

TU528.31 62  
W86

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 高性能混凝土

吴中伟 廉慧珍 著



A0927400

中国铁道出版社

1999年·北京

## (京) 新登字 063 号

### 图书在版编目 (CIP) 数据

高性能混凝土/吴中伟, 廉慧珍著. —北京: 中国铁道出版社, 1999.9

ISBN 7-113-03458-6

I. 高… II. ①吴… ②廉… III. 高强混凝土 IV. TU528.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 36816 号

书 名: 高性能混凝土

著作责任者: 吴中伟 廉慧珍

出版·发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

策 划 编 辑: 傅希刚

责 任 编 辑: 傅希刚

封 面 设 计: 李艳阳

印 刷: 北京市彩桥印刷厂

开 本: 880 mm×1 230 mm 1/32 印张: 12.75 字数: 347 千

版 本: 1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~5 000 册

书 号: ISBN 7-113-03458-6/TU·605

定 价: 28.00 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

随着科学技术和生产的发展，各种在严酷环境下使用的重大混凝土结构，如跨海大桥、海底隧道、海上采油平台、核反应堆等，以及有毒有害废物处置与处理工程的建造需要在不断增加。这些混凝土工程的施工难度大，耐久性要求高，一旦出现事故，则后果十分严重，修补耗资巨大。同时，不少工业发达国家正面临一些钢筋混凝土结构的基础设施老化的问题，需要投巨额资金进行修补或拆换。目前国际上已广泛认识到，高性能混凝土由于具有高耐久性、高工作性和高强度等特性，用高性能混凝土来替代传统的混凝土结构物和建造在严酷环境中的特殊结构，具有显著的经济效益。美国、日本、法国、加拿大、挪威、英国、德国等国家把高性能混凝土作为跨世纪的新材料，已投入了大量人力、物力进行研究和开发。高性能混凝土至今已在不少重要工程中被采用，并在高层建筑、大跨度桥梁、海上平台、漂浮结构等工程中显示出其独特的优越性，在工程安全使用期、经济合理性、环境条件的适应性等方面产生了明显的效益，因此被各国学者所接受，被认为是今后混凝土技术的发展方向。高性能混凝土是一种新型的高技术混凝土，它是应用现代混凝土科学技术来增加混凝土结构的安全使用寿命，减少因修补或拆除陈旧混凝土结构物造成的浪费和建筑垃圾；高性能混凝土可大量利用工业废渣和矿石，减少自然资源和能源的消耗，减少对环境的污染；高性能混凝土具有优异的工作性能，便于施工，可节省劳力，减少振捣用电，降低环境噪声，等等。因此高性能混凝土是混凝土可持续发展的出路。据此，本书首先提出“绿色高性能混凝土”新概念，作为水泥基材料的发展方向。

高性能混凝土一词是从英文 High Performance Concrete (HPC) 翻译过来的，是近年来一些发达国家基于混凝土结构耐久性设计提出

的新概念的混凝土。区别于传统混凝土，高性能混凝土把混凝土结构的耐久性作为首要的技术指标，目的在于通过对混凝土材料硬化前后各种性能的改善，提高混凝土结构的耐久性和可靠性。1984年，法国公开发表了有关高性能混凝土的论文。1990年5月，在美国马里兰州的 Gaithersburg 城，由美国国家标准与技术研究所（NIST）和美国混凝土协会（ACI）主办了第一届高性能混凝土的讨论会。讨论会将高性能混凝土定义为：靠传统的组分和普通的拌和、浇筑、养护方法不可能制备出的具有所要求的性质和匀质性的混凝土。实际上，在此前10年左右就有一些重要工程使用的混凝土在达到高强度的同时也具有高工作性和耐久性，与后来提出的高性能混凝土的性能要求相符。80年代末期，日本东京大学教授冈村甫开发了一种“不振捣的高耐久性混凝土”，也称之为高性能混凝土。强调高工作性的主要目的是保证成型时无原始缺陷，从而保证混凝土的耐久性。冈村并不强调高强度，认为任何强度等级的混凝土都可制备成高性能混凝土。

“高性能”显然是针对过去不高或“中”、“低”的性能提出的。在不同时期，“高”和“低”的分界线是大不相同的。随着科技的飞速进步与各种要求的不断提高，今日的“高”必然会被新的“高”所代替而成为来日的“低”。用“高”、“低”来命名科技产品，尤其是命名像混凝土这样的大宗材料，是不科学的，也是难以持久的。高性能混凝土这一名词现已“约定俗成”，期望使用一段时间后能找到一个更科学、更合理的新名词取代之。

1993年1月，通过国际和国内联机检索，从1964到1992年只检到公开发表的有关高性能混凝土的论文48篇（包括通过国内能收集到的各种文献手工检出6篇）。而从1994年以来，国内外已举办过多次有关高性能混凝土的学术会议，所公开发表的论文已多得无法统计，可见高性能混凝土发展之迅速。我国自1992年开始针对国内原材料和工艺条件进行高性能混凝土的研究、宣传和开发，并已在桥梁、高层建筑的基础和底层柱、地下构筑物等工程中应用，受到愈来愈多的重视。中国土木工程学会也已将其所设高强混凝土委员会改名

为高强和高性能混凝土委员会。随着高性能混凝土应用范围的扩大，相信会有更多的人员投身到研究、试验、应用、开发的队伍中去，高性能混凝土必将在我国各项基本建设工程中发挥巨大的作用，21世纪的混凝土也必将是高性能混凝土。

作者以几年来的实践为基础，参考了较多国内外文献撰写出本书，希望能由此引起国内广大学者和工程技术人员对高性能混凝土的各项技术进行讨论。书中有以下五点希望能引起读者重视，更希望能得到读者的支持、补充和丰富，使高性能混凝土更健康和迅速地发展，收到更大的效益。

● **扩大高性能混凝土的涵义** 目前国内外学者多数还认为高性能混凝土必须是高强混凝土（大于 C50），但从目前已取得的效果以及从工程安全性与安全使用期等要求来看，高强混凝土必须是高性能混凝土。因此高强混凝土应当包括在高性能混凝土之中，而不是相反。单纯的高强混凝土不一定就具有高性能；受钢筋混凝土结构最小断面的限制，往往也并不需要广泛采用高强度混凝土。如果强调高性能混凝土必须在 C50 以上，则必然大大限制高性能混凝土的应用范围。大量使用的钢筋混凝土建筑物，如低层和多层房屋以及高层房屋的上层构件，又如海工、水工，尤其是在不利环境中的结构物、大体积混凝土等，对强度要求并不高（例如 C30 左右），但对耐久性要求却很高。高性能混凝土恰能满足此要求。因此，高性能混凝土不只是高强度的，而是包括各种强度等级的，其应用范围十分广泛。这也正是高性能混凝土能成为混凝土的发展方向的重要原因。如日本明石大桥 2 号和 3 号大体积柱基，91 d 的设计强度只有 17 MPa（配制强度为 24 MPa），但却是按耐久性设计的，属于高性能混凝土。

● **强调混凝土的可持续发展道路** 提出绿色混凝土和环保型胶凝材料的新概念。

● **加强基础研究的分量** 高性能混凝土在 100~300 年以至更长时期内，不应出现材质的劣化。长龄期性能的保证应立足于反应机理、组成、结构等水泥基材料科学基础研究的成果。为便于正确理解

和加深研究，本书对水泥水化、混凝土的组成和结构、变形性能等作了较详细的讨论。今后应利用现代科学技术手段，更多地结合实际加强高性能混凝土的基础研究。

● **对工作性的重视** 良好的工作性是使混凝土质量均匀、获得高性能因而安全可靠的前提。没有良好的工作性就不可能有良好的耐久性。例如，不均匀的拌和物（离析、泌水）就会造成混凝土分层和不密实，流动性或填充性不足时还可能造成混凝土中出现孔洞、蜂窝等严重缺陷。工作性对混凝土技术和管理现代化有重大影响。良好的工作性可因操作方便而加快施工进度，改善劳动条件，有利于环境保护。因此，对工作性应特别重视。工作性的提高会使混凝土的填充性、自流平性和均匀性得以提高，并为高性能混凝土的生产和施工走向全盘机械化、自动化、计算机控制和机器人操作提供可能性。这是提高工作性的又一重大意义。但工作性的内涵较广，测试方法与量化均不成熟，因此尚需加强研究和改进。使用超塑化剂的水泥流变性能对高性能混凝土的工作性有重要影响，应当给予足够的重视。

● **与高性能混凝土有关的标准和规范的制定** 由于使用了超塑化剂和其他外加剂以及矿物细掺料，采用了低水胶比，现行用于普通混凝土的标准和规范，包括涉及水泥、集料等原材料的标准和规范有许多是不适用的，在推广应用高性能混凝土时不能机械地予以套用。但标准和规范的制定必须有理论和大量而广泛的实践或科学实验数据支持，并在试用的基础上经过广泛讨论和充分论证后予以制定并不断完善，因此目前应注重积累数据和经验。

作者水平有限，不当之处敬请读者指正。

吴中伟 廉慧珍

1999年8月于清华园

# 第一章 概 论

## 第一节 水泥混凝土的发展

水泥混凝土是近现代最广泛使用的建筑材料，也是当前最大宗的人造材料。据不完全统计，世界水泥年产量已超过 15 亿 t，折合成混凝土，应不少于 45 亿  $\text{m}^3$ 。另据介绍，美国 1991 年全国混凝土建筑物总值已达 6 万亿美元之巨。与其他常用建筑材料（如钢铁、木材、塑料等）相比，水泥混凝土生产能耗低，原料来源广，工艺简便，因而生产成本低；它还具有耐久、防火、适应性强、应用方便等特点。因此，在今后相当长的时间内，水泥混凝土仍将是应用最广、用量最大的建筑材料。

高性能混凝土（High Performance Concrete，缩写为 HPC，以下同）是最近十几年出现的混凝土新品种，是经过漫长的发展，在长期研究与实践中创造的至今最完善的混凝土。十多年来，它已在很多重要工程中成功地得到采用，并将在今后逐渐代替近百年来常用的普通混凝土在绝大多数的各类建筑物中使用。有学者预言，HPC 是 21 世纪的混凝土，是近期混凝土技术的主要发展方向。

从几千年前的原始胶凝材料到波特兰水泥混凝土，再发展到高性能混凝土，追溯这种重要材料的演变与发展过程，不仅饶有历史意义，更具有重要的科学技术价值。例如，某些重要性能是怎样逐步提高的，新的品种是怎样不断产生的，材料品种和性能的改进是怎样推动工程的改进和发展的，以及材料发展史中占据显著地位的复合化思想和机理，等等。以上这些都能使水泥混凝土科技工作者得到启迪，促进水泥基复合材料科学技术的发展，使高性能混凝土从完善的混凝土迈向理想的混凝土。

## 一、胶凝材料发展史

黏土是天然的胶凝材料，最早被用来加水铺筑地坪，胶结石块，填洞抹面。考古学家从先民遗址中曾发现大量用黏土胶结卵石作为居室木柱的基础（如西安半坡遗址），还发现过用草筋增强泥土抹平的洞室墙面、灶台与火塘。更有意义的是，在甘肃等地先民故居遗址中发现了有意识地用火焙烧过的草筋泥墙与坑台，至今 5 000 多年依然坚固发亮，被命名为陶质墙面。经过分析，发现其中还含有  $\text{CaCO}_3$ 。有人据此提出 5 000 年前我国已有石灰这种至今仍广泛应用的胶凝材料的假设。用草筋来增强黏土材料，可说是增强材料这一重要的复合化思想的开端；而焙烧陶质墙面则被认为是后世烧制红砖的先驱，也是建筑材料技术的一次重要的突破。

关于石灰的最早记载见于《左传》。当时用介壳烧灰，名为蜃灰，用作埋葬尸体的干燥剂。到战国时代，石灰被加入黏土中制成二合土、三合土之类的复合胶凝材料。从汉代起，石灰开始大量用于建筑工程。缪纪生等曾用近代分析方法研究北京顺义汉墓石灰，证明其纯度及煅烧技术与近代的石灰相同。可见在 1 800 年前我国已掌握大规模生产石灰的技术。一千多年来，石灰作为主要的胶凝材料，广泛用作砌筑石灰砂浆、石灰黏土砂石三合土地坪路面、三七灰土、四六灰土地基，以及在夯土建筑中加入石灰以增加强度与抗水性能。石灰还与一些有机材料复合来提高耐久、防潮、抗水、抗冲击等性能。据历史记载，曹操曾将植物油掺入石灰中建造了铜雀台。宋代曾用糯米汁石灰砌筑了安徽和州城墙。明代南京城墙也使用糯米汁石灰，并用桐油石灰封顶以增强防水抗渗的能力。明代《天工开物》记载，将石灰 1 份、黄砂 2 份，用糯米、羊桃藤汁拌匀制作的贮水建筑，有很好的防渗耐久性能。清乾隆年间曾用糯米、石灰加牛血建造了永定河河堤，长达数里。可见，我国有机—无机复合胶凝材料已有长久的历史，其功效也经过数百年的考验，有一定的历史意义。

石膏作为储藏量丰富的矿石，在古埃及就得到了使用。石膏经过



煅烧，与砖粉混合用于砌筑。金字塔等古建筑曾用石膏砌筑。石膏和石灰不能在水中凝结硬化，属于气硬性胶凝材料。

古罗马人、亚述人和巴比伦人都都将石灰和黏土混合用于建筑中。罗马有丰富的火山灰资源。古罗马人发现了在维苏威火山附近的波佐利（Pozzuoli）以及罗马北部和东部厚厚的地层里的一种带有巧克力色的沙土，称之为“坑沙”，现代人称做火山灰。他们把这种火山造成的粉末与石灰混合料浆加入加工石料的残渣、砖块、天然卵石等，就会凝固成坚实的磐石，并且不透水。这就是最早的混凝土<sup>[1-1]</sup>。使用石灰火山灰这种水硬性胶凝性材料，使气硬性石灰的功能大大提高，是胶凝材料史上的一次大突破。混凝土的发现、完善和广泛应用，是罗马建筑成就的重要条件<sup>[1-2]</sup>。从公元前二世纪起，古罗马人就已能用各种配合比的混凝土制成基础、夹心墙和整体的券、穹隆——最早的壳体结构。奥古斯都时代，罗马住宅的墙壁采用在模板中交替浇筑混凝土料浆和铺放集料，使古罗马的住宅发展成高大的多层形式。到公元二世纪，使用混凝土的技术大为熟练和有把握，不仅在普通建筑中广为应用，而且用以建造了许多大型的公共建筑，这些建筑至今仍有保存。如罗马大圆剧场（Colosseum），长轴 188 m，短轴 156 m，承重墙上面是非常复杂的混凝土筒形拱和交叉拱。又如著名的万神庙，被称为帝国建筑结构的真正杰作，其圆形平面环形混凝土基础上是厚 6.2 m 的凝灰岩和火山灰的混凝土墙，混凝土筑的穹隆顶直径达 43.2 m，顶端距地面 43.2 m；墙和穹顶都用了混凝土大发券，并且在不同高度的墙体混凝土中使用了不同的集料（基础中用凝灰岩，穹顶中用浮石），说明古代罗马人已使用了轻混凝土。罗马城的阿米里也（Amilieu）仓库长 0.5 km，墙身和拱顶都是混凝土的。此外还在内部空间极复杂的大型浴场也使用了这种火山灰—石灰混凝土<sup>[1-2]</sup>。罗马 Caligula 皇帝时期，用石灰和火山灰以 1:2 配合，成功地建造了那不勒斯海港。经现场观察，至今海港虽然被海浪磨光了表面，长满青苔，但其混凝土却完好无损，数百米长的墙几乎无一裂缝。这说明，这种胶凝材料不仅有水硬性，而且有极好的耐

久性。以上实例对于现代胶凝材料增进耐久性的研究有重要意义。另外,一些石灰—火山灰砂浆与混凝土建成的桥梁和渡槽,历时2 000多年,至今仍然完好且能使用。

当时使用混凝土建造房屋需要大量劳动力,因而非常适合于奴隶众多的罗马帝国。罗马帝国后期,奴隶减少后开始大量使用自由民和半自由民,需要使用大量劳动力的混凝土工程就显得很昂贵了。至中世纪,混凝土的技术全面衰退,直到18世纪中期才有所发展。英国的 Smeaton J 在 Cornish 海湾外用石灰—火山灰砂浆成功地建成了耐海水的 Eddystone 灯塔。该灯塔饱受海浪冲刷,环境恶劣,但至今仍完好<sup>[1-3]</sup>。许多罗马时代的混凝土,如建于公元70~82年的古罗马竞技场,长轴187 m,短轴126 m,占地204 hm<sup>2</sup>,可容纳5万名观众,作为斗兽和斗剑的场所,有时还需放水淹没。公元4世纪初,罗马城中有1 000家公共浴室,最大的面积达110 000 m<sup>2</sup>,能容纳3 200人沐浴。另外,引水渡槽、桥梁、围堰等至今还遗存200处。其中引水渡槽工程十分浩大,从92 km外引水进罗马城,共有11座渡槽。建造工程自公元前310年到公元前226年,都是用石灰加磨细凝灰岩与浮石凝灰岩以1:3.5~1:4.5建成。上述石灰—火山灰砂浆与混凝土建成的桥梁和渡槽,历时2 000多年,至今亦完好仍能使用。这是石灰—火山灰胶凝材料具有卓越耐久性的最有力证据。2 000年后的今天,混凝土耐久性问题却一直被认为是技术上未能解决的难题,混凝土耐久性指标被定在30年到50年,最多也不过100年到200年,岂不发人深省!

2 000年前这种用火山灰—石灰制作的混凝土不仅促进了罗马建筑的发展,而且这种混凝土优异的耐久性为后世混凝土的发展提供了宝贵的经验。古罗马建筑之所以耐久,除归功于耐久性好的水硬性胶凝材料外,还在于优良的设计、施工技术。正如公元77年 Pimius 论及的,优良建筑必须“用铁锤夯结实基础与墙体”。这也说明用大力普遍捣实来保证密实性的重要。Grant M 在“The World of Rome”一书中描述说,当时的建筑师们“精心挑选,精心准备,精心搅拌。对

极好的廉价的火山灰的使用结果使古罗马的墙壁建筑发生了变革。”此外，古罗马人还采用了截断毛细孔、复合使用有机外加剂等技术。

我国与印度在古代灌溉工程中也曾将人造火山灰——烧黏土或红砖粉拌在石灰中，得到水硬性胶凝材料。这虽与古罗马人利用天然火山灰的功能相同，但从技术发展的意义上来说，仍可算是一次进步。我国古代也有用有机—无机复合提高胶凝材料耐久性的记载。如前述明代《天工开物》记载的贮水建筑和清乾隆年间建造的永定河河堤，其功效也经过数百年的考验。

## 二、从波特兰水泥到高性能混凝土

进入 18 世纪以后，火山灰—石灰体系的混凝土因凝结缓慢和早期强度低而逐渐不能适应社会生产迅速发展的需要。有人用含较多黏土质的石灰石粉煅烧得到具有一定水硬性的石灰，名为水硬性石灰。还有人用泥灰岩（含较多黏土质的石灰石）直接烧成水硬性石灰，无须粉磨，经过消解直接应用。后来又有人发现，如提高煅烧温度，将不能消解的石灰块磨细，能够得到强度与水硬性更好的胶凝材料。1796 年，英国 Parker J 用黏土质石灰石煅烧而制得水硬性水泥，称为天然水泥。虽然这种水泥和古罗马所使用的胶凝材料并不同，但因也具有水硬性，故在欧洲曾被误称为“罗马水泥”<sup>[1-3]</sup>。差不多与此同时，在美国罗森代尔（Rosendale）和路易斯维尔（Louisville）也发现了一种黏土含量适当的石灰石，被用来烧成天然水泥并称为罗森代尔水泥。天然黏土质石灰石的成分并不稳定。1913 年法国的 Vicat L J 用石灰石和黏土加水湿磨成均匀的混合物，经过煅烧制成了人工水硬性石灰，被认为是近代波特兰水泥的雏形。1824 年，英国里兹的 Aspdin J 取得了波特兰水泥的专利。尽管当时的煅烧并未达到能够生产出真正的硅酸盐水泥的温度，但是他首创了波特兰水泥的名称，在市场上获得了很大的成功<sup>[1-4]</sup>。1885 年，Isaa Johnson 主张将生料的煅烧温度提高到熟料烧结的温度。1886 年，美国首先用回转窑煅烧熟料，使波特兰水泥进入了大规模工业化生产阶段，混凝土的

用量和使用范围也日益扩大。用钢筋来增强混凝土以弥补混凝土抗拉强度和抗折强度低的缺陷，几乎和水泥混凝土的使用同时出现。钢筋混凝土计算方法的建立，则大大促进了混凝土的应用范围。1896年，法国 Feret 最早提出了以孔隙含量为主要因素的强度公式。1919年，美国 Abrams D 通过大量试验提出了著名的水灰比定则，成为混凝土材料性能研究的一次重要发展。随后就出现了配合比设计法和各种工艺规程，使混凝土强度、耐久性以至均匀性得到了保证，为混凝土材料可靠地在工程中广泛应用提供了依据。

波特兰水泥在技术上的特点是：通过人工配料，将其化学成分严格控制一定范围之内，煅烧到烧结温度，能够生成硅酸三钙 ( $C_3S$ ) 与硅酸二钙 ( $C_2S$ ) 等化合物，研磨达到一定细度。波特兰水泥作为一种工业产品，必须在严格的生产程序下生产出，质量有保证，能够广泛而稳定地供应市场。它是在加水拌和后具有流动性与可范性，随时间而凝结硬化达到要求的强度和耐久性的无机水硬性胶凝材料。到 1886 年，美国首先用回转窑煅烧熟料，波特兰水泥从此走上了大规模工业化生产的大道。此后，品种和性能的不断扩大和改进，为其在工程中广泛应用准备了条件，成为现代不可缺少的重要建筑材料。现在，水泥这个名词已被波特兰水泥所独享。

自从水泥问世之后，很快就出现了水泥砂浆和水泥混凝土，并在其中配置钢筋，先用于制作花盆和容器等。1850 年前后，法国人取得了钢筋混凝土的专利权。随后，在欧美几个国家通过试验逐步建立了钢筋混凝土结构的计算公式。到 19 世纪末，出现了钢筋混凝土设计规范，分别用于各自国家设计钢筋混凝土工程。当时对混凝土材料的性能和如何正确使用还了解得很少。

100 多年来，混凝土技术经历了许多重大的变革。1928 年，法国的 Freyssinet E 发明了预应力锚具，天才地创造了预应力钢筋混凝土技术。它充分利用了近代科技提供的混凝土与钢筋的高强度等优越性能，发挥了两种材料共同作用的复合功能，为减小结构断面、增大荷载能力、提高抗裂和耐久性能等起了卓越的作用，使长跨、高耸、重

载等结构使用钢筋混凝土作为主体材料成为可能。这是混凝土技术的一次飞跃，大大推动了建筑工程的进步。

水泥混凝土外加剂使用的历史很长。如古罗马人用动物油脂、乳液和动物血来改善混凝土的工作性和耐久性，我国很早就在使用动物血、桐油、糯米汁等来改善砂浆的性能。20世纪30年代末，美国发明的松脂类引气剂和纸浆废液减水剂使混凝土的耐久性、流动性得到前所未有的提高，在工程中迅速得到采用。也在这个时期，德国在纸浆废液中提取出了木质素磺酸盐减水剂。在水泥生产中偶然发现，用牛油作助磨剂，所制混凝土有非常好的抗冻性，美国就发明了松脂皂引气剂。此后，萘磺酸盐甲醛缩合物、三聚氰胺等高效减水剂先后制成并得到应用。这些化学外加剂现已成为混凝土的必要组分，被认为是预应力混凝土技术以后的又一次技术大突破。当前，已很少有不使用外加剂的混凝土。

其他重大的发展还有：20世纪30年代，美国为开发中西部水利而兴建不少混凝土大坝工程时，采用集中拌和的大型化工厂生产方式，为近代盛行的预拌混凝土工业奠定了基础。40年代，德国将聚氯乙烯（PVC）掺入混凝土中以改善其脆性，提高抗渗、抗蚀能力，首创了聚合物混凝土。到60年代，美国发明了聚合物浸渍混凝土。60年代，前苏联开发了钢丝网水泥，中国则用玻璃纤维增强水泥。此后，各国纷纷开发钢纤维、碳纤维、聚合物纤维作为增强材料，使水泥砂浆与混凝土的性能由于增强的结果而大为改观。1980年，美国首先提出水泥基复合材料（Cement-based Composite Materials，缩写为CBCM）的名词，突出了复合化的地位，现已被人们所接受，成为以水泥为基材的各种材料（包括各种砂浆和各种混凝土）的总称。例如，普通混凝土、轻混凝土、加气混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土、钢丝网水泥、石棉水泥、玻璃纤维增强水泥、聚合物混凝土、聚合物浸渍混凝土，以及根据性能要求而发展起来的高强度混凝土、高流动性混凝土、耐热混凝土、耐火混凝土、膨胀混凝土、防水混凝土，等等。随着近代材料科学的发展，水泥基材料的复合化使品种不

断增加，性能不断改进，满足了土建工程不断提高的需要。

近百年来，水泥与水泥基材料的总的发展趋势是不断提高强度。这是由于使用部门不断提高强度的要求所致。尤其是近 50 年来，片面提高强度而忽视其他性能的倾向造成水泥生产向大幅度增加细度和硅酸三钙、铝酸三钙的含量发展，水泥标号或 28 d 胶砂抗压强度从 30 MPa 猛增到 60 MPa，并越来越多地使用 50 MPa 以上的混凝土。提高混凝土强度的办法除采用高标号水泥外，更多的是增加单方水泥用量，降低水灰比及单方加水量。因此混凝土的流动性随之下降，甚至出现必须依靠强力振捣才能保证密实性和均匀性的干硬性混凝土。到 80 年代前后，混凝土耐久性问题愈来愈尖锐。因混凝土材质劣化和环境等因素的侵蚀作用，常出现混凝土建筑物破坏失效甚至崩塌等事故，造成巨大损失。有鉴于此，加上施工能耗、劳动与环境保护，尤其是均匀性对工程安全所具有的的极端重要性，因此对混凝土的工作性提出了愈来愈高的要求。传统的单一高强化的主流思想受到批判，高性能混凝土逐渐成为合理的、科学的发展路线。高性能混凝土已成为当前的完善混凝土 (Perfect concrete)，但它也还不是理想混凝土 (Ideal concrete) 或理想的水泥基复合材料。

## 第二节 高性能混凝土的定义

高性能混凝土这种新型混凝土是在 20 世纪 80 年代末 90 年代初才出现的。自从波特兰水泥出现后，水泥基材料经历了漫长的发展过程。经过无数次改革、创造与发明，其科技内容已十分丰富。早在 30 年前，28 d 抗压强度超过 50 MPa 的高强度混凝土已较多地在工程上应用。有些远见卓识的专家考虑到某些工程的需要，在提出高强度指标的同时，也提出了对耐久性和工作性的要求。但当时还没有一个为大家所接受的名词，更没有定出指标和规程。因此也有人认为，高性能混凝土是高强度混凝土的进一步完善。

高性能混凝土名词的出现至今也只有 10 年，不同国家、不同学

者依照各自的认识、实践、应用范围和目的要求的差异，对高性能混凝土有不同的定义和解释，例如：

1. 美国国家标准与技术研究所（NIST）与美国混凝土协会（ACI）于1990年5月召开的讨论会上提出：高性能混凝土是具有某些性能要求的匀质混凝土，必须采用严格的施工工艺，采用优质材料配制的，便于浇捣，不离析，力学性能稳定，早期强度高，具有韧性和体积稳定性等性能的耐久的混凝土，特别适用于高层建筑、桥梁以及暴露在严酷环境中的建筑结构。

2. 1990年美国 Mehta P K 认为：高性能混凝土不仅要求高强度，还应具有高耐久性（抵抗化学腐蚀）等其他重要性能，例如高体积稳定性（高弹性模量、低干缩率、低徐变和低的温度应变）、高抗渗性和高工作性。

3. 1992年法国 Malier Y A 认为：高性能混凝土的特点在于有良好的工作性、高的强度和早期强度、工程经济性高和高耐久性，特别适用于桥梁、港工、核反应堆以及高速公路等重要的混凝土建筑结构。

4. 1992年日本的小泽一雅和冈村甫认为<sup>[1-8]</sup>：高性能混凝土应具有高工作性（高的流动性、黏聚性与可浇筑性）、低温升、低干缩率、高抗渗性和足够的强度。

5. 1992年日本 Sarkar S L 提出：高性能混凝土具有较高的力学性能（如抗压、抗折、抗拉强度）、高耐久性（如抗冻融循环、抗碳化和抗化学侵蚀）、高抗渗性，属于水胶比很低的混凝土家族。

不同的工程和应用部门对于高性能混凝土也有不同的要求，会提出不同的性能指标，例如：

1. 美国战略公路研究计划（SHRP）提出高性能混凝土用于公路工程应满足下列要求：

- (1) 水胶比不大于 0.35；
- (2) 耐久性指数大于 80%；
- (3) 4 h 抗压强度高于 17.2 MPa，或 24 h 抗压强度高于

34.5 MPa, 或 28 d 抗压强度高于 68.9 MPa。

2. 用于桥梁, 尤其是大跨度桥梁的高性能混凝土应满足下列要求:

- (1) 水胶比不大于 0.4;
- (2) 强度高于 41.4 MPa;
- (3) 徐变率低。

3. 高层建筑要求混凝土具有高强度、高弹性模量、轻质、低徐变率、较高的工作性、早期强度与耐久性高的特性, 使长期以来的建筑物安全使用期从 30~50 年提高到 100 年以上。

4. 港工工程要求混凝土具有高耐久性(抗腐蚀、抗冻融循环等)、高抗渗性、体积稳定性好、强度与抗冲击疲劳性高。

5. 重要水工建筑物(包括大体积混凝土工程)对耐久性与体积稳定性有很高的要求, 而对于强度和早期强度要求不高。水工建筑常要求有很长的安全使用期。在寒冷、干热以及高速水流冲刷等条件下应用的高性能混凝土, 尤其需要某些特殊性能。由于水工混凝土的工程量常较大, 工作性对均匀性、工程安全性以及施工经济性有极大影响, 因此对工作性常有较高的要求。

法国为发展高性能混凝土而设立的“混凝土新方法”国家科研项目中提出:“高性能混凝土应该是要求长期耐久性的一切工程所必须采用的, 即使结构上不要求应用高强度混凝土。”这说明高性能混凝土不一定要求高的强度指标。

综合以上论点, 对高性能混凝土可以提出以下定义:

高性能混凝土是一种新型高技术混凝土, 是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术制作的混凝土, 它以耐久性作为设计的主要指标。针对不同用途要求, 高性能混凝土对下列性能有重点地予以保证: 耐久性、工作性、适用性、强度、体积稳定性、经济性。为此, 高性能混凝土在配制上的特点是低水胶比, 选用优质原材料, 并除水泥、水、集料外, 必须掺加足够数量的矿物细掺料和高效外加剂。



高性能混凝土不仅是对传统混凝土的重大突破，而且在节能、节料、工程经济、劳动保护以及环境等方面都具有重要意义，是一种环保型、集约型的新型材料，可称为“绿色混凝土”，它将为建筑工程自动化准备条件。

总之，高性能混凝土是近代水泥基材料科学与工程学取得的新成就，是混凝土技术长期实践的结果，在性能上已达到了完善的程度。在科学技术飞速发展的今天，高性能混凝土的性能将不断提高，在土建工程中的应用范围将迅速扩大，并将取得更多更大的效益。材料与工程不断相互促进，将为人类带来更大的利益。

### 第三节 高性能混凝土的研究开发与可持续发展

#### 一、高性能混凝土的研究开发现状

十多年来，很多国家都对高性能混凝土进行了大量的研究开发工作。研究开发的目的是使其得以在土建工程中推广应用。推广范围愈宽，应用数量愈多，效益就愈大。美国 NIST 召开的 1990 年讨论会上提出应用高性能混凝土可以获得效益的工程如下：

1. 首要类——已得到应用的有柱、楼板、大跨度桥梁、抢修停车场、道面。可能开发应用的有基础、后张预应力板、冷天施工（1995 年在我国已用于柱）、加快施工、化工和食品加工厂、危险废弃物贮存、预制与预应力混凝土、公共卫生结构物、抗震、抢修工程等。

2. 次要类——已得到应用的有离岸海上（漂浮）建筑。可能开发应用的有军用结构、高速铁路、离岸海上（重力式结构）建筑（1995 年在北欧已用）、隧道、救助结构等。

3. 特殊结构——可开发应用的如月球混凝土、自动化施工建筑等。

上述范围只是针对高强度的高性能混凝土而言的，未能包含对耐