

水泥固化污染土的 强度和电阻率特性

董晓强 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水泥固化污染土的 强度和电阻率特性

◎ 董晓强 著

内 容 提 要

本书以室内试验模拟水泥固化污染土为样本,经大量电阻率和无侧限抗压强度等试验,结合理论研究,对电阻率与龄期、污染物含量、无侧限抗压强度等相关参数进行定量分析和探讨,并对水泥土基于电流变化的损伤统计模型进行了初步探讨。本书共分5章,包括绪论、水泥土的基本性质、水泥固化酸碱盐污染土的强度和电阻率特性、水泥固化污水污染土的强度和电阻率特性、基于电流变化的水泥土损伤统计模型等。

本书可作为土木工程建设及相关专业研究机构、高等院校科研人员参考使用,可作为建设工程技术人员自学提高的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水泥固化污染土的强度和电阻率特性 / 董晓强著
— 北京:中国水利水电出版社,2012.8
ISBN 978-7-5170-0173-7

I. ①水… II. ①董… III. ①水泥固化—污染土壤—
强度—研究②水泥固化—污染土壤—电阻率—研究 IV.
①TQ172.7②X53

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第221259号

书 名	水泥固化污染土的强度和电阻率特性
作 者	董晓强 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.5印张 176千字
版 次	2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水泥土搅拌桩是以水泥作为固化剂，通过深层搅拌机械，将固化剂和地基土强制搅拌，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的桩体的地基处理方法。由于其性能良好、价格低廉、施工方便，已被广泛应用于复合地基、防渗帷幕等工程实践中。由于酸雨的降落、工业和生活污水的排放、农药的渗入等因素使地基土遭受污染，现场深层搅拌施工工艺更使水泥土中存在大量孔隙，因此对水泥有腐蚀性的土体均会对水泥土形成腐蚀，致使水泥土的力学性质受到重要影响并发生一定的变化，严重时会导致建筑物失稳或破坏，因此研究水泥固化污染土的强度非常重要，这已经成为环境岩土工程领域中的一个新课程。

目前国内外尚无检测水泥固化污染土的专用手段和方法。电阻率是材料的基本物理参数，污染土中的离子成分具有自身显著的电阻率特性。由于土体污染成分不同、含量不同、污染发生的先后时间不同，其电阻率呈现出不同的特性，因此采用电阻率原理来研究水泥土是行之有效的方法。

本书共分5章，包括绪论、水泥土的基本性质、水泥固化酸碱盐污染土的强度和电阻率特性、水泥固化污水污染土的强度和电阻率特性、基于电流变化的水泥土损伤统计模型等。在收集、查阅及整理中外文献的基础上，以室内试验模拟水泥固化污染土为样本，经过大量的电阻率和无侧限抗压强度等试验，结合理论研究，对电阻率与龄期、污染物含量、无侧限抗压强度等相关参数进行了定量分析和探讨，并对水泥土基于电流变化的损伤统计模型进行了初步探讨。

本书在编写过程中得到了白晓红教授的悉心指导和帮助，引用

了本团队赵永强博士、黄新恩博士、韩鹏举博士等的一些相关成果，杨国辉、徐文攀和文斌等研究生参加了书稿的整理和校对。书中引用了许多文献资料，在此向所有与本书出版相关的所有贡献者们一起表示真诚的感谢！

本书的出版得到了国家自然科学基金（51078254）和山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划的资助支持，书中的试验得到了国家自然科学基金（51078253）和山西省青年科技研究基金（2009021023）的资助支持，谨此表示衷心感谢！

由于水平和时间所限，书中难免存在一些缺点和不足之处，敬请读者批评指正！

作者

2012年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 环境岩土工程的研究现状	1
1.1.1 污染土的研究现状	1
1.1.2 水泥土材料腐蚀的研究现状	5
1.2 岩土电阻率理论的研究现状	11
1.2.1 岩土电阻率理论的发展	11
1.2.2 电阻率法在岩土工程中的应用现状	21
第 2 章 水泥土的基本性质	24
2.1 水泥土的加固机理	24
2.1.1 水泥的水解和水化反应	24
2.1.2 黏土颗粒与水泥水化物的作用	26
2.2 水泥土的基本物理力学性质	28
2.2.1 重度和相对密度	28
2.2.2 渗透系数	28
2.2.3 无侧限抗压强度	29
2.2.4 抗拉强度	29
2.2.5 抗剪强度	30
2.2.6 变形模量	31
2.2.7 压缩模量	32
2.2.8 泊松比	32
2.2.9 电阻率	32
2.3 水泥土宏观力学性能的影响因素	33
2.3.1 龄期	34
2.3.2 水泥掺入比	35
2.3.3 含水量	36
2.3.4 水泥种类和强度等级	36

2.3.5	土性	38
2.3.6	土中污染物含量和 pH 值	39
2.3.7	养护环境的类型、浓度	41
2.3.8	外掺剂	42
2.3.9	养护温度和冻融	43
2.4	水泥土的电学特性	44
2.4.1	水泥土电学模型及修正	44
2.4.2	水泥土电阻率的主要影响因素分析	50
2.4.3	电阻率常用测试方法及原理	53
第 3 章	水泥固化酸碱盐污染土的强度和电阻率特性	57
3.1	试验方案和试验方法	57
3.1.1	试验方案	57
3.1.2	试验方法	57
3.1.3	数据的修正	58
3.2	水泥固化硫酸污染土	59
3.2.1	电阻率和强度同龄期的关系	59
3.2.2	电阻率和强度同含量的关系	60
3.2.3	电阻率同强度的关系	60
3.2.4	微观分析	61
3.3	水泥固化氢氧化钠污染土	63
3.3.1	电阻率和强度同龄期的关系	63
3.3.2	电阻率和强度同含量的关系	64
3.3.3	电阻率同强度的关系	64
3.3.4	微观分析	64
3.4	水泥固化氯化镁污染土	66
3.4.1	电阻率和强度同龄期的关系	66
3.4.2	电阻率和强度同含量的关系	67
3.4.3	电阻率同强度的关系	67
3.4.4	预测公式的建立	67
3.5	水泥固化硫酸镁污染土	69
3.5.1	电阻率和强度同龄期的关系	69
3.5.2	电阻率和强度同含量的关系	70
3.5.3	电阻率同强度的关系	71
3.6	水泥固化硫酸钠污染土	71

3.6.1	电阻率和强度同龄期的关系	71
3.6.2	电阻率和强度同含量的关系	72
3.6.3	电阻率同强度的关系	73
3.6.4	微观分析	73
3.7	水泥土材料强度的修正	75
3.7.1	硫酸腐蚀性影响系数	75
3.7.2	氢氧化钠腐蚀性影响系数	76
3.7.3	氯化镁腐蚀性影响系数	77
3.7.4	硫酸镁腐蚀性影响系数	78
3.7.5	硫酸钠腐蚀性影响系数	79
3.8	电阻率与无侧限抗压强度的关系	80
3.8.1	电阻率法确定水泥土无侧限抗压强度	80
3.8.2	电阻率变化机理分析	82
3.9	小结	83
第4章	水泥固化污水污染土的强度和电阻率特性	85
4.1	污染对土液塑性指标的影响	85
4.1.1	试验准备	85
4.1.2	污水对土样液限、塑限的影响	88
4.2	试验方案和试验方法	96
4.3	水泥固化生活污水污染土	97
4.3.1	无侧限抗压强度同龄期的关系	97
4.3.2	无侧限抗压强度同浓度的关系	98
4.3.3	水泥土电阻率同龄期的关系	99
4.3.4	水泥土电阻率同浓度的关系	100
4.3.5	水泥类型同无侧限抗压强度的关系	101
4.4	水泥固化造纸厂污水污染土	103
4.4.1	无侧限抗压强度同龄期的关系	103
4.4.2	无侧限抗压强度同浓度的关系	104
4.4.3	水泥土电阻率同龄期的关系	105
4.4.4	水泥土电阻率同浓度的关系	106
4.4.5	水泥类型同无侧限抗压强度的关系	107
4.5	生活污水和造纸厂污水对水泥土影响的综合分析	109
4.5.1	水泥土强度预测公式	109
4.5.2	水泥土电阻率同无侧限抗压强度的关系	112

4.5.3	生活污水和造纸厂污水对水泥土强度影响的对比	112
4.5.4	化学机理分析	114
4.6	小结	115
第5章	基于电流变化的水泥土损伤统计模型	117
5.1	损伤理论的发展	117
5.2	水泥土损伤理论的研究	119
5.2.1	无侧限抗压条件下的水泥土损伤本构关系	120
5.2.2	水泥土的弹塑性损伤试验研究	121
5.2.3	静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究	121
5.2.4	复合桩基水泥土非线性应力—应变关系	122
5.2.5	水泥土细观破裂过程的损伤本构模型	123
5.2.6	水泥土弹塑性本构模型	124
5.2.7	水泥土损伤本构模型	125
5.2.8	水泥土电阻率损伤本构模型	126
5.3	基于电流变化的水泥土损伤统计模型	126
5.3.1	水泥土损伤的电流变化规律	126
5.3.2	基于电流变化的水泥土损伤模型	130
5.4	小结	133
参考文献		134

第 1 章 绪 论

1.1 环境岩土工程的研究现状

1.1.1 污染土的研究现状

岩土工程本来就很复杂,随着人口增长、生活水平的提高和工业化进展,将变得更加复杂。大量以前认为不适合居住和其他工程应用的土地也被利用,而使空气、水和土地受到污染。在各种环境条件下,目前用于分析土性的土力学原理和方法已受到挑战。因此,环境岩土工程发展迅速,它是一门交叉科学,覆盖了大气圈、生命圈、地水圈、岩石圈及地质微生物圈等各种环境下土和岩石及其相互作用问题。地质微生物层是指树根特性和细菌活动及其对水土体系工程性质有影响的土层。

自从第一届环境岩土工程国际学术讨论会于 1986 年召开以来,环境岩土工程得到迅速发展,不仅覆盖了传统岩土工程问题,而且延伸到:①有害有毒废料控制;②湿地、海岸边、疏浚和海相沉积物;③干旱和沙漠地区;④敏感性生态地质环境及考古技术。在环境岩土工程领域,现在主要有两个分支:地质环境工程和生态环境工程。地质环境工程主要强调有害有毒废料控制系统的管理和修正、填料场的选择、填料的稳定分析和土清污技术。生态岩土工程主要研究环境岩土工程的敏感性生态和地质方面的问题。

近几年随着城市化、工业化进程加快,城市工程建设迅猛发展,引起或诱发环境岩土工程问题越来越严重,其中工业企业对地基土污染问题就是较为严重的环境岩土工程问题。污染土主要是指普通地基土受到工业生产过程中产生的三废(废气、废液、废渣)侵蚀,而使土质发生化学变化,改变了土的原性状的一类土。在工程中,污染土可以引起地基强度降低,导致建筑物失稳或破坏,引发一系列工程质量事故,因此研究污染土的污染机理、性状和因地制宜采取整治措施对稳定建设工程质量,保护环境具有重要意义。国外对于污染土的研究始于 20 世纪 70 年代,欧美等国家对污染土进行了较为系统的研究,积累了许多污染土的研究和治理经验。

污染土的主要研究内容可以归纳为以下几点:

(1) 对比土污染前后以及不同污染地段的物理力学性能指标，除常规指标外，还应特别注意膨胀试验、湿化试验、湿陷性试验等测定值。

(2) 调查污染物的来源、污染途径、污染历史等，测定污染土的化学成分，包括全量分析参数、易溶盐含量、pH 值、有机物含量、矿物矿相分析成果等。

(3) 研究土—污染物相互作用的方式、反应结果、时间和温度效应、生成物的性质及其影响。

(4) 鉴定土的微观结构，通过原子力显微镜 (AFM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 等手段从污染土污染前后的微观结构变化分析污染土的成分与结构。

(5) 调查地下水的分布及其与污染物作用的关系。

(6) 水质分析，其中包括水中污染物含量、水对金属和混凝土的侵蚀性等。

(7) 测定土胶粒表面吸附阳离子交换量及成分、离子发生基（如易溶硫酸盐）的成分及含量。

(8) 查明污染土的空间分布，按不同污染程度划分污染区。

(9) 对污染土作出岩土工程评价。

(10) 模拟试验，为预测地基土可能受某溶液污染的后果，可事先取样进行试验，如将土试样夹在两块透水石之间，再浸入废酸、碱液中，经不同时间后取出观察变化；还可进行压缩试验，判定其强度、变形，并与正常土进行比较预测发生的变化；进行抗剪强度对比试验等。这样就可得到废液侵蚀对地基土的影响，从而提出采取预防措施的建议，提出治理污染土的措施和方法。

对污染土及污染土地基或场地的分析与评价，除了常规的岩土工程评价内容外，还包括以下几个方面的内容：

(1) 评价污染程度按污染等级分区。严重污染土是指物理力学指标有较大幅度变化，地基土的性质变化较大的土；中等污染土则是有明显变化，地基土的性质也发生了一定变化的土；轻微污染土则是从土化学分析中检测出含有污染物，而其物理力学性质无变化或变化不明显的土。目前污染等级的划分是选用某一（或某些）标志参数作定量或半定量标准。如化工部南京勘察公司采用的标志参数是易溶盐含量，并参考了盐渍土等级划分标准。美国 Lehigh 大学按 pH 值在室内试验中区分土的不同污染程度。

(2) 确定污染土的承载力及其他强度指标。可以通过原位剪切试验或室内试验获得土的强度值。从现场载荷试验获得土的承载力。但土体受污染后强度都有不同程度的降低，原来用以确定承载力的方法和一些物理力学强度值不一定能正常反映污染土的性状。因此，考虑到污染土的特殊性，现有的承载力表

和经验公式不一定适用于污染土的评价。在这方面还要加强经验总结和理论研究。

(3) 判定污染土对金属和混凝土的侵蚀性。由于污染土中含有大量的腐蚀性的酸、碱废液和盐类，对金属和混凝土都具有腐蚀性。侵蚀性也要按污染等级分区分别判定。目前，国内对污染土的腐蚀性评价是沿用盐渍土的评价方法和标准来进行的。但由于盐渍土的特殊形成条件，使得盐渍土的成分相对简单，而污染土是土体的二次作用结果，原土和污染源的物质成分具有多样性，其化学作用过程复杂以及容易受环境条件（如透水性、温度等）的制约和影响。因此，对金属和混凝土的腐蚀成分和强度的评价与盐渍土是有一定区别的。

(4) 根据污染等级分阶段提出相应的处理措施。对于严重污染土和中等污染土地段要采取合适的处理方法，来改善污染土的工程特性提高其地基强度；对于轻微污染土地段一般可以不治理，如有侵蚀性，则要在工程施工时采取防护措施。

(5) 预测污染的发展趋势。对可能出现污染的场地，或虽经治理，但污染源有可能没有根除，污染途径可能没有杜绝，土的污染还可能继续发展时，需对其可能产生的后果作出预测，同时还应对污染的发展提出检测意见。预测内容应包括：污染物与土颗粒可能发生何种化学作用；由于时间效应和环境效应，土体物理力学性质会怎样变化。所以应预测时间和空间这两个方面。

由于化工原料的渗漏、酸雨的降落及海水的渗入直接导致地下水中含有大量的硫酸盐；我国约 85% 的造纸企业为年产量 3000t 以下的中、小造纸厂，这些以稻草、麦秸为主要原料的碱法造纸厂，年产 1 万 t 纸板就要排放废水 300 万 t 左右，而且大多数造纸厂因资金、技术、工艺等原因，废水（主要是废碱液）未经处理就直接排放，以及车间废碱液渗透到地基中；由于城市的快速发展，许多废弃的化工厂房、车间土地被开发，已经遭受污染的土体被重新利用；这些现象均导致严重的环境污染，影响地基强度和耐久性，进一步引起建筑物的失稳或破坏。

纵观污染土的国外研究现状可看出，针对污染土的研究，试用了一些新的仪器设备，如美国 Lehigh 大学研究的一种用于危险和有毒物质渗透试验的三轴仪，用试验模拟已经发生或将有可能发生的污染情况，研究土—污染物相互作用中温度效应和时间效应，以及污染土的污染机理、污染土污染等级的划分、污染土的治理方法等，如荷兰发展了几种野外快速试验方法（石油探测盘、螺纹钻等）和一些快速提取土中污染物质的方法（高热分解气体色谱法、

固体光谱法等)。国外近年来关于污染土研究的一些新的进展有：美国人 C. Vipulanandan (1995) 试验研究了受苯酚污染的水泥固化土的固结和稳定性状，并得出了随着受石炭含量增加，水泥固化土强度降低的结论；Q. Y. Ma 和 W. L. Lindsay (1995) 利用化学作用来评价和预测污染土中镉和镍的含量；美国人 Ramesh Krishnan、Harry W. Parker 和 Richard W. Tock (1996) 研究了通过洗土插入电极的方法来处理油、氯化烃类和重金属污染的粉土和黏土，效果较好。

国内对污染土的研究工作，近几年在岩土工程方面有了明显的进展，而以前大多数是有关环境保护和土壤学方面的。国内的李相然、姚志祥、曹振斌以济南市典型地区的地基土为研究对象，在室内开展了水—土化学作用的物理力学效应实验，在现场对已经污染腐蚀的地基原状土样进行了物理力学性质实验。结果表明，地基土腐蚀后其物理力学性质有显著的变化，遭受污染腐蚀的地基土和无腐蚀的地基土相比，前者液塑限和压缩模量减小，液性指数和压缩系数增大。宁宝宽等探讨了在水、不同化学溶液、不同浓度和不同 pH 值条件下，一定掺量的水泥粉质黏土的力学效应，试验表明水—土化学作用对水泥土的力学性质有明显的影响。黄汉盛等结合深港西部通道软土深层搅拌桩水泥土抗腐蚀性的室内试验，得出在腐蚀地下水环境中在水泥土中增加矿渣、粉煤灰可提高水泥土的抗腐蚀性，并提出了抗腐蚀性良好的水泥土配方。白晓红、赵永强等研究得出了污染环境化学作用对水泥土力学性质影响的一些规律。朱春鹏、刘汉龙等通过三轴固结不排水试验研究了 4 种浓度酸碱污染土应力、应变特性以及对孔隙水压力的影响，应力—应变关系曲线的形态随着污染物的不同而发生改变，随着酸浓度的增大，酸污染土软化特性更加显著；而随着碱浓度的增大，碱污染土的软化特性愈不明显，呈塑性破坏。

从 20 世纪 80 年代中期开始，随着环境岩土工程的发展，国际不少机构研制开发了用于 CPT 的新型传感器，进一步加强了 CPT 技术在环境岩土工程领域中的应用，促进了 CPT 向多功能、多领域方向的发展，而国内 CPT 技术受限于传感器等技术的落后，在此方面基本上处于空白状态。传统的 CPT 测试参数包括锥尖阻力、侧壁摩阻力及孔压，而当把额外的传感器集成在探头中后，大大提高了其反映土性或环境特性的能力，一般情况下附加的传感器直接安装在摩擦套管的后面，有时也作为一个独立的模块连接于整个探头的后面。目前，已开发出的应用于 CPT 环境岩土测试的传感器如表 1.1 所示，RCPT 技术的应用越来越受到重视，其他方法如可视化 CPT 等在岩土工程中也逐渐得到了应用。

表 1.1

环境岩土工程中使用的 CPT 传感器 (引自 曾国清, 2006)

传感器	测试参数	应用情况	资料来源
温度	温度改变情况	调查由于化学反应或生物活动造成的吸热或放热区的改变情况; 调查永久冻结带的深度	Horsnell, 1988; Mitchell, 1988; Woeller et al. 1991
氧化还原电位 传感器	土壤或孔隙流体的 氧化还原电位	监测危险性场地的生物修复 情况	Olie et al., 1992
电阻率 (Resis CPT)	土层体积电阻率 及其相对改变情况	土壤污染范围调查, 如探测 酸液的污染、有机非水溶性液 体污染等	Horsnell, 1988; Weemees, 1989; Strutynsky et al., 1991; Woeller et al., 1991
pH 值	pH 值及随深度的变化	酸碱污染调查, 监测场地修 复进展	Olie et al., 1992
介电常数	测试电磁场中分子相互 作用情况, 根据测试电磁 频率换算介电常数	调查有机非水溶性污染情 况, 其介电常数低, 为 $-3 \sim 8$, 而水的介电常数为 80	Robertson et al., 1996 Stienstra, Van Deen, 1994
ROST ^{EM} 系统 (快速光学图像 工具系统)	荧光反应 (钕钇铝深红色激光)	燃油污染调查	Lightner, Purd, 1995
γ 射线探头 (Gamma Cone)	总 γ 射线量	放射性污染调查	ConeTec Corp
紫外荧光探头 (UVIF Cone)	荧光 (紫外灯照射产生)	土壤和地下水污染情况调查	ConeTec Corp
取样系统 (EAPS CPT)	土、气、水样品	取样室内试验分析	Vertek Corp
可视化探头 (VisCPT)	土壤图像、能量、波谱	污染物调查	Hryeiw, Raschke, 1996

目前国内还没有专门用于污染土的勘察设备和分析、试验仪器, 只能应用岩土工程勘察中的通用手段, 如钻探、井探、物探、各种原位测试、室内土工试验等, 近来国内也出现了一些特殊的测试技术, 如有色长沙勘察院做了煮沸酸液试验、广西大学吴恒采用 CT 测试技术。在室内试验中, 除了常规的土工试验以及根据土的特性增加的特殊试验项目外, 还必须进行化学分析, 这是研究土—污染物相互作用所必不可少的。化学分析项目包括土的全量分析、矿物分析、某元素 (或某化合物) 的定量分析、易溶盐含量、有机质含量、pH 值、对金属和混凝土的腐蚀性分析等项目。因此, 寻找一种简便、快捷、无损及成本低廉的污染土检测方法成为众多学者的一致追求。

1.1.2 水泥土材料腐蚀的研究现状

水泥土搅拌桩是以水泥作为固化剂, 通过深层搅拌机械, 将固化剂和地基

土强制搅拌,使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的桩体的地基处理方法。由于其性能良好、价格低廉、施工方便,被广泛地应用于工程实践中,常常被用作工程地基或者防渗帷幕等。水泥土搅拌桩常常处于具有海水、地下水、生活污水等侵蚀环境中,水泥土在各种污染条件下,其力学性质受到了重要影响并发生了一定的变化,这种改变必须在具体应用中和设计时予以考虑。水泥土是水泥和土体拌和均匀后的产物,现场深层搅拌施工工艺更使水泥土中存在大量孔隙,因此对水泥有腐蚀性的土体(或土中的水)均会对水泥土形成腐蚀作用,其中主要包含 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 等离子的侵蚀作用。一般硅酸盐水泥硬化后,在通常的使用条件下有较好的耐久性,但在外界侵蚀性介质作用的环境中,引起水泥石发生一系列化学、物理变化,而逐渐受到侵蚀,严重时会使水泥土强度降低,甚至会溃裂、破坏,故有必要全面、深入地研究水泥土遭受腐蚀的过程和实质。

水泥土材料的腐蚀有多种分类方法,如按腐蚀机理分类,可分为化学腐蚀、溶析腐蚀、吸附腐蚀等;按腐蚀的形态分类,可分为溶出型腐蚀、分解型腐蚀、膨胀型腐蚀(或称结晶型腐蚀),具体见表 1.2;因对于水泥及混凝土产生侵蚀的介质主要有大气、河水、海水、酸和酸水、硫酸盐溶液和碱溶液等,故按腐蚀类介质分类,可分为酸腐蚀、碱腐蚀、盐腐蚀、海水腐蚀、淡水腐蚀、土壤腐蚀等,如按混凝土结构在地下或阴暗的场所,比如排污水的混凝土管道,还有微生物腐蚀。影响水泥石腐蚀的因素有很多,除了水泥的品种和熟料的矿物组成外,集料的性质、混凝土的致密度、抗渗性以及侵蚀介质的种类、压力与水位的变化、流速、温度的变化等多种因素都会对侵蚀过程产生严重影响。往往有数种腐蚀作用同时并存,相互影响,少数情况下是单一型腐蚀,但是大多数情况下是多种类型的复合腐蚀,因此必须针对腐蚀的具体情况加以综合分析。

表 1.2

水泥石材料的腐蚀类型

(引自 徐瑛等, 2005)

腐蚀类型	腐蚀作用	腐 蚀 过 程
溶出型腐蚀	软水的作用	硬化水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 受软水作用, 产生物理性溶解, 并从硬化水泥石中溶出
分解型腐蚀	(1) $\text{pH} < 7$ 的溶液 (酸性溶液和碳酸) (2) 镁盐溶液	硬化水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与酸性溶液作用或与镁离子的交替作用, 生成可溶性化合物或无胶结作用的产物, 导致 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 丧失, 使硬化水泥石分解
膨胀型腐蚀 (结晶型腐蚀)	(1) 硫酸镁盐溶液 (2) 结晶型盐类溶液	硫酸镁盐溶液与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作用, 产生硫酸钙型、硫铝酸钙型的腐蚀, 体积膨胀; 结晶型盐类溶液在水泥孔隙中脱水、结晶, 体积膨胀

下面介绍几种常见的水泥土材料的腐蚀。

1.1.2.1 溶出型腐蚀

硅酸盐水泥各种水化产物中， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的溶解度最大（25℃ 时约为 1.2g/L），易溶解析出。溶出型腐蚀主要是因硬化水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被溶解和析出造成的。

硅酸盐水泥属于典型的水硬性胶凝材料，本身就具备一定的抗水能力。硬水中含有 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 或 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ，能把硬化水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 变成 CaCO_3 沉淀下来，形成的碳酸盐薄膜使硬化水泥石密实，所以普通的江水、河水、湖水或地下水等硬化水对水泥不构成严重问题。但在软水中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 首先被溶解，如水量不多，水中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的溶解度很快达到饱和程度，溶出作用也就停止。但在流动水中，特别是在有水压作用且混凝土渗透性较大的情况下，水流不断将 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶出并带走，使硬化水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度降低，pH 值也同时下降，不仅增加了孔隙率，使水更容易渗透，结构 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及其他高碱性的水化硅酸盐、水化铝酸盐溶出流失，析出 CaO ，生成一些无胶结能力的硅酸凝胶、氢氧化铝、氢氧化铁等产物，甚至还能溶解硬化水泥石表面已形成的碳酸盐薄膜，导致硬化水泥石强度降低和腐蚀破坏。因此，对硬化水泥石产生溶出型腐蚀的主要是软水，如冷凝水、雨水、冰川水或者某些泉水等软水会对水泥石构成严重腐蚀。有人发现，当 CaO 溶出 5% 时，强度下降 7%；而溶出 24% 时，强度下降 29%；当混凝土中 CaO 损失达 33% 时，混凝土就会被破坏。

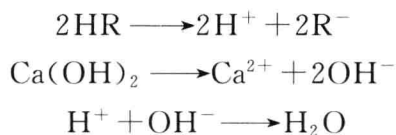
1.1.2.2 分解型腐蚀

分解型腐蚀主要是通过腐蚀性介质中的离子与硬化水泥石中的离子进行交换作用，破坏了硬化水泥石中的液相碱度平衡，使固相石灰溶解，并使水化硅酸盐和水化铝酸盐水解。硬化水泥石分解的最终产物是可溶性的硅酸凝胶、钙盐和铝盐，它们随介质被带走，硬化水泥石的结构将很快被破坏。

通过离子交换反应，硬化水泥石可能受到以下 3 种形式的分解型腐蚀。

(1) 形成可溶性的钙盐。

当水中溶有一些无机酸或有机酸时，硬化水泥石受到溶析和化学溶解双重作用而造成腐蚀。其腐蚀过程为由酸类离解出来的 H^+ 离子和酸根离子 R^- ，分别与硬化水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的 OH^- 和 Ca^{2+} 结合成可溶性的水和钙盐。酸性水对水泥石作用的反应式为：





在较强酸的作用下，HR 还可以与 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 等作用生成 AlR_3 及 H_2O ，其反应方程式为：



反应产物 CaR_2 的可溶性越高，腐蚀溶液的更新速度越快，则硬化水泥石的破坏速度也越快。pH 值越小， H^{+} 越多，侵蚀就越强烈。当 H^{+} 达到足够的浓度时，还能直接与水化硅酸钙、水化铝酸钙甚至未水化的硅酸钙、铝酸钙等起作用，使水泥石结构遭受严重的破坏。

在工业生产中，常见的酸性腐蚀介质有：含有盐酸、硫酸或硝酸的化工废水；许多食品厂含乙酸、蚁酸或乳酸的废水；饮料中的碳酸等。而在天然水中也含有浓度甚高的 CO_2 ，通过阳离子交换反应，这些酸性溶液即与硬化水泥石生成可溶性的钙盐，如氯化钙、醋酸钙、碳酸氢钙等，被水带走。硬化水泥石分解型腐蚀的速度，在很大程度上取决于反应物的结构和可溶性。

在化肥生产过程中，通常含有氯化铵、硝氨、碳氨和硫酸铵的溶液或废水，能使硬化水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转化为可溶性的产物，如：



显然，这些产物的溶解度都很大，故腐蚀性都相当强。

含有碳酸的水遇到硬化水泥石时，首先与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成不溶于水的碳酸钙，但是水中的碳酸会进一步与碳酸钙反应，生成易溶于水的碳酸氢钙，总反应式如下：



从而使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不断溶解，而且又会引起水化硅酸钙和水化铝酸钙的水解。

由上式可知，当生成的 CaCO_3 达到一定浓度时便会与剩余的一部分碳酸建立起化学平衡，反应进行到水中的 CO_2 和 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 达到平衡时终止。实际上，天然水本身含有少量的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ，即具有一定的暂时硬度，因而也必须具有一定的碳酸与之平衡，这部分碳酸不会溶解碳酸钙，没有侵蚀作用，称为平衡碳酸。只有水中含有的碳酸超过平衡碳酸时，其剩余部分的碳酸才与 CaCO_3 反应，其中一部分剩余与之生成新的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ，即称为侵蚀性碳酸；而另一部分碳酸则用来补给平衡碳酸量，与新生成的碳酸氢钙又继续保持平衡。所以，水中的碳酸可分为“结合的”、“平衡的”和“侵蚀的”3种，只有侵蚀性碳酸才对硬化水泥石有害，其含量越大，侵蚀性越强。

水的暂时硬度越大，则所需的平衡碳酸量越多，就会有较多的碳酸作为平衡碳酸存在；相反，在淡水或暂时硬度不高的水中， CO_2 含量即使不多，但