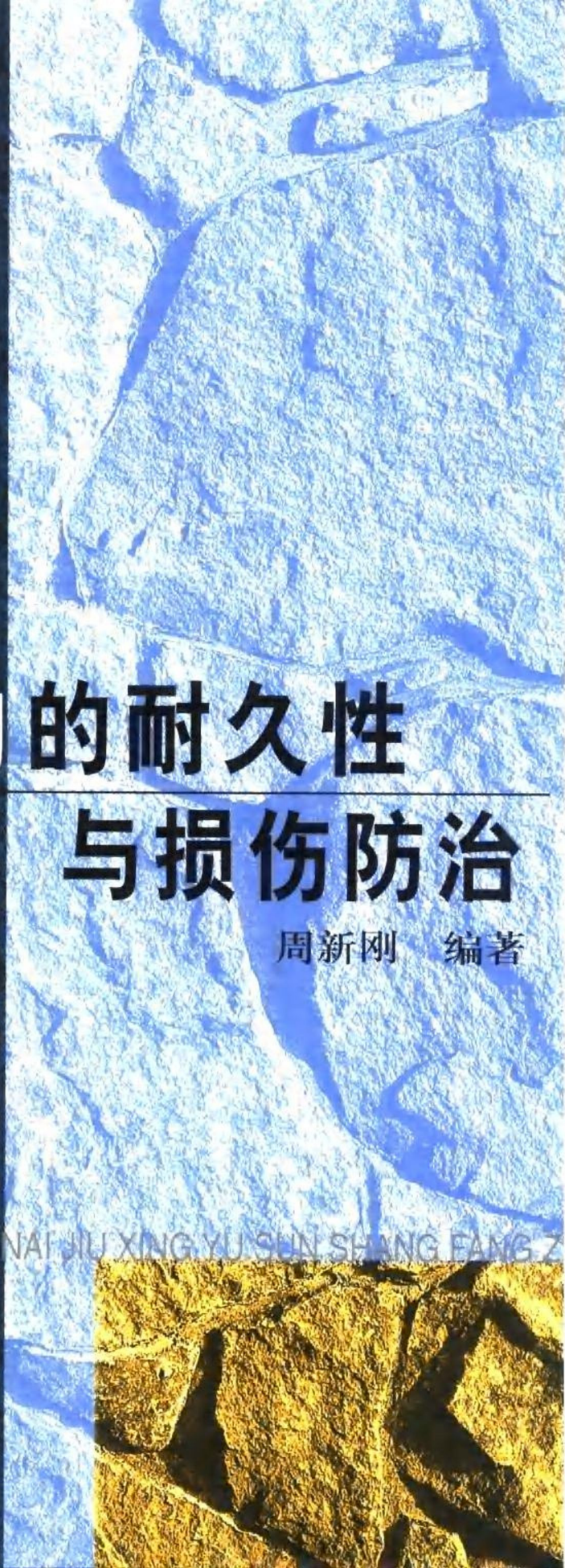




HUN NING TU JIE GOU DE NAI JIU XING YU SUN SHANG FANG ZHI



混凝土结构的耐久性 与损伤防治

周新刚 编著

HUN NING TU JIE GOU DE NAI JIU XING YU SUN SHANG FANG ZHI

中国建材工业出版社

混凝土结构的耐久性与损伤防治

周新刚 编 著

7272712

北方交通大学

藏 书

图书馆

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构的耐久性与损伤防治/周新刚编著. -北京:中国建材工业出版社, 1999. 8
ISBN 7-80090-897-6

I. 混… II. 周… III. ①混凝土结构耐用性-分析 ②混凝土结构-损伤(力学)-防护 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 37618 号

内 容 提 要

本书介绍了混凝土的耐久性和混凝土结构耐久性损伤的成因、检测评估和防治方法。书中比较系统地反映了国内外的最新研究成果,内容主要包括混凝土的耐久性,混凝土中钢筋的腐蚀,混凝土结构损伤的检测评估,混凝土结构耐久性的损伤防治、防护和防腐蚀设计,并附有工程实例。

本书既可供土木建筑部门的科研、设计、施工和建筑管理维修技术人员学习,也可供高等院校师生参考。

混凝土结构的耐久性与损伤防治

周新刚 编著

*

中国建材工业出版社出版 (北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云红光印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 字数: 256 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-80090-897-6/TU·218

前 言

结构的损伤破坏一部分是由偶然因素如自然灾害引起的，另一部分是由长期使用老化引起的。随着混凝土结构的更广泛应用和老旧工程的日益增多，混凝土结构的耐久性和使用寿命、混凝土结构损伤破坏的检测和鉴定评估、混凝土结构的防护等问题已经引起了人们普遍的关注，已成为土木建筑工程领域面临的重要研究课题，而且出现了大量的工程问题需要解决处理。

尽管结构的耐久性也是结构必须满足的基本功能之一，但结构的耐久性问题远没有像结构的安全可靠性那样得到足够的重视。而且由于影响混凝土结构耐久性的因素非常复杂，既与设计、施工和材料等因素有关，又与使用环境和维护维修等条件有关，所以工程技术人员往往对混凝土结构的耐久性缺乏深入、系统的了解和认识。在对结构的损伤破坏的认识上，我们对自然灾害引起的损伤破坏也比对结构老化的认识丰富。所以系统地介绍混凝土结构的耐久性及其有关问题具有重要的意义，这就是本书编写的初衷。

本书主要搜集了1990年以来的一些研究成果，在部分章节中也介绍了一些工程实例。在本书的编著过程中得到了有关专家的大力支持。山东建筑科学研究院朱安民高级工程师为本书提供了重要的研究资料。在此谨表衷心感谢。

由于编者的水平有限，书中难免有许多错误和不妥之处，敬请有关专家和广大读者批评指正。

编 者

1999年2月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 混凝土结构耐久性的基本概念	1
§ 1-2 混凝土结构损伤的检测评估	5
§ 1-3 混凝土结构耐久性损伤防治的特点	6
第二章 混凝土的耐久性	8
§ 2-1 混凝土的基本结构	8
§ 2-2 混凝土的渗透性	9
§ 2-3 混凝土的抗冻性能	11
§ 2-4 混凝土的抗磨损性能	15
§ 2-5 混凝土的碳化	17
§ 2-6 硫酸盐对混凝土的侵蚀	26
§ 2-7 混凝土的酸侵蚀	29
§ 2-8 海水对混凝土的侵蚀	30
§ 2-9 混凝土的碱骨料反应	31
§ 2-10 混凝土的其它物理化学作用	33
§ 2-11 混凝土的高温性能	37
§ 2-12 高强混凝土的耐久性	43
第三章 混凝土结构中的钢筋腐蚀	46
§ 3-1 钢筋腐蚀的机理	46
§ 3-2 大气条件下混凝土结构中的钢筋腐蚀	48
§ 3-3 钢筋腐蚀对混凝土结构的破坏	57
§ 3-4 工业建筑混凝土结构中的钢筋腐蚀	60
§ 3-5 海洋环境下混凝土结构中钢筋的腐蚀	64
第四章 混凝土结构损伤的检测评估	65
§ 4-1 混凝土结构检测评估的方法和程序	65
§ 4-2 混凝土结构裂缝的调查和检测	67
§ 4-3 混凝土强度的现场检测	70
§ 4-4 混凝土结构非破损检测的其它内容	79
§ 4-5 钢筋混凝土中钢筋的检测	82
§ 4-6 烧损混凝土结构的检测	85
§ 4-7 混凝土结构的鉴定评估	91
§ 4-8 混凝土结构剩余使用寿命的预测	97
第五章 混凝土结构耐久性的损伤防治	101
§ 5-1 提高混凝土耐久性的方法	101

§ 5-2	混凝土结构裂缝的修补	117
§ 5-3	钢筋腐蚀引起的混凝土开裂与剥落的修复	123
§ 5-4	混凝土结构的补强加固	128
第六章	混凝土结构的防护与耐腐蚀设计	139
§ 6-1	混凝土结构表面防护的一般原则	139
§ 6-2	混凝土结构中钢筋的防护方法	142
§ 6-3	工业建筑混凝土结构防腐蚀设计	145
§ 6-4	工业建筑混凝土结构的防护方法	147
§ 6-5	环氧树脂材料简介	149
参考文献	152

第一章 绪 论

在土木工程中，混凝土以其在性能、施工、经济等方面的显著优点成为最广泛应用的人工材料。混凝土结构也由此成为重要的结构形式。

建造结构的目的是利用结构的性能完成设计的功能。随着结构使用时间的延续，受结构使用条件变化及环境侵蚀等因素的影响，结构的性能将退化，功能将降低乃至丧失。混凝土结构也是如此，尽管通常认为混凝土结构具有寿命长和无需维护的特点。

实际上，早在波特兰水泥发明和使用的初期，人们就注意到了混凝土结构在恶劣环境下受侵蚀的问题，如海水中的氯盐、镁盐和潮汐的冲蚀等对海岸混凝土码头、灯塔等构筑物的侵蚀作用等。从本世纪初开始，解决工业建筑受化学介质侵蚀的问题也成为提高混凝土结构使用寿命的重要问题。

随着混凝土结构的更广泛应用，其使用环境日益多样化，工业污染日益加剧，混凝土结构受环境侵蚀的危害性也日益增加，混凝土结构的耐久性与使用寿命问题，逐渐成为土木工程领域普遍关注的问题。随着建筑服役时间的增长，老旧建筑物日益增多，结构的耐久性问题将更引人关注。与此相适应，结构损伤与破坏的检测、鉴定评估和修复加固等将逐步成为一种重要的工程实践活动。

据统计，结构的维修投资在发达国家逐年增加，有的已达到或超过新建工程的投资。如美国 90 年代初期用于旧建筑物维修加固上的投资就占总建设投资的 50%，德国则达 80%。涉及维修加固的结构，除有一部分是由于工程事故或偶然灾害造成的损伤和破坏外，剩下的都是经常性或阶段性的修复加固。修复加固的目的主要是弥补结构由于环境因素而受到的损伤与破坏，提高其耐久性和使用寿命。美国每年上千亿美元的腐蚀损失中，与钢筋锈蚀相关的损失就达 40%；瑞典用于桥梁耐久性修复上的投资每年可达 2800 万美元之多。

在我国，混凝土结构的耐久性及损伤的鉴定评估、修复补强工作起步较晚，80 年代才开始得到重视，并相继开展了钢筋腐蚀和混凝土碳化等耐久性方面的调查研究，以及寿命评估与耐久性设计的理论与方法等方面的研究；开始编制混凝土结构耐久性设计规范和标准；加大了对结构维修维护方面的投资。有关资料显示，“一五”期间，我国用于建设工程更新改造的投资仅为同期基本建设投资的 4.2%， “三五”期间达到 27%， “四五”和“七五”期间分别达到 31.7% 和 54%。当大规模的建设活动达到顶峰后，预计在二十一世纪，有关已有结构的适用性、耐久性问题将更加突出。结构的鉴定评估、维修、改造、加固等工程项目会成为建设项目的重要组成部分。另一方面，随着经济和社会的发展，人们对建筑的要求越来越高，对结构耐久性的要求也会越来越高。因此，研究结构的耐久性具有重要意义。

§ 1-1 混凝土结构耐久性的基本概念

结构在规定的时间内，在规定的条件下完成预定功能的能力称为结构的可靠度。结构的基本功能是由其用途决定的，包括结构的安全性、适用性和耐久性。因此，结构的耐久性也

是影响结构可靠度的重要因素。

1-1-1 混凝土结构的耐久性

混凝土结构的耐久性是指结构对气候作用、化学侵蚀、物理作用或任何其它破坏过程的抵抗能力。持久的混凝土结构当暴露于使用环境时，具有保持原有形状、质量和适用性的能力，不会由于保护层碳化或裂缝宽度过大而引起钢筋腐蚀，不发生混凝土严重腐蚀而影响结构的使用寿命等破坏。结构的耐久性与结构的使用寿命总是相联系的，结构的耐久性越好，使用寿命越长。

混凝土结构的耐久性取决于以下四个方面的因素：

1. 混凝土材料的自身特性；
2. 混凝土结构的设计与施工质量；
3. 混凝土结构所处的环境；
4. 混凝土结构的使用条件与防护措施。

混凝土材料的自身特性和混凝土结构的设计施工质量是决定其耐久性的内因。混凝土是由水泥、水、粗细骨料和某些外加剂经搅拌、浇注振捣和养护硬化等过程而形成的人工复合材料。由于环境作用对混凝土的损伤与破坏，是环境因素对混凝土物理化学作用的结果，因此混凝土的自身特性是决定混凝土耐久性的内因。设计因素如材料的选择、强度的取值、设计计算与构造措施等；施工因素如水泥的品种、水灰比的大小、骨料的种类与级配、施工中的质量控制等，都直接影响混凝土结构的耐久性。

混凝土结构所处的环境条件及防护措施，是影响混凝土结构耐久性的外因。外界环境因素对混凝土结构的破坏，是环境因素对混凝土结构物理化学作用的结果。能引起混凝土结构产生损伤或破坏，从而降低结构耐久性的环境因素主要有：

1. 冻融循环；
2. 混凝土的碳化；
3. 氯离子的侵蚀；
4. 碱—骨料反应；
5. 化学介质的侵蚀；
6. 物理磨损；
7. 钢筋的锈蚀等。

值得注意的是，几乎所有侵蚀混凝土和钢筋的作用都需要有水作介质。另一方面，几乎所有侵蚀作用对钢筋混凝土结构的破坏，都与侵蚀因素的作用引起混凝土膨胀，并最终导致混凝土结构开裂有关，而且当混凝土结构开裂后，侵蚀速度将大大加快，混凝土结构的耐久性将进一步恶化。在影响混凝土结构耐久性的诸因素中，钢筋锈蚀的危害最大。钢筋锈蚀与混凝土的碳化、氯盐的侵蚀以及水分、氧气的存在等条件是分不开的。

不同结构所处的环境条件不同，对结构耐久性起主导作用的因素也不同。工业建筑中，腐蚀性化学介质直接或间接的侵蚀作用是主要因素；海岸及近海工程中，氯盐及硫酸盐的侵蚀则是决定性因素；道桥结构耐久性恶化的主要动因是磨损和用氯盐除冰雪造成的；而一般建筑结构则主要是混凝土碳化、开裂等引起混凝土结构中钢筋锈蚀而造成的。

1-1-2 提高混凝土结构耐久性的途径

目前混凝土结构设计和施工规范中的有关规定，如混凝土结构的最小保护层厚度，混凝土的水灰比限制，混凝土的施工质量控制等，实际是耐久性设计与施工的内容。重要的或处于较恶劣环境下的结构对结构耐久性的要求，并不比对结构安全性的要求低。由于结构耐久性问题考虑不充分，给结构造成重大损失的工程事例并不少见。在设计与施工中采取可靠的方法和有效的措施，提高结构的耐久性，对提高结构的可靠度和使用寿命有重要的意义，也会显著地提高结构的长期使用效益。

在结构的设计、施工和维护中，应结合结构的具体使用条件和使用环境等因素，从以下几方面考虑采取适当的措施，提高混凝土结构的耐久性。

1. 采用高耐久性的混凝土；
2. 对混凝土结构采取适当的防护措施；
3. 提高设计、施工水平；
4. 改善和提高建筑和结构的构造处理水平；
5. 适当地提高结构的可靠水准；
6. 经常的维护、维修。

所谓高耐久性混凝土，一般指特种混凝土或高强（HSC）、高性能（HPC）混凝土。特种混凝土相对于普通混凝土而言，其对原材料的质量、配合比和施工技术有更高的要求。特种混凝土一般具有快硬、高强、改性复合、抵抗侵蚀能力高等特点。常见的特种混凝土有防水混凝土、防火混凝土、耐酸混凝土、耐磨混凝土、聚合物混凝土、浸渍混凝土和膨胀混凝土等。

高强、高性能混凝土的耐久性一般优于普通混凝土。因为高强、高性能混凝土的密实性和抗渗性远远高于普通混凝土。混凝土的渗透性是水分、气体、化学离子等通过混凝土向其内部扩散、渗透的能力。显然，混凝土的渗透性越好，有害物质的侵蚀速度越快，侵蚀的深度越深，混凝土的耐久性越差；反之，耐久性越好。混凝土的渗透性不仅影响化学侵蚀作用的程度，而且影响物理作用的程度。如混凝土的渗透性越高，混凝土抵抗冻融循环破坏的能力和抗磨能力越差。

一般混凝土结构表面的水泥砂浆面层和各种装饰性面层，对混凝土结构都有一定的保护作用，可以延缓混凝土的碳化速度，因此可以推迟混凝土中钢筋的腐蚀时间。除此之外，对一些特殊环境下使用的混凝土结构，还需要应用耐酸、耐碱等特种混凝土或混凝土面层对混凝土结构加以保护。有些结构需要使用一些特殊的化学涂层或保护方法，避免或延缓混凝土中钢筋的腐蚀，提高混凝土结构的耐久性，降低结构的正常维护、维修费用。

同其他事物一样，要保证结构具有良好的使用性能，而且能经久耐用，经常性的维护、维修也十分重要。良好的维护、定期的维修，不仅有助于提高结构的耐久性，而且可以避免发生大的工程隐患，酿成大的工程事故，减少经济损失。

混凝土结构的耐久性不仅与结构的设计、施工、材料选择、防护措施、使用维护等状况有关，也与建筑或结构的某些处理与做法有关。如建筑的防水和保温处理方法等也会影响混凝土结构的耐久性。防水处理的好坏不仅影响建筑的使用功能，而且影响混凝土结构中钢筋的腐蚀情况和混凝土的冻融损伤情况。建筑的保温处理不好，结构上容易出现温度裂缝，严重的温度裂缝也将影响结构的耐久性。建筑做法与构造处理的成败又与结构的方案、选型、处

理等有关，因此这些构造因素也对混凝土结构的耐久性有影响。

有些地下水中存在对混凝土具有侵蚀性作用的物质，如硫酸盐等。地下钢筋混凝土结构或钢筋混凝土基础等，应注意地下水中或土壤中的有害物质的侵蚀问题。

1-1-3 结构的安全性与耐久性

任何结构必须满足安全性与耐久性的要求。结构的安全性对应于结构的承载力极限状态；结构的耐久性对应于结构的正常使用极限状态。因此，结构在荷载作用下的性能不是结构耐久性讨论的问题。但有些荷载作用对结构的影响，既要进行结构受力分析，又要考虑其对结构耐久性方面的影响。如波浪对结构的作用，车辆对道桥的作用等。分析和设计水工结构时，不仅要分析波浪对结构的动力作用，而且要考虑波浪对结构的冲蚀问题。前者属结构受力分析问题，后者属结构耐久问题。车辆对桥梁结构的作用也是如此。

分析结构的耐久性，一般不需考虑结构是否处于受力状态，以及结构承受荷载的大小。可以说结构的安全性与结构的耐久性是描述结构可靠性能的两个相对独立的指标。但混凝土结构上的裂缝将影响结构的耐久性，而有些裂缝是由荷载产生的。结构的安全性可由结构的静动力分析和承载能力验算得到，结构耐久性的评价则要综合分析结构的材料组成和结构所处的环境因素才能取得。结构的耐久性更多的需要进行概念性的分析。因为影响结构耐久性的因素比较复杂，而且有关的研究工作还十分薄弱。

但是有些因素既能对结构的受力性能产生影响，又能对结构的耐久性产生影响，如结构的设计、施工质量等。结构耐久性的降低引起结构损伤，也必然引起结构受力性能的退化，最终导致结构破坏而丧失使用功能。

结构的设计基准期，即结构的正常使用寿命。在同样的环境下，结构的耐久性决定了结构的使用寿命。临时性的建筑设计基准期短，初始可靠指标低，可靠指标随时间衰减的速度快，其耐久性必然低。反之，为提高重要性建筑的耐久性，可适当提高初始可靠度，增加提高结构耐久性的措施，降低结构可靠度随时间的衰减速度，从而提高结构的耐久性，延长结构的使用寿命。

目前我国在混凝土结构的设计与施工中，对耐久性的重视程度远没有对安全性的重视程度高。这是因为，一方面影响混凝土结构耐久性的因素较多，而且涉及的知识较多；另一方面，研究混凝土结构的耐久性问题，需要较长的周期，试验条件的模拟也较困难，有些试验研究项目尚缺乏统一的试验方法标准。所以有关耐久性问题缺少比较完善的、系统的研究资料和工程调查资料。虽然在《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)和《混凝土结构工程施工及验收规范》(GB50204-90)中，在某些条款上对混凝土结构的耐久性予以了反映，但尚没有完整的混凝土结构耐久性规范。因此，很多土木工程技术人员缺乏混凝土耐久性方面的知识，对混凝土结构耐久性问题没有引起足够的重视。

国际上，许多发达国家如美国、日本以及欧洲共同体的一些国家，除了在混凝土结构设计与施工规范中规定耐久性的有关内容外，还制定专门的耐久性设计标准。我国也将颁布和实施混凝土结构耐久性设计标准。因此，提高对混凝土结构耐久性问题的认识，学习和掌握混凝土结构耐久性的理论与知识，学会从安全和耐久两个方面进行混凝土结构设计，并懂得正确地维护、修复混凝土结构的损伤与破坏，提高结构的耐久性，是从事结构工程设计、施工的工程技术人员面临的重要课题，也是结构工程科学研究面临的重大课题。

§ 1-2 混凝土结构损伤的检测评估

实际工程中有越来越多的现存结构，要求人们对其损伤破坏情况和剩余使用寿命做出评估，并在鉴定评估的基础上，结合其它条件，如经济分析比较、业主要求等，做出科学决策，以确定采取何种措施对结构进行处理。

1-2-1 检测评估的特点与内容

对现存结构进行鉴定评估和处理与新建结构的设计有许多不同之处。首先，对新建结构进行设计时，设计者在确定结构形式、分析方法，选择结构材料或更改结构设计等方面，有很大的自由度。而当结构建造完，并经过一定的使用期后，结构的几何尺寸和材料性能具有不确定性，结构的实际受力情况与原设计有差别，结构受环境因素的侵蚀其性能要发生退化，所以很难仅凭理论分析计算来回答结构的可靠程度。其次，结构设计时，结构的荷载参数和抗力参数是确定的设计值，而在结构的鉴定评估中这些参数要通过实际检测来获得，且只有通过实际的检测，在检测的基础上取得结构的有关参数，才能对现存结构的可靠性和剩余使用寿命进行科学的评估。所以，对结构的鉴定评估与处理，应该建立在对结构状况的调查和检测的基础上。

结构状况的调查是结构检测、鉴定评估和修复补强的重要内容。调查的内容应包括：

1. 设计原始资料；
2. 施工原始资料；
3. 使用工况、维护情况以及变更用途和偶然作用等情况；
4. 结构损伤的历史与现状等。

在结构调查的基础上，可以初步掌握结构设计、施工中是否存在缺陷；使用中是否有侵蚀性介质，以及侵蚀性介质的性质、强度等状况；使用中是否有变更使用用途、改变荷载等情况；使用中的维护、维修情况和损伤的时间、部位、面积、程度和结构的反应等。

掌握了初步调查资料，就可以对结构损伤破坏的原因、程度等作出概念性的分析与判断，并分清主次轻重，采取相应的检测手段，取得有关结构抗力的准确数据。

混凝土结构的检测方法可分为：

1. 表面的外观检测，如裂缝的分布、裂缝宽度、长度、深度、走向等的检测；
2. 结构构件挠度测量；
3. 非破损检测，如混凝土强度的非破损检测，钢筋腐蚀的检测等；
4. 反应分析检测，如氯离子含量的检测、碳化深度检测等；
5. 实际承载力检测等。

对具体工程，根据不同的目的与条件可同时选用几种方法进行综合检测。在分析检测结果的基础上，才能对结构进行正确的鉴定评估。

现行的混凝土结构设计规范是在建筑结构设计统一标准下制定的。设计方法是建立在结构可靠度基础上的极限状态设计方法。由于目前尚未有耐久性设计标准，对结构的耐久性评估也未有统一的规范规程。在结构的损伤或破坏鉴定评估中，一般可参照我国颁布的一些关于建筑物评定的标准和规程，如《危险房屋鉴定标准》(CJ13-86)、《工业厂房可靠性鉴定标准》(GBJ144-90)、《钢铁工业建(构)筑物可靠性鉴定规程》(YJB219-89)等。

结构的鉴定评估是一项相当复杂的工作。实际工程的情况千差万别，评估者不仅需要丰富的设计与施工经验，而且需要有丰富的现场检测评估工作的经验。我国《工业厂房可靠性鉴定标准》中，把评定的最终结果分为一、二、三、四级。一级最好，四级最差。评定过程中的每一指标都有很大的模糊性，因此评定者的经验对评定结果会有重要影响。所以，集中众多专家的知识与经验，消除个人主观因素影响的专家系统，将是结构鉴定评估的发展方向，以确保结构评估结果的科学性与准确性。

1-2-2 检测评估的程序

结构评估的科学性是结构评估准确性的保证，结构评估的准确性是结构修复处理的前提。只有准确的评估，才能采取恰当的处理措施，才能确保结构修复后的安全性与耐久性，才能取得较好的经济技术效果。

对混凝土结构检测、鉴定评估，可参照图 1-2-1 所示框图的程序进行。

对现存结构而言，如果结构的耐久性不满足要求，不可能简单地改变结构的特性。在决定对结构进行处理时，必须认真考虑技术上和经济上的问题。一般有三种处理决策：

1. 对结构进行处理以满足设计耐久性的要求；
2. 对结构进行处理以延长结构的使用寿命；
3. 拆除重建或降低结构的使用功能，保持结构在降低使用功能下的预期使用寿命。

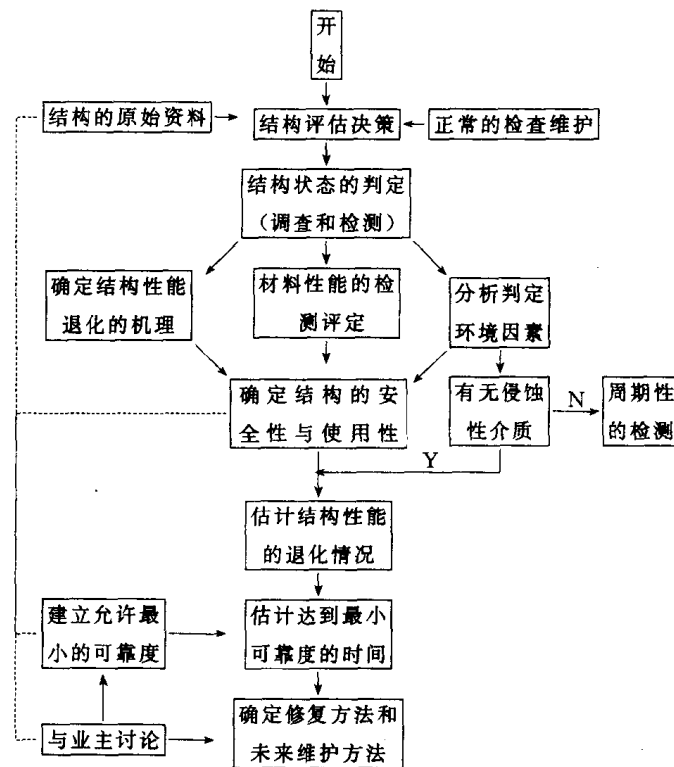


图 1-2-1 结构检测鉴定评估程序框图

§ 1-3 混凝土结构耐久性损伤防治的特点

引起结构损伤或破坏的原因主要有三种：一是工程事故，主要指勘察、设计、施工中人

为错误引起的结构破坏；二是偶然灾害，如地震、火灾、爆炸等自然或人为灾害引起的结构损伤与破坏；三是耐久性损伤与破坏，结构耐久性损伤与破坏主要指受环境侵蚀作用而产生的损伤与破坏。

如前所述，耐久性损伤与破坏除了与结构所处的环境因素和使用维护状况有关外，也与设计、施工等因素有关。耐久性损伤的过程相对缓慢，损伤的积累随时间而增加。由于损伤的发展速度相对缓慢，一些轻微损伤的迹象往往被忽视。随着时间的推移，这些轻微的损伤有可能积累发展到危及结构安全的程度。而工程事故、偶然灾害等对结构造成的破坏都有突发性的特点。

钢筋腐蚀能造成混凝土结构构件承载力降低或结构严重破坏，所以一般把预测混凝土中钢筋的腐蚀程度，作为分析判定结构使用寿命的依据。混凝土中钢筋开始腐蚀的时间与混凝土的碳化和混凝土中氯离子等的侵入深度有关。钢筋的腐蚀速度与环境的相对湿度、温度及混凝土中氯离子的含量等密切相关。因此，对混凝土结构进行防护，提高其耐久性和使用寿命，就多数混凝土结构而言，应以防止钢筋腐蚀为主要内容。

混凝土结构耐久性损伤破坏后的修复补强也有其特点。一般情况下，结构的修复加固补强，主要是采取措施提高结构的承载能力，提高结构的整体性和刚性，以保证结构的安全可靠性。耐久性损伤破坏的修复补强，除了要采取措施恢复和提高结构的安全可靠性外，还要消除侵蚀性因素的影响。侵蚀性因素有的来自于结构构件的外部，有的产生于结构构件的内部。

综上所述，混凝土结构的耐久性损伤是一个缓慢发展的过程，发展的结果将降低结构的使用功能，并可能降低结构的承载能力。耐久性损伤对结构承载能力的影响主要取决于钢筋的腐蚀程度。结构的防护、补强，并消除或减轻侵蚀性因素，是混凝土结构耐久性损伤防治中应综合考虑的问题。

第二章 混凝土的耐久性

随着时间的推移，任何材料的物理力学性能都将受环境因素的作用而发生变化，致使继续使用该材料将不安全或不经济，此时可认为材料达到其使用寿命。耐久性好的材料，抵抗环境破坏因素的能力强，材料的使用寿命就长，反之就短。

影响混凝土耐久性的因素可分为物理作用和化学作用两类。物理作用主要包括表面磨损、冻融及孔隙中盐类结晶压力引起的膨胀开裂等。化学作用则指酸溶液使水泥浆滤析、硫酸盐侵蚀、碱骨料反应、混凝土结构中钢筋腐蚀等。其中钢筋腐蚀的主要形式是电化学腐蚀。

本章将讨论混凝土的耐久性及其影响因素。钢筋的腐蚀将在下一章讨论。

§ 2-1 混凝土的基本结构

研究混凝土的耐久性实际是研究混凝土在物理作用和化学作用下的性能和破损情况。因此，在讨论混凝土的耐久性以前，对混凝土材料的组成、结构等进行简单的阐述是有益的。

2-1-1 混凝土的组成材料

混凝土是由水泥、水、骨料经搅拌、浇捣和硬化过程而形成的一种水硬性复合材料。其主要成分为水泥、水和粗、细骨料。未碳化的混凝土是碱性的。为了改善或提高混凝土的某些物理力学性能和施工性能，在混凝土中，一般需要掺加外加剂。现代混凝土中外加剂的应用越来越普遍，可以说外加剂已成为混凝土的第四种成分。

水泥经水化后具有胶粘性质，是混凝土中的胶粘材料。水泥的性质对混凝土的强度与耐久性有重要影响。根据不同工程和环境要求，应选用不同品种的水泥。常用的水泥品种有硅酸盐水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥等。

骨料是混凝土的重要组成成分。骨料可分为粗骨料和细骨料。骨料中的化学成分及杂质对混凝土的耐久性有重要影响。骨料中的杂质主要指氯盐、硫酸盐、硫化物、泥土等。这些有害的化学成分能与硬化水泥凝胶体中的成分起化学反应，而导致混凝土耐久性降低。氯盐能引起混凝土结构中钢筋腐蚀膨胀，导致混凝土结构开裂破坏。有些粗骨料中含有活性的氧化硅，如蛋白石骨料、方石英骨料等，能与混凝土中的碱性成分起骨料反应，导致混凝土破坏。

水是水泥硬化必需的，水的酸碱度及有害物质的含量如氯盐、硫酸盐等的含量对混凝土的耐久性的影响也不容忽视。

现代混凝土结构施工中，外加剂的应用非常广泛。一方面，外加剂可以改善混凝土的施工性能，并有提高混凝土的强度、改善和提高混凝土结构的耐久性等作用；另一方面，选择和应用不当的外加剂，其中的有害成分对混凝土的耐久性又有可能造成危害。

2-1-2 混凝土的结构

混凝土的结构是非均匀的，也十分复杂。这是由混凝土的组成材料决定的。

从宏观水平上看，硬化水泥浆可看成是基材，粗骨料分布于基材之中。由于混凝土的级配及骨料含量等的不同，混凝土的宏观结构也有所不同。在有些混凝土中，水泥砂浆的含量超过骨料之间的空隙，粗骨料之间互不接触；而有些混凝土中，粗骨料用量较多，骨料之间的水泥浆则相对较少，甚至在骨料之间出现孔洞。

从微观水平上看，由于混凝土中各种成分分布不均匀，成型不密实等，混凝土的密实性是不均匀的，有些区域是致密的，而有些区域则是多孔的。

除了不同的混凝土具有不同的宏观结构和微观结构外，混凝土中骨料与水泥凝胶体之间的界面，以及骨料本身的结构，如孔隙、裂缝等也对混凝土的耐久性有影响。

除了了解混凝土的结构总体特征外，仔细研究水泥浆体中的化学成分，及混凝土中孔隙和水的分布及状态，对研究混凝土的耐久性也是十分必要的。

水化水泥浆中的主要固体成分有：

1. 水化硅酸钙 ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ，简写 CSH)，也称 CSH 凝胶。在充分水化的水泥浆中 CSH 的含量在 70% 左右，对混凝土的性质起主要作用。

2. 氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，简写 CH)，占水泥浆固体体积的 20% 左右；

3. 硫铝酸钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ，简写 AFt)；

4. 未水化的熟料颗粒。熟料的化学组成一般为硅酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，简写 C_3S)、硅酸二钙 ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，简写 C_2S)、铝酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，简写 C_3A)、铁铝酸四钙 ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，简写 C_4AF) 等。

除上述固体成分外，水化水泥浆中还存在着有多种孔隙，主要有：

1. 水化硅酸钙中的孔隙；

2. 毛细孔，指未被水泥和水所占的孔隙。取决于水灰比及水泥的水化程度；

3. 气孔，气孔一般由搅拌混凝土过程中引入空气或使用引气剂等形成。在状态上看，气孔与毛细孔的主要区别是，气孔一般为圆形，毛细孔则具有不规则的形状。

水泥浆中的水，一般以毛细管水、吸附水、层间水、化学结合水等几种状态存在。

混凝土中的孔隙与水分是影响混凝土耐久性的两个重要因素。侵蚀性介质只有通过孔隙向内部渗透，才能对混凝土产生侵蚀作用。而几乎所有的化学侵蚀，都需要有水做媒体。

除了水泥浆中存在水和孔隙外，骨料与水泥浆之间的界面及骨料本身也存在孔隙和水。受骨料形状、级配、骨料含量等因素的影响，骨料、骨料与水泥浆之间界面上的孔隙和水，在不同的混凝土中往往有较大的差异。

§ 2-2 混凝土的渗透性

混凝土的渗透性，指液体流过混凝土的流畅性。混凝土的抗渗性，指混凝土抵抗压力水渗透的能力。显然，混凝土阻碍液体向其内部流动的能力越好，混凝土的抗渗性越好。混凝土的耐久性，与水和其它有害化学液体，流入其内部的数量、范围等有关，因此抗渗性能高的混凝土，其耐久性就高。

衡量材料渗透性能的指标一般为渗透系数，单位 cm/sec 。渗透系数 K 可由下式决定：

$$dq/dt = k \times (\Delta H A / L \mu) \quad (2-2-1)$$

式中 dq/dt ——液体通过固体的速率；

μ ——液体的粘度；

ΔH ——压力梯度；

A ——表面积；

L ——固体厚度。

混凝土的渗透性，可用相对抗渗系数评定。相对渗透系数的计算方法如下：

$$S_K = WD_m^2/2TH \quad (2-2-2)$$

式中 S_K ——相对渗透系数 (cm/h)；

D_m ——平均渗透高度 (cm)；

T ——恒压时间 (h)；

H ——水压力水柱高度 (cm)；

W ——混凝土的吸水率，一般为 0.03。

我国目前一般用抗渗标号来表示混凝土的抗渗性能。抗渗标号用标准实验方法测得的标准试件渗水时的最大水压力计算。抗渗标号的分级为 S2、S4、S6、S8、S12。S 的计算公式为：

$$S = 10H - 1 \quad (2-2-3)$$

式中 S ——抗渗标号；

H ——六个试件中三个试件渗水时的压力 (MPa)。

混凝土的抗渗标号与相对抗渗系数的关系见表 2-2-1。

混凝土的抗渗标号与相对抗渗系数的关系

表 2-2-1

抗渗标号	渗透系数 (cm/s)	抗渗标号	渗透系数 (cm/s)
S1	0.391×10^{-7}	S8	0.261×10^{-8}
S2	0.196×10^{-7}	S10	0.177×10^{-8}
S4	0.783×10^{-8}	S12	0.129×10^{-8}
S6	0.419×10^{-8}		

混凝土的渗透性与水灰比、水泥品种、水泥的水化程度、粗骨料的尺寸、骨料的级配、粉煤灰掺合料、骨料与水泥浆体界面的裂缝和骨料的渗透性等因素有关，因为这些因素决定了混凝土的结构、孔隙等，而混凝土的渗透性与混凝土的孔隙、气孔、裂缝等形成的透水通路密切相关。

混凝土的水灰比越大，水化程度越低，水泥浆体中的毛细孔率越高，水泥浆体含有较多的大孔和连通性良好的孔，混凝土的渗透性就越大。在相同的水灰比下，水化程度越低，混凝土中未水化物及毛细管水越多，孔隙率越大。水化程度随混凝土龄期的增长而提高，混凝土的密实性也相应提高。在相同水化程度下，水灰比越大，混凝土的孔隙率越高。图 2-2-1 给出了水灰比、水化程度和孔隙率之间的关系。混凝土的渗透性与固体水化产物百分比之间的关系见图 2-2-2。由图可见，固体水化产物百分比越小孔隙率越大，渗透系数越大。

水泥的水化程度也与养护条件有关。养护的时间、温度、湿度等都影响混凝土的水化。所以，养护条件也会影响混凝土的渗透性。一般来说，蒸汽养护的混凝土的渗透性比标准养护的混凝土的渗透性大。

一般认为骨料的渗透性比水泥浆体要低。而实际上某些骨料的渗透系数与水泥浆体的渗透系数相比相差不大。而且当骨料的孔隙率达 10% 时，其渗透性比水泥浆体还要高得多。当粗骨料中夹杂风化程度较大或有明显层理结构的骨料时，渗透性将更高。

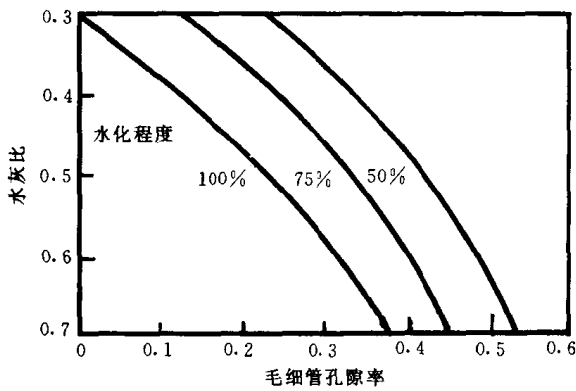


图 2-2-1 混凝土水灰比、水化程度和孔隙率之间的关系

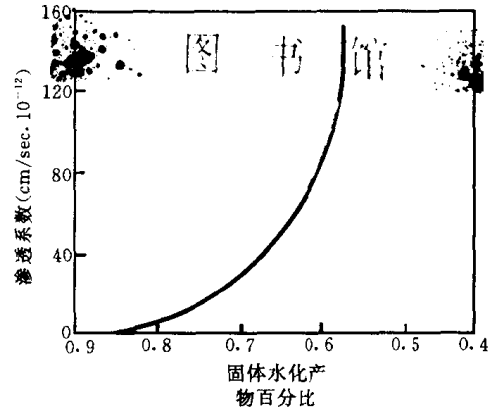


图 2-2-2 混凝土孔隙率和混凝土渗透性之间的关系

骨料的形状、最大尺寸及级配，对骨料与水泥浆体界面上的结构有影响。当骨料中含有较多的片状、条状骨料，或骨料的尺寸较大、骨料的级配不好时，界面上将存在较多的自由水或孔隙。水分在蒸发后将形成较多的孔隙，而且混凝土干燥收缩也常常引起界面裂缝。因此，骨料的尺寸越大，骨料的级配越差，水灰比越大，混凝土的渗透性越高。水灰比和骨料的特征对混凝土渗透性的综合影响见图 2-2-3。

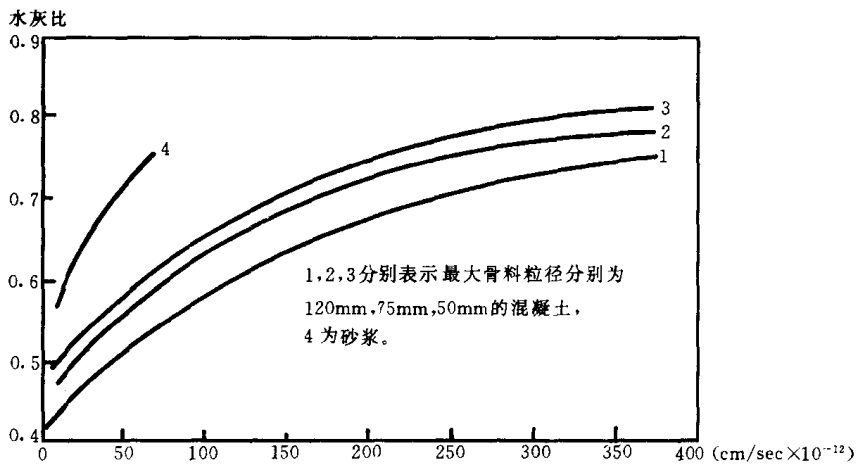


图 2-2-3 混凝土水灰比、骨料粒径对渗透性的影响

实验表明，在混凝土中掺加磨细粉煤灰对混凝土的抗渗性能有显著的改善。在水灰比 0.5 的情况下，掺磨细粉煤灰比不掺粉煤灰或掺原状粉煤灰，混凝土的抗渗性能提高近 1 倍。

在地下结构中，混凝土的渗透性与防水有重要的关系。降低混凝土的渗透性或采取有效的防水措施，以保证地下结构的正常使用，是地下混凝土结构需要解决的重要问题。

§ 2-3 混凝土的抗冻性能

潮湿的或饱和的混凝土处在寒冷环境中要受到冻害的作用，引起混凝土开裂和剥落，严重威胁混凝土的耐久性。受冻融循环的反复作用，即使质量非常好的混凝土也往往发生破坏。混凝土的冻害不仅会发生在潮湿或饱和状态的混凝土结构中，也常常会发生在混凝土结构的