

**第19届  
全国结构工程学术会议  
论文集**

**第Ⅱ册**

**PROCEEDINGS OF THE NINETEENTH NATIONAL  
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING**

**No. II**

**主编：崔京浩**

**《工程力学》杂志社**

**2010.10**

# 序

一年一度的全国结构工程学术会议今年是第 19 届了，在同行学者的大力支持下会议越办越好，正逐渐形成了一个相对稳定的学术群体，会议每年为学者们提供一个学术交流的平台，而学者们又为会议成功的召开提供了最重要学术保障，在这里我们首先要对他们致以真诚谢意。

本届会议论文集收录论文 298 篇，除特邀报告外包括 9 个专业门类，共计 1738 页。分装成 3 册，每册独立编页，为了便于读者查阅，第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II、III 册则只载本册目录。

会议在济南召开，济南素有泉城之称，山水秀美，文脉绵延又毗邻世界文化遗产和自然遗产的泰山和孔庙，是一个人文荟萃，风物绝佳的学术交流胜地。

今年会议的东道主是山东建筑大学，它创建于 1956 年，目前已发展成以建筑、结构为核心的综合性大学，拥有 44 个本科专业，在校生 2 万多人，学生就业率连续多年保持在 95% 以上，不仅早已通过教育部本科教学评估而且被评为全国建设人才培养工作先进单位。会议期间代表们会亲眼目睹学校的办学优势和校园风采。会议组委会衷心感谢山东建筑大学为开好本届会议所做的一切努力。

崔京浩



2010 年 10 月

# 第 19 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 298 篇，共计 1738 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II、III 册则只载本册目录。

第 I 册论文 80 篇（共 586 页），包括：特邀报告；1. 力学分析与计算；

2. 钢结构、材料与构件

第 II 册论文 112 篇（共 588 页），包括：3. 钢筋混凝土结构、材料与构件；

4. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；5. 公路、铁路、桥梁、

水工与港工

第 III 册论文 106 篇（共 564 页），包括：6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；

7. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；8. 舰船、车

辆、机械制造、航空航天结构；9. 新材料、新能源及交叉学科

# 第 19 届

## 全国结构工程学术会议

中国 济南  
JINAN CHINA  
11.5 ~ 11.9, 2010

主办单位 中国力学学会结构工程专业委员会  
山东建筑大学  
中国力学学会《工程力学》编委会  
清华大学土木工程系  
清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室  
清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室  
山东建筑大学建筑结构鉴定加固与改造省重点实验室

会议协办单位 山东建筑大学工程鉴定加固研究所  
山东建固特种专业工程有限公司

### 学术委员会

主 席 : 袁 驷

委 员 : (按姓氏拼音为序)

岑 松 陈以一 陈永灿 崔京浩 傅传国 葛耀君 龚耀清 桂国庆 韩林海 金 峰  
金伟良 李 慧 李庆斌 刘德富 刘光栋 刘宏民 楼梦麟 聂建国 茹继平 石永久  
宋二祥 隋允康 孙建恒 王崇杰 王光谦 王全凤 王晓纯 魏德敏 夏 禾 张 鑫  
郑建岚 周新刚 周绪红 周学军

### 组织委员会

主 席 : 范存礼

常务副主席: 崔京浩

副 主 席 : 韩林海

委 员 : (按姓氏拼音为序)

曹万林 曾 攀 陈政清 高 波 顾 明 郝际平 金学松 李 珠 李宏男 李正良  
李忠献 刘运动 陆新征 王怀忠 王庆利 王正兴 王忠静 韦树英 吴胜兴 武 哲  
辛克贵 徐礼华 杨 强 杨亚政 叶康生 袁明武 张 鑫 张建民 张正威 周学军  
朱宏平 庄 茁军

### 秘 书 处

秘书长 : 张 鑫

副秘书长 : 范夕森

学术秘书 : 黄丽艳(组织论文宣读、排序、分组、评定等)

秘书组 : (按姓氏拼音为序)

高 翔 郭 东 李 鹤 李 莹 李士彬 李秀领 马 萍 谭天乐 王 恒 邢 锐  
颜丙冬 岳庆霞 张国强 张婷婷 张玉明

# 第 19 届全国结构工程学术会议论文集目录

## 第 II 册目录

### 3. 钢筋混凝土结构、材料与构件

|                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| 海砂混凝土耐久性试验研究.....               | 曹卫群 苏 卿 赵铁军 巴光忠 (001)         |
| 长期荷载作用对核心柱承载力影响的数值分析.....       | 陈周熠 (007)                     |
| CFRP 加固钢筋混凝土梁的抗弯试验研究.....       | 董江峰 王清远 邱慈长 (011)             |
| 基于随机多尺度力学模型的混凝土力学特性研究.....      | 杜修力 金 浏 (019)                 |
| 利用超声无损检测技术评价模拟酸雨环境下混凝土损伤厚度..... | 范颖芳 刘江林 王大为 (024)             |
| 球形骨料混凝土宏观弹性模量影响因素研究.....        | 付 鹏 于国友 尹光荣 (031)             |
| 腹部纵向配筋混凝土梁斜裂缝有限元分析.....         | 傅玉勇 闫澍旺 杜 闯 (036)             |
| 钢筋混凝土板抗冲切承载力计算.....             | 韩向丽 赵均海 魏雪英 张冬芳 (042)         |
| 现浇预应力混凝土空心楼盖剪力滞后效应的分析与计算.....   | 黄竹也 王国阳 (050)                 |
| 竖向荷载下现浇梁板协同工作对楼板的影响.....        | 蒋利学 (054)                     |
| 异形钢纤维体积率对超高性能混凝土力学性能的影响研究.....  | .....                         |
| .....                           | 李 妍 刁 波 杨松霖 张 笑 张 茜 (060)     |
| 某八层混凝土框架结构火灾连续倒塌模拟.....         | 李 易 陆新征 任爱珠 叶列平 陈适才 (067)     |
| 超低温环境下钢筋与混凝土的粘结性能.....          | 李会杰 谢 剑 (075)                 |
| 箍筋锈蚀钢筋混凝土梁的抗剪承载力分析.....         | 李士彬 张 鑫 贾留东 (082)             |
| 轻骨料混凝土单轴受压应力应变关系研究.....         | 刘 香 银 俊 (089)                 |
| 竖向荷载下现浇梁板协同工作对梁的影响.....         | 蒋利学 (093)                     |
| 短切玄武岩纤维增强混凝土抗弯性能的试验研究.....      | 刘华挺 张俊芝 傅招旗 朱燕东 吴灵杰 (098)     |
| 抗冲刷磨蚀混凝土的耐磨损试验研究.....           | 刘卫东 林 瑜 朱玉强 陆中国 (102)         |
| 玻化微珠陶粒保温混凝土性能优化研究.....          | 刘元珍 朱民伟 李 珠 秦尚松 (106)         |
| 预拌干料贮存期对喷射混凝土抗折强度影响的试验与分析.....  | 马芹永 韩兴腾 张经双 (113)             |
| 石化环境基础中钢筋腐蚀与防护措施.....           | 孟庆娟 高建岭 白玉星 王晓纯 (118)         |
| 超声法逆回归现场测强曲线.....               | 秦春霞 佟晓君 陈海彬 (124)             |
| 现浇主次梁楼盖中梁板协同工作对次向梁和楼板的影响分析..... | 蒋利学 (127)                     |
| 再生混凝土研究与发展析议.....               | 施养杭 彭 冲 (133)                 |
| 低温环境下混凝土性能的试验研究.....            | 王传星 谢 剑 李会杰 (138)             |
| 大体积混凝土瞬态温度场实测与数值分析.....         | .....                         |
| .....                           | 王贵君 刘海卿 王锦力 肖建华 刘文伍 张国祥 (144) |

关于加强拉结钢筋薄壁方钢管混凝土短柱延性的研究.....王海超 葛月珍 李永秋 张红英 辛建达 (149)

.....王海超 葛月珍 李永秋 张红英 辛建达 (149)

钢筋混凝土 Z 形截面柱双偏压正截面承载力分析 ..... 王铁成 陈 烜 (156)

钢筋混凝土异形截面柱纵筋最小配筋率研究..... 王依群 严孝钦 (164)

矩形钢管混凝土梁柱节点与钢梁节点受力性能的对比研究..... 闻 洋 李 斌 高春彦 (168)

装装箱混凝土空心楼盖整体性试验研究..... 谢 群 刘俊岩 李克翔 (174)

FRP 筋混凝土梁的挠度特点及影响因素分析..... 徐新生 曹 凯 闫玉本 (180)

高强钢筋高强混凝土框架非线性地震反应分析..... 阎 石 陈 鑫 季保健 (186)

再生混凝土基本力学性能试验研究..... 杨德健 高永孚 高志伟 (192)

宽肢异形柱受剪承载力试验研究..... 王铁成 陈向上 (197)

活性粉末混凝土轴拉性能试验研究..... 原海燕 安明喆 贾方方 余自若 (203)

波纹管孔道的摩擦系数..... 张狄龙 邸小坛 陈 中 (207)

超长混凝土框架结构非线性有限元研究..... 张永胜 李雁英 (211)

平面形状为圆环形的混凝土框架结构温度应力研究..... 张玉明 边广生 孟少平 (215)

U 型钢-混凝土组合梁的受弯承载力计算..... 赵风华 齐永胜 (221)

装装箱混凝土空心楼盖结构受力性能试验研究.....

.....赵考重 李自然 王 莉 孙双军 房晓朋 王 超 (226)

预应力 FRP 加固 RC 梁抗弯疲劳寿命分析 ..... 郑顺潮 黄培彦 郭馨艳 (233)

钢丝网增强钢纤维混凝土力学性能研究..... 钟轶峰 牛建丰 蒙 云 (238)

混凝土含水率对梁动力性能影响研究..... 周 耀 王元丰 韩 冰 (242)

玻化微珠保温墙模结构自保温体系研究..... 朱民伟 刘元珍 李 珠 张 巍 (246)

4. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

基于 Boussinesq 应力解和位移解的复合地基沉降可靠度分析..... 丁继辉 袁 满 王 岩 (252)

基桩低应变完整性曲线的综合解释方法..... 韩 亮 (258)

上海打浦路越江隧道结构健康监测系统的设计与实施..... 贾喜鸽 赵 鸣 李素贞 葛 捷 (261)

混凝土水化热及入模温度对钻孔灌注桩与冻土回冻过程的影响..... 贾艳敏 郭红雨 (265)

新管幕结构肋梁斜截面抗剪性能非线性有限元分析..... 金春福 阎 石 钮 鹏 王 健 (269)

溶洞位置和大小对公路隧道力学特性影响研究..... 李 围 (274)

自锚式悬索桥张拉过程吊杆力相邻性原理研究..... 李子奇 樊燕燕 (278)

考虑土体固有各向异性的三轴和直剪试验的研究..... 梁令枝 (282)

考虑盾构隧道围岩扰动损伤的地表沉降预测..... 刘纪峰 王逢朝 (286)

三维桩土动力接触模型研究..... 卢华喜 (292)

碎石桩加固液化砂土地基的数值模拟分析..... 牛琪瑛 张 明 刘建君 (297)

台阶式加筋土挡墙的原型试验研究..... 戚 炜 王勇智 赵星民 (301)

拱形优化的直接求解法和实际应用..... 王胜利 童景盛 敖运安 (307)

夯实水泥土桩复合地基动力特性和动力响应影响因素分析..... 王维玉 赵 拓 丁继辉 (312)

大型实验室基础基坑围护方案的综合比较..... 王伟良 任晓崧 (318)

复合土钉墙变形的简化计算方法..... 魏焕卫 杨 敏 孙剑平 (323)

长沙地铁袁家岭车站基坑对周边建筑影响的有限元模拟研究.....

..... 吴朝阳 李正农 罗叠峰 张盼盼 卢 剑 (331)

开挖过程中地下新管幕结构变形数值分析..... 阎 石 张占军 金春福 卢静丽 (336)

高水压铁路隧道管片衬砌临界水压力浅析..... 晏启祥 马婷婷 (341)

极端冰雪条件下典型红粘土力学性能试验研究..... 张永兴 王韵斌 宋西成 冯 兵 (345)

盾构管片衬砌环间接缝对结构内力影响分析..... 赵大洲 (352)

悬臂排桩支护基坑侧移分布规律..... 赵静力 张建辉 王道卓 (356)

滑坡与隧道相互作用实例监测分析..... 朱苦竹 庄 宁 (360)

土体路基热力耦合数值分析..... 朱志武 宁建国 (365)

桩基负摩阻力简化计算模型研究..... 庄 宁 朱苦竹 阚二林 (370)

5. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

基于弹塑性损伤理论的水泥稳定基层养生期裂缝形成机理分析..... 曹 鹏 冯德成 田 林 (375)

预应力混凝土箱梁桥徐变研究综述..... 曾庆响 韩大建 (379)

高速公路限速标准的可靠性分析..... 陈富坚 黄世斌 包惠明 (384)

非对称大跨连续刚构桥线形控制技术研究..... 陈兴冲 王常峰 夏修身 庄立普 (390)

考虑施工缺陷和初始偏心的高墩稳定性分析..... 杜进生 康景亮 罗小峰 (394)

拱形加劲梁自锚式悬索桥静动力特性分析与研究..... 范志甫 谭红霞 涂 莉 唐先彬 (398)

B3 徐变预测模型修正方法的分析与比较..... 胡世翔 黄 侨 任 远 (403)

城市雨水管网中明满流与水气两相流研究进展..... 胡应均 茅泽育 (407)

水泥稳定沥青路面冷再生路用性能研究..... 黄世斌 刘 峰 (411)

国内外铁路桥梁抗震设计反应谱比较与分析..... 蒋丽飞 孙 卓 吴有明 钟铁毅 (416)

钢拱塔斜拉桥动力特性试验与数值模拟研究..... 李 鑫 梁 力 王福春 (422)

京杭运河大桥成桥阶段吊杆索力量测与分析..... 杜进生 肖 亮 徐 强 廖 宇 (427)

倒梯形板桁主梁 CFD 简化模型及气动特性研究..... 李永乐 安伟胜 蔡宪棠 何庭国 (431)

现浇箱梁满堂碗扣支架设计与计算..... 林 珈 李 伟 崔 杨 (438)

泾河大桥合拢内力和变形分析..... 刘海彬 杜进生 罗小峰 (442)

移动荷载作用下半刚性基层的粘弹性沥青路面结构的动力响应分析..... 刘俊卿 王保实 (446)

高拱坝梁向配筋抗震措施效果研究..... 龙渝川 许绍乾 高雪超 (452)

小花沟高墩连续刚构桥的稳定和抗震分析..... 罗小峰 杜进生 刘海彬 (459)

风嘴角度对钢箱梁斜拉桥涡振、颤振性能的影响..... 孟晓亮 郭震山 丁泉顺 朱乐东 (463)

数字图像技术在沥青混合料无侧限抗压强度试验中的应用.....

..... 彭 锋 王旭东 张 蕾 周兴业 (467)

基于动力特性的中承式拱桥损伤识别..... 彭 卫 王 炎 (473)

钢混组合梁的顶推施工过程分析..... 邵斌磊 徐荣桥 (477)

斜拉桥钢锚箱组合索塔水平受力性能简化分析模型..... 苏庆田 秦 飞 (482)

铁路 PC 低高度 T 型梁裂缝成因分析 ..... 孙 卓 蒋丽飞 吴有明 (489)

高压旋喷注浆在桥墩基础托换加固处理中的应用 ..... 孙国钧 (494)

地震作用下施工期大型桥梁的可靠性分析.....檀维超 谢 楠 杜进生 罗晓峰 (498)

脱空率对偏心受压钢管混凝土承载能力影响研究.....唐 述 刘夏平 杨作用 宁运琳 刘爱荣 (502)

胶粉改性沥青混合料弯曲蠕变试验研究..... 王 岚 常春清 邢永明 (508)

水平圆柱与沉箱组合结构消波特性试验研究.....王国玉 王彦哲 任 冰 王永学 刘 丹 (513)

拱桥连续组合梁有效宽度研究..... 苏庆田 王 巍 (517)

斜拉桥上斜拉索振动控制关键技术..... 王凌云 (523)

变截面梁桥在移动力下的动响应计算..... 王文洁 吕中荣 刘济科 (527)

E2 地震作用下部分填充钢管混凝土桥墩非线性时程分析及抗震性能评价.....

..... 王占飞 隋伟宁 吴 权 (532)

闸室混凝土浇筑温度场的仿真分析.....吴礼国 邓方明 李 维 李跃卿 (537)

某栈桥结构安全性能计算方法研究..... 吴有明 孙 卓 蒋丽飞 (543)

桥梁养护管理系统中环境影响因素的成本化分析 ..... 吴宇蒙 常 军 (548)

大尺度扁平箱梁节段模型涡激力半经验模型应用 ..... 鲜 荣 廖海黎 (554)

大跨度斜拉-悬索协作体系桥缆索无应力长度研究..... 谢官模 苗润池 (560)

基于多因素的模糊综合评判法在超声波检测桩基完整性应用中的研究 ..... 张鹏远 申向东 (564)

斜拉桥反应谱分析与动力时程响应分析比较研究..... 周 艳 宋君超 潘瑞松 (571)

国内外大跨度拱桥发展与展望.....周水兴 沈培文 孙东生 张 敏 (576)

基于弹性半空间体的水平荷载与垂直荷载非线性叠加条件下沥青路面结构受力分析 .....

..... 周兴业 王旭东 张年梅 (584)

# 海砂混凝土耐久性试验研究

\*曹卫群<sup>1,2</sup>, 苏卿<sup>2</sup>, 赵铁军<sup>1</sup>, 巴光忠<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学, 山东 青岛 266033; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 我国河砂资源日益枯竭, 海砂直接用于混凝土结构则会诱发钢筋锈蚀。为了研究海砂混凝土的耐久性能, 在对海砂特性进行分析的基础上, 制作不同强度等级的河砂混凝土、淡化海砂混凝土和原状海砂混凝土, 对三类混凝土进行了渗透性、钢筋锈蚀、碳化和冻融试验。试验结果表明, 原状海砂不能直接应用于钢筋混凝土结构, 淡化海砂混凝土的耐久性能与河砂混凝土相近, 是比较理想的建筑材料。

**关键词:** 海砂; 混凝土; 氯离子; 耐久性

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTS RESEARCH ON THE DURABILITY OF CONCRETE MADE OF SEA SAND

\*Cao Wei-qun<sup>1,2</sup>, Su Qing<sup>2</sup>, Zhao Tie-jun<sup>1</sup>, Ba Guang-zhong<sup>1</sup>

(1. Qingdao Technological University, Shandong Qingdao 266033, China; 2. Xi'an University of Architecture and Technology, Shanxi Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Many places of China have emerged a shortage of river sand, and sea sand has been gradually used for the construction which may cause the corrosion of reinforcement. In order to investigate the durability of concrete made of sea sand, concrete specimens with strength class of C30, C40, C50 and C60 were prepared using river sand, washed sea sand and sea sand based on performances of the three different sand. Experiments of Permeability, reinforcement corrosion, carbonation and freezing-thawing were carried out on the three kind of concrete. The results indicate that sea sand could not be used into concrete because of its harmful ingredients, while the durability of concrete made of washed sea sand performed well which is could be good building material.

**Keywords:** sea sand, concrete, chloride, durability

近年来我国建设规模迅速扩大, 对混凝土的需求量逐年增加。河砂是建筑用砂的主要来源, 但开采河砂耗费了土地资源, 也破坏了涵养地下水资源的砂砾石层, 随着环保要求的提高和河砂资源的枯竭, 河砂的供应越来越不能满足社会经济发展的需要。我国海岸线长, 海砂储量丰富, 具备海洋采砂的自然条件。

由于海砂中含有大量氯盐等侵蚀性物质, 如果使用未经淡化处理的海砂, 也不采取相关防腐措施, 由海砂带入的侵蚀性物质将加速钢筋的蚀, 导致混凝土保护层剥落、破坏, 降低构件的承载力, 混凝土结构使用寿命将因此大大降低。这不仅会造成了巨大的经济损失, 还会引起了严重的社会问题。如何防止氯盐等侵蚀性物质对混凝土结构的危害<sup>[1]</sup>, 保证混凝土结构的安全性和耐久性, 具有重要研究意义和工程应用价值。本文使用河砂、淡化海砂和原状海砂分别制备了不同强度等级的混凝土试块, 进行了多项耐久性试验, 研究了淡化海砂混凝土的耐久性能, 为海砂在建筑工程的使用提供了依据。

## 1 海砂特性分析

### 1.1 海砂中的氯离子

混凝土内具有高碱性环境, Cl<sup>-</sup>渗入其内并到达钢筋表面, 当其达到一定浓度时钢筋就会锈蚀, 此浓度

基金项目: 国家“973”计划项目(2009CB623203); 国家自然科学基金重点项目(50739001); 国家十一五科技支撑计划项目(2006BAJ02B04); 教育部博士点基金项目(20070429001)

作者简介: \*曹卫群(1975—), 男, 山东人, 讲师, 博士生, 主要从事混凝土结构耐久性与修复研究(E-mail: qdcaoweiquan@163.net);

苏卿(1979—), 女, 甘肃人, 博士, 主要从事高性能混凝土研究(E-mail: ss\_q2004@163.com);

赵铁军(1961—), 男, 辽宁人, 教授, 博导, 主要从事混凝土结构材料研究(E-mail: ztjgp@263.net);

巴光忠(1984—), 男, 江苏人, 助教, 硕士, 主要从事结构工程研究(E-mail: baguzon@163.com)。

被称作引起钢筋锈蚀的临界浓度。在混凝土的液相中，当浓度比值 $Cl^-/OH^-$ 大于0.61时，钢筋开始锈蚀，并以此作为临界值<sup>[2]</sup>。按照临界值的概念，只要控制 $Cl^-/OH^-$ 不大于0.61就能钢筋就不会不锈蚀。规范则从工程实践的角度出发，规定了钢筋混凝土中砂的氯离子含量限值。

因为海砂含盐量很高，氯盐会对混凝土中钢筋造成严重腐蚀，从而导致建筑结构破坏。台湾曾发生因使用海砂造成大量房屋、公共建筑的腐蚀破坏现象，被称作“海砂屋事件”<sup>[3]</sup>。造成“海砂屋”的根本原因就是使用了有害物质（主要是氯离子）含量过高的海砂生产混凝土。

1.2 海砂中的硫酸根离子

海砂中的 $SO_4^{2-}$ 与混凝土内水泥石中的 $Ca(OH)_2$ 和 $C_3A$ 发生化学反应生成钙矾石和石膏，这些难溶性矿物由于吸收了大量水而产生体积膨胀，形成膨胀内应力，当膨胀内应力超过混凝土的抗拉强度时就会导致混凝土的破坏。此外，这些化学反应也会使硬化水泥石中的CH和C-S-H等组分溶出或分解，导致混凝土强度和黏结性能损失。

1.3 海砂细度和贝壳含量

不同海域海砂细度差别较大，级配过细或过粗都会影响混凝土工作性和强度。贝壳类等轻物质往往呈薄片状，表面光滑，本身强度很低，且较易沿节理错裂，因而与水泥浆的粘结能力很差。贝壳含量较多的海砂会使混凝土的和易性变差，使混凝土的力学性能和耐久性能均有所降低。

1.4 海砂中的其它有害物质

海砂含有蛋白石、燧石等矿物质和钠、钾等碱金属离子，这些成分在混凝土中可能会产生碱—骨料反应。另外，海砂中盐分的结晶能引起膨胀压力，引发混凝土的体积稳定性问题，有时其破坏速度和程度远超过化学腐蚀对混凝土的影响。

2 试验材料与配合比

2.1 试验材料

试验所用海砂取自山东海阳，为海底砂，河砂为青岛大沽河砂，砂的基本性能如表1所示，检测方法依据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ52-2006)<sup>[4]</sup>进行。粗骨料采用花岗岩碎石，5—20mm连续级配。水泥为青岛山水水泥公司生产的P·O42.5水泥，粉煤灰为青岛四方电厂生产的Ⅱ级原状灰，减水剂为聚羧酸减水剂，水泥和粉煤灰的化学成分和性质如表2、表3所示。

表 1 砂基本性能分析结果汇总

| 类别   | 细度模数 | 含泥量 (%) | 贝壳物含量 (%) | Cl <sup>-</sup> 含量 (%) | 硫酸盐含量 (%) | 碱活性 (14d膨胀率%) |
|------|------|---------|-----------|------------------------|-----------|---------------|
| 河砂   | 2.4  | 4.0     | /         | 0.0005                 | 0.5       | /             |
| 淡化海砂 | 3.0  | 0.3     | 0.7       | 0.0082                 | 2.4       | 0.0517        |
| 原状海砂 | 3.3  | 2.0     | 6.7       | 0.1015                 | 2.6       | 0.0342        |

表 2 水泥和粉煤灰基本化学成分 (%)

| 类别  | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO    | MgO    | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| 水泥  | 22.92            | 3.0974                         | 7.3489                         | 57.462 | 4.0733 | 1.515           | 0.4709           | 0.9942            | 0.3478           | 0.0504                        |
| 粉煤灰 | 48.437           | 4.7184                         | 28.5174                        | 3.8435 | 0.7047 | 0.8411          | 1.3618           | 0.4263            | 1.3793           | 0.2574                        |

表 3 水泥和粉煤灰其它组分及性质

| 类别  | C <sub>3</sub> A (%) | 碱含量 (%) | f-CaO (%) | 总氯离子 (%) | 水溶性氯离子 (%) | 细度 (筛余量) m <sup>2</sup> /kg (%) | 烧失量 (%) |
|-----|----------------------|---------|-----------|----------|------------|---------------------------------|---------|
| 水泥  | 14.22                | 1.304   | 1.04      | 0.1773   | 0.1766     | 341.88                          | 2.72    |
| 粉煤灰 | /                    | 1.322   | /         | 0.0038   | 0.0016     | 11.9                            | 4.86    |

2.2 混凝土配合比

考虑到海砂在建设工程中的推广应用，设计了不同强度等级的混凝土，以研究海砂对混凝土长期耐久

性能的影响。河砂混凝土、淡化海砂混凝土和海砂混凝土配合比分别见表 4、表 5 和表 6。海砂混凝土与河砂混凝土胶凝材料用量和水胶比相同, 为使其具有相近的工作性能, 海砂混凝土砂率略低于河砂混凝土, 减水剂掺量略高。

表 4 河砂混凝土配合比 (kg/m<sup>3</sup>)

| 编号 | 强度等级 | 胶凝材料总量 | 水泥  | 粉煤灰 | 砂   | 石子   | 水   | 水胶比  | 砂率  | 减水剂  |
|----|------|--------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|
| A3 | C30  | 360    | 252 | 108 | 770 | 1083 | 170 | 0.48 | 42% | 2.52 |
| A4 | C40  | 410    | 287 | 123 | 741 | 1066 | 170 | 0.42 | 41% | 3.5  |
| A5 | C50  | 460    | 345 | 115 | 707 | 1080 | 162 | 0.36 | 40% | 4.60 |
| A6 | C60  | 500    | 375 | 125 | 659 | 1096 | 160 | 0.33 | 38% | 5.50 |

表 5 淡化海砂混凝土配合比 (kg/m<sup>3</sup>)

| 编号 | 强度等级 | 胶凝材料总量 | 水泥  | 粉煤灰 | 砂   | 石子   | 水   | 水胶比  | 砂率  | 减水剂  |
|----|------|--------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|
| B3 | C30  | 360    | 252 | 108 | 752 | 1102 | 170 | 0.48 | 41% | 2.88 |
| B4 | C40  | 410    | 287 | 123 | 661 | 1146 | 170 | 0.42 | 37% | 3.9  |
| B5 | C50  | 460    | 345 | 115 | 636 | 1152 | 162 | 0.36 | 36% | 5.06 |
| B6 | C60  | 500    | 375 | 125 | 625 | 1131 | 160 | 0.33 | 36% | 5.75 |

表 6 原状海砂混凝土配合比 (kg/m<sup>3</sup>)

| 编号 | 强度等级 | 胶凝材料总量 | 水泥  | 粉煤灰 | 砂   | 石子   | 水   | 水胶比  | 砂率  | 减水剂  |
|----|------|--------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|
| C3 | C30  | 360    | 252 | 108 | 752 | 1102 | 170 | 0.48 | 41% | 2.88 |
| C4 | C40  | 410    | 287 | 123 | 661 | 1146 | 170 | 0.42 | 37% | 3.9  |
| C5 | C50  | 460    | 345 | 115 | 636 | 1152 | 162 | 0.36 | 36% | 5.06 |
| C6 | C60  | 500    | 375 | 125 | 625 | 1131 | 160 | 0.33 | 36% | 5.75 |

3 试验结果与分析

3.1 混凝土的抗压强度

不同强度等级和龄期三类混凝土的强度如图 1 所示。可以看出, 对较低强度混凝土, 原状海砂混凝土抗压强度较低, 河砂混凝土和淡化海砂混凝土相近; 对较高强度混凝土, 原状海砂混凝土抗压强度反而较高一些。

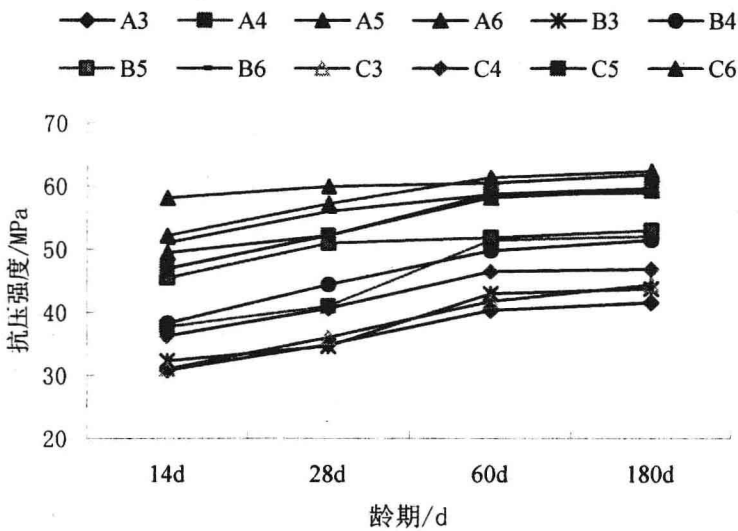


图 1 河砂、淡化海砂和原状海砂混凝土在不同龄期的抗压强度

3.2 混凝土的抗氯离子渗透性

通过RCM法<sup>[5]</sup>测试了混凝土的氯离子扩散系数,通过电通量法<sup>[6]</sup>测得混凝土的电通量,结果如表7所示。可以看出,相同等级的混凝土,河砂混凝土和淡化海砂混凝土的抗氯离子渗透性相近,而原状海砂混凝土本身含有较多氯离子,混凝土电导率大,抗氯离子渗透性明显偏低。

表 7 混凝土扩散系数和电通量

| 混凝土编号 | 氯离子扩散系数 $D/(10^{-12}m^2/s)$ | 电通量(C) |
|-------|-----------------------------|--------|
| A3    | 12.04                       | 3025.5 |
| A4    | 11.26                       | 2984.1 |
| A5    | 8.28                        | 1763.7 |
| A6    | 6.87                        | 1364.2 |
| B3    | 11.75                       | 3078.6 |
| B4    | 11.08                       | 2744.9 |
| B5    | 8.17                        | 1963.4 |
| B6    | 6.66                        | 1078.3 |
| C3    | 27.07                       | 3268.5 |
| C4    | 26.91                       | 2139.2 |
| C5    | 22.67                       | 1837.9 |
| C6    | 18.89                       | 1105.3 |

3.3 混凝土中钢筋的锈蚀

制备试件时将钢筋埋入混凝土棱柱体中,棱柱顶面中央放置一个小水箱,用来盛放 3%的氯化钠溶液或水,试验装置如图 2 所示。盐溶液在小盒中存放一天,然后倒出,并保持试块干燥 6 天,通过干湿循环加速外部氯离子的侵入。试验过程中,实验室内条件保持温度  $20\pm3^{\circ}C$ ,相对湿度 RH 为 50%~70%。

采用线性极化法测试不同试块钢筋中的腐蚀电流密度(如图 3 至图 5 所示),从测试结果看,淡化海砂混凝土和河砂混凝土中的钢筋锈蚀规律近似,开始锈蚀速率较慢,随着渗入的氯离子浓度增加和时间的增长,锈蚀速度逐渐加快,原状海砂混凝土中钢筋锈蚀由于开始时就存在较高氯离子浓度,锈蚀速率开始时就比较快,并随着外部氯离子的渗入,锈蚀速度进一步增加。

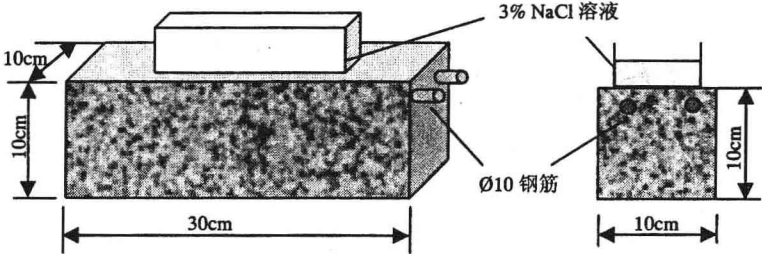


图 2 钢筋锈蚀试验装置示意图

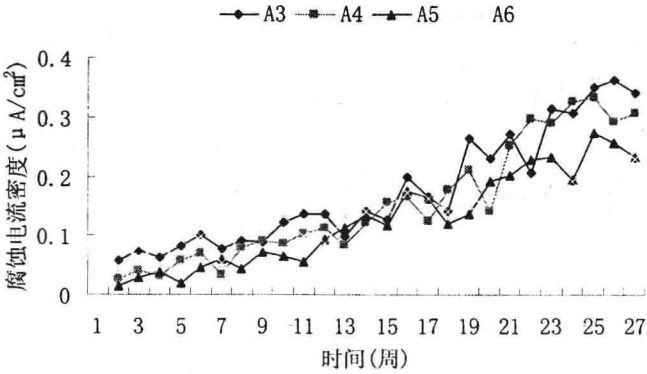


图 3 河砂混凝土中钢筋的腐蚀电流密度

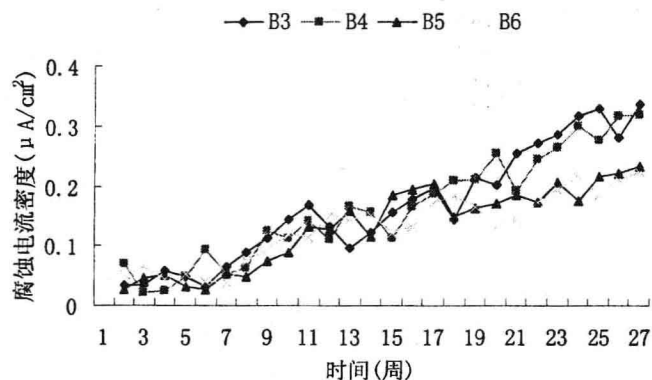


图 4 淡化海砂混凝土中钢筋的腐蚀电流密度

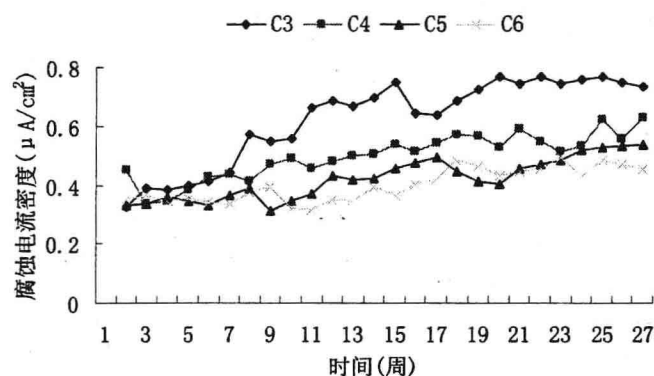


图 5 原状海砂混凝土中钢筋的腐蚀电流密度

### 3.4 混凝土的碳化

对三种混凝土进行加速碳化试验<sup>[7]</sup>, 结果如表 8 所示, 强度等级较低 (C30 和 C40) 时, 原状海砂混凝土的碳化深度最小, 而强度等级较高 (C50 和 C60) 时, 河砂混凝土的碳化深度最小。在碳化初期, 河砂混凝土的抗碳化性能要好于淡化海砂混凝土和原状海砂混凝土; 随着碳化时间的增加, 三种混凝土的抗碳化性能无明显差异。因此, 从混凝土碳化方面来说, 使用淡化海砂或海砂作为混凝土的细骨料, 对混凝土的耐久性并无显著影响。

表 8 混凝土碳化深度及标准差

| 编号 | 加速碳化深度(mm) |       | 标准差  |      |
|----|------------|-------|------|------|
|    | 14d        | 28d   | 14d  | 28d  |
| A3 | 10.41      | 12.21 | 1.75 | 1.92 |
| A4 | 10.27      | 11.32 | 2.10 | 1.67 |
| A5 | 6.01       | 6.60  | 0.80 | 0.69 |
| A6 | 4.44       | 5.19  | 0.94 | 0.88 |
| B3 | 11.98      | 13.62 | 1.60 | 2.07 |
| B4 | 10.17      | 10.43 | 1.77 | 1.62 |
| B5 | 5.80       | 6.07  | 0.44 | 0.85 |
| B6 | 5.75       | 5.83  | 0.78 | 0.60 |
| C3 | 9.67       | 11.16 | 1.52 | 1.79 |
| C4 | 8.05       | 8.32  | 1.30 | 1.35 |
| C5 | 6.23       | 6.38  | 0.66 | 0.72 |
| C6 | 5.06       | 5.64  | 1.10 | 1.05 |

### 3.5 混凝土的冻融

考虑到混凝土结构在海洋环境下可能发生盐冻破坏<sup>[8]</sup>, 对混凝土进行淡水和盐水两种冻融循环试验, 盐冻使用的是 3%NaCl 溶液, 测试结果如表 9 所示。在淡水冻融循环情况下, 淡化海砂混凝土抗冻性与河砂混凝土相近, 原状海砂混凝土抗冻性稍差; 在盐水冻融循环情况下, 三种混凝土在抗冻性都大幅度降低, 而原状海砂混凝土的抗冻性降低更多。

表9 快速冻融法测得的混凝土耐久性系数

| 试件编号          | A3   | A4   | A5   | A6   | B3   | B4   | B5   | B6   | C3   | C4   | C5   | C6   |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 淡水冻融<br>耐久性系数 | 0.28 | 0.37 | 0.41 | 0.44 | 0.26 | 0.34 | 0.37 | 0.42 | 0.25 | 0.33 | 0.35 | 0.38 |
| 盐水冻融<br>耐久性系数 | 0.18 | 0.23 | 0.26 | 0.28 | 0.17 | 0.22 | 0.24 | 0.27 | 0.15 | 0.20 | 0.22 | 0.23 |

4 结论

海砂经过淡化后, 氯离子含量显著降低, 含泥量和贝克含量也大幅度下降。淡化海砂混凝土的各项耐久性能与河砂混凝土相近, 海砂经淡化后可以用于实际工程。氯离子是海砂中的主要有害物质, 海砂使用过程中关键是要控制的氯离子含量。混凝土中钢筋锈蚀与许多因素有关系, 在使用海砂配置混凝土时, 适于低水胶比的混凝土, 以降低钢筋锈蚀的潜在风险。另外, 混凝土中钢筋的腐蚀是一个复杂而长期的过程<sup>[9, 10]</sup>, 海砂中的有害物质对于混凝土耐久性的影响仍然有待进一步研究。

参考文献:

[1] Cao Weiqun, Fan Hong, Zhao Tiejun. Service Life Model of Concrete Structures in Chloride Laden Environment[C]. Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structure, Material and Environment. Nanjing, China, 2007: 874—879.

[2] C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, P. Castro. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(3): 1047—1055.

[3] 洪乃丰. 海砂腐蚀与“海砂屋”危害[J]. 工业建筑, 2004, 14(11): 65—67.

[4] 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准(JGJ52-2006)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[5] 混凝土结构耐久性设计与施工指南(CCES 01-2004, 2005 年修订版)[S] 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

[6] ASTM C 1202-91, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration[S]. American Society for Testing and Materials, Book of ASTM Standards.

[7] 中国工程院土木水利与水利学部结构安全与耐久性研究咨询项目组. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

[8] 赵铁军. 混凝土渗透性[M]. 北京: 科学出版社. 2006.

[9] Weiqun Cao, Xiaomei Wan, Tiejun Zhao. Quality Control and Service Life Prediction of Concrete Structures in Severe Marine Environment[C]. Proceedings of The 20th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference. Beijing, China, 2010. accepted for publication.

[10] 舒阳, 杜宇平, 王学明, 闫澍旺, 颜成华. 高性能钢筋混凝土结构的耐久性研究[J]. 工程力学, 2008, 25 (Sup. I): 102—106.

# 长期荷载作用对核心柱承载力影响的数值分析

\*陈周熠

( 厦门大学土木工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 本文介绍了考虑长期荷载作用效应影响的混凝土应力应变关系模型, 该模型是综合考虑了徐变、收缩以及长期荷载的应力水平等因素, 基于已有文献介绍的方法, 通过对我国混凝土结构设计规范(GB 50010—2002)采用的短期荷载作用下的混凝土本构模型进行修正得到的。利用该模型, 对钢管核心柱(即在普通的钢筋混凝土柱截面的核心增设一钢管的柱型)的轴力-弯矩相关曲线进行了数值分析, 考察了长期荷载作用对该类柱承载力的影响。分析结果表明, 考虑长期荷载作用的影响, 柱子的压弯承载力有所降低。

**关键词:** 柱; 徐变; 收缩; 承载力

## 1 前言

以圆钢管为钢骨的劲性混凝土柱(简称钢管混凝土核心柱, 如图 1 所示), 以其抗震性能好、承载力高的优点, 近年来在高层和超高层建筑中的应用日益增多<sup>[1]</sup>。与之相应的, 由于混凝土的收缩和徐变的固有特性, 长期荷载作用对该类柱力学性能影响的问题也越来越突出。本文采用数值方法, 考虑混凝土的徐变和收缩因素, 对钢管混凝土核心柱的压弯承载力进行理论分析, 考察了长期荷载作用对该类柱承载力的影响。

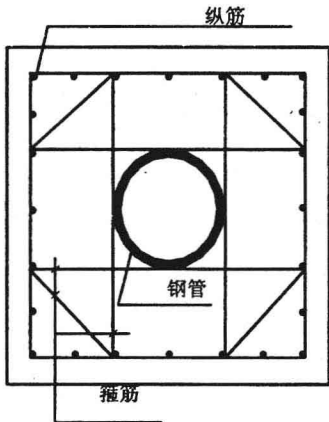


图 1 柱横截面

Fig. 1 Cross-section of column

## 2 考虑长期荷载作用效应的混凝土本构模型

文献[2, 3, 4]在推求长期荷载作用下的本构模型时, 采用的是对短期荷载作用的混凝土 $\sigma-\varepsilon$ 关系模型作平行于 $\varepsilon$ 轴的仿射变换的修正方法。本文也拟采用相同的方法对我国混凝土规范选用的模型进行修正, 在此之前, 先回顾一下我国规范采用的短期荷载作用下的混凝土本构模型。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908197), 福建省自然科学基金资助项目(2009J05135), 福建省科技计划重点项目(2009R0073)  
作者简介: \*陈周熠(1974—), 男, 福建人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程研究 (Email: chenzy@xmu.edu.cn)

### 2.1 短期荷载作用下的混凝土本构模型

可采用《混凝土结构设计规范》<sup>[5]</sup>给出的混凝土应力应变关系曲线表达式:

$$\left. \begin{aligned} &\text{当 } \varepsilon_c \leq \varepsilon_o \text{ 时, } \sigma_c = f_c \left[ 1 - (1 - \varepsilon_c / \varepsilon_o)^n \right] \\ &\text{当 } \varepsilon_o < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \text{ 时, } \sigma_c = f_c \\ &\quad n = 2 - (f_{cu,k} - 50) / 60 \\ &\quad \varepsilon_o = 0.002 + 0.5(f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \\ &\quad \varepsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_c$  为混凝土压应变为  $\varepsilon_c$  时的混凝土压应力;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值;  $\varepsilon_o$  为混凝土压应力刚达到  $f_c$  时的混凝土压应变, 当计算的  $\varepsilon_o$  值小于 0.002 时, 取为 0.002;  $\varepsilon_{cu}$  为正截面的混凝土极限压应变, 当处于非均匀受压时, 按公式 (1) 计算, 如计算的  $\varepsilon_{cu}$  值大于 0.0033, 取为 0.0033, 当处于轴心受压时取为  $\varepsilon_o$ ;  $f_{cu,k}$  为混凝土立方体抗压强度标准值;  $n$  为系数, 当计算的  $n$  值大于 2.0 时, 取为 2.0。

其曲线如图 2 曲线 a 所示。

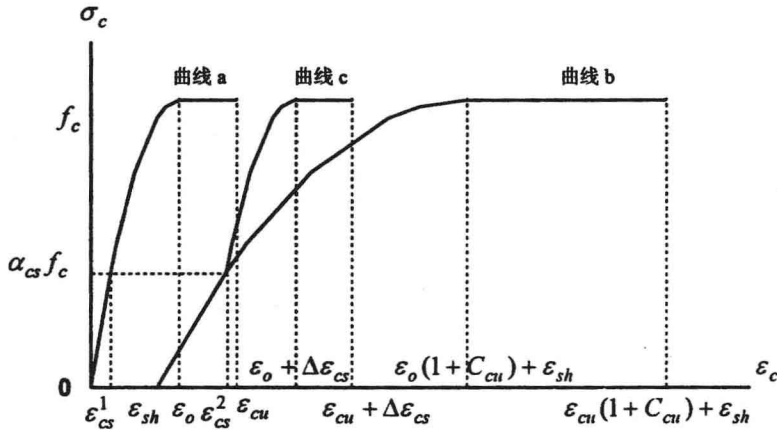


图 2 混凝土应力应变曲线

Fig. 2 Concrete stress-strain models

### 2.2 考虑长期荷载作用下的混凝土本构模型

收缩和徐变是混凝土在长期荷载作用下需要考虑的两个主要因素。

#### 2.2.1 混凝土的收缩和徐变

混凝土在空气中结硬时体积减小的现象称为收缩。混凝土的收缩是一种随时间而增长的变形, 一般认为与荷载应力水平无关。收缩变形通常在两年后趋于稳定, 最终的收缩应变值  $\varepsilon_{sh}$  约为  $(2 \sim 5) \times 10^{-4}$ <sup>[6]</sup>。

混凝土的徐变是指混凝土在荷载的长期作用下, 随时间而增长的变形。徐变受包括荷载应力水平、加荷龄期、湿度等多种因素的影响, 通常在 2~5 年之后趋于稳定。徐变应变  $\varepsilon_{cr}$  通常可以表示为瞬时弹性应变  $\varepsilon_{ei}$  与徐变系数  $C_c$  的乘积形式。对于最终的徐变系数  $C_{cu}$  的确定, 已有包括 ACI-209, CEB-FIP 和 Bazant-panula 等多种模型可以选用。

#### 2.2.2 短期荷载作用下混凝土本构模型的仿射变换

采用文献[2, 3, 4]的方法, 对式 (1) 表示的混凝土短期荷载下的模型作平行于  $\varepsilon$  轴的仿射变换。假设混凝土在短期荷载下加荷到  $\sigma_{i0}$  时的瞬时应变为  $\varepsilon_{i0}$ , 此后维持应力水平  $\sigma_{i0}$  不变, 直至混凝土的收缩和徐变变形趋于稳定, 产生的收缩应变为  $\varepsilon_{sh}$ , 徐变应变为  $\varepsilon_{i0} C_{cu}$ 。这样, 混凝土在长期荷载下考虑了收缩和徐变的应力应变关系模型中, 应力  $\sigma_{i0}$  所对应的应变  $\varepsilon_i$  与短期荷载模型中对应点的应变  $\varepsilon_{i0}$  有

如下关系:

$$\varepsilon_t = (1 + C_{cu})\varepsilon_{t0} + \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

通过对混凝土短期荷载下的模型作上述的修正, 就可以得到如图 2 曲线 b 所示的模型, 这个模型考虑了收缩与徐变的影响, 其表达式为:

$$\left. \begin{aligned} & \text{当 } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{sh} \text{ 时} & \sigma_c &= 0 \\ & \text{当 } \varepsilon_{sh} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_o(1 + C_{cu}) + \varepsilon_{sh} \text{ 时} & \sigma_c &= f_c \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_o(1 + C_{cu}) + \varepsilon_{sh}} \right]^n \right\} \\ & \text{当 } \varepsilon_o(1 + C_{cu}) + \varepsilon_{sh} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}(1 + C_{cu}) + \varepsilon_{sh} \text{ 时} & \sigma_c &= f_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

### 2.2.3 长期荷载作用下考虑实际加荷应力比的混凝土本构模型<sup>[2]</sup>

文献[2]指出, 在实际情形中, 混凝土的工作荷载应力  $f_{cs} = \alpha_{cs} f_c$  ( $\alpha_{cs}$  为加荷应力比) 通常在 30~60%  $f_c$  之间, 混凝土在这个应力水平的长期荷载作用下会产生相应的收缩和徐变变形, 之后, 工作荷载由于某种原因在一个短时期内迅速增加, 从而导致混凝土的破坏。在这种加荷路径下, 混凝土的本构模型可以采用文献[2]介绍的方法, 综合前述的两个应力应变关系式 (1) 和 (3) 得出, 如图 2 曲线 C 所示, 它考虑了实际加荷应力比的影响, 因而更接近实际情况。其表达式为:

$$\left. \begin{aligned} & \text{当 } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{sh} \text{ 时} & \sigma_c &= 0 \\ & \text{当 } \varepsilon_{sh} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cs}^2 \text{ 时} & \sigma_c &= f_c \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_o(1 + C_{cu}) + \varepsilon_{sh}} \right]^n \right\} \\ & \text{当 } \varepsilon_{cs}^2 < \varepsilon_c \leq (\varepsilon_o + \Delta\varepsilon_{cs}) \text{ 时} & \sigma_c &= f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_{cs}}{\varepsilon_o} \right)^n \right] \\ & \text{当 } (\varepsilon_o + \Delta\varepsilon_{cs}) < \varepsilon_c \leq (\varepsilon_{cu} + \Delta\varepsilon_{cs}) \text{ 时} & \sigma_c &= f_c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_{cs}^2 = \varepsilon_{sh} + [\varepsilon_o(1 + C_{cu}) + \varepsilon_{sh}](1 - \sqrt[3]{1 - \alpha_{cs}})$

$\Delta\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cs}^2 - \varepsilon_{cs}^1$

$\varepsilon_{cs}^1 = \varepsilon_o(1 - \sqrt[3]{1 - \alpha_{cs}})$

## 3 轴力弯矩相关曲线的计算

在建立了如式 (4) 所示的长期荷载下混凝土的本构模型之后, 就可以进行钢管混凝土核心柱的轴力弯矩相关曲线的数值分析, 从而考察长期荷载作用对钢管混凝土核心柱承载力的影响。

### 3.1 计算假定

- (1) 截面应变分布符合平截面假定;
- (2) 钢筋、钢管与混凝土之间充分粘结, 变形协调, 无相对滑移;
- (3) 拉区混凝土不参加工作;
- (4) 钢管内混凝土不考虑钢管的约束增强作用;
- (5) 钢材的应力应变关系采用理想弹塑性模型, 混凝土则分别采用式 (1) 和式 (4) 表示的应力应变关系来计算不考虑长期荷载作用的影响和考虑长期荷载作用的影响两种情况下的相关曲线。

### 3.2 计算过程

采用截面条带有限元法计算柱的轴力弯矩相关曲线, 主要思路是: 在柱横截面上沿着弯矩作用的方向, 平行移动中和轴, 对于每一确定的中和轴, 根据计算基本假定和材料的本构关系, 采用截面条带有限元法, 可求得一组极限轴力  $N_u$  及相应的极限弯矩  $M_u$ , 于是, 由中和轴平移所得到的一系列  $(M_u, N_u)$  就构成了柱的轴力弯矩相关曲线。

### 3.3 计算结果