

混凝土的配制与 施工技术

*HUNNINGTU DE PEIZHI YU
SHIGONG JISHU*

侯永生 刘桂君 王联芳 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

混凝土的配制与施工技术

侯永生 刘桂君 王联芳 编著

中国铁道出版社

2010年·北京

图书在版编目(CIP)数据

混凝土的配制与施工技术 / 侯永生编著. —北京:
中国铁道出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-113-11397-1

I. ①混… II. ①侯… III. ①混凝土—配制②混凝土—施工技术 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 084743 号

书 名:混凝土的配制与施工技术
作 者:侯永生 刘桂君 王联芳 编著

策划编辑:江新锡
责任编辑:江新锡 黄艳梅 电话:010-51873018 电子邮箱:jxinxi@sohu.com
封面设计:崔 欣
责任校对:张玉华
责任印制:李 佳

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)
网 址:<http://www.tdpress.com>
印 刷:三河市华丰印刷厂
版 次:2010年6月第1版 2010年6月第1次印刷
开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:18.75 字数:458千
书 号:ISBN 978-7-113-11397-1
定 价:40.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

在从事混凝土的生产与施工、质量检测的过程中,深感建筑工程施工技术人员对混凝土相关技术了解不多、重视不足,甚至设计混凝土配合比的试验人员对混凝土的理论掌握不够深入,在混凝土施工中存在的不正常现象不能分析原因,极少能够做到事前控制与过程中调整。

目前有关混凝土方面的图书大致分为四类,第一类是有关混凝土原材料的,水泥、外加剂类占大多数,从某种材料单一分析其对混凝土的影响,重点多在产品本身技术的提高与性能改进;第二类是有关配合比设计的,罗列了各种不同种类混凝土的配合比设计方法,重在配合比的设计计算;第三类是有关混凝土施工,论述了不同施工条件下混凝土工程的施工工艺,第四类是有关混凝土检测的,多是关于混凝土原材料与混凝土的各种检测方法步骤的描述。

作为一个混凝土施工过程中的技术人员,应该对混凝土的发展历程、原材料对混凝土的影响、混凝土性能及对原材料的要求、配合比设计的原理及配合比改进优化技术、常用混凝土的配合比设计方法、混凝土施工技术及常见质量问题的分析处理以及成品混凝土的检测都有一定的掌握。《混凝土的配制与施工技术》就是希望给予参与混凝土施工的技术人员比较全面、实用而又并非纯理论的提示与帮助。

现代混凝土自19世纪二三十年代发明以来,走过了从塑性混凝土到干硬性混凝土,再到由大流动高强度混凝土向高性能混凝土过渡的发展道路。混凝土因其成本低、取材方便、施工容易、适应环境广泛已成为当代最主要的建筑材料,其产量、技术进步及其在土木工程中的重要性日新月异。我国混凝土年产量占世界之首,2008年我国水泥产量达到14亿吨,混凝土的生产量约在40亿立方米以上。但混凝土材料是一种多种材料混合的不均匀体,混凝土技术在很大程度上仍然是一种经验技术,混凝土一旦成型固化后出现质量问题,不仅维修费用高昂,而且更多情况下难以补救。因此,混凝土的质量直接关系着混凝土的发展,而对混凝土质量影响最大的就是混凝土的配合比设计与混凝土的施工。混凝土的配合比设计是混凝土生产的开始,直接决定着原材料的选择、利用、成本、性能,而混凝土的施工包括了混凝土的拌制、运输、浇筑、养护,对混凝土的强度、耐久性、使用功能的形成起着关键的作用。

本书共分为十章,主要介绍混凝土的配制技术、施工技术、质量检测、通病预防。第一章主要介绍混凝土的历史与发展以及目前较注重的高性能混凝土、活性

粉末混凝土、智能混凝土、生态混凝土。第二章分新拌混凝土性能、物理力学性能、耐久性能、变形性能和混凝土结构五个方面介绍混凝土的主要性能以及影响各种性能的因素。第三章主要介绍混凝土的各组分材料的性质及其对混凝土性能的影响。第四章主要介绍了混凝土配合比设计的发展沿革以及配合比设计的方法步骤。第五章介绍混凝土配合比设计中最基本的四组份(水泥、砂、石、水)体系、五组份(水泥、砂、石、水、外加剂)体系、六组份(水泥、砂、石、水、外加剂、掺合料)体系普通混凝土配合比设计的基本方法。第六章介绍几种特种性能、特种材料、特种施工方法的混凝土配合比设计。第七章介绍了配合比设计的相关技术,其中主要介绍了正交试验设计及一元回归分析。第八章对泵送混凝土、大体积混凝土及寒冷、炎热条件下混凝土的施工注意事项进行了分析。第九章主要介绍了常用的几种混凝土质量无损检测方法。第十章对断桩、泵送不良、裂缝、蜂窝麻面等混凝土经常发生的质量事故及通病介绍了产生的原因、处理方法及预防措施。

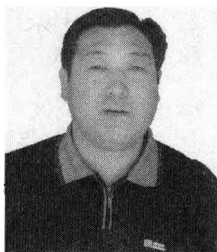
书的第一、二、四、五章、第三章第1、4、5节、第六章1~3节、第八章第1、2、4节由侯永生编写。第六章第6节、第七章、第九章第1、4、6节及附录I~J由刘桂君编写。第三章第2、3节、第六章第4、5节、第八章第3节、第九章第2、3节、第十章及附录A~H由王联芳编写。

由于书中涉及面广、内容较多,编者知识与经验有限,不足和错误之处,敬请指正。

编 者

2010年1月

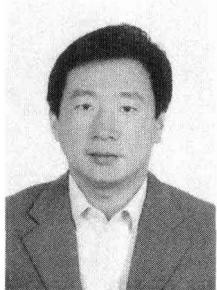
作者简介



侯永生(1971~):男,工程硕士,高级工程师。毕业于太原理工大学,曾担任施工企业试验室主任、商品混凝土公司总工、外加剂生产厂顾问,现任中建市政建设有限公司试验中心总工程师,石家庄铁道学院建筑工程领域工程硕士研究生导师。多年从事公路、普通铁路、高速铁路、房建、地铁工程试验检测与混凝土施工工作。发表有计算机、掺合料、养护剂、混凝土、工程加固等方面论文七篇,参与研究的混凝土掺合料开发课题及高性能混凝土施工工法鉴定为国内领先水平。



刘桂君,女,1959年12月12日生,高级工程师。2003年7月取得河北科技大学化工专业本科学历。河北省交通规划设计院试验检测室主任。从事公路工程试验检测、路面技术咨询、工程课题研究等工作。近年来在国内核心期刊发表专业论文五篇,完成河北省交通厅、交通运输部课题八项,多项课题研究水平达到国际先进水平,并获得省科技进步奖两次,中国公路学会进步奖两次,并参与编写了两部河北省地方标准。



王联芳,男,1971年10月25日生,高级工程师。1992年7月毕业于石家庄铁道学院桥梁系建材专业;2010年3月取得同济大学交通运输工程专业工程硕士学位。在河北省交通规划设计院从事公路工程试验检测、路面技术咨询、工程课题研究等工作。近年来在国内核心期刊发表专业论文八篇,主持或参与完成河北省交通厅、交通运输部课题七项,多项课题研究水平达到国际先进水平,并获得省科技进步奖两次,省厅科技进步奖五次,并参与编写了一部河北省地方标准。

目 录

第一章 混凝土的发展与展望	1
第一节 远古时代的混凝土.....	1
第二节 现代混凝土.....	3
第三节 高性能混凝土.....	6
第四节 未来混凝土展望	10
第二章 混凝土的性能	16
第一节 新拌混凝土性能	16
第二节 物理、力学性能.....	20
第三节 耐久性能	25
第四节 变形性能	44
第五节 混凝土的结构与性能	48
第三章 混凝土原材料	50
第一节 水 泥	50
第二节 骨 料	56
第三节 水	60
第四节 掺和料与矿物外加剂	62
第五节 混凝土外加剂	74
第四章 混凝土配合比设计的方法	90
第一节 混凝土配合比设计的历史与发展	90
第二节 混凝土配合比设计的基本原理	91
第三节 混凝土配合比设计的基本步骤	93
第五章 常见普通混凝土配合比设计	98
第一节 普通混凝土配合比设计	98
第二节 掺和料混凝土配合比设计.....	107
第六章 特种混凝土配合比设计	113
第一节 泵送混凝土配合比设计.....	113
第二节 喷射混凝土配合比设计.....	117
第三节 抗渗混凝土配合比设计.....	119
第四节 抗冻混凝土配合比设计.....	121
第五节 钢纤维混凝土配合比设计.....	124
第六节 高性能混凝土配合比设计.....	127
第七章 混凝土配合比设计相关技术	133
第一节 砂石含水率排水法快速测定.....	133

第二节 混合骨料获得所要求级配的几种方法	133
第三节 黄金分割法在材料掺量优选中的应用	135
第四节 正交试验设计	136
第五节 数据的回归分析与最小二乘法	154
第八章 混凝土施工技术	158
第一节 泵送混凝土施工技术	158
第二节 寒冷条件下混凝土施工技术	167
第三节 炎热条件下混凝土施工技术	173
第四节 大体积混凝土的施工技术	177
第九章 混凝土的无损检测	187
第一节 无损检测技术概述	187
第二节 回弹法	190
第三节 超声回弹综合法	198
第四节 超声波测缺陷	208
第五节 钻芯法	221
第六节 后装拔出法	226
第十章 混凝土质量事故与处理	232
第一节 断 桩	232
第二节 不能泵送	234
第三节 混凝土不凝固	236
第四节 裂 缝	237
第五节 蜂窝麻面、空洞漏筋	241
附 录	243
A 法定计量单位	243
B 非法定与法定计量单位换算表	245
C 检测数据的读取、记录和处理	247
D 常用材料的密度和容重	249
E 常用材料的比热容	250
F 常用材料的导热系数	252
G 筛子规格对照表	252
H 混凝土的热工计算	253
I 常用正交表	263
J 常用统计学用表	273
参考文献	285

第一章 混凝土的发展与展望

第一节 远古时代的混凝土

人类在建筑工程中使用的建筑材料,尤其是建筑胶凝材料基本上经历了从天然到人造,从单一到复合,从无机到有机,从气硬性胶凝材料到水硬性胶凝材料,从低强度到高强度,从小规模到大工业化发展的从低级到高级的发展历程。

一、黏土胶结材料

黏土是人类最先使用的天然胶结材料,在公元前 8000 年左右的中东、古埃及地区已使用日晒土坯。将黏土用水拌和成泥,成型后用太阳晒干作为墙体材料。在我国,距今 5 000 年前的龙山文化遗址中也大多发现日晒土坯。至今,我国北方地区仍有使用模具压制土坯作为墙体的建筑材料。

七千年前新石器时代早期,远古先民就利用黏土建造房屋。他们先从地面向下挖一个坑,其大小深浅根据需要而定。然后在平整过的地面挖柱洞,柱洞的位置和数量根据房屋的大小而定。然后用木柱围成墙体,用藤条和竹篾捆扎,再用草拌泥进行里外填充。用这种方法建造的墙壁,考古学上叫做木骨泥墙(如河南省舞阳县北舞渡镇贾湖村发现的贾湖遗址)。六千多年前的仰韶文化遗址中发现房屋泥墙的外部多被裹草后点燃烘烤过,来加强其坚固度和耐水性。在西安半坡遗址中发现用黏土胶结卵石作为木柱的基础。从黏土胶结材料到草筋增强黏土胶结材料的使用,体现了人类从利用天然胶结材料到通过复合手段来增强使用效果的进步。

二、石灰的开发利用

公元前 2000 年~3000 年,埃及、希腊以及罗马等国开始利用经过煅烧所得的石膏或石灰来配制砌筑砂浆。公元前 2500 年建造的埃及胡夫金字塔就是用天然的石灰砂浆做胶结材料,将大块的石块粘结砌成的,在我国,五千年前的龙山文化时期,人们就认识并烧制出石灰,龙山时期的房屋建筑,在考古学上称作“白灰面建筑”。它是在房屋内的居住面以及内墙根处,都普遍地抹上一层白石灰面,使屋内显得洁白、干净、美观,而且还有防潮、防虫等作用。河南龙山文化、陶寺龙山文化和客省庄二期文化的许多遗址里都发现有白灰面房子。如河南临汝煤山遗址、永城黑垆堆遗址、后岗遗址等。除白灰面房子以外,考古还发现有烧制石灰的窑、生石灰料和大量剩余的熟石灰,表明龙山时期的人们已经掌握了烧制石灰的技术。在汉朝(公元 2 世纪),人工烧制石灰已达到相当高的水平,与当今石灰没什么差别。石灰的开发利用表明了人类通过煅烧主动发明建筑材料的开始,也是人类发现气硬性胶凝材料的起始。

三、从石灰胶凝材料的无机复合到有机复合

石灰在建筑上除了用作抹面和砌筑石灰砂浆外,还用于和黏土、砂、石制成灰土、二合土、三合土用于地坪、路面和建筑基础等方面。此外,石灰除了和无机材料复合外,也经常和少量糯米汁、桐油、红糖、猪血、牛血等有机材料复合以提高强度、抗水性、韧性及耐久性。建于元末明初(十四世纪中期)的福建裕昌土楼共有五层,房室 270 间,历经六百多年至今仍存。其墙体由黏土、石灰、石子夯筑而成,是石灰土结构的代表之作。夯筑时,先在墙基挖出又深又大的墙沟,夯实在,埋入大石为基,然后用石块和灰浆砌筑起墙基。接着就用夹墙板夯筑墙壁。土墙的原料以当地黏质红土为主,掺入适量的小石子和石灰,经反复捣碎,拌匀,做成俗称的“熟土”。一些关键部位还要掺入适量糯米饭、红糖,以增加其强度和韧性。

四、石灰—火山灰胶凝体系的发明

1978 年,被学术界评定为 20 世纪中国百项考古大发现之一——距今 5 000 年的大地湾遗址被发现,它位于甘肃省天水市秦安县境内。考古人员在大地湾遗址发现了一片面积达 130 m² 的坚硬平滑地面,是世界上最古老的混凝土。整座房屋的地面共分四层。最下面与原始土壤接触的一层是大约 10 cm 厚的夯土层,第三层是大约 15 cm 的红烧土,它起到隔潮保温的作用,第二层是大约 20 cm 厚的胶结材料,也就是类似现代砂子、水泥混合在一起的混凝土,最上面一层是 2~3 mm 厚的原浆磨面。专家鉴定,这片灰青色的地面不但含有与现代混凝土相同的“硅酸钙”成分,胶凝材料有水泥的成分,平均每平方厘米抗压强度在 120 kg 左右,相当于今天 C10 等级的混凝土。而且比重比较小,跟现代的轻型混凝土有点相近。经研究,这种胶凝材料取材于当地附近山坡上的一种石头——料礓石经煅烧磨碎后所得,这种古老的方法现在在当地仍被人们用来制作炉台和炕面。

日本《产经新闻》曾报道,日本鹿岛公司等 3 家企业联合开发出可在世上存留上 1 万年的“下一代”新型混凝土“EIEN”。研究“EIEN”的灵感来源于距今 5 000 多年的中国新石器时代大地湾遗址中发现的混凝土,研究显示,挖掘出来的古代“混凝土”因为化学反应,表面的缝隙被填实,有效阻止了水和盐分向内部渗透,从而延缓了腐蚀作用。“EIEN”正是利用这一原理,在材料中加入特殊矿物,使混凝土表面产生同样的化学反应。

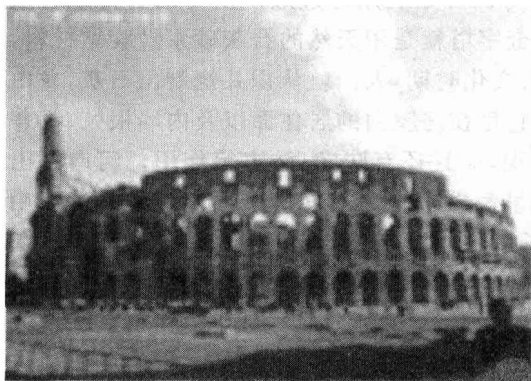


图 1-1-1 古罗马时期的混凝土建筑

古罗马是使用石灰—火山灰胶凝体系生产混凝土技术规模最大的国家。古罗马建筑的类型很多,有罗马万神庙、维纳斯和罗马庙以及巴尔贝克太阳神庙等宗教建筑,也有皇宫、剧场角斗场、浴场以及广场和巴西利卡(长方形会堂)等公共建筑,在公元一到三世纪为极盛时期,达到西方古代建筑的高峰。古罗马建筑能满足各种复杂的功能要求,主要依靠水平很高的拱券结构,获得宽阔的内部空间。拱券结构得到推广,是因为使用了强度高、施工方便、价格便宜的火山灰混凝土。约在公元前二世纪,人们发现维苏威火山附近的波佐利以及罗马北部和东部地层

里的一种巧克力色的沙土(具有火山灰成分),把它与石头、砂子、水混合可凝固成结实不透水的材料,从而产生了古代的混凝土,可用于建筑拱券,也用于筑墙。其中万神殿直径 44 m 的半球形穹顶就使用了 12 000 t 这种胶凝材料和凝灰岩轻骨料拌合而成的混凝土。

石灰—火山灰胶凝体系的发明,标志着水硬性胶凝材料使用的开始与混凝土的诞生。

五、古代混凝土的特点

1. 胶结材料的局限性。古代混凝土使用的胶凝材料具有明显的地域特点,大多数为天然形成或具有火山灰性质的材料经焙烧研磨而得,缺乏人类的主动制取,使得胶凝材料的使用有局限性,难以普遍推广。

2. 耗费人力、物力巨大。限于当时的技术水平与工具,混凝土工程的修建需要极大的人力物力与较长时间,奴隶制社会的奴隶主正好拥有这样的资源,可以不计成本地修建这类混凝土工程。而在进入封建社会以后,人们相对获得了人身自由,使得劳动力成本极大地增加,混凝土工程成本的急速增加是限制古代混凝土继续发展的关键因素。

3. 强度,尤其是早期强度发展缓慢。古代混凝土由于胶凝材料技术的限制,强度低,强度多在 10 MPa 左右,尤其是前期强度发展缓慢,强度增长所需时间较长制约着结构物使用功能的形成,逐渐不能满足社会进步的快节奏。

4. 耐久性优良。从现在遗留下来的各种建筑、桥梁、渡槽等结构历经几千年仍然安然无恙就证明了混凝土有着优良的耐久性。可见很久以前的古人极为关注结构的耐久性,吴中伟在《高性能混凝土》一书中说道:“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。例如,大力普遍捣实保证密实性,采用截断毛细孔、复合使用有机外加剂等技术。”

第二节 现代混凝土

古代混凝土虽然具有良好的耐久性,但因为其本身的技术特点,在中世纪,混凝土技术衰退,直到 18 世纪中期,人们又开始研制新型的水硬性胶凝材料。先期,利用含黏土质的石灰石煅烧来求得水硬性胶凝材料(如英国的 Parker J),后来,人们又利用石灰石和黏土混合烧制水凝性胶凝材料,体现了现代水泥的基本概念(如法国的 Vicat L J),直到 1824 年,英国人 Aspdin J 取得了波特兰水泥专利被认为是现代混凝土工业的开始。此后现代混凝土技术高速发展,不同种类、不同材料、不同功能、不同施工方法的混凝土应运而生。

现代意义的混凝土是指胶结材料(如水泥)、水、细集料、粗集料以及必要时掺入化学外加剂与矿物掺和料,按一定比例配合,通过搅拌、成型的一种人工混合物,刚拌制呈现塑性状态的拌和物,称为新拌混凝土或未凝固混凝土,在一定条件下随时间的推移逐渐硬化成具有强度和其他性能的块体,则称为硬化混凝土。混凝土在拉丁语中是“结合在一起共同成长”之意,在英语中,混凝土一词为“Concrete”,分解开是“不同材料的结合物”之意。现在中文的混凝土一词则是从日本传来的,是“Concrete”的日语音译。在汉语中,混凝土用“砼”表示,从字型上就可看出混凝土就是人造石。混凝土已经成为现代社会的基础,在日常生活中几乎各个方面都直接或间接地涉及到混凝土。混凝土在工程领域发挥着其他材料无法替代的作用,已经成为现在社会文明的基石,是人类社会文明发展的见证。

一、混凝土的分类

目前,混凝土的分类主要有以下几种方法。

1. 按表观密度分类

(1)重混凝土:干表观密度大于 $2\,600\text{ kg/m}^3$ 的混凝土。常由高密度骨料重晶石和铁矿石等配制而成。主要用于辐射屏蔽方面。

(2)普通混凝土:干表观密度为 $2\,000\sim 2\,500\text{ kg/m}^3$ 的水泥混凝土。主要以天然砂、石子 and 水泥配制而成,是土木工程中最常用的混凝土品种。

(3)轻混凝土:干表观密度小于 $1\,950\text{ kg/m}^3$ 的混凝土。包括轻骨料混凝土、多孔混凝土和无砂大孔混凝土等,主要用于保温和轻质材料。

2. 按所用胶凝材料分类

通常根据主要胶凝材料的品种,并以其名称命名,如水泥混凝土、石膏混凝土、水玻璃混凝土、硅酸盐混凝土、沥青混凝土、聚合物混凝土等等。有时也以加入的特种改性材料命名,如水泥混凝土中掺入钢纤维时,称为钢纤维混凝土;水泥混凝土中掺大量粉煤灰时则称为粉煤灰混凝土等等。

3. 按使用功能和特性分类

按使用部位、功能和特性通常可分为:结构混凝土、道路混凝土、水工混凝土、耐热混凝土、耐酸混凝土、防辐射混凝土、补偿收缩混凝土、防水混凝土、自密实混凝土、纤维混凝土、聚合物混凝土、高强混凝土、高性能混凝土等等。

4. 按施工工艺分类

泵送混凝土、喷射混凝土、真空脱水混凝土、造壳混凝土(裹砂混凝土)、碾压混凝土、压力灌浆混凝土(预填骨料混凝土)、热拌混凝土、太阳能养护混凝土等多种。

5. 按掺和料分类

粉煤灰混凝土、硅灰混凝土、磨细高炉矿渣混凝土、纤维混凝土等多种。

6. 按抗压强度分类

低强混凝土(抗压强度小于 30 MPa)、中强混凝土(抗压强度 $30\sim 60\text{ MPa}$)和高强混凝土(抗压强度大于等于 60 MPa);按每立方米水泥用量又可分为:贫混凝土(水泥用量不亏过 170 kg)和富混凝土(水泥用量不小于 230 kg)等。

二、混凝土发展的四个阶段

1. 第一阶段——理论基础时代

1850年[法]郎波特(Lambot)用钢筋网造了一条小型水泥船,标示了钢筋混凝土(RC)时代的开始,也是钢筋混凝土预制工业的萌芽。钢筋混凝土(RC)是经由水泥、级配骨料、加水拌和而成混凝土,在其中加入一些抗拉钢筋,再经过一段时间的养护,达到建筑设计所需的强度。它应该是人类最早开发使用的复合型材料之一。钢筋和混凝土是两种全然不同的建筑材料,钢筋的比重大,不仅可以承受压力,也可以承受张力,然而,它的造价高,保温性能很差。而混凝土的比重比较小,它能承受压力,但不能承受张力,它的价格比较便宜,但是却不够坚固。而钢筋混凝土的诞生,解决了这两者的缺陷问题,并且保留了它们原来的优点,使得钢筋混凝土成为现代建筑物建造的首选材料。

1861年钢筋混凝土得到了第一次的应用,首先建造的是水坝、管道和楼板。1875年,法国的一位园艺师蒙耶建成了世界上第一座钢筋混凝土桥。1887年,[英]M. 科伦(M. Koenen)首发了钢筋混凝土结构计算方法。

1919年,[美]D. A 艾布拉姆斯(D. A. Abrams)建立了水灰比(W/C)强度公式,当混凝土充分密实时,其强度与 W/C 成反比。1930年,[瑞士]鲍罗米(Belomey)根据大量试验数据,应用数理统计方法,纳入了水泥强度因素后,提出了混凝土强度与水泥实际强度及 W/C 之间的关系。后来鲍尔斯(Powers)又确立了混凝土强度增长与胶空比的关系,即已水化水泥浆体积与已水化水泥浆体积加毛细孔体积加气孔体积之和的比值。进一步反映了混凝土强度与毛细空隙的关系,基本奠定了混凝土强度理论基础,完善了混凝土配合比设计的基础理论。

2. 第二阶段——预应力和干硬性混凝土时代

1928年,[法]E. 弗列辛涅(E. Freyssinet)提出了混凝土收缩和徐变理论。采用了高强钢丝并研制了锚具,为预应力技术在混凝土中应用奠定了基础。预应力混凝土系从外部对混凝土改性,因为依靠机械张拉钢筋,因之称为机械预应力混凝土。20年后,前苏联依靠膨胀混凝土在硬化过程中产生膨胀能,通过与钢筋黏结力和末端锚固张拉钢筋而产生预应力,称之为化学预应力混凝土。

1934年,美国发明了振动器。从此高标号混凝土飞速发展。前苏联根据 W/C 理论开发了干硬性混凝土,并研制了许多高效重型设备。

1940年,[日]吉田德次郎配制了 W/C 小于0.22的混凝土,经加压与振动处理又施高温养护,获得了28d抗压强度大于100 MPa的成果。但后来逐步认识到,配制强度大于50 MPa干硬性混凝土十分困难,并且很不经济。

3. 第三阶段——干硬性混凝土向流动性混凝土转变时代

1937年,[美]E. W 斯克里彻取得了用亚硫酸盐纸浆废液改善混凝土和易性,提高强度和耐久性的专利,拉开了现代外加剂之幕。

1913年,[美]柯尼尔·开(Cornell kee)设计出曲轴机构传动的立式缸混凝土泵,并取得专利。1927年[德]弗得茨·海尔(Fritz Hell)亦设计同类型混凝土泵,并第一次获得成功的应用。1932年,[荷兰]库依曼将立式缸改为卧式缸,制造了库依曼型混凝土泵。

1936年,保尔(Bell)提出了可泵性问题,随后格莱(Gray)、波波维茨等人对可泵性作了不同的解释。现在采用的是按宾汉姆流体特征表达,可泵性实则是拌合料在泵压下管道中移动磨擦阻力和弯头阻力之和的倒数。阻力越小,可泵性越好。通俗讲,可泵性是拌和物在泵送过程中不离析、黏塑性好、磨擦力小、不堵塞、能顺利沿管道输送的性能。

1962年,[日]服部健一等将萘磺酸甲醛高缩合物(聚合度 $n \approx 10$ 核体)用于混凝土分散剂,1964年花王石碱公司作为商品出售,名为“麦地”(MT-150)高效减水剂。几乎与此同时(1963年)前联邦德国研制成功三聚氰氨磺酸盐甲醛缩聚物。上述减水剂减水率高达20%~30%,前联邦德国首先用三聚氰胺“美尔门脱(Melment)”研制成功坍落度18~22 cm的流态混凝土。标示了流动性混凝土时代的开始。

我国前华北窑业公司于1948年引进美国文沙引气剂样品,1949年研制成功松香热聚物为主要成分的引气剂,产品名为长城牌引气剂,在天津新港应用效果显著。我国20世纪50年代开始大量生产使用外加剂,主要产品有松香热物和松香皂类的引气剂、纸浆废液(木质素磺酸钙)、氯盐防冻剂等。1970年,国家建材院、清华大学、江西水泥制品研究所率先推出萘系和

三聚氰胺系高效减水剂。

4. 第四阶段——高强混凝土应用,高性能混凝土产生

1918年,[美]建造的陶粒钢筋混凝土载重7 000 t海船,半浸海水之中,至今仍很完好。1929年下水,1942年搁浅于挪威海岸,名为Crete Joist的钢筋混凝土船,历经数十年海潮和严寒考验,经取芯测定和电位测试,其混凝土强度可达75~120 MPa,除有少数裂缝外,未见明显腐蚀,钢筋锈蚀亦很缓慢。可见人们很早就开始关注高强混凝土(HSC)和高性能混凝土(HPC)。

高强混凝土(HSC)在不同历史阶段涵义不同。20世纪30年代前混凝土施工采用体积配合比,强度10~30 MPa。二战后各国不断提高,强度达到25~40 MPa。50年代高强混凝土的强度为35 MPa,60年代为40~50 MPa,70年代为60 MPa。时下采用现代技术配制的高强混凝土强度早已超过了结构设计所采用的强度。例如使用优质天然骨料能够生产230 MPa的混凝土,使用优质陶瓷骨料可以得到460 MPa的混凝土,甚至使用轻骨料亦可配制大于100 MPa的轻质混凝土。

美国混凝土学会(ACI)和国际预应力混凝土联合会(FIP)与欧洲混凝土委员会(CEB)1990年、1992年公布报告都将高强混凝土的强度界定为 ≥ 41 MPa,且不包括应用特种材料和技术制备的混凝土。其理由是超过40 MPa的混凝土性能与生产工艺都会开始变化。一些国家的标准和规范,均在抗压强度40~50 MPa试验基础上制定的。高强混凝土的强度低限,将随着研究工作的不断深化而逐步提高。目前通常将抗压强度大于50 MPa或60 MPa的混凝土认为是高强混凝土。

高强混凝土的技术发展走过三个阶段。没有减水剂前,靠低W/C、振动加压和高温养护制备为第一阶段;以高效减水剂为主开创了高强混凝土发展的第二阶段;采用矿物质细粉料和高效减水剂双掺,以普通工艺制备(亦是当前配制高强混凝土技术路线的主要特征)为第三阶段。现在高强混凝土技术有以下四个档次:

设计强度为60 MPa,采用目前市售材料和标准可以生产与施工;

设计强度为80 MPa,市售材料和标准尚有怀疑,仅以预拌商品混凝土中试点应用;

设计强度为100~120 MPa,市售材料已不适宜,技术标准也要重新制订,处于试验室配制阶段。

设计强度为140~150 MPa,必须开发新材料,处于攻关研究阶段。

高强混凝土的技术经济效果十分明显,国内外经验表明:用60 MPa代替30~40 MPa,可减少40%混凝土、39%钢材用量,降低工程造价20%~35%。若用于构件生产,每提高强度10 MPa,养生能耗减少标准煤13 kg/m³。当强度由40 MPa提高到80 MPa,其构筑物体积、自重均缩减30%。

第三节 高性能混凝土

一、混凝土高性能化的提出

古代的混凝土结构能遗留至今并仍具有使用功能,证明混凝土结构是有良好耐久性的材料。进入20世纪以来,现代混凝土技术得到了高度提高,表现在强度越来越高、种类越来越

多、劳动强度越来越低,但结构的使用寿命却大多在 30~50 年或者更少,例如,混凝土开裂成为混凝土成型后的普遍问题,楼板、剪力墙混凝土没有拆模就出现裂缝,公路混凝土路面、桥梁混凝土在除冰盐作用下不到 10 年遭受破坏等等,因材料性能、施工性能、结构耐久性问题造成混凝土结构破坏的事件随处都有发生,不仅造成维护费用高昂,同时对能源、资源造成极大浪费。

人们开始对现代混凝土的发展进行反思,造成现代混凝土结构使用寿命短的原因主要有以下几个方面:

1. 片面追求强度的提高。现代混凝土的发展是不断提高强度,首先随着现代社会生活节奏的加快,混凝土的使用者要求建设的混凝土结构尽早提供使用功能,这就要求更快的施工建成速度,更早更高的强度发展成为首要的目标,强度成为混凝土验收的唯一指标。随之而来的是混凝土结构的设计主要考虑荷载作用下的结构安全性,强度设计成为设计的主要方面,对环境作用的耐久性问题放在次要地位。对施工进度提出不合理要求。

2. 材料本身的耐久性问题被忽视。例如水泥问题,为适应高强度的要求而忽视其他性能,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 28 d 胶砂抗压强度从 30 MPa 猛增到 60 MPa,造成水泥水化热增大、放热集中,加大混凝土的收缩,劣化混凝土微观结构;随着外加剂减水率的提高,忽视外加剂对混凝土收缩增加的影响以及带入混凝土中的硫酸钠、碱和氯盐对耐久性的不利影响。

3. 忽视火山灰材料对混凝土耐久性的贡献。古代混凝土采用的石灰—火山灰胶凝材料对其结构的耐久性至关重要,现代试验证明,粉煤灰等火山灰质材料在混凝土中具有改善胶凝材料颗粒级配的填充作用、与水化产物二次反应的火山灰活性效应,减少材料间摩阻力的形貌效应等改善混凝土微观结构与改善材料耐久性作用。

4. 混凝土结构使用环境的复杂化。随着现代社会人口增加,人类活动场所涉及到了更多不利于混凝土的环境,混凝土结构处于更严酷、更复杂的冻融、腐蚀等环境。同时随着社会的发展,混凝土接触到更多对其具有腐蚀等破坏作用的物质。

有鉴于此,人们意识到,使用寿命更长的混凝土结构才是最经济、最符合资源的合理利用,有利于社会的可持续发展。混凝土耐久性影响混凝土的使用寿命,与国民经济、社会安定、环境质量、可持续发展等密切相关。对混凝土的施工性能、耐久性能提出了更高的要求,传统的单一高强化的主流思想受到批评,高性能混凝土的理念被提出并成为合理的、科学的发展方向。

二、高性能混凝土的概念

在不同的国家,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。

美国学者认为:高性能混凝土是一种易于浇注、捣实、不离析,能长期保持高强度、高韧性和体积稳定性,在严酷条件下寿命很长的混凝土。美国混凝土协会 ACI 认为高性能混凝土并不需要很高的抗压强度,但仍要不小于 50 MPa。日本学者认为:高性能是一种高填充能力的混凝土,新拌阶段不需振捣能完成浇注,水化、硬化早期阶段水化热低、干缩少,具有足够的强度和耐久性。加拿大学者认为:高性能混凝土是一种具有高弹性模量、高密度、抗侵蚀、低渗透的混凝土。可见美加学者侧重于硬化后的性能,特别是耐久性。日本学者则重视新拌混凝土的流动性和自密实性。我国学者及行业专家认为:高性能应体现在工程设计(力学概念)和施

工要求(非力学概念)及使用寿命(经济学概念)综合的优异技术、经济特性上。吴中伟院士给出的定义是: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,选用优质原材料,在严格的质量管理条件下制成的,除了水泥、水、集料以外,必须掺加足够数量的细掺料与高效外加剂,高性能混凝土重点保证下列诸性能:耐久性、工作性、各种力学性能、适用性、体积稳定性以及经济合理性。

以下是不同时期不同组织对高性能混凝土的定义:

1990 年在美国召开的高性能混凝土国际研讨会对高性能混凝土的定义是:具有所要求的性能和匀质性的混凝土。例如易于浇注和压实而不离析、高长期力学性能、高早强、高韧性、体积稳定、严酷环境中使用寿命长。采用传统的组分、普通的搅拌、浇注与养护操作是不可能日常生产这种混凝土的。

1998 年美国混凝土学会(ACI)对高性能混凝土规定:高性能混凝土的许多特性是相互关联的,改变其中一个常牵扯到一或多个其他特性发生变化。因此,如果对某一应用提供的混凝土有若干特性必须同时满足,则必须将其中每一项都在合同书上规定清楚。

中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES01:2004)对高性能混凝土(high performance concrete)的定义是:以耐久性为基本要求并用常规材料和常规工艺制造的水泥基混凝土。这种混凝土在配比上的特点是掺加合格的矿物掺和料和高效减水剂,取用较低的水胶比和较少的水泥用量,并在制作上通过严格的质量控制,使其达到良好的工作性、均匀性、密实性和体积稳定性。

不同的工程领域对高性能混凝土有不同的要求。公路工程要求水胶比不大于 0.40;耐久性指数大于 80%;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;徐变率低。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 年~50 年提高到 100 年以上。港口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、体积安定性好、强度与抗冲击疲劳性高。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并不高。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。客运专线高性能混凝土的特点是有较严格的原材料品质要求,混凝土强度等级无具体要求,流动度根据施工要求确定,均有含气量要求,电通量、抗裂性、抗碱骨料反应作为基本耐久性指标,根据环境作用等级和结构部位要求抗腐蚀、抗冻、抗渗性能等耐久性指标,还有通过施工措施控制绝热温升、徐变、收缩等指标。

通过以上不同方面的分析可以看出,高性能混凝土的特性是针对一定的应用和环境所要求的。重点关注混凝土的易于浇筑性、可捣实、不离析、早期强度、长期力学性质、渗透性、水化热、体积稳定性、密度、韧性、在服务环境中运行寿命长久等指标。高性能混凝土是在与普通混凝土相对比的基础上提出的概念。相比而言,高性能混凝土的孔隙率很低;水化物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 减少、CSH 和 AFt 增多;未水化颗粒多,未水化颗粒和矿物细掺料等各级中心质增多,各中心质之间距离缩短,有利的中心质效应增多,中心质网络骨架得到强化;界面过渡层厚度小, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 取向程度下降。

三、混凝土如何高性能化

高性能混凝土具有更密实的结构与良好的孔结构,具有优良的抗裂性能。因此使混凝土高性能化的途径就是在混凝土生产的各个环节改善混凝土孔结构与增加抗裂性。

1. 优质原材料是混凝土高性能化的基本保证

水泥高含碱量、高比表面积、高 C_3S 、高 C_3A 、高 SO_3 使水泥水化热大、水化快、早期强度高、徐变小、使混凝土延伸性低,易使混凝土因温度收缩、自收缩和干燥收缩导致开裂。配制高性能混凝土的水泥宜选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,混合材宜为矿渣或粉煤灰。不宜使用早强水泥。水泥熟料中的 C_3A 含量非氯盐环境下不应超过 8%,氯盐环境下不应超过 10%,氯离子含量 $\leq 0.06\%$,碱含量 $\leq 0.80\%$,游离氧化钙含量 $\leq 1.0\%$ 。

表面光滑的骨料与水泥砂浆界面的黏结性差,其中的碱活性成分可能造成混凝土的碱骨料反应破坏,级配差、高空隙率的骨料不仅增加水泥用量还对混凝土的抗收缩与抗冻融不利,骨料含泥量高、弹模低均增加混凝土的收缩。配制高性能混凝土的粗骨料一般采用二级级配,要求级配合理、粒形良好、质地均匀坚固、线胀系数小,其松散堆积密度应大于 1500 kg/m^3 ,紧密空隙率宜小于 40%,吸水率应小于 2%,碎石压碎指标不大于 10%,含泥量不大于 0.5%,泥块含量小于 0.25%,针片状颗粒总含量不大于 8%,硫化物及硫酸盐含量(折算成 SO_3)不大于 0.5%,氯离子含量不大于 0.02%,当用岩相法检验其矿物组成含有碱—硅酸反应活性矿物时,其砂浆棒膨胀率应小于 0.10%。

外加剂应采用减水率高、坍落度损失小、适量引气、质量稳定、能满足混凝土耐久性能的产品。硫酸钠含量不大于 10.0%, Cl^- 含量不大于 0.2%,碱含量($Na_2O + 0.658K_2O$)不大于 10.0%,对钢筋无锈蚀作用。

2. 降低水胶比

降低水胶比即是降低混凝土中水化所需以外的自由水,减少自由水蒸发后遗留的孔道,降低混凝土的空隙。目前的高效减水剂减水率多在 20% 以上,在降低混凝土水胶比方面起着关键作用。

3. 掺入矿物掺和料改善混凝土中水泥石与粗骨料之间的界面结构

普通混凝土粗骨料与水泥石之间的界面上积滞着大量的 $Ca(OH)_2$, $Ca(OH)_2$ 在界面上的结晶与定向排列,是混凝土强度与耐久性低下的主要原因。改善混凝土中骨料与水泥石之间的界面结构,是高性能混凝土必须解决的关键技术。混凝土掺入粉煤灰有以下四种功效:火山灰效应的增强作用、形态效应的减水作用、微集料效应的增密作用、稳定效应的益化作用。混凝土中掺入磨细矿渣可以取代部分水泥,可提高流动度,降低泌水性,降低混凝土黏度,早强相当,后强高耐久性好,另外将粗细不同种类的掺和料复合使用可以利用各自的特点,取长补短,各发挥各自的优势、优势互补,起到叠加效应。

4. 添加引气剂改善混凝土中水泥石的孔结构

在混凝土中加入引气剂,可在混凝土中引入大量封闭孔。在相同的孔隙率下,封闭孔的渗透系数最低,耐久性最好。

5. 综合措施改善混凝土开裂性

(1)原材料是构成混凝土的基本,应尽量改善以下方面对耐久性及抗裂性的不利影响,见表 1—3—1。