或有良好保水性能的模板。

(4)在炎热气候条件下浇筑混凝土时,应避免模板和新浇混凝土受阳光直射,入模前的模板与钢筋温度以及附近的局部气温不得超过40℃。

(5)对于混凝土结构施工应实行温度控制。并宜通过混凝土裂缝控制的专用计算分析程序,确定混凝土浇筑、养护的方法与工序,事先给出施工过程中混凝土温度的合理控制方式。

4.4.2 针对不良工作环境采取的防护措施

(1)控制环面在施工过程中承受千斤顶顶力时的裂缝开展。

(2)针对车辆滴漏的油类物质或特殊车辆装载的腐蚀液在突发事故中倾覆以致于流入泵房等非常情况,需在泵房混凝土内表面涂布环氧砂浆作为防腐蚀措施。

(3)针对隧道内废气对管片螺栓造成的侵蚀,需对整条隧道的手孔、嵌缝槽进行封堵。此举可加强螺栓防腐蚀功效,又可提高排风功效。

(4)风井附近隧道区域内废气的浓度较高,为减缓碳化对混凝土管片造成的腐蚀,需对风井排风风道一侧的100环衬砌上半环范围内的管片内表面涂布硅烷类涂料,它对混凝土的有效防护时间不低于10年。地面风井外侧受海风侵蚀,为减少海盐对风井的腐蚀,对地面风井外侧混凝土涂刷聚氨酯防腐涂料与聚氨酯、环氧树脂经化学互穿组成的防腐涂料共同组成的防腐层,它对混凝土的有效防护时间不低于10年。以上两类涂料都可以复涂,再次提供有效防护时间。

(5)管片内表面会积累车辆废气(CO_2、NO_x、SO_2等)的凝聚物,管片内侧接缝、裂缝也存在氯离子积累的可能,它们都会加速管片腐蚀。在设备安装、装修施工进行前及今后侧墙、拱顶装饰物更换之际,清洗管片内表面是简便而有效的耐久性措施。

4.5 混凝土耐久性质量检验与长期监控措施

4.5.1 混凝土耐久性质量检验

(1)氯离子扩散系数的测定,应从现场混凝土取样制作试件。

(2)标准预埋件的回弹仪试验。通过测定构件表面混凝土的抗压强度,必要时直接从构件中取芯测定,来间接推定混凝土保护层的密实度。

(3)通过钢筋保护层厚度检测仪无损探测,确定混凝土保护层实际厚度。

4.5.2 混凝土耐久性长期监测与控制措施

(1)在管片及岸边段墙板重点部位分别设置预埋式耐久性无损监测传感系统:

①监测钢筋脱钝前锋面发展进程；
②监测实际钢筋锈蚀活动；
③监测修复保护措施的效果，为结构维护保养提供信息。
管片上设置的无损监测器如图 2 所示。

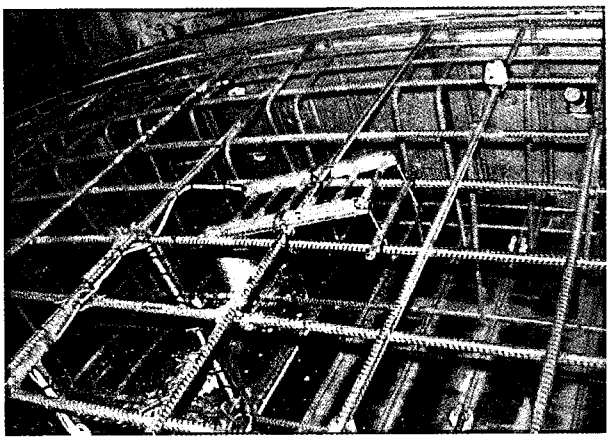


图 2　管片钢筋笼上的预埋式耐久性无损监测器

(2)监测一般分为人工检查和仪器自动监测两部分。对于钢筋是否发生和开始锈蚀可由钢筋锈蚀监测仪自动监控。人工检查的设施可以采用固定在结构内部的永久设施，也可以采用专用的外部设备，如移动式专用检修车。而一些仪器设备的配置及数量则需要结合隧道交通和健康监控系统统一考虑。

(3)根据 DuraCrete《混凝土设计指南》(2000 年版)耐久性设计的要求，管片耐久性设计也应有预案。故本设计要求管片块与块之间、衬砌环与环之间的所有钢筋、钢构件事先连为一体，以备在隧道管片受到一定侵蚀的情况下，可起用外加电流的防腐蚀方法，对隧道整体结构加以保护。

5　隧道混凝土结构使用寿命预测评估

钢筋混凝土使用寿命的定义和评估，是进行混凝土耐久性方案设计的基础。只有在准确预测结构或构件的使用寿命的基础上，才能够科学地、经济合理地确定各种防腐方案，并制定质量控制体系，保证工程的设计使用寿命。因此，需要对使用寿命的预测进行系统性分析。

5.1　钢筋混凝土结构的劣化模型

用于高性能混凝土使用寿命预测的基本模型是以建立混凝土结构劣化模型为基础。为进行使用年限设计，根据 DuraCrete 设计指南推荐[1~5]，现分别采用 2 个数学模型来描述结构随时间的劣化过程、材料抵抗氯离子和碳化引起的钢筋侵蚀。

5.1.1　氯离子侵蚀劣化模型

下列模型用于描述氯离子引起的侵蚀作用[2,3]：

$$x(t) = 2 \cdot k \cdot \sqrt{k_t \cdot D_{RCM,0} \cdot k_e \cdot k_c \cdot t \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n} \tag{1}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com