

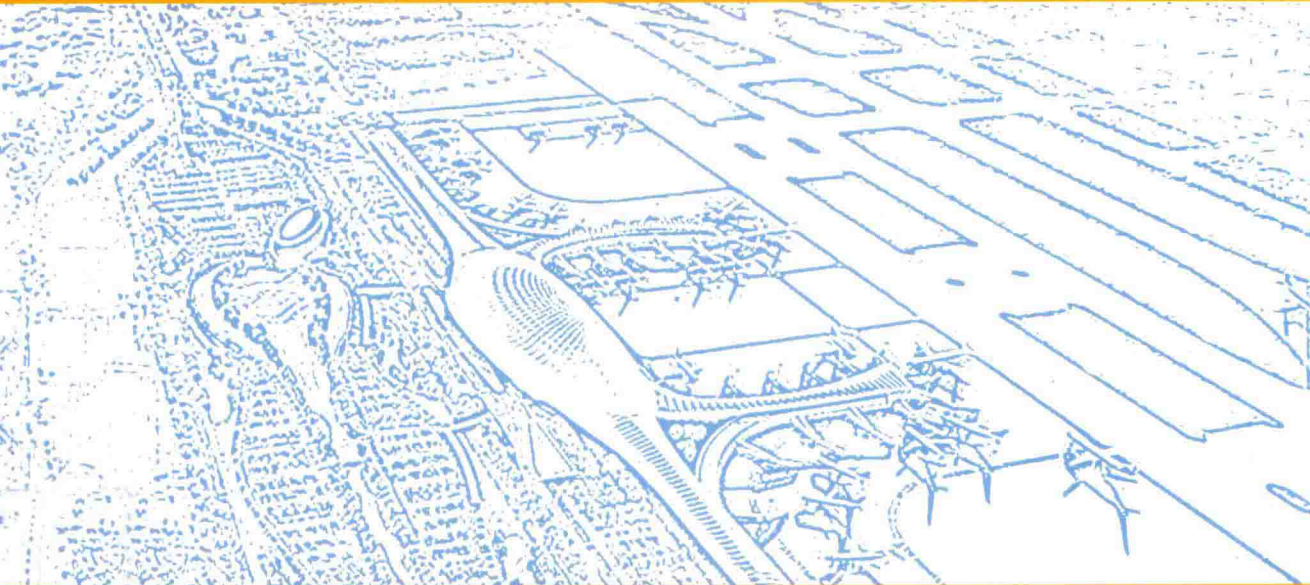


版高等学校教材
列教材

机场道面新材料

New Materials for Airport Pavement

吴永根 于洪江 刘庆涛 编 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

21世纪交通版高等学校教材
机场工程系列教材

机场道面新材料

New Materials for Airport Pavement

吴永根 于洪江 刘庆涛 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是机场工程系列教材之一,全书共分为八章,结合作者从事机场工程施工与材料方面的研究和实践经验及教学体会,较系统地介绍了各种新型机场道面材料的组成、特性与应用情况等。主要内容包括高性能混凝土、道面高强混凝土、道面自密实混凝土、道面碾压混凝土、道面纤维混凝土、道面再生混凝土、道面无机聚合物混凝土和道面接缝材料。

本书内容新颖,系统全面,可作为高等院校机场工程专业的本科教材,也可供从事机场工程各类专业技术人员和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

机场道面新材料 / 吴永根, 于洪江, 刘庆涛编著.

—北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017. 12

机场工程系列教材. 21 世纪交通版高等学校教材

ISBN 978-7-114-14389-2

I. ①机… II. ①吴… ②于… ③刘… III. ①飞机跑道—路面材料—高等学校—教材 IV. ①V351.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 304809 号

21 世纪交通版高等学校教材

机场工程系列教材

书 名: 机场道面新材料

著 者: 吴永根 于洪江 刘庆涛

责任编辑: 李 喆

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 10.25

字 数: 231 千

版 次: 2017 年 12 月 第 1 版

印 次: 2017 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14389-2

定 价: 40.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

出版说明

随着近些年来我国经济的快速发展和全球经济一体化趋势的进一步加强,科技对经济增长的作用日益显著,教育在科技兴国战略和国家经济与社会发展中占有重要地位。特别是民航强国战略的提出和“十二五”综合交通运输体系发展规划的编制,使航空运输在未来交通运输领域的地位和作用愈加显著。机场工程作为航空运输体系中重要的基础设施之一,发挥着至关重要的作用。据不完全统计,我国“十二五”期间规划的民用改扩建机场达110余座,迁建和新建机场达80余座,开展规划和前期研究建设机场数十座,通用航空也迎来大发展的机遇,我国机场工程建设到了一个新的发展阶段。

国内最早的机场工程本科专业于1953年始建于解放军军事工程学院,设置的主要专业课程有:机场总体设计、机场道面设计、机场地势设计、机场排水设计和机场施工。随着近年机场工程的发展,开设机场工程专业方向的高校数量不断增多,但是在机场工程专业人才培养过程中也出现了一些问题和不足。首先,专业人才数量不能满足社会需求。机场工程专业人才培养主要集中在少数院校,实际人才数量不能满足机场工程建设的需求。其次,专业设置不完备,人才培养质量有待提高。目前很多院校在土木工程专业和交通工程专业下设置了机场工程专业方向,限于专业设置时间短、师资力量不足、培养计划不完善、缺乏航空专业背景支撑等各种原因,培养人才的专业素质难以达到要求。此外,我国目前机场工程专业教材总体数量少、体系不完善、教材更新速度慢等因素,也在一定程度上阻碍了机场工程专业的发展。为了更好地服务国家机场建设、推动机场工程专业在国内的发展,总结机场工程教学的经验,编写一套体系完善,质量水平高的机场工程教材就显得很有必要。

教材建设是教学的重要环节之一,全面做好教材建设工作是提高教学质量的重要保证。我国机场工程教材最初使用俄文原版教材,经过几年的教学实践,结合我国实际情况,以俄文原版教材为基础,编写了我国第一版机场工程教材,这批教材是国内机场工程专业教材的基础,期间经历了内部印刷使用、零星编写出版、核心课程集中编写出版等阶段。在历次机场工程教材编写工作的基础上,空军工程大学精心组织,选择了理论基础扎实、工程实践经验丰富、研究成果丰硕的专家组成编写组,保证了教材编写的质量。编写者经过认真规划,拟定编写提纲、遴选编写内容、确定了编写纲目,形成了较为完整的机场工程教材体系。本套教材共计14本,涵盖了机场工程的勘察、规划、设计、施工、管理等内容,覆盖了机场工程专业的全部专业课程。在编写过程中突出了内容的规范性和教材的特点,注意吸收了新技术和新规范的内容,不仅对在校学生,同时对于工程技术人员也具有很好的参考价值。

本套教材编写周期近三年,出版时适逢我国机场工程建设大发展的黄金期,希望该套教材的出版能为我国机场工程专业的人才培养、技术发展有一些推动,为我国航空运输事业的发展做出贡献。

编写组

2014年于西安

前 言

“机场道面新材料”是机场工程专业的一门专业基础类选修课,主要为了扩充学生专业知识的广度和深度,提高学生的专业技能。

本书依据机场工程专业本科层次“机场道面新材料”课程标准进行编写。结合近年来机场道面工程领域新型材料的研究、应用和发展,确定本书的主要内容包括:机场道面面层材料和道面接缝材料,并具体参考相关著作、研究报告、工程标准等编写完成。

全书分为八章,详细介绍各种新型机场道面材料的组成、特性与应用情况等。第一章为高性能混凝土,第二章为道面高强混凝土,第三章为道面自密实混凝土,第四章为道面碾压混凝土,第五章为道面纤维混凝土,第六章为道面再生混凝土,第七章为道面无机聚合物混凝土,第八章为道面接缝材料。

本书由吴永根、于洪江、刘庆涛编著。在编写过程中,参阅了国内外众多学者的研究成果和著作,在此一并致以诚挚的谢意。

由于编著者的水平所限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正!

编 者

2017年8月

目 录

第一章 高性能混凝土	1
第一节 概述	1
第二节 高性能混凝土组成材料	3
第三节 高性能混凝土技术性质	6
第四节 高性能混凝土设计	7
第五节 高性能混凝土施工质量控制	9
第二章 道面高强混凝土	11
第一节 概述	11
第二节 高强混凝土组成材料和配合比	14
第三节 道面高强混凝土性能	18
第四节 道面高强混凝土施工质量控制	24
第三章 道面自密实混凝土	26
第一节 概述	26
第二节 道面自密实混凝土组成材料和配合比	29
第三节 道面自密实混凝土性能	35
第四节 道面自密实混凝土施工质量控制	40
第四章 道面碾压混凝土	43
第一节 概述	43
第二节 碾压混凝土组成材料	44
第三节 碾压混凝土性能	46
第四节 碾压混凝土配合比设计	51
第五节 碾压混凝土施工质量控制	53
第六节 道面碾压混凝土研究应用	55
第五章 道面纤维混凝土	59
第一节 概述	59
第二节 纤维对水泥混凝土作用机理	64
第三节 道面纤维混凝土组成材料和配合比	69
第四节 道面纤维混凝土性能	74
第五节 道面纤维混凝土施工	90
第六章 道面再生混凝土	92
第一节 概述	92
第二节 道面再生骨料	95

第三节 道面再生混凝土配合比设计	99
第四节 道面再生混凝土技术性能	101
第五节 道面再生混凝土现场应用与施工	108
第七章 道面无机聚合物混凝土	113
第一节 概述	113
第二节 无机聚合物胶凝材料及合成机理	117
第三节 无机聚合物混凝土性能	124
第四节 无机聚合物混凝土施工与应用	134
第八章 道面接缝材料	143
第一节 概述	143
第二节 道面接缝材料	143
第三节 道面封缝材料技术性质	146
第四节 道面封缝材料形状与尺寸	150
第五节 道面胀缝材料技术性能	152
参考文献	154

第一章 高性能混凝土

第一节 概 述

一、高性能混凝土的定义和特点

普通混凝土是当代建筑用量最多的人造材料。因其原料易得,成本低,操作简便,耐久性较好而得到了普遍应用。但是,普通混凝土并不总是耐久的,在正常使用条件下,其使用期限约为 50 年,而在严酷条件下经 20 年、10 余年或更短的时间就会遭到本质的破坏,需补强、修理,甚至重建。目前机场道面主要建筑材料是普通混凝土,而由于机场道面暴露于自然环境下,长期承受飞机重复荷载作用和严酷的自然环境作用,更加要求道面混凝土应具有足够的物理力学性能与耐久性。近年来我国北方地区新建、扩建的机场,陆续出现了混凝土道面使用仅数年后便发生冻融、碎裂、脱皮、腐蚀等耐久性破坏现象,不但严重影响飞机的安全起飞、着陆及停放,降低了道面的使用寿命,而且要花费巨额维修和重建费用。在机场建设中引入现代高性能混凝土技术为解决这类问题提供了有效的技术途径。

高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC),是 20 世纪 80 年代末 90 年代初一些发达国家基于混凝土结构耐久性设计提出的一种全新概念的混凝土,它以耐久性为首要设计指标,这种混凝土有可能为基础设施工程提供 100 年以上的使用寿命。区别于传统混凝土,高性能混凝土由于具有高耐久性、高工作性、高强度和高体积稳定性等许多优良特性,被认为是目前全世界性能最为全面的混凝土。至今已在不少重要工程中被应用,特别是在桥梁、高层建筑、海港建筑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。

1990 年 5 月在马里兰州盖瑟斯堡,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:易于浇筑、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。即 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:欧洲混凝土学会和国际预应力混凝土协会将 HPC 定义为水胶比低于 0.40 的混凝土;在日本,将高流态的自密实混凝土(即免振混凝土)称为 HPC;中国土木工程学会高强与高性能混凝土委员会将 HPC 定义为以耐久性和可持续发展为基本要求并适合工业化生产与施工的混凝土。虽然在不同的国家,不同的学者或工程技术人员,对 HPC 的理解有所不同。比如美国学者更强调高强度和尺寸稳定性,欧洲学者更注重耐久性,而日本学者偏重于高工作性。但是他们的基本点都是高耐久性,这方面的认识是一致的。

高性能混凝土与普通混凝土相比有以下三个特点:

(1)高和易性。这是机械化泵送施工的条件,一般坍落度应达到 $200\text{mm} \pm 20\text{mm}$,而且不产生过多的泌水。

(2)良好的物理力学性能。高性能混凝土应具有较高的强度和体积稳定性。

(3)长期的耐久性。这是高性能混凝土最重要的性能指标。高性能混凝土应具有上百年而不是普通混凝土 40 ~ 50 年的使用寿命。

二、高性能混凝土的技术路线

(1)低的水胶比。在保证和易性的情况下,尽可能减少水的用量。

(2)使用高效减水剂。这是为了保证在水胶比较低、胶结材料用量不多的情况下工作性能高。

(3)选择高品质的骨料。高性能混凝土对骨料的颗粒级配和粒径有着更严格的要求,要求细骨料应选用洁净的砂子,粗骨料应是高强、低吸水性碎石。

(4)掺入活性矿物材料。掺入活性矿物材料可以带来很多益处:

①改善新拌混凝土的工作性。

②降低混凝土硬化初期的水化热,减少温度裂缝。

③活性矿物材料与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 起火山灰反应,使硬化水泥浆内的空隙细化,提高水泥浆和骨料界面的强度,提高混凝土的抗渗性,有利于混凝土在酸性环境下的耐久性。

三、高性能混凝土的发展前景

目前,高性能混凝土的发展有以下几个方向:

1. 绿色高性能混凝土

水泥混凝土是当代最常用的人造材料,对资源、能源的消耗和对环境的破坏十分巨大,与可持续发展的要求背道而驰。绿色高性能混凝土研究和应用较多的是粉煤灰混凝土,粉煤灰混凝土与基准混凝土相比,大大提高了新拌混凝土的工作性能,明显降低了混凝土硬化阶段的水化热,提高了混凝土强度特别是后期强度。而且,节约水泥,减少环境污染,成为绿色高性能混凝土的代表性材料。

2. 超高性能混凝土

超高性能混凝土,如活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC),其特点是高强度,抗压强度高达 300MPa ,且具有高密实性,已在军事、核电站等特殊工程中成功应用。

3. 智能混凝土

智能混凝土是在混凝土原有的组分基础上复合智能型组分,使混凝土材料具有自感知、自适应、自修复特性,对环境变化具有感知和控制的功能。随着损伤自诊断混凝土、温度自调节混凝土、仿生自愈合混凝土等一系列机敏混凝土的出现,为智能混凝土的研究、发展和应用奠定了基础。

随着 HPC 的开发和应用,建筑对生态环境产生的影响巨大。建筑物在建造和运行的过程中需消耗大量的自然资源和能源,并对环境产生不同程度的影响。有专家指出,作为建筑工

业主要原料的水泥,实际上是一种不可可持续发展的产品。因此,高性能混凝土的技术核心是在限制水泥用量以获得混凝土高性能的同时,坚持其可持续性的发展原则。21世纪前后,吴中伟等提出了绿色混凝土的概念,在高性能混凝土的基础上增加了三个含义:节约资源、能源;不破坏环境,更有利于环境;可持续发展,既要满足当代人的需求,又不危害后代人满足其需要的能力。高性能混凝土具有普通混凝土无法比拟的优良性能,大力开展绿色高性能混凝土的研究和应用,对混凝土的发展将起重要作用,并为 HPC 的发展指明了非常明确的方向。

第二节 高性能混凝土组成材料

一、水泥

按照化学成分不同,水泥一般分为硅酸盐系水泥、铝酸盐系水泥、硫铝酸盐系水泥。一般常用的硅酸盐系水泥又分为 6 种:硅酸盐水泥(P. I、P. II),普通硅酸盐水泥(P. O),矿渣硅酸盐水泥(P. S),火山灰硅酸盐水泥(P. P),粉煤灰硅酸盐水泥(P. F),复合硅酸盐水泥(P. C)。

(1) 硅酸盐水泥,有 P. I 和 P. II 两个编号,其中 P. I 不参加任何的矿物混合材料,P. II 允许有不超过 5% 的活性矿物混合材料。

(2) 普通硅酸盐水泥,允许以 6% ~ 20% 的矿物混合材料等量取代硅酸盐熟料。

(3) 矿渣硅酸盐水泥,允许以 20% ~ 70% 的粒化高炉矿渣作为矿物混合材料等量取代硅酸盐熟料。

(4) 火山灰硅酸盐水泥,允许有 20% ~ 40% 的火山灰质材料作为矿物混合材料等量取代熟料。

(5) 粉煤灰硅酸盐水泥,允许有 20% ~ 40% 的粉煤灰等量作为矿物混合材料取代熟料。

(6) 复合硅酸盐水泥,用两种以上矿物混合料以总量 20% ~ 50% 取代硅酸熟料。

在配制高性能混凝土时,一般选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。这是因为当使用掺有矿物混合材料的水泥时,往往不清楚所加入的矿物混合材料质量与掺和工艺,而且矿渣硬度比水泥熟料大,共同磨细时,水泥中的矿渣颗粒太粗,矿渣的潜在活性不能充分发挥。因此为了有效控制混凝土的质量并发挥矿料的作用,在配制高性能混凝土时宜采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,同时可将矿料以掺合料的形式作为配制混凝土的单独组分加入混凝土拌和物中。由于水泥熟料中的主要成分硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)、铝酸三钙(C_3A)、铁铝酸四钙(C_4AF)在不同厂家中不同品牌水泥的含量不同,与水发生作用后反应的效果不同,其硬化后的早期强度、后期强度增长率、抗裂性以及抗化学腐蚀的性能都会有较大差别,因此应尽可能选择水化速度较慢、水化发热量较小的水泥。同时选择水泥时不能以强度作为唯一指标,强度高水泥不一定好。在目前生产工艺条件下,提高水泥强度(尤其是早期强度)主要依靠增加水泥中的 C_3A 、 C_3S 的含量并提高水泥的比表面积来实现,而比表面积过高将导致水化速度过快,水化热大,混凝土收缩大,抗裂性下降,混凝土的微结构不良,抗腐蚀性差,从而导致混凝土的耐久性差。

水泥含碱量的控制,应符合现行标准规定。

二、骨料

(1) 骨料的一般指标。细骨料宜选用质地坚硬、洁净、级配良好的天然中、粗河砂,其质量要求应符合普通混凝土用砂、石标准中的规定。砂的粗细程度对混凝土强度有明显的影响。配制 C50 ~ C80 的混凝土用砂宜选用细度模数大于 2.3 的中砂,对于 C80 ~ C100 的混凝土用砂宜选用细度模数大于 2.6 的中砂或粗砂。高性能混凝土必须选用强度高、吸水率低、级配良好的粗骨料,宜选择表面粗糙、外形有棱角、针片状颗粒含量低的硬质砂岩、石灰岩、花岗岩、玄武岩碎石,级配应符合规范要求。由于高性能混凝土要求强度较高,因此必须使粗骨料具有足够高的强度,一般粗骨料强度应为混凝土强度的 1.5 ~ 2.0 倍或控制压碎值指标应小于 12%。最大粒径不应大于 25mm,以 10 ~ 20mm 为佳,这是因为较小粒径的粗骨料,其内部产生缺陷的概率减小,与砂浆的黏结面积增大,且界面受力较均匀。另外,粗骨料还应注意颗粒形状、级配和岩石种类,一般采取连续级配,其中尤以级配良好、表面粗糙的碎石为最好。粗骨料的线膨胀系数要尽可能小,这样能大大减小温度应力,从而提高混凝土的体积稳定性。

(2) 骨料的级配和颗粒形状。这里需要强调的是粗骨料的级配和颗粒形状。我国混凝土质量一般的重要原因之一,在于对骨料颗粒形状和级配的不够重视。虽然我国也有关于骨料产品质量的强制性标准,但是目前生产供应的骨料很少有真正符合标准的。与水泥一样,在骨料的质量中,我国工程界比较看重的只是与混凝土强度有关的骨料强度和含泥量等指标,对于骨料颗粒形状和级配的重要性,认为后者不过是多费点水泥的问题,很少从耐久性的角度去重视骨料的质量。一般天然骨料的强度,对于目前常用的混凝土强度等级(C70 以下)来说是足够的,而骨料的其他性能(如吸水率、热膨胀系数等)对混凝土耐久性则有重要影响。吸水率大的骨料,配制的混凝土会有较大的长期收缩,影响混凝土的抗裂性。与天然骨料相比,碎石混凝土的骨料与浆体的界面有较好的结合,抗裂性也好些。一般来说粗骨料的粒径较小时,混凝土的抗渗性会提高。所以当耐久性作为主要因素考虑时,骨料的粒径宜取小一些。

粗骨料的级配和颗粒形状不好,必然要加大混凝土的胶凝材料总量和用水量,不仅增加混凝土收缩,而且会增加混凝土的渗透性和有害介质在混凝土中的含量。为了提高耐久性,必然要同时采用低水胶比和低用水量。西方发达国家混凝土的用水量都较少,先进的混凝土技术可将用水量减少到 $130\text{kg}/\text{m}^3$ 以下并依然有很好的泵送性,其中的一个关键因素就是骨料的级配和颗粒形状好,不存在粗骨料的针、片状颗粒问题。所以配制混凝土的粗骨料都要经过颗粒形状和级配的严格选择,在选择供应商时,首选采用反击式破碎机生产的粗骨料,其次是锤式破碎机生产的粗骨料,应尽可能避免采用颚式破碎机生产的粗骨料。

(3) 粗骨料的粒径。为了保证混凝土浇筑的通畅,骨料的粒径应受到钢筋最小间距和保护层厚度的限制,后者也是为了保证混凝土保护层抗渗性的需要。目前在施工中为了少用水泥,往往尽可能增大石子粒径,一些商品预拌混凝土由于大批量生产也极少变换石子粒径,而设计人员在施工图的钢筋净间距上又常忽略施工的实际情况和需要,于是混凝土浇筑时的钢筋通过性就很差,造成混凝土浇筑质量不匀,钢筋下方形成空隙,并在保护层外表面沿水平钢筋或箍筋的下方位置出现裂缝,这些均要予以充分重视。这就要求选择配合比时要根

据施工图的设计不同部位来确定选择不同骨料最大允许粒径,而不是同一强度等级不论是什么施工部位均采用同一配合比。

三、外加剂

外加剂是混凝土的重要组成部分。外加剂对混凝土具有良好的改性作用,掺用外加剂是制备高性能混凝土的关键技术之一。在混凝土中合理掺加具有减水率高、坍落度损失小、适量引气、质量稳定的外加剂产品,能明显改善或提高混凝土的耐久性能。混凝土中掺入少量引气剂后,相当于每立方米混凝土中引入数千亿个微小气泡,使混凝土的抗冻融性能大大提高。有研究表明,引气剂对混凝土的工作性和匀质性都有所提高,引气剂不仅能减少混凝土的用水量,降低泌水率,更重要的是混凝土引气后,水在拌和物中的悬浮状态更加稳定,因而可以改善骨料底部浆体泌水、沉降等不良现象,适量引气已经是配制高性能混凝土的重要手段之一。但并不是含气量越大越好,一般含气量每增加1%(体积),抗压强度降低4%~5%,抗折强度降低2%~3%。龄期增长后,含气量对混凝土强度的影响也将增大。

四、矿物掺合料

掺入一定量的矿物掺合料,可以有效改善和提高混凝土的工作性和耐久性。矿物掺合料一般分为活性和非活性两种。活性掺合料有粒化高炉矿渣、火山灰质混合材料、粉煤灰、硅灰等;非活性掺合料仅起填充作用,有石英砂、石灰石、砂岩、黏土等。一般活性矿物掺合料采用粉煤灰及粒化高炉矿渣比较多。

(1)粉煤灰。国内外大量研究表明,为有效改善混凝土抗化学侵蚀性能(如氯化物侵蚀、碱骨料反应、硫酸盐侵蚀),粉煤灰最佳替代量一般应在20%甚至以上。现行粉煤灰的分级标准是同时将烧失量、细度和需水量比作为分级的主要标准,实际上这样不利于发挥粉煤灰的效用。粉煤灰的品质主要由烧失量和需水量决定,而对细度不必苛求。一般来说,粉煤灰的烧失量越大,含碳量越高,混凝土的需水量就越大。用电收尘方法收取的粉煤灰细,所含玻璃微珠多,含碳量低,需水量小,但是产量很少。实际工程选用粉煤灰时,因条件限制不得不采用烧失量较大的粉煤灰时,必须经过混凝土拌和物性能和耐久性试验证明可行,且C50以下混凝土用粉煤灰的烧失量不得大于8%,C50以上混凝土用粉煤灰的烧失量不得大于5%。

(2)磨细矿渣粉。单独粉磨矿渣用于配制混凝土,可使磨细矿渣的细度至少达到和熟料相同。矿渣越细,活性越高。对于高细度的磨细矿渣,在一定的掺量范围内,混凝土的强度随掺量的增大而提高,但是混凝土的温升、化学收缩和自收缩也随着矿渣的掺量增加而增加。因此矿渣的掺量要适度,一般在10%~25%之间。

(3)硅灰。在水灰比不变的情况下,掺入硅灰可明显提高混凝土强度,但需水量随硅灰掺量而增加。硅灰对提高混凝土抗化学腐蚀性有显著效果。但是其高活性不仅不会降低混凝土的温升,反而使温升提前,不利于减少温度变形,并且会增大混凝土自收缩。硅灰的价格也比较贵,最好和其他需水量小的矿物掺合料混合使用。

其他一些矿物掺合料也具有较高的活性,并能提高混凝土抗侵入和抗化学侵蚀的能力,但大多数矿物掺合料有较大的需水性,因此掺量有限,为了避免自收缩和温度应力,也不宜磨得过细。根据现行矿物掺合料的品质水平情况,其氯离子含量必须控制在合理范围内。

五、拌和用水

(1) 如果使用符合国家标准的饮用水作拌和用水可不经检验,使用其他来源的水作拌和用水时,水的品质要经过检验,符合标准规定才能用于混凝土。

(2) 养护用水应符合规定,不得使用海水。

第三节 高性能混凝土技术性质

耐久的混凝土必须能抵抗风化作用、化学侵蚀、磨耗和其他破坏过程,这表示高性能混凝土不仅应有高强度,而且还应具有高刚度、体积变化小、不透水、氯离子难以渗透、高弹性模量、收缩徐变小、热应变小等特点。因此,高性能混凝土在组成和结构上与普通混凝土有所不同,与普通混凝土相比,高性能混凝土具有以下独特的性能:

(1) 耐久性。高效减水剂和矿物质超细粉的配合使用,能够有效地减少用水量,减少混凝土内部的孔隙,能够使混凝土结构安全可靠地工作 50 ~ 100 年以上,是高性能混凝土应用的主要目的。

(2) 和易性。坍落度是评价混凝土和易性的主要指标,若将坍落度控制好,则在振捣的过程中,高性能混凝土的黏性大,粗骨料的下沉速度慢,在相同振动时间内,下沉距离短,稳定性和均匀性好。同时,由于高性能混凝土的水灰比低,自由水少,且掺入超细粉,基本上无泌水,其水泥浆的黏性大,很少产生离析的现象。

(3) 力学性能。由于混凝土是一种非均质材料,强度受诸多因素的影响,其中水灰比是影响混凝土强度的主要因素,对于普通混凝土,随着水灰比的降低,混凝土的抗压强度增大,高性能混凝土中的高效减水剂对水泥的分散能力强、减水率高,可大幅度降低混凝土每立方米用水量。在高性能混凝土中掺入矿物超细粉可以填充水泥颗粒之间的空隙,改善界面结构,提高混凝土的密实度及强度。

(4) 体积稳定性。高性能混凝土具有较高的体积稳定性,即混凝土在硬化早期应具有较低的水化热,硬化后期具有较小的收缩变形。

(5) 经济性。高性能混凝土较高的强度、良好的耐久性和和易性都能使其具有良好的经济性。高性能混凝土良好的耐久性可以减少结构的维修费用,延长结构的使用寿命,收到良好的经济效益;高性能混凝土的高强度可以减小构件尺寸,减小自重,增加使用空间;高性能混凝土良好的和易性可以减小工人工作强度,加快施工进度,减少成本。有学者研究发现,用 C100 ~ C140 的高性能混凝土替代 C40 ~ C60 的混凝土,可以节约 15% ~ 25% 的钢材和 30% ~ 70% 的水泥。虽然高性能混凝土本身的价格偏高,但是其优异的性能使其具有了良好的经济性。概括起来说,高性能混凝土就是能更好地满足结构功能要求和施工工艺要求的混凝土,能最大限度地延长混凝土结构的使用年限,降低工程造价。

高性能混凝土的配制特点是低水胶比、掺加高效减水剂和矿物细料,故从组成和配比来看,高性能混凝土还具有以下特点:

(1) 水灰比(W/C) ≤ 0.38 。有研究证明,当水灰比 > 0.38 时,水泥全部水化后,水泥石中含有水泥凝胶、凝胶水、毛细水和空隙。而毛细水在混凝土中是可以扩散渗透的,也就是说,

$W/C > 0.38$ 时,混凝土中有毛细管存在,抗渗性降低,耐久性降低。所以配制高性能混凝土时,应慎重选择水灰比,选择小的水灰比,从提高耐久性的角度讲是有利的。

(2) 高效减水剂是降低混凝土水灰比的有效组分,也是高性能混凝土不可或缺的组成材料。为使混凝土具有良好的工作性能,高效减水剂除了具有高的减水率外,还应具有有效控制坍落度损失的功能。

(3) 矿物掺合料是高性能混凝土的功能组分之一,它可以填充水泥的空隙,在相同的水胶比下,能提高混凝土的流动性,硬化后也能提高其强度。更重要的是能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。

(4) 对高性能混凝土有抗冻或其他要求时,应掺加引气剂以及其他有关的外加剂,如阻锈剂等。

第四节 高性能混凝土设计

一、高性能混凝土的配制目标

1. 不同以往的设计思路

普通混凝土的配合比设计中,是按混凝土的强度等级要求计算水灰比并确定材料组成。而高性能混凝土,则以满足耐久性的要求来选择水胶比、控制胶凝材料最小用量以及掺合料的比例。

2. 胶凝材料用量及粉煤灰的比例

在进行配合比参数设计时,为保证混凝土的耐久性,混凝土中胶凝材料总量应处在一个适宜的范围,不仅有最低值限制要求,还有最高值限制要求,对于 C30 及以下混凝土,胶凝材料总量不宜高于 $400\text{kg}/\text{m}^3$, C35 ~ C40 不宜高于 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 。提倡使用粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料,与普通硅酸盐水泥一起作为胶凝材料。使用粉煤灰等矿物掺合料,并不是单纯地考虑降低混凝土成本,而是为了满足混凝土耐久性的需要,特别是可以有效改善混凝土抵抗化学侵蚀的能力(包括氯化物侵蚀、硫酸盐侵蚀、碱骨料反应等)。国内外的大量研究表明,粉煤灰的掺量在 20% 以上时,改善混凝土耐久性的效果较佳,更有研究资料表明,粉煤灰的最大掺量可达 50% 左右。

3. 耐久性要求

(1) 含气量

含气量的要求也是高性能混凝土与普通混凝土的重要区别之一。以往工程仅在抗冻要求时才考虑适当提高混凝土的含气量。实际上,混凝土中适量的引气,不仅能改善抗冻性,同时可显著减轻混凝土的泌水性,使水在拌和物中的悬浮状态更加稳定,从而提高混凝土材料的均匀性和稳定性。为适当提高混凝土的含气量,并获得较佳的减水和保塑效果,可优先选用减水剂配制高性能混凝土。

(2) 电通量

电通量是某些行业(如铁路行业)对混凝土耐久性最重要、最具体的指标。目前我国尚无电通量试验的国家标准,铁路行业电通量试验方法是以美国 ASTM C1202 快速电量测定方法为

基础制定的,其所测指标可以最大程度地区分和评价混凝土的密实度,而密实度正是影响混凝土耐久性最为关键的因素。以往多是以抗渗性来评价混凝土的密实程度,但实践证明,抗渗试验只适合于判定较低强度等级混凝土的密实性,当强度等级超过 C30 后,抗渗等级几乎都能达到 P20 以上,再往下试验比较困难。这正是用电通量指标取代抗渗等级作为混凝土耐久性控制的主要原因。混凝土的电通量主要取决于水胶比,通过大量试验得到规律,一般水胶比小于 0.5 时基本可满足电通量小于 2000C 的要求,水胶比小于 0.45 时基本可满足电通量小于 1500C 的要求。

二、高性能混凝土配合比设计法则

根据高性能混凝土的特点,在配合比设计时应遵循以下法则:

(1)水灰比法则。混凝土的强度与水泥强度成正比,与水灰比成反比。水灰比一经确定,不能随意变动。这里的“灰”包括所有胶凝材料,也可称为水胶比。

(2)混凝土密实体积法则。可塑状态混凝土的总体积为水、水泥(胶凝材料)、砂、石的密实体积之和。这一法则是计算混凝土配合比的基础。高性能混凝土的胶凝材料中包含了密度不同的各组分,因此更应遵循这一法则。

(3)最小单位用水量或最小胶凝材料用量法则。在水灰比固定、原材料一定的情况下,使用满足和易性的最小加水量(即最小的浆体量),可得到体积稳定、经济的混凝土。

(4)最小水泥用量法则。为降低温升,提高混凝土抵抗环境因素侵蚀的能力,在满足混凝土早期强度要求的前提下,应尽量减少胶凝材料中的水泥用量。

三、高性能混凝土配合比的主要参数

高性能混凝土配合比的参数主要有水胶比、浆骨比、砂率和减水剂掺量。

1. 水胶比

水胶比(或水灰比)不仅极大地影响混凝土的强度,同时会极大地影响混凝土的抗渗性和耐久性,水灰比大的水泥石的毛细孔隙较大,渗透性增加,耐久性降低。《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)中由于对耐久性有要求,规定了最大水灰比与最小水泥用量。对于高性能混凝土,为达到低渗透性以保证混凝土的耐久性,其水灰比不宜大于 0.35~0.40。有研究表明,硅酸盐水泥水化时,结合水约占水泥质量的 22%,即在目前所用水泥和高效减水剂的条件下,采用普通的拌和、浇筑和养护技术措施,最佳水灰比约为 0.22。水灰比小于 0.22,则水泥石达不到足够的密实度,因此高性能混凝土的水灰比取值范围应为 0.22~0.35。如陕西某大型工程采用 0.236 的水胶比,掺加 II 级粉煤灰,配制出 C80 的泵送大流动性混凝土。

2. 浆骨比

水灰比确定以后,胶凝材料总量就反映了水泥浆和骨料的比例,即浆骨比。试验证明,高性能混凝土中水泥浆与骨料的体积比宜为 35/65。即为保证混凝土具有良好的流动性,要求有较大的胶凝材料总用量,但随着胶凝材料用量的增加,混凝土的弹性模量会有所下降,混凝土的收缩也会有所增加。通常,高性能混凝土的胶凝材料总量以不超过 $550\text{kg}/\text{m}^3$ 为宜,并随混凝土强度等级的下降而减少,但最少不能低于 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 。此外由于水灰比较低,水泥用量

较高时,高性能混凝土会有较高的水化热,温升较高,容易引起体积变形,产生温度裂缝。因而从技术性与经济性方面考虑,需要掺加辅助胶凝材料,以减少混凝土的温升和干缩,提高抗化学侵蚀的能力,增加密实度,并降低成本。一般以 10% ~ 30% 的混合材料取代水泥,可以单独掺加硅灰、矿渣、粉煤灰,也可以掺加硅灰与粉煤灰或硅灰与矿渣的混合物。

3. 砂率

在水泥浆用量一定的情况下,细骨料对混凝土配合比的影响比粗骨料更为显著,质量一定时,细骨料的表面积比粗骨料大得多,所有骨料的表面都需要有胶凝材料浆体包裹,因而砂的颗粒级配以及砂率的大小均对浆体的需要量有直接的影响。高性能混凝土胶凝材料用量较大,若细骨料用料较少,粗骨料用量较大,则可以减少浆体用量,比较经济,也可以获得较高的强度,故在和易性能满足施工要求的条件下,可以选择较小的适宜的砂率。研究表明,应用适当的粗骨料,水泥浆与骨料的体积比为 35/65 的条件下,可以制造出尺寸稳定性好的高性能混凝土,在粗骨料最大粒径为 12 ~ 19mm 时,推荐的砂率为 36% ~ 39%。通过对国外典型工程和实验室配合比的统计,发现对于 28d 抗压强度为 60 ~ 120MPa 的高性能混凝土,砂率大多在 34% ~ 44% 范围内;当强度为 80 ~ 100MPa 时,砂率主要集中在 38% ~ 42% 之间;且随混凝土强度的增高,砂率呈减小的趋势。如内蒙古某研究采用 0.36 的砂率,掺加 650m²/kg 的超细矿渣配制出 C80 的高性能混凝土。

4. 减水剂掺量

在上述低水灰比的条件下,要拌制大流动性混凝土是十分困难的,所以必须要应用高效减水剂。高效减水剂具有较强的分散作用,其减水率可以高达 30% 以上,在水泥用量大或水泥颗粒相对较细时,分散作用更为显著。高效减水剂的掺量一般以水泥质量的 1.0% 左右较为适宜,或者掺加 0.8% ~ 1.0% 的高效减水剂和 0.2% 左右的木质素磺酸钙,以适当控制混凝土的坍落度损失。当胶凝材料用量较大时,高效减水剂的掺量需要增加。

第五节 高性能混凝土施工质量控制

高性能混凝土质量控制的关键在于保证原材料和拌和物质量的稳定。应充分考虑施工过程中可能出现的各种情况,制订充分的预防措施,合理设置确保原材料和拌和物质量稳定的控制点,杜绝在施工过程中间随意更改既定施工方案和施工条件已经变化而施工措施一成不变的现象发生。控制要点包括以下几个方面:

(1) 高性能混凝土尽可能地采用大型搅拌站集中拌制。由于采用电子计量系统对各种原材料进行计量,整套设备自动化程度较高,受操纵人员人为影响较小,对混凝土配合比的要求执行得比较好,这样搅拌出的混凝土质量比较均匀且相对稳定,混凝土的耐久性也相对较好。原材料每盘称量偏差如下:水泥、矿物掺合料为 $\pm 1\%$,粗、细骨料为 $\pm 2\%$,外加剂、拌和用水为 $\pm 1\%$ 。

(2) 加强对混凝土拌和物的检测控制。以往对混凝土拌和物出机及现场的指标一般只测定混凝土坍落度,观察混凝土的黏聚性和泌水情况。而现在却还要加测出机温度、含气量、入模温度、压力泌水率等指标,而且频率比较大(每拌制 50m³ 混凝土或每工作班至少测一次,温度则要求每工作班至少测 3 次),这就要求试验人员配备的量比普通混凝土施工的要多。

(3) 骨料的级配粒径控制。

① 细骨料应选用洁净的砂,最好是圆形颗粒的天然河砂,级配颗粒应符合Ⅱ区标准。

② 粗骨料要按粒径分级堆放,严格按试验试配优化合成级配。任何新选料源或连续使用同料源、同品种、同规格的粗、细骨料达一年时,要进行全面检测。

(4) 控制混凝土的各种温度。控制混凝土的各种温度主要是为了防止温差过大引起混凝土产生裂缝。

① 混凝土温度控制的原则。升温不要太早和太高;降温不要太快;混凝土中心和表面之间、新老混凝土之间以及混凝土表面和大气之间的温差不要太大。温度控制的方法要根据气温(季节)、混凝土内部温度、构件尺寸、约束尺寸、约束情况、混凝土配合比等具体条件来确定。

② 新旧混凝土浇筑面的温度控制。新浇混凝土与邻接的已硬化的混凝土或岩土介质间的温差不得大于 15°C 。这是因为新浇混凝土浇筑于已硬化混凝土表面时,由于两种混凝土的收缩不能同步,新浇混凝土往往由于收缩受到硬化混凝土的限制而产生开裂,这种现象在两种混凝土温差过大时更为明显。

③ 混凝土拆模的温度控制。混凝土拆模时,心部混凝土与表层混凝土之间的温差、表层混凝土与环境之间的温差均不得大于 20°C (梁体心部混凝土与表层混凝土之间的温差、表层混凝土与环境之间的温差以及箱梁腹板内外侧混凝土之间的温差均不得大于 15°C)。在炎热和大风干燥季节,应采取有效措施防止混凝土在拆模过程中开裂。

(5) 混凝土的养护。混凝土养护要注意湿度和温度两个方面。养护不仅是浇水保湿,还要注意控制混凝土的温度变化。在湿养的同时,应该保证混凝土表面温度与内部温度和所接触的大气温度之间不出现过大的差异。采取保温和散热的综合措施,可以防止温度变化和温差过大。

混凝土的潮湿养护通常采用喷水或保水方法,或用湿沙土、湿麻袋覆盖。预制混凝土或寒冷天气中浇筑的混凝土通常用密封罩内送蒸汽的方法保持潮湿。在遮阳防晒条件下进行混凝土潮湿养护,比向混凝土外露面洒水养护更有效。密封薄膜养护(不透水塑料薄膜或养护剂形成的薄膜)在水源不足时是很好的保温养护手段,但应注意薄膜密封前混凝土表面必须处于饱水状态。

拆除模板或撤除保温防护后,如表面温度骤降,混凝土可能会产生龟裂。只有当混凝土任何部位的温度都处于逐渐下降的状态时,才能撤除防护。大体积混凝土不能降温过快,因为当混凝土内外存在温差时,表面骤冷的混凝土产生裂缝的可能性很大。