

沈阳建筑大学

硕士学位论文

水泥混凝土腐蚀破坏机理及防治方法的研究

姓名：范丰栋

申请学位级别：硕士

专业：道路与铁道工程

指导教师：张敏江；王春震

2008-01

摘 要

本文在国内外已研究成果的基础上，根据国内外水泥混凝土腐蚀破坏的现状其特征，结合沈阳地区公路系统水泥混凝土腐蚀破坏的客观现实，通过对水泥混凝土腐蚀破坏机理的分析，提出了导致水泥混凝土腐蚀破坏在水泥及原材料、生产工艺，外部环境等几方面的因素，并针对不同病因对混凝土的破坏问题提出了综合防护办法，从而大大地提高了混凝土构造物的耐久性。本文的研究认为：混凝土的腐蚀破坏是水泥成分、混凝土原材料、生产工艺、外部环境等多种内外因素共同作用的结果。只有真正弄清不同条件下混凝土破坏的主因和次因，分别采取相应的内因调整和外因防护相结合的综合治理办法，才能确保水泥混凝土耐久性的提高。

本文系统分析了水泥成分及不同条件下水泥混凝土对水泥的选择，除冰、雪剂成分及对混凝土的腐蚀作用机理，以及镁盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、淡水侵蚀、碳酸侵蚀、氯盐侵蚀、碱集料反应机理及破坏形式。本文提出了通过设计控制、施工控制提高混凝土自身“免疫力”的重要性，提出了一系列能够有效预防水泥混凝土腐蚀破坏的方法和手段。本文的结论性成果，已经一系列的室内实验所验证，并在不同施工现场付之实践，效果良好。

本文的研究结果，广泛适应于普通混凝土的全面应用，具有巨大的经济、社会和环境效益。

关键词：水泥；混凝土；腐蚀破坏；机理；防治

Abstract

On the basis of the study result from other countries, in light of the current status and features of cement and concrete corrosion at home and abroad, combining the actual situation of cement and concrete corrosion damage in the road system of Shenyang, and through analysis for cement and concrete corrosion damage mechanism, this thesis points out some factors regarding such as cement, raw materials, manufacture process, external environment that lead to cement and concrete corrosion damage, and brings out integrated prevention methods aiming at distinct reasons, so that the durability of concrete construction can be greatly improved. In this thesis, it is studied that cement and concrete's corrosion damage are caused by the various internal and external factors all together. Only the main and secondary reason of cement and concrete in different environment are figured out, and corresponding integrated prevention methods to adjust internal reason, prevent external reason accordingly are adopted, can their durability be improved.

Cement component and cement concrete's election for cement in different conditions, deicing agent and snow-melting agent component and concrete's corrosion mechanism, magnesium salt corrosion, sulfate attack, fresh water erosion, carbonic acid attack, chlorine salt erosion, alkali-aggregate reaction mechanism and damage style are analyzed systematically in this thesis. The importance to improve concrete 'immune' system by design control, construction control was put forward in this thesis, along with a series of methods and means that can prevent cement concrete corrosion damage. The conclusion in this thesis has passed a series of validate in some in-house lab, and has been put into practice in different construction site, the effect proved quite good.

The study result in this thesis suits all-around application for ordinary concrete, and has great economical, social and environment benefits.

Key words: cement, concrete, corrosion damage, mechanism, prevention

声 明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下独立完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其它学位而使用过的材料。与我共同工作过的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

日 期：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解沈阳建筑大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权沈阳建筑大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。（如作者和导师同意网上交流，请在下方签名；否则视为不同意。）

学位论文作者签名：

导师签名：

日 期：

日 期：

第一章 绪 论

1.1 课题研究的背景和意义

1.1.1 研究背景

随着经济的快速发展，大规模城市基础设施建设，大型水利、地下空间和海洋开发，国家高速铁路和公路网建设等重大工程，需要我们提供大量、高品质的混凝土。现代工程混凝土除了必须满足工程设计的力学强度要求外，还应该具有良好的耐久性，以确保工程的安全性和长寿命。但是，越来越多的工程实践表明，混凝土的腐蚀破坏问题日见突出，许多混凝土工程尚未达到设计寿命就显现出各种病害，甚至发生严重事故。据统计，建筑、交通、公共设施的腐蚀损失，占到总腐蚀损失的一半以上（而一座桥梁腐蚀破坏，其间接损失可能是直接损失的十倍！）。随着建筑物的老化和环境污染的加重，钢筋混凝土结构耐久性问题越来越引起国内外广大研究者的关注。

1.1.1.1 国外的水泥混凝土腐蚀现状

在美国，早在上世纪五十年代腐蚀损失的影响就显露出来，那时每年腐蚀损失 60-92 亿美元。1976 年腐蚀损失为 820 亿美元，占国民经济总产值（GDP）的 4.9%；1996 年美国腐蚀损失为 3500 亿美元，占国民经济总产值（GDP）的 4.2%（超过军费开支，大于风、水、火灾损失的总合！），美国人每人每年承担 1 千多美元的腐蚀损失。另有报告说，腐蚀损失可占到国民经济总资产的 6 %。

美国 1984 年报道，仅就桥梁而言，57.5 万座钢筋混凝土桥，一半以上出现钢筋腐蚀破坏，40%承载力不足和必须修复与加固处理，当年的修复费为 54 亿美元；1988 年报道，钢筋混凝土腐蚀破坏的修复费，一年要 2500 亿美元，其中桥梁修复费为 1550 亿美元（是这些桥初建费用的 4 倍）。加拿大早期大量使用除冰盐，使钢筋混凝土桥梁等破坏严重。欧洲、澳大利亚、海湾国家等，都有以氯盐为主的钢筋腐蚀破坏问题，其中英国修复费为每年 50 亿英镑。韩国曾发生一系列建筑物破坏、倒塌事件，其中很多也与“盐害”有关。

美国腐蚀损失的巨大，引起美国政府的高度重视，并制定控制腐蚀的战略对策，使腐蚀损失逐步减了下来。2001 年公布的腐蚀损失仍然达 2760 亿美元，占国民经济总产值（GDP）的 3.1%。其中交通公共设施占 34.9%，建筑业占 18%（两项合计占 52%！），制造业占 31.5%。间接影响比直接损失大得多。对于桥梁破坏，影响交通等间接损失可能比直接损失大 4—10 倍。

1991 年美国技术评估中心确认美国基础设施总资产为 1.4 万亿美元，而每年的修复花费是 1400 亿美元，占总资产的 10%。十年的修复花费就与总资产持平，若保持基础设施正常运转四十年，则需要花费四倍的总资产费。

2000 年，美国直接腐蚀损失为 4400 亿美元，占 GDP 的 5%，较 1995 年增加 48%，其中交通和公共设施占 32%。间接损失 8000 亿美元。

英国 30 年来，腐蚀损失平均占 GDP 的 3.5%左右，其中基础设施占很大部分。现有桥

梁中的 35—40% 必须修复，每年费用许多亿英镑；澳大利亚每年腐蚀损失为 250 亿美元，占 GDP 的 4.2%，基础设施占主要部分。德国每年腐蚀损失为 800 亿美元。

印度向腐蚀宣战！每年腐蚀损失达 2400 亿卢比，材料生产量的 10% 用于更换被腐蚀的材料。

波兰腐蚀损失占 GDP 的 6—10%，是西方国家的 2 倍以上。通过立法和宣传，至少一半的损失可以挽回，1997 年曾提出“防腐蚀战斗计划”，以对付腐蚀危害和作为增加 GDP 的战略措施。

日本是腐蚀损失比较小的国家，大约占 GDP 的 1—2%。得益于重视腐蚀问题，也客观说明腐蚀是可以控制的。

以上涉及到日、美、英、德、加拿大、澳大利亚、印度、波兰等 8 个国家有关总腐蚀与基础设施腐蚀，对于国民经济影响的数据与资料。可以明白地看出，腐蚀对国民经济的影响是巨大的，一般可占到国民经济总产值（GDP）的 3-4%。日本比较重视能源、资源和腐蚀控制，因此，腐蚀损失小；而有些国家、特别是发展中国家，由于认识与重视不够、技术措施不力等原因，其腐蚀损失可能更高（如印度、波兰）。另外，基础设施腐蚀损失在总腐蚀损失总占有很大比例，基础设施的腐蚀破坏，已经成为当今世界突出的问题。

2001 年 4 月，在美国举行了“基础设施腐蚀控制专题讨论会”，基础设施的危险性成为会议的焦点。会议得出以下基本看法：

（1）腐蚀对国民经济的影响是巨大的，技术先进国家可占到国民经济总产值（GDP）的 3-5%，有些国家可能更高（可以设想，若要使一个国家的 GDP 提高一个百分点有多大难度、需要花费多大气力，就应该掂量出这 3-5% 的腐蚀损失的分量）。

（2）基础设施腐蚀损失，在总腐蚀损失总占有很大比例（仅与钢筋腐蚀相关联的可能占到 40-55%）。特别是以桥梁为代表的钢筋混凝土基础设施的腐蚀破坏，成为当今世界突出的问题；

（3）基础设施腐蚀损失虽然不是完全可以避免的，但其中一部分（30-50%）是可以避免和挽回的。其中极其重要的，是人们认识到腐蚀防护的重要性与长远经济意义、自觉采取防护措施（单就基础设施而言，通过教育、法律法规和通常的防护措施，就有可能避免或挽回一个百分点（GDP）的经济损失，这类同于国家 GDP 提高一个百分点！）。

更可怕的是，2006 年，曾有大量媒体连续报道了发生在美国阿拉斯加油田停产的消息。实际上，是因输油管道发生腐蚀，造成大量漏油，不得不宣布油田关闭。这一事件立即引起了世界性轰动。该油田是美国大油田之一，占阿拉斯加产油的 50%。正值世界石油价格不断攀升的敏感时期，因管道腐蚀而关闭该油田，震动世界的效应立即表现出来，包括：——全球石油价格飙升、股市下跌，媒体报道，在关闭该油田的消息推动下，国际原油价格大幅飙升。纽约商业交易每桶突破 77 美元大关，伦敦交易所也大涨至每桶 78.3 美元；同时，道琼斯工业平均指数下跌 20.97 点，那斯达克综合指数下跌 12.55 点，标准普尔 500 指数下跌 3.59 点，油价飙升冲击了日本股市，导致日本股指大幅下挫 2.3%，伦敦证交所跌逾 2%。严重的管道腐蚀，使美国突然削减了每日 40 万桶的石油产量，对美国国内原油

生产构成重大打击。美国能源部立即作出反应，表示在需要的时候动用政府战略储备。该油田外输石油管道，在本次停产之前已经发生多次原油泄漏事件，直接原因是管道内部腐蚀而发生破裂。这次泄漏的原油至少是 4785 桶，污染了 1.9 英亩土地。仅仅清理油污染的费用就大于 600 万美元。该次输油管道腐蚀事件，所造成的经济损失是巨大的，包括停产带来的直接、间接经济损失，恢复生产所需要的工程、材料，人力、物力等的花费。看了以上真实事例我们会感到，腐蚀可不是个小问题，不可等闲视之。表 1-1—表 1-4 列举了国外混凝土腐蚀破坏实例及原因分析。

表 1-1 国外混凝土中钢筋锈蚀实例及其分析

工程简介	破坏情况	原因分析
20 世纪 30 年代美国俄勒冈州 Alsea 海湾上的多拱大桥	施工极好，但因水灰比大，钢筋广泛严重锈蚀引起结构破坏，用传统局部修补方法处，不久钢筋加剧锈蚀破坏，不得不拆除、更新	水灰比太大
20 世纪 60 年代美国旧金山海湾 San Mateo-Hayward 大桥	虽采用优质的混凝土 ($W/C = 0.45$, $C = 370\text{kg}/\text{m}^3$), 但由于梁体尺寸大 (高 3.75 m, 宽 1.8 m), 底部配筋密, 加上蒸养引起微裂缝, 给钢筋锈蚀造成了必要条件, 因此发生了严重锈蚀	梁体尺寸大底部配筋密; 蒸养引起微裂缝
20 世纪 60 年代 Gjorv 调查挪威海边 700 座混凝土结构	在浪溅区, 立柱断面损失率大于 30% 的占 14%, 断面损失率为 10% ~ 30% 的占 24%; 板和梁显示钢筋锈蚀引起严重破坏的占 20%。	冻融作用引起非引气混凝土开裂; Cl^- 侵入加剧混凝土钢筋锈蚀
阿拉伯海湾和红海的大量混凝土结构	沙特 Jubail 输送冷却用海水的预应力混凝土虹吸管, 在完全投入使用之前, 就不得不因钢筋锈蚀而修补; 1973 ~ 1975 年建造的阿联酋迪拜 A1-Shindagha 海底隧道, 1986 年就修补, 修补费用为建造费的 2 倍; 新建的阿布扎比干船坞也因钢筋锈蚀严重破坏	严重的侵蚀环境; 石灰石多孔易受氯化物侵蚀; 施工差, 强度低 (20MPa), 密实性差, 保护层薄 (50mm), 养护不够; 使用抗 Cl^- 侵蚀差的抗硫酸盐水泥
澳大利亚 Sharp 调查 62 座海岸混凝土	查明耐久性的许多因素与海溅区的钢筋异常严重锈蚀有关, 特别是昆士兰使用 20 年以上的混凝土结构的桩帽	海溅区
德国柏林议会大厦	预应力混凝土屋顶倒塌, Isecke 的调查表明预应力钢丝周围水泥浆体灌注不好, 导致析氢应力腐蚀破坏	析氢应力腐蚀破坏

表 1-2 粉煤灰混凝土抗钢筋锈蚀实例

工程简介	设计措施	抗钢筋锈蚀性能
美国佛罗里达州一座跨海桥梁“阳光”高架桥	下部大体积混凝土结构采用粉煤灰代 50%水泥的混凝土,用以提高耐久性和降低水化热及热裂危险;其上部结构则采用掺 20%低钙粉煤灰和 5%~10%硅灰,同时掺高效减水剂与 NaNO ₂ 阻锈剂,水灰比 0.35,胶凝材料总量为 340kg/m ³ ,是 C45 高性能混凝土	该州公路管理局发现质量不好的环氧涂层钢筋在几座跨海大桥发生异常严重破坏后,决定在以后新建桥梁工程中采用这种基本对策
1974 年挪威与英国在北海建造 25 座预应力混凝土平台	普遍采用掺优质粉煤灰,同时掺高效引气减水剂的 C50 高性能混凝土,水胶比在 1974 年为 0.41,最近采用 0.38。虽然采用滑模施工,但施工质量控制严格	至今 20 余年,多次调查表明,除因落体撞击造成局部损坏外,钢筋完全未锈
跨英吉利海峡的 Channel 海底隧道	该隧道外面水头压力有 100m,是盐水,里面是富集氯化物的潮湿大气,既热又供氧,通风与通车使其频繁地干湿交替,是十分恶劣的钢筋锈蚀环境,设计寿命是 120 年,在英国侧采用水胶比为 0.33 的 C60 粉煤灰混凝土,优质粉煤灰代水泥 30%,蒸汽养护	钻取芯样,从切片上实测氯化物扩散系数平均为 10~9 cm ² /s
在建丹麦跨波罗的海海底隧道,设计寿命为 100 年	受到柴油机车废气 CO ₂ 和来自海水是 Cl ⁻ 侵蚀。采用水胶比 0.35,掺粉煤灰和硅灰、高效减水剂	实测这种混凝土不仅具有高的抗 Cl ⁻ 渗透性,而且有极高的电阻率,使钢筋锈蚀受到保护
美国 Naik 等从 1984 年开始研究大掺量高钙粉煤灰混凝土	粉煤灰代 50%水泥的几种混凝土,2 个月龄期时,Cl ⁻ 扩散系数属中等(2000~4000C);3 个月龄期降为低等(1000~2000C);1 年龄期,除基准混凝土为 1170C 外,掺粉煤灰混凝土降为很低(230~650C);1 年路用后实测表明只有 188C,可与硅灰混凝土相比	抗钢筋锈蚀性能强
Thmas 调查英国 2~23 年的 7 座钢筋混凝土结构	有 2 座为撒除冰盐的路桥工程,一道防海浪堤,一道挡水墙,三座大坝。所有场合,掺粉煤灰混凝土比普通混凝土强度高,氧渗透率低,龄期为 2 年的碳化深度高,但龄期大于 10 年的碳化深度相近,内部 Cl ⁻ 含量低	抗钢筋锈蚀强,但抗碳化能力相当

表 1-3 矿渣混凝土抗钢筋锈蚀实例

工程简介	设计措施	抗钢筋锈蚀性能
欧洲许多国家规定	硅酸盐水泥用于海工混凝土结构时，一定要掺大量的粒化高炉矿渣	
荷兰 1979 年对使用 3~63 年的 64 座大掺量矿渣海岸钢筋混凝土调查	仅少数是因钢筋锈蚀引起的破坏，且这些锈蚀结构均系使用期较长、保护层偏薄（<45mm），大多数碳化深度只有 5mm， C_{1-} 扩散系数只有普硅水泥的 1/10~1/15	抗钢筋锈蚀性能优异
荷兰 2 座大型海工预应力钢筋混凝土结构	一座为设计寿命为 250 年的荷兰三角洲的东谢尔德巨型消浪挡潮闸工程，采用大掺量（65%）的矿渣混凝土，水胶比为 0.4，集料健全，保护层厚 70mm。现使用 10 年，只有安置预应力混凝土块体时抛石造成的局部损伤。另一座为设计寿命为 150 年的沙特—巴林高速公路上的跨海大桥，中东海湾地区，气候炎热、干燥、风大，而夜晚又易结露，钢筋锈蚀环境特别恶劣。采用大掺量（65%）矿渣混凝土，水胶比为 0.38，阿联酋火成岩优质集料，拌和与养护均采用蒸馏水，配筋设计考虑防止热裂问题，充分湿养护，预应力混凝土桥墩表面加涂环氧涂层。10 年后检查所有结构，除发现有 3 道很细的裂缝（可能是日夜温差大引起的热裂）外，尚无钢筋锈蚀的任何迹象	取得举世瞩目的成就，国际预应力学会（FIP）曾组织国际性学术会议代表专门参观
英国跨泰晤士河大桥	为防止钢筋锈蚀和地下水对混凝土的腐蚀以及混凝土早期水化热引起的热裂问题，对该桥下部结构采用掺 70% 矿渣混凝土	该桥获英国优秀土木工程奖
Beweja 1987 年对澳大利亚已使用 10~28 年的 10 座钢筋混凝土建筑调查	采用硅酸盐水泥、矿渣、粉煤灰用量分别为 120 kg/m ³ 、120 kg/m ³ 、100 kg/m ³ ，水胶比为 0.65 的混凝土，使用 28 年后表现普遍良好，仅个别地方有钢筋锈胀破坏迹象，而采用低热纯硅酸盐水泥，水灰比也为 0.65 的混凝土，使用 28 年后已广泛严重锈蚀胀裂、剥落	
日本明石跨海大桥	矿渣 40% + 粉煤灰 20%+硅酸盐水泥 40% 同时掺高效引气减水剂和掺石英砂来改善海砂级配、减少泌水率，水胶比为 0.33，砂率为 0.45	

表 1-4 硅灰混凝土抗钢筋锈蚀实例

国名	结构物名称	建造年份	环境	使用目的	配比设计参数
挪威	受浮筒的基础、储油库	1981	北海	耐久性、抗钢筋锈蚀	MS=10% f ₂₈ =71.5MPa
美国	道路路面	1983 ~ 1984	重交通荷载	长期耐久性、抗钢筋锈蚀、抗冻、早强	C=450 MS=10% f ₁ =40MPa f ₂₈ =98MPa
瑞典	码头	1976 ~ 1978	受海浪冲击的码头	耐久性、耐磨、高强度、抗钢筋锈蚀	C=350 MS=15% f ₂₈ =61MPa
挪威	谷仓	1979	海港区	抗钢筋锈蚀耐久性	C=280 MS=15% f ₂₈ =37.7MPa
挪威	桥面板	1971	受 SO ₂ 污染的海边	抗钢筋锈蚀防 SO ₂ 侵蚀	C=316 MS=12% f ₂₈ =48MPa
美国	海岸护坡	1984	海水侵蚀、冻融	抗钢筋锈蚀护坡	C=450 MS=10% f ₂₈ =89MPa 钢纤维 75kg/m ³
挪威	隧道	1982 ~ 1984	高抗渗、耐腐蚀	抗钢筋锈蚀、高强、高抗渗、减少回弹	C=450 MS=10% 钢纤维 75kg/m ³
日本	钻井平台	1984	海洋工程	抗钢筋锈蚀、高强、高耐久性	f ₂₈ =40MPa

可喜的是，从 1987 年世界第一次混凝土耐久性会议召开以来，到 2003 年第六次国际混凝土耐久性会议在希腊召开，数年来，混凝土耐久性问题一直是世界关注的焦点之一。这是一个带有普遍性、实际性问题，与国民经济和可持续发展紧密相连。许多国家投入大量人力、物力，以期望解决这个世界性问题与难题，同时也取得长足的进展。

1.1.1.2 我国现状

我国建筑与基础设施面临着三个方面的腐蚀危害：来自大环境（自然环境——大气、土壤、水、温度、湿度等），来自小环境（如工业环境中的酸、碱、盐，气、液、固、粉尘等腐蚀介质）以及来自人为制造的腐蚀环境（污染、酸雨、撒盐、滥用海砂等）。与国外比较，我们的腐蚀环境更为严酷，我们的认识、技术与管理水平还不够高，我国建筑与

基础设施的耐久性与使用安全，将面临更为严峻的考验。

我国在五六十年代，由于要求早强或防冻而掺用过量氯盐的钢筋混凝土结构，因钢筋锈蚀引起混凝土顺筋开裂、剥落、构件破坏的事例屡有发生。八十年代，由于混凝土外加剂的应用不当或施工和原材料质量等原因，钢筋混凝土的腐蚀也不断出现。1981年调查的华南地区18座海港钢筋混凝土码头中，钢筋锈蚀破坏或不耐久的就是十占八九，基本完好的只有2座。短的只使用七年，如珠江5万吨级油码头建于1974年，到1981年已普遍出现顺筋裂缝，如珠江港一区码头建于1956年，到1981年已产生大面积的混凝土剥落。表1-5列举了国内混凝土钢筋腐蚀实例及原因分析。

表 1-5 国内混凝土中钢筋锈蚀实例及其分析

工程简介	破坏情况	原因分析
哈尔滨—大庆公路	建成5年后，混凝土出现异常严重的顺筋胀裂、剥落和层裂	撒除冰盐化雪
北京、天津的许多立交桥	虽撒除冰盐没有美国北方频繁，但使用时间不长而暴落出严重的钢筋锈蚀破坏	撒除冰盐
1999 作者调查湖北东荆河大桥	20世纪70年代修建时掺大量CaCl ₂ 早强剂，施工质量很差。80年代钢筋严重锈蚀而大修：凿除混凝土外层，钢筋除锈，加焊钢筋网，喷射掺NaNO ₂ 的混凝土保护层。1999年又严重锈蚀，锈水外流	掺大量的CaCl ₂
浙江水科所调查宁波、舟山、温州的挡潮闸	从混凝土样品分析知C1 ⁻ 含量占砂浆质量的0.35%，尤其是施工质量差的混凝土才运行1~2年就顺筋胀裂	C1 ⁻ 含量高； 施工质量差
1985 年李秉实等调查华北地区使用1~57年的66座海港钢混码头	北方海港上部结构普通存在不同程度的钢筋锈蚀引起的结构破坏。20世纪50年代修建的，大部分梁板已严重损坏；60年代修建的，一般尚好；70年代以后修建的，主要由于施工质量差或使用不当（超载或受撞击）才造成钢筋锈蚀损坏	设计强度过低； 水泥用量过少； 保护层薄； 梁板接缝处理不当； 施工质量差； 海水腐蚀
1988 年许冠绍等调查40座淡水钢筋混凝土水闸	因碳化引起钢筋锈蚀而导致上部结构破坏的占62%，破坏严重的占22%，特别是1958~1960年和1966~1976年间修建的（如万福闸、嶂山闸）混凝土碳化普遍达到5~6cm	碳化严重； 设计标准低； 施工不符合标准，水灰比大

续表

工程简介	破坏情况	原因分析
我国大多数工业厂房	化工、冶金工业的选矿、烧结、焦化、 化工、冶炼、铸造、电解等生产环境许 多结构使用不到 5~10 年即出现钢筋锈 蚀引起结构破坏	高温、潮湿、酸盐等 侵蚀性环境； 杂散电流； 重载

单说石油管道，至 2003 年底，我国油气管道累计长度 45865 公里（居世界第六位）。到 2005 年，西气东输、陕京二线、忠武线三条输气干线，川渝、京津冀鲁晋、中部、中南、长江三角洲等的区域管网基本完成。而管道腐蚀，将是我们面临的重大问题。有报道说，所发现与管道泄漏有关的大量事故中，腐蚀因素可能占 70%-90%。而且腐蚀是量大面广的，除油气管道外，我国城市地下管道的腐蚀问题不容乐观；桥梁、道路、码头等基础设施的腐蚀，更是直接影响经济发展与人民生活。核电、航空航天等更不能有半点的忽视；工业、民用、个人生活，无处不与腐蚀有关。总之，腐蚀是与国民经济的发展紧密相连的，同时又与能源、资源、污染等密不可分的。应该用战略的眼光看待腐蚀问题。重视和做好防护腐蚀工作，能够给国家、社会创造巨大财富和良好环境；不然，则会造成巨大经济损失、危机环境、带来严重社会问题。

根据《中国腐蚀调查报告》一书提供的数据，我国年腐蚀损失约占国民经济总产值（GDP）的 6%，（表 1-6 列出了直接损失数值，其间接损失应大于、等于直接损失）。按此，在 2000 年前，我国可能年腐蚀损失在 5000 亿元左右，如果按 2006 年 GDP 的 6% 计算，年腐蚀损失可达上万亿元！这是一个令人吃惊的数字！通过强化腐蚀防护工作，至少可挽回 3000-5000 亿元的损失，这也是一个不小的数字！假如将节省下来的这批巨款用于教育、科技、扶贫或投资新的建设项目，那对国家的贡献将是多么巨大！见表 1-6

表 1-6 我国几个主要行业（部门）的直接腐蚀损失调查结果

行业（部门）	腐蚀损失（亿元）
化学工业	200
能源工业	172.1
交通	303.9
建筑、基础设施	1000
机械	512.43
合计	2288.43

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

英国、法国和欧洲其它地区以及其他一些国家土壤中含有大量的硫酸盐。在美国和加

拿大的很多地区，土壤中也常常含有百分之几的硫酸盐。在北美洲的碱性土壤地区，很早就发生过混凝土下水道、排水渠、混凝土基础、涵洞和其它混凝土结构的破坏情况。20世纪初，美国和加拿大对硫酸盐侵蚀问题首先开始进行研究。多年来，国际上，关于水泥混凝土防腐课题论述很多，其中以著名专家梅塔教授（R. K. mehta）的研究为主要代表，他的理论是“钢筋腐蚀是钢筋混凝土结构破坏的主要机理，占50%以上”。表1-7列举了部分主要论述。

表 1-7 国际上关于混凝土腐蚀问题的主要论述

时间	作者	研究要点	备注
1996	谢斯托朴洛夫	混凝土的耐久性	科学出版社
1991	Strecker pp.	混凝土腐蚀破坏的评估与修补	冶金工业出版社
1991	F.D.莱登	混凝土配合比设计	人民交通出版社
1986	Weiss S M K C A	专家系统设计实用指南	吉林大学出版社
1990	British Transportation Ministry	Repair and Maintenance of Midlands Link Express	
1996	Dhir R K	Chloride Binding in GGBS Concrete	
1995	Zhong Luo, et al	Graph Transformatin Expert System(GETS)	
1987	Sentler L.	Service life predictions of concecetes	
2003	冯乃谦	日本混凝土耐久性问题的历史发展及对策	

1.2.2 国内研究现状

在我国的沿海地区、西部的重盐渍地区以及东北地区，硫酸盐侵蚀是一种非常严重和常见的现象。海岸、港口的混凝土，西北、西南地区的许多电站、大坝、隧道均出现严重的硫酸盐侵蚀。八盘峡电站、盐锅峡电站遭受硫酸盐侵蚀比较严重，混凝土多处出现膨胀开裂、剥落现象，排水孔和排水沟的强度接近于零，李家峡水电站在钻孔的时候也发现硫酸盐侵蚀问题。新疆克拉玛依市内的立交桥等建筑物，青海湖周围环境中的混凝土结构，如码头、电线杆、护栏等，到处可见由于硫酸盐侵蚀引起的混凝土开裂、钢筋外露现象。这些地区的混凝土建筑物遭受硫酸盐侵蚀严重的即出现“一年粉化，三年坍塌”现象。我国的天津、河北、山东等省市，还有大片盐碱地，这些地方的混凝土结构物也由于硫酸盐腐蚀而产生严重的破坏。我国盐渍土地区是石油、各种矿产的主要产地，是基本建设的重要基地，是交通运输的必经之路。沿海地区的经济高速发展和基本建设，西部大开发战略的实施过程中，防止硫酸盐对基础设施的腐蚀，确保安全生产，是混凝土耐久性工作者的

重要任务之一。我国从 50 年代开始关注水泥混凝土侵蚀问题，并开始展开了一系列的研究工作。表 1-8 列举了部分主要论述。

表 1-8 国内关于水泥混凝土腐蚀问题的主要论述

时间	作者	研究要点	备注
1996	刘崇熙	三峡大坝混凝土耐久寿命 500 年的设计构思	
1989	黄土元 陈联荣	混凝土抗抗冻性与其气泡结构	上海建材学院学报
1996	立金玉 曹建国 徐文雨等	混凝土冻融破坏机理的研究	中国建筑出版社
1999	王超 郭荣泰 杨全兵	水泥混凝土路面现场撒盐破坏试验研究	
1991	钱春香	专家系统在水泥混凝土领域的应用	
1985	吴科如	混凝土破坏机理概论	
1992	蔡光汀	钢筋混凝土腐蚀机理和防腐措施探讨	
1990	龚洛书 柳春圃	混凝土耐久性及其防护修补	卑贱建筑出版社
1998	洪定海	混凝土中钢筋的腐蚀与防护	
1991	普勒	混凝土腐蚀破坏的评估与修补	
1993	王济川	建筑物的损伤诊断与对策	中南工业大学出版社
1990	杨崇毫	建筑材料的腐蚀及控制设计	水电水利出版社
2002	邓敏	碳酸盐反应活性的新快速鉴定方法	南京工业大学学报
2003	邓敏	碳酸盐反应活性快速试验方法的比较研究	

在国际上享有盛誉的,还有中国著名腐蚀专家洪乃丰,他著有《钢筋阻锈剂的发展与应用》、《钢结构腐蚀防护技术及其发展》等著作。并在建筑腐蚀与可持续发展一文中曾经阐述了海洋环境与撒氯盐环境的混凝土腐蚀的影响:

(1) 海洋环境

中国具有超过 1 万公里的海岸线、大量岛屿,南方高温高湿,北方存在冻融问题。海水、海风、海雾中所含的氯盐将对钢结构、混凝土结构等造成腐蚀危害破坏(称作“盐害”)。

我国早期的调查资料表明,处于海洋环境下的钢结构、混凝土结构腐蚀是严重的,许多建筑物远达不到设计寿命,或反复修复,或提前重建,经济损失巨大。海洋环境中,工程结构防腐蚀措施的有效性,成为结构耐久性的关键因素(是当前几座大型跨海桥设计寿命的论证中心议题)。我国正在建设一批寿命要求上百年工程结构物,其中对付“盐害”的防护措施是关键技术之一。

(2) 撒氯盐环境

我国广大北方地区（可占国土面积的 1/2），冬季都要向路、桥、城市街道上撒盐，借以保证交通畅达与公共安全。目前我国使用的“融雪剂”中，氯盐仍然是主要成分。氯盐具有很强的腐蚀性，金属结构、混凝土中钢筋、排水装置以及地下管线等加速腐蚀。盐促进冻融作用，也是混凝土破坏的重要因素。这是另一类“盐害”，是人为造成的腐蚀环境，也是一个世界尚未解决的难题。由于氯盐化冰雪效果最优、价格最低，预计在一个时期内，还是要继续使用氯盐类融雪剂，这可能是人们无奈的选择。然而，国外在吃过大亏之后，对于此类“盐害”，重点转向为对结构强化防护的方针，而我国则还没有。忽视这一方面的“盐害”，半个中国的基础设施要“吃大亏”。

碱集料反应（AAR）问题，是水泥混凝土腐蚀破坏的另一重点。混凝土一旦遭受 AAR 破坏就很难修补，也难以阻止破坏的进一步发展，避免 AAR 造成重大危害的唯一可行办法就是采取措施进行预防。在世界各国有关减小 ASR（碱-硅酸反应）危害的规范和标准中，普遍建议通过控制混凝土的碱含量来防止混凝土的破坏。混凝土碱含量的降低可通过使用低碱硅酸盐水泥、低碱外加剂、或掺用混合材料来实现。考虑到经济方面的原因、有限的集料资源和最大限度地利用资源以保持持续发展，国际上普遍认为，采用混合材料抑制混凝土中 AAR 破坏是解决问题的最经济、有效和实用的途径，且高掺量粉煤灰混凝土和超细微粉混凝土是国际上重点研究和发展的主要方向。如通过工程试验或实验室试验证明混合材料能长期有效抑制 ASR 膨胀、破坏，也可不控制混凝土的碱含量。目前还有建议采用化学外加剂如锂盐来防止 ASR 破坏的，工程短期应用效果良好。对于白云质集料，通过内外资料均表明，低碱硅酸盐水泥、混合材料和化学外加剂的使用均不能有效的抑制其膨胀破坏，防止 ACR（碱-碳酸反应）的破坏一直是一个国际上没有解决的问题。而低碱硫铝酸盐水泥对于 ACR 具有抑制作用，这为活性碳酸盐集料的使用提供了一条可行的途径。有关混凝土 AAR 的研究已经历了 60 多年，到 2004 年在北京举行的国际混凝土碱集料反应会议，已就 AAR 进行了十二届国际专题会议。研究工作主要集中在 ASR 的反应和膨胀机理、集料碱活性的评定方法、碱集料反应的抑制措施。最近开始研究碱集料反应破坏工程诊断、碱集料反应对混凝土结构性能的影响、碱集料反映破坏工程修补、维护和管理办法。有关 ASR 的研究已取的大量的成果，发表研究论文接近 3000 篇，各国已就该问题制定了相应的规范或标准，但在一些方面的研究还有待深入，结论还需进一步进行论证。有关 ACR 的研究主要集中在 20 世纪 60 年代和 90 年代至今，已就机理、鉴定方法、防治措施等方面进行了卓有成效的研究工作，但还不够完善、系统和深入。

1.3 本文主要工作

本文以水泥混凝土构造物为研究对象，主要研究内容如下：

- （1）常见水泥特性及其水化反应机理；
- （2）除雪剂成分分析及其化学作用原理；
- （3）水泥混凝土镁盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、碳酸盐侵蚀的作用原理及破坏程度分析；
- （4）钢筋混凝土氯盐腐蚀机理分析；

- (5) 水泥混凝土碱集料反应及“D”开裂的原理、破坏特点及防治规律； 13
- (6) 水泥混凝土腐蚀破坏、冻融破坏的防治手段的设计及实验验证；
- (7) 各种原材料的选择、构件的加工制作、特殊环境的防腐处理

1.4 技术路线

为深入研究混凝土构造物的使用性能及破坏原因，课题组从调查、分析开始，经过了现场调研，室内试化验，技术设计、效果检验复查，实验段推广、撰写成果报告等详细的技术路线。如图 1.1。

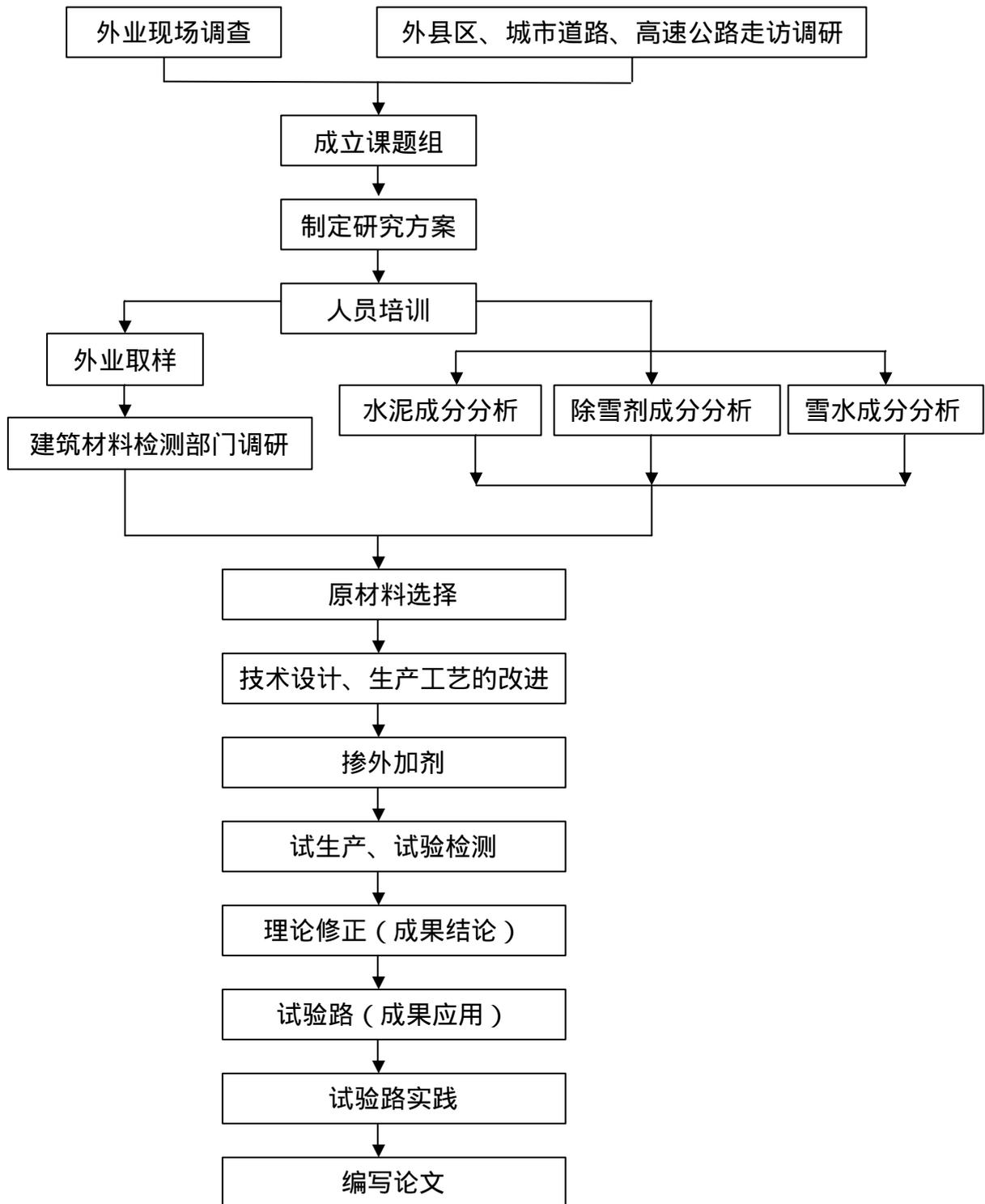


图 1.1 技术路线框图

1.5 小结

本章通过对世界上具有代表性的几个国家及我国水泥混凝土腐蚀破坏现状的剖析，说明了水泥混凝土腐蚀破坏的严重危害性，影响广泛性以及防治的迫切性和重要性。同时，概括介绍了国内外在水泥混凝土防腐治理方面所做的努力及目前的研究现状。最后，介绍了本文的主要工作及技术路线，为全面把握论文的研究背景，研究内容及基本思路，做了概要性的介绍。

第二章 沈阳地区水泥混凝土结构物腐蚀破坏的调查

2.1 概述

混凝土和钢筋作为主要建筑材料，在工业、民用、运输和其他建筑物、构筑物的建造中起了很大作用。用混凝土和钢筋混凝土建造的建筑物和构筑物中的很大一部分，在使用期间常常受到腐蚀介质的侵蚀。如果建筑物在建造时对结构材料不采取或不实施防腐措施，则腐蚀性介质就可能损坏建筑结构，甚至使其丧失使用价值。这对于工业构筑物尤为密切，因为在工业构筑物中，建筑结构直接与液态、气态等介质接触，或者被产品和生产中排放的废料所污染。在有色冶金、化学、纸浆及其他工业部门中，约有 20-70%的构筑物常常受到腐蚀性介质的作用，并由此引起结构材料的腐蚀。同样，农业建筑物，它们会受到腐蚀性有机物的腐蚀。外部介质的腐蚀性越强，在建筑物进行设计、建造和使用时对其腐蚀作用考虑的越少，那么由腐蚀引起的结构损坏就越快和越深。据国外专家估计，由混凝土和钢筋的腐蚀造成的经济损失约占国民收入的 3%-6%。这些经济损失中不仅包括修复和重建建筑物的材料费用和工程造价，而且还包括产量上的损失，这是由于建筑结构不符合生产要求，或者在修理期间引起的正常生产的中断造成的。而在众多的水泥混凝土腐蚀当中，道路交通工程约占一半以上。仅就沈阳公路系统而言，各种水泥混凝土腐蚀破坏的现状，同样令人触目惊心。

2.2 水泥混凝土破坏的主要形式

水泥混凝土结构的破损状况一般表现为以下几种情况：

(1) 浅表面破损 这种破损包括麻面、蜂窝、剥蚀等情况。麻面指混凝土表面呈现的无数像绿豆般大小的不规则小圆点，圆点直径通常不大于 5mm，这是一种较轻微的破损状况。蜂窝指混凝土表面出现的或多或少的孔洞，大小如蜂窝，形状不规则，深度一般不露出主筋，这是一种比麻面严重的表面破损。剥蚀（又称起皮、剥落）指混凝土表面的水泥石、细集料等的脱落，这是混凝土表面面积较大的破损。按严重程度来分，这种破损又可分为轻微剥蚀、中等剥蚀和严重剥蚀，其中轻微剥蚀和蜂窝类似，但面积比之较大。

(2) 裂缝 裂缝指混凝土表面产生的较长、较窄的破裂。裂缝的基本参数包括其宽度、长度、深度以及贯通程度等。在对裂缝进行调查时，需明确裂缝是否继续扩展、是否渗水等情况，以适应选择修补材料和修补方法。

(3) 大面积深度破损 这是一种严重的需尽快修补的破损状况，包括孔洞、露筋、大面积脱落等。大面积脱落与严重剥蚀类似，但深度较大，是一种严重的水泥混凝土结构破损。

(4) 强度损失 强度损失指混凝土受到种种破坏作用，结构劣化，导致强度下降。

(5) 膨胀式破坏 这是一种“自杀式”的破坏，是水泥混凝土内部在各种侵蚀介质作用下，发生化学反应，重新生成一种或多种结晶水化物造成混凝土膨胀破坏的过程。这

是一种毁灭性的破坏。

2.3 沈阳地区水泥混凝土破坏现状调查

几年来，我们对沈阳周边大多数水泥混凝土路面、桥涵、混凝土缘石、泄水槽等构造物的使用情况进行了详细调查，还查看了沈营线辽阳段及市内几乎所有道路，又到沈阳大二环、沈桃高速公路、沈大高速公路部分路段、沈阳外环等公路近二十条，总里程达四百公里之多的现场调查。

破坏的混凝土结构：



图 2.1 沈阳老浑河桥桥柱



图 2.2 沈阳老浑河桥桥柱



图 2.3 改造前的沈祝线桥柱开张



图 2.4 沈阳市东陵区 2004 年拆除新建的险桥桥台

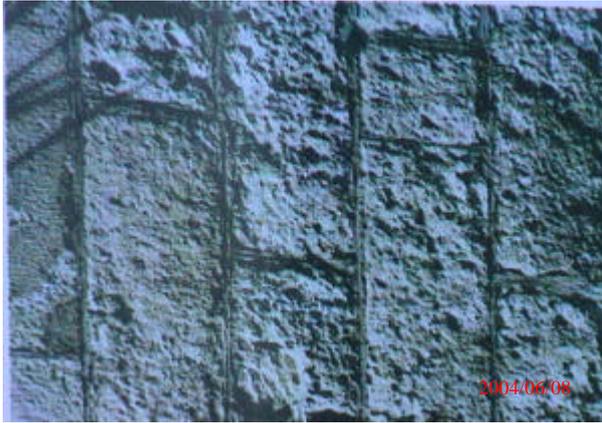


图 2.5 沈阳市东陵区 2004 年拆除新建的
险桥桥面板下部



图 2.6 改造前的石庙子大桥台身



图 2.7 沈阳市长青收费站水泥混凝土路面



图 2.8 沈阳市长青收费站水泥混凝土路面



图 2.9 沈阳市桃仙桥下水泥混凝土路面



图 2.10 沈阳市桃仙桥下水泥混凝土路面



图 2.11 改造前的苏赵线桥面护栏



图 2.12 桃仙机场跑道水泥混凝土路面



图 2.13 改造前省道沈营线路缘石



图 2.14 改造前省道沈营线路缘石



图 2.15 改造前的沈营线混凝土路缘石



图 2.16 沈阳白塔桥桥墩

2.4 沈阳地区水泥混凝土破坏规律性分析

2.4.1 大面积集中坏损的路缘石、泄水槽的分布非常有规律：

高速公路及市内道路的混凝土缘石几乎全部毁坏，在高速公路上，弯道内侧缘石坏的尤其严重；

与城市道路相联及靠近高速公路出口两侧 0.2—0.5 公里范围内双侧路缘石几乎全部毁坏，且越是近口处坏的越严重；

城市道路出口的右侧及高速公路出口右侧至少 2.0 公里以上的缘石绝大部分损坏，而对面（出口左侧）缘石的损坏则相对轻了许多。

丹霍线全线 10 公里的缘石使用一年后没有损坏，只是在英城子村旁一处堆积大量雪和垃圾下面的二十几块缘石全部脱皮损坏。

其它远离高速公路、城市道路的公路缘石凡使用期在二、三年内的基本上完好无损（如我公司施工的沈新线慢车道，沈阎线、沈营线白塔堡以南公路），而使用期在五年以上的各公路缘石均有不同程度损坏。

2.4.2 混凝土路面

水泥混凝土路面破坏一是表皮脱落，原因是施工原因、外介质侵蚀原因、除雪剂侵蚀、淡水侵蚀等；二是碱集料反应及“D”开裂，根源在于混凝土原材料的选择。

沈阳桃仙国际机场是 1987 年建成交付使用的，现在机场的站坪道面，有的已腐蚀掉渣影响正常使用。大连机场建成于 1985 年，1990 年即发现道面砼有腐蚀现象，至 1999 年，发展到有的砼板不能正常使用，只好对部分道面板作修复处理。其它如丹东机场跑道，长春机场站坪及对应的一段滑行道，不少砼板面都有明显的腐蚀现象。牡丹江机场的站坪，也有少部板角发现了黄斑龟裂，由此可看出东北地区砼道面的腐蚀问题不容忽视。

机场砼道面腐蚀反应，有的建成两三年即有发现。开始是板的边角出现细密的裂纹束，沿着板角向外呈弧形延伸，甚至发展到整块板都出现裂纹和板面砼碎落。就是发展到道面砼板面不能正常使用，也就是少则几年，多则十多年的时间，这说明腐蚀性反应发展是较快的。实践及研究成果表明道面砼的腐蚀性反应，比较突出的是碱—集料反应和“D”开裂问题。

2.4.3 桥梁构造物

老旧桥梁的腐蚀破坏基本上覆盖了所有破坏形式，但无论外因如何，其内因多是标号低，混凝土强度低，导致自身“免疫力”低，造成较严重的综合性腐蚀破坏。另外，水泥中石膏超标导致膨胀破坏，河水、外部环境导致的氯盐侵蚀、镁盐侵蚀、硫酸盐侵蚀也均常见。

2.5 小结

在对现场调查的基础上，我们带着从现场取到的各种样品（脱落混凝土皮、松散混凝

土、构造物破损处的土壤、液体介质等)走访了东陵区建筑材料质量监督站,沈阳市建筑材料质量监督站,并与有关专家作了定性分析。之后,我们在沈阳市盐业总公司、营口盐业(集团)公司,营口市产品质量监督检验所,辽宁省海盐及盐化工产品质量监督检验站、沈阳市房产水泥厂等多家单位对水泥与除雪剂的组成成分及化学反应特性做了大量技术咨询与委托实验,同时我们做了不同标号混凝土构件在除雪剂试液中的侵蚀后的强度实验。从理论上定性,沈阳地区混凝土破坏包括:镁盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、氯盐侵蚀、碳酸盐侵蚀以及水泥混凝土碱集料反应等。

经过调查及取样分析,我们初步认识到被腐蚀破坏的水泥混凝土构造物,与使用环境的各类污染有关,与构造物本身的混凝土强度有关,还跟加工制作混凝土构造物的各种原材料有关。这其中关键是水泥的成分及其各种成分与相邻介质的反应。

因此,深入研究水泥及介质的化学组成,反应特性,是一切工作的突破口。

第三章 水泥混凝土构造物侵蚀破坏机理

3.1 概述

目前,国内外研究钢筋混凝土的侵蚀问题,一是特别关注外界环境侵蚀,二是特别关注氯盐,认定氯盐侵蚀为“元凶”,再者是镁盐侵蚀、硫酸盐侵蚀。而对于其他侵蚀方式,尤其是综合侵蚀破坏及起初的诱发侵蚀因素重视的不多。在公路系统中,我们研究发现,镁盐侵蚀,淡水(或软水)侵蚀,硫酸盐侵蚀,碳酸盐侵蚀,以及氯盐侵蚀和碱集料反应,既有“外部环境侵蚀”,也有“内部侵蚀”。在绝大多数情况下,均首先表现为混凝土构造物的破坏,且侵蚀结果也多表现为表皮涨裂脱落和表皮因不断溶析分解而渐渐剥落。大量的调查研究表明,造成水泥混凝土构造物表皮脱落破坏,甚至最终整体松散的主要原因,不是上述某一侵蚀方式单独奏效的,而是几种侵蚀破坏共同作用的结果。而且在各种方式的共同作用中,相互间都对其它破坏方式起到了极其重要的“催化”作用。这样,一旦混凝土构造物因某一侵蚀方式起主要作用(在撒除雪剂路段自然除雪剂起主要作用)而被破坏,则该构造物本身就为其它侵蚀方式提供了极其便利的破坏条件,从而就更加快、加重了水泥混凝土构造物的损坏速度和程度。内部侵蚀,首先是使水泥混凝土强度降低,从而降低混凝土构件自身的“免疫力”,为外部侵蚀提供更大的可能。同时,在我们北方地区,每年的秋冬季节,当混凝土构造物表皮发生破坏后,雨、雪水便很容易地渗透到整个构件之中去,随之产生循环往复的冻融破坏活动,这就更加剧了混凝土构件的破坏。因此,介质腐蚀破坏的同时,加之冻融破坏,是辽沈地区水泥混凝土腐蚀破坏的显著特点。

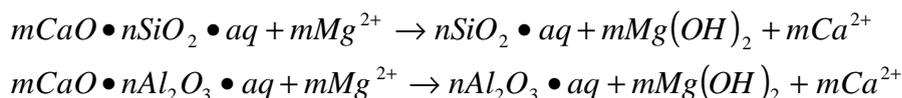
3.2 水泥混凝土常见侵蚀破坏类型及反应机理

3.2.1 镁盐侵蚀

海洋工程和滨海工程的混凝土结构,长期受海水或潮湿空气的作用,其中含有大量的镁盐。它们与混凝土中的水泥水化物 $Ca(OH)_2$ 作用后,生成 $CaCl_2$, $CaSO_4$ 等都是易溶物质, $NaCl$ 又提高其溶解度,增大了混凝土的孔隙率,削弱了材料的内部结构,使混凝土遭受腐蚀。

(1) Mg^{2+} 对混凝土的腐蚀机理

Mg^{2+} 对混凝土的侵蚀是通过分解水泥石中的 $Ca(OH)_2$, 或直接分解胶凝物质而使水泥石分解,其反应式为:(注: aq 为拉文,水的缩写)

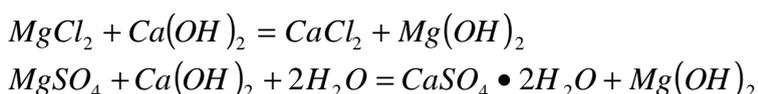


由于反应生成的 $Mg(OH)_2$ 溶解度很低(一般为18mg/L左右), 当其溶液达到溶解平衡时, 溶液PH=10.5, 比饱和的水化硅酸钙稳定所要求的值小, 致使水化硅酸钙不断地分解, 使混凝土的孔隙率提高, 水泥浆硬化结构疏松, 结构被削弱甚至解体, 并为其它腐蚀组分的渗入创造了条件。特别是 Mg^{2+} 的含量较高时, 混凝土外部 $Ca(OH)_2$ 的数量不够被中和, 因此, 溶液向混凝土内部迅速扩散, 加速水泥石结构的解体。这种现象在流动的海水中更为严重。

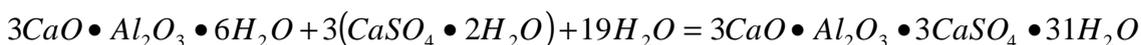
(2) SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 共同作用对混凝土的侵蚀机理

镁盐中的 SO_4^{2-} 对混凝土的腐蚀是最为常见的, 也是最为严重的腐蚀组分之一。在含有 33-35g/L 盐类的海水中, SO_4^{2-} 的含量约为 2500-2700mg/L, 混凝土中的微孔、敞开孔的存在, 对混凝土的发展过程有很大作用。当水中含有硫酸盐时, 会提高水泥石某些组分的溶解度, 从而加速腐蚀的发展。当 SO_4^{2-} 的含量大于 2100mg/L 时, 水与混凝土接触形成二水合石膏 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 。石膏可能以溶液形式存在。

Mg^{2+} 侵蚀的化学反应可以表示为:



生成溶解度小且强度不高的氢氧化镁, 使液相中氢氧化钙浓度降低, 由于水泥混凝土中的各种水化产物须在一定浓度的 $Ca(OH)_2$ 液体中才能存在, 否则被分解。从而引起水泥混凝土构件中氢氧化钙、水化硅酸钙、水化铝酸钙等强度组分的水解, 导致水泥混凝土构件破坏。同时, 生成的石膏在混凝土孔隙内结晶, 体积膨胀, 造成混凝土构件破坏。更为严重的是石膏与水泥中的水化铝酸钙作用:



生成的水化硫铝酸钙, 含大量结晶水, 相应体积比原来的水化铝酸钙体积增大 1.5 倍, 对混凝土构件起到巨大的破坏作用, 被称为“水泥杆菌”。

3.2.2 溶析性侵蚀:(淡水侵蚀或软水侵蚀)

正因如前所述, 水泥混凝土的各种水化物须在一定浓度的 $Ca(OH)_2$ 液相中才能稳定存

在。故一旦水泥混凝土长期处于淡水环境中，其各种水化物与水作用时 $Ca(OH)_2$ 溶解度最大，首先被溶出，冬季冰雪过多，则水泥混凝土中 $Ca(OH)_2$ 不断被溶析，不仅使混凝土的密度和强度降低，且导致水泥混凝土液相中 $Ca(OH)_2$ 浓度降低，以致整个结构物破坏。（侵蚀强弱取决于周围水质硬软及水泥混凝土本身密实度）

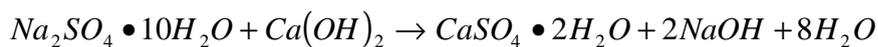
水泥的水化物生成中， $Ca(OH)_2$ 最容易被渗入的水溶解，又促使水化硅酸钙等多碱性化合物发生水解，随后破坏低碱性水化产物（ CaO ， SiO_2 ）等，最终完全破坏水泥石结构，某些酸盐溶液渗入混凝土，生成无凝胶型的松软物质，易被水溶蚀。水泥石的溶蚀程度随渗流速度增大溶蚀后，胶结能力减弱，混凝土材料的整体性被破坏。

3.2.3 硫酸盐的侵蚀：

3.2.3.1 硫酸盐内部反应侵蚀

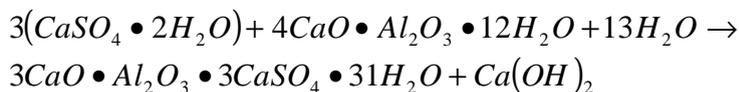
含有硫酸盐的水渗入混凝土中，与水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 的化学作用生成石膏（ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ）以溶液形式存在。石膏在和水化物铝硫酸盐起作用，形成多个结晶水的水化铝硫酸钙，体积膨胀，导致混凝土开裂破坏。当水泥混凝土构件受到沼泽水、工业污水等含碱性硫酸盐（如 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 等）侵蚀时：

如 SO_4^{2-} 浓度 > 1400mg/L 发生



$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 结晶析出，降低了混凝土中 $Ca(OH)_2$ 浓度。

如 SO_4^{2-} 浓度低时，发生：



由于该反应在固相中进行，生成的水化硫铝酸钙结合着大量结晶水，其体积为原来的水化铝酸钙体积的 2.5 倍，故产生很大的内应力，使混凝土结构严重破坏。（特别注意的是，如水泥中 SO_3 含量过多则必然发生混凝土构件整体膨胀式松散破坏）

每当冬季，尤其是雪量偏大，雪水过多的年份（雨、雪水均属软水），雪水过长浸泡混凝土构造物，及各高速公路，城市道路大量撒除雪剂（含镁盐及硫酸盐、氯盐）而致春季混凝土构造物大量脱皮损坏的最主要原因。而更显然的是混凝土显规律性分布的脱皮、破

坏多与除雪剂关系密切。

3.2.3.2 外部硫酸盐侵蚀

外部硫酸盐侵蚀可分为化学硫酸盐侵蚀和物理硫酸盐侵蚀。化学硫酸盐侵蚀要有硫酸根离子参与化学反应，物理硫酸盐侵蚀一般指硫酸盐结晶。

(1) 物理硫酸盐侵蚀

混凝土孔隙中的碱金属硫酸盐浓度高时就会有盐结晶析出，产生极大结晶应力和体积膨胀而使混凝土破坏。特别是当结构物的一部分浸入盐液，另一部分暴露在干燥空气中时，盐液在毛细管作用下升至水平以上部分然后蒸发，盐液浓缩而析出晶体。

暴露混凝土表面的风化现象（ Na_2SO_4 和 $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 结晶存在）就是典型的硫酸盐物理侵蚀。硫酸盐结晶风化完全是一定环境条件下发生的物理现象。物理盐风化侵蚀引起的混凝土表面剥落常被混淆为化学硫酸盐侵蚀。

(2) 化学硫酸盐侵蚀

根据侵蚀过程发生的化学反应的产物的不同，又可将化学硫酸盐侵蚀分为钙矾石型腐蚀、石膏型腐蚀和碳硫硅钙石腐蚀。硫酸盐与水化水泥浆体的主要反应有：

硫酸盐与氢氧化钙反应生成硫酸钙（石膏）。这个反应的进行程度与外界条件有关。流动的水持续提供硫酸盐，消耗掉氢氧化钙，反应可以完全。

生成的硫酸钙可以与 C_3A （铝酸三钙）反应，一般通过先形成单硫型化合物，再形成钙矾石。

硫酸镁与水泥的所有水化产物反应，生成的重要产物有硫酸钙和氢氧化镁。氢氧化镁的溶解度较小，并且饱和溶液的 pH 值大约在 10.5，在该 pH 值时，C-S-H（水化硅酸钙）分解，释放出氢氧化钙。氢氧化钙与硫酸镁反应，形成氢氧化镁和石膏。这个反应进行直至石膏结晶出来。氢氧化镁还和水化硅酸盐反应，进一步加剧了 C-S-H 的分解，并形成没有结合特性的水化硅酸镁。即使水泥中 C_3A 含量很低，这些反应仍可发生。硫酸钙又可以与 C_3A 反应。

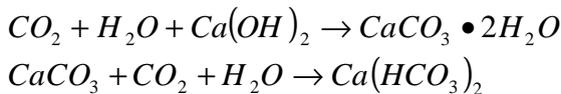
如果体系中存在 CO_3^{2-} ，就会与硫酸盐及 C-S-H 反应生成碳硫硅钙石。碳硫硅钙石的溶解度很低，特别是在较低温度下几乎不溶解，而水泥中的 C-S-H 凝胶的溶解度比碳硫硅钙石高。只要体系中有 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 存在，且孔液 pH 值高于 10.5，反应将不断进行。

认清各种反应的最终产物是很重要的，不同的反应产物代表了不同类型的破坏。当溶液的浓度发生改变，反应机理也会改变。对于硫酸钠溶液侵蚀，在低硫酸盐浓度（ $<1000 \text{ ppmSO}_4^{2-}$ ）时，主要产物为钙矾石；在高浓度（ $>8000 \text{ ppmSO}_4^{2-}$ ）时，石膏是主要产物；在中等浓度（ $1000\sim 8000 \text{ ppmSO}_4^{2-}$ ）时，石膏和钙矾石共同存在。对于硫酸镁溶液侵蚀，在较低浓度（ $<4000 \text{ ppmSO}_4^{2-}$ ）时，观察到钙矾石产物；在中等浓度

(4000~7500 ppmSO₄²⁻), 观察到钙矾石和石膏的混合物; 在高浓度 (>7500 ppmSO₄²⁻) 时, 镁盐侵蚀占主导。

3.2.4 碳酸侵蚀

在工业污水或地下水中常溶解有较多的二氧化碳 (CO₂), 这种水对水泥石有侵蚀作用。二氧化碳与水泥石的氢氧化钙作用, 可生成碳酸钙, 碳酸钙再与水中的碳作用, 生成重碳酸钙。当水中含有较多碳酸, 并超过平衡浓度, 则水泥石中的氢氧化钙, 转变为可溶的碳酸氢钙, 而使水泥石的强度下降。



当水中含较多碳酸时上式反应向右进行, 使 Ca(OH)₂ 转变成 Ca(HCO₃)₂ 混凝土强度降低。

3.2.5 氯盐腐蚀

Cl⁻ 对水泥石的水化具有促进作用, 但是当Cl⁻ 含量过高时, 也会使混凝土结构发生种种腐蚀和溃坏的现象。Cl⁻ 对混凝土的作用表现为:

(1) 对于靠近液面以上的混凝土, 依靠混凝土毛细管吸收作用, 会将含氯盐的溶液吸到液面以上的部位; 当其中的水分蒸发后, 或由于液面的下降而变干时, 则会析出晶盐, 将盐分遗留于混凝土内。如果溶液中的氯盐含量较高, 或者反复干湿循环, 将会使更多的盐分带进混凝土。这样, 晶盐就会在混凝土孔隙中产生很高的结晶压力, 使混凝土表面剥蚀或开裂崩碎。

(2) 当 CaCl₂ 的浓度较高 (> 15%) 时, 它能与 CaO 在液相中形成氯氧化钙

(CaO₂ + CaCl₂ • 15H₂O) 含有大量结晶水的物质会形成极其微小的针状结晶状态, 该物质积聚较多时就会导致混凝土的隆胀型腐蚀。除上述之外, 高浓度氯盐的存在会使混凝土的干缩湿胀现象更加明显。

微观研究表明, Cl⁻ 能渗入到水泥石凝胶内部起破坏凝胶内部结构的作用。

Cl⁻ 的环境渗入

a. 海洋环境

—— 海水 (约含 2.9% 的 Cl⁻) ;

—— 飞溅区 (混凝土表面层中 Cl⁻ 含量可达 17. kg/m³) ;

—— 海洋大气区 (包括海风、海雾影响区) 。按日本的有关规定, 钢筋混凝土建筑物, 离海 (面) 距离 300 m 之内, 属于 “ 重腐蚀区 ” , 需可靠防护。

b. 化冰盐

- 桥梁（混凝土表面层中 Cl^- 含量可达 $15kg/m^3$ ）；
 - 停车场（混凝土表面层中 Cl^- 含量可达 $17.8kg/m^3$ ）。
- c. 盐渍土、盐湖（在我国分布广阔）。

工业盐环境

混入（掺入）混凝土中

含氯盐外加剂、含氯盐砂（如海砂）、含氯盐（超标）施工用水等。

表 3-1 混凝土中允许 Cl^- 含量的限定值（水泥重量百分比）

预应力混凝土	普通混凝土		
	湿环境、有氯盐	一般环境、无氯盐	干燥环境或有外防护层
0.06	0.10	0.15	无规定
0.06	0.15	0.30	1.0
0.08	0.20	0.20	0.20

我国规程规范对氯盐限量规定差异大，近期国内制定、修订的规程规范有了很大改进。逐步靠近如下指标：

对于预应力混凝土： Cl^- 总量不超过 0.06%（水泥重量百分比）；

对于普通混凝土： Cl^- 总量不超过 0.10%（水泥重量百分比）。

3.2.6 碱集料反应

碱集料反应（AAR）包括碱-硅酸反应（ASR）和碱-碳酸盐反应（ACR），它们分别由活性硅质集料和活性白云质集料引起。研究表明，已造成混凝土工程结构破坏的集料有：安山岩、玄武岩、流纹岩、石英砂岩、长石砂岩、（亚）硬砂岩、砂岩、粉砂岩、页岩、角页岩、凝灰岩、燧石、火山玻璃、硅质灰岩、硅质白云岩、石英岩、砾岩、泥板岩、千枚岩、（正）花岗片岩、花岗岩、片麻岩、碎裂岩、糜棱岩、泥质白云质灰岩、灰质白云岩、泥质白云岩、白云岩等。我国既有大量活性硅质集料分布，如北京、锦州地区的硅质灰岩、硅质白云岩、粉砂岩和长石石英砂岩；也有不少的活性白云质集料分布，如太原、平顶山、潍坊和四川宝珠寺地区的白云质灰岩、灰质白云岩和泥质白云岩。

活性集料在世界范围内的分布极其广泛，而集料资源并不像人们过去所想像的那样是取之不尽的，随着建设的发展和加速，矿产的不断消耗，选择集料的余地越来越小，许多国家和地区不得不使用大量活性岩石作集料。如何使用具有碱活性的集料制备耐久性混凝土是各国将要或已经面临的一个严峻问题。

3.2.6.1 混凝土碱含量

混凝土及其组成材料的碱以等当量 Na_2O 计，即 $Na_2O + 0.658K_2O$ 。水泥、外加剂混合

料和拌合水的碱含量是指其酸溶碱含量，通常以质量分数表示。砂、石中的碱是指砂、石表面以 $NaCl$ 、 KCl 形式存在的可溶碱，按 0.76Cl 计，通常以质量分数表示。混凝土碱含量来自于各组成材料，以 kg/m^3 计。

混凝土的组成材料水泥、外加剂、集料、掺合料、拌合水都有可能增加混凝土孔溶液的碱，环境中碱往混凝土中渗透时也会使孔溶液的碱浓度增大，进而促进混凝土的 AAR。

(1) 水泥中的碱

水泥是混凝土中碱的主要来源，其中的 K^+ 、 Na^+ ，使混凝土的孔溶液呈碱性，硅酸盐水泥中的碱基本上可参加与集料的反应，由其带入混凝土的碱以其酸溶碱的 100% 计算。对于普通硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥，其中硅酸盐水泥部分的碱以其酸溶碱的 100% 计入混凝土的碱含量，粉煤灰和矿渣等混合材的碱按其掺量大小分别计算。

(2) 化学外加剂中的碱

常用混凝土外加剂中有一部分含有碱金属盐，这些碱金属盐在水泥混凝土中也能直接或间接地参与同活性集料的化学反应，并进而促进 AAR 膨胀，其作用等同于 $NaOH$ 或 KOH 。由其带入混凝土的碱按其碱含量的 100% 计算。

(3) 混合材料中的碱

对于一般活性和低活性的集料，混合材料中带入混凝土的碱可按下述方法计算：

粉煤灰 < 20% 时，粉煤灰带入混凝土的碱按其酸溶含量 100% 计算；

粉煤灰为 20% ~ 25%，粉煤灰带入混凝土的碱按其酸溶碱含量的 20% 计算；

粉煤灰 ≥ 25% 时，粉煤灰带入混凝土的碱按其酸溶碱含量的 0% 计算；

矿渣 < 25% 时，矿渣带入混凝土的碱按其酸溶碱含量的 100% 计算；

矿渣为 25% ~ 40% 时，矿渣带入混凝土的碱按其酸溶碱含量的 50% 计算；

矿渣 ≥ 40%，矿渣带入混凝土的碱按其酸溶碱含量的 0% 计算。

当矿渣与粉煤灰混合使用时，可考虑将粉煤灰当作矿渣处理，其含量作为矿渣的数量，然后根据此方法计算其带入混凝土的碱含量。

(4) 集料和拌合水中的碱

海水以及受到海水作用的砂石都含有 $NaCl$ 和 KCl ，这种盐在含活性集料的混凝土中也会加速 AAR，需将其全部计入混凝土的碱含量。

(5) 环境中的碱

实验表明，从环境中渗入混凝土的碱也能促进 AAR。

1) 凝胶

特指由于 ASR 而形成于混凝土或集料内部的一种碱硅酸（钙）胶体物质。它具有吸水性，吸水后能产生膨胀应力，当应力达到足够大时可导致混凝土开裂或引起结构性的破坏。

2) 混合材

混合材是指水泥制备过程中掺入水泥熟料并与熟料共同粉磨的活性混合材料，通常有

粉煤灰、火山灰和矿渣等。

3) 掺合料

掺合料是指在混凝土搅拌过程中掺入混凝土的粉状活性混合材料，如粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等。

3.2.6.2 关于碱—硅酸反应

A、S、R 是水泥中的碱与集料中的活性硅成分的反应。当硅离子被浓度较高的 $NaOH$ 或 KOH 等碱性溶液浸渍时，和 Na^+ 反应生成碱性硅酸盐，发生膨胀。大量研究表明，当碱浓度较低时，不发生碱—硅反应。因此为防止出现 A、S、R，途径有两条，一种路径使用低碱水泥，国内外普遍认为，水泥中当量钠（钾）含量在 0.6% 以下时即属低碱水泥；另一种途径为在高碱水泥中掺适量的硅灰、粉煤灰、矿渣等含活性的材料，使之与水泥中的碱结合生成无害的凝胶，而不使其与集料中活性氧化硅起作用，以阻止产生碱—集料反应。

3.2.6.3 关于碱—碳酸盐反应（A、C、R）

A、C、R 是在水泥水化过程中，在碱浓度较高时，产生的一种更具有破坏性的腐蚀性反应。但它不是水泥中的钠钾成分与集料中活性硅的反应，而是碱与石灰岩集料伴生的白云石间的一种反应，白云石分解后，内部所含粘土成分吸水膨胀，使混凝土产生裂缝破坏。产生白云石化反应，关键混凝土液相中的碱浓度。当使用高碱水泥时，即使掺入大量粉煤灰、矿渣灰等活性材料，也不能有效降低混凝土液中的碱浓度。唐明述院士的研究指出，混凝土液相中的 PH 值在 11.25 以下时，不致出现白云石化反应，而当水泥中的碱含量较高时，活性掺和料的比例需达到 90% 以上方可有效避免出现 A、C、R，这显然无法在实际中应用的。

综上所述可知，混凝土的碱—碳酸盐反应，主要是石灰岩中伴生的白云石与碱的一种反映。但过去的研究认为，只有加拿大的一种石灰石，才会发生这种反应。可是就国内来说，机场工程中以石灰石为骨料的混凝土道面，多处出现腐蚀现象，前面提到大连机场、丹东机场的道面都是以石灰石为骨料。国内如此，国外也屡有发现。

3.3 硅酸盐水泥和溶雪剂成分分析

3.3.1 对硅酸盐水泥的分析

硅酸盐水泥通常作为以硅酸钙为主要成分的各种水泥的总称。但是，此处所指硅酸盐水泥是不掺各种混合材料的硅酸盐熟料与适量的石膏共同磨细而成一种强度较高的水泥。生产硅酸盐水泥的原料，主要是石灰质原料和粘土质原料两类。石灰质原料（如石灰石、白垩、石灰质凝灰岩等）主要提供 CaO ，粘土质原料（如粘土、粘土质页岩、黄土等）主要提供 SiO_2 ， Al_2O_3 以及 Fe_2O_3 。有时二种原料化学组成不能满足要求，还要加入少量校正原料（如黄铁矿渣）等调整。按我国国家标准，凡以适当成分的生料，烧至部分熔融，

所以以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量的石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为硅酸盐水泥。

硅酸盐水泥主要原料有 CaO 或 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 ；校正原料：黄铁矿或硅藻土；熟料中加 3% 左右石膏等。

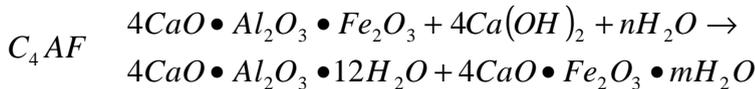
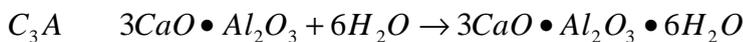
硅酸盐水泥主要成分： $3CaO \cdot SiO_2 (C_3S)$	37%—60%
$2CaO \cdot SiO_2 (C_2S)$	15%—37%
$3CaO \cdot Al_2O_3 (C_3A)$	7%—15%
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 (C_4AF)$	10%—18%

硅酸盐水泥主要矿物组成与特性如下表 3-2

表 3-2 硅酸盐水泥主要矿物组成与特性

矿物组成	硅酸三钙 (C_3S)	硅酸二钙 (C_2S)	铝酸三钙 (C_3A)	铁铝酸四钙 (C_4AF)
与水反应速度	中	慢	快	中
水化热	中	高	高	中
对强度的作用	早期	良	良	良
	后期	良	中	中
耐化学侵蚀	中	差	差	优
干缩性	中	大	大	小

3.3.2 硅酸盐水泥水化作用原理



(1) 水化产物

氢氧化钙 (CH)、水化硅酸钙 (CSH_x)、水化硫铝酸钙 ($C_3A_3\bar{S}H_{31}$ 、 $C_3A\bar{S}H_{12}$)

水化铁铝酸钙 ($C_4[A;F]H_x$)

(2) 水泥中各种单矿物成分水化后抗压强度和释热量随龄期的增长

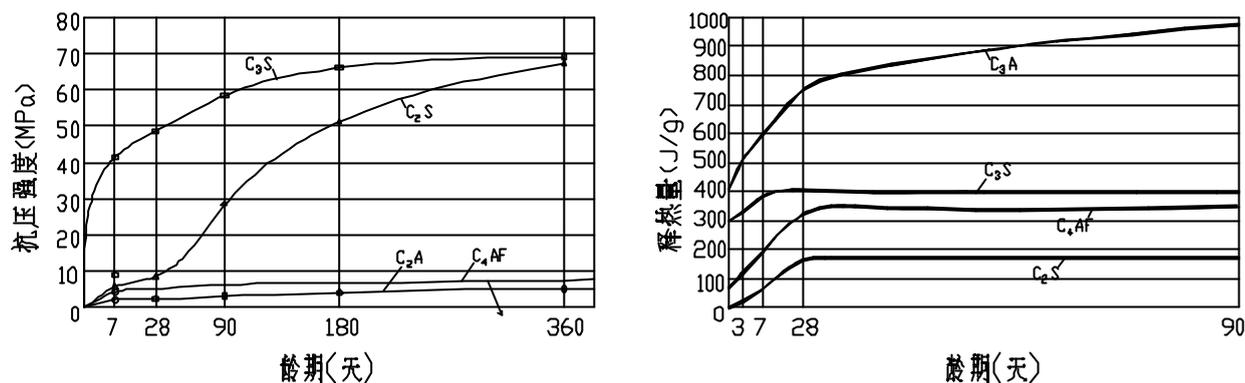
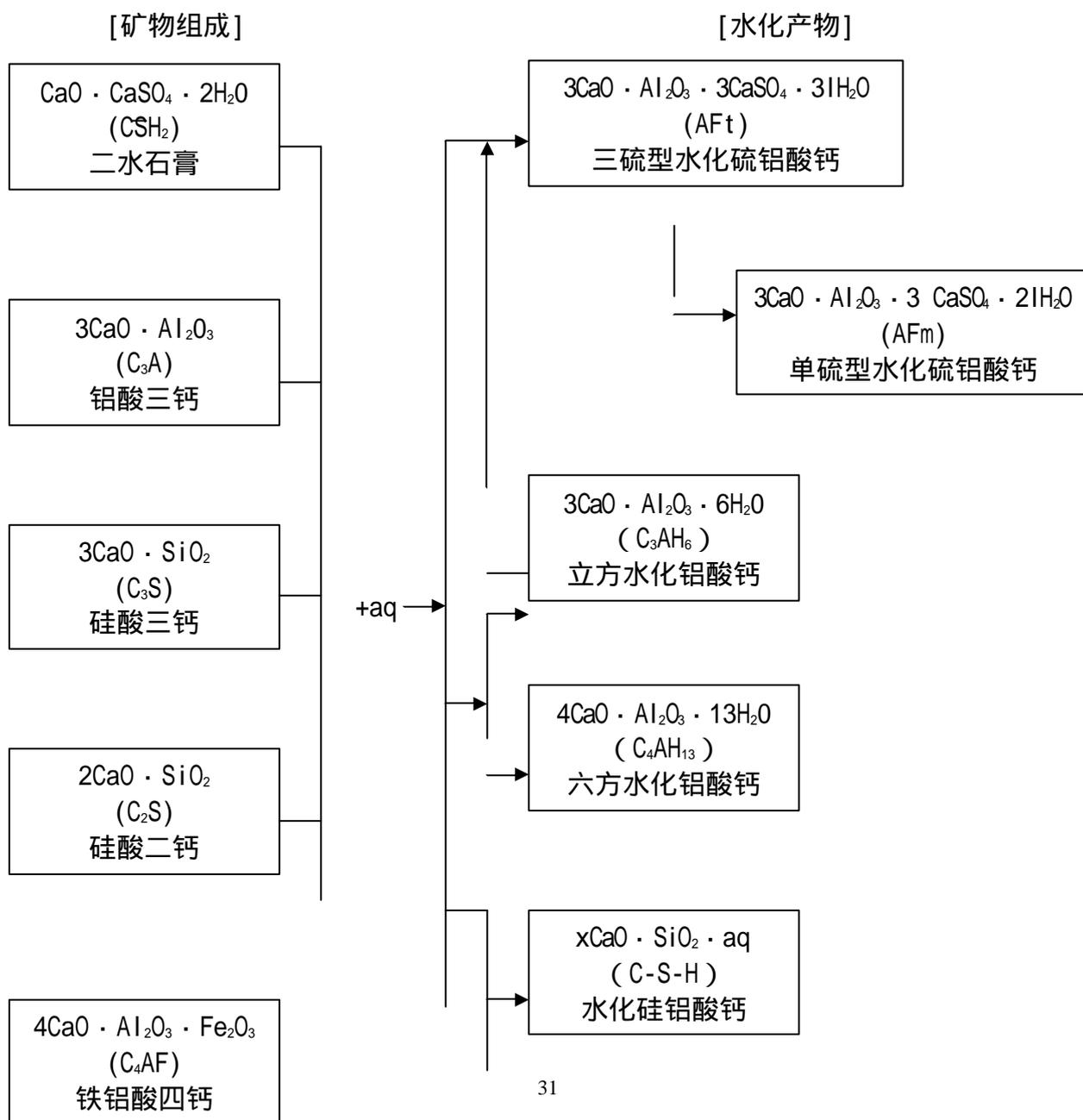


图 3.1 水泥中各种单矿物成分水化后抗压强度和释热量随龄期的增长



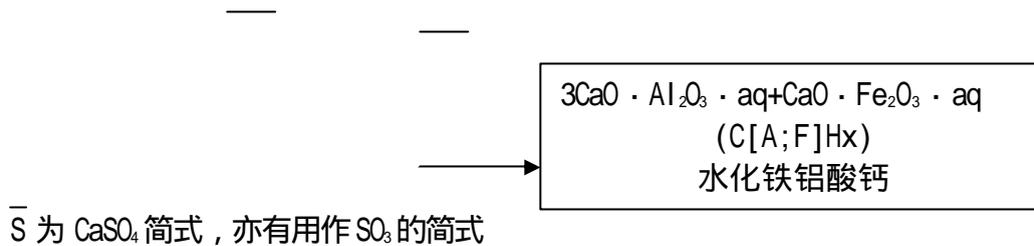


图 3.2 各化学反映方程式可归纳为此图

3.3.3 融雪剂的主要成分

调查中发现, 辽宁地区过去几年一直使用的除雪剂, 其主要成分 NaCl , 但含有较多量的镁盐, 硫酸盐, 对水泥混凝土构造物具有较强的腐蚀作用。目前, 我们沈阳地区采用的除雪(融雪)剂均为工业盐(主要成分 NaCl), 我们在对沈阳市盐业总公司的普通盐抽样化验结果来看, 工业盐中仍含较大量的 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} , (二者含量均接近 1%)。据业内人士讲, 越是不合格的小矿工业盐产品, 其含 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的量越多。在我国一段时期, 媒体曾宣传称北京使用了“环保型融雪剂”, 并说这种“新型融雪剂对道路桥梁无腐蚀作用”, “无公害、不毁路”, “对城市设施和花草树木没有任何影响”。其实撒的还是氯盐, 按照报载的说法: “用氯化钙、氯化镁等代替食盐”。显然仍属于氯盐类融雪剂。而撒盐同时又宣传“无害论”这是很不得当、十分有害的, 说明社会上对此方面“盐害”的认识尚需要进一步强化。

天津等城市也发生路、桥受氯盐侵蚀破坏的事例。我国北方将长时期面临化冰盐所造成的“盐害”问题, 若认识不足或处理不当, 也足以影响这些地区的可持续发展(国外已有经验教训)

3.4 侵蚀特性及水泥品种的选择

3.4.1 侵蚀特性

在前述几项水泥混凝土侵蚀破坏中, 镁盐侵蚀, 淡水(或软水)侵蚀, 硫酸盐侵蚀及碳酸盐侵蚀、氯盐侵蚀及碱集料反应, 既有“外部环境侵蚀”, 也有内部侵蚀。在绝大多数情况下均首先表现为混凝土构造物的破坏, 且侵蚀结果也多表现为表皮涨裂脱落和表皮因不断溶析分解而渐渐剥落。大量的调查研究表明, 造成水泥混凝土构造物表皮脱落破坏, 甚至最终整体松散的主要原因, 不是上述某一侵蚀方式单独奏效的, 而是各种侵蚀破坏共同作用的结果。而且在各种方式的共同作用中, 相互间都对其它方式起到了极其重要的“催化”作用。这样, 一旦混凝土构件因某一侵蚀方式起主要作用(在撒除雪剂路段自然除雪剂起主要作用)而被破坏, 则该构造物本身就为其它侵蚀方式提供了极其便利的破坏条件, 从而就更加快、加重了水泥混凝土构件的损坏速度和程度。内部侵蚀, 首先是使水泥混凝土强度降低, 从而降低混凝土构件自身的“免疫力”为外部侵蚀提供更大的可能。同时,

在我们北方地区，每年的秋冬季节，当混凝土构造物表皮发生破坏后，雨、雪水便很容易地渗透到整个构件之中去，随之产生循环往复的冻融破坏活动，这就更加剧了混凝土构件的破坏。

3.4.2 水泥品种的选择

辩证法认为，内因是绝对的，外因是相对的。因此，提高混凝土构件本身的“免疫力”是防止构造物的决定因素。而在内因的诸多因素中，水泥的因素又是重中之重，不同的结构，不同使用条件，水泥的选择上不尽相同。见表 3-3

表 3-3 常用水泥品种的选择

混凝土工程特点或所处环境条件		优先选用	可以使用	不得使用
环境条件	在普通气候环境中的混凝土	普通水泥	矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥	
	在干燥环境中的混凝土	普通水泥	矿渣水泥	火山灰水泥、粉煤灰水泥
	在高湿度环境中或永远处在水下的混凝土	矿渣水泥	普通水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥	
	严寒地区的露天混凝土、寒冷地区处在水位升降范围内的混凝土	普通水泥（标号 32.5 级）	矿渣水泥（标号 32.5 级）	火山灰水泥、粉煤灰水泥
	严寒地区处在水位升降范围内的混凝土	普通水泥（标号 42.5 级）		火山灰水泥、粉煤灰水泥、矿渣水泥
	受侵蚀性环境水或侵蚀性气体作用的混凝土	根据侵蚀性介质的种类、浓度等具体条件按专门（或设计）规定选用		
工程特点	厚大体积的混凝土	粉煤灰水泥、矿渣水泥	普通水泥、火山灰水泥	硅酸盐水泥、快硬硅酸盐水泥
	要求快硬的混凝土	快硬硅酸盐水泥、硅酸盐水泥	普通水泥	矿渣水泥、火山灰水泥、粉

				煤灰水泥
	高强（大于 C40）的混凝土	硅酸盐水泥	普通水泥、矿渣水泥	火山灰水泥、粉煤灰水泥
	有抗渗性要求的混凝土	普通水泥、火山灰水泥		不宜使用矿渣水泥
	有耐磨性要求的混凝土	硅酸盐水泥、普通水泥（标号 32.5 级）	矿渣水泥（标号 32.5 级）	火山灰水泥、粉煤灰水泥

3.4.3 影响水泥混凝土强度的因素见图 3.3

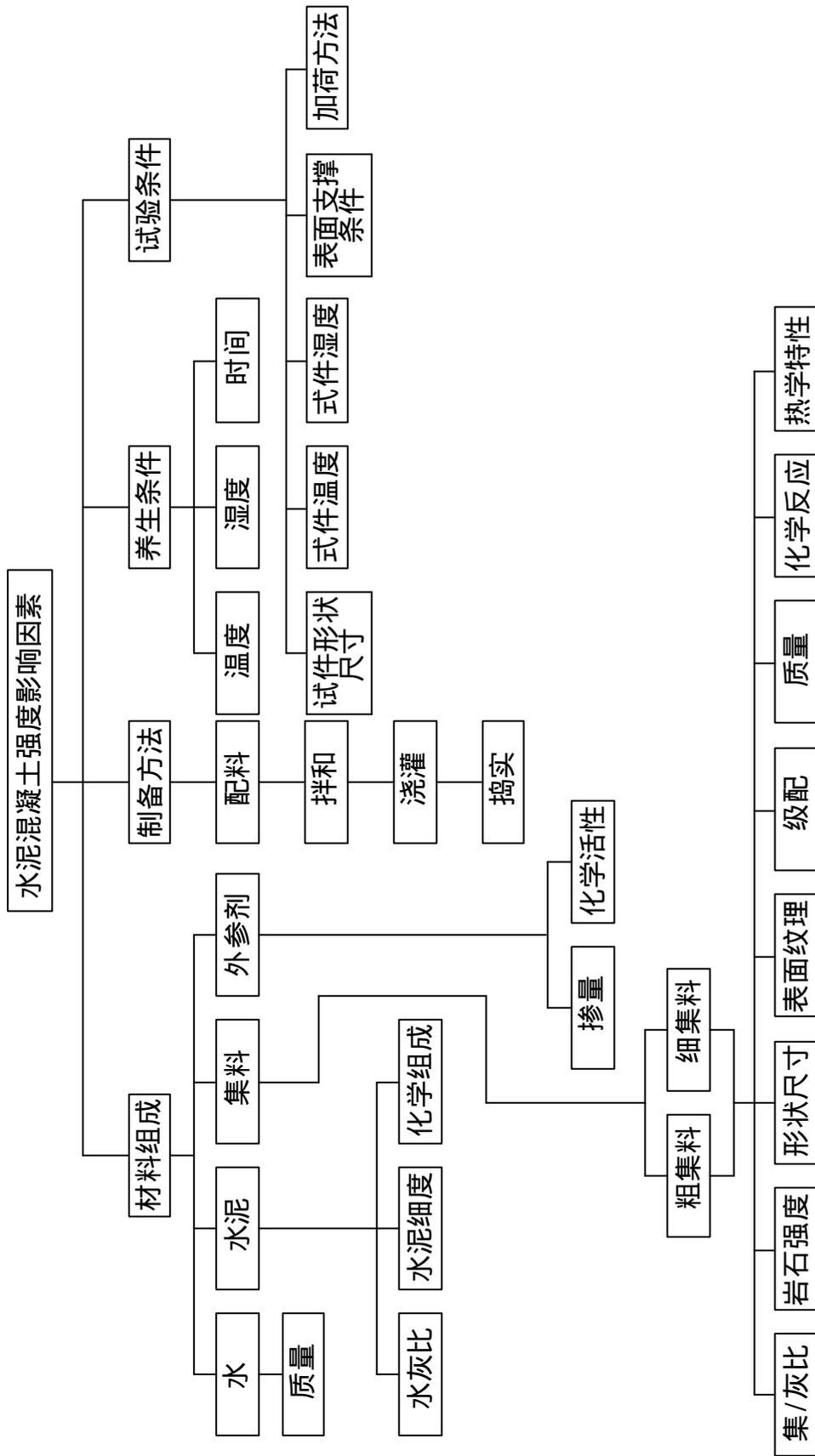


图 3.3 影响水泥混凝土强度的因素

3.4.4 影响耐久性的不利因素 见图 3.4

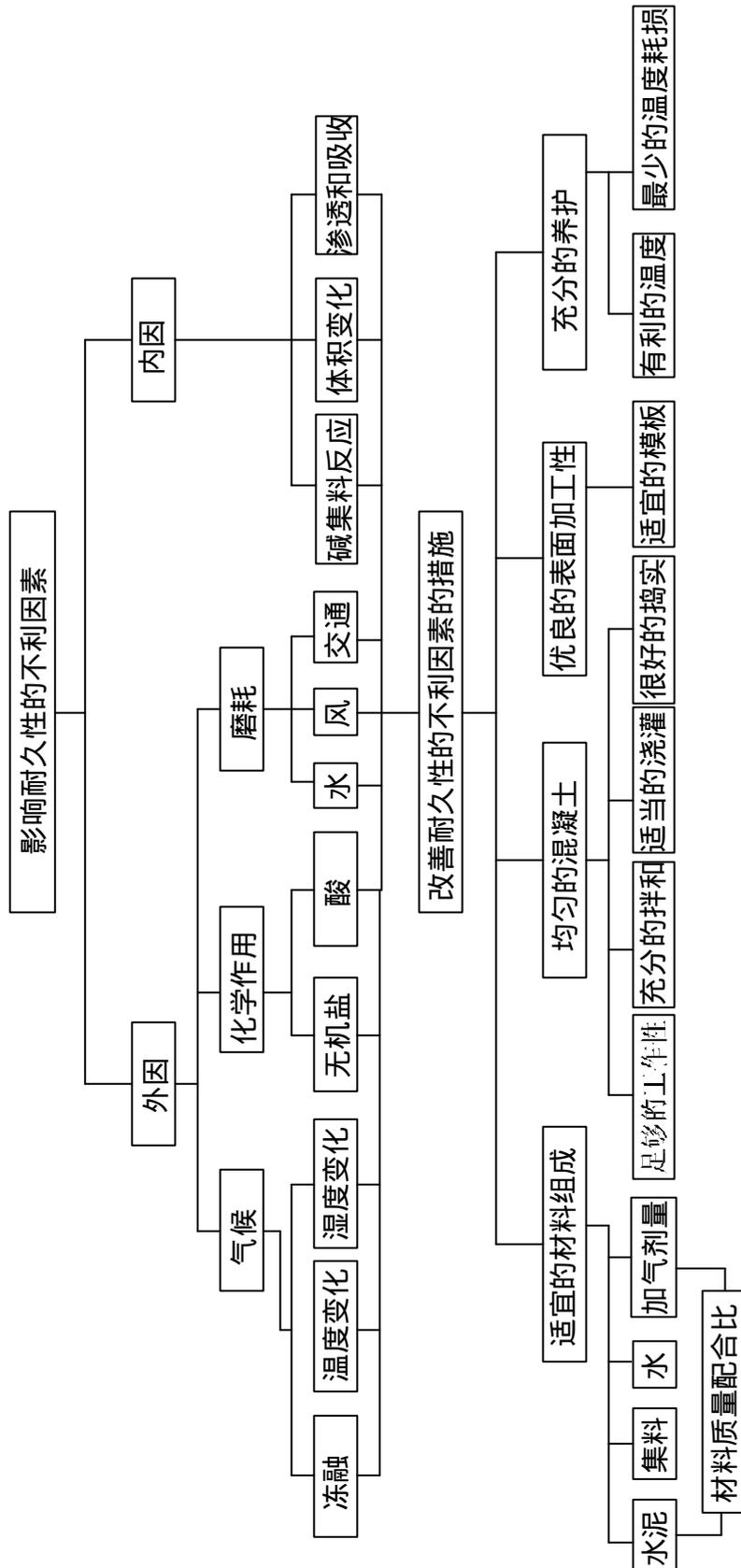


图 3.4 影响耐久性的不利因素

3.5 小结

通过对水泥混凝土构造物侵蚀破坏机理的分析发现，尽管导致混凝土腐蚀破坏集中体现在有害介质侵入，常见的主要包括：镁盐侵蚀、淡水溶析侵蚀、硫酸盐侵蚀、碳酸侵蚀、氯盐侵蚀及碱集料反应。进而发生内外部腐蚀破坏反应。但根源则在于如何根据水泥混凝土使用部位，使用环境，通过恰当选择混凝土原材料及适当的添加剂，提高水泥混凝土自身“免疫力”，才可能有效规避或减轻介质侵蚀破坏的发生。

第四章 试验设计与试验研究

4.1 研究方法

目前，对受腐蚀水泥混凝土结构的研究方法主要是试验研究和有限元分析。试验研究中，腐蚀试件的模拟一是通过试验室试验，包括快速腐蚀试验（电化学腐蚀、加氯盐腐蚀等）和盐雾试验；二是长期自然暴露试验；三是替换构件法。有限元分析中，大多采用钢筋混凝土非线性有限元方法对受腐蚀钢筋混凝土构件进行非线性模拟。

而我们进行的大量前期调研工作发现，水泥混凝土腐蚀破坏既有环境中自然腐蚀，也有原材料介质侵入的内在破坏腐蚀。

自然腐蚀的复杂条件需要在试验室用简单但具有代表性的方法模拟，如何在试验室更好地模拟真实的腐蚀环境对构件的作用，在较短的时间里达到结构在一定时期后的腐蚀状态，对试验结果的可靠性非常重要。

因此，我们综合现场调研、原材料检测分析、不同水泥品种、不同使用环境、不同标号试件的强度变化实验结果，我们设计了多组试件，多种液相环境，对其进行了不同情况下的冻融实验及强度跟踪试验。

4.2 试验设计

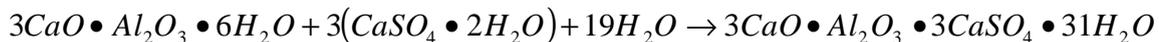
4.2.1 水泥的选择：

水泥的选择除前文 3.4.2 中的原则限制外，还应注意以下问题：

(1) 对软水（如雪、雨）溶析及 H_2CO_3 侵蚀的防治，可选用硅酸三钙含量低的水泥，使水化物中 $Ca(OH)_2$ 含量减少。

(2) 对硫酸盐类的腐蚀，可选用含 $CaO \cdot Al_2O_3$ 含量低的水泥。

(3) 严格控制使用含过量石膏的水泥，（石膏含量不能超过 4%）因过量石膏与固态的水化铝酸钙反应生成水化硫铝酸钙，体积增大 1.5 倍，引起水泥混凝土开裂（即 2.2.5 中所言的混凝土整体膨胀式松散破坏）。此反应同于 3.2.1.1 中的反应，即



(4) 在酸性及含镁盐的水中，矿渣水泥易受腐蚀，严禁使用。

(5) 建议使用低碱水泥（尤其是水泥混凝土道面施工中）。

(6) 降低水泥混凝土液相中的碱浓液。

(7) 确保混凝土构造物必要的强度要求，不能盲目地、过度地追求水泥混凝土的高标号。

4.2.2 砂的选择：

砂的细度模数控制 3.0—2.0 之间，平均粒径 0.5—0.3 之间，含泥量 3%，云母含量

1%，轻物质含量 1%，硫化物及硫酸盐折成为 SO_3 1%。

4.2.3 碎石的选择：

针状片状颗粒含量 15%，泥土含量 1%，硫化物及硫酸盐折算为 SO_3 1%。并根据水
泥混凝土的使用特点有针对性地控制其碱含量。

4.2.4 水的选择：

污水，PH 值小于 4 的酸性水及含硫酸盐量按 SO_3 计超过水质量 0.27%的水不得使用。

必要时，必须对用于工程的饮用水进行 SO_3 含量检测。不能以能否饮用作为选择标准。

表 4-1 混凝土拌和用水质量要求

项目	素混凝土	钢筋混 凝土	预应力混 凝土	项目	素混凝 土	钢筋混 凝土	预应力混 凝土
1.pH 值 不小于	4	4	4	4. 氯化物(以 Cl^- 计) (mg/L)不大于	3500	1200	500
2.不溶物 (mg/L) 不大于	5000	2000	2000	5. 硫酸盐(以 SO_4^{2-} 计) (mg/L)不大于	2700	2700	600
3.可溶物 (mg/L) 不大于	10000	5000	2000	6. 硫化物(以 S^{2-} 计) (mg/L)不大于	—	—	100

表 4-2 桥涵及路面混凝土水质要求

路面混凝土	桥涵混凝土
硫酸盐含量(以 SO_4^{2-} 计)小于 $2.7mg/cm^3$	水中不应含有影响水泥正常凝结与硬化的有害杂质、 油脂、糖类和游离酸类等
含盐量不超过 $5mg/cm^3$	污水、pH 值不得小于 5 的酸性水不得使用
pH 值不得小于 4	硫酸盐含量(按 SO_4^{2-} 计)小于 $2.7mg/cm^3$
不得含有油污	海水不得作为混凝土拌和用水

海水不得作为混凝土拌和用水	供饮用的水，一般能满足上述条件，但使用时要经试验
---------------	--------------------------

4.2.5 水泥混凝土构件的制作

4.2.5.1 严格控制水灰比，提高水泥混凝土的紧密度

一般而言，水泥水灰比所需水量仅为水泥质量的 10—15%，标准稠度用水量也仅 24—30%，而实际用水量（由于施工等因素要求）则高达水泥质量的 40—70%，多余水分蒸发后形成连通的孔隙，使腐蚀介质渗入其中。在满足拌和、施工的条件下，水灰比小，则水泥浆稠，水泥混凝土的整体结构内毛细孔减少，凝聚—结晶网状结构易于形成，促使水泥的凝结硬化速度快，强度将显著提高，不易腐蚀。施工中，应控制水灰比在 0.4 左右，并加入减水剂达到降低水灰比，改善混凝土内部微观结构，提高混凝土抗盐、抗冻破坏能力，提高混凝土强度及耐久性。

4.2.5.2 严格控制混凝土标号，确保混凝土强度

大量的实验及工程实践表明，混凝土的标号如小于 C25，则在自然界中长期冻融、侵蚀易风化破坏，对于路缘石、排水沟等构造物我们结合道路的使用年限，建议其标号不能低于 C25，同时必须确保制作过程能做到真正满足其强度设计要求（水泥最小用量控制在 370 公斤/立方米以上）。这里需要特殊指出的是，强度不合格的路缘石极易受侵蚀而破坏。反之，也不能盲目地过高追求高标号，在对桃仙机场道面的调研中发现，水泥混凝土标号越高，其 $Ca(OH)_2$ 浓度越大，混凝土液相的碱浓度也越大，发生碱集料反应与“D”开裂的机率也越大。因此，恰如其分地控制水泥混凝土标号至关重要。

4.2.5.3 混凝土制作中，砂率不能超过 30%，同时确保振捣效果，严禁过振、漏振和漏浆。

4.2.5.4 高度重视养生工作

混凝土构件的养生非常重要，须洒水养护，但注意：

气温低于 20℃ 时，不能在混凝土表面直接浇水，需在草袋上浇水。

浇水（保持构件湿润）时间在 7 天—14 天之间（干燥气候中 14 天）

在强度允许的情况下，尽早脱膜浇水养生。

避免强水流冲击混凝土表面。

特别值得注意的是：混凝土构件在施工中有时需用量很大，以致一些构件生产厂家多采用蒸汽养生，此时应注意：

混凝土浇完 2-6 小时（一般为 3 小时）后才可通蒸汽，不能浇完即通气，否则混凝土在水化过程中造成自身破坏。

温度均匀上升，养生结束后，温度均匀下降，普通混凝土温度控制在 60-80℃ 为宜。恒温养护时间为 5-8h 为宜。

最高温度限制：对硅酸盐水泥或普通水泥，宜控制 80℃，最高不超 85℃；对矿渣水泥，宜控制 90℃；最高不超过 95℃。

4.2.6 对特殊路段（如撒除雪剂段）的构件人为敷设防腐保护层：

当混凝土构件应用在撒除雪剂段时，为避免其受侵蚀，可在混凝土表面敷设一层耐腐蚀且不透水的保护层，如涂刷防水胶等。

4.2.7 道面混凝土腐蚀预防

前面介绍的道面混凝土出现腐蚀，基本都与水泥含碱量高有关。又因混凝土所用骨料品种不同，分为使用花岗岩、砂岩时出现碱—集料反应。还有一项所谓的“D”开裂，属物理性反应。“D”开裂是混凝土以石灰石为骨料时，被认为是由于石料抗冻性差，而出现的一种破坏性反应。可是所描述的裂纹形状，又和其它两类腐蚀性反应基本相同，并且混凝土的水泥碱含量较高时，“D”开裂会较快出现，所以对“D”开裂的预防，我们仍可以把它归入碱—碳酸盐反应这类来考虑。

道面混凝土的腐蚀性反应，目前都明确要求道面混凝土需使用低碱水泥。可是这项措施，只是对碱—硅反应效果明显。从反应式可看到，碱—硅酸反应是集料中的活性硅与钠（钾）的反应。如果钠（钾）的含量低，则不致造成破坏性反应。因此当混凝土骨料是花岗岩、砂岩时，使用低碱水泥，可以较为有效的防止出现腐蚀性反应。应该注意的是，使用低碱水泥，但水泥的标号较高，还不能完全解决碱—碳酸反应。可能由于过去认为，只有加拿大的一种石灰石，才会发生碱—碳酸盐反应，因此没有把注意力放到这个问题上。可是在九十年代山东的济南、潍坊机场，建成不久既出现了严重道面腐蚀性反应，虽未经实验定性，但混凝土用的是石灰石，不是碱—碳酸反应，就是“D”开裂。由于这类反应出现较快，更应引起我们注意寻找有针对性的预防措施。

从碱—碳酸反应的式中，这种反应虽与钠（钾）有关，但钠（钾）的存在不是这种反应的充要条件。关键是混凝土液相的碱浓度高，就可诱发这种反应。所以防止出现碱—碳酸盐反应及“D”开裂，除了不用高碱水泥外，还有一个重要因素，就是怎样能实现混凝土液相的低碱浓度。

我们的研究表明，生成混凝土腐蚀的反应式，无论是碱—硅酸反应，或碱—碳酸反应，都是OH⁻离子在其中起作用。而OH⁻离子，主要来自游离Ca(OH)₂在混凝土硬化过程中起重要作用。所以愈是高标号水泥，其Ca(OH)₂浓度愈高，混凝土液相的碱浓度也愈高。

为使混凝土液相碱浓度低一些，道面混凝土工程不宜使用标号过高的水泥。五十年代起，道面混凝土的强度要求就与现在的一致，但那时使用的是400号混凝土，按现在的水泥标号，相当于32.5级水泥。而现在道面混凝土水泥，至少是42.5级水泥，还有不少使用的是52.5级水泥。我国六十所代前的道面混凝土，几乎没有发现碱腐蚀现象。除了那时水泥中碱含量较低外，用低标号水泥，混凝土液相碱浓度较低，不能说不是一个重要因素。桃仙机场场道混凝土，用的是52.5级水泥，抗折强度要求4.5Mpa以上，实际大多达到6Mpa以上，高的达7Mpa以上。看出降低一点水泥标号是完全可能的。为预防混凝土出现腐蚀破坏，我们建议道面混凝土工程用标号不高于42.5级水泥。

我们的研究还发现，预防道面混凝土出现腐蚀性破坏，除严格控制水泥的碱含量不超过千分之六，及不使用高标号水泥外，施工操作上，对道面混凝土作真空处理，也对防止出现腐蚀性反应有重要作用。

道面混凝土工程施工中，即使按设计水灰比投水，混凝土拌和料经振实作用，粗骨料下沉，细骨料上泛，拌和料中的多余水分，也随之富集于表层混凝土中。这不但会影响表层混凝土的耐磨性，更主要的，溶于水中的碱分，随多余水分上泛，积存于表层混凝土中，这就会增大表层混凝土的碱含量，使表层混凝土更容易出现腐蚀性反应。采用真空吸水工艺，可将混凝土拌和料中多余的水分吸出，使混凝土致密。它的另一重要作用，是将溶于水中的碱，随吸出的水分吸去，降低混凝土的碱含量，对增进混凝土质量，特别对增进表层混凝土质量有重要作用。

4.2.8 高度重视混凝土的“预先设防”工作，提高其自身“免疫力”

(1) 关于“基本措施”

最大限度提高混凝土的密实性。优质混凝土、密实性混凝土、高性能混凝土等，都能提高阻挡腐蚀介质渗入混凝土中的能力，减缓介质的扩散速度。从而延长了介质到达钢筋表面并达到“临界值”的时间，这就延长了结构物的使用寿命。

增加混凝土保护层厚度

图 4.1 为 50 年海洋环境(年平均温度 18)中混凝土方桩的混凝土厚度与 Cl^- 渗透量之间的关系。

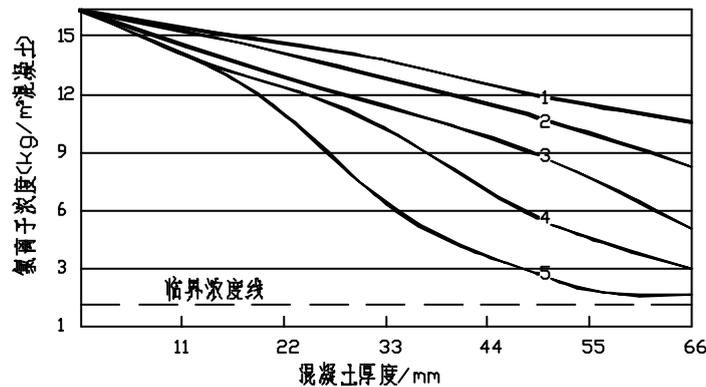


图4.1 混凝土厚度与 Cl^- 渗透量之间的关系

1-水灰比为0.45 ; 2-水灰比为0.40 ;3-水灰比为0.35

4-电量为600C; 5-电量为300C

由图 4.1 可以看出：

1) Cl^- 在混凝土中的浓度(含量) 是随混凝土的深度(厚度)的增加而减小的；

2)在同样环境条件下,混凝土的水灰比越低,Cl⁻在混凝土中的浓度(含量)越低,并随混凝土的深度(厚度)的增大而衰减越快,说明降低水灰比对于降低Cl⁻在混凝土中的渗透速度是很有效的;

3)Cl⁻在混凝土中的浓度(含量)随混凝土厚度的增大而降低。说明增大混凝土保护层厚度,对于减缓Cl⁻的渗透量也是很有效的;

4)即使是高密实混凝土,50年、66mm混凝土保护层,钢筋表面Cl⁻的浓度也达到了足以使混凝土顺筋开裂的“临界值”(1kg/m³) ; 采用水灰比为0.45的混凝土,50年、66mm处钢筋表面Cl⁻的浓度可达到15kg/m³。如果混凝土保护层厚度更小或者水灰比更大,钢筋表面Cl⁻的浓度还会更高。有人预测,采用高密实混凝土,如果能在50年内使钢筋表面的Cl⁻的浓度不超过“临界值”(1kg/m³),混凝土保护层厚度至少需要120mm。

最大限度地防止混凝土裂纹的产生

混凝土的裂纹(宏观、微观)是影响钢筋锈蚀和混凝土耐久性的最重要因素之一,一些国家的规程、规范中对于裂纹有严格规定,如美国混凝土学会(ACI222)规定,对于使用化冰盐的环境,混凝土裂纹应小于0.007英寸(约0.18mm);对于海洋环境,混凝土裂纹应小于0.006英寸(约0.15mm)。为了防止和减缓有害介质的危害,这些限制性规定是十分重要和必要的。

(2) 附加措施

附加措施的必要性

国内外大量实践和试验证明,在严酷的氯盐环境中,10-20年内就要出现钢筋腐蚀破坏和修复。即使是高密实混凝土,66mm厚的混凝土保护层,50年内钢筋表面Cl⁻的浓度也超过了足以使混凝土顺筋开裂的“临界值”(1kg/m³),即难以达到50年的使用寿命;

虽然增加混凝土保护层厚度是有效的措施之一,但有些结构(如桥梁)不可能采用太厚的保护层。因此,增加混凝土保护层厚度的方法也有一定限度。

混凝土的密实性和裂纹控制,除材料、合理配比外,很重要的是施工、养护过程。大型工程的施工与质量控制,是一个复杂的过程,需要整体水平和人员素质的提高。因此,工程实现高迷失、无裂纹的混凝土制作是困难的,对于我国更上如此。

附加措施的主要内容

表 4-3 在氯盐环境中钢筋防腐蚀常用技术措施

防护种类	措施内容
钢筋采制与钢筋涂层	环氧涂层钢筋 镀锌钢筋 耐蚀合金钢 不锈钢
混凝土外加剂、掺合料	钢筋阻锈剂 硅灰 高性能混凝土
混凝土表面封闭、涂层	硅酮类 涂料 聚合物灰浆 其他防水层
电化学方法	阴极保护、电化学除盐
设计	选材、结构设计、水/灰比、混凝土保护层厚度、排水系统、防护方案选择

施工	固化与养护、温度与裂缝控制、严格规范施工
维护	裂缝修补、清洗排水、控制防冰盐用量
综合措施	以上两项或多项措施联合使用

4.3 试验成果

见表 4-4、表 4-5

表 4-4 水泥混凝土试件侵蚀冻融情况汇总表（随机取样部分）

液相环境		普通淡水浸				10%除雪剂液浸				30%除雪剂液浸				5%Na ₂ SO ₄ 液浸				海水			
混凝土试件		20#	25#	30#	35#	20#	25#	30#	35#	20#	25#	30#	35#	20#	25#	30#	35#	20#	25#	30#	35#
冻融 损坏 情况	15 个 循 环	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	浸液 浑浊	无反应	无反应	无反应	浸液 浑浊	浸液 浑浊	无反应	无反应	浸液 浑浊 表面 起微 皮	浸液 浑浊	无反应	无反应
	30 个 循 环	表面 脱皮 (较 轻)	无反应	无反应	无反应	浸液 浑浊 表面 起微 皮	无反应	无反应	无反应	浸液 浑浊 表面 起皮	无反应	无反应	无反应	浸液 浑浊 表面 起皮	浸液 浑浊 表面 起皮	浸液 浑浊	无反应	表面 脱皮 可见 骨料	表面 脱皮	无反应	无反应
	50 个 循 环	表皮 严重 脱落 见骨 料	表皮 严重 脱落 见骨 料	表面 脱皮	无明 显变 化	表皮 严重 脱落 个别 骨料 脱落	表皮 严重 脱落 个别 骨料 脱落	表皮 严重 脱落 见骨 料	浸液 浑浊 表面 脱皮	骨料 脱落	表皮 严重 脱落 见骨 料	表皮 严重 脱落 见骨 料	表面 脱皮	试块 消 失, 骨料 散落	表皮 严重 脱落 骨料 脱落	表皮 严重 脱落 个别 骨料 脱落	表皮 严重 脱落 见骨 料	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	表皮 严重 脱落 个别 骨料 脱落	表皮 严重 脱落 个别 骨料 脱落
	70 个 循 环	表皮 严重 脱落 骨料 脱落	表皮 严重 脱落 个别 骨料 脱落	表皮 严重 脱落 见骨 料	表皮 严重 脱落 见骨 料	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	表皮 严重 脱落 个别 骨料 脱落	表皮 严重 脱落 见骨 料	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	表皮 严重 脱落 个别 骨料 脱落	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落	试块 消 失, 骨料 散落

表 4-5 水泥混凝土试件侵蚀冻融情况汇总表（按照研究结论生产的）

液相环境		普通淡水浸				10%除雪剂液浸				30%除雪剂液浸				5%Na ₂ SO ₄ 液浸				海水			
混凝土试件		20#	25#	30#	35#	20#	25#	30#	35#	20#	25#	30#	35#	20#	25#	30#	35#	20#	25#	30#	35#
冻融 损坏 情况	50个循环	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应
	100个循环	无反应	无反应	无反应	无反应	液体浑浊	液体浑浊	无反应	无反应	液体浑浊	液体浑浊	无反应	无反应	液体浑浊	液体浑浊	无反应	无反应	液体浑浊	液体浑浊	无反应	无反应
	150个循环	无反应	无反应	无反应	无反应	液体浑浊	液体浑浊	液体浑浊	无反应	液体浑浊	液体浑浊	液体浑浊	无反应	液体浑浊	液体浑浊	液体浑浊	无反应	液体浑浊	液体浑浊	液体浑浊	液体浑浊
	200个循环	细微脱皮	无反应	无反应	无反应	液体浑浊 细微脱皮	液体浑浊 细微脱皮	液体浑浊	液体浑浊	液体浑浊 细微脱皮	液体浑浊 细微脱皮	液体浑浊	液体浑浊	表面脱皮	液体浑浊 表面脱皮	液体浑浊	液体浑浊	严重脱皮 见骨料	严重脱皮, 见骨料	轻微脱皮	液体浑浊

4.4 成果分析

通过调查分析阶段大量的试化验，以及我们在广泛研究基础上进行的针对性设计试验检测表明：

(1) 实验结果表明，我们严格按照研究结论生产的各种混凝土构件在不同浸蚀液相中进行的冻融试验，较以往混凝土抗腐蚀破坏能力提高3—4倍之多。基本达到了国内外关于抗腐蚀混凝土的标准要求。这样，对于普通的道路混凝土，桥涵构造物，只要严格按照前述的设计理论，正确组织工程实施，保证水泥混凝土构造物满足道路、桥梁构造的耐久性，满足其工程的设计使用年限，没有任何问题。

(2) 对于机场、海洋、化工厂矿等特殊要求或特殊腐蚀介质环境，对水泥混凝土只要在深入、仔细研究环境特点、腐蚀介质成份的前提下，通过严格界定原材料，合理增添外加剂，必要时进行特殊防腐处理，确保工程实施过程中的科学严谨，也是可以解决的。

(3) 实验结果还表明，水泥混凝土防腐问题不能泛泛而言，必须针对其使用环境结构特点，工程使用要求以及潜在的腐蚀影响，综合分析，“对症下药，一人一方”，才有实际效果。

4.5 小结

实验表明，我们前期的调查、试验研究思路是正确的、继之的设计理论是成功的、进一步的检测、验证、实验效果是良好的。应用前述的设计标准严格进行施工组织，完全可以满足普通公路工程中桥梁、构造物及机场等水泥构造物的使用寿命。

第五章 工程实例

5.1 工程概述

为了检验研究成果，进一步完善设计理论，提高混凝土加工生产技术，进而保证其耐久性。我们有针对性地对公路系统常见的普通混凝土路面、桥梁、构造物进行了试验性实施。国道 304 线沈阳段是我省交通要道，也是沈阳市区通往桃仙机场的主要路径，1997 年进行改建时采用传统方法制备的路缘石，在 2006 年公路改建时已经破损严重；我们利用道路改建机会完全更换了我们研究成果的缘石。桃仙机场跑道在 2006 年新建的水泥混凝土道面 23000 平方米；桃陨线桥梁工程为沈阳市 2007 年的重点工程项目，该工程是沈阳市李相新城项目与沈阳桃仙航空港经济圈之间的核心通道，受到东陵区委区政府高度重视，该工程中的八座桥梁的混凝土均严格按照我们的成果实施。

5.2 试验现场的选择和施工

5.2.1 丹霍线路缘石预制与使用

5.2.1.1 原材料选择

(1)水泥。选用本溪水泥厂生产的强度等级为 32.5 级的普通硅酸盐水泥，其性能见表 5-1

表 5-1 水泥性能表

安定性	初凝时间 / min	终凝时间 / min	抗折强度 / MPa		抗压强度 / MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
合格	210	340	5.2	6.4	18.6	36.5

(2)砂子。细度模数 2.65，含泥量 2.4%，表观密度 2.67 g/cm³，符合 GB/T14684—2001

规范 类标准。

(3)碎石。石灰岩碎石，最大粒径 9.5 mm，含泥量 0.5%，压碎性指标为 7.1%，表观密度为 2.72 g/cm³，技术要求符合 GB/T14685—2001 规范 类标准。

(4)粉煤灰。沈海电厂生产的 I 级粉煤灰，物理性能与化学成分见表 5-2

表 5-2 粉煤灰物理性能与化学成分表

细度	需水量	烧失量	含水量	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
7.5	93.5	1.3	0.2	0.25	49.5	5.15	25.58	3.36	2.18

5.2.1.2 超干硬性混凝土配合比设计

(1)小型预制构件生产的混凝土路缘石，由于采用机器振动成型，混凝土为塑性，可用坍落度控制，混凝土粗骨料常采用最大粒径 26.5 mm 或 31.5 mm 的碎石；机器压力成型的混凝土路缘石，采用超干硬性混凝土，应严格控制混凝土的流动性和粗骨料的

径，加入一定量的石屑可以增加混凝土的粘聚性，保证路缘石脱模养护时不损坏，否则，既影响生产速度，又影响生产质量。

(2)混凝土路缘石设计标号为 C25，机器压力成型的路缘石生产速度较快，混凝土经搅拌后灌入混凝土路缘石模具，机器加压后一次脱模成型，堆放在养护区进行自然养护。混凝土配合比经试验室试配选择两种不同材料的配合比进行比较，试验结果见表 5-3。

表 5-3 混凝土配合比试验结果

编号	配合比 / (kg / m ³) 水泥:水:砂:石屑:碎石:粉煤灰	水 / (水泥+粉煤灰)	抗压强度 / MPa				
			3d	7d	28d	60d	90d
1	400:168:494:576:823	0.42	17.3	24.3	30.8	32.1	32.9
2	360 160 494 576 823 40	0.40	15.6	22.8	31.2	34.8	36.0

5.2.1.3 配合比使用效果分析

(1)从使用两种不同配合比生产的混凝土路缘石的应用情况来看，超干硬性混凝土中加入粉煤灰代替水泥用量 10% 后，路缘石混凝土早期龄期的强度偏低，早期混凝土增长速度较慢，但 28 d 强度与未掺有粉煤灰的混凝土基本相同，并且掺有粉煤灰的混凝土后期强度有较大增长，对路缘石的耐久性有良好的作用，掺有粉煤灰与未掺粉煤灰两种配合比的路缘石混凝土各龄期强度的增长情况见表 5-4。

表 5-4 混凝土强度增长率 (%)

混凝土龄期	3d	7d	28d	60d	90d
未掺粉煤灰	56.2	78.9	100	104.2	106.8
掺 10% 粉煤灰	50.0	73.1	100	111.5	115.4

(2)超干硬性混凝土路缘石在掺入粉煤灰后，混凝土配合比中用水量减少，混凝土的和易性得到提高。在 1:1 水泥砂浆面层中，未掺有粉煤灰时采用机器压力一次成型的路缘石气泡较多，影响混凝土路缘石美观；掺入 10% 的粉煤灰后，气泡明显减少，改善了构件砂浆的和易性，大大提高了混凝土路缘石的外观质量，及抗腐蚀能力。

5.2.1.4 路缘石混凝土强度的快速检测

预制厂生产的超干硬性混凝土路缘石采用机器压制成型，试验规范规定每小班制作一组且每 100 m³ 路缘石至少制作一组混凝土试件，由于超干硬性混凝土试件制作困难，只能采用混凝土切割机把路缘石切成 100mm × 100mm × 100 mm 的标准试件，此方法制作困难且受到机械设备等因素的限制；而利用混凝土材料的受力特性及相关知识，对路缘石整体试压，经过计算准确得出路缘石的混凝土强度，方法简单、准确、可节省大量的人力、物力，受到预制厂管理人员的认可，提高了工程试验检验的技术水平。

1. 计算过程及相关理论

路缘石的外观尺寸，侧面积为 300 × 120 = 36000 mm²。

因路缘石的基本尺寸为 300 mm × 120mm × 495mm，依据《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ81—85)确定路缘石为棱柱体，测出的强度为轴心抗压强度，当压力为 F、面积

为 A 时，轴心抗压强度 $f_{cp}=F/A$ ，《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)规定，棱柱体抗压强度平均值 f_{cp} 与立方体抗压强度平均值 f_{cu} 的关系为 $f_{cp}=0.76f_{cu}$ ，故路缘石立方体强度的计算公式为 $f_{cu}=F/(0.76A)$ 。例如当路缘石的破坏荷载为 700 kN 时，算得立方体抗压强度为 25.8 MPa。

2. 经济性分析

(1)用常规方法检验路缘石，每制作一组试件需机械费 30 元、人工费 20 元，合计 50 元，一年共计制作 200 组试件，全年共计费用 10 000 元。

(2)采用新技术后，无需制作试验试件，节约制作费，直接创造经济效益 10 000 元，还提高了混凝土强度的检测水平，拓展了试验思路与方法，未来的经济效益显著。

(3)跟踪试件的检测结果表明，该混凝土构件完全满足道路使用年限内的安全问题，不能再发生修复，更换费用，经济、社会效益显著。

5.2.2 桃仙机场混凝土道面

水泥混凝土道路具有自身承载能力高、车辆通过能力强、使用寿命长等特点，在公路建设和施工中得到了广泛的应用。随着我国公路事业迅速发展，水泥混凝土道路以其不可替代的优势，在公路建设中发挥着越来越重要的作用。搞好水泥混凝土道路的养护，延长公路的使用寿命，使之更好的为经济建设服务，具有十分重要的意义。

5.2.2.1 水泥混凝土摊铺

除了对混凝土原材料及制作方式按前述严格控制外，水泥混凝土路面摊铺是施工中难度较大、技术要求较高的工序，我们在摊铺前准备，摊铺机的合理运用，摊铺后养护等方面也做了严格的限制。

(1) 摊铺前的准备工作

混凝土摊铺前的准备工作很多，我们主要强调一下摊铺前的洒水的卸料工序。

摊铺前洒水是一个看似简单的工序，往往不被施工人员重视，但如果洒水处理不好会严重影响路面质量。

洒水量要根据基层材料、空气温度、湿度、风速等诸多因素来确定洒水量，即保证摊铺混凝土前基层湿润，而且尽可能洒布均匀，尤其在基层不平整之处禁止有存水现象。从目前施工现场来看，大多数情况下是洒水量不足，因为基层较干，铺筑后混凝土路面底部产生大量细小裂纹，有些小裂纹与混凝土本身收缩应力产生的裂纹重叠后使整个混凝土路面裂纹增多。

自卸车的卸料也是常常不被重视的工序，在施工中经常发生摊铺机前堆料过多使摊铺机行走困难，有时布料过少使振捣箱内混凝土量不足，路面厚度得不到保证。摊铺机前这种混凝土忽多忽少现象会严重影响混凝土路面的平整度。在施工过程中大多数施工者死板地间隔一定距离卸一车料，而忽视了基层不平整的变化，这咱变化在客观上是普遍存在的。我国目前施工水平不是很高，对路面基层标高和平整度不一致，加大了混凝土路面施工的难度。在实际施工中，我们对基层表面与面层基准标高线隔段实测来决定混凝土的卸料量，这样会避免卸料不均的问题。

(2) 混凝土摊铺机的合理使用

振捣器间隔距离的确定看似简单，但它会对混凝土的密实度产生直接影响。振捣器的间隔一般在厂家安装高度时均加以调整、确定、正是这一点使操作人员忽视了振捣器使用中的再定位，因为要的不同混凝土的级配、和易性、坍落度以及摊铺后的密实度要求，振捣器的间隔应做适当调整，这是非常必要的，尤其是两边的振捣器距侧模板的距离更应该常做出调整，以防止坍边。

另外，液压式振捣器随着使用时间的加长，振捣能力有所下降，要根据实际情况做出调整。

许多摊铺机边模板的升降是通过液压缸来调整的。在实际使用中，边模板不能与基层间距太大，以防止严重漏浆，由于这一要求，摊铺行走过程中随着基层变化，边模板会直接与基层接触，使边模板形成支承点，严重影响了成型模对混凝土的挤压在型，坍边严重。

从目前国内施工单位来看，大多数单位摊铺能力远远大于搅拌的生产能力。这主要是由于一般摊铺机最大摊铺能力均大于 500m³/h，而混凝土生产能力只有 100—200m³/h，有些单位生产能力更小，强调这一点主要是为了说明摊铺机的摊铺速度没有必要开得很快，单方面的速度并不能提高施工进度。

在施工中如果将摊铺速度控制在 1—2m/min 左右，就会使摊铺机运行平稳，路面平整度好，连续摊铺成为可能。而如果混凝土摊铺速度过快则会造成铺铺停停，不仅使每次启动时设备磨损大大增加，而且每次停机时的停机跳点不可避免，造成路面平整度很差。

(3) 摊铺后的养护

严格遵守混凝土路面摊铺后的例行养护工序之外，我们突出强调切缝时间的控制，在一些施工规范中列出了切缝机开始切缝时间表（见表 5-5）。这里开始切缝时间指混凝土抹平成型后所经历的时间。

表 5-5 切缝机开切缝时间表

序号	昼夜平均温度 (°C)	开始切缝时间 (d)
1	5	4
2	0	3
3	15	2
4	20	1.5
5	≥25	1

不难看出，此表仅列出温度对切缝时间影响，但实际施工中影响混凝土铺筑后强度的不仅是温度这一个条件，还有湿度，风速，路面厚度以及混凝土添加剂的含量等重要因素。上述因互助中风速对强度形成影响很大，风速较大地区应根据实际情况来确定切缝时间，

如果不考虑风速，通常是切缝时间过晚，混凝土强度较高切割速度慢，切割机及刀片损坏度高。

5.2.2.2 水泥混凝土搅拌

水泥混凝土搅拌质量直接影响混凝土的内在质量，混凝土的质量则影响路面的平整度。我们从影响混凝土坍落度的因素和自动砂石含水补偿装置的正确使用两方面进行分析。

A. 影响混凝土坍落度的主要因素

(1) 级配变化对混凝土坍落度的影响是很大的，由于水和水泥对等体积的大料和细料和包裹率有着很大的差别，如在同等含水量和水灰比的情况下细料混凝土坍落度远远小于粗料混凝土坍落度，因此混凝土搅拌生产过程中的往骨料仓里上料时要尽可能保持各仓骨料级配相对稳定，从而确保混凝土级配的配定。

(2) 含水量的变化对混凝土坍落度的影响更是显而易见的，一般搅拌站水秤中的水量变化可以直观地了解，但砂中含水率变化大时对混凝土的坍落度影响十分明显，这一点已经得到施工者足够重视。但在雨水较大地区或下雨过后，坍落度很不好控制。因此，在搅拌生产过程中应先测一下骨料中的含水率，水秤中应扣除这此水量，以得到理想的效果。

(3) 水泥温度对混凝土坍落度的影响往往被施工人员忽视，这种因素往往在单机生产能力较大的搅拌站中发生，因为一般水泥仓只有 100—150t 左右，大方量搅拌站用水量也较多，有些时候一边往水泥罐里打水泥一边生产，有时候水泥还没有冷却下来就开搅拌，这不仅使生产出的混凝土温度较高，而且坍落度因水泥温度高，吸水较大而变小。

(4) 水秤和水泥秤的称量偏差对混凝土坍落度的影响是很大的，如果水秤和水泥秤的称量偏差都是稳定的，操作人员可根据实际重量计算用量。如果这个偏差是不稳定的，尤其是用水计量采用流量计方法的搅拌站，水量计量偏差较大且不稳定，因而坍落度不易控制。

(5) 添加剂的用量也是影响混凝土坍落度的重要因素，目前因为添加剂用量较多，因而添加剂用量的多少就直接对坍落度起作用。在添加剂的使用中不要用量过大。它虽然能使水量减少，便用量过大会使混凝土的一些物理、化学性能发生较大变化。所在具体生产的过程中，减水剂的用量应相对稳定，才会起到较好的作用。

B. 砂石自动含水补偿装置的正确使用

在使用自动含水补偿装置时有一种错误认识，即自动测量显示仪显示的百分数就是砂石中的含水率。这种认识主要原因是缺乏对此装置原量的理解，要正确使用自动含水补偿装置，必须在每次使用前重测砂石的实际含水量并依此调节显示仪上的显示值。

自动测量补偿装置能够正常工作、精确补偿后，混凝土的坍落度会得到很好的控制。

5.2.3 桃隈线桥梁工程

5.2.3.1 材料选择

本工程采用商品混凝土浇筑。对主要材料要求如下：

(1) 水泥：考虑普通水泥水化热较高，特别是应用到桥涵混凝土中，大量水泥水化热不易散发，在混凝土内部温度过高，与混凝土表面产生较大的温度差，使混凝土内部产生压应力，表面产生拉应力。当表面拉应力超过早期混凝土抗拉强度时就会产生温度裂缝，因此确定采用水化热比较低的矿渣硅酸盐水泥，标号为 42.5 级，通过掺加合适的外加剂可以改善混凝土的性能，提高混凝土的抗渗能力。

(2) 粗骨料：采用碎石，粒径 5-25mm，含泥量不大于 1%。选用粒径较大、级配良好的石子配制的混凝土，和易性较好，抗压强度较高，同时可以减少用水量及水泥用量，从而使水泥水化热减少，降低混凝土温升。

(3) 细骨料：采用中砂，平均粒径大于 0.5mm，含泥量不大于 3%。选用平均粒径较大的中、粗砂拌制的混凝土比采用细砂拌制的混凝土可减少用水量 10%左右，同时相应减少水泥用量，使水泥水化热减少，降低混凝土温升，并可减少混凝土收缩。

(4) 粉煤灰：由于混凝土的浇筑方式为泵送，为了改善混凝土的和易性便于泵送，考虑掺加适量的粉煤灰。按照规范要求，采用矿渣硅酸盐水泥拌制大体积粉煤灰混凝土时，其粉煤灰取代水泥的最大限量为 25%。粉煤灰对水化热、改善混凝土和易性有利，但掺加粉煤灰的混凝土早期极限抗拉值均有所降低，对混凝土抗渗抗裂不利，因此粉煤灰的掺量控制在 10 以内，采用外掺法，即不减少配合比中的水泥用量。按配合比要求计算出每立方米混凝土所掺加粉煤灰量。

(5) 外加剂：设计无具体要求，通过分析比较及过去在其它工程上的使用经验，每立方米混凝土 2kg，减水剂可降低水化热峰值，对混凝土收缩有补偿功能，可提高混凝土的抗裂性。

5.2.3.2 混凝土配合比

(1) 混凝土施工前应按技术要求，提前做好混凝土试配。

(2) 混凝土配合比应提前试配确定。按照国家现行《混凝土结构工程施工及验收规范》、《普通混凝土配合比设计规程》及《粉煤灰混凝土应用技术规范》中的有关技术要求进行设计。

(3) 粉煤灰采用外掺法时仅在砂料中扣除同体积的砂量。另外应考虑到水泥的供应情况，以满足施工的要求。

5.2.3.3 现场准备工作

(1) 基础混凝土应尽快施工完毕，并进行隐蔽工程验收。

(2) 基础底板上的地坑、积水坑采用组合钢模板支模，不合模数部位采用木模板支模。

(3) 浇筑混凝土时预埋的测温管及保温必需的塑料薄膜、草席等应提前做好。

(4) 项目经理部应与建设单位联系好施工用电，以保证混凝土振捣及施工照明用。

(5) 管理人员、施工人员、后勤人员、保卫人员等昼夜排班，坚守岗位，各负其责，保证混凝土连续浇灌的顺利进行。

5.2.3.4 混凝土温度和温度应力

根据设计要求，对混凝土进行温度检测；混凝土中部中心点的温升高峰值，该温升值一般略小于绝热温升值。一般在混凝土浇筑后 3d 左右产生，以后趋于稳定不在升温，并且开始逐步降温。规范规定，对大体积混凝土养护，应根据气候条件采取控温措施，并按需要测定浇筑后的混凝土表面和内部温度，将温差控制在设计要求的范围内；当设计无具体，要求时，温差不宜超过 25 度；本工程设计无具体要求，即按规范执行。表面温度的控制可采取调整保温层的厚度。

5.2.3.5 混凝土施工

(1) 混凝土浇筑时应采用“分区定点、一个坡度、循序推进、一次到顶”的浇筑工艺。钢筋泵车布料杆的长度，划定浇筑区域，每台泵车负责本区域混凝土浇筑。浇筑时先在一个部位进行，直至达到设计标高，混凝土形成扇形向前流动，然后在其坡面上连续浇筑，循序推进。这种浇筑方法能较好的适应泵送工艺，使每车混凝土都浇筑在前一车混凝土形成的坡面上，确保每层混凝土之间的浇筑间歇时间不超过规定的时间。同时可解决频繁移动泵管的问题，也便于浇筑完的部位进行覆盖和保温。

(2) 混凝土浇筑时在每台泵车的出灰口处配置 1~2 台振捣器，因为混凝土的坍落度比较大，在 1.5 米厚的底板内可斜向流淌 1 米远左右，2 台振捣器主要负责下部斜坡流淌处振捣密实，另外 2~4 台振捣器主要负责顶部混凝土振捣。

(3) 由于混凝土坍落度比较大，会在表面钢筋下部产生水分，或在表层钢筋上部的混凝土产生细小裂缝。为了防止出现这种裂缝，在混凝土初凝前和混凝土预沉后采取二次抹面压实措施。

(4) 现场按每浇筑 100 立方米（或一个台班）制作 3 组试块，1 组压 7d 强度，1 组压 28d 强度归技术档案资料用；1 组作仍 14d 强度备用。

(5) 防水混凝土抗渗试块按规范规定每单位工程不得少于 2 组。考虑本工程不太大，按规定取 2 组防水混凝土抗渗试块。

5.2.3.6 混凝土测温

(1) 混凝土浇筑时应设专人配合预埋测温管。测温管的长度分部为两种规格。测温线应按测温平面布置图进行预埋，预埋时测温管与钢筋绑扎牢固，以免位移或损坏。每组测温线有 2 根（即不同长度的测温线）在线的上断用胶带做上标记，便于区分深度。测温线用塑料带罩好，绑扎牢固，不准将测温端头受潮。测温线位置用保护木框作为标志，便于保温后查找。

(2) 配备专职测温人员，按两班考虑。对测温人员要进行培训和技术交底。测温人员要认真负责，按时按孔测温，不得遗漏或弄虚作假。测温记录要填写清楚、整洁，换班时要进行交底。

(3) 测温工作应连续进行，每测一次，持续测温及混凝土强度达到时间，强度并经技术部门同意后方可停止测温。

(4) 测温时发现混凝土内部最高温度与部门温度之差达到 25 度或温度异常，应及时通知技术部门和项目技术负责人，以便及时采取措施。

5.2.3.7 混凝土养护

(1) 混凝土浇筑及二次抹面压实后应立即覆盖保温，先在混凝土表面覆盖二层草席，然后在上覆一层塑料薄膜。

(2) 新浇筑的混凝土水化速度比较快，盖上塑料薄膜后可进行保温保养，防止混凝土表面因脱水而产生干缩裂缝，同时可避免草席因吸水受潮而降低保温性能。

(3) 柱、墙插筋部位是保温的难点，要特别注意盖严，防止造成温差较大或受冻。

(4) 停止测温的部位经技术部门和项目技术负责人同意后，可将保温层及塑料薄膜逐层掀掉，使混凝土散热。

5.3 使用效果检查

目前应用我们设计理论实施施工的丹霍线路缘石、桃仙机场混凝土路面、桃陨线八座桥梁均使用状况良好无破损。



图 5.1 丹霍线路缘石

(使用已达两年，路缘石完好如初)



图 5.2 丹霍线路缘石

(使用已达两年，路缘石完好如初)



图 5.3 桃陨线桥梁防撞墙图



图 5.4 桃陨线桥面板底面



图 5.5 桃陨线桥盖梁及柱



图 5.6 桃仙机场混凝土路面



图 5.7 桃仙机场混凝土路面



图 5.8 桃陨线桥下部

5.4 小结

在工程实践的应用过程中，我们严格控制了原材料选择、配合比设计、水泥混凝土的加工制作、养生、维护的各个关键环节，并对大量的跟踪试件进行不同条件下的检测试验，试验结果及实践工程的使用状况调查结果表明，本文的研究结论可以彻底解决水泥砼在公路系统中的耐久性问题。

第六章 结论与展望

6.1 结论

水泥混凝土腐蚀破坏的机理研究及有效防治措施的探讨,涉及材料学、结构学、力学、物理、化学、环保等多学科、多领域的复杂知识结构,研究方法、研究内容的深度和广度也因腐蚀破坏的复杂性而不尽相同。本文在对水泥成份、混凝土原材料成份分析的基础上,针对不同腐蚀破坏介质特点,对水泥混凝土进行不同的配合比设计,并在特殊使用环境中采取防腐措施等一系列手段,经过室内实验、工程现场使用,检测结果证明了研究结论的有效性和可靠性。该成果普遍适用于普通水泥混凝土的全面应用。对于公路工程中的混凝土道面、桥梁、各种构造物,可以实现混凝土的使用寿命完全满足其所在工程的设计年限及所在工程的周期寿命。主要研究结论如下:

1、原材料选择及设计方面

(1) 水泥的选择

- a. 严格控制使用含过量石膏的水泥。
- b. 对硫酸盐类的腐蚀,可选用含 $CaO \cdot Al_2O_3$ 含量低的水泥。
- c. 对软水(如雪、雨)溶析及 H_2CO_3 侵蚀的防治,可选用硅酸三钙含量低的水泥,使水化物中 $Ca(OH)_2$ 含量减少。
- d. 在酸性及含镁盐的水中,矿渣水泥易受腐蚀,严禁使用。
- e. 建议使用低碱水泥(尤其是水泥混凝土道面施工中)。
- f. 降低水泥混凝土液相中的碱浓度。
- g. 确保混凝土构造物必要的强度要求,但不能盲目地、过度地追求水泥混凝土的高标号。

(2) 砂的选择

砂的细度模数控制 3.0—2.0 之间,平均粒径 0.5—0.3 之间,含泥量 3%,云母含量 1%,轻物质含量 1%,硫化物及硫酸盐折成为 SO_3 1%。

(3) 碎石的选择:

针状片状颗粒含量 15%,泥土含量 1%,硫化物及硫酸盐折算为 SO_3 1%。

(4) 水的选择

污水,PH 值小于 4 的酸性水及含硫酸盐量按 SO_3 计超过水质量 0.27%的水不得使用。

必要时,必须对用于工程的饮用水进行 SO_3 含量检测。不能以能否饮用为选择标准。

2、混凝土构造物的施工及养护方面

(1) 严格控制水灰比，提高水泥混凝土的紧密度。施工中，应控制水灰比在 0.4 左右，并加入减水剂达到降低水灰比，改善混凝土内部微观结构，提高混凝土抗盐、抗冻破坏能力，提高混凝土强度及耐久性。

(2) 严格控制混凝土标号，确保混凝土强度。大量的实验及工程实践表明，混凝土的标号如小于 C_{25} ，则在自然界中长期冻融、侵蚀易风化破坏。反之，也不能盲目地过高追求高标号，水泥混凝土标号越高，其 $Ca(OH)_2$ 浓度越大，混凝土液相的碱浓度也越大，发生碱集料反应与“D”开裂的机率也越大。因此，恰如其分地控制水泥混凝土标号至关重要。

(3) 混凝土制作中，砂率不能超过 30% 同时确保振捣效果，严禁过振、漏振和漏浆。

(4) 高度重视养生工作。气温低于 20℃ 时，不能在混凝土表面直接浇水，需在草袋上浇水。浇水（保持构件湿润）时间在 7 天—14 天之间。在强度允许的情况下，尽早脱膜浇水养生。避免强水流冲击混凝土表面。采用蒸汽养生时，混凝土浇完 2-6 小时（一般为 3 小时）后才可通蒸汽，不能浇完即通气，否则混凝土在水化过程中造成自身破坏。温度均匀上升，养生结束后，温度均匀下降，速度控制在 15—20℃/h 为宜。温度上升过程中，一般混凝土控制 80℃。最高温度限制：对硅酸盐水泥或普通水泥，宜控制 80℃，最高不超 85℃；对矿渣水泥，宜控制 90℃；最高不超过 95℃。

(5) 对特殊路段（如撒除雪剂段）的构件人为敷设防腐保护层，如涂刷防水胶等。

(6) 高度重视混凝土的“预先设防”工作，提高其自身“免疫力”。最大限度地提高混凝土的密实性。增加混凝土保护层厚度。最大限度地防止混凝土裂纹的产生。

6.2 展望

如本文所言，水泥混凝土构造物腐蚀破坏后，修复费用很高。如果加之间接损失费用往往要几倍甚至十倍于本身价值。因此，通过理论研究，现场实践，能够解决我们辽沈地区公路工程中普通混凝土的耐久性问题，其经济、社会、环境效益是十分巨大的。但本文在以下方面尚需进一步的完善与研究。

- 1、不同品种水泥在不同使用环境中使用的可靠性，尚需进一步研究。
- 2、水泥混凝土腐蚀破坏的多种诱因及共同作用的分析与研究，尚待深入进行。
- 3、钢筋混凝土腐蚀破坏的有效防治，需更深入的研究。
- 4、海洋、化学腐蚀导致的混凝土破坏，需进一步研究。
- 5、本文仅限于普通公路工程，常见的、简单的水泥混凝土现状的分析与研究，建议扩大使用范围与选材范围的理论研究。
- 6、建议通过对工程实践的进一步跟踪检测，修正设计、施工理论，并进一步提供相应设计参数及检测指标。
- 7、建议抓紧建立辽沈地区水泥混凝土耐久性行业标准。

参考文献

1. 王庆明.公路圬工桥涵设计规范与钢筋混凝土路桥工程测量施技术标准规范及预应力测试实用手册
2. 中华人民共和国水利部专家工作室编.环境水侵蚀性的特征和标准： H114-54 水工混凝土规范
3. 张滨 陈金波 刘桂英.寒冷地区水工混凝土建筑物侵蚀破坏的类型
4. 马惠珠.混凝土外部硫酸盐侵蚀破坏的研究
5. 刘崇熙.坝工混凝土耐久寿命的衰变规律[J].长江科学院院报, 2000, 35(4): 20—
6. 吕林女,何永佳,丁庆军,等.混凝土的硫酸盐侵蚀机理及其影响因素[J].焦作工学院学报(自然科学版), 2003, 22(6): 466-468.
7. 申春妮,杨德斌,方祥位,等.混凝土硫酸盐侵蚀影响因素的探讨[J].水利与建筑工程学报, 2004, 2(2): 16-19.
8. 柯伟.中国腐蚀调查报告[M].北京:化学工业出版社, 2003.
9. 冯乃谦,邢锋,牛全林.水泥抗硫酸盐侵蚀检测方法的探讨[J].
10. 马孝轩,冷发光,郭向勇.混凝土材料抗硫酸盐侵蚀实验方法研究[J].
11. Skalny, J.S. Pierce. Sulfate attack issues: an overview. Materials Science of Concrete—Sulfate Attack Mechanisms, .
12. P.K. Mehta. Sulfate attack on concrete: separating myths from reality, Concr. Int.
13. P.W. Brown, .Thaumasite formation and other forms of sulfate attack, guest editorial, Cem. Concr. Compos.
14. A.Neville. The confused world of sulfate attack on concrete[J]. Cem. Concr. Res.
15. R.J.Flatt. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated, [J]. Cryst. Growth, .
16. 胡明玉,唐明述.碳硫硅钙石对混凝土的破坏作用.
17. I.Biczok. Concrete Corrosion Concrete Protection[M]. Chemical Publishing: New York.
18. M.Santhanam ,M.D.Cohen, J.Olek. Sulfate attack research—whither now ?[J] .Cem.Concr.Res.
19. 胡明玉,唐明述.碳硫硅钙石型硫酸盐腐蚀研究综述[J].混凝土.
20. 湖南大学等编著.建筑材料[M].
21. 亢景富.混凝土硫酸盐侵蚀研究中的几个基本问题[J].混凝土.
22. 屈文俊.侵蚀性环境下混凝土结构耐久寿命预测方法探讨[J].
23. X. Ping, J.J. Beaudoin. Mechanism of sulfate expansion I. Thermodynamic

principles of crystallization pressure[J]. Cem Concr Res

24.X. Ping, J.J. Beaudoin. Mechanism of sulfate expansion II. Validation of thermodynamic theory[J]. Cem.Concr.Res.

25.B.Tian, M.D.Cohen. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?[J]. Cem.Concr.Res.

26.D. Bonen, S.L. Sarkar. Replacement of Portlandite by gypsum in the interfacial zone and cracking related to crystallization pressure, Ceramics Transactions, Vol. 37, Cement-Based Materials: Present, Future, and Environmental Aspects, Am Ceram Soc, Westerville, OH,

27.M.A. Gonzalez, E.F. Irassar. Ettringite formation in low C3A Portland cement exposed to sodium sulfate solution[J]. Cem.Concr.Res., 1997, 27 (7): 1061 – 1072.

28.M.Santhanam, M.D.Cohen, J.Olek. Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack. Cem.Concr. Res.,

29.严家伋, 道路建筑材料。见: 高等学校教材(公路与城市道路桥梁专业用)

30.胡曙光、钟珞、吕林女, 混凝土安全性专家系统, 北京科学出版社 2007.1

作者简介



范丰栋，71年12月20日出生，2002年7月毕业于长安大学土木工程专业，多年来，一直从事公路工程施工、管理及科研工作。

2005年通过国家考试，攻读建筑大学工程硕士学位。在此期间完成国道102线的项目管理工作；东李线改扩建工程、石庙子大桥新建工程的项目管理工作；彰桓线三标段的项目管理工作；桃陨线新建工程项目管理工作。先后获辽宁省五一劳动奖章、沈阳市劳动模范、沈阳市五四奖章、东陵区十大杰出青年等称号。

作者在攻读硕士学位期间发表的学术论文

此间，公开发表学术论文四篇，分别为《应用非接触式平衡梁提高沥青混凝土路面的摊铺质量》发表在《辽宁交通科技》，《沥青路面病害治理及质量控制》发表在《沈阳交通科技》，《含表面裂缝的半刚性基层路面的应力强度因子分析》发表在《沈阳交通科技》，《水泥混凝土碱集料反应的研究与探讨》发表在《北方交通》。

致 谢

本文是在尊敬的导师张敏江教授悉心指导下完成的。张老师严谨的治学态度、渊博的知识、丰富的科研和实践经验、开阔的学术视野、循循善诱的教导和不拘一格思路给予我无尽的启迪，令我受益匪浅。校外导师王春震教授在百忙之中从课题的选择到项目的最终完成，都始终给予我细心的指导和不懈的支持。至此论文完成之际，谨向两位尊敬的导师致以衷心的感谢和崇高的敬意！

在课题的研究过程中，还得到了道桥教研室才华教授、张海教授、包龙生教授、于玲教授等诸多老师的悉心指导和帮助，在此表示诚挚的谢意！

还要感谢在一起愉快的度过研究生生活的各位同门，正是由于你们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难和疑惑，直至本文的顺利完成。在此，谨向所有帮助过我的师兄弟、同学和朋友们表示真诚的感谢和衷心的祝福！

最后，感谢我的同事、亲人在我的论文写作过程中，给予我莫大支持和鼓励，使我顺利完成学业。

范丰栋

2007年12月于沈阳建筑大学