

XIANDAI
DUOZUFEN
HUNNINGTU
LILUN

现代多组分

● 朱效荣 李 迁 孙 辉 著

混凝土理论

辽宁大学出版社

XIANDAI
DUOZUFEN
HUNNINGTU
LILUN

现代多组分

混凝土理论

朱效荣 李 迁 孙 辉 著



辽宁大学出版社

©朱效荣 李 迁 孙 辉 2007

图书在版编目 (CIP) 数据

现代多组分混凝土理论/朱效荣, 李迁, 孙辉著. —沈阳: 辽宁大学出版社,
2007. 5

ISBN 978-7-5610-5361-4

I. 现… II. ①朱… ②李… ③孙… III. 混凝土—强度理论—研究
IV. TU528.01

中国版本图书馆CIP数据核字 (2007) 第 066487 号

出版者: 辽宁大学出版社

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路66号 邮政编码: 110036)

印刷者: 沈阳市北陵印刷厂有限公司

发行者: 辽宁大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

插 页: 4

印 张: 7.75

字 数: 180千字

印 数: 1~3000册

出版时间: 2007年5月第1版

印刷时间: 2007年5月第1次印刷

责任编辑: 马 静

封面设计: 邹本忠

版式设计: 何艳秋

责任校对: 程 杰

书号: ISBN 978-7-5610-5361-4

定价: 32.00元

联系电话: 024-86864613

网址: <http://press.Lnu.edu.cn>

电子邮件: Lnupress@vip.163.com

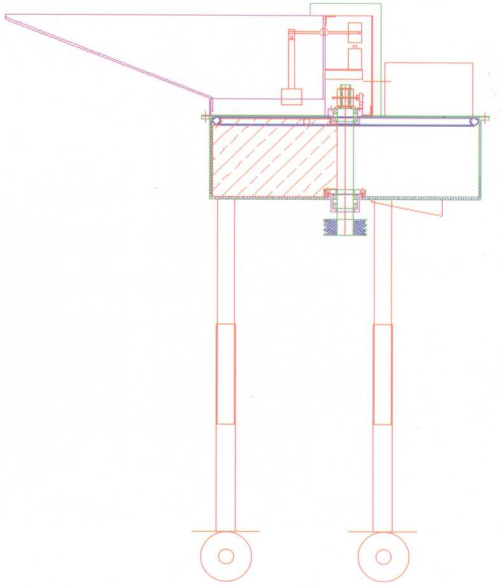


作者简介

朱效荣，1970年1月生，教授级高级工程师。长期从事科研工作，主持研制的低碱膨胀剂、聚丙烯纤维防渗抗裂混凝土、ZF族高效减水剂、有机硅防水剂、HPC-001S高性能混凝土综合性能测试仪、预拌砂浆、新型无熟料水泥混凝土、C100高性能混凝土、多组份混凝土理论、绿色环保透水混凝土等技术成果达到国际领先或先进水平，大量应用于实际工程。其中C100高性能混凝土应用于国家大剧院钢管柱工程施工，是目前国内应用强度等级最高的预拌混凝土。先后完成了科研和技术革新改造项目18项，其中获得省部级科学技术奖6项；局级科技进步奖9项；被授予国家发明专利8项，在国家级技术类核心期刊等杂志发表论文二十多篇，参加了《预拌混凝土》和《早期推定混凝土强度实验方法标准》两部国家标准的修订工作。



HPC-001S高性能混凝土
综合性能测试仪



混凝土体积测定仪

前 言

传统混凝土中掺合料的主要作用是取代部分水泥、减少水泥用量、降低水化热和混凝土成本,并对混凝土拌合物的和易性与混凝土的强度、耐久性带来一定的改善,原国家标准规定粉煤灰和矿渣粉等矿物掺合料的用量不能超过规定的最大限量。而随着外加剂和超细矿物掺合料的广泛使用,其在混凝土中的作用越来越重要,对混凝土性能的影响越来越大,其掺量也越来越大,我国现有的混凝土设计规范已经很难满足高性能混凝土配制及施工的实际需要。本书的核心内容就是提出多组分混凝土强度理论的数学模型,并在此基础上进一步探讨其对强度的预测和在配合比设计中的实际应用,并对混凝土各组分进行了研究和介绍。此外还对高性能混凝土综合性能测试仪和混凝土体积测定仪的研究进行了介绍。

本书共分为十三章,每章内容简介如下:

第一章介绍了现代多组分混凝土强度理论数学模型的建立及应用。首先对混凝土的体积组成模型进行了分析,以鲍威尔斯胶空比理论、晶体强度计算理论和格利菲斯脆性材料断裂理论为基础,结合水灰比公式建立了多组分混凝土强度理论数学模型及计算公式(简称XS公式)。提出了多组分混凝土体积组成石子填充模型,并对混凝土硬化浆体理论强度、硬化浆体的密实度、掺合料的活性系数和胶凝材料的填充因子系数等进行了定义和准确计算公式的推导。根据混凝土体积组成石子填充模型,进行了现代多组分混凝土强度的早期推定和

配合比设计计算,推导出了多组分混凝土强度与水泥、掺合料、砂、石、外加剂及拌合用水定量计算的科学计算公式。

第二章介绍了现代多组分混凝土强度理论在配合比设计中的应用。与传统混凝土配合比设计方法相比,以多组分混凝土强度理论数学模型为基础的石子填充法用于混凝土配合比的设计(XS法),充分考虑了混凝土配制过程中强度、工作性和耐久性之间的矛盾,实现了混凝土性能与原材料之间的准确量化关系,可以配制各种强度等级的高性能混凝土。由于各种材料用量合理,既提高了混凝土的综合性能又大大降低了生产成本,实现了混凝土配合比设计计算的科学、精确、简便、快捷和实用,在预拌混凝土生产企业进行推广显得十分必要。

第三章介绍了多组分混凝土配合比设计及强度预测计算分析软件的编写。混凝土配合比设计分析软件根据多组分混凝土强度理论,设计出了基于数字化的混凝土配合比设计和强度预测计算软件,实现了已知混凝土配合比时混凝土28天强度的预测、分析;实现了依据现有的原材料基本性能完成混凝土配合比设计,使混凝土配合比设计与强度预测功能统一,使用简便、可靠、直观,为混凝土生产提供了可靠的计算技术基础。

第四章介绍了毛细管微泵开裂机理在混凝土裂缝控制中的应用。通过对混凝土裂缝的种类和产生的原因作较全面的分析,提出了一定的控制方法,以方便施工单位参考,达到防患于未然的作用。

第五章简要介绍了多组分混凝土原材料——水泥、砂、石、掺合料和外加剂的一些技术要求和应用,以及国家标准中的相关规定。

第六章介绍了硫铝酸盐与硅酸盐复合水泥研究。根据复合化的思路,通过多组分复合所产生的超叠加效应,在立窑产硅酸盐水泥熟料中掺入一定量的硫铝酸盐水泥熟料,然后通过调整石膏的掺入量,达到对立窑水泥改性的目的,解决立窑水泥存在的一些问题。同时在此研究的基础上,进一步探讨混合材对复合系统各项性能影响的规律。

第七章介绍了磨细矿渣在高性能混凝土中的应用研究。探讨了矿

渣的细度及掺量对混凝土强度的影响,对掺加磨细矿渣的混凝土拌合物的性能及硬化后混凝土的性能进行了试验,得出磨细矿渣的掺入可以使混凝土获得更为优异的施工性能和耐久性能的结论。

第八章介绍了 ZL 缓凝高效减水剂对混凝土性能的影响。对新型缓凝高效减水剂的工艺、性能、作用机理进行了介绍,并且对 ZL 缓凝高效减水剂对混凝土性能的影响进行了详细的研究。

第九章介绍了 SQ 混合材催化剂在水泥生产中的应用。介绍了 SQ 混合材催化剂的研制及其性能,并对其市场潜力及技术、经济效益进行了分析,并对沸石由于催化剂的作用在水泥中的大量应用进行了研究。另外,对水泥助磨剂对混凝土外加剂适应性进行了论述。

第十章介绍的 HPC-001S 高性能混凝土综合性能测试仪专利技术产品是利用混凝土的流变特性来测量混凝土的基本参数的。它通过传感器的旋转剪切运动测量出混凝土的粘滞阻力矩,利用混凝土粘滞阻力矩与混凝土基本参数的相关性,将传感器测量出的混凝土粘滞阻力矩直接转换成数字信号,数字信号送入 MCU 进行数据处理和计算。同时 MCU 还输出一控制信号以校正传感器的误差,保证测试精度,并将结果送给显示电路显示出来。该技术产品采用了传感技术和微电脑技术,能直接通过液晶显示器显示坍落度值、扩展度、水灰比、温度,预测 28 天强度等参考值,并进行平均值计算、数据打印输出或作在线测试。实现了多功能合一,使用简便、可靠、直观。它为混凝土的准确测量提供了技术基础。

第十一章高性能混凝土超缓凝原因及对策的实例分析对某单位冬季施工时生产的混凝土在六个工地出现大面积缓凝的情况进行了研究,根据现场状况,对混凝土超缓凝产生的原因和造成的后果(强度)从外加剂、水泥和生产工艺三个方面进行了初步分析,并给出了对超缓凝混凝土工程的处理意见。

第十二章介绍了混凝土体积测定仪。主要用途是测量预拌混凝土的流量,它是由流量即时液晶显示、微电脑控制并存储和查询数据的功能、计量数据的输出打印的功能所组成,本仪器可以解决混凝土计

量、统计和打印输出问题，是混凝土生产企业加强内部管理的重要工具，也是生产者与购买者计量结算的依据。

第十三章介绍了自密实混凝土的工作原理及检测方法。

本书的第一、二、四、十一、十二、十三章由朱效荣执笔，第五、六、七、八、九、十章由李迁执笔，第三章由孙辉执笔。

朱效荣

2007年5月20日

目 录

第一章 现代多组分混凝土强度理论数学模型的建立及应用	1
第一节 现代多组分混凝土强度理论数学模型的建立.....	1
第二节 现代多组分混凝土强度理论数学模型的验证.....	3
第三节 结论.....	6
第二章 现代多组分混凝土强度理论在配合比设计中的应用	7
第一节 现代多组分混凝土强度理论数学模型.....	7
第二节 混凝土体积组成石子填充模型的建立.....	8
第三节 石子填充法 (XS 法) 在混凝土配合比设计中的应用	8
第四节 结论	13
第三章 多组分混凝土配合比设计及强度预测计算分析软件的编写	15
第一节 数字混凝土设计软件的技术基础	15
第二节 软件设计	16
第四章 毛细管微泵开裂机理在混凝土裂缝控制中的应用	21
第一节 混凝土裂缝的种类和成因	21
第二节 混凝土裂缝控制思路及毛细管微泵开裂机理	22
第三节 裂缝控制措施	22
第四节 工程应用	26
第五章 多组分混凝土原材料	28
第一节 水泥及技术要求	28
第二节 细集料及技术要求	32
第三节 粗集料及技术要求	35
第四节 混凝土掺合料	38
第五节 相关标准对混凝土外加剂的要求	45
第六章 硫铝酸盐与硅酸盐复合水泥研究	48
第一节 原材料	48
第二节 试验方案设计	49
第三节 分析与讨论	50
第四节 R_3 微观试验结果与分析	55
第五节 复合水泥水化机理进一步探讨	58

第七章 磨细矿渣在高性能混凝土中的应用研究	59
第一节 原材料的选择	59
第二节 配合比的优选	60
第三节 混凝土拌合物性能试验	61
第四节 硬化混凝土的性能试验	64
第五节 结论	66
第八章 ZL 缓凝高效减水剂对混凝土性能的影响	67
第一节 研究方案的确定	68
第二节 ZL 缓凝高效减水剂工艺的确定	69
第三节 ZL 缓凝高效减水剂的性能	69
第四节 ZL 缓凝高效减水剂的作用机理	70
第五节 ZL 缓凝高效减水剂对混凝土性能的影响	71
第六节 结论	76
第九章 SQ 混合材催化剂在水泥生产中的应用	77
第一节 SQ 混合材催化剂的研究与应用	77
第二节 SQ 混合材催化剂技术经济效益分析	81
第三节 沸石在水泥生产中的应用研究	84
第四节 水泥助磨剂对混凝土外加剂适应性研究	87
第十章 HPC—001S 高性能混凝土综合性能测试仪的研究	89
第一节 概述	89
第二节 技术基础介绍	90
第三节 技术方案的确定	94
第四节 设计与调试	95
第五节 结论	98
第十一章 高性能混凝土超缓凝原因及对策的实例分析	99
第一节 混凝土超缓凝原因	99
第二节 外加剂厂的生产及质量控制状况分析	100
第三节 水泥厂生产及质量控制状况分析	101
第四节 对超缓凝混凝土工程的处理意见	103
第十二章 混凝土体积测定仪的研发	105
第一节 混凝土拌合物体积流量测定仪的研究	105
第二节 混凝土体积测定仪的经济技术效益分析	107
第十三章 自密实混凝土的工作原理及检测方法研究	110
第一节 自密实混凝土简介	110
第二节 自密实混凝土的工作机理	110
第三节 自密实混凝土工作性评价试验方法	111
参考文献	117

第一章 现代多组分混凝土强度理论 数学模型的建立及应用

随着混凝土化学外加剂和超细矿物掺合料的普遍使用,我国现有的混凝土配合比设计规范已经不能满足高性能混凝土配制及施工的实际需要,特别是传统观念下配制混凝土时水泥强度要比混凝土强度高,粉煤灰及矿渣粉等矿物掺合料用量不能超过一定比例的规定,在现实混凝土生产过程中已经失去了指导意义。以水灰比(水胶比)决定强度的假设为基础的混凝土配合比设计技术规程在许多方面已经不符合多组分混凝土材料自身的性能和特点。基于以上观点,我们首先对混凝土的体积组成模型进行了分析,以鲍威尔斯胶空比理论、晶体强度计算理论和格利菲斯脆性材料断裂理论为基础,结合水灰比公式建立了多组分混凝土强度理论数学模型及计算公式(简称XS公式)。

$$\text{即 } f = \sigma_f \cdot u \cdot m$$

σ_f ——硬化砂浆理论强度

u ——胶凝材料填充强度贡献率

m ——硬化砂浆密实度

提出了多组分混凝土体积组成石子填充模型,并对混凝土硬化砂浆的理论强度、硬化砂浆的密实度、掺合料的活性系数和胶凝材料的填充因子系数等进行了定义和准确计算公式的推导。根据混凝土体积组成石子填充模型,我们进行了现代多组分混凝土强度的早期推定和配合比设计计算,推导出了多组分混凝土强度与水泥、掺合料、砂、石、外加剂及拌合用水定量计算的科学计算公式。

第一节 现代多组分混凝土强度理论数学模型的建立

多组分混凝土作为一种复杂的物理化学反应产物,主要由砂子、石子、水泥、矿渣粉、粉煤灰、硅粉、水、外加剂等成分组成,由于水泥和胶凝材料的水化过程极其复杂,内部结构不能直接测量。作为一种承重材料,我们认为其强度的形成大体可分为两部分:一部分是由粗骨料(石子)提供,因为石子的强度大于混凝土的设计强度,因此大多数混凝土在工作状态时骨料都具有足够的强度。另一部分来源于硬化砂浆,对于强度等级较低的混凝土,其硬化砂浆强度主要由水泥水化形成的C—S—H凝胶和粉煤灰等惰性或活性较低的掺合料填充组成,它的强度主要来源

于水泥。而对于强度较高的混凝土,其硬化砂浆强度主要由水泥水化形成的C—S—H凝胶、活性较高的矿渣粉水化形成的凝胶、填充于孔隙中的超细矿渣粉和硅粉等组成,这样就决定了混凝土的强度在低强度等级范围内与水泥强度和粘结强度相关;在高强度等级范围内由于粘结强度大,故混凝土的强度与水泥强度、超细矿物掺合料密切相关,特别是超细掺合料的微粉超叠加效应表现得非常明显。

一、硬化砂浆理论强度计算公式的建立

根据格利菲斯断裂强度理论公式 $\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_0}{\pi a}}$, 可以求得密实状态下无缺陷多组分混凝土硬化砂浆理论强度。由于多组分混凝土中胶凝材料用量和反应活性对强度有一定的影响,经过综合考虑,我们引入以上两个因素的影响系数 α , 这样我们可以认为多组分混凝土硬化砂浆理论强度值主要取决于胶凝材料的用量和反应活性、内部结构组成、微裂缝和缺陷的大小。

其计算公式变为: $\sigma_f = \sqrt{\frac{2\alpha E\gamma_0}{\pi a}}$

α ——胶凝材料用量系数, $\alpha = \frac{B}{1000}$, $B = \alpha_1 C + \alpha_2 F + \alpha_3 K$;

α_1 、 α_2 、 α_3 ——分别为水泥、粉煤灰、矿粉的活性指数;

C 、 F 、 K ——分别为水泥、粉煤灰、矿粉的用量;

γ_0 ——混凝土表面能;

a ——硬化砂浆初始裂缝值;

π ——常数 3.14;

E ——设计强度等级混凝土弹性模量 $E = 0.55 \times \sqrt{f_{cu,0}} \times 10^4$;

f ——混凝土强度等级。

二、胶凝材料填充强度贡献率计算公式的建立

在很多描述混凝土矿物掺合料的技术文献中,曾多次提出超细矿物掺合料的微集料填充效应,但一直没有提出准确的量化计算公式和数据。通过胶凝材料的比表面积,我们可以求得粉煤灰、矿渣粉、沸石粉、炉渣粉、硅灰等超细矿物掺合料与水泥的粒径比,从而准确计算出它们相互之间最佳的填充比例。同时又考虑相同粒径比的超细矿物掺合料密度不同时,未凝结的砂浆在自重作用下的沉降速度不同,填充效果也不同,因此在填充因子计算时引入密度的影响。根据以上分析,我们定义胶凝材料填充强度贡献率为:

$$u = \frac{u_1 C + u_2 F + u_3 K + u_4 Si}{C + F + K + Si}$$

式中:

C 、 F 、 K 、 Si ——分别为水泥、粉煤灰、矿粉、硅粉的用量;

u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 ——分别为水泥、粉煤灰、矿粉、硅粉的填充因子系数;

$$u_1 = \sqrt{\frac{S_C \rho_C}{S_C \rho_C}}, \quad u_2 = \sqrt{\frac{\rho_F S_F}{\rho_C S_C}}, \quad u_3 = \sqrt{\frac{\rho_K S_K}{\rho_C S_C}}, \quad u_4 = \sqrt{\frac{\rho_S \rho_S}{\rho_C S_C}}.$$

三、硬化砂浆密实度计算公式的建立

根据胶空比理论,水化的胶凝材料所占体积越大混凝土的强度越高,即混凝土中硬化砂浆密实度越大混凝土的强度越高,这里我们定义混凝土中硬化砂浆的密实度为:

$$m = (W_0/W - 0.27)$$

W_0 ——胶凝材料水化理论用水量 $W_0 = 0.23 \times C$;

W ——胶凝材料拌合用水量 $W = (0.23 \times C + 0.5 \times T) \beta \times (1 - n)$;

C ——胶凝材料总用量;

T ——混凝土的坍落度;

β ——胶凝材料需水量系数;

n ——外加剂的减水率;

$P = 0.27$ ——胶凝材料完全水化形成的凝胶孔体积。

四、现代多组分混凝土强度理论数学模型的建立

依据以上分析总结,我们可以将多组分混凝土强度理论数学模型及其计算公式 $f = \sigma_f \cdot u \cdot m$ 扩展写成以下形式:

$$f = \sqrt{\frac{2\alpha E \gamma_0}{\pi a}} \left(\frac{\sum u_i c_i}{\sum c_i} \right) \left(\frac{0.23 \sum c_i}{(0.23 \sum c_i + 0.5 T) \beta (1 - n)} - 0.27 \right)$$

这样我们就建立了多组分混凝土强度理论数学模型,其中 σ_f 是混凝土对应的硬化砂浆的理论强度,它主要考虑了胶凝材料的水化反应形成的强度;胶凝材料填充强度贡献率 u 主要考虑了胶凝材料的微集料填充效应,我们可以根据掺合料的种类、数量的不同计算它们对混凝土强度的影响; m 是硬化砂浆的密实度,它主要考虑胶凝材料水化和调整混凝土拌合物的工作性能以及外加剂的使用引起的密实度变化对混凝土强度的影响。这一公式是当今多组分混凝土强度计算和配合比设计的通用公式,当混凝土原材料只使用水泥、砂、石和水四组分时,该公式简化为 $f = \sigma_f \cdot \left(\frac{0.23C}{W} - 0.27 \right)$,即符合水灰比决定强度的统计及经验计算公式。

第二节 现代多组分混凝土强度理论数学模型的验证

现代多组分混凝土强度理论数学模型及计算公式经过数学推导得到了混凝土中水泥、掺合料、砂、石、外加剂和拌合用水量等组成材料对强度影响的准确计算公式,解密了混凝土强度与各组成之间的定量关系,可以广泛用于现代多组分混凝土(水泥)强度的早期推定和配合比设计计算。

一、C10~C30 掺粉煤灰混凝土

普通混凝土实际强度远远小于理论强度的原因,一方面是由于水泥及胶凝材料水化后所占的体积小于由强度贡献胶凝材料水化后的体积,而非活性或低活性掺合料(如粉煤灰)在28天时还没有完全水化,胶凝材料的强度贡献率低,因此强度较低;另一方面低强度等级混凝土配比中胶凝材料用量较少,使石子、砂子及胶凝材料之间存在微裂缝使界面粘结强度较低,导致混凝土强度降低;第三个因素是混凝土中胶凝材料拌合用水量大于胶凝材料理论水化用水量,这些水分在混凝土硬化后蒸发,留下孔隙使混凝土中硬化砂浆密实度降低从而影响混凝土的强度。对于大多数C10~C30普通混凝土,胶凝材料使用水泥和粉煤灰,其强度计算如下:

例1 已知C20混凝土,使用的水泥为P·O32.5,细度0.08mm方孔筛筛余3%,混凝土实测强度值为26MPa,利用多组分混凝土强度理论数学计算公式计算强度。

(1) 根据原材料计算初始参数值

$$C=240\text{kg} \quad F=100\text{kg} \quad K=0\text{kg} \quad S_i=0\text{kg} \quad W=175\text{kg} \quad W_0=78\text{kg} \quad \alpha_1=1$$

$$\alpha_2=0 \quad \alpha_3=0.75 \quad u_1=1.0 \quad u_2=0.53 \quad u_3=0 \quad u_4=0$$

$$S_c=320\text{m}^2/\text{kg} \quad S_f=150\text{m}^2/\text{kg} \quad \rho_c=3.0 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3 \quad \rho_f=1.8 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$$

$$T=220\text{mm} \quad n=15\% \quad \beta=1.05 \quad \gamma_0=0.386 \quad \pi=3.14 \quad a=0.08$$

(2) 将以上参数带入公式

$$f = \sqrt{\frac{2\alpha E \gamma_0}{\pi a} \left(\frac{\sum u_i c_i}{\sum c_i} \right) \left(\frac{0.23 \sum c_i}{(0.23 \sum c_i + 0.5T) \beta (1-n)} - 0.27 \right)}$$

可得 $f=24.90\text{MPa}$, 计算值与实测值相差小于2MPa。

其他条件不变时改变用水量进行计算可得:

$$W=185 \text{ 时} \quad m = (W_0/W - 0.27) = 0.152 \quad f = \sigma_f \cdot u \cdot m = 21.51\text{MPa}$$

$$W=195 \text{ 时} \quad m = (W_0/W - 0.27) = 0.130 \quad f = \sigma_f \cdot u \cdot m = 18.39\text{MPa}$$

用水量的变化对低强度等级混凝土强度的影响主要是改变了混凝土内部硬化砂浆的密实度。

二、C30~C55 掺复合料(矿粉和粉煤灰)混凝土

掺复合料(矿粉和粉煤灰)普通混凝土,由于双掺矿渣粉和粉煤灰,从理论可知该混凝土除具备C10~C30普通混凝土的特征外,由于矿渣粉的引入,使混凝土内硬化砂浆结构较为复杂。其强度来源从内部组成看,有一部分矿粉是超细粉,产生了微粉填充叠加效应,因此使混凝土结构致密;另一方面又因为较粗的矿渣粉不能及时水化而使混凝土强度提高较少。综合实际情况,对于C30~C55掺复合料(矿粉和粉煤灰)混凝土,胶凝材料使用水泥、粉煤灰和矿粉,其强度计算如下:

例2 已知C50混凝土,使用的水泥为P·O32.5,细度0.08mm方孔筛筛余1.5%,混凝土实测强度值为55MPa。利用多组分混凝土强度理论数学计算公式计算强度。

(1) 根据原材料计算初始参数值

$C=240\text{kg}$ $F=100\text{kg}$ $K=120\text{kg}$ $W=175\text{kg}$ $W_0=105.8\text{kg}$

$S_C=320\text{m}^2/\text{kg}$ $S_F=150\text{m}^2/\text{kg}$ $S_K=400\text{m}^2/\text{kg}$

$\rho_C=3.1\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ $\rho_F=1.8\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ $\rho_K=2.5\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$

$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$ $\alpha_3=0.75$ $u_1=1.0$ $u_2=0.53$ $u_3=1.02$ $u_4=0$

$T=220\text{mm}$ $n=15\%$ $\beta=1.15$ $\gamma_0=0.386$ $\pi=3.14$ $a=0.08$

(2) 将以上参数带入公式

$$f=\sqrt{\frac{2\alpha E\gamma_0}{\pi a}\left(\frac{\sum u_i c_i}{\sum c_i}\right)\left(\frac{0.23\sum c_i}{(0.23\sum c_i+0.5T)\beta(1-n)}-0.27\right)}$$

可得 $f=59.09\text{MPa}$, 计算值与实测值相差小于 4MPa 。

其他条件不变时改变用水量进行计算可得:

$W=185$ 时 $m=(W_0/W-0.27)=0.335$ $f=\sigma_f \cdot u \cdot m=53.271\text{MPa}$

$W=195$ 时 $m=(W_0/W-0.27)=0.302$ $f=\sigma_f \cdot u \cdot m=48.68\text{MPa}$

经过对比分析, 胶凝材料细度的变化对混凝土强度的影响主要是改变了混凝土内部硬化砂浆的理论强度值和胶凝材料的填充因子系数, 从而改变了混凝土的强度。

三、C60~C100 掺硅粉高强度混凝土

由于超细矿渣粉和硅粉的复合使用, 从理论可知 C60~C100 混凝土内硬化砂浆结构更为复杂。其强度来源从内部组成看, 第一部分由水泥水化形成的 C-S-H 凝胶产生; 第二部分是超细矿渣粉的微粉填充叠加效应, 使硬化砂浆结构更加致密, 提高了混凝土强度; 第三部分是由于硅粉填充到水泥水化后的孔隙和矿粉没有填充到的部位, 产生硅粉微集料填充效应, 使混凝土的强度大大提高。对于 C60~C100 掺硅粉混凝土, 胶凝材料使用水泥、矿粉和硅粉, 其强度计算如下:

例 3 已知 C100 混凝土, 使用的水泥为 P·O42.5, 细度 0.08mm 方孔筛筛余 0.5% , 混凝土实测强度值为 127MPa 。利用多组分混凝土强度理论数学计算公式计算强度。

(1) 根据原材料计算初始参数值

$C=450\text{kg}$ $K=100\text{kg}$ $Si=50\text{kg}$ $W=175\text{kg}$ $W_0=138\text{kg}$

$S_C=350\text{m}^2/\text{kg}$ $S_K=400\text{m}^2/\text{kg}$ $S_{Si}=15000\text{m}^2/\text{kg}$

$\rho_C=3.0\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ $\rho_K=2.5\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ $\rho_{Si}=2.2\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$

$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$ $\alpha_3=0.75$ $u_1=1.0$ $u_2=0.53$ $u_3=0.97$ $u_4=5.6$

$T=240\text{mm}$ $n=25\%$ $\beta=1.15$ $\gamma_0=0.386$ $\pi=3.14$ $a=0.08$

(2) 将以上参数带入公式

$$f=\sqrt{\frac{2\alpha E\gamma_0}{\pi a}\left(\frac{\sum u_i c_i}{\sum c_i}\right)\left(\frac{0.23\sum c_i}{(0.23\sum c_i+0.5T)\beta(1-n)}-0.27\right)}$$

可得 $f=135.76\text{MPa}$, 计算值与实测值相差小于 8MPa 。

其他条件不变时改变用水量进行计算可得:

$$\begin{aligned} W=185 \quad m &= (W_0/W - 0.27) = 0.476 \quad f = \sigma_f \cdot u \cdot m = 123.9 \text{ MPa} \\ W=195 \quad m &= (W_0/W - 0.27) = 0.438 \quad f = \sigma_f \cdot u \cdot m = 114.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

超细硅粉的掺入对混凝土强度的影响主要是提高了填充因子系数,从而改变了混凝土内部孔结构,增加了密实度,大大提高了混凝土的强度。

综合以上验证计算和分析可知,胶凝材料细度的变化对混凝土强度的影响一方面是改变了硬化砂浆的理论强度值,另一方面是超细矿物掺合料的加入使胶凝材料的填充强度贡献率成倍增加。用水量的变化对混凝土强度的影响:一方面是改变了混凝土的工作性,另一方面是改变了混凝土内部硬化砂浆的密实度,从而改变了强度。多组分混凝土强度理论数学模型用于早期推定混凝土强度,定性判断是正确的,定量判断误差小于10%,可以应用于各种类型混凝土强度的早期推定计算。

从2000年以来,我们采用该理论模型进行配合比设计配制的C100高性能混凝土、纤维防裂混凝土和自密实混凝土经过在中国国家大剧院、奥林匹克国家体育场、老山自行车馆和五棵松文化体育中心等重点工程的应用,验证了现代多组分混凝土强度理论数学模型的正确性和结合混凝土体积组成石子填充模型用于混凝土配合比设计的可行性,取得了良好的技术效果。

第三节 结 论

1. 建立了多组分混凝土强度理论数学模型 $f = \sigma_f \cdot u \cdot m$, 该模型综合考虑了原材料技术参数对混凝土的工作性、强度和耐久性的影响,满足了多组分混凝土配合比设计的要求。

2. 通过大量试验提出了当粗集料压碎值 $\leq 8\%$ 时,混凝土的强度主要取决于砂浆强度、胶凝材料填充强度贡献率及密实度的新观点。

3. 上述模型及新观点适用于各种多组分混凝土配合比设计和强度计算,经过数学推导得到混凝土配合比设计中水泥、掺合料、砂、石、外加剂和拌合用水量等组成材料的准确计算公式,确定了混凝土各组分与设计参数之间的定量关系,提高了多组分混凝土配合比设计的合理性与科学性。

4. 经过北京市建委组织,由中国工程院孙伟院士主持的专家组综合评定,本研究成果系国内首创,达到国际先进水平。