

高性能混凝土
——**材料特性与设计**
High Performance Concrete
——**Material Properties and Design**

F. H. Wittmann 编著
〔德〕**P. Schwesinger**
冯乃谦 等 译

中国铁道出版社

1998年·北京

高性能混凝土
——**材料特性与设计**
High Performance Concrete
——**Material Properties and Design**

F. H. Wittmann 编著
〔德〕**P. Schwesinger**
冯乃谦 等 译

中国铁道出版社

1998年·北京

(京)新登字 063 号

北京市版权局著作权合同登记图字 01—96—0842 号

内 容 简 介

高性能混凝土是近年来发展起来的一种新型混凝土,它不仅具有很高的强度,而且还有很高的耐久性。本书是欧洲国际材料与试验室联合会主席 Wittmann 博士主编的介绍各类高性能混凝土在各种情况下的材料特性、材料配比和设计方法的一部专著。书中内容科学、实用、新颖,对从事建筑材料、土木工程设计、研究和施工的人员有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

高性能混凝土:材料特性与设计/(德)威特曼(Wittmann, F. H. W.), (德)施瓦辛格(Schwesinger, P.)著;冯乃谦等译. —北京:中国铁道出版社, 1997. 6
ISBN 7-113-02739-3

I. 高… I. ①威…②施…③冯… III. 混凝土, 高性能-基本知识 N. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 16372 号

中国铁道出版社出版发行

(100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

中国铁道出版社印刷厂印 各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.75 字数: 362 千字

1998 年 2 月第 1 版 第 1 次印刷

印数: 1—1500 册

ISBN 7-113-02739-3/TU · 558 定价: 26.50 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前言

早在 80 年代中期,洛桑的瑞士联邦工学院建筑材料与结构试验室就与魏玛建筑大学土木工程系达成协议,共同研究高温对混凝土性能的影响。那时,赫尔辛基法律首次为前民主德国的大学和西欧一些国家的相应院校间建立双边关系提供便利条件。

按照魏玛的提议,合作以试验工作为基础,从高温和高湿条件下的混凝土徐变领域展开。因为在前民主德国及西欧一些国家都没有进行过这方面的研究。当我们在魏玛努力寻求新的试验方法时,讨论的机会少,尤其是在所研究课题的基础理论方面的讨论机会少,显得极为不利。

那时,Wittmann 教授和他的一些同事正从事依据温度和含水量模拟混凝土性能的工作(三水平方法)。这样,为开展富有成效的思想交流奠定了基础,并创造了有利条件。Wittmann 教授对魏玛提议有着非常深刻的理解,这使得我们建立起了关系。

在合作的早期,我们就有组织该课题研讨会的想法。至少是潜意识地存在这种想法,为东欧和西欧科学家间的交流提供条件,而这对东欧的同事将非常方便。于 1986 年 9 月 11 日,第一届魏玛研讨会召开,会议的题目为“高温影响下的混凝土徐变”。在与会者的交谈中,许多人表示,希望这样的研讨会将来继续组织,以便彼此交流第一手资料和经验。继这第一届研讨会之后,第二届国际研讨会题目为“高热、高湿条件下混凝土的力学性能”,会期两天。第三届研讨会于 1992 年 10 月 8 日~9 日召开,题目为“高热、高湿梯度条件下混凝土的性能”。

在第二届研讨会期间,我们发现,不仅要关注所讨论题目的试验及理论方面的内容,还应考虑科学家和结构工程师对其中间学科的思想交换,并应将其作为研讨会的部分内容。这一点,Wittmann 教授在第二届研讨会的闭幕词中以“界面”的概念阐述得很清楚。他是这样叙述东欧和西欧同行间的状况的“在地理上魏玛几乎处于欧洲的中心。但长期以来,在我们多数人的想象中它很远,远得几乎不可接近。现在看来,魏玛是个最适合的拆除壁垒的地方。那些多年来形成的壁垒,隔开了人们、隔开了思想。”无疑,他在表示一种愿望,希望世界政策会改变。

但从对第三届研讨会的反应清楚地看出,即使东西部间的政治壁垒不复存在,要参加这类会议仍然有一些重要的影响因素。非常遗憾,由于财政上的原因,当时许多东欧的同行已经不可能再参加了。

本研讨会一般比较注重观察到的现象和所涉及的物理和化学的作用机理。这样,第四届会议的题目“高性能混凝土:材料性能与配合比设计”似乎更为重要。同时,该会议又明显有别于其它一些近期召开的有关高性能混凝土方面的会议。

与前几届会议的论文都发表在魏玛建筑大学科学杂志上不同,这第四届会议的论文首次以独立的会议文集形式出版,以便没有参加这次会议的专家更容易获得主要研究结果。

P. Schwesinger

1995 年 8 月于魏玛

(赵铁军 译)

Preface for the Chinese Edition

The term high performance in context with concrete is often used in a restrictive way. Concrete with a compressive strength higher than 60 N/mm^2 is often referred to as high performance concrete. This narrow view and unprecise use of technical terms has at least two major disadvantages. It is very likely to hide in the first place the real potential to develop high performance concretes for a variety of applications in which high strength may be of no or of little interest. In addition, misuse of the term high performance concrete may create the impression that high strength concrete performs generally better than normal concrete and this is by no means true.

It has been widely accepted that many properties of concrete can be related in one way or another to its compressive strength. The only reason for this oversimplification in characterizing a complex material is the fact that compressive strength can be determined easily and cheaply and that required values can be achieved very easily. When one adopts the crude prediction rules to estimate the behaviour of high strength concrete the discrepancy with respect to the real behaviour can be dramatic. If this is already true for the elastic modulus it becomes even more evident for drying and shrinkage. Normal concrete dries very slowly and, as a consequence, drying shrinkage develops over many years in elements with conventional dimensions. High strength concrete in many cases is very dense and because of the low W/C ratio, the drying process is therefore slowed down tremendously. Drying shrinkage, in contrast, may be 0.3‰ and more after a curing period of not more than 28 days. This phenomenon is due to endogenous drying. Numerous cases are known where the rapid shrinkage of high strength concrete has originated serious early cracking of concrete structures.

It is also known from the early applications of high strength concrete some thirty years ago that this material is more brittle than normal concrete. These are just a few examples to underline the necessity for careful redefinition of design rules for high strength concrete. If this is not done properly misapplications of an interesting material and serious damage will be unavoidable.

In this volume, all contributions to a workshop held at Bauhaus University in Weimar, Germany, are compiled. This was a first attempt to bring together materials and structural engineers in order to discuss the experimental data so far available and ways to take the specific properties of high strength concrete into consideration by simple design rules. It is a first step and it is hoped that it will help to provide a safe basis for a wider use of high strength concrete in the near future.

October 1997


F.H. Wittmann

中文版前言

(译文)

混凝土科学中“高性能”这一术语的应用往往有一定的局限性。当混凝土抗压强度高于60MPa时,便被统称为高性能混凝土。这种不准确和狭窄地使用术语可带来两方面的缺陷。首先,阻碍了广泛发展应用高性能混凝土的潜力,因为强度在某些条件下是次要的或根本不需要考虑的因素;其次,还可使人们有种错觉,即高强度混凝土通常情况下其性能优于普通混凝土,而实践证明并非如此。

事实上混凝土的许多性能与其抗压强度有一定的相关性,而这一概念已被普遍接受。用这种过份简化的关系来表征一种复杂的材料,其原因仅在于抗压强度的测试方法既简便又便宜。如果采用这种粗糙的预算规则来估价高性能混凝土的行为,例如弹性模量,与实际会有出入。若对比干缩行为,其差异会更加明显。由于普通混凝土干燥十分缓慢,因此在常规尺寸的构件中,干缩进程需要很多年。高强度混凝土由于其结构较密实,水灰比又低,故其干燥过程要大幅度降低。反常的是,其干缩值在养护期28d内便可达到,甚至会超过0.3%。产生这一现象的原因是“内源(内生)干燥”。有很多实例示出高强度混凝土因快速干燥而导致混凝土结构严重的早期开裂。大约30年前在高强度混凝土的早期应用中,人们已发现其脆性比普通混凝土大。综上所述,很有必要在设计规范中认真谨慎地定义高强度混凝土,以避免误用材料所造成的损失。

本书编纂了在德国 Weimar Bauhaus 大学举行的专题讨论会上宣读的所有论文。由材料和结构专家一起探讨迄今为止所得到的有关数据,试图解决如何在简单的设计规范中囊括高强度混凝土的特殊性能。但愿这一努力能够帮助将来更广泛应用高强度混凝土提供可靠依据。

F. H. Wittmann

1997年10月

(张新华译)

目 录

第一章 水化热及温度裂缝	1
水灰比、高效减水剂及硅粉对高性能混凝土的水化热和强度发展的影响	1
缓凝剂对高强度混凝土早期热裂缝的影响	11
第二章 湿度迁移、干燥、收缩与徐变	20
添加剂和掺合料对硬化水泥浆的收缩、湿度迁移以及失水的影响.....	20
在蒸发温度下,普通混凝土中和高性能混凝土中湿度行为的模拟.....	25
高强混凝土的表面裂缝	31
普通混凝土与高性能混凝土的收缩和开裂	44
实验基础上高性能混凝土强度、徐变、收缩性能的描述	54
高性能混凝土的泊松比	63
高性能混凝土的徐变性能及其预测	72
高强混凝土的徐变数据	83
第三章 抗化学侵蚀特性及抗热特性	90
高性能混凝土的抗化学侵蚀特性	90
掺矿渣和硅粉的高性能混凝土强度及抗冻性	99
高性能混凝土的抗冻性与抗除冰盐侵蚀性.....	106
高强度混凝土的高温性能与爆裂行为.....	113
高温下高强度混凝土的力学性能.....	123
第四章 纤维增强混凝土	135
硅粉对高性能钢纤维增强混凝土力学特性的影响.....	135
低含量碳纤维增强水泥砂浆的微结构和力学性能.....	143
第五章 结构构件	151
用高强度混凝土制造的预应力梁的强度与韧性特征.....	151
确定高强度混凝土预制板断裂状态的有利条件.....	158

第六章 设计..... 168

 在应力-应变曲线图上对受压状态下高强度混凝土进行钢纤维效应检验 168

 关于高性能混凝土结构现行设计规范拓展的几个方面..... 178

 由材料对设计的重要性看材料研究与结构构件研究的结合..... 189

附录 参考文献摘要(1993~1995)..... 199

第一章 水化热及温度裂缝

水灰比、高效减水剂及硅粉对高性能混凝土的水化热和强度发展的影响

加拿大 Calgary 大学土木工程系 W. H. Dilger 和 C. Wang

(赵铁军 译)

[摘要] 与普通混凝土(NSC)比较,高性能混凝土(HPC)中通常水胶比很低、高效减水剂用量大、以及使用硅粉。由于它们都不同程度地影响水泥水化,因此HPC的水化热和强度发展与NSC的有所不同。本文就这方面内容作一文献综述。

从文献中发现有这样的总趋势:当降低水胶比时,总水化热降低,而早期相对强度增长较快。高效减水剂通常推迟水化进程,但会使水化峰值速度增加。硅粉会明显提高混凝土的强度,参与早期的水化反应,使放热速度增大;另一方面,与纯水泥混凝土比较,加硅粉混凝土的总水化热似乎较低,早期相对强度增长也较低。

1 引言

抗压强度高达 120MPa 的 HPC,有时也叫高强混凝土(HSC),近几年在世界各地已被用于多种结构。HPC 的成功主要得益于应用高效减水剂(也称超塑化剂)和硅粉。与 NSC 比较, HPC 对骨料及质量控制措施要求虽然较高,它主要的特征却是低水胶比、高掺量高效减水剂,以及通常使用硅粉。

由于其材料组成不同,HPC 的性能,尤其是如水化热及强度发展等早期性能,会与 NSC 有明显的不同。例如,低水胶比使最终水化率及总水化热降低;硅粉使水化速度加快及提高早期水化放热量。HPC 的另一特征是,由于水胶比低水泥水化结束早。

本文将研究水胶比、硅粉及高效减水剂对 HPC 水化热和强度发展的影响。需要时也将讨论这些参数的数学模型。当然,其它的化学及矿物掺合料如粉煤灰等,也会影响硬化 HPC 的性能,但它们的作用在 HPC 和 NSC 中有些类似,因此不属于这项研究的内容。

必须指出,从 NSC 到 HPC 的材料性能变化是个渐进的过程,而不是在某处的突变。因此不能将 HPC 和 NSC 当作两种完全不同的材料对待。本文所讨论的 HPC 和 NSC,如果非要区别开来的话,其界限定为抗压强度 50MPa,之上为 HPC,之下为 NSC。

由于近年来 HPC 生产和应用的发展非常迅速,以及缺乏系统的试验数据,对本课题的多数讨论都是定性而不是定量的。同时,由于水胶比、高效减水剂及硅粉的作用效果相互影响,因此它们对混凝土性能的影响也难于分别评价。

2 水灰比的影响

由于水胶比是混凝土强度最重要的影响因素,因此为了获得高强度 HPC 中自然使用非常低的水胶比。HPC 中的水胶比通常在 0.2~0.4 之间,这样低的水胶比只有在使用高效减水剂时才能实现。

由于水泥或火山灰质材料水化时需要水,故最大水化率受水胶比影响。理论上讲,水泥完全水化需要最小水胶比约为 0.4。然而,水泥颗粒即使在水中也不能达到完全水化。在 HPC 中,水胶比可低至 0.2,可见其中水泥的水化至少后期是停止了。

2.1 水灰比对水化热的影响

Wang 和 Dilger(1995)曾试图估算混凝土的水胶比对其最终总水化放热量及水化速度的影响。他们研究表明,对于低水灰比的 HPC,其单位质量水泥的最终水化放热量远远低于 NSC 的相应值(见图 1-1)。随着水化进程的发展,低水灰比的水泥水化速度也迅速降低(图 1-2)。

以前,人们总认为大体积混凝土的温升直接与水泥用量成正比,而忽略了水灰比的影响。例如,AC1207(1986)建议,在 3m 厚的混凝土板中最大温升取水泥 100kg/m³ 为 13.1℃;Freedman (1970) 的结论是,HPC 的温升 100kg/m³ 水泥为 10℃~13.5℃。然而,Cook 等(1992)在边长为 1m 的正方形断面柱中的试验结果表明,对于水泥用量分别为 470kg/m³ (水灰比 0.31)和 540kg/m³ (水灰比 0.25)的 HPC,它们的最大温升完全相同。

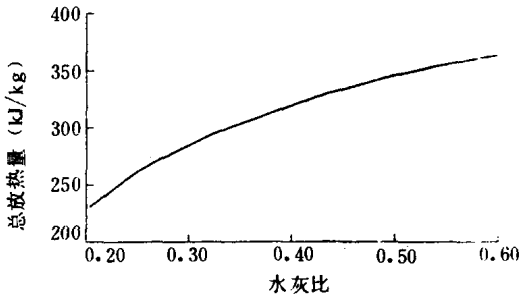


图 1-1 水灰比对总水化热的影响 (Wang 和 Dilger1995)

正如 Wang 和 Dilger(1995)指出的那样:忽视水灰比的影响,会导致过大估计 HPC 中总的水化放热量。他们提出如下估算公式,即普通水泥的水化放热总量是水灰比(W/C)的函数(图 1-1)。

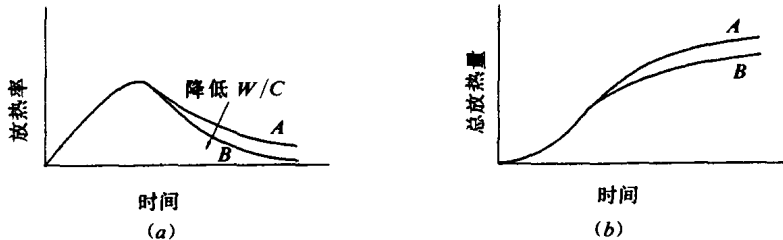


图 1-2 水灰比对:(a)水化速度,(b)总水化热的影响(Wang 和 Dilger1995)

$$Q=[0.26+1.55(W/C)-1.07(W/C)^2]450(\text{kJ/kg 水泥}) \tag{1-1}$$

2.2 W/C 对强度发展的影响

人们都知道,混凝土的强度随 W/C 降低而提高。随着水泥的水化,水化产物不断填充浆体的孔隙,促进混凝土强度增长。

在早龄期,一般认为低 W/C 的 HPC 比高 W/C 的 NSC 相对强度增长得快。这一点已由 Saeplass 和 Maage(1990)(图 1-3)及 Carrasquillo 等(1981)(图 1-4)的试验得到证实。通常的

假定是,当 W/C 较低时,水泥颗粒彼此距离较近,故为了获得强度发展所需要连接颗粒和填充孔隙的水化物较少。而在后期,对于很低 W/C 的 HPC,由于缺水水泥的水化停止。因此,对于后期的强度增长,HPC 比 NSC 慢,即 HPC 的长期强度增长潜力较小。

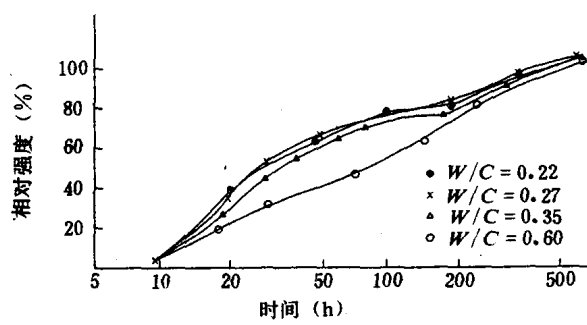


图 1-3 不同 W/C 混凝土的相对强度增长 (Saeplass 和 Maage 1990)

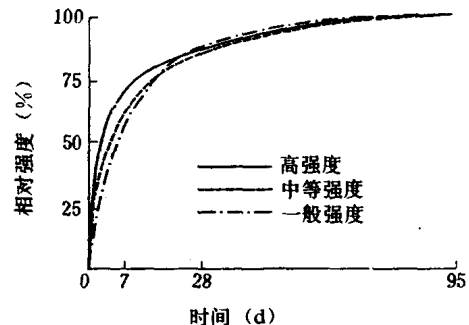


图 1-4 不同混凝土的相对强度增长 (Carrasquillo 等 1981)

然而,混凝土的强度发展是很多复杂的化学和力学作用结果。由于 W/C 低,即使表面看来胶凝材料的水化已经停止,由于老化或干燥作用使得水化产物性能变化,也可能影响混凝土的强度。Aitcin 等(1994)的试验表明,在密封条件下(与中型或大型试件的中部条件接近),NSC ($W/C = 0.45$) 和 HPC ($W/C = 0.31$ 及 0.25) 的相对强度增长没有区别(图 1-5)。

2.3 HPC 的养护

由于 HPC 的 W/C 非常低,有人认为它比 NSC 需要更多的养护。的确,由于 HPC 的初始 W/C 很低以及泌水非常小(尤其是硅粉 HPC),新鲜状态需要更多的湿养护。如果初始几个小时受到干燥,将产生塑性收缩裂缝。

然而,并不是 HPC 比 NSC 需要更长的养护时间。在维持适当的温度下,养护意味着避免新鲜混凝土的水分损失,而不是向混凝土拌和物提供更多的水。如果向新鲜混凝土上加水,面层的水泥浆会被稀释,即 W/C 增加了,于是混凝土面层的强度降低。另一方面,当混凝土硬化之后,其吸水性非常低,在任何实际养护时间内外部水分都不能达到面层以下。

由于 HPC 的 W/C 非常低,其早期相对水化速度及相对强度增长速度都较大。但由于水分很快用完,该速度很快降低。所以,对于相同的养护龄期,HPC 比 NSC 的相对强度增长快。而且,HPC,尤其是硅粉 HPC 的水渗透性,1d 龄期时要比 NSC 的 28d 龄期时低得多。因此在湿养护期间 HPC 吸水很少,这使得 HPC 长期养护效果不大。另一方面,由于短期 HPC 的水渗透性很低,使得它在非养护条件下不易失水和干燥。综合上述讨论,可见 HPC 比 NSC 需要的养护时间短。

有人认为,长期的湿养护对 HPC 强度的改善比 NSC 多,原因是提供的外部水分增加了 HPC 内部的水泥水化。然而,如前面提到那样,养护水只能到达 HPC 表面之下很小深度,所以在任何实际养护期间内,由增加的水引起的额外水化,对强度增长的影响很小。Aitcin 等

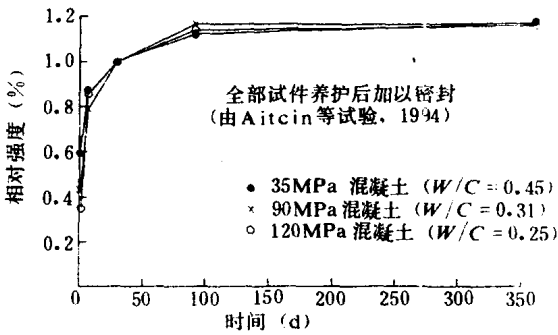


图 1-5 密封养护条件下不同混凝土的相对强度增长 (Aitcin 等 1994)

(1994)连续在水中养护试件的试验结果表明,从 28d 至 91d(比能够实行的养护期长得多),在 NSC 在 35MPa 时的相对强度增长(10.1%)比 120MPaHPC 的(8.1%)略高。由 Mindeaa (1994)整理的其他研究者的试验结果表明,HPC 连续在水中养护并不总能获得强度增长,有时强度会降低。

也必须指出,混凝土的试验强度受试件的湿润状态和干燥裂缝影响。某些连续湿养护试件的强度较高,其原因可能是这些试件不像干燥养护试件那样有裂缝(De Larrard and Aitcin 1993)。就是说,连续湿养护中混凝土的强度增长,并不一定是因为混凝土中水泥更多的水化了,至少不是仅仅因为水泥的水化问题。不论试件在水中养护多长时间,如果它们取出后干燥一定时间,就会出现微裂隙,因此长期强度将降低。另外,研究者在实验室中使用的很长时间(28d 以上)的湿养护制度,除非用于水下结构,否则对实际混凝土完全没有意义。从适用方面讲,混凝土的养护期很少超过两周。

3 高效减水剂的影响

可以说,如果没有高效减水剂就没有今天的 HPC。加入高效减水剂,不仅使新拌混凝土获得较高的工作性,而且通过防止水泥颗粒形成絮凝结构,使之均匀分散在浆体之中,减少了孔隙,因此使混凝土强度提高(Aitcin 等 1994)。

如 Masobd 和 Agarwal(1994)指出,各种高效减水剂对混凝土的粘度影响不同,因此为了获得一定的工作性,使用不同高效减水剂时其掺量要求不同。同时,由于各高效减水剂的化学组成有区别,它们对水泥水化速度的影响差别很大。另外,高效减水剂的性能也受所用水泥化学组成及物理性质的影响。所以,无法为所有高效减水剂建立一个总的作用效果模型,而且当发现某高效减水剂在一种混凝土中使用效果很好,而在另一混凝土中表现反常时,就不足为奇了(Aitcin 等 1994)。

3.1 高效减水剂对水化热的影响

通常情况下,高效减水剂不影响混凝土中水泥或火山灰质材料的总水化热,但可能明显改变它们的早期放热速度。高效减水剂对早期水泥水化有两种作用,一是推迟水化开始时间,二是加速硬化后的水化。

在通常掺量下(高达水泥重的 1%),高效减水剂不推迟水化。如在某些 HPC 中,当高效减水剂掺量很高时,尤其是使用木质素磺酸盐类及萘系高效减水剂时,开始水化时间将推迟(ACI 212 委员会 1989,Mindess 1994)。推迟效果明显表现在图 1-6(Cook 等 1992)及图 1-7(Burg and Ost 1994)的温升曲线中。图 1-6 及图 1-7 的混凝土配合比见表 1-1 及表 1-2,其中所用水泥为普通硅酸盐水泥(ASTM I 型)。

表 1-1 图 1-6 中三种混凝土的配合比(Cook 等 1992)

混凝土类型	35MPa	90MPa	120MPa
水泥(kg/m³)	355	470*	540*
水灰比	0.45	0.31	0.25
高效减水剂(1/m³)	—	10.5	19.5

* 混合水泥,含 7%~8%的硅粉。

表 1-2 图 1-7 中混凝土的配合比(Burg and Ost 1994)

配合比编号	1	2	3	4
水泥(kg/m ³)	564	475	487	564
硅粉(kg/m ³)	—	24	47	89
粉煤灰*(kg/m ³)	—	59	—	—
水胶比	0.281	0.287	0.291	0.220
高效减水剂(l/m ³)	11.60	11.60	11.22	20.11

* 高钙粉煤灰(CaO 含量 25.85%)。

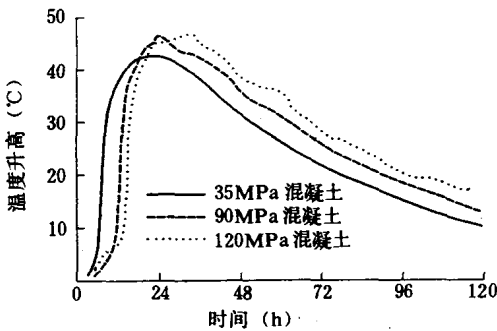


图 1-6 1.0m×1.0m 柱中心的温升
(Cook 等 1992)

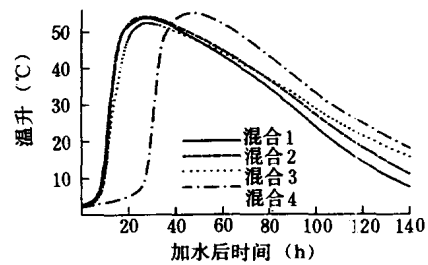


图 1-7 1.2m³ 立方体试件中心的温升
(Burg 和 Ost 1994)

图 1-6 及图 1-7 表明,当高效减水剂增加时,水化开始时间(温升迅速提高的起点)推迟了。图 1-7 中的 4 号配合比推迟得太多了,24h 后才开始凝结。由于高效减水剂的化学组成及水泥性质的变化,不可能从高效减水剂掺量的多少预计推迟水泥水化时间的长短。

另一方面,高效减水剂趋于加速凝结后的水化反应(Simard 等 1993,Swamy 等 1994),结果使放热速度提高,如图 1-8(Swamy 等 1994)。图 1-8 也清楚表明了高效减水剂的推迟水化作用。

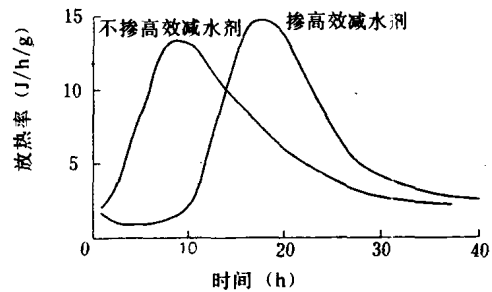


图 1-8 高效减水剂对水泥早期水化速度的影响
(Swamy 等 1994)

3.2 高效减水剂对混凝土强度的影响

如前所述,与普通减水剂比较,高效减水剂不仅显著改善新拌混凝土的工作性,而且还可以改善硬化混凝土的强度,见图 1-9(Cook 1989)。在同样的水胶比和水泥用量条件下,使用高效减水剂可使最终强度提高 20%以上(ACI 212 1989)。

高效减水剂早期对强度发展的影响与对水化热的影响类似,即开始推迟,凝结后加速。就是说,高效减水剂通常推迟了 HPC 产生强度的开始时间;而在凝结之后,由于加速水化的作用,强度发展通常非常快。

根据 Legrand 和 Wirquin(1994)的分析,当高效减水剂掺量过高时,其分散作用可能影响

到水化产物,阻碍它们之间的粘结,于是推迟强度增长以及降低最终的强度。因此,为了获得混凝土的最大强度,存在一个最佳的高效减水剂掺量。

这种推迟水化的效果通常无法由凝结之后的加速水化及快速相对强度增长来补偿。24h 后的 HPC 相对抗压强度通常仍然比 NSC 的高。

最后还必须指出,如高效减水剂这类化学外加剂的性能,受水泥及其它胶凝材料的影响很大,所以迄今为止,为了估计它们之间的相互作用,除了通过试验之外没有什么预计的办法。在某一工程中成功使用的配合比,当换一个工程使用时,如果所用材料不是严格相同,不能保证具有类似的性能。新拌混凝土的温度对高效减水剂的性能也有明显影响。对于大型工程,需要系统地试验化学外加剂、矿物掺合料及水泥之间的相容性问题。

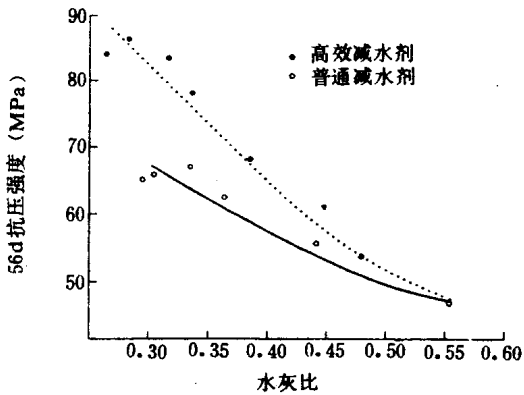


图 1-9 不同水胶比下高效减水剂对混凝土强度的影响(Cook 1989)

4 硅粉的作用

尽管应用纯水泥可以制成抗压强度高达 100MPa 的 HPC,但当使用硅粉时将容易得多。对于制备强度超过 100MPa 的混凝土,硅粉的使用几乎不可缺少。硅粉在混凝土中同时起填充材料和火山灰材料作用(Khayat 和 Aitcin 1993,Malhotra 等 1994)。使用硅粉后,大大降低了水化浆体中的孔隙尺寸,改善了孔隙尺寸分布,于是使强度提高,渗透性降低。

通常可以获得三种形式的硅粉:带水的浆体、松散状、及凝聚状态,它们在混凝土中的性能本质上没有什么不同(Cohen 和 Olek 1989)。实际应用中最方便的形式是将其制成混合水泥。

4.1 硅粉对水化热的影响

由 Khayat 和 Aitcin(1993)整理的硅粉对水化热影响的各种研究结果表明,部分水泥由硅粉代替后,通常可使前 3d 的水化速度和温度升高加快,但最终总水化热有所降低,特别是水胶比低时更显著。然而,Smeplass 和 Maage(1990)发现,当水胶比高时,硅粉对总水化热的影响完全与水泥相同。

尽管硅粉混凝土的水化放热量小,但这可能不会引起混凝土的温升降低。硬化混凝土中的温度升高,表示混凝土内部产生热量与向周围散失热量的动态平衡(Wang and Dilger 1994)。温度升高主要发生在浇筑之后的几小时之内。在相同的胶凝材料用量条件下,与纯水泥混凝土比较,尽管硅粉混凝土的总水化热较低,但温升一般却较高,其原因是它早期放热速度快。

在硬化混凝土中观察到的硅粉性能,不可避免地要受化学外加剂的影响,因为如果没有高效减水剂,就无法获得具有良好工作性的硅粉 HPC。所以硅粉对早期水化的作用效果总受到化学外加剂的影响。例如,当不使用高效减水剂时,应用硅粉并不能增加早期水化速度;使用高效减水剂则对放热速度有显著影响,见图 1-10(Meland 1982)。由此本文作者认为,加硅粉后表现出来的对早期水化的加速效果,可能是高效减水剂和硅粉共同作用的结果;高效减水剂对硅粉混凝土的早期水化加速作用比纯水泥混凝土的显著。

当温度升高时,水泥的水化速度总是增加。根据 Wen 等(1989)和 CEB-FIP(1988)的报导,

温度升高对硅粉混凝土水化的加速效果比纯水泥混凝土的大。因此,当用 Arrhenius 公式表示水化速度和温度之间的关系时,硅粉混凝土的活化能应当比纯水泥混凝土的高。

4.2 硅粉对 HPC 强度的影响

应用硅粉会显著提高混凝土的抗压强度。例如,研究结果表明(CEB-FIP1988),为了获得 70MPa 的混凝土强度,应用纯水泥需要水胶比 0.35;而当加 8% 的硅粉时,水胶比可以 0.50。

由于硅粉颗粒非常细,它们可以在很早的几小时发生火山灰反应。根据 Carette 和 Malhotra(1992)的报导,硅粉对混凝土强度的贡献主要在 28d 之前。所以,就长期强度增长方面,一般认为硅粉混凝土不如纯水泥混凝土或粉煤灰混凝土。

Ahmad(1994)引用的硅粉对 NSC 强度发展的试验结果表明,硅粉掺量增加使得早期相对强度发展降低。Sandvik 和 Gjorv(1992)在 65MPa 的混凝土中也发现了这种现象(图 1-11)。这与他们自己早期的报导(Sandvik and Gjorv 1991)不符。

然而,尽管在相同的水胶比下硅粉混凝土的早期相对强度发展比纯水泥混凝土的慢,由于加入硅粉使得强度大大提高,硅粉混凝土的绝对强度则比纯水泥混凝土的高。另一方面,经验表明,HPC 的早期强度发展比 NSC 的快。虽然 HPC 的凝结时间可能稍有推迟,其凝结之后的水化作用会由高效减水剂和硅粉大大加快。其结果通常是凝结之后强度发展非常快。例如,Calgary 大学对超高强混凝土的试验表明,120MPa 的硅粉混凝土,24h 时可以获得 28d 抗压强度的 50%。

对于某些空气中干燥或养护的很低水胶比的硅粉混凝土试件,有抗压强度倒缩的报导(De Larrard 和 Aitcin 1993)。这种强度降低通常发生在 90d 龄期之后,一般认为是由内部自干燥及干燥裂缝引起的。然而,包括 Gjorv(1994)在内的许多其他研究人员的试验室及现场研究表明,HPC 的后期强度没有降低。例如,从 6 种不同的 HPC 中取得的 3 个月至 3 年龄期的所有钻芯试样试验结果表明,其强度在不断增长(Burg 和 Ost 1994)。当然,与 NSC 比较,HPC 的长期强度增长潜力较小。

正如上节提到的那样,升高温度对硅粉混凝土水化作用的加速效果比纯水泥混凝土的明

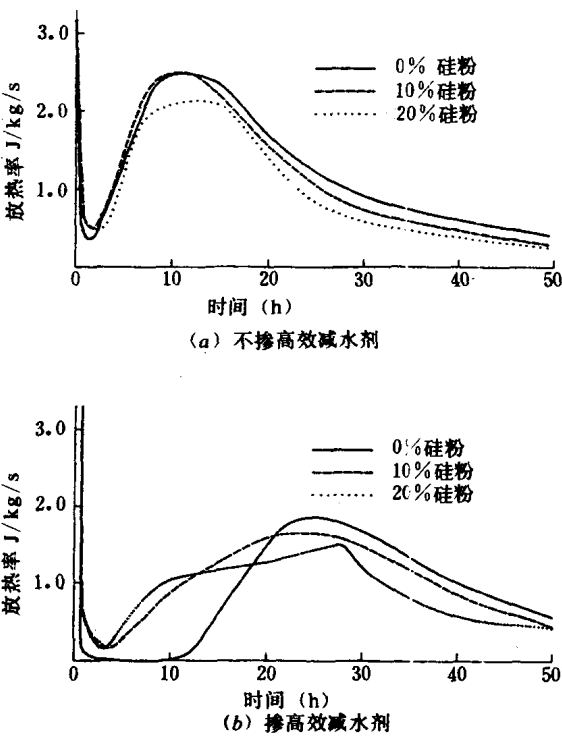


图 1-10 硅粉和高效减水剂在最初数小时对水化热的影响(Meland 1982)

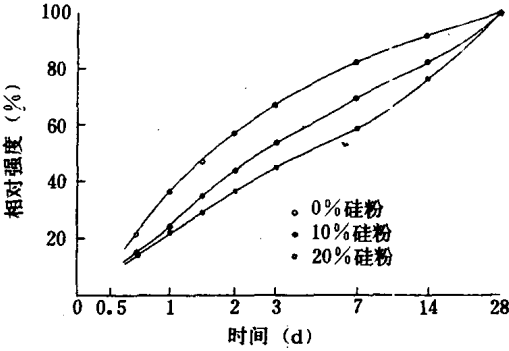


图 1-11 不同硅粉掺量下混凝土相对强度发展 (Sandvik and Gjorv 1992)

显(Wen 等 1989,CEB—FIP 1988)。试验也表明,硅粉 HPC 承受高温养护的能力比 NSC 强。养护温度高达 85℃时,没有发现强度降低(Gjorv 1994)。

5 各因素间的相互作用

前面已经提到,在水灰比、高效减水剂、硅粉以及水泥之间有相互作用。有时很难评价试验中某一特定参数的实际作用。某些研究者对单个因素得出的一些结论,不可避免地会包括其它参数或其它参数共同的作用。例如,当降低水灰比时,必须相应增加高效减水剂的掺量,以保持一定的工作性。这样,看到的水灰比对混凝土强度的影响可能已经包括了高效减水剂的贡献。

另一方面,与粉煤灰不同,硅粉可能显著增加拌和水需要量。所以当加硅粉时,或是增大水灰比,或是增加高效减水剂用量,以保证 HPC 的工作性。而且,为了制成超高强混凝土,不得不使用很低的水灰比、高掺量高效减水剂,以及一些硅粉。所以,看到的硅粉对应用某一具体水泥的混凝土早期水化及强度发展的影响,有时可能是水灰比、高效减水剂及硅粉联合作用的结果。换句话说,当涉及几种参数时,所谓观察到的各因素对 HPC 水化热及强度发展的影响效果不能简单地进行叠加。

6 结 语

本文综述了 HPC 水化热及强度发展方面的有关资料。在典型的 HPC 中,三个工作参数即低水灰比、高效减水剂、及硅粉通常同时出现,它们彼此之间相互作用。在某一工作性良好的 HPC 中估算各单因素的作用效果,或者不可能,或者非常难。大多报导的结果,可能是这些参数各种作用的最终体现。然而,基于本文的分析,对于典型的高强 HPC 有如下的基本趋势:

1. 低水灰比明显降低总水化热。
2. 低水灰比使相对强度发展加快,然而 HPC 的长期强度增长不如 NSC。
3. 高效减水剂推迟水泥水化的开始时间,但使凝结后的水化速度加快。
4. 与普通减水剂比较,高效减水剂不仅显著改善新拌混凝土的工作性,而且明显使硬化混凝土的强度提高。
5. 与不掺硅粉的混凝土比较,尽管硅粉混凝土的相对强度发展通常稍慢,但硅粉使得混凝土的绝对强度大大提高。
6. 尽管硅粉对总水化热的贡献不如水泥,它能增加早期数小时的水化放热速度。
7. 一典型的 HPC 硬化时间-温度曲线表明,凝结前湿,可以忽略,凝结后温升急剧增加。
8. HPC 的总体相对强度增长比 NSC 快。

参考文献

ACI Committee 207 (1986) *Cooling and insulating systems for mass concrete*, American Concrete Institute, Detroit, 21pp.

ACI Committee 212 (1989) *Chemical admixtures for concrete*, American Concrete Institute, Detroit, 31pp.

Aitcin, P.C., Jolicoeur, C. and MacGregor, J.G. (1994a) Superplasticizers: How they work and why they occasionally don't, *Concrete*