

地下结构耐久性能及其评估

Durability and Its Evaluation on Underground Structure

许宏发 杨 亮 陈 伟 编著



中国建筑工业出版社

地下结构耐久性能及其评估

Durability and Its Evaluation on Underground Structure

许宏发 杨 亮 陈 伟 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地下结构耐久性能及其评估/许宏发等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-112-18657-0

I. ①地… II. ①许… III. ①地下工程-结构工程-研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 265717 号

本书在国内外学者对混凝土结构耐久性研究成果的基础上, 围绕地下结构工程的耐久性设计、混凝土碳化及氯离子侵入混凝土计算模型、构件锈胀开裂耐久性寿命计算、腐蚀构件抗弯承载力计算、混凝土及结构开裂、在役地下工程耐久性分级以及地下工程耐久性设计方法等方面进行了系统的研究。本书可供地下工程领域设计、勘察、施工人员参考, 也可作为硕士、博士研究生的教学参考书。

* * *

责任编辑: 刘婷婷 王 梅
责任设计: 董建平
责任校对: 张 颖 赵 颖

地下结构耐久性能及其评估

许宏发 杨 亮 陈 伟 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10¼ 字数: 251 千字

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-18657-0

(27948)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

加快建设资源节约型社会，事关我国现代化建设进程和国家安全，事关人民群众福祉和根本利益，事关中华民族生存和长远发展。首先要节约土地资源，到 21 世纪中叶，我国人口将达到 15 亿人，土地资源十分不足。而地下空间的开发，可以实现土地的多重利用，是节约土地资源的重要举措。

但地下空间结构，与上部结构相比，处于地下水和各类岩土介质中，其环境更复杂，损坏后维修难度和成本更高。地下结构由于各种各样的原因提前失效的案例很多，多数情况源于结构的耐久性不足。例如，有些地区地下水中含有大量的硫酸根离子、氯离子、镁离子，尤其南方地区由于酸雨的影响和沿海地区海水的侵彻，酸性土壤所占比例很大，因而我国南方和沿海地区地下结构所面临的耐久性问题更加突出。

地下结构的耐久性能及评估是国内外结构工程学科研究的热点，受到工程界的关注与重视。随着 21 世纪以来城市地下空间开发利用的加速发展，地下结构的数量和类型越来越多，而随之暴露的问题也越来越多。长期以来，人们只关注地下结构的实用性和稳定性，而对地下结构的耐久性问题重视不足，片面注重建设阶段的造价，忽略耐久性，使得结构的维修加固费用远远高于建设成本。尤其是我国早期建设的一批地下工程，对耐久性设计意识很低，在使用过程中又忽视维修保养，以致很多工程出现材质老化、结构损伤严重的情况，极大影响其正常使用，有些甚至面临提前退役的局面，给国家带来了巨大的经济和资源损失。

我的学生许宏发、杨亮和陈伟，在地下工程结构耐久性方面，做了大量的调研和系统理论分析，取得了一系列的研究成果，这本书是对这些研究成果的总结。

这本书思路清晰，内容广泛、特色鲜明，提出了很多新的思路和实际有效的方法，具有较高的学术价值和工程实用价值，对如何解决我国在役地下工程的耐久性问题具有重要的指导意义，也是从事地下空间开发和利用有关的科研、教学、设计和施工管理人员难得的一本参考书。



2016 年 2 月

前 言

随着我国国民经济的不断发展,地下空间的开发和利用是节约资源、保护环境,实施可持续发展的必由之路。地下结构处于地表以下,环境条件与地面完全不同,长期经受地下水、氯离子、二氧化碳等地下环境的侵彻。由于以往对地下结构耐久性问题认识不足,大量地下工程结构劣化病害严重,给工程的使用与战备带来了较大困扰。地下结构材料大多采用钢筋混凝土,而混凝土结构耐久性问题已在世界范围内造成巨大损失,并引起了广泛的关注。解放军理工大学国防工程学院和南京城建集团项目管理公司,结合相关课题,对地下结构耐久性问题开展了深入系统研究,本书大部分内容为相关课题的研究成果。本书从混凝土结构耐久性损伤机理出发,对混凝土碳化、氯离子侵入计算模型、混凝土构件耐久性寿命计算、在役地下工程耐久性评估分级、水下隧道结构应力分布及防裂混凝土的研制、地下结构耐久性设计方法等几个方面对地下结构耐久性问题进行了论述。

全书共分九章。主要包括:

1. 系统分析了地下工程耐久性损伤原因,以及混凝土结构耐久性研究现状。
2. 在分析了混凝土碳化影响因素和国内外计算公式的基础上,构建了适合地下工程混凝土结构碳化深度的计算公式。
3. 针对近海干湿交替区域混凝土结构劣化最为严重的现象,建立了考虑干湿交替影响的氯离子侵入混凝土模型,为准确预测实际混凝土工程的使用寿命奠定了基础。
4. 在综合分析现有试验研究和理论分析的基础上,计算了锈蚀钢筋混凝土梁产生纵向裂缝时的锈蚀量与时间,基于可靠度理论,利用蒙特卡罗法,对地下工程梁正常使用可靠度随时间变化的规律进行了分析,计算了基于正常使用极限状态下梁构件的耐久性寿命。
5. 针对材料性能退化对承载力的影响及锈蚀受弯构件的承载力计算模型进行了评估及优选,详细介绍了地下人防工程梁板结构承载力计算方法,提出了锈蚀的地下结构梁受弯承载力的计算方法,探讨了地下结构构件承载力失效的准则。
6. 采用有限元法,以某水下交通隧道为背景,系统研究了水下隧道的结构应力分布对防水的影响,分析计算了水下混凝土结构的应力分布规律;根据混凝土渗透系数与应力之间的关系,确定了各部分的渗流系数,计算了结构的渗流状态和渗流规律。
7. 对水下混凝土收缩的抗裂性能的影响因素进行了试验研究,确定了水下隧道防裂自防水混凝土原材料级配参数和添加剂含量,为水下自防水混凝土的研制提供了新的思路。
8. 归纳了常用的混凝土结构耐久性检测方法和一般建筑的耐久性评估方法,结合地下工程抗力及荷载的实际情况,以构件损伤后的承载力与完好构件的承载力的比值,即以承载力降低系数为标准,对在役地下工程的耐久性等级划分进行了初步工作。
9. 归纳了近海环境下地下工程耐久性设计的内容,总结了耐久性设计的一般原则与

构造要求,提出了基于可靠度的结构工作寿命设计验算方法,最后介绍了一些防腐蚀的附加措施,初步提出了地下工程结构耐久性设计思路。

由于地下结构耐久性涉及的学科范围广泛而且问题复杂,尤其随着地下空间的进一步开发和利用,将会伴随着更多新问题的出现,如何研究和解决好这些问题,将是以后工程界发展的一个重要方向。本书虽然提出了一些方法和思路,但只能反映出这个课题当前的发展水平,不能完全满足工程实践中的需要。希望能以此为契机,让更多同行关注这个问题,共同促进地下结构耐久性的深入研究。

本书完稿之际,作者要感谢为相关课题研究付出辛勤劳动的研究生。感谢中国工程院院士、总参科技委委员、解放军理工大学教授钱七虎先生对作者研究工作的大力支持,并对本书进行了审阅,提出了许多宝贵的意见和建议。本书引用了大量的文献,有些为内部或不宜公开的资料,未能一一列出,在此对本书参考文献的作者表示衷心的感谢。

本书由许宏发、杨亮撰写第1章,许宏发撰写第2章和第8章,陈伟、许宏发撰写第3章、第4章和第5章,杨亮、许宏发撰写第6章,杨亮撰写第7章,陈伟撰写第9章。全书由许宏发修定、统稿。

尽管作者的编写工作非常认真、仔细,但由于水平有限,书中不足、疏漏和错误敬请读者批评指正。

目 录

序	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 混凝土结构的耐久性研究现状	2
1.2.2 混凝土结构耐久性评估方法现状	3
1.2.3 混凝土自防水耐久防裂研究现状	5
1.3 地下环境对地下结构的劣化作用分析	7
参考文献	9
第2章 地下结构混凝土碳化及其模型分析	11
2.1 混凝土碳化机理	11
2.2 混凝土碳化速度的影响因素	12
2.2.1 混凝土原材	12
2.2.2 原材配比与施工	13
2.2.3 外部环境	14
2.3 混凝土碳化深度预测模型回顾	15
2.4 地下结构混凝土碳化计算模型	17
参考文献	19
第3章 近海地下结构氯离子侵入混凝土计算模型	22
3.1 引言	22
3.2 氯离子对钢筋混凝土结构的破坏作用	22
3.3 氯离子侵入混凝土机理分析	23
3.3.1 混凝土中孔的结构	23
3.3.2 孔与水的相互作用	24
3.3.3 扩散作用机理	24
3.3.4 毛细管吸附作用机理	25
3.3.5 渗透作用机理	26
3.4 氯离子侵入混凝土模型研究	27
3.4.1 标准扩散模型简介	27
3.4.2 标准扩散模型的修正	27
3.4.3 考虑毛细管吸附作用的模型	30

3.4.4 计算参数选取	33
3.4.5 计算模型的程序实现	34
3.5 实例验证	35
3.5.1 干湿循环下的混凝土试件试验	35
3.5.2 粉煤灰混凝土试件 10 年浸泡试验	35
参考文献	36
第 4 章 基于正常使用极限状态地下结构构件耐久性寿命计算	38
4.1 引言	38
4.2 地下结构工作寿命分析	38
4.3 混凝土中钢筋锈蚀机理与锈蚀速度	39
4.3.1 钢筋锈蚀的机理	39
4.3.2 钢筋的锈蚀速度	40
4.4 混凝土构件锈胀开裂时的锈蚀量计算	41
4.5 锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀率的关系	42
4.6 基于构件纵向开裂的耐久性寿命分析	43
4.6.1 纵向裂缝耐久性寿命的可靠度分析方法	43
4.6.2 失效概率的蒙特卡罗法求解	44
4.6.3 耐久性寿命影响因素的统计特征	45
4.6.4 构件适用性可靠度的计算步骤	46
4.7 地下工程梁正常使用的可靠度经时变化规律	47
4.7.1 近海地下人防工程正常使用寿命算例及分析	47
4.7.2 耐久性寿命影响因素敏感性分析	50
参考文献	51
第 5 章 基于抗弯极限状态的地下结构构件耐久性寿命分析	53
5.1 引言	53
5.2 锈蚀钢筋对梁承载力的影响	53
5.2.1 锈蚀钢筋的截面积	53
5.2.2 锈蚀钢筋的强度	54
5.2.3 锈蚀钢筋的粘结性能	55
5.3 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力计算模型	56
5.3.1 研究现状及评述	56
5.3.2 锈蚀钢筋混凝土梁的受力过程及破坏特征	57
5.3.3 锈蚀梁承载力计算	58
5.4 地下工程梁板结构承载力分析	59
5.4.1 地下人防工程主体结构上的荷载	59
5.4.2 动荷载作用下材料力学性能参数	60
5.4.3 梁板结构内力分析	61
5.4.4 支承梁跨中 T 形截面受弯承载力计算	62
5.5 锈蚀地下结构抗弯梁承载力计算方法研究	62
5.5.1 锈蚀地下工程构件承载力计算的难点及处理	62

5.5.2 动载下锈蚀梁的承载力与内力	63
5.5.3 锈蚀地下工程梁的承载力极限状态分析	63
5.6 地下结构梁耐久性寿命的可靠度算法	64
5.6.1 承载力耐久寿命的蒙特卡罗法求解	64
5.6.2 影响承载力寿命的各因素统计特征	65
5.6.3 构件耐久性寿命可靠度的计算过程	66
5.7 锈蚀地下结构梁承载力的时变可靠度分析	67
5.7.1 近海地下工程梁算例及分析	67
5.7.2 一般环境下地下工程梁算例及分析	70
参考文献	72
第6章 水下隧道结构应力分布对防水耐久性的影响	74
6.1 前言	74
6.2 某水下隧道结构应力分布规律分析	74
6.2.1 计算模型	74
6.2.2 结构内应力计算分布规律	75
6.2.3 覆土层厚度对应力分布的影响	77
6.3 混凝土渗透系数与应力之间的关系	79
6.4 结构渗流规律	81
6.4.1 计算方法及渗流系数确定	81
6.4.2 计算结果分析	81
6.5 结论	83
参考文献	83
第7章 水下隧道结构自防水防裂混凝土的研制及其性能试验	84
7.1 防裂混凝土设计依据与思路	84
7.1.1 设计原则	84
7.1.2 技术指标	84
7.1.3 外部条件	85
7.2 混合材料的性能、强度等常规性能研究	85
7.2.1 水泥品种、水胶比、掺合料品种和用量、外加剂品种的影响	85
7.2.2 胶凝材料总用量、水泥强度等级的试验研究	87
7.2.3 采用实际生产用原材料对上述试验配合比的验证研究	88
7.2.4 低温下混凝土强度发展规律研究	89
7.2.5 C30P8 防裂混凝土原材料与初步配合比	90
7.3 收缩性能研究	91
7.3.1 试验原材料	91
7.3.2 砂浆收缩试验	93
7.4 混凝土收缩性能研究	100
7.4.1 混凝土收缩性能研究	101
7.4.2 试配混凝土与实际应用混凝土的收缩验证	105
7.5 塑性收缩与抗裂性研究	107

7.5.1 塑性收缩与抗裂性研究方法	107
7.5.2 试验设计	108
7.5.3 试验结果	109
7.5.4 试验结果分析	113
7.6 试验结果分析	114
7.6.1 水下隧道防裂自防水混凝土指标	114
7.6.2 混合料验收指标	116
7.6.3 收缩性能研究	117
7.6.4 塑性收缩与抗裂性研究	118
7.6.5 补偿收缩混凝土养护建议	118
7.6.6 对混凝土早期防裂与耐久性认识的提高	119
参考文献	119
第8章 地下工程结构耐久性检测、评估和分级	121
8.1 引言	121
8.2 既有地下钢筋混凝土结构病害	122
8.2.1 病害原因分析	122
8.2.2 按病因分类	123
8.2.3 按表观实态分类	124
8.3 常用地下工程耐久性检测方法	125
8.3.1 衬砌耐久性检测	125
8.3.2 钢筋的检测	127
8.3.3 围岩病害检测	129
8.4 地下工程耐久性评估和分级	130
8.4.1 引言	130
8.4.2 隧道衬砌开裂病害等级	130
8.4.3 隧道衬砌水害分级	132
8.4.4 隧道冻害分级	133
8.4.5 衬砌材料劣化评定	134
8.4.6 地下工程安全性综合评价	135
8.5 地下人防工程耐久性分级初步	136
8.5.1 地下工程主体结构上的承载力极限状态	136
8.5.2 耐久性状态与耐久性等级划分	137
参考文献	138
第9章 近海地下工程耐久性设计方法建议	140
9.1 引言	140
9.2 近海地下结构耐久性设计的主要内容	140
9.2.1 结构设计使用寿命	141
9.2.2 结构工作环境	141
9.2.3 混凝土材料的选择	142
9.2.4 构造措施和裂缝宽度限制	143

9.2.5 施工质量控制与竣工验收	143
9.2.6 使用期内的维护与检测	144
9.2.7 使用年限的定量计算	144
9.3 构造要求与裂缝限制	145
9.3.1 一般设计原则	145
9.3.2 构造要求	145
9.3.3 裂缝宽度限制要求	146
9.4 近海地下结构耐久性寿命的设计验算方法	147
9.4.1 耐久性设计的极限状态	147
9.4.2 结构工作寿命的设计验算步骤	147
9.4.3 耐久性寿命安全系数的确定	148
9.4.4 算例	149
9.5 防腐蚀附加措施	150
参考文献	151

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的和意义

地下工程由于环境条件与地面大不相同,因此不仅应具有足够的强度,还应具有足够的耐久性能,以保证在足够长的时间内满足要求。人们以往认为,地下工程承载力高,不存在耐久性问题或耐久性问题影响不大,实际上地下工程也和其他结构一样,在自然环境、使用环境和材料内部因素的作用下,结构的性能会逐步劣化,抗力不断下降,从而使结构在规定的时间内和规定的条件下承载能力降低。地下工程结构的耐久性问题必须引起足够的重视,据不完全调查,我国在 20 世纪 50 年代至 70 年代修建的地下工程,有近 40% 出现了不同程度的耐久性问题,主要表现为渗漏、顺筋开裂、剥落、开裂、锚杆锈蚀等,使得这些结构的抗力下降,必然带来工程等级的降低。图 1.1 即为某人防地下室顶板钢筋锈蚀,出现顺筋裂缝情况。



图 1.1 某人防地下室顶板钢筋锈蚀

地下工程结构主要采用钢筋混凝土材料。混凝土的耐久性问题,已引起国内外的广泛重视。混凝土结构耐久性可定义为:结构在规定的使用年限内,在各种环境条件作用下,不需要额外的费用加固处理而保持其安全性、正常使用性和可接受的外观的能力^[1]。

耐久性问题会产生许多严重后果。一是使得结构承载力下降,导致安全隐患。欧洲是最早使用钢筋混凝土结构的地区,1956 年,英国英格兰岛一座悬索桥突然断塌,导致 8 辆汽车掉进河里,造成 30 人死亡^[2]。究其原因是因为早期混凝土质量不高,使用了 40 年后混凝土里的钢筋严重锈蚀。我国西南一拉索式公路大桥,桥面为钢筋混凝土结构,仅仅使用 11 年后突然坍塌^[3],曾成为全国瞩目的事件,也是由于钢筋锈蚀所致。二是造成巨大经济损失。起初人们对混凝土结构的耐久性问题是重视的,很多国家因此产生了巨大的损失。美国国家标准局调查表明,1996 年由于混凝土结构耐久性失效给美国带来的损失大约 3500 亿美元,是美国 GDP 的 4.2%,而 2000 年达到了 4400 亿美元,占 GDP 的 5%,另外失效钢筋混凝土加固的费用每年大约 2500 亿美元^[4]。我国建筑结构耐久性问题也非常突出,据统计,1995 年在役的 60 亿 m^2 的城镇居民用建筑中,约有一半的建筑需要加固处理,其中约 1/6 的建筑急需维修加固^[5]。三是产生过多的建筑垃圾,破坏生态环境。对于发展中国家,建筑垃圾在垃圾中占比重很大,主要原因是工程的耐久性问题

引起的。我国目前水泥年产量如配置混凝土,年人均近4吨。混凝土用量过大,过度开采矿石和砂、石已在许多地方造成资源枯竭。同时每生产1吨水泥熟料消耗大量燃煤与电能,并排放约1吨二氧化碳^[4],严重影响环境和景观。

在地下工程中,这些问题同样出现,有的是由于在特定的历史时期设计不合理与施工水平低下造成的,但也有许多根据规范设计和施工的结构,在达到设计寿命以前就发生了明显的耐久性问题,这说明现行规范存在一定的问题,对工程耐久性考虑不周。

地下工程一旦出现耐久性问题,不仅修复困难,耗费大量资金,而且维修效果也不显著。如果我们在地下工程设计和施工中考虑耐久性,就能延长地下工程的使用年限,减少维修费用。而现行的地下工程设计规范考虑强度较多,考虑耐久性较少,重视强度极限状态,而不重视使用极限状态,造成了地下工程耐久性问题严重,因此开展地下工程耐久性的研究工作迫在眉睫。否则,巨大投资将蒙受重大损失,有限资源将遭到极大浪费,并将给今后使用与战备带来长期困扰。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 混凝土结构的耐久性研究现状

20世纪20年代初,钢筋混凝土结构开始被大规模采用,其后钢筋混凝土结构的耐久性损伤问题逐渐显现。1925年,美国开始在硫酸盐含量极高的土壤内进行长期实验^[6]。1945年,Powers等人从混凝土亚微观入手,开始了对混凝土冻融破坏的研究^[7]。1951年,苏联学者最先对混凝土中钢筋锈蚀问题进行研究^[8],同时,制定了相应的防腐标准规范。20世纪60年代,钢筋混凝土结构的使用进入了高峰期,同时钢筋混凝土结构的耐久性研究也进入了一个高潮,并开始朝系统化、国际化方向发展。1978~1993年连续六次召开了建筑材料与构件的耐久性国际学术会议^[9]。1982年,国际材料与结构实验室联合会和国际建筑研究与文献协会联合成立了建筑材料及构件使用寿命预测委员会,其目的是研究混凝土结构寿命问题。1989年欧洲混凝土结构委员会出版了“耐久混凝土结构设计指南”,对影响混凝土耐久性的因素及其相互作用关系进行了界定,成为混凝土耐久性工作寿命研究的基础^[10]。1995年,日本土木学会出版了“混凝土结构物耐久性设计指南(修正)”,采用类似于结构安全性设计的方法,将材料、设计、施工等具体参数以耐久指数表达,将环境因素(氯离子、冻融、碳化等作用)以环境指数表示,然后比较这两种指数,从而进行目标耐久寿命设计。韩国以日本土木学会耐久性设计方法为基础,结合韩国具体实际,提出了韩国式的考虑多种因素影响的耐久性设计方法^[11]。1998年美国国家标准与技术院、美国混凝土学会和美国材料试验学会赞助召开了混凝土结构使用年限和全寿命费用预测的专题研讨会,对混凝土使用寿命预测的“标准计算模型”进行研究,并资助开发相应的计算程序。

国内对混凝土结构耐久性劣化问题的研究起步于20世纪60年代,主要研究混凝土的碳化和钢筋锈蚀,范围不广泛。进入80年代后,研究越来越深入,范围更广泛,取得了很大的进展。“八五”期间,建设部把“混凝土结构耐久性及其耐久性设计”列入了科技攻

关课题,并由清华大学和中国建筑科学研究院完成了“混凝土结构耐久性设计”初步研究成果;“在用危险建(构)筑物实时监测和评价技术研究”列入了国家“八五”科技攻关专题,从结构材料层次和构件层次对混凝土结构的耐久性问题进行了较深入的研究^[12]。1991年12月在天津成立了混凝土耐久性学会。1995年,国家科委正式批准并启动了攀登计划项目“重大土木及水利工程安全性与耐久性的基础研究”^[13]。2003年6月,由建设部建筑业司和科教司委托,中国土木工程学会和清华大学土木系牵头,在国内众多专家的参与下完成《混凝土结构耐久性设计与施工指南》编审,并于同年年底出版,将我国结构耐久性的研究水平提高到一个新的高度。2008年,由清华大学会同有关单位共同编制的《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476—2008正式颁布。目前,混凝土结构耐久性研究主要集中在以下六个方面:

- (1) 材料耐久性劣化原因及机理研究;
- (2) 材料耐久性劣化计算模型研究;
- (3) 混凝土结构构件耐久性寿命计算;
- (4) 混凝土结构耐久性的检测与评估;
- (5) 混凝土结构的耐久性设计方法;
- (6) 提高混凝土结构耐久性的技术措施。

其中,混凝土材料耐久性劣化原因及机理研究相对比较成熟,而其余方面则在不断发展之中。尽管混凝土结构耐久性研究已取得了许多有益成果,但总的来说,理论研究还是落后于实践,不能满足工程实践的需要。尤其对于地下结构,人们往往有一种误解,认为地下结构强度很高,只要能保证结构强度,再辅以一定的构造要求,工程的耐久性就不存在问题,因此地下结构耐久性的研究较少。

实际上,人们大大低估了环境对地下结构的作用,地下结构所处环境恶劣,耐久性问题十分突出。由于耐久性问题致使地下结构达不到设计的防护要求,必然带来巨大损失。我国在地下工程耐久性方面的研究才刚刚开始,存在许多问题,有待专家们认真研究和解决。

1.2.2 混凝土结构耐久性评估方法现状

根据评定方法的不同,结构的耐久性评定可分为传统经验评定法、层次分析法、神经网络法、模糊综合评判法和可靠度指标评定法五种。^[14]

1. 传统经验评估法

传统经验评估法主要以设计规范、施工规程和施工工法为主要依据,依赖有丰富经验的技术人员(现场工程师、施工技术员或研究学者)作出评价和处理,从而评估结构耐久性的一种经验评估法。

传统经验评估法很少或不采用现代检测手段和测试技术,很大程度上凭借工程技术人员的专业知识和工程经验对结构作出定性评价,因而受个人主观意志影响较大。有以下特点:(1) 荷载作用大小由现场调查确定;(2) 材料强度取值以经验判断为准;(3) 图纸规定的材料数据是否与实际结构状况符合。该方法鉴定程序少,方法简单、直观,对于那些

受力简单、传力路线明确、较易分析的一般性建筑物和构筑物的耐久性评估,该方法仍是可行的^[15]。

传统经验评估法的评估程序主要以个人的经验为前提,由于调查较简单,缺乏准确数据,所以在工程处理上偏于保守,但该方法在工程实践中不断发展,经验在不断丰富,通过多次测试、观察和验证,可大大提高评估的可靠程度^[15,16]。

2. 层次分析法

层次分析法(AHP)首先找出影响系统的各个因素,再把各个因素按相互关系和主次划分为有序的层次,形成多层次结构的分析模型,最后把多层次多指标的权重赋值简化为指标重要性的两两比较,弥补了人脑很难在两维以上空间进行全方位扫描的弱点,便于对各层次、各指标进行科学、客观的赋值^[16]。它不仅可简化系统分析和计算,把一些定性指标定量化,使人们的思维过程数学化,而且有助于评估者保持思维过程的一致性^[17]。层次分析方法在结构耐久性分析中已有许多学者作了深入研究^[17-20]。

3. 人工神经网络法

人工神经网络是采用物理可实现的器件或采用现有的计算机来模拟生物体中神经网络的某些结构与功能,并反过来用于工程或其他领域。人工神经网络的主要目的并不是用物理器件重构生物体的神经网络,而是对生物体的神经活动的方式加以利用,构建一种虚拟的计算网络,模拟生物神经运动的过程,如学习、系统识别、系统控制、复杂系统结果模拟等。

目前人工神经网络理论的研究很深入,许多新的神经网络模型和算法得到发展,已在控制工程、信号处理、土木工程等领域得到广泛应用,受到广大科技人员的重视。在混凝土耐久性研究方面,人工神经网络的应用也受到了科研人员的重视,其中BP人工神经网络模型的应用较多^[21-23]。

4. 模糊综合评估法

混凝土结构耐久性的影响因素很多,且许多因素存在模糊性,因此采用模糊综合评估法是较好的。这些模糊因素和模糊评判主要体现在:

(1) 混凝土构件的耐久性问题非常复杂,因素多,且信息有时很难定量表达,因素的测量受到人力的影响,存在较大的模糊区间,采用模糊数学的度量方法是较好的处理手段。

(2) 影响耐久性的因素与耐久性寿命之间的关系非常复杂,难以用某个数学函数表达,是一个黑箱的非线性系统。模糊判别方法能比较客观地表达该系统的过程,从而减少人的主观因素的影响。

模糊综合评估方法已在混凝土结构耐久性评估中得到了较好应用^[24-27],取得了较多的研究成果。

5. 可靠性指标评估法

对在役结构进行耐久性评估,就是通过合理方法评估在役混凝土结构的可靠性,并预

估该结构长期运营过程中可靠性降低的规律。基于数理统计和概率论,采用非定值统计规律对结构的可靠性进行分析,称可靠性指标评估法。该方法已在混凝土结构的性能评价中成功应用^[28-30],并已形成国家设计规范^[1]。

假定建筑物的作用效应为 S , 结构抗力为 R , 其影响因素为 Y , 这些参数并不是常数,而是按一定分布规律变动的随机变量。

建筑物的结构抗力 R 和作用效应 S 之间,存在如下关系:

当 $R > S$ 时,结构处于安全状态;

当 $R = S$ 时,结构处于极限状态;

当 $R < S$ 时,结构处于失效状态。

然而,在计算结构的可靠度时也存在一定的困难,主要在于结构物本身材料强度的差异和计算模型与实际工作状态之间的差异,同时,由于计算规范中给出的荷载是与设计基准期有关的统计值,荷载统计与荷载组合是非常复杂的问题,所以在计算中确定各个时期的荷载是非常困难的。其次,通过比较分析,各类结构构件的可靠度指标不一致。在结构的实际工程中,施工质量不稳定,结构可靠性指标大多偏低。因此,落实可靠的质量控制措施非常必要。

1.2.3 混凝土自防水耐久防裂研究现状

地下结构中,自防水混凝土耐久防裂性能的研究一直是工程界关注的热点。目前不同功能的地下隧道结构实施防水的做法还不统一,但其防水技术主要分为三种类型:(1)从围岩、结构和附加防水层着手以防为主的水密型防水;(2)从疏水、泄水着手以排为主的泄水型或引流自排型防水;(3)防排结合的混合型防水。国内外几种主要地下结构防水做法如下^[31-36]。

1. 复合衬砌防水

复合衬砌防水一般由初次支护、防水薄膜层和二次模筑混凝土衬砌组成。初次支护一般为喷锚支护;再在喷射混凝土层上铺设防水薄膜(如PVC、ECB、EVA等)和导水排水系统;最后浇筑钢筋混凝土二次衬砌。复合衬砌防水技术在交通隧道施工中广泛使用,如南京九华山隧道、北京地铁隧道、北京八达岭高速公路潭峪沟隧道、青藏铁路风火山隧道、日本的北陆新干线一间瀬隧道等均采用了该防水技术。

2. 二次衬砌防水

二次衬砌防水是盾构隧道防水的主要技术措施。为了提高防水效果,常在隧道管片和二次衬砌间增加铺设防水板。但要使管片接头处不漏水,在施工技术难以达到。因此对隧道防水等级要求较高的工程,可在混凝土接缝处增设拦水结构,且增加防水板。二次衬砌防水技术充分利用了混凝土自身的抗渗性、密实性和刚度性能,从而防水和承载性能相结合,一构两用,节省了造价,但设计时必须使用高抗渗等级(一般大于S8)的防水混凝土。

二次衬砌防水在施工时应注意以下几点:

- (1) 二次衬砌浇筑时, 尽量减少衬砌混凝土开裂, 如温度缝、收缩缝、应力缝等;
- (2) 对二次衬砌施工缝、伸缩缝等接缝, 应做好防水设计, 确保施工质量;
- (3) 如增加铺设防水层, 应确保质量, 尤其注意防水层破裂等问题。

3. 单一衬砌

单一衬砌防水做法可以分为内防水和外防水两种。其衬砌施工时应注意以下几点:

(1) 防水泄漏。外喷射层主要承受围岩的压力, 来力较快, 因此常添加速凝剂, 该层具有较好的透水性; 内喷层采用防水混凝土, 起到隔水的作用, 这样在内、外层间的接触面上将承受地下水的压力。也可在喷射混凝土中拌合埃尔克姆硅浆状的浓缩二氧化硅粉(CSF), 不加速凝剂。也可在喷射混凝土中添加微粒石英材料, 能提高混凝土的密实性、抗腐蚀性和抗压性等, 耐久性能得到较大改善。

(2) 隧道衬砌无伸缩缝防水。喷射混凝土初喷后到强度达到一定值的过程中, 最容易出现混凝土变形、开裂等现象, 注意采取防止混凝土水合反应生热、坚持薄层喷射、喷水养护等措施, 保持混凝土不开裂。这样就可以减少伸缩缝。

(3) 采用无缝衬砌施工技术, 在喷射混凝土衬砌中, 利用喷射混凝土喷射层间良好的粘结作用的特点, 连续作业施工, 不留作业缝。

4. 排水法防水

通常先预测排水量, 然后制定周密的排水技术措施。当采用排水法进行防水时, 实施步骤为:

(1) 预先排水。在隧道开挖后和混凝土衬砌浇筑前, 对围岩中的地下水进行充分排放, 并引入到排水沟内排出;

(2) 施作围岩排水槽。当围岩中的地下水以渗透形式释放时, 地下水可沿排水槽分流, 减小衬砌中的渗透压;

(3) 施作衬砌排水沟槽。一般沿着混凝土衬砌的接缝或者垂直于接缝设置沟槽, 地下水从沟槽排出, 沟槽的断面形状可以根据现场情况确定。

5. 注浆防水

注浆是地下结构防水的常用方式。注浆不但能粘结隧道围岩块体, 增强围岩的强度, 也有利于减小围岩压力和衬砌变形, 同时减小了围岩的渗透系数。注浆防水可用于: (1) 已建成的隧道堵漏而不需拆除衬砌; (2) 隧道施工期间, 涌水、漏水的治理; (3) 隧道变形缝的处理。常用的注浆有化学浆液和微细粒水泥浆液, 通常使用双组分聚硫橡胶、SH 外掺剂、环氧砂浆等防水材料。

注浆防水的主要缺点: (1) 费用高; (2) 难于控制注浆走向; (3) 做到完全不透水难度大; (4) 对施工人员造成伤害; (5) 环境污染。

目前该领域的研究主要集中于自防水混凝土耐久性能和应用研究。辽宁大伙房输水隧洞, 地表水与地下水联系较为密切, 节理断层发育, 渗水比较严重, 采用自防水混凝土技术, 在混凝土中掺加 CSA 抗裂防水剂配制自防水混凝土, 取得了良好的防水效果^[37]。郭毅、李蓉^[38]针对长大输水隧洞工程衬砌结构, 进行了衬砌结构自防水混凝土, 从注浆选