

高性能混凝土技术

冯乃谦 邢锋 编著

原子能出版社

高性能混凝土技术

冯乃谦 编著
邢 锋



原子能出版社
·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高性能混凝土技术/冯乃谦,邢锋著. —北京:原子能出版社,2000.2

ISBN 7-5022-2086-0

I. 高… II. ①冯…②邢… III. 混凝土,高性能-生产工艺 IV. TU528.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 50315 号

内 容 简 介

本书从高性能混凝土的组成、配制及应用技术进行系统的论述。特别是混凝土的耐久性的检测与评价,以及耐久性设计等方面,从理论到实际进行了全面的介绍,对我国混凝土耐久性研究和设计会有较大的参考价值。

矿物质粉体是高性能混凝土的第六组份。为了达到低水灰比,还必须使用新型高性能减水剂。低水胶比、使用矿物质超细粉的品种、数量和质量,是高性能混凝土具有长寿命的关键。

高性能混凝土的钢筋混凝土结构的使用寿命可达百年以上,这是普通混凝土所不能比的。

“与环境共生”是混凝土技术发展的新方向。本书首次将国外最新动态介绍给我国读者,对混凝土技术今后发展会有很大的指导意义。

Wittmann 教授及其夫人还特为本书撰写了“第十八章 高性能混凝土的应用潜力与风险:尚需进一步研究”,从高性能混凝土的结构性能及发展方向进行了更透彻的阐述。

本书可供混凝土科技工作者、工作技术人员,以及与此相关的科研、工业生产、施工技术人员和高等院校师生参考阅读。

原子能出版社出版 发行

责任编辑:王裕新

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印制 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张:22.875 字数:565 千字

2000 年 6 月北京第一版 2000 年 6 月北京第一次印刷

印数:1—3000 册

定价:63.00 元

序 言

100 多年来,混凝土是世界范围内的主导工程材料。目前,就全世界而言,混凝土的年产量约 28 亿 m^3 左右。可以预计,混凝土将长期服务于世界。

过去 10 多年来,生产应用的混凝土强度越来越高:80、90、100、120 MPa,甚至更高的强度。有些地方已生产和应用强度为 140 MPa 的混凝土。

但是,高性能混凝土与高强混凝土是不同的。在性能上,高性能混凝土能满足特定环境条件下所需的高弹模、低渗透性和抵抗环境中侵蚀介质破坏的性能。

在组成材料方面,高性能混凝土都含有矿物质粉体。如硅粉、超细矿渣与超细粉煤灰等,有时还同时含有两种以上的超细粉。低水灰比和矿物质超细粉的混凝土拌合物,必须使用新型高性能减水剂,才能提高混凝土的流动性,控制坍落度损失,并提高耐久性。高性能混凝土的骨料最大粒径介于 15~20 mm,小于普通混凝土骨料。这样可以降低骨料-水泥石界面的应力差。而且较小骨料的颗粒强度比大颗粒的高,能配制出更高性能的混凝土。

从混凝土技术的整个发展进程来看,60 年代的高效减水剂的发明与应用,把混凝土技术带进了高强度与高流态的新领域。而 90 年代的粉体技术,使混凝土进入了高性能时代。矿物质超细粉是高性能混凝土的第 6 组份。低水胶比,矿物质超细粉的品种、数量与质量,是高性能混凝土具有使用寿命长的关键。

混凝土的使用寿命是混凝土与环境协调性的重要指标。在海洋工程条件下,普通钢筋混凝土结构的使用寿命一般是 40~50 年;而高性能混凝土的钢筋混凝土结构的使用寿命达百年以上。这意味着资源、能源及资金的大量节约,同时也减少了由于结构构件的过早破坏而带来环境的污染。这是高性能混凝土技术与环境共生的重要方面。

良好的养护是混凝土获得高质量的工艺措施。普通混凝土与高性能混凝土在这方面均具有同样要求。

城市建设、建筑工程、地下及水下工程,海洋开发与核能工程等,都需要大量的高性能混凝土。特别是非常严酷的暴露环境中,氯离子或硫酸盐或其他侵蚀性介质可能进入混凝土,渗透性及化学稳定性成为混凝土的主要技术要求,高性能混凝土在这些领域将获得更广泛应用。

高性能混凝土的水胶比低,浇注后硬化初期往往出现自收缩裂纹;硬化后长期处于水中,又往往由于继续水化而产生裂纹。高性能混凝土的延性差。这些都是需要进一步克服的缺点。

本书在编写过程中,得到了社会同行的大力支持与鼓励。深圳大学邢锋博士编著了本书的第六章、第七章、第八章、第十章和第十七章(约 15 万字)。张新华博士编写了本书的“高性能混凝土的微观结构”一章。RILEM 主席 F.H. Wittmann 教授为本书撰写了“高性能混凝土应用的潜力与风险”一章。本书在出版时还得到了深圳市科委“高性能混凝土技术”研究项目组的资助。对此表示衷心感谢。

此书可供我国混凝土科技工作者、工程技术人员,以及高校师生参考。

望批评指正。

冯乃谦

2000.1.1 于清华园

目 录

序 言

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(High Performance Concrete 简称为 HPC)	3
第三节 混凝土如何达到高性能	6
第四节 本书介绍的主要内容	7
参考文献	8
第二章 高性能混凝土用水泥	9
第一节 高性能混凝土对水泥的选择	9
第二节 球状化水泥	10
第三节 调粒(级配)水泥	20
第四节 活化填料与活化水泥	27
第五节 超细水泥	28
第六节 现状与问题	35
参考文献	36
第三章 骨 料	37
第一节 概 述	37
第二节 骨料与水泥浆的粘结强度	38
第三节 骨料的表观密度与吸水率对混凝土强度的影响	41
第四节 骨料对混凝土力学与变形性能的影响	42
第五节 粗骨料的体积含量、粒径对 HPC 抗压强度影响的数学模型	45
第六节 骨料对混凝土耐久性的影响	49
第七节 粗骨料的最大粒径	50
第八节 粗骨料的细度模量与质量系数	50
第九节 高性能混凝土对骨料的选择	51
第十节 现状与问题	52
第十一节 今后的方向	53
参考文献	53
第四章 新型高效减水剂	55
第一节 新型高效减水剂的种类与特性	55
第二节 新型高性能减水剂的作用机理	58
第三节 新型高性能减水剂对高性能混凝土的适应性	60
第四节 接枝共聚物高效减水剂	64
第五节 氨基磺酸系高效减水剂的生产与应用	68
第六节 混凝土坍落度损失及其抑制机理	73
第七节 发展的方向	78

参考文献	79
第五章 矿物质超细粉	80
第一节 实验用原材料及试验方法	80
第二节 超细粉的填充效应	81
第三节 矿物质超细粉的流化效应	81
第四节 超细粉对水泥的增强效果	84
第五节 超细粉的耐久性效应	85
第六节 抗硫酸盐腐蚀	86
参考文献	88
第六章 高性能混凝土中的粉煤灰掺合料	90
第一节 粉煤灰的种类与性质	90
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	99
第四节 粉煤灰高性能混凝土的配制	102
第五节 粉煤灰在特种混凝土中的应用	107
第六节 粉煤灰在使用中应注意的问题	108
参考文献	109
第七章 硅粉在高性能混凝土中的应用	110
第一节 概 述	110
第二节 硅粉的生产	112
第三节 硅粉的物理化学性质	114
第四节 硅粉的填充性及火山灰活性	116
第五节 硅粉对混凝土性能的影响	118
第六节 硅粉混凝土的耐久性	127
第七节 硅粉混凝土的微结构	132
第八节 硅粉混凝土的配合、制造与施工	134
参考文献	136
第八章 水淬矿渣超细粉高性能混凝土	138
第一节 高炉矿渣超细粉的性质	138
第二节 矿渣超细粉混凝土的性质	140
第三节 利用矿渣超细粉的特性配制混凝土的应用	150
第四节 超细矿渣在混凝土工程中的应用	151
第五节 今后展望	156
参考文献	157
第九章 天然沸石在高性能混凝土中的应用	158
第一节 概 述	158
第二节 天然沸石的特性	159
第三节 天然沸石粉对不同水灰比混凝土强度的影响	168
第四节 天然沸石高强度、高性能混凝土	171

第五节 天然沸石超细粉混凝土的微结构	177
第六节 天然沸石粉高性能混凝土的耐久性	183
参考文献	187
第十章 矿物质掺合料对水泥水化及结构形成的影响	188
第一节 矿物质掺合料的特性	188
第二节 水化作用	191
第三节 硬化水泥石的性质与结构	196
第四节 基本结论	204
参考文献	204
第十一章 新拌混凝土的工作性能	206
第一节 高性能混凝土拌合物的粘性	206
第二节 高性能混凝土的粘性与施工性能	207
第三节 流变学参数的测定方法	209
第四节 高性能混凝土的可泵性	212
参考文献	213
第十二章 高性能混凝土的强度与断裂	214
第一节 混凝土的破坏机理	214
第二节 混凝土的微观结构与混凝土的高性能	217
第三节 高性能混凝土断裂性能的研究	221
第四节 分数维理论在混凝土断裂研究中的应用	222
第五节 混凝土断裂能尺寸效应	227
第六节 混凝土微裂纹区测定与研究	233
第七节 组成材料对混凝土断裂能的影响	245
第八节 总结——高性能混凝土的结构、强度与断裂特性的关系	248
参考文献	249
第十三章 混凝土的耐久性	250
第一节 目前混凝土耐久性的问题	250
第二节 混凝土的渗透性	251
第三节 体积稳定性	261
第四节 裂纹、剥落、散开	263
第五节 中性化	265
第六节 抗冻融性能	272
第七节 在海水中混凝土的耐久性	278
第八节 硫酸盐腐蚀	281
第九节 高温下混凝土的力学性质	284
第十节 高耐磨性混凝土	291
第十一节 碱-骨料反应	294
参考文献	304
第十四章 高性能混凝土的微观结构	305

第一节	引 言	305
第二节	描述混凝土微观结构的模型	307
第三节	孔 系	310
第四节	水泥浆体——集料界面结构	312
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	313
第六节	小 结	317
第十五章	高性能混凝土的裂纹损伤与超高耐久性混凝土的开发应用	318
第一节	概 述	318
第二节	高性能混凝土尚需进一步研究解决的问题	318
第三节	超高耐久性混凝土的开发与应用	322
第四节	结 论	324
	参考文献	324
第十六章	高性能混凝土的配合比设计	325
第一节	HPC 所处的环境及技术要求	325
第二节	按 Cl^- 渗透性进行 HPC 配合比设计	325
第三节	硫酸盐腐蚀条件混凝土配合比设计	330
第四节	抗碳化的 HPC 配合比设计	333
第五节	按混凝土抗冻性进行 HPC 配合比设计	334
	参考文献	335
第十七章	普通混凝土高性能化	336
第一节	引 言	336
第二节	普通混凝土的结构形成及其特点	336
第三节	改善混凝土结构、提高性能的技术途径	338
第四节	实 例	339
第五节	施工应用	341
第六节	微观结构	341
第七节	结 论	342
	参考文献	343
第十八章	高性能混凝土的应用潜力与风险:尚需进一步研究	344
第十九章	与环境共生——水泥混凝土技术发展的新方向	346

第一章 概 论

高性能混凝土就是具有优异耐久性的混凝土。其主要特点是高强度、高抗渗性、高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,活化水泥与生态水泥等。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少的组分。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^- 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,现在与 50 年代截然不同。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,可以准确地预测混凝土 28 d 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落度基本上无损失,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的问题日益增多

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^[2]。乌克兰境内的切尔诺贝利核电站,由于钢筋混凝土结构的泄漏,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,明确地指出: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。例如,日本的鸟取县境内,有一座钢筋混凝土桥,也由于碱骨料反应造成严重破坏,达到了不可修复的程度,而被炸掉重建。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,造成很大的人员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。

由于混凝土耐久性不足而导致结构破坏的现象日益增多。相当多的混凝土结构物在使用过程中,在物理、力学与化学等因素的作用下,过早地破坏,造成了严重的经济损失。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。在美国,1980 年的报道,有 56 万座公路桥因使用除冰盐引起混凝土剥蚀和钢筋锈蚀,其中有 9 万座需要大修或重建,仅 1978 年,经济损失已达 63 亿美元。在桥梁方面,目前已有 253 000 座桥的桥面板不同程度的劣化,而且每年还以 35 000 座的速度增加,修复这些桥面板需要 500 亿美元、而维修或更换所有劣化的混凝土结构将花 2 000 亿美元。这样惊人的维修费是结构设计者没能预计到的。

种种工程事故及惊人的维修费用,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,而不是对普通混凝土要求的 40~50 年,对混凝土性能的要求更高了。

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,甚至比强度都更重要。

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被提出来了。

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;直至今日,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 简写为 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 被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;良好的、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 ≤ 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 90 d 龄期的干缩值可以降低到 0.04% 以下。

二、美国战略公路研究项目(SHRP)的一项研究,定义 HPC 如下:

1. 最大的水胶比(w/B)为 0.35;
2. 按 ASTM C666 评价性能,最小耐久性系数为 0.8;
3. 最小强度指标为:(a)浇注 4 小时内,强度达到 21 MPa,(b)24 小时内达到 34 MPa,(c) 25 d 龄期达到 69 MPa。

三、欧洲学派的观点

RILEM 主席 F. H. Wittmann 教授认为由普通混凝土达到高性能混凝土的方法如下图所示:

通过高效减水剂降低水灰比,利用硅粉或微填充料填充水泥粒子间的空隙,采用新型水泥,通过一定压力作用可使混凝土达到高性能。他还指出,如果将硅酸盐水泥 475 kg 和 47 kg 硅粉、138 升水、1790 kg 骨料和 2% 的超塑化剂拌合,得到 1 m³ 混凝土,这时混凝土的耐久性提高,28 d 强度在 80 MPa 以上。

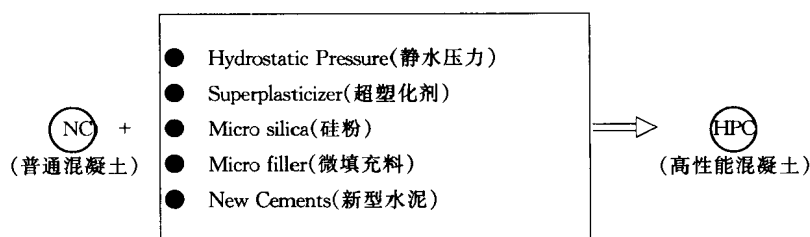


图 1.2.1 由普通混凝土达到高性能混凝土的技术途径

四、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搅拌混凝土的性质,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就可以保证混凝土的施工质量,也可以保证施工速度;2. 可以有效的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,又能保证混凝土硬化后的性能,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。这样搅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。

五、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 1.2.2 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 16 h 脱模,混凝土脱模强度达 140 MPa。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,耐磨耗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。

六、本书作者的观点

高性能混凝土必须具有高的耐久性。高性能混凝土也应具有高的强度。但仅仅是高强度,还不一定具有高耐久性。混凝土为了获得高耐久性,还要与使用环境相结合,采取相应的对策,例如掺入矿物质超细粉。高性能混凝土应是流动性好,可泵性的混凝土,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。

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。对高性能减水剂的要求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。硅粉的比表面积约 20 万 cm^2/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 6000 cm^2/g 左右，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 C_3A 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%~1.4%，坍落度仍可达 22 cm。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十分重要。国际上希望粗骨料的 $D_{\max}$ 不超过 20 mm，有人认为粗骨料的粒径应在 10 mm 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 25 mm 时，其 k_{IC} 值不会降低。建议采用 $D_{\max} \leq 25$ 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。关于骨料的质量系数请参阅第三章。

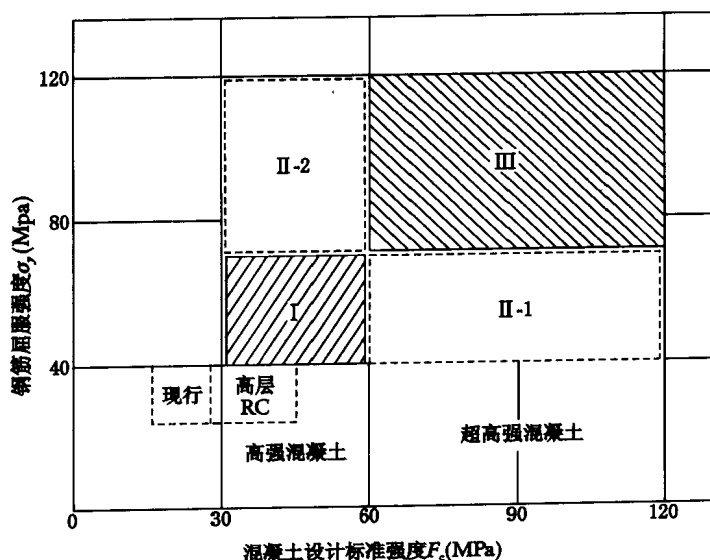


图 1.2.2 材料强度与研究开发区关系

区域 I：用高强材料的 RC 结构

区域 II-1：超高强混凝土的 RC 结构

区域 II-2：超高强钢筋的 RC 结构

区域 III：超高强材料的 RC 结构

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 m^3 左右、 $D_{\max}\leq 25\text{ mm}$ 砂率 $36\%\sim 40\%$ 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 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 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 $10\%\sim 15\%$ 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 Na_2SO_4 的含量要低。不宜用木钙来配制高性能混凝土,因其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 18 cm 以上,且在 90 min 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,都可以影响到 HPC 的性能。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, 从微观结构角度分析与了解 HPC 的特性并评价 HPC 的性能。围绕这一目的, 作者在本书中将介绍以下的主要内容:

一、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 20 cm 以上。这是混凝土技术新进展的一个方面。

2. 超细粉。包括硅粉、超细矿渣、超细粉煤灰、超细天然沸石粉等。超细粉是 HPC 中不可缺少的组分, 既可改善流动性, 又可以提高强度与耐久性。

3. 新型高效减水剂。其与一般萘系高效减水剂的主要区别是, 既具有高的减水效果, 又能控制混凝土的坍落度损失, 而且其作用机理又与普通高效减水剂不同。

4. 骨料。配制高性能混凝土的骨料与普通混凝土的要求不同, 骨料本身的强度要求高, 一般采用花岗岩、硬质砂岩, 以及石灰岩等, 卵石不能配制高性能混凝土。如何评价与选择骨料, 本书第三章将有详尽的介绍。

二、HPC 的物理力学特性

1. 耐久性。这是本书论述的重点。高性能混凝土在各种使用环境条件下, 耐久性如何, 如何评价与检验, 如何进一步提高等等, 是 HPC 发展过程中必须解决的问题。

2. 混凝土拌合物的粘稠度。HPC 与普通混凝土具有相同的坍落度时, 由于粘性大, 流动慢, 必须引入时间因素, 也即引入流变学的有关概念。

3. HPC 的强度与断裂。引入了分数维(Fractal)理论, 对 HPC 的结构与断裂进行了深入的分析, 这是作者与研究生们辛勤劳动的成果。

三、HPC 的微结构

HPC 的性能取决于其成分与结构。本书除了在各种超细粉的 HPC 中, 做一般的论述其结构以外, 还专门写了一章, 系统地介绍了 HPC 的微结构。从水泥浆、砂浆到混凝土的微结构, 进行了深入浅出的分析与介绍, 使读者对微结构研究的历史、发展及现状等有全面的了解。使读者能从混凝土的组分、结构状态和性能等方面, 了解 HPC 与普通混凝土的区别, 进一步提高混凝土的性能。

高性能混凝土是近几年发展起来的, 在工程中已得到广泛的应用。我国每年都浇灌数亿立方米的混凝土, 如能用到 $\frac{1}{3}$ 或 $\frac{1}{4}$ 的高性能混凝土, 则我国混凝土工程质量将大大提高, 给国

家带来重大的社会效益、技术效果与经济效果。

四、HPC 的配合比设计

考虑了 HPC 的环境行为及其劣化,针对不同的使用环境的腐蚀性介质,按照耐久性要求设计了 HPC,使 HPC 满足耐久性要求的同时,也能满足强度要求。耐久性与强度既相关,又有不同设计特点。在本书中进行了初次尝试。

五、普通混凝土高性能化

迄今为止,国内外所指的 HPC,一般均系 C60 以上的高强度高性能混凝土。作者认为,高性能一般需要具有高强度,但高强度的混凝土不一定具有高性能。因此,低强度的混凝土,如 C20, C30, C40, 甚至 C50 的混凝土如何提高其性能、延长其使用寿命,这是混凝土研究的另一个方面,本书对普通混凝土如何达到高性能进行了初步的介绍。

六、人类与环境共生是水泥混凝土技术发展的新方向

有效的利用城市垃圾灰、下水道污泥及其他工业废渣为原料,生产水泥,达到省能源、省资源、降低 CO₂ 排放量、减少环境污染;利用再生骨料等再生资源,生产混凝土;混凝土达到长的使用寿命等等,这些都是水泥混凝土可持续发展的重要方面,本书初步介绍了日本在这方面的成就与发展。

混凝土材料仍然是 21 世纪的主要工程材料。望我国混凝土材料工作者能从本书得到借鉴与参考。

参 考 文 献

- 1 柳橋邦生、吉岡保彦、齊藤俊夫。“超高耐久性混凝土”,コンクリート, Vol. 32. No. 7, 1994, 7
- 2 P. K. Mehta. 混凝土的结构、性能与材料(祝永年、沈威、陈志源译),同济大学出版社, 1991. 7
- 3 W. R. Kilareski. Failure of Reinforced Concrete Structures due to Corrosion, Material Performance, 1980, 3
- 4 P. K. Mehta. Durability of Concrete-fifty Years of Progress? In V. M. Malhotra eds. Durability of Concrete, second International conference, Detroit, American Concrete Institute, 1991
- 5 P. K. Mehta and Pierre-Claude C. Aitcin. Principles Underlying Production of High-Performance Concrete, ASTM Cement, Concrete, and Aggregates V. 12. N2, Winter 1990
- 6 F. H. Wittmann. High-performance of Cement-Based Materials, AEDIFICATIO VERLAG. FRAUNHOFER IRB VERLAG, 1997
- 7 岡村 甫ほか. 締固め不要への挑戦, セソント. コンクリート. NO. 539. Jan. 1992
- 8 日本建築學會. 高强度コンクリートの技術の現状, 発売所: 丸善株式會社; 印刷所: 株式會社昭和工業寫真印刷所, 1991 年 1 月 15 日第一版第 1 次印刷

第二章 高性能混凝土用水泥

胶结材料(cement)从广义来讲是把物与物粘结在一起的材料总称。石膏、石灰,以及火山灰等均属此范围。但是,一般所指的水泥(cement)均系硅酸盐水泥及其所属系列的含掺合料的水泥。对于高性能混凝土来说,对水泥的性能,有其特殊要求。

第一节 高性能混凝土对水泥的选择

高性能混凝土的特点之一是低水灰比,为了确保其流动性,必须掺入高效减水剂。因此,必须选择适宜低水灰比特性的水泥。其一是细度及粒子的组成,另一方面是加水后的早期水化。

水泥粒子群的比表面积、粒子形状、密度及粒子之间的级配(互相填充)等,对浆体的流动性影响很大。比表面积小,粒子形状接近球状,比重大,填充性越大,流动性也大。优化这些因子,可以获得最适宜的流动性。

对于加水后的早期水化来说,水泥中的铝酸三钙的量越少,流动性的经时降低越小。特别是采用高性能减水剂时,坍落度损失的抑制问题较大。从水化方面考虑,含有适当的 fCaO 是比较有效的。关于早期水化反应的流动性,如图 2.1.1 所示。含适量的 fCaO 的水泥浆的屈服值低(图中曲线 1),流动性比图 2.1.1 中的曲线 2、3 的好。

为了混凝土的高强化,提高水泥的活性,过去一直试图增加 C-S-H 的生成量。其方法是在水泥熟料烧成时,在高温烧成过程中急冷,使熟料中的 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 及 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 固溶体产生高温变态,固溶适当的微量成分,增加其活性。降低 C_3A 、钙矾石的含量,使低硫酸铁水化物及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成量降低。硅酸二钙含量高的水泥,在低水灰比下,水化热低,强度发展好。

从低水灰比的观点出发,水泥的粒子组成,除了水泥本身最密实的填充之外,也应包含骨料的最密实填充。从理论上讲,希望能获得如图 2.1.2 所示的粒子组成。

一般情况下,骨料的粒度分布近似于最密实的填充状态,但水泥的粒度分布却相差很远,2 μm 以下的微粒部分,及 50~200 μm 的粒子部分不足。因此,要调整水泥本身的粒度,以及通过掺合料调整粒度是很必要的。

一般的情况下,水泥粒子的形状系数为 0.67 左右。但是,把水泥粒子球状化处理后,形状系数成为 0.8~0.9。过去混凝土的水灰比只能在 0.18~0.20 的范围,而由于形状系数的提高,0.14 的水灰比成为可能。在低水灰比下,即使水泥的水化量少,但水泥石却能获得高密实度与高强度。

为了获得高性能混凝土,对水泥性能的要求,除了确保最低限度的流动性之外,还要求水泥在低的水灰比下,能促进水泥的水化反应,使水泥石的结构密实化。这是至关重要的。