

IC122/08

# 高性能混凝土

冯乃谦 编著

中国建筑工业出版社

TC122/08

# 高性能混凝土

冯乃谦 编著

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书是在总结国内外最前沿的混凝土技术的基础上编写的。主要内容包括：高性能混凝土的历史与发展；高性能混凝土的胶凝材料与骨料；新型高效减水剂；矿物掺合料(超细粉)在高性能混凝土中的技术效应与结构特点；混凝土达到高性能的途径及其断裂力学特性；高性能混凝土的施工性与耐久性；配合比设计；微观结构以及对发展高性能混凝土的展望。

## 高性能混凝土

冯乃谦 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市顺义县燕华印刷厂印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：13 字数：348千字

1996年8月第一版 1996年8月第一次印刷

印数：1—2,700册 定价：23.00元

ISBN 7-112-02834-5

TU·2155(7944)

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

高性能混凝土是一种高耐久性、高强度及高流动性的混凝土，是混凝土技术进入高科技时代的产物。

高性能混凝土的最重要特征是其优异的耐久性。耐久性可达百年以上，甚至可以达到 500 年，是普通混凝土的 3~10 倍。混凝土要达到高的耐久性，首先要降低水灰比，达到高强度，因此，高强混凝土也属于高性能混凝土的范畴。也就是说，高性能混凝土必须是高强混凝土。

混凝土达到高性能最重要的技术手段是使用新型高效减水剂和超细矿物质掺合料(超细粉)。前者能降低混凝土的水灰比、增大坍落度和控制坍落度损失，也即给混凝土赋予高的密实度和优异的施工性能；后者填充胶凝材料的空隙、参予胶凝材料的水化反应，除了提高混凝土的密实度外，还改善混凝土的界面结构，提高混凝土的耐久性与强度。可以说，60 年代高效减水剂的发明与应用，使混凝土技术进入了高强度与高流态的新领域；90 年代的粉体工程，进一步使混凝土进入了高性能的时代。

城市建设、建筑工程、地下及水下工程、海洋开发、宇宙航天与核能工程等方面，都需要大量的高性能混凝土。为了加速混凝土科学技术水平的提高，使混凝土这种主要工程材料在我国经济建设中发挥更大的作用，作者编写了此书，献给我国水泥混凝土的科技工作者及工程技术人员。

国际材料与结构研究和测试实验所联合会(RILEM)的主席 F. H. Wittmann 教授为本书撰写了一章——高性能混凝土应用的潜力与风险；尚需进一步研究；张新华副教授、博士，编写了本书的第十三章；博士研究生丁建彤参加了第十二章的编写。在此，

# 目 录

第一章 概 论.....	1
第一节 问题的提出 .....	1
第二节 何谓高性能混凝土 .....	4
第三节 混凝土如何达到高性能 .....	7
第四节 本书介绍的主要内容 .....	9
第二章 配制高性能混凝土的水泥 .....	12
第一节 高性能混凝土对水泥的选择 .....	12
第二节 球状化水泥 .....	14
第三节 调粒(级配)水泥 .....	29
第四节 活化填料与活化水泥 .....	37
第五节 超细水泥 .....	40
第六节 现状与问题 .....	50
第三章 骨 料 .....	52
第一节 概 述 .....	52
第二节 骨料与水泥浆的粘结强度 .....	53
第三节 骨料的物理性质对混凝土强度的影响 .....	58
第四节 骨料对混凝土抗压强度的影响 .....	60
第五节 骨料对混凝土耐久性的影响 .....	63
第六节 粗骨料的最大粒径 .....	64
第七节 骨料的粒度分布 .....	65
第四章 新型高效减水剂 .....	68
第一节 新型高效减水剂的种类与特性 .....	69
第二节 新型高性能减水剂的作用机理 .....	73
第三节 新型高性能减水剂对高性能混凝土的适应性 .....	76

第四节	接枝共聚物高效减水剂 .....	81
第五章	高性能混凝土中的粉煤灰掺合料 .....	88
第一节	粉煤灰的种类与性质 .....	88
第二节	粉煤灰对水泥混凝土性能的影响 .....	94
第三节	粉煤灰对硬化混凝土耐久性的影响 .....	101
第四节	粉煤灰高性能混凝土的配制 .....	105
第五节	含粉煤灰混凝土的微结构 .....	112
第六章	硅粉在高性能混凝土中的应用 .....	123
第一节	概    述 .....	123
第二节	硅粉的生产 .....	126
第三节	硅粉的物理化学性质 .....	129
第四节	硅粉的填充性及火山灰活性作用 .....	131
第五节	硅粉对混凝土性能的影响 .....	133
第六节	硅粉混凝土的耐久性 .....	145
第七节	硅粉混凝土的微结构 .....	152
第八节	硅粉混凝土的配合、制造与施工 .....	155
第七章	矿渣高性能混凝土 .....	159
第一节	超细矿渣的质量与特性 .....	162
第二节	混凝土配合比与新拌混凝土的性质 .....	166
第三节	硬化混凝土的性能 .....	177
第四节	超细矿渣混凝土的抗化学侵蚀性能 .....	190
第五节	超细矿渣在混凝土工程中的应用 .....	193
第八章	天然沸石在高性能混凝土中的应用 .....	199
第一节	概    述 .....	199
第二节	天然沸石的特性 .....	200
第三节	天然沸石粉对不同水灰比混凝土强度的影响 .....	210
第四节	天然沸石高强度、高性能混凝土 .....	215
第五节	天然沸石超细粉混凝土的微结构 .....	223
第六节	天然沸石粉高性能混凝土的耐久性 .....	233
第九章	高性能混凝土的耐久性 .....	237

第一节	概    述	237
第二节	耐久性的定义	238
第三节	高性能混凝土的渗透性	239
第四节	硫酸盐腐蚀	249
第五节	碱—骨料反应	256
第六节	抗冻融性能	269
第七节	在海水中混凝土的耐久性	275
第八节	高耐磨性混凝土	279
第九节	高温下混凝土的力学性质	285
第十节	混凝土的中性化(碳化)	292
<b>第十章</b>	<b>高性能混凝土的强度与断裂</b>	<b>297</b>
第一节	混凝土的破坏机理	297
第二节	混凝土的微观结构与混凝土的高性能	302
第三节	高性能混凝土断裂性能的研究	308
第四节	分数维理论在混凝土断裂研究中的应用	311
第五节	混凝土断裂能尺寸效应	318
第六节	混凝土微裂纹区测定与研究	326
第七节	组成材料对混凝土断裂能的影响	340
第八节	总结——高性能混凝土的结构、强度与断裂特性的关系	346
<b>第十一章</b>	<b>新拌混凝土的工作性能</b>	<b>348</b>
第一节	高性能混凝土拌合物的粘性	348
第二节	高性能混凝土的粘性与施工性能	350
第三节	流变学参数的测定方法	354
第四节	高性能混凝土的可泵性	359
<b>第十二章</b>	<b>高性能混凝土的配合比设计</b>	<b>361</b>
第一节	高性能混凝土配合比设计的要求	365
第二节	高性能混凝土各组成材料用量的确定	365
第三节	高性能混凝土的试配与配合比调整	372
第四节	高性能混凝土配合比实例	374

第十三章	高性能混凝土的微观结构·····	379
第一节	引言·····	379
第二节	描述混凝土微观结构的模型·····	382
第三节	孔系·····	388
第四节	水泥浆体——集料界面结构·····	390
第五节	几种被广泛应用于实践中的高性能混凝土 结构的具体分析·····	392
第六节	小结·····	398
第十四章	高性能混凝土应用的潜力与风险： 尚需进一步研究·····	399
参考文献	·····	402



# 第一章 概 论

高性能混凝土就是具有优异耐久性的混凝土。其主要特点是高的强度、高的抗渗性、高的工作性能与体积稳定性。

## 第一节 问题的提出

### 一、混凝土技术进入了高科技的时代

过去一般都认为混凝土是一种经验配制的材料。从原材料的选择、配制工艺到施工应用都比较简单。但从70年代末期，混凝土技术已有很大的进展，混凝土所达到的强度已远远超出了工程所要求的范围。混凝土技术已进入了高科技的领域。其表现为：

1. 在原材料方面，除了常用的水泥以外，新出现了球状水泥，调粒水泥，活化水泥等。这些水泥的标准稠度用水量低，在水胶比相同的情况下，比普通水泥的流动性大；如果流动性相同，这些新型水泥可以减少用水量，降低水灰比，提高强度。利用矿渣、粉煤灰、天然沸石等制造的超细粉，以及硅粉等，对改善与提高混凝土的性能起着重要的作用，成为高性能混凝土不可缺的组分。日本近两年新出现的高性能 AE 减水剂，除了高效减水外，还能控制混凝土坍落度损失。这为高性能混凝土的发展提供了一种关键性的材料。使混凝土的性能设计和控制达到了更高的水平。

在日本，研制出了耐久性达500年以上的混凝土。在水灰比0.50的普通混凝土中，掺入乙二醇醚衍生物及氨基醇衍生物，混

凝土可达超高耐久性。其干燥收缩约为普通混凝土的 50%~60%；能控制碳化发展速度，约为普通混凝土的 1/3。可以防止钢筋锈蚀。密实度高，Cl<sup>-</sup> 渗透速度仅为普通混凝土的 1/4。这种混凝土具有优异的耐酸性，能有效地控制盐酸、硝酸对混凝土的渗透。

2. 在混凝土的施工技术方面，与 50 年代的截然不同。各种新型搅拌设备、原材料的检验与监测设备、计算机的应用等高新技术，很容易得到均匀的多组分的混凝土拌合物。并根据新拌混凝土的检测，可以准确的预测混凝土 28d 的强度。更重要的是混凝土拌合物可以达到高流态，而且可以使混凝土在搅拌、运输与施工过程中坍塌度基本上无损失，泵送后的混凝土可以自流平与自密实。这样的混凝土施工，完全可以保证质量，不会像 50 年代的干硬、半干硬性混凝土，容易产生蜂窝、狗洞等质量事故。

以上情况说明混凝土技术已取得了很大的进展，能根据选择的原材料，设计并预测混凝土的性能。也就是说，高性能混凝土可以按照材料科学的方法，设计并施工。

## 二、混凝土在耐久性方面已出现了很多问题

随着建设事业的发展，混凝土材料在工程中获得了更加广泛的应用。许多专家学者预言，21 世纪混凝土仍为主要的建筑材料。

一般情况下，钢筋混凝土结构设计者往往只对混凝土的强度特别感兴趣。但是，很多工程的钢筋混凝土结构，往往会发生过早破坏，其原因不是由于强度，而是由于耐久性不足。这使很多设计者意识到耐久性的重要。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。乌克兰境内的切尔诺贝利核电站的泄漏，造成了大面积的放射性污染，生态环境遭受了严重的破坏。1983 年日本的小林一辅教授，在 NHK 电视台的讲话中，明确的指出：当前，日本混凝土的主要问题是耐久性问题，而耐久性中的主要问题是碱—骨料反应问

题。在日本海沿岸，许多港湾建筑、桥梁等，建成后不到 10 年的时间，混凝土表面开裂、剥落，钢筋锈蚀外露。主要原因是由于碱—骨料反应。在中国，北京的三元立交桥桥墩，建成后不到两年，个别地方发生“人字形”的裂纹，有人认为是碱—骨料反应。更严重的是在 1987 年左右，我国某处的钢筋混凝土大水塔突然毁坏，水流象山洪暴发一样的冲下，造成人员很大的伤亡和建筑设施等严重毁坏。这是由于渗漏造成钢筋锈蚀，混凝土断裂而毁坏。

种种工程事故，使人们意识到，在结构设计时，对使用材料的耐久性应象力学性质一样予以仔细的考虑。

### 三、特种结构中，混凝土将获得越来越多的应用

在未来的几十年里，海底隧道，海上采油平台与堤坝，污水管道，核反应堆外壳，有害化学物的容器等恶劣环境下的结构物，对混凝土要求的使用寿命将为几百年，而不是普通混凝土要求的 40~50 年，对混凝土性能的要求更高。

综上所述，在很多特种结构中，混凝土是一种必不可少的建筑材料；而对这些结构工程来说，混凝土的耐久性与长期性能显得更加重要，甚至比强度都重要。

混凝土既然进入了高科技行列，能按材料科学的观点与方法，根据要求设计其性能；又有客观工程要求；因此，高性能混凝土就自然而然地提出来了。

混凝土技术的发展，归纳起来，可以说由初期的大流动性混凝土；发展到塑性混凝土；二次大战后，由于机械设备的发 展，提高混凝土的质量，发展了半干硬性与干硬性混凝土；后来由于劳动力的贵昂，新的高效减水剂的出现，发展了流态混凝土；直至今天，由于混凝土技术水平的提高及工程的特种性能要求，又发展为高强度、高性能混凝土。核心问题都是围绕着混凝土的质量与施工水平的提高而发展。

## 第二节 何谓高性能混凝土 (High Performance Concrete 简称为 HPC)

1990年5月在马里兰州 Gaithersburg 城, 由美国 NIST 和 ACI 主办的讨论会上, HPC 定义为具有所要求的性能和匀质性的混凝土, 这些性能包括: 易于浇注、捣实而不离析; 高超的、能长期保持的力学性能; 早期强度高、韧性高和体积稳定性好; 在恶劣的使用条件下寿命长。也就是说 HPC 要求高的强度、高的流动性与优异的耐久性。

但是, 不同的学派, 根据实际工程的要求, 对 HPC 的看法有所不同:

### 一、Mehta 为代表的美、加学派的观点

他们强调的是硬化后混凝土的性能。Mehta 认为对于近来建造的暴露于腐蚀性环境下的混凝土结构物, 其受腐蚀的速率之快表明: 抗压强度指标已不足以保证其长期耐久性, 而耐久性应当放在 HPC 的首位。Mehta 还认为 HPC 应该满足下列规定:

1. 抗渗性: 大多数化学侵蚀都是在水分与有害离子渗透进入的条件下产生的, 混凝土的抗渗性是防止化学侵蚀的第一道防线。混凝土的抗渗性是以美国的 AASHTO277 方法为标准, 在该方法中, 氯离子的渗透速度以“库伦”为单位, 如果某种混凝土进行 6 小时渗透试验后, 通过的电量  $\leq 500$  库伦, 则认为该混凝土是不透水的。

2. 尺寸稳定性: 尺寸稳定性良好的混凝土的主要特征是高弹性模量、低干燥收缩、徐变及温度应变率小。尺寸稳定性好的混凝土可以降低预应力损失, 降低混凝土的原生裂纹。为了获得良好尺寸稳定性, 需要限制水泥用量, 使用高弹模、高强度的粗骨料。经验表明, 选用适当的原材料, 配合比适当, 混凝土 90d 龄期的干缩值可以降低到 0.04% 以下。

## 二、以冈村为代表的一部分日本学派的观点

这一学派认为高流态、免振自密实的混凝土就是高性能混凝土。也就是说他们强调的是新拌混凝土的性质，其理由是：1. 混凝土技术熟练的工人越来越少，自密实的混凝土用不着什么技术都可以保证混凝土的施工质量，也可以保证施工速度；2. 可以有效地减少混凝土施工时的环境噪音。

该学派为了获得免振自密实的 HPC，又能保证混凝硬化后的性能，对原材料采用了严格的控制，特别注重砂、石的含水量的控制。混凝土搅拌时，粗、细骨料先进入预处理器，使其含水量稳定在某一控制值，然后再进入搅拌机。这样新拌混凝土的水灰比不会产生波动，从而保证了硬化混凝土的性能。为了自流平、自密实，混凝土组成材料中粗骨料用量也相对降低，砂率增大，胶凝材料也增多；而且还掺入膨胀剂，以补偿混凝土硬化后的收缩。这种 HPC 已用于日本明石大桥的混凝土工程。

## 三、日本大多数学者及工业界的观点

他们强调的仍然是高强、超高强与高流态混凝土。因为高性能首先必须具有高强度。

日本建设省综合技术开发计划“钢筋混凝土结构建筑物的超轻量与超高层技术的开发”（简称新 RC 总计划），从 1988 年开始为期 5 年的工作，获得了大量的科研成果，并在工程中获得了试验验证与工程应用，受到了人们的普遍关注。

在新 RC 的总计划中，把混凝土的高强与超高强作为目标，同时与钢筋的高强度相匹配，把研究的对象分成四个区，如图 1-2-1 所示。

日本许多商品混凝土公司、从事生产与开发高性能减水剂的公司，均纷纷从事高强度、高流态混凝土的开发研究。如日本三菱材料(株)开发了一种超高强、耐磨的混凝土，使用硅粉、高性能减水剂、特殊的天然骨料，成型后蒸养 16h 脱模，混凝土脱模

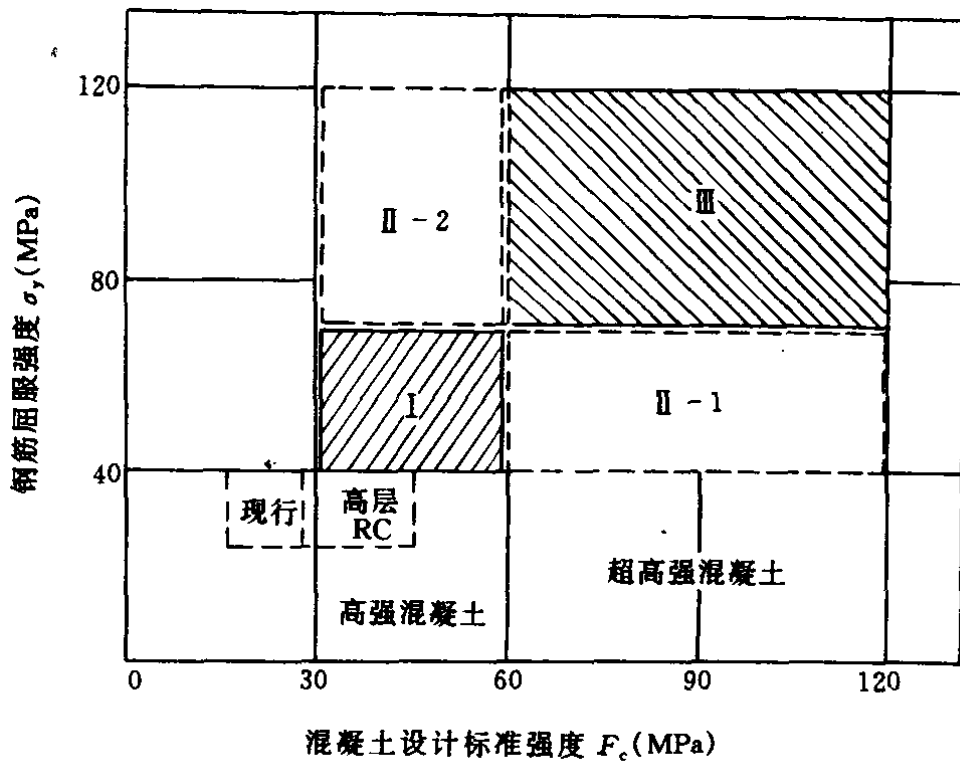


图 1-2-1 材料强度与研究开发区关系

- 区域 I：用高强材料的 RC 结构
- 区域 I-1：超高强混凝土的 RC 结构
- 区域 I-2：超高强钢筋的 RC 结构
- 区域 III：超高强材料的 RC 结构

强度达 140MPa。按照 ASTM C666 方法进行抗冻试验，重量损失小于 0.2%，耐久性系数 0.97；此外，耐磨耗性明显地提高，按雷氏磨耗试验法测定，耐磨性比过去的混凝土提高 10 倍。这是超高强混凝土，也是高性能混凝土。

#### 四、本书作者的观点

高性能混凝土必须是高强度，或者说，高强混凝土属于高性能混凝土的范畴；高性能混凝土必须是流动性好的、可泵性好的混凝土，以保证施工的密实性；高性能混凝土一般需要控制坍落度损失，以保证施工要求的工作度；耐久性是高性能混凝土的最重要技术指标，但混凝土达到高强度后，很自然会具有高性能，也即具有高的耐久性。当然耐久性还要与使用的环境相结合，采取相应的对策，仅仅是高强度是不够的。

作者把国内外高性能混凝土的技术途径归纳如下：

1. 为了达到高强度与高耐久性，混凝土的水灰比一般要在 0.38 以下。这样可使水泥石具有足够的密实度。

2. 高性能减水剂是降低混凝土中水灰比的必须材料，也是高性能混凝土不可缺的组分。对高性能减水剂除了高的减水率以外，还希望能具有控制坍落度损失的功能。

3. 矿物质超细粉是高性能混凝土的功能组分之一。其可以填充水泥的空隙，在相同的水胶比下，比对比的基准水泥浆能提高流动性，硬化后也能提高强度。更重要的是改善混凝土中水泥石与骨料的界面结构，使混凝土的强度、抗渗性与耐久性均得到提高。常用的矿物质超细粉，除了硅粉以外，还有超细矿渣、分级粉煤灰、天然沸石与石灰石超细粉等。硅粉的细度很大，20 万  $\text{cm}^2/\text{g}$ ；矿渣及天然沸石、石灰石、磨细粉煤灰等也要求比表面积达  $8000\sim 10000\text{cm}^2/\text{g}$ ，才能具有比较好的功能。

对于水泥，在我国除了硅酸盐 525 号以外，作者首推洛阳生产的低热硅酸盐 525 号水泥，其特点是  $\text{C}_3\text{A}$  含量低，高效减水剂能充分发挥作用，当高效减水剂与硅酸盐水泥具有相同的掺量时，坍落度明显增大。作者的研究证明，采用这种水泥， $W/C=26\%$ ，外掺萘系高效减水剂  $1.2\%\sim 1.4\%$ ，坍落度仍可达 22cm。这对配制高性能混凝土相当有利。

骨料的质量对高性能混凝土也是十分重要。国际上希望粗骨料的  $D_{\max}$  不超过 20mm，有的认为粗骨料的粒径应在 10mm 以下。作者对 C70 混凝土的断裂韧性测试，粗骨料的  $D_{\max}$  不超过 25mm 时，其  $k_{1c}$  值不会降低。建议采用  $D_{\max}\leq 25\text{mm}$  的粗骨料配制高性能混凝土。并建议用质量系数综合评价骨料的质量，根据质量系数选择骨料。

### 第三节 混凝土如何达到高性能

综上所述，混凝土要获得高性能，其主要的技术途径可归纳如图 1-3-1 所示。

正确选择 原材料	合理的 工艺参数	施工工艺 选择与控制	HPC
硅酸盐水泥 (包括中热硅酸盐 水泥、球状水泥、调 粒水泥、活化水泥) 优质骨料 超细矿物质掺料 新型高效减水剂	水灰比 $<0.40$ 粗骨料体积含量 $0.4\text{m}^3$ 左右、 $D_{\max}\leq$ $25\text{mm}$ 砂率 $34\%\sim 39\%$ 胶凝材料用量 $500\sim 600\text{kg}$ 新型高效减水剂 $0.8\%\sim 1.4\%$	强制式搅拌机, 泵 送施工, 高频振动, 坍落度损失控制混 凝土养护剂养护	密实的水泥石及合 理的孔结构; 界面 过渡区的改善(解 决 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在过渡 区富集与定向排 列)体积稳定性, 高 强、高耐久性

图 1-3-1 HPC 的技术途径

## 一、正确选择原材料

根据工程实际的要求及所处的环境, 确定原材料的品种与质量是很重要的。例如海洋工程的 HPC, 要求抗  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等渗透与腐蚀, 在这种情况下, 胶凝材料掺入超细矿渣最为有效。为了抑制碱骨料反应, 混凝土中的硅粉、天然沸石超细粉的掺量要在  $15\%\sim 20\%$  左右; 或者严格的控制水泥中的含碱量。对于优质骨料, 一般情况下可选用石灰石碎石, 但其粒径、粒形、级配以及杂质含量等必须严格控制, 特别是其压碎指标必须在国家规定范围内。必须选用高效减水剂, 而且  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的含量要低。不宜用木钙来配制高性能混凝土, 因对混凝土的强度影响大。

## 二、合理的工艺参数

选择合理工艺参数的主要依据是耐久性、流动性与强度要求。根据这些要求确定原材料的数量与质量。HPC 组成材料的数量比例与普通混凝土明显的不同, 胶凝材料用量偏高, 砂率偏高, 粗骨料的含量相对降低, 水灰比要低, 高效减水剂掺量比较大, 必须有一定的超细矿物质掺合料。图 1-3-1 所示的工艺参数是比较



成熟、合理的参数。

### 三、施工工艺的控制

HPC 施工工艺中要解决的主要问题是混凝土拌合物的高粘性与坍落度损失。水灰比低、胶凝材料含量高，粘性大，流动慢。因此希望坍落度大；一般希望坍落度 18cm 以上，且在 90min 内无坍落度损失。这样便于泵送施工。HPC 需要良好的养护条件，拆模后喷涂养护剂，比浇水养护的效果更好。

### 四、HPC 的性能

从组成材料→配合参数→施工工艺→HPC 的全过程，都与 HPC 的性能有关。在保证密实成型的条件下，HPC 的性能取决于其组成材料的质量与数量比例。其中尽量降低水灰比以及一定的超细粉含量是很重要的。因为这两方面都与混凝土的密实度、水泥石的孔隙体积、孔结构及界面结构有关。而这两方面也是混凝土达到高性能的关键。

## 第四节 本书介绍的主要内容

本书的主要目的是告诉读者如何配制出 HPC，并从微观结构角度分析与了解 HPC 的特性。围绕这一目的，作者在本书中将介绍以下的主要内容：

### 第一部分 HPC 的组成材料

1. 高性能混凝土的水泥。一般来说，高性能混凝土必须使用 525 号以上的硅酸盐水泥，或中热硅酸盐水泥。但是，为了混凝土的高强化与高性能化，在国外出现了球状水泥，调粒水泥以及活化水泥等。这些新品种水泥的一个很大的特点是，达到相同的标准稠度下，需水量很低，混凝土的  $W/E \leq 17\%$  时，坍落度仍达 20cm 以上。这是混凝土技术新进展的一个方面。