

**第十三届
全国结构工程学术会议
论文集**

第Ⅱ册

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

No. II

主编：崔京浩

**清华大学出版社
《工程力学》杂志社**

ISSN1000-4750

CN11 - 2595/ O3

工程力学

第21卷

2004 增刊

第Ⅱ册

ENGINEERING MECHANICS

Vol. 21

Supplements No. II

(2004)京新出报刊增准字第333号

ISSN 1000-4750



第十三届

全国结构工程学术会议

论文集

第Ⅱ册

PROCEEDINGS OF THE THIRTEENTH
NATIONAL CONFERENCE ON
STRUCTURAL ENGINEERING

No. II

2004年10月16~19日

江西 井冈山

10.16~10.19, 2004

JINGGANGSHAN CHIAN

清华大学出版社

《工程力学》杂志社

第十三届 全国结构工程学术会议

中国 井冈山
JINGGANGSHAN CHIAN
10.16~10.19, 2004

主办单位

中国力学学会结构工程专业委员会
南昌大学土木工程学院
中国力学学会《工程力学》编委会
清华大学土木工程系

协办单位

江西省力学学会
江西省土木建筑学会

学术委员会

主席：龙驭球

副主席：袁 驷

委员：(按姓氏拼音为序)

陈肇元 崔京浩 董石麟 范 重 方 竞 扶名福 桂国庆 何玉敖 胡和平 江欢成
金 峰 景 瑞 雷晓燕 李 慧 李国强 梁 波 刘德富 刘光栋 刘英卫 欧进萍
秦 荣 茹继平 石永久 宋二祥 宋固全 苏先槿 吴 恒 夏亨熹 辛克贵 徐镇凯
严宗达 杨桂通 杨秀敏 俞茂宏 袁明武 张建民 张瑞丰 张维奇 赵国藩 赵国景
郑建岚 郑照北 周绪红

组织委员会

主席：扶名福

副主席：崔京浩(常务) 张维奇

委员：(按姓氏拼音为序)

包世华 陈定胜 陈景宝 陈以一 陈永灿 龚良贵 顾莉珠 雷晓燕 李正良 李 珠
刘英卫 钱稼茹 宋固全 苏是岷 王怀忠 王晓纯 王忠静 王志浩 韦树英 翁智远
吴胜兴 熊进刚 徐镇凯 杨 强 叶列平 尹双增 于海山 钟宏志 周新刚

秘书处

秘书长：徐镇凯

副秘书长：宋固全

秘书组：(按姓氏拼音为序)

陈景宝 顾莉珠 梁 洪 刘 丹 刘光宗 谢立新 袁志军 张爱萍

第十三届全国结构工程学术会议论文目录

本次会议论文集收录论文 321 篇, 共 1111 页, 分装成三册, 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 103 篇 (共 631 页), 包括:

特邀报告: 一、力学分析与计算; 二、试验、监控、鉴定、事故分析与加固

第 II 册论文 132 篇 (共 583 页), 包括:

三、钢与钢筋混凝土、材料、构件与结构; 四、岩土、地基基础与地下工程; 五、特种结构、车辆、飞行器与船舶结构; 六、路桥、水工、港工;

第 III 册论文 86 篇 (共 583 页), 包括:

七、抗震、爆炸、冲击、动力与稳定; 八、设计、施工、优化与可靠度; 九、交叉学科与其他研究成果

第 II 册目录

三、与钢筋混凝土、材料、构件与结构

T 形柱-梁结点受力性能研究.....	崔清洋 胡必武 (001)
硅泡沫材料单向压缩试验曲线拟合及其应用.....	范志庚 尹益辉 史平安 郝志明 徐 兵 (006)
宽肢 T 形柱构件静力试验性能分析.....	郭 棣 吴敏哲 (011)
聚丙烯纤维增强水泥基复合材料的断裂特性.....	华 渊 周太全 连俊英 (015)
高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究.....	黄海峰 谢永亮 李 媛 卢玉松 (019)
钢管混凝土柱滞回性能的试验分析.....	黄晓宇 王铁成 杜喜凯 陈敖宜 (022)
粉煤灰加气混凝土动力学试验与分析.....	江小平 常 鑫 (026)
钢筋砼梁外贴碳纤维加固抗剪强度的计算分析.....	金丰年 方华军 王 斌 周建民 (031)
预应力预压装配式框架梁端结合部承载能力.....	晋哲锋 张瑜中 柳炳康 昌献峰 (035)
钢骨高强混凝土轴心受压长柱受力性能试验研究.....	李 斌 韩 卓 薛 刚 任锡跃 (040)
钢管栅混凝土侵彻性能试验分析.....	李 媛 智海运 谢永亮 (044)
T 形短肢剪力墙承载力模拟试验分析.....	李青宁 蔡卫宁 王 宁 张守军 (048)
新型混凝土夹芯板 (CS 板) 的研究与应用.....	李砚波 涂 杰 戴自强 赵仲星 (052)
动载作用下有粘结部分预应力混凝土梁中非预应力钢筋和预应力钢绞线的受力特性.....	李砚召 王肖钧 王玉岚 (056)
干湿状况对水泥混凝土冲击压缩强度的影响.....	李赞成 吴 磊 祝真强 孙金坤 (061)
湿喷聚丙烯纤维砼新型隧道锚喷支护结构分析.....	连俊英 华 渊 周太全 汪仁和 (065)
聚丙烯纤维混凝土早期收缩开裂试验研究.....	林挺伟 季 韬 郑忠双 (068)

栓冲切板考虑受弯作用的强度计算公式.....	林旭健 (072)
某博物馆钢结构静力和模态分析.....	刘 杰 黄 卓 陈志华 杜 涛 (076)
轻骨料混凝土局部受压抗裂性试验研究.....	刘 强 潘 清 陈忠汉 朱聘儒 (080)
自修复混凝土中内置空心胶囊几何参数的确定.....	刘承超 罗素蓉 (084)
混凝土结构基本热工参数研究进展.....	刘文燕 赵 勇 (088)
聚氨酯混凝土基本性能试验研究.....	彭全敏 韦灼彬 王铁成 (093)
混杂纤维约束混凝土方柱的轴压试验研究.....	彭亚萍 王铁成 刘增夕 徐新生 (098)
框架底层柱计算长度 l_0 取值方法的探讨.....	任瑞瑞 李九红 (103)
超长预应力混凝土框架梁的预应力效应分析.....	桑文进 赵 勇 (107)
采用加劲肋改善薄壁方钢管混凝土工作性能初探.....	陶 忠 王志滨 韩林海 (112)
挑梁下 R.C 构造柱受力分析及柱轴力计算.....	涂序庆 贾益纲 (116)
立方晶粒各向同性集合的平均本构关系.....	王 姣 (121)
L 形楼板受力分析.....	王铁成 郭永亮 (125)
矩形钢管高性能混凝土偏压柱试验研究.....	王志滨 陶 忠 韩林海 (128)
钢筋混凝土非线性有限元及 ANSYS 中混凝土本构关系研究.....	吴可训 叶献国 武士军 (132)
混凝土夹芯承重墙板的 ANSYS 分析.....	李砚波 张荣庆 戴自强 张 敬 赵铃军 (138)
钢-混凝土混合结构在反复水平荷载下的全过程分析.....	阎兴华 黄 海 周娟华 朗义勇 (142)
不同品种粉煤灰对混凝土抗裂性能的影响.....	杨 波 王雪芳 郑建岚 (146)
钢管和混凝土之间粘结强度的探讨.....	杨有福 韩林海 (151)
某机场航站楼钢结构防火保护的性能化分析.....	姚 斌 时 虎 张和平 范维澄 (155)
长期荷载作用下 FRP 约束混凝土偏压构件的变形影响因素分析.....	于 清 陶 忠 张 铮 (161)
开洞钢筋混凝土板的非线性有限元分析.....	曾 懿 徐镇凯 (165)
钢管混凝土构件徐变的研究与处理方法.....	战启芳 (169)
混凝土夹芯承重墙板承载能力的试验研究.....	张 敬 李砚波 赵铃军 戴自强 (173)
粘结应力对钢管混凝土性质的影响.....	张 煜 李雪飞 刘荣杰 (178)
钢管混凝土柱延性的影响因素分析.....	张建辉 王铁成 杜喜凯 陈敖宜 (182)
单轴受压下混凝土的力学性能试验研究.....	张生营 林锋挺 林旭健 (186)
轻钢框架梁柱节点在反复荷载下的全过程分析.....	阎兴华 郝国龙 朗义勇 周娟华 (190)
钢筋混凝土柱耐火极限的理论计算模型.....	郑永乾 杨有福 韩林海 (194)
超高层建筑巨型框架结构简化分析的再研究.....	周 坚 陈 峥 (198)
钢筋混凝土梁的受力全过程分析及多线程对比仿真.....	朱梁洪 刘文锋 (202)
新《混凝土结构设计规范》在正截面弯曲承载力计算中受拉钢筋用量的变化.....	邹雪芹 闻海英 (209)

四、岩土、地基基础与地下工程

论粤东地区地质构造特性及软土地基处理方法.....	蔡 晶 张季超 许 勇 (214)
石灰改良膨胀土特性试验分析.....	段萌笋 郑春元 郁时炼 (219)
某小区软土地基处理方法.....	甘耀华 张季超 许 勇 (223)
深基坑支护桩的计算与设计.....	郭诗崇 (226)
坑道式飞机隐蔽库的防潮与除湿研究.....	何大贵 陈家强 庄惠平 杨 华 (229)
软岩隧道聚丙烯纤维砼锚喷支护结构的安全度.....	华 渊 周太全 连俊英 (232)
分层土中单桩水平动力阻抗的统计特性.....	黄 斌 高洪波 (236)
地基—非线性空间结构动力相互作用研究.....	姜忻良 郑希明 (240)

粉土粉砂中两层地下室深基坑支护工程设计与施工技术.....	李欢秋 庞伟宾 胡时胜 (245)
人工挖孔桩与拱墙联合支护的应用.....	李雪飞 张煜 郁雯 (250)
地下室防水工程质量控制的探讨.....	李约汉 付红 滕桃居 蒋美其 (254)
预应力管桩静压和锤击法施工在某工程中的应用分析.....	梁德聪 张季超 王遇国 (258)
强夯地基单击夯击能的数值研究.....	梁济丰 吴磊 祝真强 胡功笠 (261)
东方金融大厦基坑支护结构的设计与施工.....	梁亦坤 张季超 王遇国 (266)
滑坡预报的灰色模型及其应用.....	林跃忠 王铁成 王来 (270)
全夯式扩底灌注桩在高层建筑基础中的应用.....	刘献江 吴敏捷 (274)
桩基低应变动力检测判读失误分析.....	卢海林 马驰 姚专 晏绍新 (279)
夯后土体动应力和位移特性数值分析.....	牛志荣 杨桂通 (283)
双参数地基环扇形板的 Fourier-Bessel 级数解.....	钱民刚 (289)
山区高等级公路高边坡的稳定性分析及边坡加固措施.....	任志华 周亦唐 费维水 陈华 (294)
干旱区土壤抗风蚀能力的特征初步研究.....	申向东 王晓飞 姬宝霖 王丽萍 (299)
浅析地下工程围岩稳定的耗散结构理论.....	林茂 胡功笠 温志鹏 卢玉松 (303)
片筏基础沉降实用计算方法.....	施养杭 庄金宏 (307)
影响土坡稳定性模糊破坏概率的若干因素.....	孙宇坤 蒋菡 吴为义 (311)
强夯法在机场停机坪地基处理中的应用.....	滕桃居 汪文良 丁菊芬 李约汉 刘道永 (315)
打入桩的桩端超孔隙水压力引起的沉降.....	王怀忠 (319)
机场地基的强夯加固理论及应用研究.....	王克信 郁时炼 (323)
大直径桩竖向荷载渐近破坏极限荷载判定法.....	王明恕 梁力 董天文 王凤池 (326)
地下工程锚喷支护的设计施工要点.....	魏入廷 杨华 陈太林 (330)
用粒状体力学方法研究沙的理论负功区.....	武建勋 高尔新 张海涛 琚素芳 黄建鸿 (333)
液压挤扩支盘桩水平承载性能研究.....	张延庆 孙雅欣 (337)
基坑支护桩配筋计算探讨.....	郑金伙 (341)
在上海地区用压密注浆方法处理浅层地基土承载力不足的可行性探讨.....	肖鸿斌 林宗庆 (345)
利用旋喷桩加固浅基桥墩.....	薛莘 孙国钧 (349)
浅谈地下工程渗漏水原因及处理方法.....	温志鹏 胡功笠 林茂 (353)
沉管夯扩灌注桩的施工质量控制及检测.....	李约汉 王亚军 刘道永 付红 (356)
洞库的潮湿问题及其处理方法.....	王克信 郁时炼 孙博 (360)
非均布荷载作用下各向异性地基最终沉降量的分析.....	袁满 李雷鸣 丁继辉 (363)
神经网络在围岩稳定分析中的应用与研究.....	张仲林 许金余 朱笃美 赵靖 范建设 (367)
基坑工程发展现状及存在的问题.....	赵杰 邵龙潭 李淑英 (371)
软土地基上桩基承载力的数值模拟.....	赵钦 简政 李毅 侯艳君 (377)
土钉墙内部稳定性的简化分析.....	赵抚民 桂国庆 杨小伟 周庆荣 (381)
黄土地区公路边坡滑坡原因分析及防治.....	郑春元 郁时炼 段萌笋 (385)
基于流鼓破坏模式的软土土钉支护的位移控制.....	郑金伙 (389)
黄土边坡框架预应力锚杆支挡结构的设计计算.....	朱彦鹏 周勇 (393)

五、特种结构、车辆、飞行器与船舶结构

韩国 2002 世界杯体育场挑蓬屋盖结构.....	刘锡良 周颖 梁子彪 (399)
新型钢-混凝土组合壳结构性能研究.....	王增春 董石麟 滕锦光 王汉廷 (404)

轻质复合材料制作的桥脚舟的静力分析.....	韦忠瑄 沈 庆 李 跃 陈徐均 孙 鹰 (408)
温度对岩石损伤和变形破坏的影响.....	谢卫红 李顺才 肖永红 (412)
张拉膜结构荷载分析过程的若干问题探讨.....	徐其功 苏建华 韩大建 宋雄彬 (418)
内衬钢板—混凝土复合防护结构的试验与数值模拟研究.....	颜治国 刘殿书 (425)
网壳结构抗震性能的理论研究.....	杨 忠 李丽娟 刘 锋 (429)
面向对象的船舶板架稳定性分析程序.....	俞铭华 陈惠芬 (434)
静力压桩沉桩阻力的计算模拟.....	周益众 张明义 (438)
钢-混凝土组合拱承载性能试验研究.....	王增春 滕锦光 董石麟 何艳丽 (442)
嘉兴发电厂二期取水构筑物工程.....	祝建伟 (446)

六、路桥、水工、港工

初始缺损对梁动力特性影响的研究.....	曹吉星 陈 虬 (450)
苏通大桥连续刚构抗风试验.....	陈艾荣 许福友 周志勇 (453)
鄂黄长江大桥斜拉索风振的分析以及控制.....	程向阳 李洪乾 顾金钧 (458)
国外道桥路面快速抢修技术研究述评(一).....	崔玉红 周世才 严宗达 (464)
国外道桥路面快速抢修技术研究述评(二).....	崔玉红 王 娟 严宗达 (471)
黄土路基病害的防治技术研究.....	邓洪亮 谢向文 郭玉松 高文学 (479)
窄轨运输铁路道岔结构设计.....	谷国宏 (484)
基于柔度阵的简支梁桥损伤识别方法.....	关文阁 林 皋 魏翠玲 (487)
高等级公路沥青路面施工质量控制.....	庞 彬 薛冰基 王全梅 (494)
高路堤加筋土挡土墙设计.....	姜 斌 (500)
基于功能的海洋平台抗冰动力优化设计.....	李 刚 刘 翔 岳前进 于学兵 (503)
基于网络的土木工程 CAD/CAE 集成系统.....	李海江 (508)
超静定曲线梁的横向位移解析解.....	李晓飞 赵颖华 (513)
水泥混凝土面层受连续冲击荷载的响应.....	梁成立 吴春红 谢卫红 王 浩 (518)
引道板对无伸缩缝桥梁受力性能的影响研究.....	林志平 彭大文 (522)
二灰碎石基层施工技术研讨.....	薛冰基 王全梅 于 涛 (527)
高填粉煤灰在公路软土地基中的应用.....	徐 杨 (533)
湖北省浠水县通乡公路线形设计中超高的设计.....	王 辉 (537)
大跨度 PC 梁桥施工控制过程中的参数估计与修正.....	王根会 魏胜勇 (541)
机场道面不均匀冻胀分析和防治对策.....	魏入廷 杨 华 陈太林 (546)
薄层单元求解带初间隙摩擦接触问题.....	姚纬明 张春华 李同春 (550)
海洋平台的冰振疲劳与动冰力研究.....	岳前进 姚 健 毕祥军 屈 衍 (556)
板底灌浆法补强脱水水泥混凝土路面.....	张 超 祝真强 吴 磊 罗昭俊 (562)
振动碾压混凝土的施工方法在刚柔结合公路路面上的应用.....	徐 杨 (566)
桥面补强和贴钢法在桥梁加固中的联合应用.....	张 宏 邵永军 (571)
山区公路构造物敷设.....	庞 彬 于 涛 邵海健 (575)
悬索桥空缆吊点坐标的计算.....	张庆芳 张志国 (581)

T形柱-梁结点受力性能研究

崔清洋¹, 胡必武²

(1. 盐城工学院建工系, 江苏盐城, 224003; 2. 宁夏大学土木工程系, 银川, 750021)

摘要 研究钢筋混凝土框架顶层 T 形柱梁边结点在单调荷载作用下的受力性能, 分析框架梁纵筋在结点处的锚固构造及结点的破坏机理和破坏方式, 根据试验结果提出结点抗剪承载力公式。

关键词: T 形柱; 结点; 承载力; 锚固;

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON BEHAVIOR OF EXTERIOR BEAM-T COLUMN JOINTS

CUI QINGYANG¹, HU BIWU²

(1. Dept. of Architecture and Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, 224003, China

2. Dept. of Civil Engineering, Ningxia University, Yinchuan, 750021, China)

Abstract: The test results of ten exterior beams-T column joints on the top floor under monotonous loading are reported. The anchorage of beam and the failure mechanics of the joints are also discussed. Based on the experimental results, a formula to calculate the shear capacity of the joints is put forward.

Key words: T-column; joints; capacity/joint; anchorage.

1 前言

在住宅结构设计中, T 形和 L 形截面柱得到了广泛的应用, 但对异形柱的结构设计, 目前国家设计规范还没有明确的条文指导。本文对框架 T 形截面柱-梁结点在试验的基础上, 做了力学性能分析研究, 根据破坏形式, 探究破坏机理, 提出了相应的设计公式和构造措施。

2 试件和试验装置

10 个试件(编号为 EJ1—EJ10)的尺寸及配筋见图 1 和表 1, 钢筋的规格、力学性能见表 2。试验的加载装置如图 2 所示。在试验中将试件倒立放置, 使梁、柱两试件分别与地面成 45 度夹角, 结点在上方, 将试件的柱端固定, 用油压千斤顶在梁端施加单调荷载。试验中对梁纵筋和结点水平箍筋的应变及梁端的相对水平位移等进行了量测

作者简介: 崔清洋 (1944. 12), 男 (汉族), 山西长治人, 教授, 从事结构力学、结构设计研究。

胡必武 (1963. 7), 男 (汉族), 宁夏隆德人, 副教授, 从事结构力学、水工设计研究。

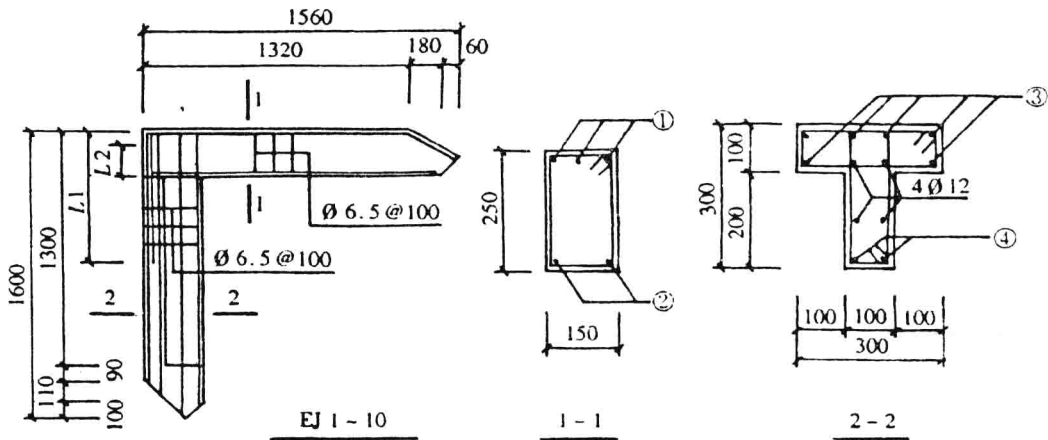


图 1 试件大样

表 1 试件的主要特征

试件	梁 筋				柱 筋		f_{cu} (MPa)
	①	②	L1	L2	③	④	
EJ1	3 $\phi 16$	2 $\phi 14$	890	260	6 $\phi 16$	2 $\phi 16$	16.5
EJ2	3 $\phi 14$	2 $\phi 12$	810	180	6 $\phi 14$	2 $\phi 16$	20.0
EJ3	3 $\phi 16$	2 $\phi 12$	890	180	6 $\phi 14$	2 $\phi 16$	16.5
EJ4	3 $\phi 14$	2 $\phi 12$	810	180	6 $\phi 12$	2 $\phi 16$	18.7
EJ5	4 $\phi 12$	2 $\phi 12$	730	180	6 $\phi 12$	2 $\phi 14$	18.2
EJ6	3 $\phi 16$	2 $\phi 14$	890	260	6 $\phi 14$	2 $\phi 16$	17.6
EJ7	3 $\phi 14$	2 $\phi 14$	810	260	6 $\phi 12$	2 $\phi 14$	18.0
EJ8	3 $\phi 16$	2 $\phi 16$	890	340	6 $\phi 16$	2 $\phi 16$	14.0
EJ9	3 $\phi 14$	2 $\phi 12$	810	180	3 $\phi 14$	2 $\phi 14$	17.6
EJ10	3 $\phi 12$	2 $\phi 12$	730	180	6 $\phi 14$	2 $\phi 14$	22.0

表 2 钢筋的力学性能

规格	弹性模量 N/mm^2	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa
$\phi 6.5$	2.12×10^5	345.8	440.4
$\phi 12$	2.07×10^5	432.9	634.7
$\phi 14$	2.10×10^5	401.5	593.5
$\phi 16$	2.06×10^5	383.8	618.1

3 结果与分析

3.1 破坏特点

结点破坏经历了初裂、屈服、极限、下降4个阶段，出现了梁端弯曲破坏和核心区剪压破坏两种破坏形态，如图3所示。试验结果见表3。可以看出，T形柱顶层边结点的承载力一般较低，梁一旦屈服，结点便马上进入极限阶段，且随即破坏，这主要是因为结点截面上的受剪面积较小，使混凝土斜压杆抗剪能力受到限制的缘故。

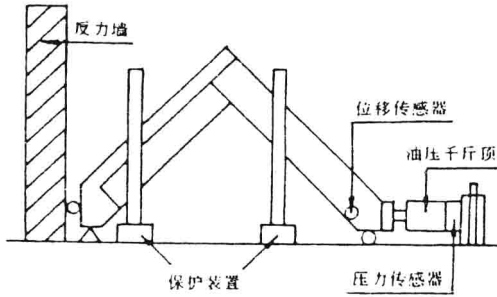


图2 加载装置

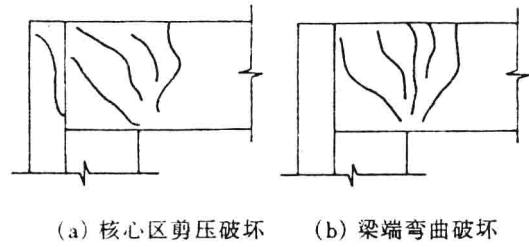


图3 破坏形式

表3 试验的主要结果

试件编号	EJ1	EJ2	EJ3	EJ4	EJ5	EJ6	EJ7	EJ8	EJ9	EJ10
初裂荷载	10.0	16.7	12.5	13.0	13.3	15.3	10.0	12.8	15.0	13.3
屈服荷载	42.5	55.0	47.5	42.0	44.0	45.0	47.5	45.0	40.0	40.0
最大荷载	47.0	60.0	54.0	45.0	52.0	47.0	52.5	47.5	45.0	50.0
极限荷载	39.0	56.3	50.0	43.8	48.4	37.6	45.0	45.3	43.8	46.8
$V_j = A_{sb} f_{vb}$	231.4	185.5	231.4	185.5	197.5	231.4	185.5	231.4	185.5	148.1
$V_j / f_c b_j h_j$	0.334	0.150	0.340	0.240	0.307	0.324	0.282	0.457	0.259	0.080

3.2 结点水平箍筋应力

发生结点破坏的试件，箍筋应力随着荷载的增加而增加，最终有一个箍筋屈服，但该箍筋的位置是随机的，如图4所示。

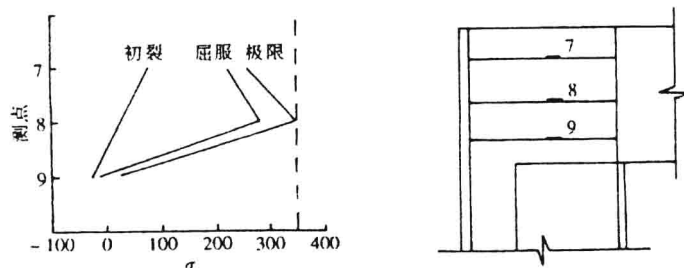


图4 箍筋应力 (N/mm²)

3.3 荷载P-位移△曲线

以EJ5试件为例，结点的P-△曲线大致可分为4个阶段：初裂段AB、屈服段BC、极限段CD、下降段DE，如图5所示。初裂段是弹性工作阶段，在屈服段P-△曲线的斜率逐渐下降，屈服后荷载仍有一定的增长，下降段的曲线比较平缓，所以，尽管结点破坏，试件仍有一定的延性。

3.4 梁纵筋的锚固

梁纵筋在顶层边结点的锚固长度包括水平段和弯折的垂直段。为了考察梁的边角部位处纵筋在结点内的锚固作用，在水平段设置了 3 个电阻应变片，在垂直段设置了 2 个，如图 6 所示。分析试验结果可得出以下结论：

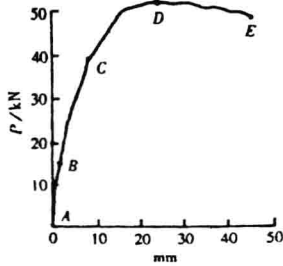


图 5 P-Δ 曲线

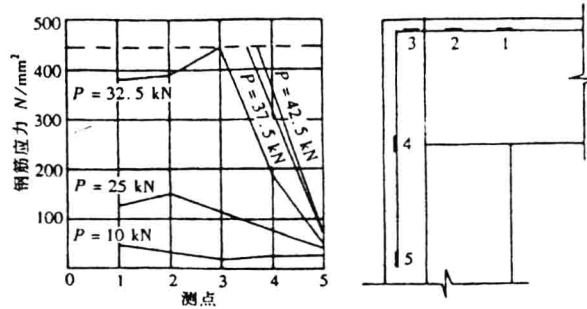


图 6 梁纵筋应力

- 1) 加载初期，水平段的钢筋起主要持力作用，在加载后期，水平段的作用逐渐减弱，弯折段逐渐起主要锚固作用，但此时滑移量已经很大，超出正常使用范围。
- 2) 水平段越长，其锚固力占总锚固力的比例越大，发挥的锚固作用就越持久，只要水平段钢筋有足够的 $0.45L_a$ 的长度，并符合规范要求，就能传递大部分粘结力，发挥主要锚固作用。
- 3) 为了探讨梁宽大于腹板时钢筋的锚固情况，本试验所有试件梁的四角纵筋均未经过柱腹板直接进入柱翼缘，从试验结果看，中间和两侧的钢筋的锚固条件并没有很大的区别，并未象中间层边结点那样出现梁纵筋的滑移现象

4 抗剪承载力公式

4.1 顶层边结点的受力机理

基于试验结果，可以认为顶层边结点在单调荷载作用下，按斜压杆模型来传递荷载。

- 1) 从结点裂缝发展情况来看，出现了多条大致平行于对角线方向的斜裂缝，结点核心区混凝土只能传递压力，形成混凝土斜压杆，结点最后的破坏形式是沿对角线方向斜压杆混凝土被压碎。
- 2) 从箍筋应力发展来看，箍筋屈服比较晚，而且只有个别的箍筋达到屈服强度，结点在闭合弯矩作用梁柱的负筋作为拉杆，拉力通过拉杆传到结点外凸角，再经斜压杆传到内折角后由梁柱受压区平衡，如图 7 所示。

4.2 抗剪承载力公式

按照斜压杆机理，节点核心区的抗剪承载力可取混凝土斜压杆极限抗压承载力的水平分量，即

$$V_j = \xi f_c ab \cos \theta \quad (1)$$

其中： f_c --- 混凝土轴心抗压强度

θ --- 斜压杆轴线与梁纵筋的夹角

b --- 斜压杆的厚度，当柱腹板宽与梁宽不同时，可取两者的平均值

a --- 斜压杆宽度， $a = k \sqrt{a_c^2 + a_b^2}$

a_b 、 a_c --- 梁、柱截面受压区高度

k 和混凝土强度有关，根据试验数据，回归出如下关系

$$k = 2.504 - 0.008 f_c \quad (2)$$

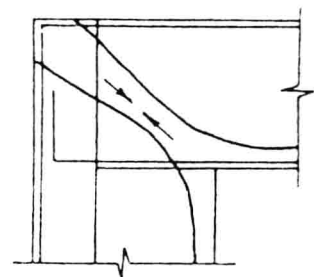


图 7 斜压杆传力原理

ξ ---箍筋对节点约束作用影响系数, 根据文献^[2]

$$\xi = 0.95 + 4.5 \mu_{sv} \quad (3)$$

μ_{sv} ---横向钢筋体积百分比

$$\mu_{sv} = (nh^* + mb^*) A_t / b^* h^* s_c$$

A_t --- 一根箍筋的横截面积

s_c ---横向钢筋间距, b^* 、 h^* 的含义见图 8。

$m(n)$ ---Y-Y(X-X)方向箍筋的肢数。最后, 得到顶层边节点的抗剪承载力公式

$$V_j \leq \xi f_c [(2.504 - 0.008 f_c) \sqrt{a_c^2 + a_b^2}] b \cos \theta \quad (4)$$

表 4 节点抗剪承载力计算值 V_j^c 与试验值的比较 V_j^o 的比较, 其符合程度较好。

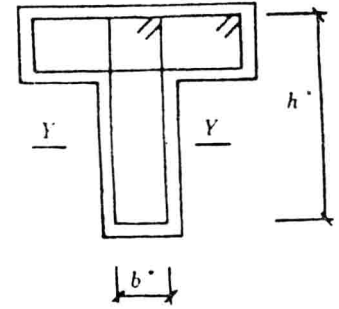


图 8 节点核心区尺寸

表 4 节点抗剪承载力计算值 V_j^c 与试验值 V_j^o 的比较 kN

试件编号	EJ1	EJ2	EJ3	EJ4	EJ5	EJ6	EJ7	EJ8	EJ9	EJ10
V_j^o	231.4	185.5	231.4	185.5	197.5	231.4	185.5	242.1	185.5	195.5
V_j^c	218.2	216.0	248.8	175.3	191.1	210.0	216.8	285.4	181.9	210.5
V_j^c / V_j^o	0.942	1.162	1.075	0.975	0.968	0.908	1.168	1.178	0.981	1.076

5 结论

- 1) 顶层边节点的受力机理可用斜压杆模型解释, 当梁的受拉钢筋配筋率小于界限配筋率时, 可保证梁端弯曲破坏先于节点破坏。
- 2) 梁的四角钢筋的锚固不经过翼缘是可行的, 但要保证水平段的长度, 宜用直径较小的钢筋。
- 3) 为了约束节点核心区的混凝土, 应在节点加密箍筋

参考文献

- [1] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 东南大学出版社. 1989.
- [2] 张连德. 钢筋混凝土平面框架节点抗剪强度的研究[J]. 工业建筑. 1983.
- [3] 吴修文. 低周反复荷载下 T 形柱框架边节点的试验研究[J]. 华南理工大学. 1994.
- [4] 郭 棣. 钢筋混凝土 T 形截面柱性能分析[C]. ((工程力学)) 增刊. 2003. 10

硅泡沫材料单向压缩试验曲线拟合及其应用

范志庚 尹益辉 史平安 郝志明 徐兵

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川绵阳, 621900)

摘要: 分别基于多项式拟合、橡胶材料的 Mooney—Rivlin 三阶变形形式的应变能函数以及广义的可压缩 Ogden 应变能函数, 对硅泡沫材料的单向压缩试验曲线进行了拟合, 得到了单向压缩状态下硅泡沫材料应力函数的三种表达式。然后以多项式拟合函数为例, 通过硅泡沫垫层的形变分析得到以多项式形式描述的硅泡沫垫层接触表面的压应力分布, 再将压应力分布作为函数载荷施加到结构的其它组件上, 进行了一种典型的含硅泡沫材料层合结构的强度分析。有限元结果表明, 采用该方法很大程度地简化了计算过程, 提高了计算效率, 具有实际的工程意义。

关键词: 硅泡沫 橡胶 应变能函数 单向压缩 层合结构

1 引言

硅泡沫材料与橡胶材料具有相类似的力学特征: 在较小的应力作用下有高度变形; 在较短的时间内且温度变化不大时, 可认为是完全弹性的等等。两者的主要区别在于硅泡沫材料具有可压缩性, 在较小的应力作用下可以产生相当大的体积变化, 而橡胶材料一般是不可压的。模拟这种硅泡沫材料的本构模型比较少, 而广义的可压缩 Ogden 应变能函数就是其中的一种。与之相比, 处理不可压橡胶材料的模型就很多, 鉴于硅泡沫材料与橡胶材料具有相类似的力学特征, 文中借用了描述橡胶材料的 Mooney—Rivlin 三阶变形形式的应变能函数, 给出了单向压缩状态下硅泡沫材料应力函数的一种表达式。

硅泡沫材料具有良好的弹性且容易变形, 被广泛地用作各种工程结构的垫层等等, 且在很多工程结构中硅泡沫材料主要产生压缩变形。对于含硅泡沫材料层合结构, 由于各层之间的接触关系(尤其软、硬材料之间的接触)以及硅泡沫垫层的材料非线性特征等等, 直接进行该种结构的强度分析, 需要相当长的计算周期。而如果通过硅泡沫垫层压应力函数的拟合, 由垫层的压缩量得到垫层材料表面的压应力分布, 再将垫层材料表面的压应力分布作为函数载荷施加到层合结构其它组件上, 则避免了因软、硬材料之间的接触以及硅泡沫垫层的材料非线性带来的计算周期长的问题, 可以大大提高计算效率。

2 单向压缩状态下硅泡沫材料应力函数描述

2.1 基于 Ogden 模型的应力分布函数描述

Ogden 是一种可描述轻微可压缩橡胶以及体积可压缩聚合泡沫的模型。

允许橡胶有轻微体积变化的 Ogden 应变能函数定义为

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} [J^{-\frac{\alpha_n}{3}} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3] + 4.5K(J^{\frac{1}{3}} - 1)^2 \quad (1)$$

其中 μ_n 和 α_n 为材料常数, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为沿各边的伸长率, K 为初始体积模量, J 为体积率, λ_i 和 J 分别定义为

$$\lambda_i = \frac{L_i + \Delta L_i}{L_i} = 1 + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (3)$$

式(2)中 ε_i 为工程应变。(1)式中最后一项控制可压缩性。对于不可压缩材料, $J=1$ 且最后一项消失。允许体积可压缩的广义 Ogden 模型可描述为

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\beta_n} (1 - J^{\beta_n}) \quad (4)$$

其中 μ_n 、 α_n 和 β_n 为材料常数。通常 Ogden 模型中考虑的项的数目为 $N=2$ 或 $N=3$ 。

硅泡沫材料是一种高度可压缩的超弹材料, 在单向压缩状态下, 与沿厚度方向的变形相比, 其它两个方向(长度和宽度方向)的变形很小, 在实际计算过程中可不予考虑, 即 $\lambda_1 = \lambda$ 、 $\lambda_2 = \lambda_3 = 1$ 。从而有

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda^{\alpha_n} - 1) + \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\beta_n} (1 - \lambda^{\beta_n}) \quad (5)$$

单向压缩状态下硅泡沫材料的工程应力为

$$\sigma = dW / d\lambda = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda^{\alpha_n - 1} - \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda^{\beta_n - 1} \quad (6)$$

单向压缩状态下硅泡沫材料的真应力为

$$t = \sigma = dW / d\lambda = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda^{\alpha_n - 1} - \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda^{\beta_n - 1} \quad (7)$$

由沿各边的伸长率与工程应变的关系式 $\lambda_i = 1 + \varepsilon_i$ ($i=1, 2, 3$) 可得, 单向压缩状态下

$$t = \sum_{n=1}^N \mu_n (1 + \varepsilon)^{\alpha_n - 1} - \sum_{n=1}^N \mu_n (1 + \varepsilon)^{\beta_n - 1} \quad (8)$$

2.2 基于 Mooney—Rivlin 三阶不变量形式的应力分布函数描述

Mooney 理论基于下列假设:(1)橡胶是不可压缩的, 而且在变形前是各向同性的;(2)简单剪切包括先受简单拉伸再在平面截面上叠加简单剪切服从虎克定律。

Rivlin 采用材料不可压缩及无变形状态是各向同性的假设。各向同性条件函数 W 对三个主伸长率 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 应为对称。进一步, Rivlin 认为应变能函数必须与 λ_i 的偶数幂相关。

满足 Mooney—Rivlin 假设的三阶变形形式为

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (9)$$

其中, I_1 、 I_2 分别为第一和第二应变不变量, 定义为

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (10)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (11)$$

在单向压缩状态下, $\lambda_1 = \lambda$ 、 $\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda}$ 。从而有

$$I_1 = \lambda^2 + 2/\lambda \quad (12)$$

$$I_2 = 2\lambda + 1/\lambda^2 \quad (13)$$

$$W = c_{10}(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3) + c_{01}(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3) + c_{11}(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3)(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3) + c_{20}(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3)^2 + c_{30}(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3)^3 \quad (14)$$

单向压缩状态下硅泡沫材料的工程应力为

$$\sigma = dW / d\lambda = 2(1 - \frac{1}{\lambda^3})[c_{01} + c_{11}(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3)] + 2(\lambda - \frac{1}{\lambda^2})[c_{10} + c_{11}(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3) + 2c_{20}(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3) + 3c_{30}(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3)^2] \quad (15)$$

将沿各边的伸长率与工程应变的关系式 $\lambda_i = 1 + \varepsilon_i$ (i=1, 2, 3) 代入上式, 有

$$\sigma = 2\{(1 + \varepsilon) - \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2}\}[c_{10} + c_{11}[2(1 + \varepsilon) + \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2} - 3] + 2c_{20}[(1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3] + 3c_{30}[(1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3]^2\} + 2(1 - \frac{1}{(1 + \varepsilon)^3})[c_{01} + c_{11}((1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3)] \quad (16)$$

单向压缩状态下硅泡沫材料的真应力为

$$t = \sigma = 2\{(1 + \varepsilon) - \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2}\}[c_{10} + c_{11}[2(1 + \varepsilon) + \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2} - 3] + 2c_{20}[(1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3] + 3c_{30}[(1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3]^2\} + 2(1 - \frac{1}{(1 + \varepsilon)^3})[c_{01} + c_{11}((1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3)] \quad (17)$$

3 单向压缩状态下硅泡沫材料应力函数拟合

表 1 为硅泡沫材料的一组压缩性能实验数据。

表 1 硅泡沫材料压缩性能实验数据

应力 Mpa	0	0.256	0.512	0.768	1.024	1.284	1.540	1.796	2.052	2.564
应变	0	0.141	0.199	0.245	0.286	0.324	0.356	0.382	0.403	0.436
应力 Mpa	3.076	3.588	4.104	4.616	5.128	5.640	6.152	6.668	7.036	7.692
应变	0.462	0.483	0.499	0.513	0.526	0.537	0.546	0.553	0.562	0.567

基于广义的 Ogden 应变能函数进行拟合, 取 $N=2$, 可以得到 $\mu_1 = 0.136$ 、 $\mu_2 = 1.063 \times 10^{-7}$ 、 $\alpha_1 = 9.178$ 、 $\alpha_2 = 38.653$ 、 $\beta_1 = \beta_2 = 0$, 代入 (6) 式可得

$$\sigma = 0.136 \times ((1 + \varepsilon)^{8.178} - \frac{1}{1 + \varepsilon}) + 1.063 \times 10^{-7} \times ((1 + \varepsilon)^{37.653} - \frac{1}{1 + \varepsilon}) \quad (18)$$

拟合得到的应力—应变曲线及试验曲线如图 1 所示。

基于 Mooney—Rivlin 三阶不变量形式的应变能函数进行拟合, 可以得到 $c_{10} = -17.2698$ 、 $c_{01} = 18.3051$ 、 $c_{11} = 90.2756$ 、 $c_{20} = -67.3858$ 、 $c_{30} = 10.2104$, 代入 (16) 式可得

$$\sigma = 2\{(1 + \varepsilon) - \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2}\}[-17.2698 + 90.2756[2(1 + \varepsilon) + \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2} - 3] - 134.7716[(1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3] + 30.6312[(1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3]^2\} + 2(1 - \frac{1}{(1 + \varepsilon)^3})[18.3051 + 90.2756((1 + \varepsilon)^2 + \frac{2}{1 + \varepsilon} - 3)] \quad (19)$$

拟合得到的应力—应变曲线及试验曲线如图 2 所示。

利用 MATLAB 的多项式拟合功能对硅泡沫垫层压缩性能试验数据进行拟合, 得到

$$\sigma = 954.5\varepsilon^5 - 1044.4\varepsilon^4 + 419.9\varepsilon^3 - 61.3\varepsilon^2 + 4.8\varepsilon \quad (20)$$

拟合的工程应变—工程应力曲线以及单向压缩试验数据点如图 3 所示。

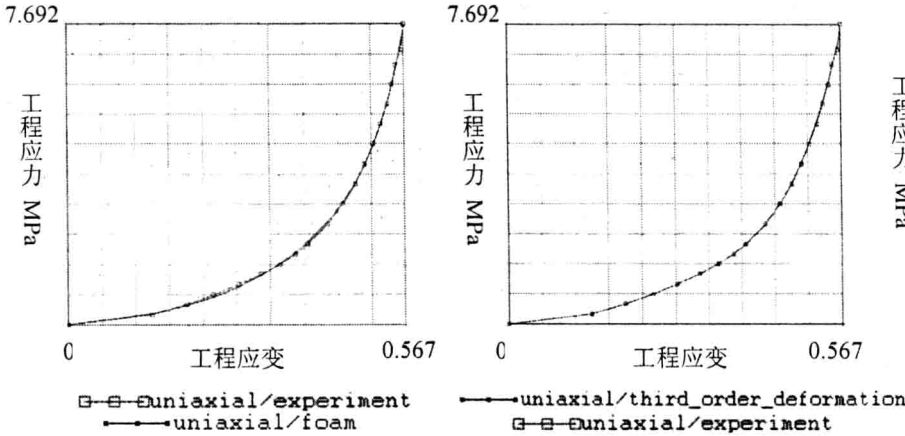


图 1 基于广义 Ogden 模式的拟合曲线与试验曲线比较

图 2 基于 Mooney—Rivlin 三阶变形形式的拟合曲线与试验曲线比较

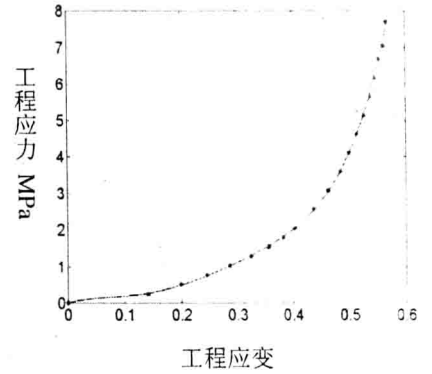


图 3 多项式拟合曲线与试验数据点比较

由图 1~图 3 可以看出基于广义 Ogden 模式、Mooney—Rivlin 三阶变形形式及多项式拟合得到的拟合曲线均能很好地描述硅泡沫垫层地压缩性能。

4 有限元算例

以图 4 所示层合结构为例, 分别采用压应力函数加载和整体模拟的方法进行计算。在整体计算过程中考虑了硅泡沫材料与其它各层的接触关系, 其单向压缩性能数据如表 2 所示。

对于图 4 所示层合结构, 里层钢底部垂直方向自由度约束, 外层钢上表面施加面压力使产生大小为 l 的偏移。设硅泡沫层的内形面半径为 r 、外形面半径为 R , 厚度为 $R-r$, 硅泡沫内形面顶部相对于里层钢底部的变形量为 l_1 、硅泡沫外形面顶部相对于外层钢顶部的变形量为 l_2 , 则

$$l_1 + l_2 = l \quad (21)$$

由于与内、外钢层相比, 硅泡沫层的刚度要小的多, 内、外钢层的变形与硅泡沫层的变形相比可以忽略, 可以近似认为硅泡沫层的内、外形面的形变符合正弦分布。假设硅泡沫层的中形面在压缩过程中形状不变, 从而硅泡沫层内、外形面的变形分别为

$$\delta_1 = l_1 \sin \theta \quad (22)$$

$$\delta_2 = l_2 \sin \theta \quad (23)$$

其中 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 。硅泡沫层内、外形面的应变分别为

$$\varepsilon_1 = \frac{2\delta_1}{R-r} = \frac{2l_1 \sin \theta}{R-r} \quad (24)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{2\delta_2}{R-r} = \frac{2l_2 \sin \theta}{R-r} \quad (25)$$

对于平面应变问题, 平衡方程为

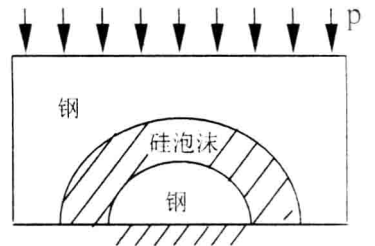


图 4 层合结构

$$\int \sigma_1 dx = \int \sigma_2 dx \quad (26)$$

由多项式拟合可以得到

$$\sigma = f(\varepsilon) = a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 + \dots + a_n \varepsilon^n \quad (27)$$

将(22)、(23)和(25)式代入(24)式可以得到

$$\frac{\frac{2l_1}{R-r} + \left(\frac{2l_1}{R-r}\right)^2 + \dots + \left(\frac{2l_1}{R-r}\right)^n}{\frac{2l_2}{R-r} + \left(\frac{2l_2}{R-r}\right)^2 + \dots + \left(\frac{2l_2}{R-r}\right)^n} = \frac{r_2}{r_1} \quad (28)$$

联合(21)式和(26)式可以计算得到硅泡沫层内、外形面的变形 l_1 和 l_2 ，从而可以得到硅泡沫层内、外形面应力分布为

$$\sigma_1 = f(\varepsilon_1) = f\left(\frac{2l_1 \sin \theta}{R-r}\right) \quad (29)$$

$$\sigma_2 = f(\varepsilon_2) = f\left(\frac{2l_2 \sin \theta}{R-r}\right) \quad (30)$$

图6、图7分别为结构采用整体建模方法以及基于多项式拟合得到的应力云图。

由上面的应力云图可以看出，施加压应力分布函数的办法与整体建模得到的计算结果，在量值以及分布规律上基本一致，基于多项式拟合得到的计算结果基本上反应了结构真实的应力状态。

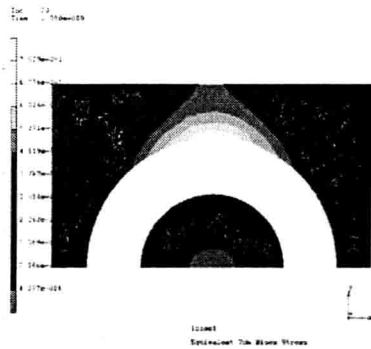


图6 结构采用整体建模方法得到的应力云图

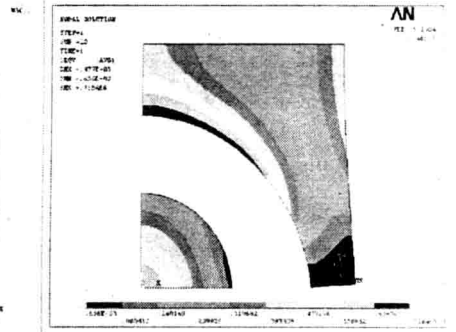


图7 结构基于多项式拟合得到的应力云图

5 结论

对于一些含硅泡沫材料的层合结构，采用基于该种超弹材料压应力函数拟合的方法进行此类结构的强度分析，可以大大提高计算效率，计算结果真实可靠。

参考文献：

- [1] 陈火红. MSC/Marc 材料非线性分析培训教程, 2001
- [2] 危银涛等. 橡胶类材料大变形本构关系及其有限元方法. 固体力学学报, 1999,20(4):281—289.
- [3] 薛定宇. 科学运算语言 MATLAB5.3 程序设计与应用. 清华大学出版社, 2000.
- [4] ANSYS/APDL 使用指南, 2000