

土木建筑工程继续教育丛书

混凝土的耐久性及其 防护修补

龚洛书 柳春圃 编著



中国建筑工业出版社

土木建筑工程继续教育丛书

混凝土的耐久性及其 防护修补

龚洛书 柳春圃 编著

中国建筑工业出版社

本书较系统地阐明了混凝土耐久性问题中的渗透性、碳化、化学腐蚀、钢筋锈蚀、抗冻性、碱集料反应以及对耐久性有直接影响的混凝土收缩与徐变等的定义、分类和机理；具体地分析了各自的影响因素及其对建筑工程的危害；列举了国内外有关的评定标准、预测方法及有效的防护措施；同时着重介绍了由于混凝土耐久性不够引起的结构缺陷及其修补加固措施。

本书可作为土木建筑工程继续教育教材，供土建技术人员和土建院校师生参考。

土木建筑工程继续教育丛书
混凝土的耐久性及其防护修补
龚洛书 柳春圃 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
新华书店经销
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：5¹/₂ 字数：141千字
1990年10月第一版 1990年10月第一次印刷
印数：1—4,515册 定价：3.95元
ISBN7-112-01098-5/TU·799

(6170)

出 版 说 明

社会的进步、经济的振兴和科技的发展,都依赖于劳动者素质的提高和大量合格人才的培养。为此,必须努力通过各种途径,加强对劳动者的职业教育和在职继续教育。

为满足土木建筑界科技工作者补充新知识的需要,在中国建筑学会及中国土木工程学会的倡导和参预下,我社拟编辑一套《土木建筑工程继续教育丛书》由两个学会各专业委员会协助,按专题约请有关专家执笔,陆续出版。

本丛书以在职的具有大专文化程度的中青年科技工作者为主要对象,可作为进修自学材料,也可供短期培训之用。

中国建筑工业出版社

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 混凝土的渗透性	5
2.1 混凝土的孔结构	5
2.2 主要影响因素	9
2.3 几种混凝土的抗渗性	13
2.4 改善抗渗性的措施	19
第三章 混凝土的碳化	21
3.1 机理和研究方法	21
3.2 混凝土碳化特性	23
3.3 主要影响因素	26
3.4 碳化合格性指标	35
3.5 碳化深度的预测	37
3.6 减少混凝土碳化的措施	41
第四章 混凝土的腐蚀	43
4.1 分类和机理	44
4.2 海水对混凝土的腐蚀	46
4.3 土壤和地下水对混凝土的腐蚀	48
4.4 混凝土腐蚀性的判定标准	51
4.5 防治措施	54
第五章 混凝土中钢筋的锈蚀	58
5.1 钢筋锈蚀机理	58
5.2 钢筋锈蚀的主要影响因素	60
5.3 钢筋锈蚀的检测方法	71
5.4 防止钢筋锈蚀的措施	74
第六章 混凝土的抗冻性	80
6.1 混凝土的冻害机理	80

6.2	混凝土抗冻性的主要影响因素	82
6.3	轻集料混凝土的抗冻性	88
6.4	提高混凝土抗冻性的措施	89
第七章 混凝土的碱集料反应		92
7.1	碱集料反应的类型	92
7.2	碱集料反应的机理	93
7.3	碱集料反应的主要影响因素	96
7.4	集料膨胀性反应引起的结构破坏实例	99
7.5	防止碱集料反应的措施	101
第八章 混凝土的收缩与徐变		105
8.1	定义与分类	105
8.2	收缩与徐变特征曲线	111
8.3	收缩与徐变的基本方程	114
8.4	收缩与徐变的影响因素	117
8.5	多系数实用计算公式	135
第九章 混凝土结构的修补		138
9.1	混凝土结构的损伤及其特征	138
9.2	常用的修补材料	140
9.3	混凝土结构的修补方法	149

第一章 绪 论

混凝土是现代土木建筑工程中不可缺少的、用量最大、用途最广的一种建筑材料。自19世纪20年代波特兰水泥问世以来，混凝土材料及其应用技术得到不断发展，并逐渐成为材料科学的一个重要门类。

广义地说，凡是由胶结料、集料和液体拌制硬化而成的一种复合材料都可称为混凝土。混凝土由于所采用的胶结料和集料品种不同、其品种、性能和应用技术也因之而有很大差异。通常我们所说的混凝土是指用水泥作为胶凝材料而制成的普通混凝土。在土木建筑工程中，用量最多的是普通混凝土，其次是轻集料混凝土。因此，本书所论述的问题也是以普通混凝土为主，适当涉及轻集料混凝土的有关问题。

由于混凝土的应用范围很广，对混凝土材料科学的研究，不仅对工程建设的经济性、实用性和可靠性都有很大影响，而且与人们的生活、安全也密切相关，所以，越来越引起人们的关注。

近年来，混凝土的耐久性是混凝土材料科学中最为人们所关心的重要问题之一。它是指在使用过程中，在内部的或外部的，人为的或自然的因素作用下，混凝土保持自身工作能力的一种性能。

近几十年来，国外对混凝土耐久性的研究较多。60年代以来相继召开过多次国际性的混凝土耐久性学术讨论会，如国际材料与建筑结构试验研究所联合会（RILEM）于1961年和1969年召开的国际混凝土耐久性学术会议，1968年和1980年召开的第六届、第七届国际水泥化学会议和1978年至1984年连续三次召开的国际建筑材料与构件耐久性会议等，混凝土耐久性问题都是重要

议题之一。所讨论的问题广泛涉及混凝土耐久性的各个方面。

在我国，混凝土耐久性的研究起步较晚，虽然国家科委早在本世纪50年代末期，就组织了很多单位对土壤、金属材料和非金属材料(包括混凝土)的腐蚀进行了大规模的试验研究，但后来中断了很长一段时间，至80年代初才又恢复起来；铁道、交通部门等有关科研单位，在70年代也曾结合工程的需要对混凝土耐化学腐蚀进行过大量试验研究；建工系统也在80年代初组织了中国建筑科学研究院等的科研单位和有关大专院校对混凝土的收缩、徐变、碳化、钢筋等问题进行了系统的试验研究；另外，水电部门对混凝土抗冻性能的研究也取得了不少成果。

为什么国内外的有关学者对混凝土耐久性问题的研究都如此重视呢？我们认为，主要有如下三个原因：

1. 混凝土是一种永久性的结构材料

在土木建筑工程中常用它作为承重的主体结构，其用量很大，对结构的经济性与安全性起主导作用。虽然，无论在正常工作条件下，或在侵蚀介质中，用混凝土建造成的钢筋混凝土的结构物或构筑物，其耐久性一般都比金属材料和其他材料好。但在很多情况下，钢筋混凝土结构由于各种原因而遭受破坏也是相当迅速而又严重的，其中由于耐久性差是最主要的原因，特别是在某些化工和冶金工业建筑中更是如此。最严重的有的刚建成，尚未正常投产使用，就需废弃；有的在使用2、3年后就遭受破坏，丧失工作能力；有的使用2~10年后，为其保持工作能力所花费的维修、加固费用早已超过结构本身的造价。这种情况在我国是屡见不鲜的。

在国外，对钢筋混凝土结构的耐久性问题很早就十分重视。据苏联资料介绍，在一般工业区，大部分工业厂房和构筑物，都不同程度地遭受各种介质的侵蚀，其损耗总值每年达400亿卢布以上，约占工业固定资金的16%。若不对这些厂房和构筑物采取专门的保护措施，那么，因建筑结构缩短使用周期，而造成的材料损耗每年将达40亿卢布。可见情况是十分严重的。由于建筑结

构的耐久性得不到保障，每年将给国家造成巨大的经济损失。

2. 影响混凝土耐久性因素十分复杂

众所周知，钢筋混凝土结构的承载能力很大程度是按其混凝土的强度控制的，但除设计或施工原因以外，直接由于强度问题而引起的结构破坏是很少的；有的即使是强度问题，往往是因为各种因素对混凝土耐久性的影响而促使混凝土强度下降，从而导致结构的破坏。如路面、钢筋混凝土桥梁和下水管道等的破坏，往往是由于冻融的反复作用，钢筋的锈蚀，或是受一些腐蚀介质的作用所引起的。这些引起破坏的因素、往往不是单一的，而是综合的，反复作用的；又如冬季下雪后，路面撒盐化雪防滑问题也是如此。由于寒冷气候周期性变化对混凝土的破坏作用，固然值得重视，但是由于氯盐给钢筋混凝土带来的腐蚀将更为严重。这个问题在西方的一些国家已经引起重视。有些国家（如联邦德国）已明文规定禁止在下雪后撒盐化雪防滑，而在我国，有些单位还把它作为一个下雪后减少交通事故的一个好经验加以宣传。

另外，由于当地混凝土原材料（如砂、石）缺乏，人们采用海砂和某些工业废料来代替河砂；以及随着工业的发展、环境污染、“酸雨”的形成、气温的提高和空气中二氧化碳含量的增多，也都给混凝土耐久性带来新的不利影响，促使人们对混凝土耐久性更为重视。

3. 混凝土应用范围日益扩大

随着人类社会活动和科学技术的发展，混凝土材料的应用技术也随之迅速发展，不仅广泛应用于工业与民用房屋建筑、道路、桥梁、水坝等土木工程建筑和构筑物，而且越来越多应用于海洋和严寒地区的一些特殊建筑中，如核电站的预应力钢筋混凝土安全壳；海上采油平台和盐湖地区的道路、桥梁，日益向海洋扩展的海上城市建筑，都比在正常地区的介质条件更为严酷。这些构筑物的施工条件也比一般的更差，而且造价十分昂贵，因此，与其使用年限直接有关的耐久性问题更引起人们的注意。

除此以外，由于混凝土耐久性问题是一个非常复杂的问题。

虽然，近几十年来，各国学者进行了大量的试验研究工作，取得了不少成就，也解决了不少工程实际问题，在第七届国际水泥化学会议上有人统计，关于混凝土耐久性的论文全世界已达千余篇，但由于缺乏交流和协调，可以说重复的较多，而且各国学者所采用的试验方法和条件很不统一，常常是各行其是，而且有的与实际情况相差很远，至今国际上尚无统一的试验方法。因此，得出的结果、评价和分析方法也无法进行比较；有的甚至本身就是不正确的，不能接受的；有的用简单的模拟和外推法，或者带有主观意图、有倾向性的归纳、分析，甚至夸大或言过其词，得出错误的，或自相矛盾的结论。这些都更增加了混凝土耐久性的复杂性。

尽管如此，几十年来，国内外学者在混凝土耐久性方面都进行了大量的研究工作，累积起来的知识还是十分有价值的。本书尽可能的收集国内外有关资料，去粗取精，去伪存真，结合工程实际的需要，和我们自己在科研工作中取得的成果和体会，将有用的知识介绍给大家。

主 要 参 考 文 献

- [1] V.S.Ramachandran等著，黄士元等译，〈混凝土科学〉，中国建筑工业出版社，1986年。
- [2] I.Calleja，“耐久性”，〈第七届国际水泥化学会议论文集〉，中国建筑工业出版社，1985年。
- [3] 黄可信、吴兴祖等编译，〈钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与保护〉，中国建筑工业出版社，1983年。

第二章 混凝土的渗透性

混凝土是一种多孔性物体，在存在内外压力差的情况下，必然引起液体或气体从其高压处向低压处迁移、渗透的现象。这种现象称为混凝土的渗透性。而其抵抗气体或液体的渗透能力则称为抗渗性。

混凝土的渗透性与混凝土的耐久性有极其密切的关系。一般说来，抗渗性好的混凝土，其密实性高，耐久性也较好。混凝土的渗透性直接关系到它的抗碳化能力、抗冻性和抵抗各种侵蚀性介质的耐腐蚀性，而且，对混凝土的收缩与徐变也有很大影响。在钢筋混凝土结构中，若混凝土的密实性差，其抗渗性也差，空气中的二氧化碳容易渗透到混凝土内部，与水泥的某些水化产物起作用，这就是我们常说的碳化。碳化会使混凝土的碱度降低，使钢筋钝化膜遭受破坏，在水和空气同时渗入的情况下，会导致钢筋生锈，混凝土保护层裂缝，甚至使结构物遭受破坏。又如在水工结构中，若抗渗性不好，水很容易渗入混凝土内部，在冬季使混凝土遭受冻害；还有些水工结构，如水坝，经常处在高压水的作用下，水渗入混凝土，易使其内部的某些水化产物，如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 析出，引起溶出型的腐蚀（详见第四章），最终可能导致混凝土的破坏。由此可见，在研究混凝土耐久性问题时，对其抗渗性必须给予充分注意。

2.1 混凝土的孔结构

混凝土的渗透性主要取决于其水泥石的孔结构和集料的性能。水泥石和集料都含有各种大小不同的孔隙和裂缝。但并不是说，

所有的孔隙都是渗透的孔道。在研究混凝土的渗透性时，有的只注意到混凝土的孔隙率，认为这是影响其渗透性的最主要原因，其实并不完全是这样的。混凝土的渗透性不是孔隙率的直线函数，它还与孔隙的尺寸、分布及连续性有关。而且，很大程度上还取决于水泥石的孔结构。

2.1.1 水泥石的孔结构

众所周知，水泥水化是一个非常复杂的化学和物理化学过程，至今很多学者都还在不断深入地进行研究。要用几句话综述水泥水硬化过程的现代理论是十分困难的。但可以简单地说，水泥与水的作用是从水泥颗粒表面熟料矿物的溶解开始，以后进入凝聚结构和结晶结构的形成阶段。其水化产物以凝胶体、亚微观晶体、大晶体的形式存在。它们与未水化的水泥颗粒、水、粗细集料和成型时裹挟进去的大量气泡，组成固、液、气的多相结构。

水泥石就是这样一个含有粗细集料的固、液、气相的多相多孔体。水泥石的孔隙主要由凝胶孔、毛细孔和非毛细孔三部分组成。

1. 凝胶孔

凝胶孔是水化水泥颗粒间的过渡空间。凝胶孔的孔径依其不同的形成条件而波动在一个很大的范围内，大约为 $300 \sim 10000$ nm。凝胶孔的最小孔隙率一般约等于凝胶体积的28%。在结构形成初期生成的水泥凝胶，比水泥水化晚期生成的水泥凝胶具有更大的孔隙率和不同的孔结构，即更多为封闭型的。但随着水泥水化的发展，在后期，由于水分蒸发，其凝胶孔隙率将逐步增加。

虽即如此，水泥凝胶的渗透系数是很小的（一般为 10^{-14} cm/s），属无害孔。但也有的认为，大于 $500 \text{ \AA}$ 的凝胶孔可能引起水渗透。

2. 毛细孔

水泥水硬化到一定阶段，水泥石内部出现毛细孔。它对水

泥石的渗透性影响最大。

毛细孔的形成主要与水灰比的大小有关。初始水灰比越大，水泥水化程度越低，水泥石的毛细孔越大。随着水泥水化的发展，水泥石毛细孔孔隙也是不断变化的。A. E. 谢依金等人的资料说明，随着水泥水化的深入发展，水泥石毛细孔的孔隙率下降（图2-1）。这主要是因为孔的凝胶体的体积比未水化水泥颗粒的体积约大1.2倍的结果。

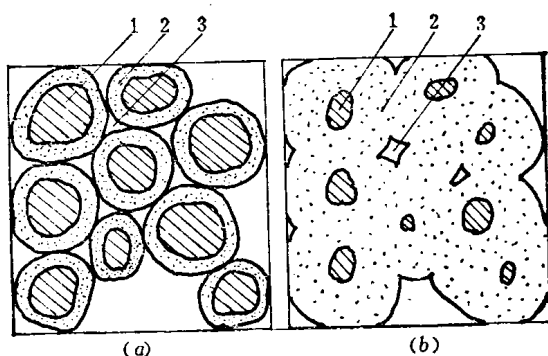


图 2-1 水泥石水化对其毛细孔孔隙率的影响

(a)水化初期，(b)水化后期

1—未水化水泥颗粒；2—水泥凝胶；3—毛细孔

毛细孔的孔径也是因形成条件不同而变化在一个很大范围内。微细孔 $r < 0.1\mu$ ；大毛细孔 $1 \sim 10\mu > r > 0.1\mu$ 。毛细孔的形状多样，难以名状，其体积约估水泥石总体积的 $0 \sim 40\%$ 。

3. 非毛细孔 主要是指水泥石内部缺陷和微裂缝。它可能是由于水泥石的沉缩、温湿度变化、成型条件及其他复杂原因引起的裂缝或孔隙。

2.1.2 混凝土孔结构组成

混凝土的孔结构虽然很大程度取决于水泥石的孔结构，但由于混凝土的构造比水泥石复杂得多。这个复杂性是与原材料质量、施工工艺和周围介质温湿度的变化等一系列因素紧密相关的。

因而，在某些情况下，混凝土的渗透性主要取决于这些复杂性，而不以水泥石的孔结构为转移。在实际工程中，混凝土的孔结构可描述如下（表2-1）：

混凝土孔结构特性

表 2-1

序号	孔隙或缺陷类型	形成的主要原因	典型尺寸	在混凝土可能占有的体积(%)	开孔性
1	大孔洞和缺陷	漏震或震捣不密实	1~50cm	0~5	开放的
2	气孔	1)自然吸入 2)引入的	0.1~5mm	1~3	大部分闭孔
3	毛细孔	水份蒸发形成的	1~50μ	10~15	大部分开孔
4	水平裂隙	内离析、分层	0.1~1mm	1~2	大部分开孔
5	内泌水孔隙	钢筋或集料颗粒间离析	0.01~0.1mm	0.1~1	大部分开孔
6	微型	1)温度的 2)收缩的	1~20mm 1~5mm	0~1 0~0.1	开放的 开放的
7	凝胶孔	水化和化学收缩等	30~3000 Å	0.5~1.0	大部分是闭孔的

1. 大孔洞和缺陷——由于采用干硬性或低塑性的混凝土拌合物，在成型时漏震或震捣不密实所造成的。

2. 气孔——在混凝土成型时吸入，或是采用引气剂、加气剂等化学外加剂，在水泥石或混凝土中形成的气泡或孔隙。

3. 微孔和毛细孔——部分自由水或联结水蒸发后，在水泥石或水泥砂浆间形成的孔隙。

4. 内水平裂隙——由于混凝土拌合物的内离析所造成的。

5. 内泌水孔隙——位于粗集料或钢筋下部，由于水泥砂浆离析、泌水所造成的。

6. 微裂——由于混凝土内温度或湿度梯度所引起的内应力所形成的。

7. 凝胶孔——由于水泥水化时水泥石的化学收缩所造成的。

2.2 主要影响因素

混凝土渗透性的影响因素很多，现将主要影响因素分析如下：

2.2.1 水灰比

水灰比对水泥石、水泥砂浆和混凝土的孔结构影响最大。水灰比越大，包围水泥颗粒的水层越厚。一部分拌合水在水泥石中形成相互连通的、无规则的毛细孔系统，使水泥石的总孔隙率增加。但是水泥的水化是不断地缓慢进行着的，随着硬化龄期的延长，由于某些水化产物填充了一部分初始拌合水占据的体积，混凝土的毛细孔孔隙率和总孔隙率下降。

在相同条件下，随着水灰比增大，毛细孔的半径孔径明显增大。水银压入法的试验说明，水泥石的水灰比越大，其积分孔隙率有规律地增大（表2-2）。П.П.斯都巴钦哥的资料说明，当水灰比大于0.55时，将使混凝土的渗透性急剧增加。

水灰比与孔隙率关系

表 2-2

序 号	水 灰 比	积 分 孔 隙 率	
		cm ³ /g	按 体 积 %
1	0.25	0.105	19.50
2	0.30	0.100	18.90
3	0.35	0.145	24.80
4	0.50	0.219	33.00

2.2.2 水泥细度

在材料和工艺条件相同情况下，水泥细度及其颗粒组成对水泥孔结构有很大影响。

试验说明，使用粗颗粒含量多的水泥（比面积约为 1400cm²/

g)，水化后，水泥石主要是含凝胶孔（ $r = 81 \sim 300 \text{nm}$ ）和大毛细孔（ $10000 \sim 100000 \text{nm}$ ），具有较高的渗透性。采用细颗粒含量多的水泥，除凝胶孔外，生成微毛细孔结构，毛细孔体积大大减少，从而提高水泥石的抗渗性（图2-2）。使用较细的水泥时，需增加其需水量，从而可能导致抗裂性下降，必须引起注意。

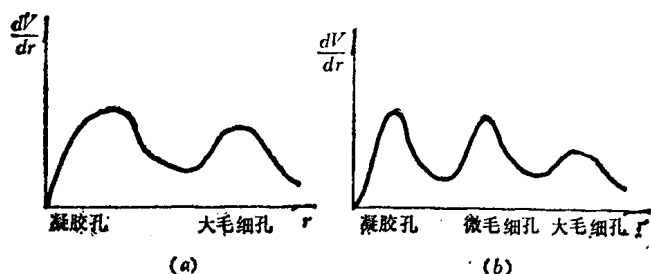


图 2-2 不同半径毛细孔的微分体积曲线
(a) 粗水泥，(b) 细水泥

2.2.3 水泥品种

在相同条件下，各种膨胀水泥和自应力水泥具有最小的渗透性，其次是矾土水泥、普通硅酸盐水泥；较差的是火山灰水泥和矿渣水泥。但由于火山灰水泥混凝土具有明显的膨胀性能，其透水性接近膨胀水泥混凝土。在水泥中如掺有较粗的原状粉煤灰时，其混凝土的抗渗性没有明显改善。但当采用符合标准要求的磨细粉煤灰时，混凝土的抗渗性有所提高，特别是采用超量取代法（即掺入的粉煤灰量大于取代的水泥量）设计混凝土配合比时，混凝土抗渗效果的改善将更为明显。

2.2.4 集料品种

混凝土和水泥石孔结构有很大不同，就是在于混凝土有集料存在。特别是粗集料对其孔结构的影响更大。不同用途的混凝土，其所采用的集料品种有很大不同。普通混凝土一般采用密实的天然岩石作集料；轻集料混凝土则采用多孔的天然的或人造的轻集料。轻集料本身比天然岩石集料具有更大的孔隙率。而且随

其品种不同而变化在很大的范围内，其孔隙率一般为46~76%，并且存在有相当多数量的开口性孔隙，所以，渗透性较好。而普通集料则较为密实，但其品种、质量不同，其孔隙率变化也很大，如石灰岩的孔隙率为0~37.6%；花岗岩为0.4~3.8%，且大多为闭孔型的，因而其抗渗性最好。

2.2.5 成型质量

从混凝土的孔结构特性（表2-1）可以看出，混凝土的成型质量是对其孔结构、渗透性影响最大的因素之一。在实际工程中，即使是配合比设计得很好的混凝土，浇灌成型时稍有不慎，即可能造成混凝土内部的缺陷，降低其抗渗性。何况在实际工程中，往往对混凝土配合比的设计不加重视，而经常是不顾工程对象和原材料的具体情况，任意套用现成的混凝土配合比，使工程质量得不到应有的保证，对混凝土的抗渗性影响更大。这一点对有抗渗要求的混凝土工程切应戒之。

2.2.6 养护条件

养护方法对混凝土的渗透性的影响也是十分明显的。采用水中养护或潮湿养护，水泥水化处于十分优越的条件下，水泥石的毛细孔空间，被吸入的水填满，水泥石中小于10000nm的毛细孔增加，大于100000nm的大毛细孔减少，总孔隙率下降，其抗渗性明显提高。而且随着养护龄期的增加，混凝土的总孔隙率及毛细孔还会逐渐减小。

在采用加热养护时，其养护制度，包括静停时间与条件、升温速度、最高恒温温度，恒温时间和降温速度等，对水泥石的孔结构都有很大影响。静停时间短，升温速度太快，恒温温度太高或降温速度太快，都会导致混凝土渗透性加剧。这主要是由于增加了大毛细孔和出现由于温湿梯度引起内部的微裂所造成的。所以，加热养护的混凝土的耐久性也将大大低于水中或潮湿养护的混凝土。

2.2.7 周围介质

混凝土渗透性能的变化与周围介质的气体和流体的品种有