

混凝土冻害研究与防冻施工

刘中林 赵振祥 冯金东 编著

中国建筑工业出版社

混凝土冻害研究与防冻施工

刘中林 赵振祥 冯金东 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土冻害研究与防冻施工/刘中林等编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2011.2
ISBN 978-7-112-12885-3

I. ①混… II. ①刘… III. ①混凝土-冻害-研究
②混凝土施工-防冻-研究 IV. ①TU528②TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 012203 号

北方寒冷地区的混凝土破坏多数与冻融作用有关, 混凝土结构在冻融循环作用下的破坏, 关系到建筑物使用寿命、工程质量、运营安全等方面的问题。本书基于混凝土冻融破坏机理研究分析, 介绍了改善抗冻性能各种途径, 对混凝土设计和施工中的防冻措施提出具体要求。全书包括六部分: 混凝土冻融破坏机理、混凝土抗冻试验、混凝土防冻外加剂、掺合料改善混凝土防冻性能、抗冻混凝土设计、混凝土防冻施工。本书有助于混凝土冻融破坏理论研究工作, 对在实际工程中进行混凝土抗冻设计和施工具有参考作用。

本书可供从事混凝土结构设计、施工的工程技术人员参考, 也可作为大专院校相关专业师生的参考用书。

混凝土冻害研究与防冻施工

刘中林 赵振祥 冯金东 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京千辰公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{3}{4}$ 字数: 415 千字

2011 年 5 月第一版 2011 年 5 月第一次印刷

定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-12885-3
(20152)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

我国地域辽阔，气候复杂。北方广大地区，每年都有较长的负温天气。这些地区混凝土的破坏多数与冻融作用有关，冻融破坏成为混凝土建筑物损坏的主要形式之一，严重影响到建筑物使用寿命、工程质量和运营安全。一些公路、桥梁、水坝等混凝土构造物在投入使用很短时间就发生冻融破坏，给国民经济造成很大的损失。

近些年来，随着经济的发展，河北省的公路建设规模不断增大。高速公路、国省干线、农村公路每年都需要建设相当规模的混凝土构造物。由于河北环境气候因素影响，按常规方法施工，每年可施工天数有限，难以满足工期要求，特别是承德、张家口北部坝上地区，海拔高、无霜期短，最低气温摄氏零下40多度。特殊的环境因素，严重制约了工程进度。为此，为减轻混凝土构造物冻融破坏影响，加快公路工程建设步伐，河北省交通运输厅科教处和承德市交通运输局组织科研和工程技术人员，对混凝土结构抗冻机理和混凝土防冻施工进行专项研究。依托工程实际，联合专业学院和科研机构开展混凝土结构抗冻试验研究，确定抗冻设计方案，采取有效的防冻施工方法，取得了很好的成效。

编写人员在对混凝土冻融破坏机理、混凝土抗冻试验研究章节的编写中，介绍了部分国内外学者在混凝土受冻机理研究方面的成果和一些国家混凝土抗冻试验研究状况以及抗冻试验方法。力图通过各种理论和各种方法比对借鉴，从而找到提高混凝土抗冻性能的更有效、更经济、更实用的方法。在掺合料改善混凝土防冻性能、抗冻混凝土设计、混凝土防冻施工方面借鉴国内外成功做法的同时，对工程施工中采取的设计、管理、养护措施和减轻冻融破坏对建筑物的影响的具体做法进行了认真总结，对寒冷地区在保证工程质量前提下，利用冬季进行施工、缩短工期、加快基本建设步伐有着很好的指导作用。

该书在筹划和编写过程中得到承德交通规划设计院有限公司和河北工业大学土木学院的大力支持，在此深表感谢。

由于该书学科跨度大，专业性强，加之编者知识局限，书中难免有疏漏和错误之处，祈请读者批评指正。

2010年9月

目 录

第 1 章 混凝土冻融破坏机理	1
1.1 序言	1
1.2 混凝土冻融破坏的影响因素	1
1.2.1 水灰比的影响	1
1.2.2 骨料的影响	4
1.2.3 引气剂的影响	7
1.2.4 水泥的影响	9
1.2.5 碳化的影响	16
1.2.6 施工工艺的影响	18
1.2.7 环境的影响	19
1.2.8 冻结温度和冻融速率的影响	20
1.3 混凝土受冻理论	21
1.3.1 水转化为冰的相变过程	22
1.3.2 混凝土中水的存在形式及空隙中饱水程度	22
1.3.3 冻融临界饱水值	22
1.3.4 水分迁移及干燥	23
1.3.5 孔隙溶液的冻结	23
1.4 冻融破坏研究	27
1.4.1 混凝土冻融损伤	27
1.4.2 冻融破坏机理	30
1.4.3 冻融破坏特性	34
第 2 章 混凝土抗冻试验	47
2.1 国外混凝土抗冻性控制要求和试验方法综述	47
2.1.1 美国	47
2.1.2 加拿大	48
2.1.3 欧洲标准委员会	49
2.1.4 德国	53
2.1.5 瑞典	53
2.1.6 挪威	56
2.1.7 丹麦	56

2.1.8 芬兰	57
2.2 国内标准规定的冻融试验方法和控制要求	58
2.2.1 抗冻试验方法的基本要求	58
2.2.2 慢冻法	59
2.2.3 快冻法	61
2.2.4 单面冻融法（盐冻法）	64
2.2.5 蒸压加气混凝土抗冻性试验	69
2.2.6 各种抗冻性试验方法综述	71
第3章 混凝土防冻外加剂	73
3.1 概述	73
3.1.1 防冻剂的适用范围	73
3.1.2 防冻剂的种类	74
3.1.3 防冻剂的作用	75
3.1.4 防冻剂应用技术指标要求	77
3.2 混凝土防冻剂均质性试验	78
3.2.1 一般规定	78
3.2.2 固体含量试验	78
3.2.3 密度试验	79
3.2.4 细度	82
3.2.5 pH值	82
3.2.6 表面张力	83
3.2.7 氯离子含量	84
3.2.8 硫酸钠含量	87
3.2.9 还原糖含量	89
3.2.10 水泥净浆流动度	91
3.2.11 水泥砂浆工作性	91
3.2.12 碱含量	93
3.3 防冻剂含水率及释放氨的测定	94
3.3.1 防冻剂含水率测定	94
3.3.2 防冻剂释放氨的测定	95
3.4 掺防冻剂混凝土性能试验	96
3.4.1 材料	96
3.4.2 配合比	97
3.4.3 混凝土搅拌	97
3.4.4 试件制作及试验所需试件数量	97
3.4.5 混凝土拌合物试验	98
3.4.6 硬化混凝土性能试验	100
3.4.7 钢筋锈蚀快速试验方法	102

3.5 混凝土外加剂对水泥的适应性检测	105
3.6 防冻剂的使用	106
3.6.1 防冻剂的选择	106
3.6.2 防冻剂的掺量	107
3.6.3 防冻剂的质量控制	107
3.6.4 防冻剂施工	108
3.6.5 掺防冻剂混凝土的质量控制	109
第4章 掺合料改善混凝土防冻性能	111
4.1 矿物掺合料研究动态	111
4.2 掺合料的指标及技术要求	113
4.2.1 掺合料的指标	113
4.2.2 掺合料的试验	113
4.2.3 掺合料的技术要求	116
4.3 添加不同掺合料混凝土试验	116
4.4 粉煤灰	121
4.4.1 引气粉煤灰混凝土抗冻研究	122
4.4.2 高掺量粉煤灰混凝土防渗抗冻性能研究	127
4.4.3 粉煤灰混凝土抗盐冻性能研究	130
4.4.4 粉煤灰的技术要求	134
4.4.5 粉煤灰混凝土的工程应用	135
4.4.6 粉煤灰混凝土配合比设计	136
4.4.7 粉煤灰取代水泥的最大限量	139
4.4.8 粉煤灰混凝土的施工	140
4.4.9 粉煤灰混凝土的检验	140
4.5 硅粉	141
4.5.1 硅粉在国外的应用情况	141
4.5.2 硅粉在国内的生产和应用情况	143
4.5.3 硅粉的特性	144
4.5.4 硅粉的作用机理	145
4.5.5 硅粉混凝土基本物理力学性能	148
4.5.6 硅粉对混凝土的耐久性的影响	150
4.5.7 掺硅粉混凝土在融冰盐溶液中的冻融循环试验	152
4.5.8 硅粉混凝土的主要用途	154
4.5.9 硅粉的指标要求	156
4.5.10 硅灰混凝土施工	156
4.5.11 混凝土中掺用微硅粉时应注意事项	158
4.6 矿渣	158
4.6.1 概述	158

4.6.2 矿粉对混凝土性能的影响	159
4.6.3 矿渣粉品质差别及其对混凝土性能的影响	160
4.6.4 矿渣粉不同掺量对强度的影响试验	165
4.6.5 矿渣粉技术要求	167
4.6.6 矿渣试验方法	167
4.6.7 矿渣检验规则	169
4.6.8 矿渣混凝土适用范围	170
4.6.9 矿渣混凝土的施工	170
第5章 抗冻混凝土设计	173
5.1 盐碱腐蚀环境中混凝土抗冻设计要求	173
5.2 位于水位变动区有抗冻要求的混凝土抗冻等级要求	174
5.3 掺加引气剂要求	175
5.4 桥涵基础抗冻设计要求	175
5.5 桥涵墩台抗冻设计规定	177
5.6 桥梁上部结构抗冻设计规定	178
5.7 桥梁铺装及桥上建筑设计规定	178
5.8 砌筑工程混凝土抗冻设计规定	179
5.9 抗冻水泥混凝土设计	179
5.10 抗冻水泥混凝土配合比设计	180
第6章 混凝土防冻施工	181
6.1 混凝土防冻施工的基本要求	181
6.1.1 钢筋的焊接、冷拉及张拉的要求	181
6.1.2 混凝土配制和搅拌的要求	181
6.1.3 混凝土运输和浇筑的要求	182
6.1.4 灌注桩冬期施工要求	183
6.2 施工准备	184
6.2.1 组织管理	188
6.2.2 图纸准备	188
6.2.3 安全与防火	188
6.2.4 现场准备	188
6.3 钢筋工程	188
6.3.1 钢筋负温冷拉和冷弯	189
6.3.2 钢筋负温焊接	190
6.4 混凝土工程	192
6.4.1 混凝土的拌制	194
6.4.2 混凝土的运输和浇筑	196
6.4.3 混凝土强度估算	201

6.4.4 蓄热法施工	205
6.4.5 暖棚法施工	213
6.4.6 电热法施工	215
6.4.7 远红外线法施工	228
6.4.8 蒸汽加热法	235
6.5 负温混凝土施工	247
6.5.1 负温度混凝土施工范围	247
6.5.2 负温度施工混凝土强度增长依据	247
6.5.3 负温度施工防冻剂选择	247
6.5.4 负温混凝土施工要求	249
6.6 抗冻混凝土养护	249
6.7 抗冻混凝土质量检查及评定	251
6.7.1 施工过程检查	251
6.7.2 抗冻混凝土质量验收检查	252
6.8 越冬混凝土工程	254
6.8.1 基本要求	254
6.8.2 在建工程越冬要求	255
6.8.3 停、缓建工程越冬要求	255
参考文献	257

第 1 章 混凝土冻融破坏机理

1.1 序言

我国地域辽阔，在长江中下游、东北、华北、及内蒙、青海、新疆等地，冬季气温都在 -5°C 以下。低温对混凝土十分不利，在这些地区的混凝土的破坏多数与冻融作用有关，混凝土在冻融循环作用下破坏是关系到建筑物使用寿命、工程质量、安全运营等方面的重大问题。冻融破坏是混凝土水工建筑物损坏的主要形式之一，许多工程在应用中产生冻融（或盐冻）破坏，如一些公路、桥梁等工程在短期就发生抗冻的破坏，给国民经济造成很大的损失。必须充分认识它的严重性，了解其破坏原因，采取正确的设计、施工和管理措施以减轻冻融破坏对建筑物的影响，就此问题国内外混凝土专家对混凝土抗冻问题的研究日益重视，各种理论不断提出，各种方法不断采用，都力图通过对混凝土受冻机理研究找到提高混凝土抗冻性能的更有效、更经济、更实用的方法。

近年来，随着混凝土技术的发展，高性能混凝土的研究与应用日益得到人们的重视，而高性能混凝土的研究中更是以混凝土耐久性的研究为其核心的内容。混凝土抗冻性是混凝土耐久性中的重要组成部分。混凝土抗冻性的研究与其评价方法是密不可分的。目前我们使用的方法对当前混凝土技术的发展显然是不适应的。混凝土的冻融破坏，是国内外研究较早、较深入的课题。从 20 世纪 40 年代以后，美国、前苏联、欧洲、日本等均开展过混凝土冻融破坏机理的研究，提出的破坏理论就有 5~6 种，如美国鲍尔斯（T. C. Powers）提出的冰胀压和渗透压理论等。但其中大部分是从纯物理的模型出发，经假设和推导得出，有些是以水泥净浆或砂浆试件通过部分试验得出的，因此迄今为止，对混凝土的冻融破坏机理，国内外尚未得到统一的认识和结论。

1.2 混凝土冻融破坏的影响因素

混凝土在抗冻融作用时，虽然关于破坏机理的问题非常复杂。混凝土结构冻融破坏最重要的影响因素可以分为：

- （1）混凝土配比影响：主要因素为 W/C （水灰比）、外加剂、骨料、水泥；
- （2）工程施工影响：主要因素为养生、成型捣固、输送、养护对策；
- （3）外部的影响：水分的供给、温度的行为、除冰盐的影响。

一般来讲，外部因素对混凝土抗冻性影响不是最重要的，而最适宜的混凝土配合比、适宜的制造技术、施工技术等对提高混凝土抗冻融的影响是最重要的。

1.2.1 水灰比的影响

水灰比对混凝土抗冻融的影响是使混凝土结构生成不同的孔隙体系，其与抗冻融性能

有很重要的关系。水化进行完全时,根据水泥的矿物组成,约有25%的拌合用水成为水化物中的结合水,约15%为物理结合水(水泥凝胶孔隙吸附水)。因此,从化学—物理的观点来看,为了使混凝土中全部水泥水化, W/C 约为0.40。但从施工方面来看,一般情况下,混凝土的水灰比 >0.4 ,这样才能满足施工作业的要求。但是,这种高水灰比的混凝土中,非化学和非物理结合水,在混凝土结构硬化过程中蒸发,形成毛细管孔隙。水泥石中形成的毛细管孔隙与 W/C 有何关系以及毛细管孔隙与抗冻融性之间的关系一直被国内外学者重视。

Bogue 曾经进行过混凝土抗冻融/抗除冰盐冻融与毛细管孔隙间的关系的研究,得到了如图1.2.1-1所示特别有意义的图表。由图可见,当毛细管孔隙在2%以下时,抗冻融循环次数可达800次以上;而当毛细管孔隙为6%左右时,抗冻融循环次数则仅能达到300次左右。由此可以进一步说明高强度高性能混凝土($W/C \geq 0.30$)抗冻性高的原因。

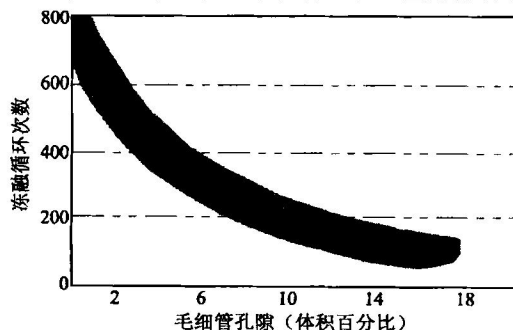


图1.2.1-1 抗冻融性能(相对动弹性模量50%时的冻融循环次数)和毛细管孔隙的关系

在我国的华北、西北部分地区和东北部分地区气象条件下的最低气温,或者是在抗冻融试验时的温度,也几乎只有毛细管孔隙中的水结冰。因此,混凝土中毛细管孔隙的比例就影响到结冰的形成。而周边的水分或水蒸气要迁移进入混凝土内部,也主要是通过毛细管孔隙体系。

因此,混凝土的透水性,也随着毛细管孔隙的提高而增大。特别是那些连通的毛细管孔隙,会使混凝土的透水性明显地上升。当毛细管孔隙超过25%时,就会出现连通的毛细管孔隙。

在混凝土中,毛细管孔隙占全部孔隙的比例,实际上与 W/C 、水化程度和水泥的种类有关。国内外的有关资料均认为:水泥的化学结合水约为未水化水泥的25%,物理结合水大约达到15%。根据这一观点, W/C 为0.4的水泥混凝土结构,水泥水化完之后,全部拌合用水都处于结合状态;其结果,硬化水泥浆中是没有毛细管孔隙存在的,如图1.2.1-2所示。

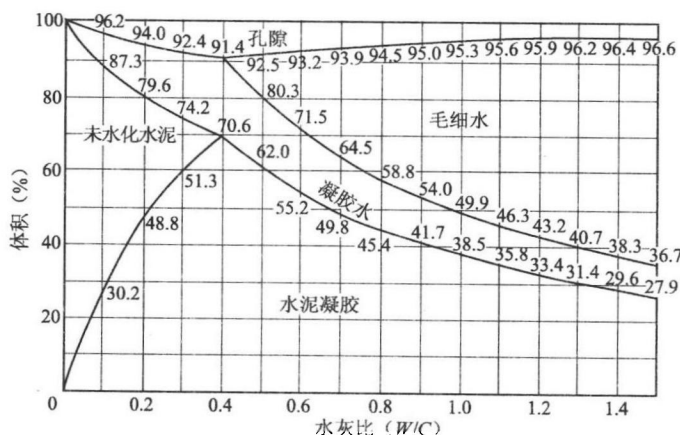


图1.2.1-2 水泥石中孔隙与水灰比关系 (Russ)

但是,即使水泥经过很长期的水化硬化,也不可能使水泥完全水化,水化程度不可能达到 100%。实际上,即使水灰比很低,也避免不了毛细管孔隙的出现。如果完全没有毛细管孔隙,施工是困难的。当毛细管孔隙超过 25% 时,就会出现连通的毛细管孔隙,透水性和物质移动可能性迅速提高,如图 1.2.1-3 所示。

通过适当调整水灰比,使毛细管孔隙达到最小,这就有可能提高混凝土抗冻融的性能,这是众所周知的。各国对受冻融作用的混凝土,都规定了水灰比的最大极限值。中国工程建设标准化协会标准《高性能混凝土应用技术规程》规定不同冻害地区混凝土最大水胶比如表 1.2.1-1 所示,德国的标准 DIN EN 206—1 如表 1.2.1-2 所示。

日本《高耐久性钢筋混凝土结构的设计与施工指南(案)·同解说》中的规定见表 1.2.1-3。

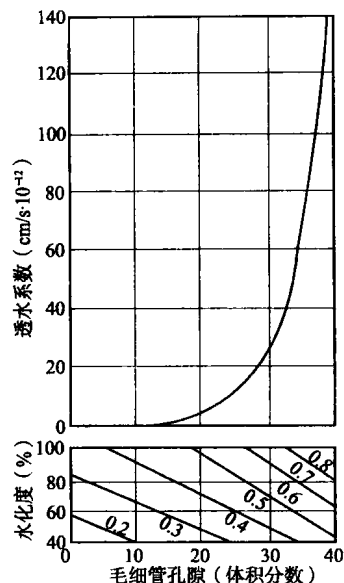


图 1.2.1-3 水泥石的透水性 and 毛细管孔隙、水灰比和水化程度的关系

不同冻害地区或盐冻地区混凝土的最大水胶比

表 1.2.1-1

外部劣化因素	水胶比 (W/B) 最大值	外部劣化因素	水胶比 (W/B) 最大值
微冻地区	0.50	严重冻害地区	0.40
寒冷地区	0.45		

注:表中的严重冻害地区:如西藏、东北、西北、华北,冬季最低温度 -16°C 以下;

寒冷地区:如安徽、山东、河南、湖北等地,冬季最低温度在 $-16^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 之间;

微冻地区:如湖南、江西、贵州等地的一些山区。

受冻融作用混凝土配比 (DIN EN 206—1)

表 1.2.1-2

暴露条件	XF1 (标准的饱水无除冰盐)	XF2 (标准的饱水无除冰盐)	XF3 (高饱水无除冰盐)	XF4 (高饱水无除冰盐)
W/C 最大值	0.60	0.55 ^① 0.55 ^①	0.55 0.50	0.50 ^①
最低强度等级 ^②	C25/30	C25/30 C35/45	C25/30 C35/45	C30/37
最小水泥用量 (kg/m^3)	280	300 320	300 320	320
矿物掺合料 (kg/m^3) ^③	270	① ①	270 270	①
最小含气量 ^{④⑤} (%)	—	4.0 —	4.0 —	4.0 ^{⑥⑦}
其他	F4	MS25	F2	MS18
使用的水泥	符合 DIN1164 要求的各种水泥	除了 CEMII/A-P CEMII/B-P CEMII/A-V CEMII/B-SV 之外,符合 DIN1164 的各种水泥	符合 DIN1164 的各种水泥	只能使用各种水泥 CEMI CEMII/A-S, B-S, A-T, B-T, A-L CEM III/A ^⑥ CEM III/B ^⑥

① II 型混合料 (火山灰或潜在活性),但计算入水泥用量中或必须计算入水灰比中。

② 不适用于轻骨料混凝土。

③ $D_{\max} = 63\text{mm}$ 时,单方水泥用量最好减少 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 。

- ④ 浇筑前新拌混凝土含气量按混合物粒径大小而定；8mm = 5.5%，16mm = 4.5%，32mm = 4.0%，63mm = 3.5%。
- ⑤ $W/C \leq 0.4$ 的超干硬性混凝土不引气制造也可。
- ⑥ 当最低强度等级为 C40/50， $W/C \leq 0.35$ ，最小水泥用量 $\geq 340\text{kg/m}^3$ 时，含气量再进一步确定。
- ⑦ 矿渣掺量 $\leq 50\%$ ，强度等级 ≥ 42.5 或 $\geq 32.5\text{R}$ 。

冻害地区水灰比最大值

表 1.2.1-3

劣化外力区分	水灰比最大值 (%)
准冻害地区	55
一般冻害地区	
重冻害地区	50

设计配合比中含气量为 5%。

美国 ACI201 委员会提出的关于混凝土耐久性的最大水灰比如表 1.2.1-4 所示。

处于恶劣环境中混凝土的最大水灰比

表 1.2.1-4

结构的类型	经常处于潮湿状态并 遭受冻融作用结构 ^①	接触海水或硫酸盐结构
断面细小的构件以及 钢筋保护层小于 1in 的截面	0.45	0.40 ^②
其他所有的结构	0.50	0.45 ^②

① 混凝土中须掺引气剂。

② 如采用抗硫酸盐水泥，允许水灰比提高 0.05。

1.2.2 骨料的影响

混凝土中使用的骨料，其种类和品质对混凝土的抗冻融性能影响很大。不适宜应用的骨料，会使混凝土发生剥落 (Popout) 和生成贯通性的裂缝 (D 形开裂, D-Cracking)。

剥落和开裂是混凝土结构受冻破坏的最普通形式。剥落劣化，多发生于混凝土表面。饱水骨料在混凝土中受冻时，骨料体积膨胀；由于骨料强度高于水泥石强度，使骨料上表面的混凝土剥离。这完全是由于饱水骨料粒子受冻融造成的。如图 1.2.2-1 所示。

混凝土结构在冻融破坏过程中，由于水分和融雪剂的作用，容易脱皮。在混凝土结构中，某些粗骨料在反复冻融作用下，通常会沿结构边缘及节点的平行方向缓慢开裂，最终得到一个类似于“D”字形的裂缝，如图 1.2.2-2 所示。

在混凝土路面板的接缝处，水分从表面、下面与侧面渗入混凝土，受冻融时易出现“D”字形裂缝。

骨料抗冻融的影响因素主要有：骨料的孔隙率、强度、粒径等。

骨料的饱水程度和吸水量，对于骨料的抗冻融性能起着中心作用。除了骨料的总孔隙率之外，骨料中孔隙大小的分布也很重要，因为毛细管水上升的高度与孔隙半径成反比。平均孔直径小、总孔隙率大的骨料的冻融性能差。图 1.2.2-3 为骨料的总孔隙量、平均孔隙直径和抗冻害性能的关系。

1.2 混凝土冻融破坏的影响因素

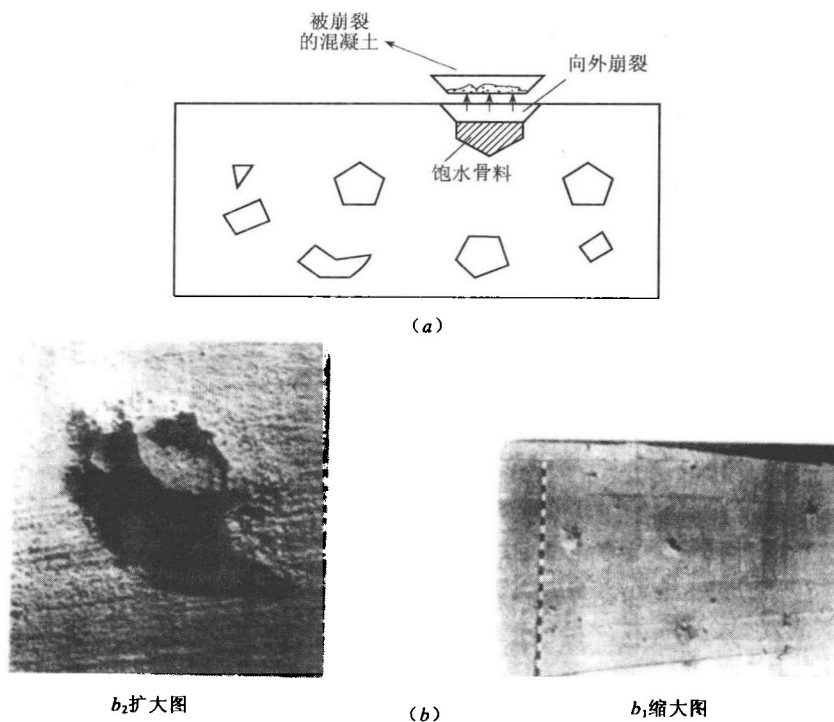


图 1.2.2-1 由于饱水骨料在混凝土中受冻而造成表层崩裂
(a) 饱水骨料受冻使表面混凝土崩裂示意图；(b) 饱水骨料受冻使表面混凝土崩裂

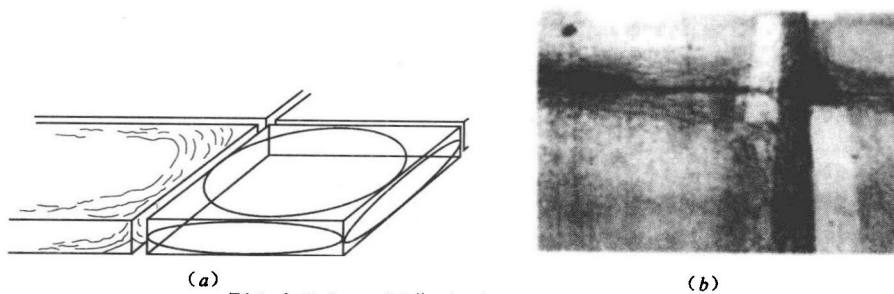


图 1.2.2-2 “D” 字形裂缝示意图与实例
(a) 示意图；(b) 实例

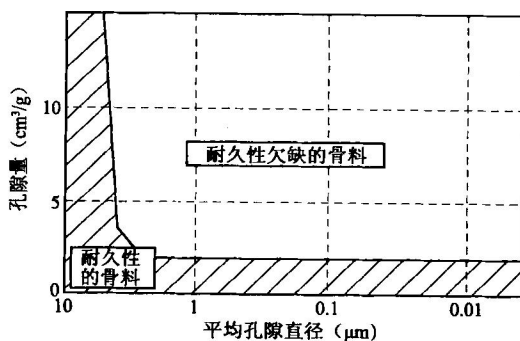


图 1.2.2-3 骨料的抗冻融性能和平均孔隙直径、总孔隙量的关系

一般来讲, 具有高强度的骨料, 其抗冻融的效果也是好的; 试验证明, 强度为 150MPa 的岩石, 具有充分的抗冻融能力。

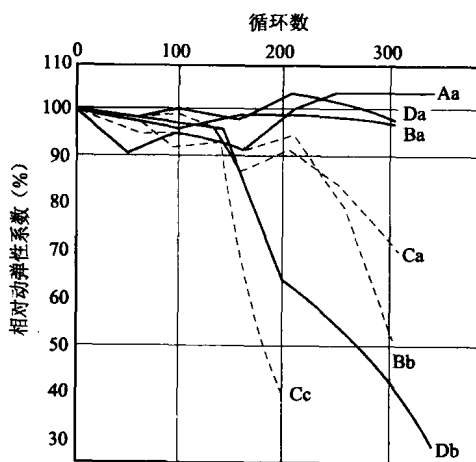
粗骨料粒径大者比粒径小者抗冻融性能差, 天然砂对冻害比较敏感, 粉体骨料掺量对混凝土抗冻融有一定影响。在掺入粉体的混凝土中, 为了提高工作性而提高 W/C 时, 这时对抗冻融/抗除冰盐冻融有一定负面的作用。但混凝土中单位体积用水量一定时, 适量的粉体对抗冻性能提高有帮助。

根据日本的试验, 骨料的吸水率对混凝土抗冻融的影响很大。表 1.2.2-1 为几种骨料的吸水率。如果骨料的吸水率高, 即使混凝土的水灰比很低, 抗冻融性能也不好。如图 1.2.2-4 所示。

几种骨料的吸水率

表 1.2.2-1

符 号	种 类	吸水率 (%)
A	硬质砂岩碎石	0.78
B	安山岩碎石	1.49
C	安山岩碎石	2.44
D	安山岩碎石	2.30
a	河砂	1.69
b	河砂	3.80
c	碎石砂	4.90



1.2.2-4 骨料吸水率对混凝土抗冻性影响

由图 1.2.2-4 可见, 骨料 Aa、Da 及 Ba 的混凝土 ($W/C = 30\%$), 虽经 300 次冻融循环, 相对动弹模量仍在 100% 上下波动。但骨料 Ca、Db、Bb 及 Cc 的混凝土, 经过 150 次或 200 次冻融之后, 相对动弹模量 E 迅速降低。这与骨料的吸水率有很大关系。因此要注意选择吸水率低的骨料, 特别是细骨料。

日本的《高耐久性钢筋混凝土结构的设计与施工指南 (案) · 同解说》中, 对骨料的品质要求如表 1.2.2-2 所示。

项目 种类	骨料的品质						表 1.2.2-2		
	相对 密度	吸水率 (%)	密实体 积 (%)	黏土块含 量 (%)	冲洗失 重 (%)	有机不 纯物	NaCl 含量 (%)	安定性 (%)	碱活性
粗骨料	>2.5	>2.0	>59	<0.25	<1.0	—	—	<12	无害
细骨料	>2.5	<3.0	—	<1.0	<2.0	不比标准高	<0.02	<10	无害

1.2.3 引气剂的影响

为了提高混凝土抗冻融的性能，常常人为地在混凝土中引入一定量气泡。如图 1.2.3-1 所示。为了引气，在混凝土中主要使用引气剂，在拌合过程中在水泥浆或砂浆中形成细小的、分散的、球状的封闭气孔，以此提高混凝土抗冻融性能，同时也改善工作性能。

引气剂的分子结构有亲水端和疏水端。亲水端指向水分，使水的表面能降低，并由此产生流动性。疏水端指向固体粒子，使粒子间产生排斥的作用，产生微小气泡。如图 1.2.3-2 所示。

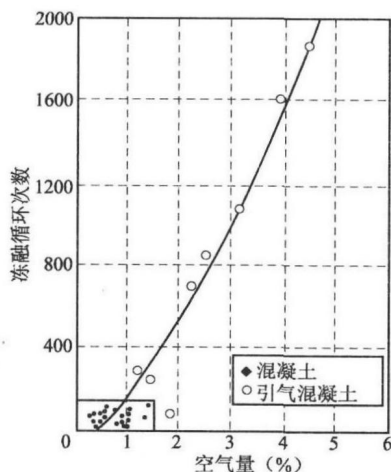


图 1.2.3-1 相对动弹性模量降至 50% 时的
抗冻融次数与含气量关系

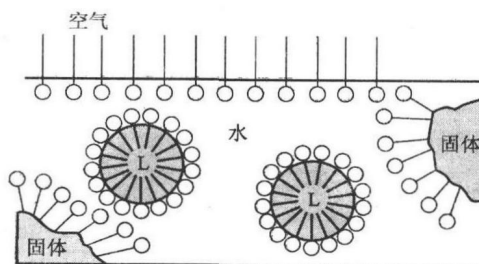


图 1.2.3-2 引气形成的模式图

疏水端拒绝水分子，使水分子间发生排斥，形成小气泡；亲水端朝向水，而疏水端朝向空气。

引气剂的副作用是使混凝土强度降低。一般情况下，引气量 1%，抗压强度降低 1.5~2.0MPa，大部分的引气剂都具有增加流动性的效果，达到相同工作性能条件下，可以适当降低 W/C ，以补偿强度的降低。

人为地在混凝土中引气，使混凝土具有良好的抗冻融性能，主要是气孔断开了冻结水并提供由于水结冰膨胀的补助空间；进一步中断了连通的毛细管孔隙结构，降低了混凝土对液体的吸收。在混凝土中引入气孔含量适中，气孔间距分布也比较小的时候，就能提高抗冻融的效果。

为了评价气泡体系的性能，引入气泡系数：①全含气量 L ；②微小气泡含量 L_{300} ；③气泡间隔系数 AF 。

全含气量 L : 水泥浆中或水泥浆与骨料之间存在的全部含气量。

微小气泡含量 L_{300} : 直径 $10 \sim 300\mu\text{m}$ 的小的环状或近似于球状的气泡量。这对混凝土具有高抗冻融性/抗除冰盐冻融是十分重要的。

气泡间隔系数 AF : 以从水泥浆中的某一点到最近气泡边缘的距离的平均值来表示, 如图 1.2.3-3 所示,

在各种引气剂认可的试验范围中, 必须证明其在新拌混凝土中的含气量为 3.5% 和 4.0%, 气泡间隔系数 $\leq 0.2\text{mm}$, $L_{300} \geq 1.5\%$, 才是可用的。P. K. Mehta 引用 H. Woods 的试验结果指出 A、B、C、D、E 五种引气剂, 能使 1m^3 水泥石中分别产生 24000、49000、55000、170000 和 800000 个气孔。要使上述含气量的混凝土试件出现 0.1% 的膨胀时, 需要 29、39、82、100 和 550 次的冻融循环。这很具体地说明了含气量与抗冻性之间的关系。

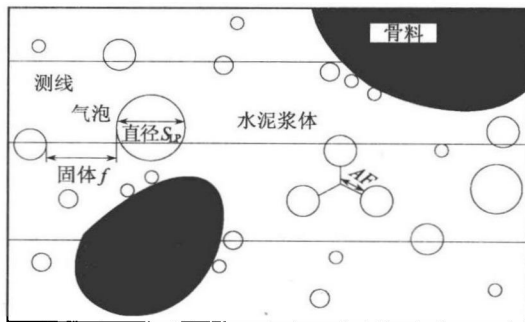


图 1.2.3-3 给予分派指标值、符号的混凝土结构模式图 (Jung、Wirth 等)

$$\text{气泡量 } L_0 = \left[\sum S_{Lp} / (\sum S_{Lp} + \sum f) \right] \times 100$$

AF : 气泡间隔系数; N : 测线上的气泡数

引气剂的引气量还受到许多因素的影响, 如表 1.2.3-1 所示。

对新拌混凝土含气量的重要影响因素

表 1.2.3-1

因素	影响
细骨料	$< 0.125\text{mm}$ 抑制气泡形成 $> 0.125\text{mm}, < 1.0\text{mm}$ 促进气泡形成 $> 1.0\text{mm}$ 抑制气泡形成
粗骨料	球状粒径促进气泡形成
掺合料	火山灰及潜在水硬性材料抑制气泡形成
外加剂	添加化学外加剂促进气泡形成
稠度	软的塑性稠度促进气泡形成
搅拌时间	短 不可能形成气泡 中间 最适宜于气泡形成 长 破坏气泡
强搅拌	强搅拌促进气泡形成
振捣时间	振捣过时的话, 减少气泡量
振捣类型	插入式振捣器、附着式振捣器和振动台都破坏气泡
运输时间	运输时间长气泡减少
温度	新拌混凝土温度升高抑制气泡形成 (图 1.2.3-4)

混凝土温度对气泡量的影响如图 1.2.3-4 所示。

为了不受外部因素的影响, 在混凝土中添加微小中空球。这是用很小弹性的高分子作为外膜、内部充满空气的球。除了能准确地引入空气量外, 因其直径没有离散性, 能便于施工, 这也是其优点。这与形成气泡的 AE 剂不同, 它能有效改善气泡大小, 并使全空气量等于部分空气量 L_{300} , 有效地改善混凝土的抗冻融性能。但是其价格高, 只有在特殊情