



海水冻融与侵蚀耦合作用下 桥梁下部结构耐久性评估

HAISHUI DONGRONG YU QINSHI OUHE ZUOYONGXIA
QIAOLIANG XIABU JIEGOU NAIJIUXING PINGGU

周勇 林新元 张峰 蔡建军 编著



人民交通出版社
China Communications Press

Haishui Dongrong Yu Qinshi Ouhe Zuoyongxia
海水冻融与侵蚀耦合作用下

Qiaoliang Xiabu Jiegou Naijiuxing Pinggu
桥梁下部结构耐久性评估

周勇 林新元 张峰 蔡建军 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要内容包括:绪论,混凝土冻融、侵蚀及力学性能试验,混凝土冻融损伤破坏准则,混凝土干湿循环后的破坏准则,海水冻融与侵蚀耦合作用下的混凝土破坏准则,混凝土损伤劣化的室内和室外关联模型,桥墩冰荷载作用分析,波浪模型试验,非通航孔桥墩耐久性评估,大沽河航道桥模型简介、合理成桥状态确定、索塔和桥墩耐久性评估等。本书实例实验分析与理论相结合,对海水冻融与侵蚀耦合作用下桥梁下部结构耐久性评估具有一定的参考价值。

本书可供从事桥梁检测、设计、科研等的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

海水冻融与侵蚀耦合作用下桥梁下部结构耐久性评估

/ 周勇等编著. —北京:人民交通出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-114-09743-0

I. ①海… II. ①周… III. ①桥梁结构:下部结构—耐久性—评估 IV. ①U443.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 062883 号

书 名: 海水冻融与侵蚀耦合作用下桥梁下部结构耐久性评估

著 作 者: 周勇 林新元 张峰 蔡建军

责任编辑: 王文华

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13.25

字 数: 315 千

版 次: 2012 年 12 月 第 1 版

印 次: 2012 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09743-0

定 价: 36.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



前 言

冰冻海域海洋环境中桥梁下部结构混凝土在浸水饱和或潮湿状态下,由于海水冻融带来的温度正负交替变化,使桥梁下部结构混凝土内部孔隙水形成冻结膨胀压、渗透压及水中盐类的结晶压等,产生疲劳应力,造成混凝土由表到里逐渐损伤破坏,导致结构剥蚀,发生早期损坏,从而使结构的安全性能减弱,严重的还将导致结构物的破坏和倒塌,造成人员伤亡和经济损失。结构的冻融破坏现象不仅在我国东北、华北和西北地区存在,而且在气候比较温和但冬季依然出现冰冻的华东、华中地区(山东、江苏和湖北等),也广泛存在混凝土的冻融破坏问题。冰冻海域海洋环境不仅对桥梁下部结构存在冻融破坏作用,海水侵蚀同样对桥梁下部结构产生损伤破坏,因此有必要开展冰冻海域桥梁在海水冻融和侵蚀作用下桥梁下部结构耐久性能的研究。

全书共分四大部分。第一部分重点探讨了海水冻融与化学侵蚀作用下混凝土的力学性能退化规律,提出了海水冻融与侵蚀耦合作用下的混凝土三轴强度准则,建立了恶劣海洋环境下海水冻融与侵蚀环境因素的室内外计算等效模型,为后续桥梁下部水位变化区及浪溅区的结构耐久性评估提供理论基础。第二部分开展了冰冻海域冰荷载效应研究,重点对跨海桥梁宽幅承台的冰荷载效应进行探讨。第三部分开展了群桩承台水动力物理模型试验,提出了承台波流计算经验公式。第四部分依托青岛海湾大桥非通航孔桥和大沽河航道桥,开展了桥梁下部结构的结构耐久性评估研究。

限于著者的知识视野和学术水平,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。如有问题,请联系山东大学桥梁所副教授张峰(zhangfeng2008@sdu.edu.cn)。

作者

2012年10月6日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 混凝土耐久性能研究进展	2
1.2.1 冻融循环后混凝土性能的试验研究	2
1.2.2 海水侵蚀循环后混凝土性能的试验研究	5
1.2.3 冻融、海水侵蚀复合作用下的混凝土破坏研究	7
1.3 桥梁冰荷载研究进展	7
1.4 研究内容和创新点	8
第2章 混凝土冻融、侵蚀及力学性能试验	10
2.1 试验设计	10
2.1.1 试验参数	10
2.1.2 试验内容及要求	11
2.1.3 试件制作及养护	11
2.2 试验设备	12
2.2.1 直读式混凝土含气量测定仪	12
2.2.2 混凝土快速冻融试验设备	12
2.2.3 大型混凝土静、动三轴电液伺服试验机	13
2.3 试验流程	14
2.3.1 冻融试验	14
2.3.2 人工海水配制	14
2.3.3 海水侵蚀试验	15
2.3.4 海水冻融与侵蚀试验	16
2.3.5 加载试验	16
2.4 本章小结	17
第3章 混凝土冻融损伤破坏准则	18
3.1 冻融循环试验结果	18
3.1.1 试验现象	18
3.1.2 冻融循环作用后混凝土质量损失	18
3.2 基于损伤理论的混凝土单轴压本构模型	19
3.2.1 冻融0次混凝土试块单轴应力—应变曲线	20
3.2.2 冻融50次混凝土试块单轴应力—应变曲线	21
3.2.3 冻融100次混凝土试块单轴应力—应变曲线	22
3.2.4 冻融200次混凝土试块单轴应力—应变曲线	22



3.2.5	冻融 300 次混凝土试块单轴应力—应变曲线	23
3.2.6	混凝土试块单轴应力—应变曲线特征值分析	23
3.3	混凝土抗拉强度计算	25
3.4	混凝土双轴破坏准则与本构关系	27
3.4.1	Kupfer-Gerstle 强度准则	27
3.4.2	双拉区强度准则	28
3.4.3	双轴压试验结果及分析	30
3.4.4	同时考虑应力比及冻融次数影响的双轴压破坏准则	32
3.4.5	拉压区强度准则	36
3.4.6	混凝土冻融损伤双轴强度准则	37
3.5	混凝土三轴破坏准则与本构关系	37
3.5.1	各向同性连续损伤力学	37
3.5.2	混凝土强度准则	38
3.5.3	Ottosen 四参数混凝土强度准则	39
3.6	混凝土冻融损伤破坏准则	39
3.6.1	混凝土冻融损伤变量	39
3.6.2	混凝土冻融损伤的演化方程	40
3.6.3	混凝土冻融损伤破坏准则	41
3.7	混凝土力学性能退化规律	42
3.7.1	混凝土在单调、短期荷载加载作用下的变形	42
3.7.2	混凝土弹性模量计算	44
3.7.3	混凝土冻融损伤 Ottosen 强度模型	45
3.8	本章小结	47
第 4 章	混凝土干湿循环后的破坏准则	48
4.1	混凝土由于化学反应造成的劣化	48
4.2	试验现象	49
4.3	海水侵蚀后混凝土单轴压损伤模型	50
4.4	海水侵蚀后混凝土单轴抗拉损伤模型	51
4.5	海水侵蚀后的混凝土双轴破坏准则	53
4.5.1	双轴压试验结果及分析	53
4.5.2	同时考虑应力比及干湿循环次数影响的双轴压破坏准则	53
4.5.3	拉压区强度准则	54
4.5.4	混凝土干湿损伤双轴强度准则	54
4.6	混凝土三轴干湿损伤 Ottosen 强度模型	55
4.6.1	混凝土弹性模量计算	55
4.6.2	模型参数确定	56
4.6.3	拉压子午线确定	56
4.7	本章小结	57

第 5 章 海水冻融与侵蚀耦合作用下的混凝土破坏准则	58
5.1 试验现象	58
5.2 试件破坏形态	58
5.2.1 抗压破坏形态	58
5.2.2 劈拉破坏形态	58
5.3 海水冻融与侵蚀耦合作用下的混凝土抗压强度退化模型	59
5.4 海水冻融与侵蚀耦合作用下的混凝土抗拉强度退化模型	63
5.5 混凝土冻融与侵蚀耦合损伤双轴强度准则	64
5.6 混凝土冻融与侵蚀耦合损伤 Ottosen 强度准则	64
5.7 本章小结	66
第 6 章 混凝土损伤劣化的室内和室外关联模型	67
6.1 胶州湾海域自然环境	67
6.1.1 胶州湾海域气温统计资料	67
6.1.2 海水水样参数检测	68
6.2 浸烘循环加速系数计算	72
6.2.1 考虑温度的加速系数	72
6.2.2 考虑腐蚀溶液浓度的加速系数	73
6.3 现场环境下混凝土冻融耐久性预测评估	74
6.4 本章小结	75
第 7 章 桥墩冰荷载作用分析	76
7.1 概述	76
7.1.1 工程概况	76
7.1.2 大桥海区的地理环境	76
7.2 胶州湾冰的基本特征	77
7.2.1 冰期	77
7.2.2 冰的类别及范围	78
7.2.3 胶州湾海冰及其危害	78
7.2.4 流冰	80
7.2.5 2005 年 1 月冰情	80
7.3 海水结冰条件	80
7.3.1 海水结冰理论	80
7.3.2 影响海水温度的因素	82
7.3.3 影响海冰形成和发展的因素	82
7.4 海冰的设计厚度	83
7.4.1 不同重现期设计冰厚的推算	84
7.4.2 设计冰厚推算的合理性分析	84
7.5 冰的物理性质及力学参数	85
7.5.1 物理性质	85

7.5.2 海冰力学参数	85
7.6 有关冰荷载的设计计算	86
7.6.1 青岛海湾大桥工程海区冰作用力的特点	86
7.6.2 我国有关规范中冰荷载的计算方法	86
7.6.3 国外有关冰荷载的计算方法	87
7.6.4 大尺度结构物各种规范规程计算公式	89
7.6.5 对本工程中冰荷载计算方法的建议	90
7.7 宽幅承台冰荷载研究	90
7.7.1 碰撞过程中的冰面力学效应描述	91
7.7.2 冰面初始移动速度对荷载的影响	93
7.7.3 冰厚及承台宽度对冰荷载的影响	94
7.7.4 冰的强度对冰荷载的影响	97
7.7.5 宽幅承台冰荷载模型	99
7.7.6 冰荷载模型与国内外规范比较	101
7.8 青岛海湾大桥冰荷载计算	102
7.9 本章小结	103
第8章 波浪模型试验	104
8.1 数值计算研究的条件和内容	104
8.1.1 计算水位	104
8.1.2 计算波浪和水流要素及水深参数	104
8.2 承台波浪力模型试验	106
8.2.1 试验模型	107
8.2.2 水位	108
8.2.3 波浪要素	109
8.2.4 试验内容及要求	110
8.2.5 模型设计及试验方法	110
8.2.6 试验设备及量测仪器	112
8.2.7 承台波浪力数据整理	113
8.2.8 冲击压强与承台相对净空的关系	116
8.2.9 冲击压强模型	117
8.3 青岛海湾大桥索塔和桥墩承台的波浪作用力	120
8.4 青岛海湾大桥索塔和桥墩桩的作用力	121
第9章 非通航孔桥墩耐久性评估	128
9.1 桥梁结构的功能要求	128
9.2 桥梁简介	128
9.3 基于确定性分析的桥墩正常使用极限状态评估	129
9.3.1 自重和活载作用下的支座反力	129
9.3.2 正常使用阶段的荷载组合	129

9.3.3 桥墩自重 + 支座反力 + 波浪荷载组合效应	129
9.3.4 桥墩自重 + 支座反力 + 冰荷载组合效应	130
9.3.5 基于单轴强度的结构耐久性评估	130
9.3.6 基于三轴强度的结构耐久性评估	134
9.3.7 非通航孔桥墩静力评估小结	136
9.4 基于可靠度理论的桥墩正常使用极限状态评估	137
9.4.1 结构可靠度分析的响应面法	138
9.4.2 桥梁正常使用阶段可靠指标研究	140
9.4.3 非通航孔桥墩可靠度分析	141
9.4.4 非通航孔桥墩正常使用极限状态可靠度评估小结	142
9.5 桥墩极限承载能力退化评估	143
9.5.1 钢筋混凝土结构劣化模型	143
9.5.2 氯离子扩散模型	145
9.5.3 结构可靠性分析的一次二阶矩法	148
9.5.4 桥墩极限承载能力退化评估	149
9.6 本章小结	152
第 10 章 大沽河航道桥模型简介	153
10.1 工程概况	153
10.1.1 大沽河航道桥主要设计技术标准	153
10.1.2 主要材料	155
10.2 有限元模型简介	155
10.3 本章小结	161
第 11 章 大沽河航道桥合理成桥状态确定	162
11.1 空间主缆成桥线形分析方法	162
11.1.1 主缆的变形协调方程和平衡方程	162
11.1.2 索形求解的迭代方法——梯度法	165
11.1.3 索形求解的迭代方法——牛顿拉普森法	167
11.2 程序简介	168
11.3 大沽河航道桥主缆恒载线形计算	168
11.4 大沽河航道桥合理成桥状态确定	170
11.5 本章小结	173
第 12 章 大沽河桥索塔和桥墩耐久性评估	174
12.1 索塔耐久性评估	174
12.1.1 索塔内力分析	174
12.1.2 基于单轴强度的结构耐久性评估	179
12.1.3 基于三轴强度的结构耐久性评估	180
12.1.4 大沽河索塔静力评估小结	184
12.1.5 基于可靠度理论的索塔正常使用极限状态评估	184



12.1.6	索塔极限承载能力退化评估	185
12.2	辅助墩耐久性评估	187
12.2.1	辅助墩应力分析	187
12.2.2	基于单轴强度的结构耐久性评估	190
12.2.3	基于三轴强度的结构耐久性评估	190
12.2.4	基于可靠度理论的辅助墩正常使用极限状态评估	191
12.3	本章小结	192
第 13 章	结论	193
13.1	理论和方法上的进步	193
13.2	进一步研究建议	193
参考文献		194

第1章 绪 论

在自然环境中,由于腐蚀介质的侵蚀及材料的老化,结构的性能不断劣化,其结果是导致结构的使用寿命缩短。从可靠度的角度讲,结构的使用寿命评估是一个概率问题。目前,对结构使用寿命的预测已有较多研究,但这些研究,或者只根据结构当前的状态推断结构未来的状况,没有考虑结构随时间的变化,或者根据假定的结构性能退化规律,推断结构的使用寿命。实际上,结构性能随时间的衰减规律极其复杂,由于受材料制作、施工、养护等因素影响,同一地域不同结构,甚至同一结构不同部位的材料,其随时间的变化都相差很大。因此,结构使用寿命的评估,应以结构或构件本身的性能随时间的变化规律为依据。但如何根据为数不多的检测资料来揭示结构性能随时间的变化规律,是一个难度较大的课题,需要进行深入的研究。

1.1 研究背景

我国是一个发展中的大国,正在从事着为世界所瞩目的大规模基础建设。而我国财力有限,能源短缺,资源并不丰富。因此,战略上要高瞻远瞩,有效地利用资金,节约能源,既要科学地设计出安全、适用又耐久的新建工程项目,还要充分、合理、安全地延续利用现有资源和工程设施。因此,加强混凝土结构耐久性研究,提高设计质量,延长结构使用寿命,是摆在我们面前的一个很重要的现实课题和任务。

目前,混凝土已经广泛地应用于各种海洋环境下,如海滨城市、海港、渔港、钻井平台等。但同时人们也研究发现,混凝土在海洋环境下的性能及其性能的改变与在一般环境下不同。暴露于海洋环境下的混凝土,可能由于海水组成对水泥水化物的化学作用、碱—集料反应、混凝土内部盐类结晶压力、寒冷气候下的冷冻作用、埋入钢筋的腐蚀及物理冲刷等复合作用的结果而破坏。许多混凝土建筑在使用一二十年后就必须花巨资修补,甚至重建。1980年3月27日,北海 Stavanger 近海钻井平台 Alexander Kjell 号突然破坏,导致123人死亡。1983年日本的小林一辅教授,在NNK电视台的讲话中明确指出:当前日本混凝土的主要问题是耐久性问题,在日本沿海岸,许多港湾建筑、桥梁等,建成以后不到10年的时间,混凝土表面开裂、剥落,钢筋锈蚀外露。P. K. Mehta指出,在工业发达国家,建筑业总投资的40%以上用于现存结构的修理和维护,60%以下用于新的设施建设。图1.1为几座跨海混凝土桥梁裂缝调查情况。

北方海域环境中,桥梁下部结构混凝土在浸水饱和或潮湿状态下,由于海水冻融带来的温度正负交替变化,使桥梁下部结构混凝土内部孔隙水形成冻结膨胀压、渗透压及水中盐类的结晶压等,产生疲劳应力,造成混凝土由表及里逐渐损伤破坏,导致结构剥蚀,发生早期损坏,从而使结构的安全性能减弱,严重的还将导致结构物的破坏和倒塌,造成人员伤亡和经济损失。结构的冻融破坏现象不仅在我国东北、华北和西北地区存在,而且在气候比较温和但冬季依然出现冰冻的华东、华中地区(山东、江苏和湖北等),也广泛存在混凝土的冻融破坏问题。海洋环境不仅对桥梁下部结构存在冻融破坏作用,海水侵蚀同样对桥梁下部结构产生损伤破坏。



由于青岛海湾大桥位于山东省东部,因此,有必要开展青岛海湾大桥在海水冻融与侵蚀作用下桥梁下部结构破坏及对整桥稳定性影响的研究。

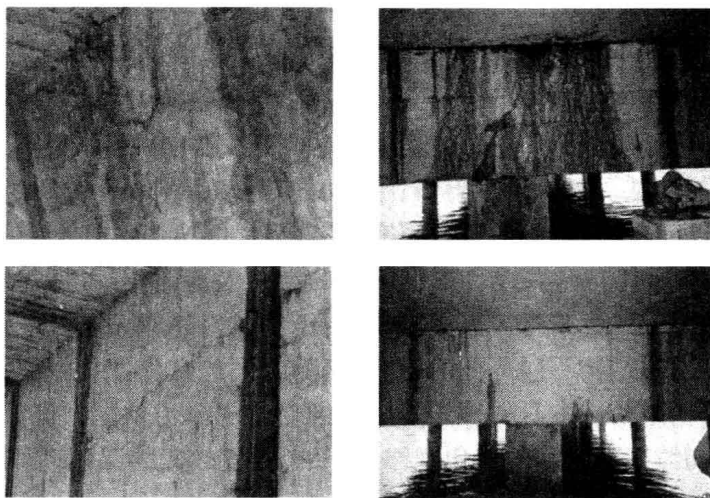


图 1.1 桥梁裂缝调查

1.2 混凝土耐久性能研究进展

混凝土在饱水状态下,因冻融循环产生的破坏作用称为冻融破坏。混凝土的抗冻耐久性是指饱水混凝土抵抗冻融循环作用的性能。处于高饱水度寒冷地区的混凝土结构物常常发生冻融破坏,如处于北方的大坝,大坝的迎水面水位变化区混凝土和溢流坝混凝土坝面常发生冻融破坏,还有处于河流中的大桥桥墩、海洋中的海上采油平台等建筑物,常常由于抗冻耐久性不足而提前“衰老”。因此,混凝土的抗冻耐久性对处于寒冷地区的水工建筑、桥梁等十分重要。而且,混凝土的抗冻性能还是混凝土耐久性能中非常重要的方面,在很长一段时间里,国内外评价混凝土耐久性时,常以混凝土的抗冻性作为主要标准或综合指标,甚至把抗冻性能试验直接称为耐久性试验。

2001 年,加州伯克利分校的 Mehta 教授^[1]在总结 59 年来混凝土耐久性的研究进展时指出:引起混凝土结构劣化的因素,按照重要程度依次为钢筋锈蚀、冻融破坏和海水侵蚀作用。因此,有效评估海水侵蚀对混凝土的作用具有工程应用和理论价值。

1.2.1 冻融循环后混凝土性能的试验研究

混凝土冻融循环产生的破坏作用主要有冻胀开裂和表面剥蚀两个方面。水在混凝土毛细孔中结冰造成的冻胀开裂使混凝土的弹性模量、抗压强度、抗拉强度等力学性能严重下降,危害结构物的安全性。一般认为,混凝土的冻融破坏是一个物理作用过程。

国内外学者对混凝土的抗冻性能做了大量理论与试验工作。早在 1945 年, Powers 提出了混凝土冻融破坏的静水压假说,后又提出了渗透压假说; Fagerlund 提出了“临界水饱和度法”。 Powers 还提出了混凝土抗冻性研究中的重要参数——平均气泡间隔系数的计算方法。中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、原上海建材学院等也对水工结构的抗冻性及公路混

凝土的抗盐冻性能等开展了卓有成效的研究,对保证重大工程的抗冻耐久性起到了积极的作用。

1) 混凝土冻融破坏的机理

1945年, Powers 提出了混凝土冻融破坏的静水压假说,此后又与 Helmuth 一起提出了渗透压假说。这两个假说合在一起,较为成功地解释了混凝土冻融破坏的机理,奠定了混凝土抗冻性研究的理论基础。

(1) 静水压假说

硬化混凝土中的孔隙有凝胶孔、毛细孔、空气泡等。各种孔隙之间的孔径差异很大,而且往往互相连通;空气泡是混凝土搅拌与振捣时自然吸入或掺加引气剂人为引入的,且一般呈封闭的球状,混凝土在水中时,毛细孔处于饱和状态,而空气泡内壁虽也吸附水分,但在常压下很难达到饱和。

混凝土孔溶液中溶有钾、钠、钙离子等,溶液的饱和蒸汽压比普通水低,在不掺盐类的水泥浆体中自由水的冰点约为 $-1 \sim -1.5^{\circ}\text{C}$ 。由于孔隙表面张力的作用,不同孔径孔内水的饱和蒸汽压和冰点不同,孔径越小,孔内水的饱和蒸汽压越小,冰点越低。当环境温度降低到 $-1 \sim -1.9^{\circ}\text{C}$ 时,混凝土孔隙中的水由大孔开始结冰,逐渐扩展到较小的孔。一般认为温度在 -12°C 时,毛细孔都能结冰,而凝胶中的水分子物理吸附于水泥浆固体表面,估计在 -12°C 以上不会结冰。因此,凝胶孔水实际上是不可能结冰的,对混凝土抗冻性有害的孔隙只是毛细孔。

众所周知,水转变为冰时体积膨胀 9%,迫使未结冰的孔溶液从结冰区向外迁移,因而产生静水力。显然,静水压力随孔隙水流程长度增加而增加。因此,存在一个极限流程长度,如果孔隙水的流程长度大于该极限长度,则静水压力将超过混凝土的抗拉强度,从而造成破坏。混凝土拌和时掺入引气剂后,硬化后混凝土浆体内分布有不与毛细孔连通的、相互独立且封闭的空气泡,空气泡直径达 $25 \sim 500\mu\text{m}$,且不易吸水饱和。空气泡的存在使受压的孔隙水可就近排入其中,提供了孔隙水的“卸压空间”,缩短了孔隙水的流程长度,减少了静水压力,从而使混凝土的抗冻性大大提高,这就是引气混凝土抗冻性远好于普通混凝土的原因。

(2) 渗透压假说

静水压假说成功地解释了混凝土冻融过程中的很多现象,如引气剂的作用、结冰速度对抗冻性的影响等,但却不能解释另外一些重要现象,如混凝土不仅会被水的冻结所破坏,还会被一些冻结过程中体积并不膨胀的有机液体如苯、三氯甲烷的冻结所破坏;非引气浆体当温度保持不变时,出现连续的膨胀,引气浆体在冻结过程中的收缩等。基于此, Powers 和 Helmuth 提出了渗透压假说。

渗透压假说认为,由于混凝土孔溶液含有 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^+ 等盐类,大孔中的部分溶液先结冰后,未冻溶液中盐的浓度上升,与周围较小孔隙中的溶液之间形成浓度差。这个浓度差的存在使小孔中的溶液向已部分冻结的大孔迁移。即使是浓度为零的孔溶液,由于冰的饱和蒸汽压低于同温下水的饱和蒸汽压,小孔中的溶液也要向已部分冻结的大孔溶液迁移。可见,渗透压是孔溶液的盐浓度差和冰水饱和蒸汽压差共同形成的。

2) 混凝土抗冻性研究中的两个重要参数

(1) 平均气泡间距

由冻融破坏机理可知,平均气泡间距是混凝土抗冻性的一个重要定量指标。 Powers 将气

泡间距 d 的一半定义为气泡间隔系数 L , 当混凝土的平均气泡间隔系数 L 小于某个临界值时, 毛细孔的静水压或渗透压不会超过混凝土的抗拉强度, 其抗冻性较好, 否则其抗冻性较差。Powers 用冻融循环法测抗冻性, 在显微镜下测空气泡含量及比表面积, 以此计算出平均气泡间隔系数。美国混凝土学会根据 Powers 的建议, 将极限平均气泡间隔系数定为 $250\mu\text{m}$ 。当然, 这个极限值取得是否合理, 以及各种水泥的混凝土是否均可采用同一个极限值等, 一些学者提出异议, 但平均气泡间隔系数作为混凝土抗冻性的重要参数, 得到了公认。假设混凝土中的空气泡都是等直径的球体, 且在水泥浆体中有规则地几何排列, 则可根据混凝土中水泥浆体的体积百分数、空气泡的体积百分含量, 以及空气泡的平均半径计算平均气泡间隔系数。气泡平均半径越大, 水泥浆含量越大, 含气量越小, 则平均气泡间隔系数越大, 对混凝土抗冻越不利。

(2) 临界水饱和度

1975 年, Fagerlund 提出了关于混凝土抗冻性的临界水饱和度理论。混凝土与水接触时, 毛细孔中吸水饱和, 然后小气泡中吸水, 大气泡的孔壁也吸附水, 随空气泡吸水的增加, 平均气泡间隔系数 L 逐渐增大。当 L 增加到某个极限值时, 冻结将引起材料破坏。因此, 从理论上讲, 混凝土的水饱和度 S 必然存在一个与极限平均气泡间隔系数相对应的临界值。当混凝土的水饱和度小于这个临界值时, 混凝土不会发生冻害, 超过临界值时将迅速破坏, 这一临界值称为混凝土的临界水饱和度 S_{cr} 。

3) 影响混凝土抗冻性的因素

由混凝土冻融破坏的机理可知, 混凝土的抗冻性与空气泡间距、降温速度、可冻水的含量、材料的渗透系数以及抵抗破坏的能力等因素有关。主要影响因素是平均气泡间距、水灰比、集料、水泥品种、掺和料、水泥用量等。

4) 混凝土冻融破坏后的力学性能

北方寒冷地区的道路、桥梁、地基基础及水工混凝土结构, 经常承受冻融循环作用, 冻融循环对混凝土的力学性能产生不利影响。张彦^[2]概述了海洋环境对桥梁下部结构(包括基础、承台和桥墩等)的影响, 并介绍了跨海大桥在下部结构设计施工中采取的相应措施。文中同时指出对处于浪溅区的墩柱与承台节点部位进行加强, 以确保结构的安全、可靠。现有的冻融循环后混凝土力学性能的研究资料, 都是针对单轴情况进行的^[3], 对冻融循环后混凝土受双轴拉压性能的试验研究报道较少。而实际工程中, 有些混凝土结构是处于多轴应力状态的, 如处于双轴压应力状态的混凝土结构比单轴应力状态的混凝土结构具有更高的抗冻融破坏能力, 而处于双轴拉压应力状态的混凝土结构的情况正相反, 所以, 如果按照单轴状态设计是不合理的。目前, 现有的关于冻融循环后混凝土性能的试验资料, 大多是以质量损失与动弹性模量为标准, 针对混凝土抗冻安全设计等级而展开的。然而, 在实际应用中, 人们最关心的是混凝土的力学性能, 如强度的损失直接关系到建筑物使用性能及安全。对常态下处于双轴拉压状态的混凝土力学性能的研究始于 20 世纪 50 年代末的日本、前苏联等国, 其成果已应用于制定相应的设计规范。

20 世纪 40 年代以来的混凝土冻融研究, 多以试验室研究为主^[4-13]。文献[14]认为, 对于一般条件下的混凝土结构, 其功能失效的标志并非钢筋锈蚀, 而是冻融或腐蚀等损伤引起混凝土自身的耐久性破坏, 对这类混凝土结构进行使用寿命预测和耐久性设计, 需要探索新的方法。该观点同样证明了本项目的研究具有实际的理论和工程意义。

以上文献大都从材料的微观破坏机理及材料抗冻性方面阐述冻融对混凝土的影响。然而,在实际工程应用中,人们最关心的是混凝土的力学性能,如强度的损失,直接关系到建筑物使用性能及安全。

关于普通混凝土在复杂多轴应力状态下的变形和强度特性研究,多年来一直受到国内外专家和学者的高度重视,并进行了一系列的试验及理论研究工作,发表了大量的研究论文^[15-30]。所建议的混凝土在应力空间和应变空间中的破坏准则已有很多模型。应力空间中的破坏准则从一个参数一直到五个参数的模型^[5],如朗金(Rankine)的最大拉应力理论、屈瑞斯加(Tresca)和密赛斯(Mises)的剪应力理论属于一个参数的模型,摩尔(Mohr)—库仑(Coulomb)理论,杜拉克(Drucker)—卜拉格(Prager)理论属于两个参数的模型。这些模型都属于早期的破坏理论,它们对促进现代混凝土强度理论的发展起过重大作用,有些理论直到今天仍全部或部分地被应用着。随着计算理论、试验技术和计算技术的发展,近代的混凝土破坏准则渐趋复杂,所含参数也渐趋增多,如 Bresler-Pister^[16]和 Willam-Warnke^[27]的三参数模型; Ottosen^[28]、Hsieh-Ting-Chen^[29]和大连理工大学的四参数模型^[15-16]; Willam-Warnke^[28]和 Podgorski^[30]的五参数模型。大连理工大学的模型是利用自行研制的、先进的混凝土三轴试验系统^[23]全面系统地研究了混凝土在两向及三向应力状态下的变形和强度特性^[31-34],特别是关于混凝土在三向不等拉状态下变形和强度特性的研究^[35-36],在国内外均属罕见。在上述试验研究的基础上,建立了应力空间及应变空间混凝土的破坏准则和内力损伤本构模型^[16]。中国水利水电科学研究院^[37]提出了不同形式的混凝土破坏准则。清华大学^[38]等单位也相继开展了这方面的研究,其他正在发展的还有裂缝摩擦理论^[39]、断裂力学理论等。一般认为四参数和五参数模型的精度最好。现有的应变空间的破坏准则分为两类:一类为由应力空间的破坏准则转换过来的,如 Romstad 的破坏准则^[40];另一类为根据试验资料直接建立的应变空间的破坏准则,如主应变与剪应变间为线性关系的模型^[41],主应变与剪应变间为非线性关系的模型^[42]。

目前已有一些关于混凝土力学性能退化方面的研究、冻融条件下混凝土破坏面演化模型研究^[43]、冻融环境下混凝土应力—应变关系研究^[44-45]。由于考虑抗冻因素,一般都添加引气剂。因此,引气混凝土冻融循环后的力学性能研究对抗冻结构的评估和设计更具有参考价值。通过检索发现该研究相对较少^[46-48]。本文基于连续损伤力学和 Ottosen 破坏准则模型建立的冻融损伤模型,可为建立符合实际工程的混凝土结构冻融后抗裂设计理论提供基础资料。

1.2.2 海水侵蚀循环后混凝土性能的试验研究

大量工程实践证明,在钢筋混凝土结构中,钢筋的锈蚀是影响服役结构耐久性的主要因素。新鲜的混凝土是呈碱性的,其 pH 值一般大于 12.5,在碱性环境中的钢筋容易发生钝化作用,使钢筋表面产生一层钝化膜,能够阻止混凝土中钢筋的锈蚀。但当有二氧化碳、水汽和氯离子等有害物质从混凝土表面通过孔隙进入混凝土内部时,与混凝土材料中的碱性物质中和,从而导致了混凝土的 pH 值降低,就出现 $\text{pH} < 9$ 的情况,在这种环境下,混凝土中埋置钢筋表面的钝化膜被逐渐破坏,在其他条件具备的情况下,钢筋就会发生锈蚀,并且随着锈蚀的加剧,使混凝土保护层开裂、钢筋与混凝土之间的黏结力破坏、钢筋受力截面减少、结构强度降低等,从而导致结构耐久性的降低。通常情况下,受氯盐腐蚀过的混凝土中的钢筋有更严重的锈蚀情况。



贺鸿珠等^[49]采用交流阻抗谱方法研究了在海水侵蚀条件下不同强度等级混凝土试件的钢筋锈蚀情况。通过复导纳图求得了反映钢筋锈蚀特性的全部阻抗参数,并分析了在海水中浸泡时间的长短对这些参数的影响。结果表明:随混凝土强度等级的增大,混凝土的抗钢筋锈蚀能力亦增大。张伟平等^[50]从三种途径获取共 267 根锈蚀钢筋试件,其中 156 根试验室外加电流锈蚀钢筋试件,35 根大气环境自然裸露锈蚀钢筋试件,76 根实际工程老构件中锈蚀钢筋试件。通过拉伸试验,研究了锈蚀钢筋力学性能变化规律,指出:随着锈蚀的发展,钢筋屈服强度、极限强度和极限应变均发生退化,屈服平台缩短直至消失。同时,收集国内外已有锈蚀钢筋力学性能试验数据,建立了相应的数据库,经过统计、分析比较后,得出了锈蚀钢筋弹性模量、屈服强度、极限强度和极限应变等力学性能特征值的回归公式和屈服平台消失时的临界截面锈蚀率,最后建立了不同环境条件下锈蚀钢筋的应力—应变关系数学模型。张玉敏等^[51]采用普通硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥,分别配制了混凝土试件,采用加速腐蚀试验研究了在海水侵蚀后,其强度、质量损失随时间变化的规律及原因,并为试件损伤状态定量化解析提供了试验数据。结果表明,在相同的试验条件下,矿渣硅酸盐水泥混凝土耐久性优于普通硅酸盐水泥混凝土;混凝土试件的抗蚀系数为 0.18 时,与美国 ASTM 标准规定的强度损失 25% 的界限值吻合较好。

酸腐蚀混凝土的力学性能:酸性介质与混凝土中水泥水化产物发生化学反应,生成易被水溶解或是没有胶结性能的软物质,使混凝土表面酥松,混凝土强度降低。国内外学者就硫酸、盐酸、二氧化硫气体腐蚀对混凝土强度的影响进行过试验研究。硫酸盐与混凝土水化产物发生化学反应,生成低溶解度的盐并堆积在孔隙内,从而在混凝土孔隙内产生内膨胀作用。试验研究表明,硫酸盐腐蚀和硫酸腐蚀后混凝土力学性能的变化规律基本相同,所不同的是,混凝土硫酸盐腐蚀初期,内膨胀使混凝土更加密实,因而强度有所增加,直至腐蚀后期,随着内膨胀力的增大,导致混凝土内裂缝的产生和发展,强度开始明显降低。林跃忠等^[52]根据灰色系统理论,依据试验数据建立了海水作用下混凝土的强度预测模型,以便能够比较准确地预测海水侵蚀混凝土强度与浸烘循环次数的关系,为预测海水侵蚀混凝土强度变化提供理论分析方法和依据。经计算分析比较,其预测结果与实测数据较好吻合,结果比较理想。文献[53]进行了高浓度及应力状态下混凝土硫酸盐侵蚀的研究。研究结果表明:在高浓度硫酸盐干湿循环条件下,应力会明显加速混凝土的硫酸盐侵蚀破坏,而且对抗弯强度的影响大于对抗压强度的影响。

各国对于混凝土在侵蚀环境中的损伤机理方面已经取得了一些科研成果,但大多数研究只针对一两种侵蚀离子对混凝土的侵蚀作用。Liang 等^[54]对氯离子、硫酸根离子、二氧化碳三种化学侵蚀因素进行了两两组合试验,研究了侵蚀因素的叠加效应。文献[55-57]分别研究了硫酸盐对碾压混凝土侵蚀的机理,阐述了混凝土受硫酸盐侵蚀的防治措施,得出海工混凝土需综合考虑海水环境的影响,在选用集料时,应检测其碱活性,避免使用具有碱活性的集料等结论。文献[58-62]通过加速腐蚀试验,研究了普通硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥在海水侵蚀后物理性能的变化。

通过检索文献发现,干湿循环作用下混凝土力学性能退化方面的研究相对较少。其中文献[63]研究了混凝土在冻融循环和盐湖卤水共同作用下混凝土的抗压和抗折强度的变化规律。文献[14]的研究借助于损伤力学的理论,建立了单一冻融或侵蚀后的混凝土损伤退化模

型。文献[64]研究了干湿循环作用下引气混凝土的力学性能退化规律。文献[65]研究了干湿循环对混凝土硫酸盐侵蚀的影响,认为影响混凝土侵蚀速度的因素有:试件反应面积、侵蚀溶液的浓度、结晶压力和溶液的温度等。

1.2.3 冻融、海水侵蚀复合作用下的混凝土破坏研究

吴中伟院士曾指出^[66],耐久性研究本身存在缺点,如习惯单一破坏因素的研究试验,与实际工程中多因素的联合作用脱节,工作缺少组织与联系,大量重复劳动等。系统论方法告诉我们,整体的性质和规律只存在于组成各要素的相互联系和相互作用中,而各组成部分孤立的特征和活动的总和,不能反映整体的特征和活动方式。因此,要真正实现混凝土材料实际工程条件下的寿命预测,必须考虑工程条件的多因素作用这一问题,从而进一步指导室内试验设计和研究。

混凝土在海洋环境下的抗冻性问题,实际上是混凝土在多因素作用下的耐久性破坏问题,无论在单因素还是多因素作用下,混凝土的耐久性失效过程都是一个内部损伤逐步演变的劣化过程。关于混凝土在物理化学腐蚀和冻融循环双因素作用下的损伤失效规律,至今仍然没有取得一致的看法,需要作进一步的理论探索。

混凝土在冻融循环或化学腐蚀过程中,其强度随着时间的推移而显著降低,最终混凝土发生破坏和结构解体。有关冻融循环或化学腐蚀等单一破坏因素(single damage factor, SDF)作用下混凝土的强度特征,已经有大量的文献报道^[67-69]。但是,在我国东部沿海滩涂或北方盐渍土地地区,实际混凝土结构常常同时受到化学腐蚀与冻融破坏的共同作用,在此(化学腐蚀+冻融破坏)双重破坏因素(double damage factors, DDF)作用下,两个因素相互影响,相互促进。因此,近几年以来,国内外学者非常关注混凝土在化学腐蚀和冻融循环共同作用下的耐久性問題,比如:慕儒等^[70-72]和余红发等^[73-74]研究了混凝土在(化学腐蚀+冻融破坏)DDF作用下相对动弹性模量的变化规律,得到重要的研究成果。

在实际工程中的钢筋混凝土结构中,各部分混凝土承受单一的受压或纯剪应力的情况是极少的。而大多数混凝土结构物,如常见的楼板、剪力墙结构,以及水工大坝、桥梁、核反应堆安全壳、采油平台等处于复杂应力状态。由于试验设备的不足和试验难度大等原因,人们对混凝土多轴强度理论的试验研究还不够充分。目前,国内外对常态下混凝土多轴强度理论的试验研究取得了一些进展^[75-78],但对于冻融循环作用后普通混凝土多轴强度理论的试验研究较少,大连理工大学对冻融循环作用后混凝土的多轴强度作了试验研究^[77-79]。

1.3 桥梁冰荷载研究进展

在我国北方近海区域,海水流速较小,流冰尺度不大,因此,由流冰撞击结构物产生的冲击较小,一般不控制设计,工程设计中可以忽略。海冰大面积冻结在结构上的几率较小,海冰对桥梁基础由于水位升降产生的荷载以及对建筑物挤压产生的膨胀力较小,也可以忽略不计。因此,我国海冰对跨海桥梁结构基础的作用荷载主要是由于大面积冰场运动而产生的静冰压力。

目前,对于海洋平台上的冰荷载效应研究较多^[80-83],而完全针对桥梁的冰荷载的研究相