

# 混凝土冬期施工手册

王 昇 主 编



黑龙江科技出版社

# 混凝土冬期施工手册

王 昇 主 编

黑龙江科技出版社

混凝土冬期施工手册

王 异 主 编

黑龙江省新华书店发行

黑龙江省林业设计研究院铅印室

787×1092 1/32 印张12.8375 字数327.8千字

1985年12月第一版 1988年10月第二次印刷

印数 00,001—20,000册

统一书号：15217.241 定价2.50元

## 前 言

混凝土冬期施工，是一种实用技术。近年来无论在研究及工程实践方面都有一定的进展。我国寒冷地区比较辽阔，随着四化建设的进行，每年都要进行大量冬期施工，因此，急需向建设者提供一本介绍国内外有关这一领域进展的参考性工具书。本书就是应这种要求而编写的。

全书分为三部分。第一部分介绍混凝土冬期施工的理论，力求反映近年来国内外有关混凝土冬期施工研究的最新成果。

第二部分为混凝土冬期施工方法。鉴于有些方法是卅年代至五十年代流行的，过去一些书籍已经多次做过介绍，所以本书只做些简介，或着重介绍其最新发展；而对有一些方法，例如电热混凝土拌合物的方法，在苏联被认为是最经济有效的方法，而在国内，则从未被系统介绍过，本书对此不厌其详，务使国内同行对这种方法有所瞭解，以便于在我国推广应用；对于采用外加剂施工，则比较详尽地介绍国内外，特别是国内的经验。

第三部分主要介绍国内混凝土冬期施工实践，也是对方法篇的补充。这部分重点选择了一些新的方法及新的经验，推广这些成功的经验，必然会进一步提高我国的混凝土冬期施工水平，降低混凝土冬期施工的成本。

在编写过程中，我们引用了有关文献资料，特别是第三部分，介绍了一些单位公开发表过的宝贵经验，谨致谢意。

# 目 录

## 混凝土冬期施工理论

§1、水泥的水化机理·····	1
§2、水泥及混凝土在负温下的水化·····	7
§3、混凝土早期冻结时的结构损坏·····	23
§4、粗骨料与砂浆间粘着力和混凝土负温 下界面状况·····	43
§5、早期受冻对混凝土强度和变形的影响·····	53
§6、冷冻下混凝土变形的研究·····	60
§7、负温对于不同骨料混凝土强度与结构 形成的作用·····	68

## 混凝土冬期施工方法

§8、混凝土允许受冻强度·····	75
不掺外加剂混凝土的允许受冻强度·····	75
掺外加剂混凝土允许受冻强度·····	76
混凝土的安全养护期·····	77
§9、混凝土冬季施工方法的选择·····	79
施工方法选择原则·····	79
用能最少方法选择·····	81
用工量最少方法选择·····	84
§10、材料加热·····	86
水泥的水化热·····	86
混凝土的热性能·····	89

加热基本原则	91
材料加热的热工计算	91
各种材料的加热方法	93
§11、蓄热法施工	94
蓄热法混凝土冬期施工设计	94
蓄热法的热工计算	99
§12、混凝土蒸汽加热法施工	132
蒸养制度的选择	132
蒸养对混凝土物理—力学性能的影响	135
蒸养对钢筋锈蚀的影响	137
蒸养对混凝土抗冻性的影响	139
蒸养混凝土的抗渗性与抗冻性	145
冬期施工中常用的蒸养设施	147
§13、电加热法施工	152
电极加热法	153
电热器法	169
框架节点的电加热	171
电磁感应加热法	176
注意事项	190
§14、混凝土拌合物的电热方法	194
加热设备	194
加热的工艺参数	201
混凝土拌合物的电阻	213
混凝土拌合物电加热设备的结构和计算	226
电加热混凝土拌合物的生产工艺	240
§15、掺外加剂施工方法	242
掺外加剂负温混凝土施工设计	249

外加剂应用情况 .....	256
<b>混凝土冬期施工实践</b>	
§ 16、采用硫铝酸盐水泥施工 .....	294
硫铝酸盐水泥特性 .....	294
外加剂对硫铝酸盐水泥的作用 .....	296
水灰比和初期受冻对强度的影响 .....	300
早强水泥的耐久性 .....	301
冬季施工中的几个问题 .....	303
在桥梁工程中的应用 .....	307
在框架轻板接头中的应用 .....	312
其他应用 .....	316
§ 17、采用外加剂冬季施工 .....	321
外加剂在大模板现浇混凝土中的应用 .....	321
外加剂在多年冻土地区灌注桩中应用 .....	326
减水剂CRS和硫酸钠复合外加剂的应用 .....	334
三乙醇胺复合早强剂在冬施中的应用 .....	338
外加剂在冬季框架结构施工中的应用 .....	342
§ 18、远红外线在冬季混凝土施工中的应用 .....	350
在大模板混凝土中应用 .....	350
在梁框接头中应用 .....	356
混凝土远红外线内热养护法 .....	360
大模板工程中应用的改进 .....	370
§ 19、采用其他方法的施工经验 .....	378
筒形模用串片干热养护法的应用 .....	378
电热模法在大模板施工中的应用 .....	389
电热毯保温综合养护法的应用 .....	411

# 混凝土冬期施工理论

## § 1 水泥的水化机理

硅酸盐水泥，即波特兰水泥。因为早期生产的水泥加水凝结后的颜色和英国波特兰城建筑岩石颜色相仿，因此又称为：波特兰水泥。

一种物质，从无水状态变成含水状态就叫做水化作用。所谓水泥的水化作用，除了直接和水化合作用外，常常还包括加水分解的作用以及由含水较低的化合物变成含水较高的化合物的作用。硅酸盐水泥是多矿物体系，各矿物的水化反应可能同时进行，互相影响，并且水化产物之间还可能发生二次反应，这就使得水泥水化作用的研究复杂化。所以最好首先分别研究各个熟料矿物的水化与水解过程，然后再全面地讨论整个水泥的水化作用。

从四种主要水泥熟料矿物的净浆试体抗压强度发展的曲线可以看出  $C_3S$  是很好的水硬性材料，但它的烧制温度较高； $\beta-C_2S$  的烧制温度较低，它的早期强度较差，但最终能赶上  $C_3S$ 。水泥的性质是这四种组分的总和。目前的一个课题是如何通过熟料烧制及以后外加材料的掺和改善其早期强度低的弱点，也就是如何提高  $\beta C_2S$  的早期强度。化合物的活性不是决定水硬性胶结材料性能好坏的唯一因素，还要看水化产物的各种性质，如显微结构、形态、溶解度等。 $C_3A$  与水反应很迅速，但反应产物的强度很低，是很差的水硬性胶凝材料矿物。



表1-1列出了典型硅酸盐水泥熟料的理想分子式和粗略百分数

表1-1

硅酸三钙 (阿利特)	$C_3S$	47%
$\beta$ -硅酸二钙 (贝利特)	$C_2S$	33%
铝酸三钙	$C_3A$	11%
含铁相	$C_3AF_2$	9%
	$C_6A_2F$	
方镁石	$MgO$	3%
氧化钙	$CaO$	<1%

熟料中阿利特 ( $C_3S$ ) 约占一半重量, 贝利特  $C_2S$  约有  $\frac{1}{4}$ , 其余主要为  $C_3A$  和含铁相, 还加百分之几的二水石膏。在硅酸盐水泥中的单矿物并不象理想分子式所表示的那样纯, 常夹有不少等量的其他元素。 $C_3S$  是多晶型。最近研究表明,  $C_3A$  相可以在很大的范围内变化。它可以含相当大量的钠和一些硅, 这些元素的取代引起晶体结构的重要变化。

水化水泥的  $x$ -射线研究表明, 水化产物主要是水化硅酸钙、 $Ca(OH)_2$  和水化硫铝铁酸盐。从阿利特净浆和水泥净浆的部分  $x$ -射线衍射图 (横坐标为  $2\theta$  角, 纵坐标为强度。) 得知一年的水化, 反应已完全,  $Ca(OH)_2$  峰很强, 水化硅酸钙的峰非常弱和弥散。水泥的水化产物与阿利特的水化产物大致类似。水化硅酸钙用  $C-S-H$  表示, 字母中的破折号表示其组成不确定, 而且有一定量的铝、硫和碱进入  $C-S-H$ 。水泥浆体中的  $C-S-H$  实际上是无定形的物质。在压蒸的硅酸盐水泥制品中可能存在半晶体的  $C-S-H$  (I)、 $C-S-H$  (II) 和晶体雪硅钙石。法国的 Regourd 应用电子光谱化学分析 (ESCA) 测定了  $C_3S$  浆体颗粒表层

40埃深的化学组成。得知早期的水化产物具有低钙硅比。有人试图用准确的化学式来表示水化硅酸钙，这是不可能的。因为不但C/S比不确定，而且H/S比也是任意的，在化学结合水和物理结合水之间并没有明显的界线。水化高硫铝酸钙 $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ （钙矾石），*AFt*和*AFm*相可能与早期强度及耐久性有很大关系，但对于水泥的一些主要工程性能如最终强度和体积稳定性等，可能并不是很重要的。

对水泥浆体表面化学性质的研究表明，硬化浆体具有固体凝胶性质，这用来解释干缩湿胀，水分运动等性质。表1—2列出了用不同方法测得的水化产物的比面积的结果。用小角度x射线散射法测得的值最大（700米<sup>2</sup>/克），*BET*水吸附法次之（200米<sup>2</sup>/克）。

水泥浆体中水化产物的比面积 表 1—2

---

<i>BET</i> 法用水为吸附质：
200米 <sup>2</sup> 克 <sup>-1</sup> ( <i>Powers, Brunauer</i> )
<i>BET</i> 法用N <sub>2</sub> 为吸附质：
30米 <sup>2</sup> 克 <sup>-1</sup> ( <i>Feldman</i> )
小角度X射线散射法：
700米 <sup>2</sup> 克 <sup>-1</sup> ( <i>Winslow, Diamond</i> )
未反应水泥作对比：
0.3米 <sup>2</sup> 克 <sup>-1</sup> (透气法)

---

*BET*用N<sub>2</sub>吸附法测得的值最低（30米<sup>2</sup>/克）。这些测定值差别如此之大，可能是方法或测定值有错，也可能各种方法所测的不是同一对象。但有一点是可以肯定的，即以上几种方法所得最低值也比未反应的水泥比面积（0.3米<sup>2</sup>/克）高得多，这说明水泥水化之后，产物的比面积大大增加。

研究水化水泥颗粒与水混合后六小时、七天、一年时的情况。水化产物在原颗粒周围生成、增长，最后交织成一片。实际上水化产物是由很细小的颗粒构成的。这些颗粒一部分占据原来无水化合物的空间（有人称内水化产物），另一部分占据原来水所占据的空间（有人称外水化产物）。这些颗粒、孔及孔内的液体所组成的集合体就是凝胶体。凝胶体内的颗粒尺寸悬殊很大，其中包括未反应的残余， $Ca(OH)_2$ 以及主要水化产物即水化硅酸钙的颗粒。

美国的 *Diamond* 根据电子显微镜中所观察到的形态把  $C-S-H$  分为四类。第一类是纤维状或针状粒子，第二类是网络状，有人称之为蜂窝状，还有人说象海草或者象连结在的一的带子，它们分支并连成三维网络；第三类为等大粒子状，这些粒子大小相近，形状接近扁平，约几百埃，第四类或者象第三类，但尺寸更小些，或者是由极小的粒子构成的连续多孔状物质，粒子大小在  $100\text{Å}$  以下。他认为这是在原来无水物所占的空间而生成的物质即所谓的内水化产物。

虽然电子显微镜观察的结果不能完全肯定，但有一点是清楚的，即早期水化产物的形态比后期水化产物更为确定。早期是大颗粒，后期是很小的颗粒。再者，原水泥颗粒所有空间内的产物尺寸小于原来水占有空间内生成物的尺寸。这是很容易理解的，因为水化初期，有更多的空间可供颗粒生长。后来空间减少，颗粒不易生长，离子也不易在其中移动，因而形态也变得不清楚。

对初期反应机理的研究表明，水化初期浆体溶液内的  $[Ca^{++}]$  和放热量随时间而变化。初始反应迅速放热，随后很快停止（或者说反应极慢）其后反应又继续发生，并在数小时后达到最大值，然后又下降。人们把水化初期从反应

停止到继而发生这段时期称为诱导期。广义地说， $C_3S$ 和水泥都有这样的反应现象。对于水泥来说，这种作用可能是由于生成钙矾石引起的。但是 $C_3S$ 水化时也有这两个峰，这表明部分是由 $C-S-H$ 或 $Ca(OH)_2$ 造成的。浆体溶液的钙离子浓度开始增加很快，在诱导期增加缓慢，在诱导期末， $Ca(OH)_2$ 浓度达到过饱和。当反应重新恢复后， $Ca(OH)_2$ 浓度又下降。对于上述初期反应现象，各国水泥工作者提出了自己的假设，下面介绍两种。

英国的Jennings和Pratt根据他们自己用高压电镜所做的工作，提出一种保护膜理论，对水泥和 $C_3S$ 都适用。他们认为，当水泥颗粒与水接触后，首先生成一层水化产物保护膜。此膜使反应减缓即诱导期开始，由于水的进入，水化产物膜与无水物分离，薄膜以内的溶液称内部溶液，其外的溶液称外部溶液。由于内部溶液的浓度高于外部溶液，产生了渗透压力，水被吸入，这样薄膜不断向外推进，钙离子可穿过薄膜而硅酸盐离子只能部分穿过，不如钙离子容易。当外部溶液中的钙离子浓度，可能还有硅酸盐离子浓度足够高时，水化产物会发生核晶作用。此核晶作用可能是 $Ca(OH)_2$ 细小颗粒的结晶，发生在保护膜上，这使薄膜减弱并破裂，诱导期结束。薄膜里边含硅酸盐离子较多的溶液和外边含钙离子较多的溶液发生反应，从而生成 $C-S-H$ 。这个理论能很好解释诱导期结束时外部溶液 $Ca(OH)_2$ 浓度出现过饱和的现象。

Taylor教授综合了Young、Skalny、Jannings和Pratt的看法，提出了自己对早期反应机理的看法。Taylor以 $C_3S$ 水化为例，他认为 $C_3S$ 和水进行反应有二个推力。一是酸碱反应，在 $C_3S$ 中有钙离子、硅酸根离子，还有自由氧离子。

这些氧原子是碱性的，因此有和水中的质子反应的趋势，也就是水中的质子转移到硅酸盐阴离子的氧上，特别是那些自由氧离子上。二是离子在不同程度上都有被水化的趋势，即钙离子和硅酸根离子有和水结合的趋势。 $NaCl$  溶于水中的情况就是这样， $Na$ 离子和 $Cl$ 离子与水分子之间形成很强的键。而它们之间的键被打断了。由水分子向物质表面提供氢离子，为保持电价平衡，钙离子进入溶液，同时由于溶液中失去氢离子，而自动产生了氢氧根离子，这样，原来 $C_3S$ 的表面结构完全破坏，变成完全的无定型。这层表面层含有钙离子、带有氢的硅酸盐阴离子或高度质子化的阴离子以及水分子，是半固体的而不是完全固体的。它们之间主要是靠氢键结合在一起，这表面层就是前面提到的电子光谱化学分析法在头几秒钟看到的低钙硅比的物质。此过程继续进行，水扩散进去，钙离子出来。根据美国Skalny的看法，物质表面带负电，钙离子出来后就固定在其表面，形成双层。这是大概水化开始后一分钟的情况，这时诱导期开始，钙离子被硅酸盐离子钳制住，不易逃出。但过程还在缓慢地进行，钙离子一点一点逃出，水分子不断吸向表面层，这就产生了吸水压力。Taylor认为称吸水压力比渗透压力更为确切。许多凝胶体都由于溶剂分子和凝胶体的分子或离子之间的吸引力而吸收溶剂。最后由于钙离子、氢氧根、硅酸盐离子达到足够高的浓度时， $Ca(OH)_2$ 和 $C-S-H$ 就在表面上发生核晶作用，从而导致诱导期结束。

## § 2 水泥及混凝土在负温下的水化

水泥的正温条件下水化的研究比较充分，在低正温及负温条件下的水化，研究较少。

苏联A·A·贝洛夫在研究液相含量与水泥水化程度关系时，曾涉及水泥在负温度下的强度增长问题，对早期受冻对水泥石结构的影响及达到预期的混凝土物理—力学性质所要采取的措施，进行了探讨。

用物理方法在温度为  $-1^{\circ}\sim -38^{\circ}\text{C}$  范围内，对龄期为 0、3、6、9、12、24、72 小时的混凝土（骨料为石灰石及陶砾），进行混凝土中结冰量测试（图2—1）。当温度为  $-3^{\circ}\text{C}$  时，经 3、6、9 小时冻结后，试件约有 86—89% 的水冻结成冰。当龄期达到 12~24 小时时，含冰量降为 59—80%。当

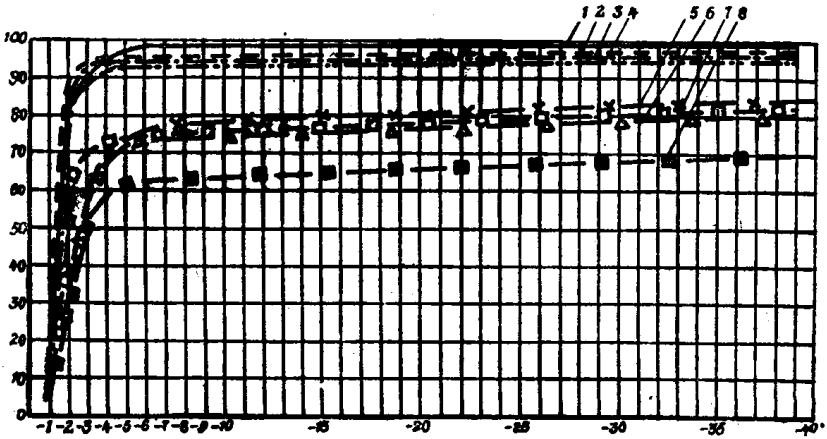


图2—1 硅酸盐水泥含冰量变化曲线

负温为 $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $-10^{\circ}\text{C}$ 经12、24小时的常温硬化，含冰量为2—78%。如令期为0，即成型后立即受冻，含冰量可增至94%。上述数据与鲍威斯，勃拉澳尔特，沙维尔茨基的数据大致相同。

当受冻前有24小时标准养护时，成冰量就要少得多。 $-3^{\circ}\text{C}$ 时，为50、57、70及62%； $-5^{\circ}\text{C}$ 时，62、74、74、74%； $-10^{\circ}\text{C}$ 时，68、75、75、78%； $-38^{\circ}\text{C}$ 时为68、79、80及83%。试验表明，采用轻质骨料比采用石灰石碎石骨料的冻结要快。

在上述温度范围内，冰晶是在直径小于0.1 微米的毛细管中生成的。温度降至 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ 时，成冰量开始减少，这表明混凝土中含冰量与未冻前的令期有关，或者说与水泥的水化程度和水灰比有关。在已硬化的水泥石中大部分水分布在水化硅酸钙凝胶之中。当温度低到 $-40^{\circ}\text{C}$ — $-50^{\circ}\text{C}$ 时，凝胶中的水分也可转化成冰，其含冰率又有增长。低于 $-50^{\circ}\text{C}$ 时超微细孔（ $<50^{\circ}\text{A}$ ）水开始受冻，但已与凝胶稳固结成化学结合水的部分不受冻，因此它不参予相转换过程。

$W/C$ 愈大，毛细管孔隙率与总孔隙率将增大，混凝土的冻害作用亦愈烈。寒冷作用影响程度可取决于总的混凝土含水量、 $W/C$ 、正温下养护时间长短、骨料孔隙率与冻结速度大小等。

发生在混凝土冰冻过程中的结晶、释放热量，使水由液态转换成固态时内部体积出现畸变（水的过冷变化，冰在不同温度下有时膨胀有时缩小）。已受冻结的混凝土融化阶段，温度上升时，可又另有一番情景（此时吸热为主，冰开始体积膨胀，随后随分布水增多，重新发生水化）。但无论

是冰冻或重新融化开始，过程带有滞后特性。这就导致前一情况下可能发生冰块上吸附水分，后一情况下出现冰块酥软，它由毛细微管压力增大产生结构塑性变形所造成。这不同温度下硬化的1:3砂浆试块试验结果早经查明。在+20—70℃在用高精度体积膨胀仪测试的记录也有上述变形反映。当温度低到-2℃、-3℃时觉察到冰块的体积膨胀是由水向冰的方向转化造成的。且发生在较粗的毛细孔中（1000Å），而第二次体积膨胀出现在-6℃—-8℃阶段，其时冰冻发生在较细毛细管中（1000—10000 Å），即孔径为0.1—1微米。以后变化在下降到-30℃低温时试件尺寸或其它方面均正常。但当温度低到-30℃—-40℃时体积变化曲线出现转折，说明又有更细毛细管（<1000 Å）中的水受冻发生膨胀变形，可是作二次或更多次重复降温试验时，出现降温转折点的温度有所降低，且曲线位置又有升高（较之首次冰冻时体积变形更为厉害）。

在更细的毛细管中的水（50—100 Å），由于大量水分乃为密布于胶孔中的水，其冰点更要低至-60℃时出现。以上测定含冰率变化和混凝土受温度变化的变形情况在用超声对受冻混凝土的测试检验中也有反映。值得一提的是直径为0.1—1微米毛细管孔隙中水的冻结应该说对混凝土结构破坏性最大。这样无论是客观上结构破坏或微孔结构的细微变化均可导致对水泥石收缩产生影响。

以上说到的水的冰冻融化过程及其相变换的动态过程规律均对负温下水泥硬化与水化过程机理的认识打开了新的视野。

水泥水化释热及其水化硬固均受总含水量（液相）的多寡影响。对水泥水化程度与速度可取由 $C_3S$ 含量决定的 $x$ 射



线分析作鉴定，或测定其含水量（600℃或1000℃灼烧）、化学分析（必须先作105℃干燥处理）。用差热分析测定 $Ca(OH)_2$ 效应范围内的失重也可得出结论（直到1000℃测出其总失重），或用电镜作研究。这些试验有的用 $2 \times 2 \times 2$ 标准稠度用水量的小试块进行。试块的冰冻采取-2℃、-5℃、-10℃、和-20℃几种类型，受冻前养护令期取3、6、9、12、24和72小时几个标养养生时间。

测定严寒下水泥水化程度可用不同负温温度中放置28天的试块测其结合水拥有量。试块事先粉碎用100%纯酒精在冰箱中萃取水分，部分试块未经破碎在上述令期（7、28天）负温处理后，再在标准条件养生28天或90天作试验，随后试块破碎。三次用纯酒精、两次用乙醚萃取水分，确定水泥水化程度。与此同时对标养试块情况也作了研究。

用于x射线分析和ATA试验的试样应经过用10000孔/厘米<sup>2</sup>筛筛分，而用于化学分析的则仅使用4900孔/厘米<sup>2</sup>筛即可。测600和1000℃灼烧失重时，事先应经105℃干燥称重，得出低温失水情况。

水泥混凝土-2℃时冻结，无论静养时间长短如何，水化仍能相当快地进行。水泥试块在快速受冻28天后，有20% $C_3S$ 水化了，而相应正常标养同令期的试块也只有59.6%和52.5% $C_3S$ 被水化。

试块于-5℃下即刻冻结，一月后，只有7.6%已被水化，若-5℃下冻结前先有一天标养静置，水化物的出现可达17%；而在-10℃和-20℃马上冻结的试块测得水化水泥部分只有1—2%，若-10℃、-20℃冻前先有一天标养，水化物可高达10—11%。当寒冷停止。正温恢复时仍可照样发生水化。