

北京新闻出版局批准号: 京内资准字2006—Ly0077号
《工程力学》刊号: ISSN 1000-4750 CN11-2595/O3

第15届 全国结构工程学术会议 论文集

第Ⅱ册

PROCEEDINGS OF THE FIFTEENTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. Ⅱ

主编: 崔京浩

《工程力学》杂志社

2006.8

郑重承诺

全国结构工程学术会议每年召开一届，并出版由北京新闻出版局批准文号的论文集。为了扩大影响，确保作者论文能够得到广泛交流和宣传，便于同行学者及知识产权查新部门随时查阅、检索和引用，《工程力学》杂志社每届均作如下两项工作：

1. 会议论文集向全国 70 多个省市（包括港澳台地区）200 多所高等学校图书馆和情报部门免费赠送，总数有 300 多套
2. 会议论文集被中国多个学术期刊光盘版全文收录。

序

第 15 届全国结构工程学术会议在焦作市河南理工大学召开。

河南理工大学是一所历史悠久的学校，它可以一直追溯到 1909 年成立的焦作路矿学堂，随着岁月的变迁和形势的发展，今天已经成为一所以理工为主，理、工、文、管、经、法等多学科的综合性大学，再有三年，即将步入我国少数几所百年学府的行列。

历史是一所学校的财富和贡献，近百年来河南理工大学为国家培养了约十万学子，不少人成为各条战线的栋梁之才，他们不无自豪地用“百年沧桑、十万芬芳”来赞誉培育他们的母校。

本次会议出版的论文集是经北京市新闻出版局正式批准的，共收录论文 274 篇，总计 1409 页，分装成三册，内容涵盖了国民经济各行各业与结构工程有关的技术研究成果和工程实践总结，具有重要的参考价值。

焦作市，北依太行，南滨黄河，风景秀丽，交通方便，我国第一批被联合国批准的世界地质公园——云台山就在近郊，为我们结构工程行业的技术人员提供了一个良好的工程地质学习的现场。为此会后将组织云台山考察，欢迎广大与会代表参加。

崔京浩



2006 年 8 月

第 15 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 274 篇，共计 1409 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 69 篇（共 459 页），包括：特邀报告；1. 力学分析与计算的基本方法

第 II 册论文 99 篇（共 463 页），包括：2. 土木工程学科：2.1 钢与钢筋混凝土材料、构件与结构；2.2 岩土工程与地基基础；2.3 隧道与地下工程；2.4 水工、港工

第 III 册论文 106 篇（共 487 页），包括：2. 土木工程学科：2.5 铁路、公路、道路、桥梁、机场及市政设施 2.6 结构抗震与抗爆；2.7 特种结构如电视塔、大跨、索膜结构、体育场馆、网架、贮液池等；2.8 监控、鉴定、健康监测；2.9 事故分析、维修与加固；2.10 其他；3. 交叉学科及其他

第 15 届

全国结构工程学术会议

中国 焦作
JIAOZUO CHIAN
10.13 ~ 10.17, 2006

主办单位 中国力学学会结构工程专业委员会
河南理工大学土木工程学院
中国力学学会《工程力学》编委会
清华大学土木工程系

学术委员会

主 席： 龙驭球 袁 驷

委 员： (按姓氏拼音为序)

陈兴冲 陈兴义 陈永灿 陈云敏 陈肇元 崔京浩 董石麟 顿志林 范 重 房贞政
扶名福 龚耀清 桂国庆 韩大建 韩林海 胡和平 景 瑞 孔留安 李 斌 李 慧
李爱群 李国强 梁 波 刘德富 刘光栋 刘希亮 聂建国 欧进萍 秦 荣 茹继平
沈凤生 石永久 宋二祥 苏先樾 隋允康 王怀忠 韦树英 吴 恒 夏 禾 夏亨熹
辛克贵 徐麟祥 燕柳斌 杨秀敏 尹双增 余锡平 袁明武 曾宪桃 张建民 张有才
赵国景 郑照北 周福霖 周绪红

组织委员会

主 席： 孔留安

常务副主席： 崔京浩

副 主 席： 李书民、曾宪桃

委 员： (按姓氏拼音为序)

曹万林 陈景宝 陈以一 陈永灿 杜守军 段敬民 顾莉珠 黄丽艳 黄醒春 李 珠
李桂林 李庆斌 李正良 李志鹏 李忠献 刘洪玉 刘希亮 钱稼茹 苏是媚 王晓纯
王有凯 王志浩 吴胜兴 徐礼华 杨 强 叶康生 叶列平 张建平 张素梅 张有才
郑建岚 钟宏志 周新刚

秘 书 处

秘书长： 曾宪桃 (兼)

副 秘 书 长： 欧阳文峰

秘 书 组： (按姓氏拼音为序)

陈昌禄 陈景宝 程建华 顾莉珠 黄丽艳 李 艳 李志鹏 李壮文 梁为民 刘剑飞
孟海平 秦莞臻 孙现军 王 辉 王 煊 王光勇 王开林 王文华 王一新 叶亚齐
张敏霞 张素华 郑艳平

第 15 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 II 册目录

2 土木工程学科

2.1 钢与钢筋混凝土材料、构件与结构

三轴应力下钢纤维混凝土的破坏准则 白二雷 许金余 吕晓聪 (001)

受盐腐蚀混凝土抗压强度的试验研究 陈元素 李 昕 范颖芳 (005)

外贴 FRP 片材加固混凝土梁二次受力下承载力分析 丁亚红 王兴国 曾宪桃 成香莉 (011)

水胶比对加固砂浆界面剂粘结强度的影响 董 军 季 韬 林旭健 何国忠 (015)

型钢混凝土剪力墙抗震性能试验研究 董宇光 吕西林 (019)

塌陷区地表房屋抗采动结构体系及其加固技术 段敬民 钱永久 曾宪桃 (026)

受腐蚀钢筋混凝土双筋截面梁延性研究 范颖芳 胡志强 (030)

聚丙烯腈纤维自密实混凝土早期抗裂性能的研究 李 豪 郑建岚 (039)

碳纤维片材抗弯加固钢筋混凝土梁端部剥离界面剪应力分析 李 艳 胡春红 刘泽军 (043)

双层钢管混凝土短柱轴心受压承载力的试验研究 李国祥 程文灏 (049)

型钢混凝土构件的受力性能和设计研究 李晋春 宋彦琦 宛光辉 (054)

基于性能的高层钢—混凝土混合结构住宅设计 李丕宁 秦 荣 (058)

非预应力混凝土空心板梁桥日照温度效应分析 李勇生 李思明 (067)

屈服强度 550MPa 高强钢材冷弯薄壁型钢结构轴压构件承载力设计方法研究
..... 李元齐 王 磊 沈祖炎 王彦敏 徐宏伟 (072)

双向偏心受压异形柱计算机辅助配筋计算 连 星 叶献国 (076)

高性能混凝土在大跨度预应力混凝土连续梁中的应用 连俊英 华 渊 周太全 (080)

FRP 钢与混凝土预应力组合梁承载力计算公式 刘 莉 杨 佳 王连广 (084)

受损混凝土梁受力性能试验研究 刘 中 郑玉庆 (088)

已破损非预应力钢筋混凝土吊车梁的试验研究
..... 刘海生 武智超 丁无私 马军利 雷 军 顾 敏 (092)

高性能混凝土配合比正交试验法 刘宏伟 庄惠平 (096)

矿区构筑物耐久性影响因素分析 刘剑飞 陈维红 (100)

自密实混凝土力学性能的影响因素 刘志超 罗素蓉 (105)

H 型截面有约束钢柱火灾行为的试验研究 吕俊利 董毓利 李晓东 马 萍 (109)

半刚接钢框架的几何非线性有限元分析	栾焕强 (113)
无量纲表格法计算 T 形梁正截面配筋	罗强军 周东华 (118)
混凝土结构裂缝的预防与处理	马焕然 (124)
钢骨混凝土结构的技术经济分析	慕光波 王连广 朱森岩 (128)
梁振动问题的非局部效应理论研究	宋彦琦 (132)
基于统一强度理论的圆钢管混凝土轴压长柱的极限承载力分析	田宏伟 赵均海 刘丽芬 李巧燕 (136)
带肋薄壁方钢管混凝土轴压短柱延性的试验研究	王冬晔 陶 忠 韩林海 (144)
混凝土结构早龄期开裂的概率分析	王甲春 阎培渝 余红发 (148)
无梁楼板的直接计算分析方法	王雪琴 (153)
高层建筑基础裂缝的成因及控制	王亚宁 (157)
耐久性退化后钢骨混凝土抗弯承载力计算公式	王连广 哈 娜 霍君华 (161)
混凝土耐久性的影响因素及措施研究	魏亚兵 蔡 路 (165)
基于材料本构关系的钢筋混凝土矩形截面梁抗弯刚度计算	吴二军 王秀哲 (169)
轻骨料混凝土复合梁受力性能的数值模拟	吴平安 闫文斌 高洪生 (174)
长期荷载作用下轻骨料混凝土梁的变形试验研究	夏春红 许 勤 (179)
高层建筑及其裙房结构整体设计抗震性能的动力分析	许 波 (184)
混凝土材料性质对其碳化的影响	许 超 黄慎江 (189)
基于“双重”非线性钢结构的 ANSYS 稳定设计方法研究	薛晓敏 张 陵 (193)
腐蚀后钢筋混凝土梁正截面承载力的计算	阎西康 赵少伟 王铁成 (197)
暗钢梁板柱-核心筒混合结构节点试验研究	阎兴华 朱清峰 苏志宏 张 彬 (201)
纤维高强粉煤灰混凝土早龄期强度试验研究	杨启斌 罗素蓉 (205)
钢管再生混凝土纯弯构件力学性能研究	叶 欣 杨有福 (209)
预应力 FRP 布钢骨混凝土抗弯承载力计算公式	王连广 时 光 吕 月 (213)
FRP 筋粘结性能的试验研究及理论分析	张 鹏 薛伟辰 李 冰 邓 宇 (217)
基于挠度的体外预应力 RC 梁极限承载力分析	张立峰 程绍革 卢晋福 (222)
水泥土疲劳损伤的实时在线监测	张敏霞 简文彬 徐 平 (226)
现浇混凝土蜂窝式空心板的试验研究	张仟朋 程文灏 党 纪 程远兵 (231)
原材料对混凝土裂缝的影响及控制	张增运 许金余 杨计发 (236)
圆钢管再生混凝土柱力学性能初步研究	张 波 杨有福 (240)
混凝土构件安全性模糊综合评判	郑新锋 程才渊 宋 辉 (244)
矩形截面 FRP 约束混凝土轴压性能的试验研究	钟远志 陶 忠 丁 清 (249)
聚丙烯纤维混凝土动力学性能实验分析	庄惠平 杨 明 (253)

2.2 岩土工程与地基基础

预应力管桩在某行政办公楼中的应用	蔡北海 张季超 曾华健 (257)
------------------------	-------------------

青康公路冻土路基变形、强度特性的数值试验研究.....陈飞熊 李 宁 宋战平 (261)

面向对象三维非线性有限元程序设计.....邓安福 魏艳军 邓 璞 郑 冰 (265)

横观各向同性地基 Cerruti 问题的解析解.....李 婕 顿志林 张学民 高雪冰 (270)

膨胀型软岩变形机理与特种控制技术.....李国富 殷惠光 (274)

自平衡试桩测试研究与应用.....李恒太 (280)

湿陷性黄土的动力固结特性.....李志飞 李赞成 王亚军 (285)

双荷载箱自平衡测试技术在工程中的巧妙应用.....卢 波 龚维明 戴国亮 (289)

软土路基沉降变形规律现场试验及 FLAC 模拟研究.....

.....毛巨省 秦杏春 唐筱慧 贺维庚 李 涛 高 涛 (294)

基于粘弹性模型的土层动、静力参数关系研究.....秦莞臻 王开林 (299)

阴山北部地表土层冻融特性分析.....中向东 刘铁军 王丽萍 何 梁 (303)

应用无单元法模拟岩体水力劈裂.....沈 明 胡云进 毛根海 (307)

压弯荷载作用下圆截面混凝土桩的损伤分析.....司文静 王 成 (312)

提高预应力混凝土管桩单桩承载力的新思路.....宋志慧 牛志荣 (316)

双面加筋挡土墙受力特性的试验研究.....苏 骏 余天庆 (321)

高岩石边坡加固风险决策研究.....田 斌 张 萍 刘德富 (326)

用非经典振型分解法计算混凝土房屋及其顶上钢塔的地震响应.....王依群 王华明 (332)

直角坐标系下层状地基理学计算中的传递矩阵技术.....王有凯 牛婷婷 (336)

聚氨酯发泡快速稳定路基回填料的试验研究.....韦灼彬 彭全敏 王铁成 高 屹 (340)

人工挖孔大直径灌注桩基桩检测分析.....杨秀花 苏长吉 (344)

加筋土挡墙的破坏机理及稳定性分析研究.....杨正权 邹德高 孔宪京 (350)

锁口桩围堰在大型基坑支护中的应用.....叶 松 李彦武 龙永高 江栋材 (356)

高地下水位下的深基坑土钉支护与降排水措施.....张卫民 王平乐 项林凤 (360)

基坑开挖过程中支护桩土拱效应探讨.....张云军 宰金珉 王旭东 (364)

薄壁混凝土沉井围堰的施工技术.....赵振宇 (368)

简单土坡稳定最大失效概率滑动面的分析方法.....邹传仁 张俊芝 (372)

2.3 隧道与地下工程

高地应力地下工程仿围岩自然崩落外廓特征的洞形结构模拟试验研究.....范广勤 张千里 (377)

岩溶隧道岩层垮塌机理及隧道底板最小厚度分析.....宋战平 李 宁 邓良胜 (385)

特大断面黄土隧道有限元分析.....苏新民 (390)

高填方涵洞不同顶板结构的设计对比.....王桂林 彭 跃 郭 超 张永兴 (394)

隧道复合衬砌运营期可靠性评价方法.....谢 楠 王人力 张 弥 朱尔玉 王 勇 (398)

某地下室裂缝原因分析.....余通州 沈 凡 周海浪 (403)

锦屏电站左岸导流洞局部洞段围岩失稳成因及支护措施研究.....

.....张恩宝 张建海 周 钟 唐朝阳 王仁坤 (406)

砂土地基盾构隧道作用松驰土压力数值分析 钟小春 韩月旺 加 瑞 (412)

2.4 水工、港工

水泥混凝土道面板缝破损机理研究 冯道德 庄惠平 (417)

模糊聚类分析在抽风机故障诊断中应用 扶名福 谢明祥 饶 泓 (421)

水电站重力坝段坝踵应力分析 黄文威 蓝文武 谢开仲 (428)

高土石坝加筋抗震措施的快速拉格郎日差分分析 刘莹光 孔宪京 邹德高 (432)

某双曲拱坝应力稳定分析 吴冬梅 燕柳斌 梁金福 (437)

锦屏电站左岸导流洞局部围岩失稳有限元分析 吴数伟 张建海 张雪晶 张恩宝 唐朝阳 王仁坤 (441)

矩形断面有压管道汇流口流场数值计算 相 鹏 茅泽育 罗 昇 (447)

应用 Ansys 求解碾压混凝土坝渗流场 徐卫超 田 斌 邓凤铭 (451)

园满贯拱坝温度荷载影响及诱导缝作用 张雪晶 张建海 陈卫平 吴数伟 张恩宝 (455)

水泥混凝土道面板缝破损防治措施 庄惠平 韩 凯 (460)

三轴应力下钢纤维混凝土的破坏准则

白二雷¹, 许金余^{*1, 2}, 吕晓聪¹

(1. 空军工程大学工程学院机场建筑工程系, 西安 710038; 2. 西北工业大学力学与建筑工程学院, 西安 710072)

摘 要: 由于在一定纤维含量范围内, 钢纤维混凝土空间破坏曲面的形状与罗德角 θ 的大小无关。据此, 对普通混凝土的 Ottosen 破坏准则进行了相应的修正, 并考虑了钢纤维含量特征参数 $\rho_f l/d$ 的影响, 得出适合钢纤维混凝土的破坏准则表达式。

关键词: 钢纤维混凝土; Ottosen 准则; 钢纤维含量特征参数; 破坏准则

THE FAILURE CRITERION OF STEEL-FIBER REINFORCED CONCRETE UNDER THREE-AXIAL STRESS

BAI Er-lei¹, XU Jin-yu^{1,2}, LU Xiao-cong¹

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038; 2. College of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Within a certain range of steel-fiber content, the space failure surface shape has no relation with angle θ . As a result, the Ottosen criterion of concrete is modified considering the influence of steel-fiber content parameter $\rho_f l/d$. Finally, the failure criterion formula of steel-fiber reinforced concrete is gained.

Key words: steel-fiber reinforced concrete; Ottosen criterion; represent parameter of steel-fiber content; failure criterion

1. 引言

钢纤维混凝土由于受到所掺钢纤维的影响, 其强度、力学性能、破坏形态等都与普通混凝土的各项性能有很大的差异。在三向应力状态下, 由于应力比等影响因素的介入以及应力状态的改变, 影响钢纤维混凝土力学性能的因素更为复杂。在这种情况下, 钢纤维的掺入对混凝土的强度有何影响, 钢纤维含量特征参数与其他影响因素的相互关系如何, 如何确定适合钢纤维混凝土的破坏准则和本构关系, 这是现有研究较少涉及的方面^[1]。本文主要考虑在一定纤维含量范围内, 钢纤维混凝土空间破坏曲面的形状与罗德角 θ 的大小无关, 并考虑钢纤维含量特征参数 $\rho_f l/d$ 的影响, 据此, 对普通混凝土的 Ottosen 破坏准则进行了相应的修正, 最后得出适合钢纤维混凝土的破坏准则表达式。

2. 混凝土的 Ottosen 破坏准则

将混凝土的破坏包络曲面用数学函数加以描述, 作为判定混凝土是否达到破坏状态或极限强度的条件, 称为破坏准则或强度准则。虽然它不属基于机理分析、具明确物理概念的强度理论, 但它是大量试验

作者简介: 白二雷 (1979), 男, 河南人, 博士生, 主要从事结构工程与防护工程研究 (E-mail: baierlei@163.com);

*许金余 (1963), 男, 吉林人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程与防护工程研究 (E-mail: jinyuxu@263.net);

结果的总结，具有足够的计算准确性，对实际工程有重要的指导意义。

Ottosen 准则是根据偏平面包络线由三角形过渡为圆形的特点、应用薄膜比拟法 即在等边三角形边框上蒙上一薄膜，承受均匀压力后薄膜鼓起，等高线的形状由外向内的变化恰好相同。据此建立了二阶偏微分方程，求解后转换得到以应力不变量表达的破坏准则式

$$a\frac{J_2}{f_c^2}+\lambda\frac{\sqrt{J_2}}{f_c}+b\frac{I_1}{f_c}-1=0$$

(1)

当 $\theta \leq 30^\circ$ ，即 $\cos 3\theta \geq 0$ 时

$$\lambda = \frac{1}{r} = k_1 \cos \left[\frac{1}{3} \cos^{-1} (k_2 \cos 3\theta) \right]$$

$\theta \geq 30^\circ$ ，即 $\cos 3\theta \leq 0$ 时

$$\lambda = k_1 \cos \left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \cos^{-1} (-k_2 \cos 3\theta) \right]$$

(2)

式中共有 4 个参数，其中 a 和 b 决定子午线的形状， k_1 和 k_2 分别决定偏平面包络线(r 或 $\sqrt{J_2}$)的大小和形状。

3. 钢纤维混凝土的破坏准则

文献[2]研究指出：对于钢纤维混凝土，在压子午线上($\theta = 60^\circ$)其剪应力的大小与普通混凝土没有显著区别，而在拉子午线上，由于钢纤维提高了混凝土的抗拉能力，所以其剪应力则明显提高了，在偏平面上表现为强度包络线的相对饱和。对于一定纤维含量(0.5%~2.5%)，在相同静水压力段，钢纤维混凝土拉压子午线上的剪应力基本相同，其比值 $\tau_{\alpha l} / \tau_{\alpha c}$ 接近于 1，强度包络线的形状基本为圆周线。

偏平面上强度包络线的圆形分布规律表明，在一定纤维含量范围内，钢纤维混凝土空间破坏曲面的形状与罗德角 θ 的大小无关。钢纤维混凝土的这一力学特性为其空间破坏准则的建立带来了方便，因为在不考虑 θ 角影响的情况下，空间破坏曲面的形状完全可以由曲面上任意一条子午线在 $\tau_{oc l}-\sigma_{oc l}$ 平面内的分布规律来描述。

根据上述研究结论，对 Ottosen 准则表达式进行简化，并且转换到用相对八面体强度表示的表达式中，得：

$$\sigma_0=\frac{1}{3b}-\sqrt{\frac{1}{6}}\frac{k}{b}\tau_0-\frac{a}{2b}\tau_0^2$$

(3)

式中只有三个参数需要标定，参数物理意义与原公式一致。

表 1 参数表

$\rho_f l/d$	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25
系数					
$-a/2b$	0.0192	0.0754	0.4962	0.3111	0.4785
$-\sqrt{1/6} k/b$	-1.5651	-1.7180	-1.9357	-1.7219	-1.7980
$1/3b$	0.1091	0.1243	0.1297	0.1276	0.0822

采用试验数据^[2]进行曲线拟合。表达式中各参数的计算值见表 1。考虑到钢纤维含量的影响，须确定各参数与钢纤维含量特征参数之间的关系(图 1)。

用最小二乘法可以求得：

$$\begin{aligned} -a/2b &= (0.4617\rho_f l/d - 0.0702) \\ -\sqrt{1/6} k/b &= (-0.1879\rho_f l/d - 1.6068) \\ 1/3b &= (-0.0202\rho_f l/d + 0.1297) \end{aligned}$$

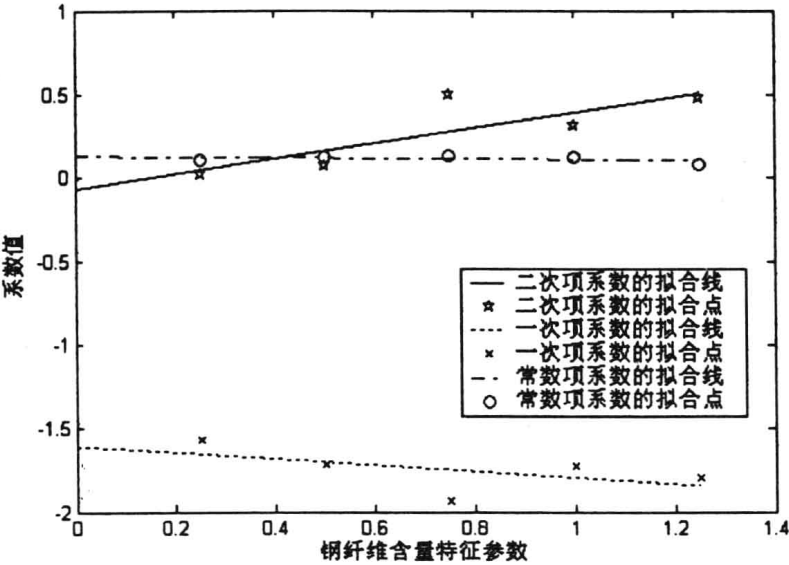


图 1 各项次系数与纤维含量特征参数的关系

由此可以得出破坏准则的表达式为：

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= (0.4617\rho_f l/d - 0.0702) \cdot \tau_0^2 + (-0.1879\rho_f l/d - 1.6068) \cdot \tau_0 \\ &\quad + (-0.0202\rho_f l/d + 0.1297) \end{aligned} \tag{4}$$

试验数据和拟合曲线绘于图 2。由图 2 可以看出，在一定的纤维含量内，本文提出的破坏准则计算式与试验数据吻合良好，具有较高的精度。

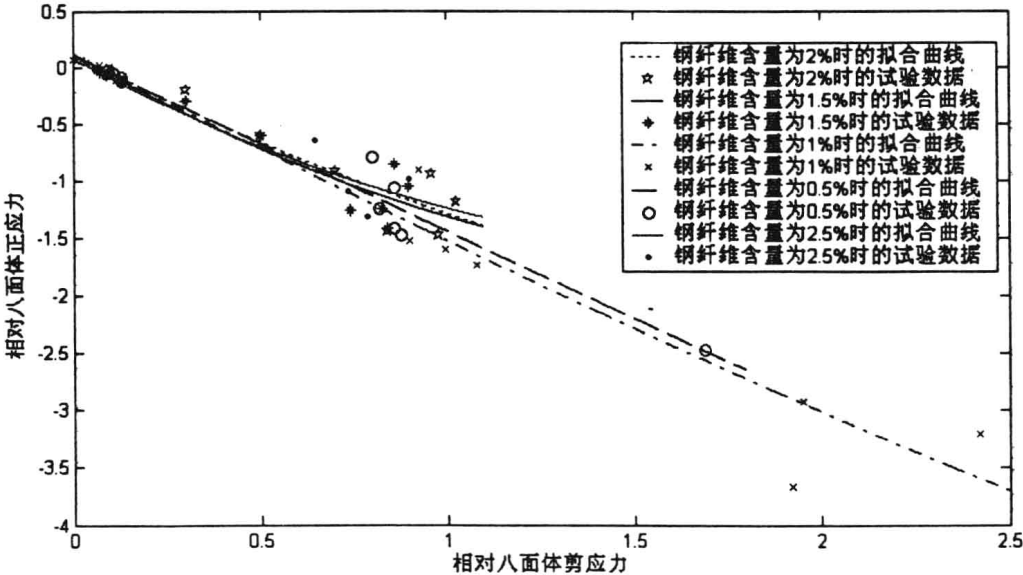


图 2 试验数据及拟合曲线

4. 结语

由于钢纤维的作用影响，钢纤维混凝土的力学性能与普通混凝土有较大差异。本文通过推导得出的三轴应力状态下的钢纤维混凝土的破坏准则与已知试验数据吻合良好，具有较高的精度。

但限于试验数据是基于钢纤维含量较低时的情况，本文提出的破坏准则表达式仅限于低钢纤维含量的钢纤维混凝土。对于高强高含量钢纤维混凝土，需要根据实际试验数据重新标定参数。

参考文献：

[1] 过镇海、时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 清华大学出版社. 2003, 12
[2] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 中国水利水电出版社. 2002, 12
[3] 姚仰平、路德春等. 广义非线性强度理论及其变换应力空间[J]. 材料科学. 2004, 34(11): 1283~1299
[4] 曹国娥、欧志华等. 钢纤维形状特征对钢纤维混凝土力学性能的影响[J]. 新型建筑材料. 2002, 2: 37~38

受盐腐蚀混凝土抗压强度的试验研究

陈元素^{*1}, 李昕¹, 范颖芳²

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连海事大学交通工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 考虑了 Na_2SO_4 、 NaCl 两种腐蚀介质对混凝土的腐蚀作用, 研究了两种浓度作用下腐蚀后 C30 混凝土的抗压强度。试验结果表明, 两种腐蚀性介质作用下, 混凝土强度在腐蚀作用初期有所增加, 随着腐蚀时间的增加, 混凝土强度逐渐下降。 NaCl 腐蚀后的强度衰减率越来越小, Na_2SO_4 腐蚀后的强度衰减率越来越大。介质浓度对混凝土强度变化率的影响不大。基于试验研究, 提出了计算腐蚀混凝土强度的数学模型。

关键词: 混凝土; 盐腐蚀; 抗压强度; 膨胀内应力;

Experimental Investigation on Compression Strength of Salt Corroded Concrete

Yuan-su Chen^{*1}, Xin Li¹, Ying-fang Fan²

(1. School of Hydraulic Engineering and Civil Engineering Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024;

2. Institute of Road and Bridge Engineering Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026)

Abstract: Considered the effect of corrode mediator of NaCl and Na_2SO_4 on concrete, researched the compression strength of corroded concrete on the effect of two sort concentration of corrode liquor. The result indicated that the compression strength of concrete increased a little at the beginning. With the increasing time of corrode, the compression strength of concrete fall down gradually, the decline rate of NaCl corroded concrete will become more and more smaller, and the decline rate of Na_2SO_4 corroded concrete will speed up. The consistency of the liquor do not have the high effect on the strength change rate of the concrete. Based on the experiment, extract a mathematic model to compute the compression strength of corroded concrete.

Keywords: concrete; salt corrosion; compression strength; expansion internal stress

1 引言

混凝土结构是目前土木建筑结构中最常用的结构,但是由于混凝土材料的腐蚀造成的经济损失,据专家估计每年最少 400 亿元以上^[1]。一直以来,钢筋混凝土结构被认为是耐久性很强的结构,但是实际环境中总是存在着大量的腐蚀因素,特别是工业、化工环境、盐碱土地区,随着全球环境恶化,酸雨、工业生活废液的排放也大大增加了混凝土结构受腐蚀的机会,其中盐类腐蚀占有很大的比例,受腐蚀后混凝土的力学性能将产生变化,混凝土内部钢筋也因混凝土的腐蚀而加剧了锈蚀,从而造成结构承载性能的下降,降低结构的使用寿命,甚至可能会造成突然的坍塌造成人员伤亡和巨大的经济损失。因此对腐蚀混凝土的

*基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目 (20022135), 辽宁省博士启动基金资助 (1050259)

作者简介: *陈元素 (1982), 男, 沈阳人, 硕士研究生, 从事混凝土耐久性研究 (wgoever@163.com)

李昕 (1971), 男, 长春人, 博士, 副教授, 主要从事海洋结构动力响应分析, 水工结构健康诊断方面的研究工作。

范颖芳 (1972), 女, 开封人, 博士, 副教授, 主要从事受腐蚀钢筋混凝土结构力学性能研究。

研究有重要的经济意义和社会意义。

国外对混凝土腐蚀的研究起步较早，研究内容也较广泛，涉及腐蚀介质在混凝土内的扩散、阳离子类型的影响^[2]、浓度的影响、PH 值的影响^[3]以及腐蚀造成混凝土的膨胀^[4]等，但很少考虑诸多因素与强度变化的关系。国内虽然起步较晚，但是近几年已经受到重视，通过试验研究得到了腐蚀混凝土的强度变化与腐蚀因素的关系，并对腐蚀混凝土应变-应变曲线也进行了初步的探讨^[5]。

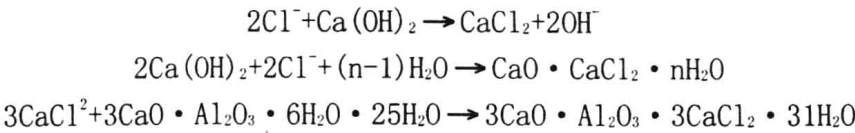
腐蚀后混凝土的力学性能将不同于新混凝土，其强度、变形能力、弹性性能、动力特性、吸能能力都会决定结构构件的力学性能，使构件产生不同的破坏形态。此时对受腐蚀的结构的评价和分析就不能单凭新混凝土的力学特性来进行了，必须要有一套描述腐蚀混凝土力学性能的模型或者数学表达式，才能得出科学而准确的结果。这也体现了对腐蚀混凝土的研究的重要意义。

对腐蚀混凝土力学性能的研究将是一个漫长而艰苦的过程，需要大量的试验和分析工作，目的是能够得到描述腐蚀混凝土各项性能的力学或数学模型。本文的工作以强度为切入点，研究了不同介质、不同浓度对腐蚀混凝土的强度变化的影响。

2 混凝土的腐蚀机理

2.1 氯盐对混凝土的腐蚀机理

氯盐腐蚀是沿海混凝土建筑物和公路腐蚀破坏最重要的原因之一。氯盐既可能来自于外部的海水、海风、海雾、化冰盐，也有可能来自于建筑过程这使用的海砂、早强剂、防冻剂等，它可以和混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 等起反应，生成易溶的 CaCl_2 和带有大量结晶水、比反应物体积大几倍的固相化合物，造成混凝土的膨胀破坏^[6]，反应式如下：



因此，如果水泥中水合铝酸钙含量高于 8%，由其制成的混凝土将很容易遭受氯离子的腐蚀。有必要指出的是，能够引起混凝土腐蚀破坏的是自由的氯离子，而不是已经结晶固化的氯化物，如难溶的氯铝酸盐 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ，其中的氯离子就不再有破坏性。所以提高混凝土耐久性一方面是选择材料，不用海砂，慎用早强剂。

2.2 硫酸盐对混凝土的腐蚀机理

硫酸盐也是破坏混凝土耐久性的一个重要因素，近年来在青海、甘肃等地的铁路、矿山、水电工程中的混凝土构筑物都出现了不同程度的遭受硫酸盐腐蚀破坏的问题。与氯盐的腐蚀相类似，硫酸盐进入混凝土内部后与水泥石的某些成分反应，生成物吸水而体积膨胀，当膨胀应力达到一定程度时就会造成混凝土结构的破坏，这种腐蚀作用在不同条件下又有两种表现形式：

(1) E 盐破坏—Ettringite expansion

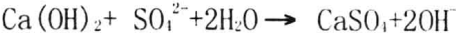
即钙矾石膨胀破坏，或称高硫铝酸钙膨胀破坏，其反应式如下：



生成物的体积比反应物大 1.5 倍或更多呈针状结晶引起很大的内应力其破坏特征是在表面出现几条较粗大的裂缝。

(2) G 盐破坏—Gypsume expansion

即石膏膨胀破坏，当溶液中 SO_4^{2-} 大于 1000 ml/L 时， SO_4^{2-} 可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成石膏晶体，反应式如下：



生成的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 体积增大 1.24 倍，导致混凝土及水泥硬化浆体因内应力而破坏。其破坏特征是构筑物表面没有粗大裂纹但遍体溃散。即使 SO_4^{2-} 的浓度不高，但若混凝土处于干湿交替状态，石膏结晶膨胀破坏也易发生，因为水分蒸发导致石膏结晶的形成。造成 E 盐或者 G 盐破坏主要取决于环境中 SO_4^{2-} 的浓度，

Biczok^[1]等人对此进行了研究。

综上，对于混凝土的盐腐蚀破坏，都是由于混凝土内组分与腐蚀环境中的氯盐或者硫酸盐发生化学反应后内部组分的成分改变、生成物的膨胀性造成了骨料和水泥水化产物粘结性能改变以及产生膨胀内应力，造成混凝土强度的劣化。

3 试验研究

3.1 原材料

水泥为大连水泥厂生产的 325#普通硅酸盐水泥，粗骨料为 5~31.5mm 连续级配的碎石，细骨料为天然河沙，水为普通自来水，无外加剂。

3.2 试验方案

试件尺寸为 100mm×100mm×100mm 的混凝土试块，考虑盐的类型、浓度、时间三个因素的影响，其具体配合比见表 1，所考虑的影响因素表见表 2。

表 1 混凝土配合比设计

水/kg	水泥/kg	砂/kg	碎石/kg	砂率
200	450	541	1200	0.31

表 2 影响因素

分组	溶液类型	溶液浓度
A1	NaCl	10%
A2		20%
B1	Na ₂ SO ₄	10%
B2		20%

3.3 试验方法

3.3.1 加速腐蚀试验方法

目前研究腐蚀混凝土的试验方法主要有现场试验法和实验室快速腐蚀试验法。现场试验法可靠性高，但是实验周期太长，而且对结构有直接损伤，很难大量进行。实验室加速腐蚀方法主要通过增大浓度、提高环境温度、增大接触面积、增加混凝土渗透性、采用干湿交替循环等方法加快腐蚀。

本试验主要研究两种盐的直接化学作用腐蚀对混凝土劣化的影响，因此，采用提高浓度（相当于高于普通环境 50~100 倍的浓度）、恒温的方式进行快速腐蚀，并不增加混凝土的渗透性和采用干湿交替循环的方法。这样更能体现单纯化学腐蚀对混凝土性能的影响。

3.3.2 试件制作

试件形成 24 小时后脱模，标准养护 28 天后，测试其抗压强度，而后放在凉棚中自然存放 45 天，使其强度增长比较缓慢且平稳，开始腐蚀，将试块按照分组放入装有 Na₂SO₄、NaCl 的 10%和 20%溶液的四个容器中，并封口，防止水分过分挥发和杂物进入。

3.3.3 试验过程

- (1)开始腐蚀之日分别对各容器中一组试件（3 个）测其抗压强度；
- (2)待腐蚀日期分别到达 5d、10d、15d、30d、60d、90d、150d 时，分别从各容器中取出一组（3 个）试件，置于通风处使其干燥，再测其抗压强度。

3.3.4 力学性能试验

按《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T50081-2002）进行抗压强度试验。试验设备采用大连理工大学结构工程实验室 YE-2000A 型 200t 液压式压力试验机。

4 结果与分析

4.1 腐蚀后混凝土强度的变化

为了便于分析比较, 定义抗压强度损失率 K_c 如下:

$$K_c = (1 - \frac{f'_{ct}}{f'_{ci}}) \times 100\% \tag{1}$$

式中: f'_{ct} 表示第 t 天混凝土的抗压强度, 此处 t 分别等于 0、5、10、15、30、60、90、150 (从浸泡至溶液之日算起); f'_{ci} 表示与腐蚀龄期 t 相对应的未腐蚀混凝土的抗压强度。

根据定义的抗压强度损失率 K_c , 可以得到混凝土在不同介质、不同浓度腐蚀溶液作用下 K_c 值与腐蚀时间的关系, 如图 1 所示。

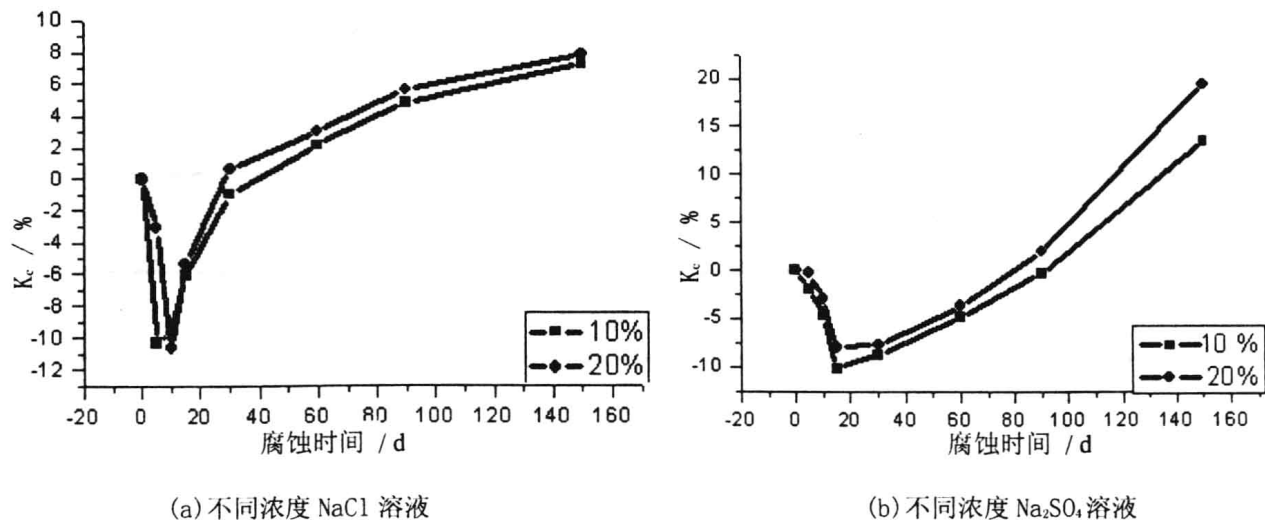


图 1 受腐蚀混凝土强度的损失率

4.1.1 腐蚀溶液类型的影响

由图 1 可以得到以下分析结果:

(1) 无论是 NaCl 还是 Na₂SO₄ 溶液的腐蚀, 在腐蚀作用初期, 混凝土的强度都有所提高, 大约在 10% 左右, 这是由于腐蚀初期腐蚀溶质与混凝土组分发生化学反应后生成物在一定程度上填满混凝土内部原有的初始空隙或缝隙, 由于此时混凝土只是表层一定深度内遭受腐蚀, 因此, 混凝土试块的外围组分由于密实而使得混凝土在受压时受到了加强的约束, 从而强度得到提高。此时膨胀物只起到填充作用, 当腐蚀进一步进行, 膨胀物继续增多到填满初始空隙后, 就产生的膨胀的内应力, 这种内应力使混凝土受到了劈拉的作用, 在压力作用下会加强混凝土的横向破坏, 使混凝土的抗压强度降低, 表明混凝土受腐蚀到一定时间后强度开始劣化。

(2) 两种介质腐蚀造成的强度变化也有差别。图(a)是 NaCl 的腐蚀后抗压强度损失率图, 混凝土强度在腐蚀后 10 天左右达到强度的最大值, 之后强度开始下降, 开始下降率较大, 达到 90 天以后强度下降缓慢, 有趋于恒定的趋势, 这是由于 NaCl 与混凝土组分反应生成的 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ 和 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 3H_2O$ 是难溶于水而且较为密实的膨胀物, 随着它们的增多, 混凝土越来越密实, NaCl 越来越难以渗透到混凝土的内部, 其造成的膨胀内应力增大也就越来越慢了。图(b)是 Na₂SO₄ 腐蚀后抗压强度损失率图, 混凝土在腐蚀后 15 天左右达到强度最大值, 之后强度开始下降, 下降幅度越来越大, 在 150 天的时候最大已经下降 19% 左右, 与 NaCl 腐蚀相比, 有很大的下降趋势, 这是由于 Na₂SO₄ 腐蚀, 无论是 E 盐破坏还是 G 盐破坏其反应物都属于针状结晶型产物, 因此在混凝土内部不能完全填满内部空隙甚至会由于膨胀力产生新的裂隙, 使得腐蚀溶液能够进一步进入混凝土内部与其组分继续发生反应, 从而加剧了强度下降的速度。

(3) 两种腐蚀溶液使混凝土初期强度增加 10% 左右, 这是由混凝土本身决定的, 由于腐蚀造成的密实只