



混凝土 工作性调整 CONCRETE

主 编 朱效荣 赵志强 梁汝恒

中国建材工业出版社

混凝土工作性调整

主 编 朱效荣 赵志强 梁汝恒

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土工作性调整 / 朱效荣, 赵志强, 梁汝恒主编.

—北京: 中国建材工业出版社, 2016.5

ISBN 978-7-5160-1452-3

I. ①混… II. ①朱… ②赵… ③梁… III. ①混凝土—性能 IV. ①TU528.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 092717 号

内 容 简 介

《混凝土工作性调整》主要内容分为理论研究、试验研究、外加剂技术、掺合料技术、集料技术、养护技术、施工应用技术、工程应用技术、特种混凝土技术、生产管理技术、经营管理技术、问题分析及其他共 13 个部分, 吸收和选用了国内外有关高性能水泥和高性能混凝土方面专家的论著和报告, 针对预拌混凝土生产过程中的各种因素和困难提出了有效的解决方案。

编辑出版该书, 旨在培养优秀的混凝土生产技术人才。该书内容全部来自生产一线, 有行业前辈的经验, 有技术工作者的亲身实践成果, 更有来自实践中的经验教训, 为预拌混凝土搅拌站的技术工作者提供了技术方面的丰富的实用性指导。

混凝土工作性调整

主 编 朱效荣 赵志强 梁汝恒

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 889mm×1194mm 1/16

印 张: 30.25

字 数: 890 千字

版 次: 2016 年 5 月第 1 版

印 次: 2016 年 5 月第 1 次

定 价: 198.00 元

本社网址: www.jcbs.com.cn 微信公众号: zgjcgycbs

广告经营许可证号: 京海工商广字第 8293 号

本书如出现印装质量问题, 由我社网络直销部负责调换。联系电话: (010)88386906

编 委 会

主 编 朱效荣 赵志强 梁汝恒

副 主 编 闻宝联 刘延恩 戴会生 计海霞

编 委 宋 笑 王 军 张本强 马丽涛 杨 娜 温秀岑

朱炎宁 贺海量 马 安 黄 荣 杨 峰 黄文君

肖 灿 李世华

特别鸣谢 混凝土第一视频网

北京志强积土网络科技有限公司

混凝土科技网

北京灵感科技有限公司

广州市洛美建材（集团）有限公司

东明源昱建材有限公司

前 言 (一)

为了提高混凝土产品质量,满足高强度、高流态和高耐久混凝土生产应用技术需要,培养优秀的混凝土生产技术人员,特征集和编写了《混凝土工作性调整》一书。本书涵盖了水泥、掺合料、外加剂、砂石集料、配合比设计、试验研究、质量控制、技术管理、经营管理以及特种混凝土的各个环节。参与撰稿的人员包括房建、公路、铁路、港口、码头、水电、核电、隧道和桥梁各个领域,他们为本书的成稿做出了很大的贡献,在此深表感谢!

由于本书内容丰富,覆盖面广,为了方便大家阅读,本书将收集的 99 篇论文进行了分类,其中第一部分为理论研究,收集论文 9 篇;第二部分为试验研究,收集论文 6 篇;第三部分为外加剂技术,收集论文 10 篇;第四部分为掺合料技术,收集论文 3 篇;第五部分为集料技术,收集论文 5 篇;第六部分为养护技术,收集论文 11 篇;第七部分为施工应用技术,收集论文 9 篇;第八部分为工程应用技术,收集论文 12 篇;第九部分为特种混凝土技术,收集论文 6 篇;第十部分为生产管理技术,收集论文 7 篇;第十一部分为经营管理技术,收集论文 12 篇;第十二部分为问题分析,收集论文 4 篇;第十三部分为其他,收集论文 5 篇。本书将为广大混凝土从业者提供内容丰富的实用性技术资料。

本书的论文主要由朱效荣教授和赵志强高级工程师征集修改。在本书的修改过程中,吸收和选用了国内外有关高性能水泥和高性能混凝土方面专家的论著和报告的部分内容,得到了许多预拌混凝土生产企业、水泥生产企业、建筑施工单位、监理公司及科研院所的大力支持和帮助,在此深表谢意。技术一直在进步,由于时间和实际经验的不足,书中内容仍然需要同行在技术交流的过程中批评指正,各位同行可以到 www.hntkjw.com 留言,发送电子邮件到 bjlgkj@126.com,编者将虚心听取各种意见并改进。

本书的编撰依赖于生产应用项目的研究,在这些项目的研究过程中,得到了混凝土第一视频网、混凝土科技网、北京灵感科技发展有限公司、东明源昱建材有限公司等单位的大力支持,特别是湖南省硅酸盐学会混凝土和外加剂专家会委员的支持,在此表示感谢!

朱效荣 赵志强

前言 (二)

从20世纪末我国推广预拌混凝土以来,经过十几年的发展,预拌混凝土销售额已达建材工业的20%左右,2014年混凝土与水泥制品产业年销售额超过1万亿,达到1.04万亿,成为中国建材行业规模最大的产业。2013年全国预拌混凝土产量达到历史最高,为16.4亿立方米,2015年取得预拌混凝土生产资格的厂家全国达8500家。

预拌混凝土与传统混凝土相比有着本质的差异,预拌混凝土是一种多组分、大流动性、适应超高距离泵送的具有较高工作性能要求的混凝土。预拌混凝土最主要的三大技术要素为强度、工作性能和耐久性能。强度已经不是难题,通过常规原材料和常规生产工艺已经可以生产C100混凝土,而工作性能和耐久性能已成为目前广大混凝土技术人员共同面临的难题。

在实际生产活动中,一线混凝土技术人员最大困惑之一就是混凝土的工作性能调整问题,如坍落度损失大、扩展度损失大、有坍落度没扩展度、拌合物包裹性差、分层离析、泌水泌浆、抓底和可泵性差等常见表象,给混凝土浇筑施工带来难题,给成品混凝土的匀质性、耐久性带来隐患。这些不足之表象涉及方方面面,如多组分材料之间的相容性问题、配合比设计问题、颗粒之间合理填充问题、水化反应问题、运输距离和运输时间问题以及气温湿度问题等。

为什么现场施工人员总是免不了要给混凝土拌合物加水?难道这种加水行为作为混凝土生产方就没有一点责任吗?为什么我们不能在低等级高品质混凝土方面作些努力,或在不过多提高成本前提下提供自密实或半自密实混凝土呢?

要全面掌握混凝土工作性能调整方法,既要有专业的理论知识,又要有丰富的实践经验,而靠单个人来摸索,将是一个漫长的且难以达到系统性要求的过程。

朱效荣教授和赵志强高工征集主编的《混凝土工作性调整》一书,就是针对以上难题撰写的一本具有指导意义的教科书,这是行业一线技术工作者的福音。文章素材全部来自生产一线,有行业前辈的经验总结,有技术工作者的亲身实践成果,更有来自实践中沉重的教训,比较全面地考虑到预拌混凝土生产过程中的各种因素和所要面对的困难并提出了有效的解决方案。

本书的出版，能真正服务并指导一线生产活动，对预拌混凝土搅拌站的技术工作者具有实实在在的学习参考价值，能够让从业者借鉴，让将来从业者少走弯路，实乃行业幸事！

南方新材料科技有限公司技术中心
中国商砼行业企业专家委员会
全国混凝土标准化技术委员会
湖南省硅酸盐学会砼和外加剂专业委员会
长沙市两型住宅产业化

总工 高级工程师
主任委员
委员
副主任
专家

目 录

理论研究

数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展	王模弼	梁丽敏	李世华	田 帅	(3)	
水泥石的孔结构研究进展	邓天明	张凯峰	赵世冉	王 宁	姚 源 (8)	
大粉煤灰掺量海工混凝土耐久性探讨	艾红梅	孔靖勋	朱苏峰	卢洪正	(13)	
混凝土泵送剂的复配	朱效荣	赵志强	薄 超	王世彬	(19)	
抗冲耐磨混凝土的力学性能研究	王维红	孟云芳	莫立锋		(28)	
碳纤维增强混凝土导电行为研究		白 燕	潘继姮		(34)	
均匀变化温度场中均匀干燥时钢材热膨胀系数对抗裂圆环的影响	顾丽华	张承志			(39)	
装配式建筑纵向钢筋套筒连接用灌浆料的研究进展	赵世冉	张凯峰	姚 源	邓天明	耿 飞	刘 磊 (46)
混凝土离析分形特征研究	冯 闯	袁启涛	李 磊	张艺莹		(50)

试验研究

超缓凝混凝土的配合比试验研究及设计方法	李世华	李章建	赵志强	王模弼	何 云	田 帅 (57)
水工混凝土配合比管理体系优化研究					隗 收	(63)
胶凝材料级配效应综述	周溪泉	修晓明	殷艳春	何 畔	韩 宇	(67)
C30 高性能混凝土的配制与研究	李文龙	刘天云	张凯峰	邓天明	耿 飞	徐 力 (76)
石屑全代砂高性能混凝土配合比简易设计法	周启源	蒋雪琴	谭世霖			(81)
C20 超缓凝大掺量矿物掺合料混凝土的配制及在钻孔咬合桩中的应用	李世华	赵 彦	赵志强	梁丽敏	陈华民	曹 蓉 (86)

外加剂技术

新型聚羧酸保坍剂的制备及混凝土性能研究	贺海量	闵亚红	赵志强	吴振军	严 杰	袁剑涛	蔡炳煌 (93)
聚羧酸减水剂的合成及应用性能研究	刘行宇	刘 磊	刘彦辉	陈 虎	刘博博		(98)
硝酸钠对混凝土强度的影响	刘行宇	刘 磊	刘彦辉	陈 虎	魏 飞		(101)
超早强极低水胶比水泥基材料的研究现状	简险峰	陈 雷	黄天勇	王栋民			(104)
聚羧酸减水剂的研究进展与发展趋势	刘 磊	张光华	张凯峰	刘行宇			(109)
一种早强型聚羧酸高性能减水剂的合成和砂浆早强性能的试验研究	傅 凌	张 娟					(114)
木质素纤维增强干混砂浆的制备与性能表征	李亚辉	钱元弟	雷团结	陈 贺			(118)

常温合成聚羧酸减水剂工艺的理论研究	王浩 张晓春 逢建军 张力冉 王栋民 (123)
高强混凝土灌浆料的配制及其性能研究	王宏伟 (128)
高强高模聚乙烯醇 (PVA) 纤维水泥产品制备工艺及应用	李良 姜维 郑艳红 (137)

掺合料技术

石灰石粉作掺合料对混凝土工作性能及强度的影响	黄荣 赵志强 (145)
钢渣微粉单掺及与矿渣、粉煤灰复掺对混凝土性能的影响	宋凯强 柳东 刘福田 (147)
复合矿物掺合料对高性能混凝土工作性的研究及应用	宋文 (157)

集料技术

集料对混凝土工作性能的影响之连续级配	张本强 赵志强 (163)
用钢渣作集料引起的混凝土工程开裂问题案例分析	张亚梅 李保亮 (168)
高温集料对商品混凝土影响的试验浅析	张保平 (172)
机制砂在混凝土中的应用试验研究	郑春湖 (174)
细集料级配对混凝土和易性及强度的影响	杨锋 赵志强 杨娜 (181)

养护技术

混凝土沸水法养护推定 28d 标养强度试验探讨 ...	韩宇 修晓明 殷艳春 姜兴彦 刘洪江 (187)
天津地区商品混凝土质量控制关键技术研究	李茂奇 刘芳 吴贺龙 (191)
现浇混凝土蜂巢板楼板下表面外观质量问题的研究	陈永钧 江明辉 董杰 (195)
砂含泥量对混凝土性能的影响	孟书灵 张平 (200)
商品混凝土质量控制	曹养华 徐庆香 (203)
砂的主要技术指标及其合理应用	朱效荣 赵志强 薄超 方忠建 (209)
浅谈商品混凝土质量控制	刘博 朱永刚 刘春健 (214)
装饰混凝土工艺品关键技术解析	姚源 张凯峰 刘磊 耿飞 王宁 赵世冉 (218)
浅谈预拌混凝土生产全过程质量控制要点	唐承勇 (221)
浅谈提高混凝土耐久性的措施	王新芳 (224)
云南昭通地区高等级公路高性能混凝土冬期施工技术措施的探讨	黄文君 许国伟 赵志强 杨亚新 王应斌 李东林 董晨辉 王浩 (227)

施工应用技术

全国第十三届冬运会场馆 400m 速滑大道大面积冰面承压混凝土关键配制及施工介绍	朱炎宁 刘军 艾洪祥 (233)
大体积混凝土裂缝防治施工技术在 D6 工程中的应用	刘振东 王春 王怀东 程超 曹祥 刘春玲 (237)
南方冻雨季节预拌混凝土质量问题分析及预防措施	朱江春 牟仲雄 (241)

预拌混凝土生产、施工常遇问题及解决措施 耿鹏涛 孙振磊 徐东明 郭 帅 (244)

浅谈高层大体积混凝土的基础施工管理 朱 吟 (247)

加强责任心减少泵车常见故障 张华强 (250)

泵送混凝土的可泵性与堵管原因的分析 梅 祥 (253)

节水保湿养护膜养生水泥混凝土结构施工技术 李冬生 乔 华 (257)

混凝土预湿集料技术 朱效荣 赵志强 王世彬 (261)

工程应用技术

客运专线无砟轨道底座板低弹性模量混凝土配合比研究及应用 李海滨 张建峰 (273)

基于高温的超高层泵送工程外加剂的研发应用 陈建大 王克琼 沈剑锋 (278)

引气剂在冷却塔抗冻融混凝土中的应用研究 孙东华 谷祖良 都晓明 (285)

钢渣粗集料在泵送配重混凝土的应用试验研究 张 勇 鲁晓辉 谢慧东 (289)

地铁超缓凝混凝土的质量控制及应用技术 王海涛 徐锦富 闫 磊 (294)

机制砂现浇箱梁混凝土的配制及施工质量控制 陆科奇 郝文斌 陈 潇 周明凯 (299)

精品机制砂在高性能混凝土中的应用研究 田 帅 桂进峰 黄久光 李 锐 杜书赞 (303)

掺新型膨胀材料混凝土渡槽早期抗裂性研究
..... 陈泽昊 高培伟 范传卫 张书起 徐少云 鞠向伟 (308)

混合砂对混凝土性能实际应用 方忠建 苗永刚 刘均平 胡秋楠 (314)

石粉对混凝土性能影响的试验研究 刘佳斌 (317)

027 工程大体积商品混凝土的生产与施工 陆总兵 金海军 刘 虎 赵志强 (322)

新型泵管润滑剂的研究与应用 牛学蒙 (331)

特种混凝土技术

废弃混凝土的循环利用研究 覃 爽 (335)

塑性混凝土防渗墙施工质量控制 方忠建 苗永刚 何百静 (339)

具有自修复性能的高性能混凝土的研究现状及启示 李 健 (342)

利用钢渣集料制备绿色高性能混凝土关键技术研究经济效益评价 薄 超 方忠建 (349)

细集料水泥基灌浆料性能的研究进展 王 宁 (357)

MDF 水泥基复合材料 张军华 (362)

生产管理技术

浅谈商品混凝土搅拌站技术科工作管理思路及团队建设 孙振磊 刘洪江 (371)

预拌混凝土原材料控制措施及配合比设计关系原则 计海霞 赵志强 (373)

浅谈预拌混凝土施工技术提要 朱永刚 张 峰 苗永刚 何百静 (376)

混凝土搅拌站成本管理体系 殷中洋 (379)

混凝土预湿集料应用验证 王旭鹏 吴存玉 宋本立 (382)

荣盛商品混凝土回弹测强曲线的建立与研究	郭建良 (387)
自密实混凝土的生产与市场应用	鲁炳平 (391)

经营管理技术

建筑信息化的理论初探	曹艳春 (397)
针对工程变更引起的合同价格调整的简单分析	袁 芳 (399)
依法应对商品混凝土需求合同中的隐性霸王条款	张华强 (402)
商品混凝土常见工作性能问题及其调整对策	马 安 赵志强 (404)
使用指导性资料在预拌混凝土生产服务中的应用	戴会生 赵志强 (407)
工业化建筑建造过程评价体系的研究	邱 琴 (413)
基于建筑节能施工技术应用及其竣工验收的论述	杜兆金 史文娟 (419)
工程信息化方法检测混凝土热膨胀系数的相关性研究	谭 康 (422)
浅谈出厂商品混凝土折返率的有效控制	张华强 (425)
预拌混凝土企业知识产权管理	戴会生 赵志强 (427)
某住宅楼工程混凝土质量问题检验分析	刘春健 董桂利 (431)
信息智能化在商品混凝土中的应用研究	宋庭鉴 辛运来 (434)

问题分析

混凝土工作性能之粉煤灰最佳掺量	肖 灿 赵志强 杨 娜 (443)
混凝土表观质量问题分析	郝占龙 李文鹏 郝佳欣 姜其波 唐沛然 (446)
混凝土裂缝成因及处理方法	朱永刚 刘均平 何百静 (449)
钢筋混凝土结构的腐蚀机理与防腐措施	李 迁 王 莹 (452)

其他

耐水型石膏复合胶凝材料研究进展	耿 飞 张凯峰 赵世冉 姚 源 刘 磊 (461)
混凝土企业技术管理若干问题的探讨	刘洪江 修晓明 孙振磊 耿鹏涛 (466)
沥青路面破坏原因及修复工艺	刘西超 何百静 纪淑福 (468)
浅析环保型建筑材料的重要性及发展	许 璐 杨福新 (470)
水泥及熟料强度的几种简便计算方法	朱效荣 赵志强 (472)

数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展

王 强, 李 强, 张 强, 赵 强, 刘 强, 孙 强, 周 强, 吴 强, 郑 强, 王 强

1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084

3. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 4. 清华大学水利系, 北京 100084

5. 清华大学环境工程系, 北京 100084; 6. 清华大学材料系, 北京 100084

摘要: 数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展, 本文从混凝土工程中的数值模拟应用现状出发, 对混凝土工程中的数值模拟应用进行了系统的分析和总结, 并对混凝土工程中的数值模拟应用进行了展望。

理 论 研 究

The Advance of Numerical Simulation in Concrete Engineering

Wang Qiang, Li Qiang, Zhang Qiang, Zhao Qiang, Liu Qiang, Sun Qiang, Zhou Qiang, Wu Qiang, Zheng Qiang, Wang Qiang

1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084

3. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084; 4. Department of Hydraulics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

5. Department of Environmental Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084; 6. Department of Materials Science, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: The advance of numerical simulation in concrete engineering, this paper starts from the current status of numerical simulation in concrete engineering, and systematically analyzes and summarizes the application of numerical simulation in concrete engineering, and prospects the application of numerical simulation in concrete engineering.

Keywords: numerical simulation; concrete engineering; application; research progress

1. 引言: 数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展, 本文从混凝土工程中的数值模拟应用现状出发, 对混凝土工程中的数值模拟应用进行了系统的分析和总结, 并对混凝土工程中的数值模拟应用进行了展望。

2. 数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展, 本文从混凝土工程中的数值模拟应用现状出发, 对混凝土工程中的数值模拟应用进行了系统的分析和总结, 并对混凝土工程中的数值模拟应用进行了展望。

3. 数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展, 本文从混凝土工程中的数值模拟应用现状出发, 对混凝土工程中的数值模拟应用进行了系统的分析和总结, 并对混凝土工程中的数值模拟应用进行了展望。

4. 数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展, 本文从混凝土工程中的数值模拟应用现状出发, 对混凝土工程中的数值模拟应用进行了系统的分析和总结, 并对混凝土工程中的数值模拟应用进行了展望。

数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展

数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展, 本文从混凝土工程中的数值模拟应用现状出发, 对混凝土工程中的数值模拟应用进行了系统的分析和总结, 并对混凝土工程中的数值模拟应用进行了展望。

数值模拟在混凝土工程中的应用研究进展

王模弼^{1,2,3}, 梁丽敏^{1,2,3}, 李世华^{1,2,3}, 田 帅^{1,2,3}

(1. 云南建工集团有限公司, 云南昆明, 650501;

2. 云南省高性能混凝土工程研究中心, 云南昆明, 650501;

3. 工业产品(预拌混凝土)质量控制和技术评价实验室, 云南昆明, 650501)

摘 要 本文简单阐述了数值模拟方法及其分类, 并针对近 10 年来数值模拟方法在混凝土力学性能、耐久性能以及流变性能研究中的应用和发展进行了回顾, 同时论述了数值模拟方法在混凝土工程研究中面临的主要问题。

关键词 数值模拟; 混凝土; 力学性能; 耐久性能; 流变性能

The Advance of Numerical Simulation in Concrete Engineering

Wang Mobi^{1,2,3}, Liang Limin^{1,2,3}, Li Shihua^{1,2,3}, Tian Shuai^{1,2,3}

(1. Yunnan Construction Engineering Group Co., Ltd, Kunming, 650501, China;

2. Yunnan Engineering Research Center of High Performance Concrete,
Kunming, 650501, China;

3. Yunnan Quality Control and Technical Evaluation Laboratory Of Industrial Product
(ready mixed concrete), Kunming, 650501, China)

Abstract This paper briefly discusses the numerical simulation and its classification, and gives a general review on the development and application of the numerical simulation in the mechanical properties, durability and rheological properties of concrete over the past ten years. At the same time, discusses the mainly facing problems of numerical simulation in concrete engineering.

Keywords numerical simulation; concrete; mechanical property; durability; rheological property

0 引言

通常研究混凝土性能的方法有理论分析、试验研究和数值模拟三种, 目前关于混凝土性能的研究大多建立在试验的基础上, 但由于试验条件、方法、环境和材料本身的限制, 有些试验很难进行, 或者离散性很大, 或者难以突破时间的限制。数值模拟实际上可以理解为用计算机来做实验, 数值模拟替代了大量的实验, 节省了大量的人力物力, 带来了可观的社会效益和经

济效益, 它已经在石油化工和机械等行业领域有较多应用, 但在混凝土工程中特别是在混凝土流变性能方向尚未有效展开, 因此数值模拟已经成为当下研究混凝土性能的热点方向。

1 数值模拟方法和分类

随着计算机技术和计算方法的发展, 许多复杂的工程问题都可以采用区域离散化的数值计算并

借助计算机得到满足工程要求的数值解。常用的离散化方法有有限差分法、有限元法和有限体积法^[1~2]。有限差分法(FDM)是数值解法中最经典的方法,但有限差分方法只有当网格极其细密时,离散方程才满足积分守恒,商业软件极少采用。基于有限元方法(FEM)的数值模拟商业软件最多,它们主要面向固体力学和结构力学问题。基于有限体积法(FVM)的商业软件也不少,它们主要面向流体力学和传热传质学问题,有限体积法不仅在数学求解上易于理解,而且有限体积法即使在粗网格情况下,也显示出准确的积分守恒。

就离散方法而言,有限体积法可视作有限元法和有限差分法的中间产物。三者各有所长^[3],有限差分法:直观,理论成熟,精度可选,但是不规则区域处理繁琐,虽然网格生成可以使FDM应用于不规则区域,但是对区域的连续性等要求较严。使用FDM的好处在于易于编程,易于并行。有限元方法:适合处理复杂区域,精度可选。缺憾在于内存和计算量巨大,并行不如FDM和FVM直观。有限体积法:适于流体计算,可以应用于不规则网格,适于并行。但是精度基本上只能是二阶了。

2 数值模拟在混凝土性能研究中的应用

2.1 数值模拟在混凝土力学性能研究中的应用

在混凝土力学性能研究中,很多情况下无法进行试验,如混凝土结构细观特性需要采用扫描电镜等先进的试验设备,只有加载和测试同时开展才能得到较准确的结果,这种试验方法过程复杂,且试验结果较离散。用数值模拟的方法模拟混凝土结构损伤破坏过程有着先天优势^[4]。

夏晓舟^[5]应用渐变网格剖分方法对随机投放的集料、界面和水泥砂浆进行网格剖分,生成三维随机集料分布的细观有限元数值模型。并利用该模型分别进行了混凝土的单轴拉伸、压缩、劈拉和梁弯曲等数值试验,分析了不同界面参数、不同砂浆损伤参数、不同加载形式对混凝土试件的变形特点、破坏形式以及承载能力的影响,探讨了混凝土宏观力学性能的细观机制。

叶丹燕^[6]基于统计理论和 Monte-Carlo 随机抽样原理,分别建立了纤维混凝土随机圆形、椭圆形和凸多边形集料细观模型,提出并验证了纤维混凝土细观模型力学性能数值模拟试验方法,并针对不同粗集料形状的纤维混凝土细观模型利用大型有限元软件 ABAQUS 进行了抗压和抗弯拉强度数值模拟试验。数值模拟试验与试验室试验得到的抗压和抗弯强度的平均值误差较小。

孙立国^[7]针对大坝混凝土集料含量高的特点,提出了一种全新的集料生成算法,通过一次性随机投放形成的三角形基集料随机延凸,生成任意形状的随机集料,通过对随机集料模型进行有限元网格划分,并采用大型通用有限元软件 MARC 对东江拱坝三级配混凝土试件的单向轴拉破坏过程进行了全过程数值模拟,数值模拟计算结果与试验结果接近。

朱浮声^[8]将混凝土粗集料分档组配,建立了9个不同组配比例的混凝土细观数值模型,利用有限元分析系统 MFPA^{2D}模拟了不同组配比例对混凝土抗压强度的影响情况,并模拟了混凝土在单轴受压状态下的破坏过程。结果显示,分档比例不同,会直接影响混凝土的抗压强度,数值模拟试验与物理试验结果基本吻合。但是其研究的数值模型是以圆形颗粒为基础的,试验结果稳定性有待检验。

宋来忠^[9]在二维情形下,基于参数曲线的自由变形技术,将混凝土集料及黏结界面的轮廓线用确定的、形式统一的参数方程予以表示,建立了混凝土随机参数化集料数学模型。该数学模型描述了集料、砂浆与黏结界面组成的二维三相复合结构形式,考虑到细观混凝土三相材料性质的不同,作者针对三相材料使用 MATLAB、AutoCAD 和 ANSYS 软件分别进行了网格的划分建模,并进行了数值加载试验。该方法可较好地满足混凝土动静力学性能细观数值分析的要求。

赵海涛^[10]基于细观随机集料模型,构建符合界面厚度要求的混凝土圆柱体细观模型,通过赋予混凝土集料、砂浆和界面的各项力学参数,模拟了混凝土圆柱体在轴拉应力状态下的力学性能,探讨了不同均质程度的混凝土圆柱体抗拉强度变化规律,模拟研究结果与实测混凝土强度误差较小。

2.2 数值模拟在混凝土长期及耐久性能研究中的应用

当前,不少学者将数值模拟方法应用到混凝土耐久性研究中,但是对混凝土耐久性研究主要集中在混凝土裂缝扩展^[11~13,17]及氯离子腐蚀两个方面,对其他诸如抗渗透性、抗碳化性能、抗冻性能方面还不够深入。

刘捷^[11]结合云南糯扎渡水电站大坝心墙区垫层混凝土施工,应用有限元软件 ANSYS 对整个计算过程进行较为全面的分析和介绍,对大体积混凝土在浇筑后 30d 龄期内的温度场进行模拟,计算混凝土内部及表面温升曲线。在此基础上采用铺设冷水管的温控措施,有效控制了混凝土内部最高温度及内外温差,达到了防止出现温度裂缝的目的,有效提高了混凝土结构的耐久性。

由于有限元是基于无数小单元的近似,在研究对象受到大变形时,需要对网格进行重新划分,并且严重影响计算精度,因此刘杏红^[14]结合混凝土热传导问题推导了伽辽金无网格方法控制方程和基本算法步骤,编制了混凝土温度场计算和温度裂缝扩展过程模拟的无网格法程序,并通过具体的算例验证了伽辽金无网格程序的正确性。数值模式试验结果表明无网格法能够有效地模拟混凝土块在温度应力作用下的开裂发展过程。

为了给混凝土结构耐久性研究和寿命预测提供参考,许崇法^[15]依据扩散理论和有限元数值模拟,对应力、碳化和酸雨等单一因素和多因素耦合作用下的混凝土构件中性化区域的物质含量分布、pH 值和中性化深度进行了分析。研究结果表明混凝土中性化深度的数值模拟具有一定的可信度。

李春秋^[16]在干湿交替下表层混凝土内水分的不同传输机理的基础上,建立了干湿交替下表层混凝土内氯离子传输模型。利用建立的模型和试验测得的基本材料参数进行了数值计算,计算结果同干湿交替试验中实测的氯离子含量分布吻合较好,证明了干湿交替下表层混凝土内氯离子传输模型的正确性和考虑干湿交替过程水分本身传输的重要性。研究表明干湿交替下混凝土内氯离子入侵比永久浸没于氯盐溶液中的混凝土要严重得多。这为解决处于干湿交替环境下的混凝土结构氯离子腐蚀问题提供了理论指导。

唐云清^[17]以均质连续介质为假设建立高强混凝土多孔介质徐变数值模型,分析不同双轴应力组合对徐变效应的影响,以获得高强混凝土在双轴应力状态下的徐变发展规律,同时开展高强混凝土双轴徐变试验论证。计算结果和试验结果均表明徐变系数和应力状态密切相关,双轴应力状态下混凝土徐变系数小于单轴应力状态,且竖向应力对徐变系数影响较大。

张晓东^[18]采用虚拟裂缝模型模拟混凝土非线性断裂行为,针对二维四边形单元推导了详细的有限元列式。采用 3 种方案对非线性方程系统进行求解,通过对带初始边缘裂纹的单向拉伸混凝土板的数值模拟,对 3 种求解方案的计算结果进行了分析和讨论,3 种计算方案均取得了较好的效果,并且计算过程中无需对网格进行重新划分。

周新刚^[19]基于氯离子在混凝土结构中的扩散传输理论,建立了氯离子扩散传输偏微分方程,讨论了边界与初始条件。并建立了氯离子在混凝土中扩散传输的离散方程,编制了计算程序对氯离子在混凝土中的传输进行了模拟。模拟结果表明有限体积法可以很好地模拟氯离子在混凝土中的扩散传输,可以分析计算复杂边界条件下的混凝土内的氯离子分布,并对受氯离子侵蚀混凝土结构的使用寿命进行预测分析。

郭利霞^[20]在前人研究基础之上,通过分析混凝土冻融特性,提出了随龄期变化的力学特性模型,并利用三维有限元仿真计算程序,对混凝土施工期可能产生的冻融破坏过程进行数值模拟,计算结果与实际冻胀开裂规律一致,为工程施工过程设计提供理论依据。

2.3 数值模拟在混凝土流变性能研究中的应用

众所周知,在泵送混凝土过程中,混凝土料本身、混凝土料与管壁之间的相互作用是一个非常复杂的课题。为解决复杂条件下混凝土的泵送施工问题,有必要采用计算机仿真模拟结合大量试验的方法进行研究。泵送混凝土在国内使用的时间不长,相关的资料和经验总结以及实验研究的成果仍十分有限。尽管对宾汉型流体的数值模拟已经在石油、化工和机械等行业有较多的应用,但在泵

送混凝土方面在国内尚未有效开展。

田正宏^[21]用卡波姆凝胶配制与流变混凝土浆体流变性能等效的透明浆体,通过可视化物模试验模拟得到流变混凝土集料运动规律。分析了拌合物流动过程形变和振动集料沉降特点及其形成机理,试验结果表明流变混凝土基于等效流变性能的可视化模拟方法可行,并且该方法能直观获取集料沉降运动规律和速度场、位移场等运动形态参数,为深入研究流变混凝土本构关系及颗粒接触模型提供了基础。

段化奎^[22]采用计算流体力学商业软件 FLOW-3D 对自密实混凝土的工作性能进行研究。将自密实混凝土拌合物看作均匀单一流体,其本构关系采用宾汉姆模型,流变性能由屈服应力和塑性黏度两个参数控制。通过对坍落度试验、L 型仪试验和 U 型箱试验的数值模拟,并且结合相应的试验,考察水胶比、砂率和减水剂三种因素对自密实混凝土的工作性能的影响,数值模拟结果可以与试验结果较好地吻合。

宋军华^[23]基于 PFC2D 的自定义接触平台,建立能表征新拌混凝土微观结构的离散元接触模型。并进行了多种工况下的散体堆积实验并与离散元模拟对比。采用离散元分别模拟了坍落度、L 箱流动、V 型箱流动、U 型箱流动等新拌混凝土流变学行为,并与部分实验进行对比,研究结果表明自定义滚动摩擦接触模型能更好地模拟混凝土中粗集料间的相互作用,通过参数调整,离散元能够模拟新拌混凝土的流变学行为,并进而模拟新拌混凝土在管道中的流动特性以及与泵送管道的相互作用规律。

3 数值模拟在混凝土工程中应用面临的主要问题

作为一门交叉学科,数值模拟方法的发展受限于数学、物理、计算机等学科的制约,另外,在混凝土工程领域应用数值模拟的研究方法时间还不长,应用相对不成熟,本身还存在一些问题:

(1) 数值模拟的主观性问题。数值模拟的对象本身就是主观上基于理论上的假设,是将研究对象通过理论模型进行一定简化形成的“数值混凝土”,通常将其简化为集料、过渡区、水泥石三相复合材料模型,并通过计算机展开“数值混凝土”的研究,并且数值模拟过程中的初始条件及边界条件等都是主观性的。

(2) 数值模拟结果可靠性问题。数值模拟方法在模拟分析过程中,对边界条件和混凝土结构的简化,或多或少对分析结果产生影响,而且混凝土结构离散化的形式不同,得到的结果和精度也不同,随机性比较大,可信度降低。

(3) 如何建立适合混凝土结构的数理模型,如何选取边界条件及参数以及如何判断模拟结果在科研层面上的可信性,这些还有待于定出一套类似解析解的论证方法。

4 小结

本文概括总结了仅 10 年来数值模拟在混凝土性能研究中的发展情况,可以看出数值模拟检验并预测了混凝土结构宏观及微观层次损伤模型,对混凝土科学的发展起了推动作用,但是数值模拟在混凝土流变学特性方面研究还不多也不够深入,相信随着计算机和数值模拟技术的发展,数值模拟在混凝土工程中应用会越来越广泛。

基金项目: 云南省科技创新强省计划项目 (2015AA022)。

参考文献

- [1] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics-the finite volume method [M]. 2nd ed. England, 9-38; Pearson Prentice Hall, 2007.
- [2] 周新刚, 李克非, 陈肇元. 氯离子在混凝土中扩散传输的有限体积法模拟分析 [J]. 工程力学, 2013, 30 (7): 34-39.