

京内资准字2005—Ly0053号

第14届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅱ册

PROCEEDINGS OF THE FOURTEENTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. II

主编：崔京浩

《工程力学》杂志社

第 14 届全国结构工程学术会议论文集目录

本次会议论文集收录论文 338 篇，共计 1698 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 95 篇 (共 570 页), 包括: 特邀报告; 1. 力学分析与计算;

第II册论文117篇(共548页),包括: 2. 钢与钢筋混凝土、材料、构件与结构; 3. 岩土、地基基础与地下工程; 4. 设计、施工、优化与可靠度;

第Ⅲ册论文 126 篇（共 580 页），包括：5. 特种结构、车辆、飞行器与船舶结构；6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；7. 路桥、水工、港工；8. 试验、监控、鉴定、事故分析与加固；9. 交叉学科与其他研究成果。

第II册目录

2. 钢与钢筋混凝土、材料、构件与结构

多层砖混住宅沉降及外墙应力分析	艾 军 刘秋萍 张大煦 刘兴业	(001)
空间预应力钢桁架整体可靠性分析	陈慧明 王新堂	(006)
以圆钢管为钢骨的劲性高强混凝土柱的弯矩曲率关系的数值分析	陈周熠 易伟建 林立岩 沙镇平	(010)
外包钢-混凝土组合梁正截面抗弯承载力计算	杜德润 李爱群 石启印 陈丽华 娄 宇 李培彬	(016)
加载模式对无粘结预应力筋极限应力的影响	方德平 王全凤	(022)
钢筋混凝土柱的抗剪承载力计算	王克海 叶英华 李 茜	(026)
欧洲混凝土结构耐久性监测系统的研究与应用	王克海 叶英华 李 茜	(032)
现浇钢筋混凝土叠合箱网梁格构式组合楼盖试验研究	高 娟 李克翔 张锡增 胡 伟	(036)
钢框架非对称异型柱结构研究	高树栋 陈 辉 许 茜 武建勋	(040)
现代预应力混凝土分析方法及其工程应用	郭自兴 焦利军 马健生 魏秋菊	(044)
预应力钢筋混凝土管桩在喀斯特地貌中的适用性	侯太平 陈 敏	(051)
承重型预应力钢梁非线性有限元分析与研究	侯晓武 孙仁范 李黎明 牟在根	(055)
自控技术在预应力结构中的试验研究	李 兵 刘 弘 李 珠	(061)
装有“双功能”软钢阻尼器结构的地震反应分析	李宏男 李 钢	(065)
桩柱—盖梁结构体系开裂研究	李少波 张献民	(069)
某高层考虑地形影响的风荷载取值分析	李元齐 刘振君 夏 季	(074)
超声波在海水侵蚀混凝土强度检测中的应用研究	林跃忠 王铁成 张洪波	(078)
纤维与混凝土之间粘结剥离破坏过程分析	刘 锋 张红州 李丽娟	(082)
对钢管混凝土转换粘结应力试验的评估	刘冬元 徐敬军 庞永宏	(087)
劣化混凝土构件中钢筋界限锈蚀量的研究	吕 广 谢 楠	(091)

碳化混凝土再碱化技术机理的深入研究	屈文俊 朱 鹏 张 翔 (096)
高层建筑整体结构数值分析	任瑞瑞 简 政 杨菊生 (100)
砼耐久性研究与应用的若干关键问题	施养杭 (104)
机场道面碱骨料反应的机理及应对措施	孙 伟 胡功笠 来 源 桑宝岩 (108)
骨状杆件的轴压稳定分析	谭晋鹏 朱 子 董 聪 (112)
聚丙烯纤维粉煤灰混凝土氯离子扩散试验	王冬梅 林旭健 季 韬 许奎山 张 熠 (117)
平面桁架损伤识别的柔度差值曲率法	王建萍 杜守军 (121)
反复荷载下方钢管混凝土框架混凝土弹性模量退化的研究	王 来 尹燕霞 (125)
冻融循环后轻骨料混凝土双轴压压状态下的强度和变形性能研究	王立成 刘汉勇 (129)
基于可靠度理论的钢筋混凝土框架体系构件权重集分析	王铁成 李新华 徐明贵 (133)
钢筋混凝土高层宿舍结构经济性能比较研究	吴本华 (138)
片材加固钢筋混凝土梁界面应力的简化计算方法	吴平安 闫文斌 陶洪明 (143)
圆环法在混凝土早期开裂试验研究中的应用	吴伟明 吴胜兴 (152)
混凝土道面评价指标分析	谢永亮 侯治宁 季 凯 (157)
钢框架在钢-混凝土混合结构中的抗震作用及设计建议	阎兴华 马洪旭 张 彬 (161)
复合纤维混凝土的性能分析及其应用	杨 明 庄惠平 (165)
高层住宅建筑中的核心型钢混凝土组合结构体系	杨 勇 郭子雄 聂建国 (168)
大体积混凝土温控技术	叶 松 李彦武 龙永高 江栋材 (174)
体内外同索预应力混凝土结构承载力极限状态计算理论	袁爱民 李延和 李书祥 (178)
R.C 双弯构件斜截面承载力计算及程序设计	曾庆响 肖芝兰 (184)
巨型钢结构体系及其节点形式探讨	张季超 周 云 秦 亮 (188)
加劲箱梁的稳定性能研究分析	赵 敏 曾国华 董 聪 (192)
预应力拱板预制质量控制	赵洪先 刘 军 王鲁明 崔春之 (197)
轴向不均匀锈蚀对结构影响的研究	郑晓燕 (204)
低强度混凝土梁受力性能试验研究	郑玉庆 刘 申 (208)
后张预应力混凝土宽幅空心板梁扁锚锚固体系改进研究	周 伟 (212)
索张拉预应力刚桁架几何非线性分析	朱 嘉 王新堂 (216)
滨海地区混凝土盐冻破坏的探讨	朱晓文 吕恒林 (220)
聚丙烯纤维混凝土力学性能分析及在工程中的应用	庄惠平 杨 明 李艳丽 (225)
钢-混凝土混合结构节点抗震性能试验研究	阎兴华 张 彬 马洪旭 (228)
支座刚度对单层柱面网壳稳定性的影响分析	桂国庆 英金贵 苏光学 (233)

3. 岩土、地基基础与地下工程

拉锚式钢板桩支护结构在软土地区的应用研究	蔡北海 张季超 王 阁 (238)
冻土的粘弹塑性损伤本构理论	蔡 雪 章梓茂 (242)
桩—承台横向强迫振动分析	陈雪丹 陈 镭 薛松涛 王远功 (246)
竖直荷载下单桩的受力变形性状分析	邓安福 王闪闪 邓 璞 (250)
黄土浸水破坏机理研究	邓洪亮 谢向文 郭玉松 尹金宽 (254)
郑西客运高速铁路改良填料的试验研究	邓剑辰 赵青海 马学宁 (259)
天然地基上浅基础可靠性设计理论研究	丁继辉 李雷鸣 王 岩 (263)
打桩监控试验理论及其应用	韩 亮 (268)
房屋翻建中复杂地基综合处理技术	胡振文 刘良军 宋德安 (272)

南京某立交桥试桩研究.....	黄亚琴 龚维明 刘卫东 (276)
层状地基中桩与桩相互作用分析.....	靳元峻 张建辉 马丽红 (281)
刚性芯复合桩试验研究.....	李 正 王维玉 董伯新 (285)
强夯块石墩复合地基在机场停机坪建设中的应用.....	梁 雷 殷荣领 孙远彪 (289)
深层搅拌桩在软土地基加固处理中的应用.....	林成杉 刘国义 郑显春 (295)
反射波法在桩基完整性检测中的 BP ANN 预测.....	刘宝臣 肖明贵 王杰光 唐辉明 (299)
复合桩基工作性状的数值模拟.....	刘 洪 杨桂华 赵国景 (303)
饱和粘土中基础承载力的三维大变形分析.....	刘 君 于 龙 孔宪京 (307)
渗压固结过程中固结特性指标关系探讨.....	齐清兰 张力霆 (313)
边坡稳定的三维下限分析.....	沈珠江 王建华 杨洪杰 傅德明 (317)
黄土的弹塑性帽盖模型.....	石 坚 李 敏 贺建辉 王毅红 (323)
深厚软土地基降水预压与强夯加固试验研究.....	时 伟 刘继明 章 伟 孙 瑜 (327)
机场工程中膨胀土地基的处理.....	孙金坤 田艳凤 黄 伟 郭锦江 (331)
DX 多节挤扩灌注桩设计与工程应用.....	汪明栋 王铁成 韩克胜 袁海涛 李俊峰 魏 强 (334)
三峡库岸桥梁地基被淘蚀后的稳定性分析.....	王 成 郑 莉 原 磊 (339)
土体固结剂在防护工程中的应用研究.....	夏逸平 张 凡 李少红 (343)
侧限压缩下亚塑性模型参数敏感性研究.....	熊保林 邵龙潭 杨立祥 (347)
广州新白云国际机场停车楼冲(钻)孔灌注桩施工.....	许 志 (351)
基坑开挖降水技术.....	叶 松 龙永高 李彦武 (355)
基桩低应变动力检测的一种改进系统.....	于世海 袁小军 杨绪普 韦忠瑄 陈国良 (359)
复合土钉支护结构变形控制研究.....	张 凡 武 凯 李 涛 (364)
M 型连拱隧道的一种施工工法.....	张 倩 范海云 骆凤涛 (369)
桩与桩相互作用的非线性分析模型.....	张建辉 余晓雅 (373)
强夯法在工业厂房地基加固处理中的应用.....	张锦朋 郁 雯 贾爱景 (378)
用于铁路路基边坡防护的改良黄土砖试验研究.....	赵少强 黄志军 别大华 (382)
灰土挤密桩单桩复合地基承载特性的有限元分析.....	马学宁 梁 波 (386)
隧道盾构施工地层沉降因素分析.....	杨洪杰 傅德明 葛修润 (389)
带有桩基础的建筑物的整体平移设计.....	郑 丽 张明义 (394)
某软土基坑土钉支护险情的分析和处理.....	郑金伙 (399)
江苏省沿长江地区高速公路河塘处理施工方法浅析.....	周 伟 (402)
极限分析原理及其在土工问题中的应用.....	杨洪杰 沈珠江 马桂云 刘计山 (409)

4. 设计、施工、优化与可靠度

预应力框架节点设计探讨.....	曹 霞 金凌志 胡锦秀 (414)
多联体筒仓整体滑升施工技术.....	陈 敏 侯太平 (418)
某动平衡试验台基础设计分析.....	陈树华 齐 辉 韩玉来 王晓丹 陈力攀 (428)
抗震结构的优化设计.....	董作超 江为强 (432)
地下防护工程的变形缝防水做法.....	高志刚 许金余 (437)
应力集中及孔洞加固.....	郭天木 刘忠宏 (441)
混凝土道路作法之更新.....	何剑平 (451)
地铁冻结止水帷幕施工技术.....	金国海 牛金宝 (454)
平板网架加劲梁悬索桥的力学性能分析.....	王秀丽 李玉学 (459)

江苏徐州国际商厦工程.....	李约汉 汪文良 滕桃居 王亚军 (464)
高层建筑结构选型与布置对受力性能的影响.....	刘建文 沈蒲生 (468)
耐久性研究中的若干问题.....	刘兴远 林文修 舒 超 (474)
施工期拱坝封拱过程优化模型研究.....	彭 辉 刘德富 彭惠明 (478)
战时机场道面抢修优化分析.....	桑宝岩 米 源 胡功笠 孙 伟 (486)
单立柱海洋平台的可靠度分析.....	舒 铁 李 昕 周 晶 (490)
某超高层结构中设置加强层问题的研究.....	苏志彬 王立长 (495)
遗传算法对桁架结构的优化设计.....	孙鲁原 韩志军 饶 勇 陈昭怡 (499)
滨海地区海水环境中钢筋混凝土桥桩耐久性的数值模拟研究	田国华 吕恒林 蒋其刚 刘 伟 朱方之 (504)
洛界高速公路内埠立交桥连续箱梁外模设计.....	汪 洋 汪 洁 (510)
有粘结与无粘结预应力框架梁的比较.....	金陵志 曹 霞 田爱菊 (514)
Y形平面多层钢框架体系优化设计.....	王秀丽 师 伟 莫 庸 李晓东 陈 明 李大军 刘明路 (518)
大体积混凝土底板施工的裂缝控制.....	许 志 (522)
城市基础设施工程施工过程中关键问题的控制研究.....	杨成军 (526)
空间钢结构优化设计系统 3SOD.....	曾国华 董 聪 (531)
圆柱筒结构的强度与可靠性灵敏性分析.....	张 伟 崔维成 徐秉汉 谢 镭 (541)
无梁板结构在新加坡高层住宅中的应用及设计方法浅析.....	张振坤 黄 勇 陈恒超 (545)

多层砖混住宅沉降及外墙应力分析

艾军¹, 刘秋萍², 张大煦², 刘兴业¹

(1. 天津大学土木系, 天津 300072; 2. 天津市建筑科学研究院, 天津 300193)

摘 要: 以往的砖混结构沉降裂缝分析都局限于平面分析, 本文建立了多层砖混住宅的三维整体有限元模型。文中采用三维壳、梁单元来模拟上部结构; 采用文克尔地基模型来模拟地基土, 并通过不同刚度的弹簧单元来实现; 采用接触单元来模拟上部结构与下部地基土之间的相互作用。根据地基土不同的基床系数, 分析了五种工况, 并得出了结构沉降曲线与应力分布的结果, 描述了外墙裂缝分布情况。

关键词: 砖混结构; 基床系数; 沉降; 裂缝; 接触单元

SETTLEMENT AND STRESS ANALYSIS OF MULTI-STORY MIXED BUILDINGS

Ai Jun¹, Liu Qiuping², Zhang DaXu², Liu Xingye¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, P. R. China;

2. Tianjin Institute of Architectural Science, Tianjin, 300193, P. R. China)

Abstract: The settlement analysis of the multi-story mixed buildings was confined in two-dimension before. In this article, a three-dimension finite element model of a practical building is established. 3-D shell element is used to build the roof, floors and walls, and 3-D straight beam element is used to build the columns and beams. The Winker Soil Model is adopted to simulate the foundation by using spring element. Contact element is introduced to consider the interaction between the upper structure and foundation soil. Five cases are analyzed according to the different variation of the soil stiffness. The settlement curves and 1st principal stress curves are drawn, and the crack states of the outer walls are also described.

Keywords: three-dimension analysis, mixed structure, soil stiffness, settlement, crack

B 1. 前言

裂缝问题是砖混结构存在的一个普遍性现象^[1]。多年的观察实践表明: 砖混结构的裂缝主要是由于地基的不均匀沉降引起的。地基不均匀沉降的原因主要有: 上部荷载不均, 地基土非均质性和相邻建筑物的影响等。然而是否会引起结构物产生裂缝、产生什么样的裂缝是由地基、基础和上部结构相互影响而决定的。因此结构的裂缝分析必须同结构物沉降分析联系起来。

以往墙体的裂缝分析限于对单片墙体的分析, 往往先是进行沉降计算, 再以沉降值施加给某单片墙体, 进行应力分析及裂缝判断。墙体在地基下的沉降计算也仅限于墙体下部分地基的作用。这种分析的局限在于, 墙体的约束同实际约束差异较大, 差异主要体现于两个方面: 墙体侧向与顶部受其他墙体及楼板的约束不好估计, 底部以平面考虑的地基同三维地基的特性有较大差别。这种差别的结果造成单片墙体分析的结果较难反映墙体在整体结构内部的性能。

作者简介: 艾军(1981), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要从事工程结构研究(E-mail: aj2000_ren@126.com);

*刘秋萍(1956), 女, 高级工程师, 主要从事结构分析与检测研究(E-mail: jylqp@eyou.com)

本文试图从整体的角度,通过建立整栋住宅楼及弹性地基的三维有限元模型来进行整栋结构物的沉降分析和墙体的应力分析,进而进行裂缝分布的判断,为以后更进一步的细致的整体分析打下基础。

2. 结构分析模型

计算模型含两个部分:上部结构部分和下部地基部分。考虑到现有资料只能提供地基土基床系数,因此本文中下部地基采用比较常用的文克尔地基模型模拟,并采用弹簧单元实现。砖混房屋主要包含以下几种构件:钢筋混凝土基础、砖墙体、混凝土梁、现浇或预制楼板、圈梁及构造柱^[2]。本文有限元模型的上部结构模型涵盖了所有上述构件。如图1所示,该模型为六层六开间双排含走廊结构,其中墙板采用壳单元模拟,梁柱采用梁单元模拟。

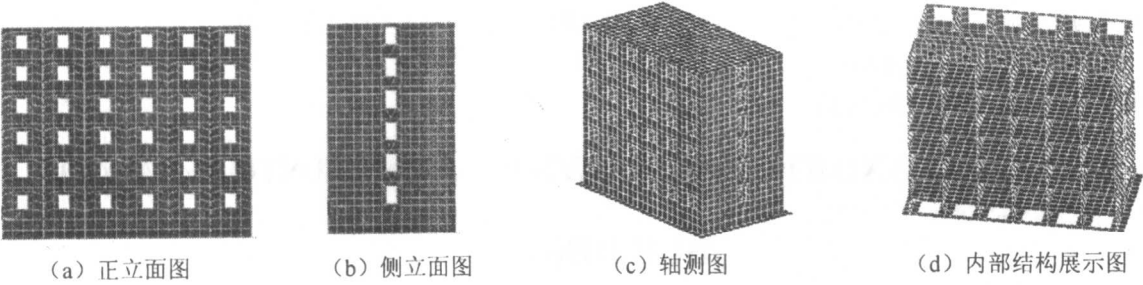


图1: 上部结构有限元模型

由于不均匀沉降,造成上部结构某些部位下沉较多,而另外某部分下沉很小。若情形比较极端,则可能出现上部结构某部位与地基土脱开的情况。为了考虑此接触效应,本模型引入了接触单元。接触单元存在于基础底面与地基土表面之间,当上部结构向上翘起时,下部地基土单元并不提供向下的拉力,与实际相符。计算分析采用有限元软件 ANSYS 实现^[3]。模型计算参数见表1所示:

表1 模型参数 (单位/m)

开间	进深	层高	窗洞宽度	门洞宽度	走廊宽度
3.6	4.8	2.8	1.8	0.9	2.4
窗台高度	圈梁截面	构造柱截面	基础宽度	软土基床系数 (kN/m ³)	硬土基床系数 (kN/m ³)
0.9	0.24×0.34	0.24×0.24	1.7	1000	10000

3. 分析工况及结果分析

为分析结构在不同刚度的地基土条件下的沉降情况以及各情况下结构外墙的应力分布,进而判断外墙开裂情况,本文考虑了五种工况:(1):均匀地基;(2):以开间为单位,左三个开间下部地基土硬,右三个开间下部地基土软;(3):左、右两个开间下部地基土硬,中间两个开间下部地基土软;(4):左、右两个开间下部地基土软,中间两个开间下部地基土硬;(5):房屋一侧外墙中部地基土内存在一根桩,其他部位地基土较软且均匀。各工况计算结果及描述见表2。

表2 各工况计算结果

工况号	最大沉降(mm)	最大沉降差(mm)	窗洞处最大拉应力(MPa)	最大应力位置	开裂情况
1	80	0.2	0.19	窗台中部	接近开裂
2	65	63	0.83	窗角	已开裂
3	14.5	4.2	0.62	窗角	已开裂
4	23.5	5.3	1.09	窗角	已开裂
5	22.2	22	1.2	窗角	已开裂

3.1 工况 1 结果分析

楼房在工况 1（均匀软土地基）情况下，沉降量约 80mm，由于地基均匀，计算所得沉降差非常小（不到 0.2mm）。最大应力的位置在各窗台的中部，靠边的两开间的窗台应力最大。窗台处处于濒临开裂的情形；若为硬土，最大拉应力则更小。工况 1 上部结构沉降云图如图 2 所示。最大拉应力分布见图 3 所示。图 4 为外墙下基础底面沿房屋纵向的沉降曲线。该图表明窗间墙部位下沉降多，窗洞下沉较少，反映了上部结构荷载的传递情况。图 5 为窗台高度外墙最大拉应力图，横坐标为外墙长度方向，纵坐标为最大拉应力值。由图示，应力曲线基本为波浪状，在窗台处应力较大，窗间墙处应力较小。

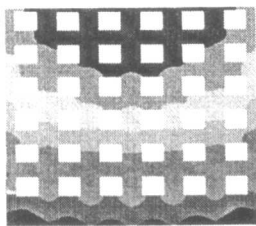
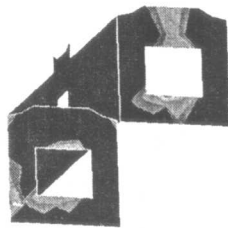
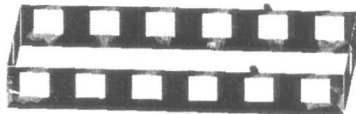


图 2 工况 1 沉降云图



(a) 第一开间窗台



(b) 一层窗洞

图 3 工况 1 最大拉应力云图

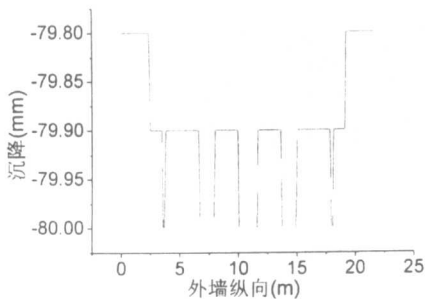


图 4 工况 1 基础底面沉降曲线 (m)

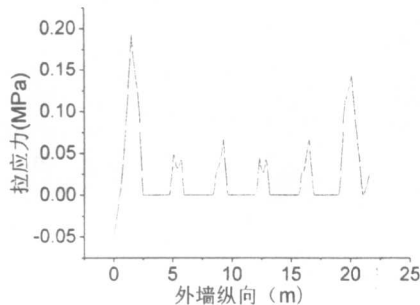


图 5 工况 1 一层窗台最大拉应力曲线 (MPa)

3.2 工况 2 结果分析

楼房在工况 2（一半硬土一半软土）下向软土一侧倾斜。软土一侧最大沉降达 65mm 左右，硬土一侧非常小。沉降小的区域墙体拉应力相对于沉降大的区域要大，另外在地基土软硬交界处拉应力也较大，窗洞角部比窗台中部应力大。上部结构沉降云图如图 6 所示，最大拉应力分布见图 7 所示。图 8 为基础底部延长度方向的沉降曲线。由图 8 可见，沉降曲线接近直线。图 9 为窗台高度处外墙最大应力图。由图示，应力曲线基本为波浪状，在窗台处应力较大，窗间墙处应力较小，且硬土范围内应力较软土范围内应力大。

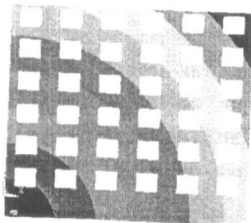
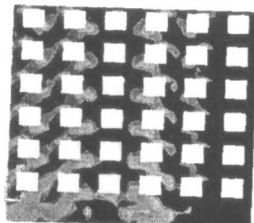
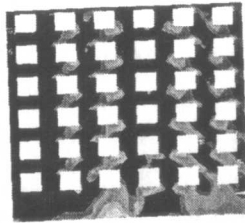


图 6 工况 2 沉降云图



(a) 外墙外侧面



(b) 外墙内侧面



(c) 一层窗洞

图 7 工况 2 最大拉应力云图

3.3 工况 3 结果分析

楼房在工况 3（两边硬土中间软土）下，结构沉降曲线成下凹型。最中间计算沉降量为 14.5mm

左右, 两侧则稍小, 最大沉降差近 5mm。外墙纵向中部的拉应力较两边要小。窗洞角部比窗台中部应力大,

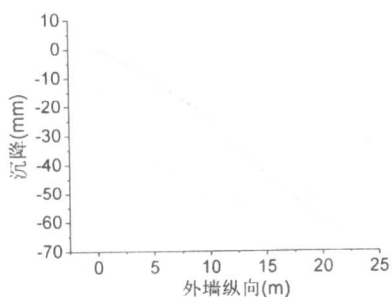


图 8 工况 2 基础沉降曲线 (m)

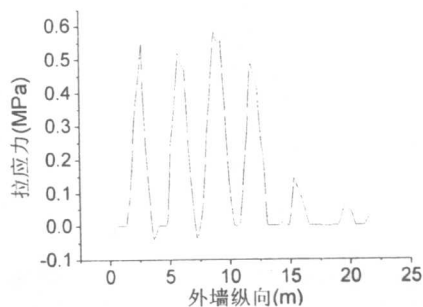
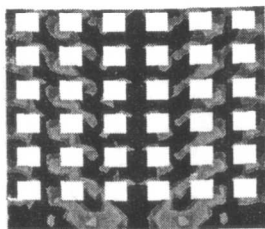
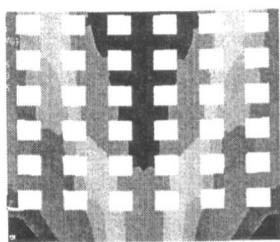
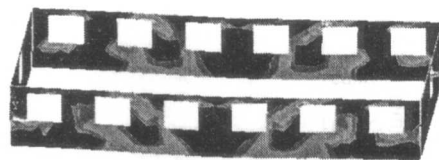


图 9 工况 2 一层窗台最大拉应力曲线 (MPa)

窗角处已经超过开裂应力, 裂缝分布成明显的正八字形。上部结构沉降云图如图 10 所示。最大拉应力分布见图 11 所示。图 12 为基础底部延外墙长度方向的沉降曲线。由图 12 可发现, 曲线基本为下凹曲线。图 13 为窗台高度处外墙最大应力图。由图示, 应力曲线基本为波浪状, 在窗台处应力较大, 窗间墙处应力较小, 且硬土范围内应力较软土范围内应力大。



(a) 外墙外侧面



(b) 一层窗洞

图 10 工况 3 沉降云图

图 11 工况 3 最大拉应力云图

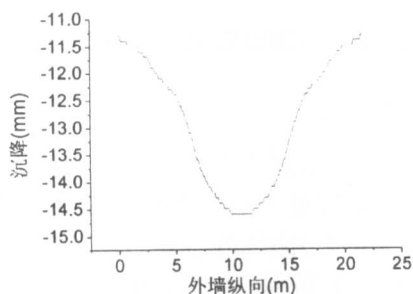


图 12 工况 3 基础沉降曲线 (m)

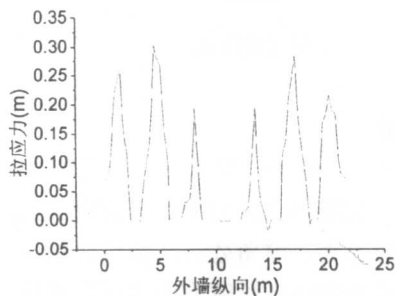


图 13 工况 3 一层窗台最大拉应力曲线 (MPa)

3.4 工况 4 结果分析

楼房在工况 4 (两边软土中间硬土) 情况下, 结构沉降曲线成上突型。最外侧计算沉降量为 23.5mm 左右, 中间硬土部分则比较小, 最大沉降差 5mm 左右。窗洞角部比窗台中部应力大, 窗角处已经超过开裂应力, 裂缝分布成明显的倒八字形。上部结构沉降云图如图 14 所示。最大拉应力分布见图 15 所示。图 16 为基础底部延长度方向的沉降曲线。由图 16 可发现, 曲线基本为上突曲线, 但是在顶部有一局部下凹区。图 17 为窗台高度处外墙最大应力图。由图示, 应力曲线基本为波浪状, 在窗台处应力较大, 窗间墙处应力较小, 且第二和第五开间的应力相对较大。

3.5 工况 5 结果分析

楼房在工况 5 (一侧外墙中部地基土内存在一根桩) 情况下, 外纵墙沉降曲线在桩位处有明显突起。最外侧计算沉降量为 22mm 左右, 桩位处沉降非常小。结构最大拉应力主要集中在桩位上部墙体, 且已经超过开裂应力。上部结构沉降云图如图 18 所示。图 19 为基础底部延长度方向的沉降曲线。由图 19 可发

现, 曲线中部有明显的突起。图 20 为窗台高度处外墙最大应力图。由图示, 应力曲线基本为波浪状, 在窗台处应力较大, 窗间墙处应力较小, 且在中部窗台处的应力明显较其他处大。

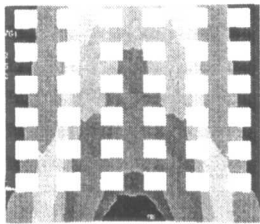
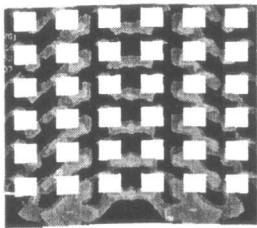
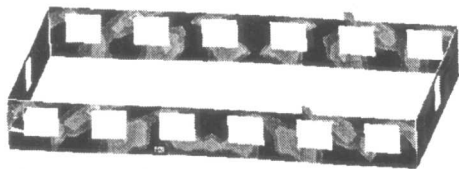


图 14 工况 4 沉降曲线



(a) 外墙外侧面



(b) 一层窗洞

图 15 工况 4 最大拉应力云图

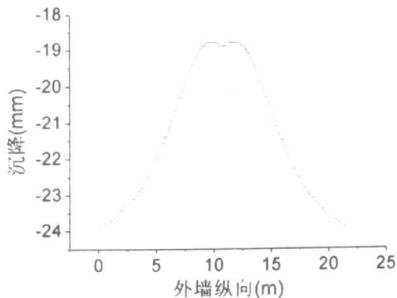


图 16 工况 4 基础沉降曲线 (m)

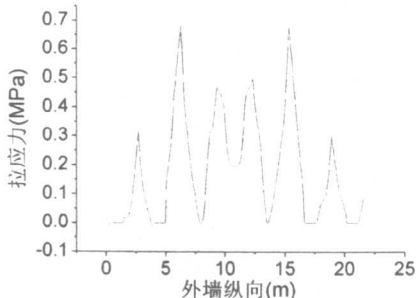


图 17 工况 4 一层窗台最大拉应力曲线 (MPa)

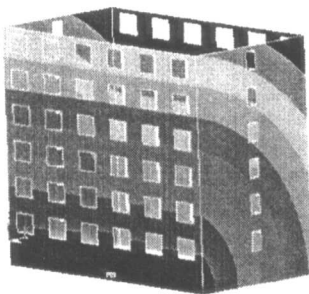


图 18 工况 5 沉降云图

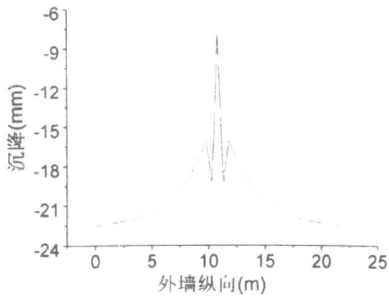


图 19 工况 5 基础沉降曲线 (m)

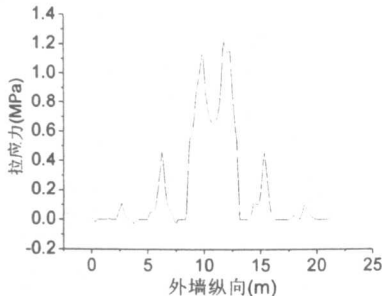


图 20 工况 5 一层窗台最大拉应力曲线 (MPa)

4. 结论与展望

- (1) 地基土比较均匀时, 结构外墙最大拉应力存在于窗台处, 且靠边窗台拉力最大。对于不均匀地基土情况, 结构外墙最大拉应力集中在窗角处。
- (2) 沉降曲线为下凹形时, 外墙裂缝成正“八”字形, 沉降曲线为上突形时, 外墙裂缝成倒“八”字形。
- (3) 限于建模难度和硬件水平, 本文采用的是文克尔地基模型, 该模型将地基土考虑为并列的弹簧, 弹簧之间并没有联系, 因此不能考虑土同周围土的横向作用。今后若采用更为合理的地基模型则能得到更为理想的结果。

参考文献:

[1] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992
 [2] 中华人民共和国国家标准. 砌体结构设计规范 (GB50003—2001) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
 [3] 美国 ANSY 公司. Ansys 使用手册[M], 1996

空间预应力钢桁架整体可靠性分析

陈慧明¹, 王新堂^{*2}

(1. 宁波市创力建筑钢结构有限公司, 浙江 宁波 315202; 2. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 本文在基于随机摄动理论建立索张拉空间预应力钢桁架随机内力统计特性分析模型的基础上, 进一步利用映射变换法建立了任意单元失效模式的可靠度指标与验算点的迭代计算模型, 并基于窄界限法得到了整体结构失效概率的计算公式。结构的基本随机参数包括折线索单元和桁架单元的截面面积(或综合刚度)、张拉钢索的预拉力等。结果分析表明, 结构的截面面积和材料强度的随机性对结构可靠性指标的影响与随机变量的分布特征有较大关系, 所有变量为正态分布时截面面积随机变量标准差的变化对可靠性指标的影响明显大于截面面积为对数正态分布时的影响。另外, 完全正态分布时结构的可靠性指标通常大于截面面积为对数正态分布时的结果。

关键词: 空间预应力钢桁架; 映射变换法; 窄界限法; 系统可靠性

RELIABILITY ANALYSIS OF STRUCTURAL SYSTEM OF SPATIAL PRESTRESSED STEEL TRUSSES

CHEN Huiming¹, WANG Xintang²

(1. Ningbo Chuangli Company of Steel construction LTD, Ningbo 315202, China)

2. Faculty of Architectural, Civil engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The computational model of statistical characteristics of random internal forces of spatial prestressed steel trusses is first established based on the fundamental theories of random perturbation method, in which the random parameters of areas of cross sections of all the elements, areas of cross section of cables, prestress of cables, the strength of materials and axial stability coefficients of elements etc. are considered, the methods of Reflection Transformation is used to establish the computational model of reliability index of elements, and the methods of Narrow Bounds is used to establish the formulation of reliability index of the structural system of the spatial prestressed steel trusses. Finally some computational examples are put forward and the results are discussed. It is concluded that randomness of areas of cross section of each elements and randomness of strength of materials of the structures have great effect on reliability index of the structure, and is relevant to characteristics of distribution of random variables. The results show that effect of mean square deviation of areas of cross section of all elements on reliability index of the structures as all the random variables have the characteristics of normal distribution is greater than as all the variables have the characteristics of other distribution, and the reliability index of the structural system as all the random variables of the structure are in normal distribution is commonly larger than as areas of cross section of all the elements are in logarithmic normal distribution.

Keywords: Spatial prestressed steel trusses ; Methods of Reflection Transformation; Methods of Narrow Bounds; Reliability of structural system

1 随机内力特征值分析

*基金项目: 浙江省自然科学基金项目(502152), 宁波市重点博士基金项目(2004A610019)

作者简介: 陈慧明(1961), 男, 浙江人, 工程师, 主要从事钢结构设计与施工技术的研究;

王新堂(1963), 男, 陕西人, 教授, 博士, 西安建筑科技大学兼职博士生导师, 主要从事钢结构与空间结构研究(E-mail: stwang727@sina.com)

对于索张拉预应力钢桁架的一般模型, 设该结构在张拉阶段(施加预应力阶段)整体结构的基本随机参数由反映各单元综合刚度 $E_i A_i$ (或截面面积 A_i) 随机性的无量纲随机参数 γ_i , 反映张拉钢索截面面积随机性及钢索预张力随机性的参数 β_k 和 α_k 构成, 且可由随机参数向量表示为

$$\{h\} = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_n \ \alpha_1 \ \dots \ \alpha_q \ \beta_1 \ \dots \ \beta_q]^T \quad (1)$$

式中的下标 n 、 q 分别为杆单元数和张拉钢索数。基于随机内力摄动理论可得到预应力钢桁架结构在张拉阶段桁架各单元随机内力统计特性的一般计算公式。其中, 桁架单元 i 的内力均值为

$$\mu_{N_e} = \gamma_{ed} D_{ed} [B]_e [T]_e \{\delta\}_e^c \quad (2)$$

这里的 $\{\delta\}_e^c$ 为第 e 个桁架单元在索张拉时所产生的单元节点位移列阵的确定部分, 由预应力钢桁架的普遍模型确定。 D_{ed} 则为所有杆单元刚度 $E_i A_i$ ($i = 1 \sim n$) 的最大估计值。单元内力协方差及标准差可表示为

$$[N]_e^v = [N, _h] [\sigma_h] [\rho] [\sigma_h] [N, _h]^T \quad (3)$$

此处

$$[N, _h] = [\{N\}_{d,1} \ \{N\}_{d,2} \ \dots \ \{N\}_{d,m}] \quad (4)$$

$$\{N\}_{d,j} = [N_{d,j}^1 \ N_{d,j}^2 \ \dots \ N_{d,j}^n \ S_{d,j}^1 \ S_{d,j}^2 \ \dots \ S_{d,j}^q]^T \quad (5)$$

式中 m 为影响单元内力的随机参数总数, 且有 $m = n + q$ 。

2 单元可靠性指标计算

根据索张拉预应力钢桁架结构的受力特点, 在张拉阶段每个桁架杆件(单元)的失效均将导致整体结构的破坏, 且由于张拉钢索对于整体结构性能所具有的至关重要的作用, 张拉阶段也不允许钢索的破坏。因此, 根据单个杆件或折线钢索元失效的功能函数 Z_i 可分别确定各类单元的状态方程如下:

$$G_e(Y_{e1}^*, Y_{e2}^*, Y_{e3}^*) = X_{e1}^* X_{e2}^* - X_{e3}^* = F(\beta_e^1) = 0 \quad (7)$$

$$G_e(Y_{e1}^*, Y_{e2}^*, Y_{e3}^*, Y_{e4}^*) = X_{e1}^* X_{e2}^* X_{e3}^* - X_{e4}^* = F(\beta_e^1) = 0 \quad (8)$$

方程(7)可用于受拉杆单元和折线索单元, 方程(8)可用于受压杆单元。这里的 X_{ei}^* 为随机变量 X_{ei} 的验算点数值。于是按照映射变换法可得到 X_{ei}^* 的变换验算点 Y_{ei}^* 为

$$X_{ei}^* = \begin{cases} \mu_{X_{ei}} + Y_{ei}^* \sigma_{X_{ei}} & X_{ei} \text{ 为正态分布} \\ \exp(\mu_{\ln X_{ei}} + Y_{ei}^* \sigma_{\ln X_{ei}}) & X_{ei} \text{ 为对数正态分布} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$Y_{ei}^* = \beta_e^1 \cos \theta_{Y_{ei}}, \quad \cos \theta_{Y_{ei}} = - \frac{\sum_{k=1}^m \rho_{Y_{ei} Y_{ek}} \frac{\partial G_e}{\partial Y_{ek}} \bigg|_{P^*}}{\left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \rho_{Y_{ej} Y_{ek}} \frac{\partial G_e}{\partial Y_{ej}} \frac{\partial G_e}{\partial Y_{ek}} \bigg|_{P^*} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

这里的 $\rho_{Y_{ei} Y_{ek}}$ 为当量随机变量 Y_{ei} 和 Y_{ek} 间的相关系数, 且有 $\rho_{Y_{ei} Y_{ek}} \approx \rho_{X_{ei} X_{ek}}$ (见文[6])。方程(9)中的 β_e^1 即为待求的单元可靠性指标, 迭代求解方程(7)或(8)即可得到所需要的可靠的可靠度指标 β_e^1 及相应的验算点。

3 整体结构失效概率计算

按照以上过程得到了索张拉预应力钢桁架各单元可靠度指标 β_c 及相应随机变量的验算点之后,可按如下过程进一步确定整体结构的失效概率及可靠度指标。按照该方法,需首先确定各失效模式之间的相关系数 ρ_{kl} 。于是可得到窄限法估计整体结构失效概率 P_{fs} 的表达式为

$$P_{f1} + \sum_{i=2}^m \max(P_{fi} - \sum_{j=1}^{i-1} P_{fij}, 0) \leq P_{fs} \leq \sum_{i=1}^m P_{fi} - \sum_{i=2, j < i}^m \max(P_{fij}) \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} P_{fij} &= \Phi_2(-\beta_i, -\beta_j, \rho_{ij}) \\ &= \Phi(-\beta_i)\Phi(-\beta_j) + \int_0^{\rho_{ij}} \varphi_2(\beta_i, \beta_j, Z) dZ \end{aligned} \quad (12)$$

$$\varphi_2(\beta_i, \beta_j, Z) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-Z^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\beta_i^2 + \beta_j^2 - 2Z\beta_i\beta_j}{1-Z^2}\right) \quad (13)$$

这里的 P_{fij} 可通过较精确的数值积分法或下面的近似公式计算

$$P_{fij} = [P(A) + P(B)][1 - \arccos(\rho_{ij})/\pi] \quad (14)$$

此处

$$P(A) = \Phi(-\beta_i)\Phi\left(-\frac{\beta_j - \rho_{ij}\beta_i}{\sqrt{1-\rho_{ij}^2}}\right), \quad P(B) = \Phi(-\beta_j)\Phi\left(-\frac{\beta_i - \rho_{ij}\beta_j}{\sqrt{1-\rho_{ij}^2}}\right) \quad (15)$$

这里的 m 为所有失效模式数,式中的 β_j 为 j 失效单元的可靠度指标, $\Phi(\bullet)$ 为标准正态分布函数。显然该模型充分反映了单元失效相关性对整体失效概率的影响。失效概率 P_{fs} 确定之后,可进一步利用关系 $P_{cf} = \Phi(-\beta_c)$ 得到相应的可靠性指标。

4 算例分析

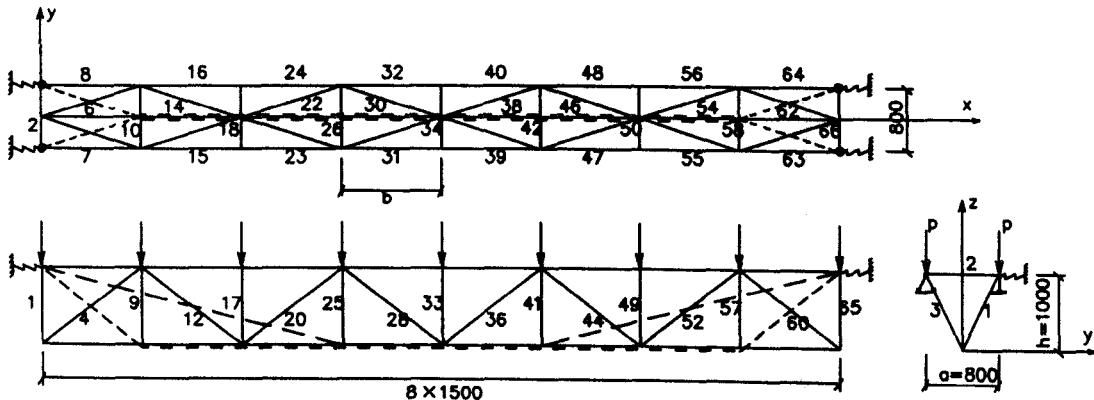


图1 空间立体桁架模型

图1所示结构为一倒三角预应力立体钢桁架,其中两端具有水平弹性约束。该结构设有图示两道钢索,基本几何参数及单元编号如图所示。已知结构材料为Q235,张拉钢索为高强钢索,外荷载作用于上弦节点(左右对称分布)。按照结构的实际特点和图示编号顺序,假定该结构各随机变量的统计特性为:竖腹杆(即图中的1、2、3、9、10、11...)截面面积的均值和变异系数为 15cm^2 、0.067;斜腹杆(即图中的4、5、12、13...)截面面积均值与变异系数分别为 30cm^2 、0.067;下弦杆(即图中的6、14...)截面面积均值与变异系数分别

为 45 cm²、0.078；上弦杆（图中的 7、8、15、16…）截面面积的相应参数分别为 50 cm²、0.07。张拉钢索截面面积均值和变异系数分别为 4.52 cm²、0.022。钢索张拉力均值和变异系数分别为 350kN、0.0286，外荷载的均值和变异系数分别为 40 kN、0.05。Q235 钢材的抗拉强度均值和变异系数分别为 21.5kN/cm²、0.116；高强钢索抗拉强度的均值与变异系数分别为 170 kN/cm² 和 0.047。Q235 与高强钢索的弹性模量分别取为 2.1 × 10⁴ kN/cm²、1.7 × 10⁴ kN/cm²。为方便计算，此处假定所有杆件截面为圆管，截面壁厚 0.6cm，按一类截面考虑。各杆件计算长度系数为 0.9，且将单元轴心受压稳定系数作为独立随机变量考虑，其均值由截面面积均值确定，同时假定各单元稳定系数的变异系数为 0.012。按照本文计算模型可分别得到该结构整体可靠性指标对于不同分布特性时随截面面积标准差 σ_A 和材料强度标准差 σ_f 的变化，结果列于表 1、表 2。

表 1 整体可靠性指标 β 随 σ_f 的变化

σ_f	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
分布 1	4.0218	3.9433	3.8409	3.6705	3.6221	3.4701	3.4533	3.4362
分布 2	3.9079	3.8898	3.8580	3.8037	3.7150	3.5705	3.4728	3.4130
差值/%	2.832	1.356	0.445	-3.628	-2.565	-2.893	-0.565	0.675

表 2 整体可靠性指标 β 随 σ_A 的变化

σ_A	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
分布 1	4.9976	4.9927	4.9823	4.9580	4.8836	4.5052	4.1973	3.7912	3.3895
分布 2	4.7784	4.7735	4.7642	4.7459	4.7085	4.6254	4.4918	4.4364	4.2927
差值/%	4.386	4.392	4.377	4.284	3.585	-2.668	-7.016	-17.018	-26.646

因本算例的上、下限 β 值极为一致，故而表中只给出了一个数值。这里的 σ_A 表示斜腹杆 4、5 截面面积标准差。分布 1 表示所有随机变量为正态分布，而分布 2 则表示杆单元截面面积为对数正态分布，其余变量仍为正态分布。

5 结束语

本文根据随机摄动理论首先建立了空间预应力钢桁架结构任意单元内力（包括折线索单元）的统计特性计算公式，并基于映射变换法和窄限法建立了整体结构可靠性指标的计算模型，该模型可用于任意布索且具有任意弹性约束的预应力钢桁架整体可靠性分析。计算结果表明，结构的截面面积和材料强度的随机性对结构可靠性指标的影响与随机变量的分布特征有较大关系，所有变量为正态分布时截面面积随机变量标准差的变化对可靠性指标的影响明显大于截面面积为对数正态分布时的影响。另外，完全正态分布时结构的可靠性指标通常大于截面面积为对数正态分布时的结果。

参考文献：

- [1] 董聪、刘西拉. 非线性结构系统可靠性理论及其模拟算法[J]. 土木工程学报, 1998(1)23-31.
- [2] 王新堂. 随机参数预应力钢桁架随机内力摄动分析[J]. 土木工程学报, 1999(1)50-55.
- [3] Feng Y S. A Method of Computing Structural System Reliability with High Accuracy[J]. Comput. & Struct., 1989(1)1-5.
- [4] 董聪、杨庆雄. 冗余桁架结构系统可靠性分析理论与算法[J]. 计算结构力学及其应用, 1992(4)393-398.
- [5] 王新堂、徐永春、王者静. 随机拉索刚度预应力空间钢桁架随机内力摄动分析[J]. 计算力学学报, 2002(1)69-73.
- [6] 赵国藩、金伟良、贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

以圆钢管为钢骨的劲性高强混凝土柱的弯矩曲率关系的数值分析

陈周熠^{*1, 2}, 易伟建¹, 林立岩³, 沙镇平²

(1 湖南大学, 长沙 410082, 中国; 2 厦门大学, 厦门 361005, 中国; 3 辽宁省建筑设计研究院, 沈阳 110005, 中国)

摘要: 近年来, 以圆钢管为钢骨的劲性高强混凝土柱在高层建筑中开始得到应用。本文介绍了这种柱子的抗震性能试验研究的试验概况, 在此基础上, 采用条带法进行了截面弯矩曲率关系的数值分析, 计算结果与试验结果大致吻合, 并利用该数值分析方法讨论了不同参数对柱的截面弯矩曲率关系的影响。试验和分析的结果都表明, 高强混凝土柱中核心钢管的存在对改善其延性和提高强度有重要作用。

关键词: 高强混凝土; 柱; 钢管; 弯矩曲率关系; 条带模型; 延性

NUMERICAL SIMULATION OF THE MOMENT-CURVATURE RELATIONSHIP FOR HIGH STRENGTH CONCRETE COLUMNS REINFORCED WITH CONCRETE FILLED STEEL TUBE

CHEN Zhou-yi^{1,2}, YI Wei-jian¹, LIN Li-yan³, SHA Zhen-ping²

(1 Hunan University, Changsha 410082, China; 2 Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3 Liaoning Provincial Building Design & Research Institute, Shenyang 110005, China)

Abstract: High concrete columns reinforced with concrete filled steel tube, which is an ordinary reinforced-concrete column where there is a steel tube designed to be put in the core additionally, are used quite extensively in high buildings in recent years. In this paper, the general situation about earthquake-resistant behavior experiments of the columns is presented. Based on the experimental results, the numerical analysis of the sectional moment-curvature relationship for the columns is proposed using fiber model. Comparison of experimentally obtained ultimate sectional moments and those predicted by numerical analysis are given and reasonable agreement is observed. Additionally, effects of different parameters on the sectional moment-curvature relationship of the columns are studied with the proposed analysis method. The results of both the experiments and analysis indicate that the existence of concrete filled steel tube in core of high-strength concrete column section plays an important role in improving its ductility and strength.

Keywords: high-strength concrete; columns; steel tube; moment-curvature relationship; fiber model; ductility

1 引言

在现代工程结构的发展中, 人们不断地利用“组合”的概念来实现结构形式的突破。辽宁省建筑设计

作者简介: *陈周熠(1974), 男, 福建人, 讲师, 博士, 主要从事结构工程数学及研究(E-mail:chenzy@yanan.xmu.edu.cn);

易伟建(1954), 男, 湖南人, 教授, 博士, 副院长, 主要从事结构工程数学及研究;

林立岩(1935), 男, 福建人, 教授级高工, 顾问总工, 从事结构工程设计与研究;

沙镇平(1935), 男, 福建人, 教授级高工, 顾问总工, 从事结构工程设计与研究。

研究院在设计实践过程中,借鉴劲性钢筋混凝土的思考方法,提出了以圆钢管为钢骨的劲性高强混凝土柱(习惯称为钢管高强混凝土核心柱)这一形式^[1](图1)。并与大连理工大学土木系合作进行了钢管高强混凝土核心柱的抗震性能的试验研究^[2],试验表明,这种柱型可以有效地改善普通高强混凝土构件延性差的缺点,减小构件断面,增强柱的承载能力,有很好的研究和应用前景。

在核心柱的抗震性能的试验研究基础上,本文完成了确定柱子截面弯矩与曲率关系的材料非线性分析,并研究了混凝土强度 f_c 、轴压比 n 、体积配股率 ρ_v 以及钢管面积比 ρ_{tube} 等不同参数对柱子截面弯矩曲率关系的影响,为进一步研究由这种柱所构成的框架的抗震性能提供了基础。

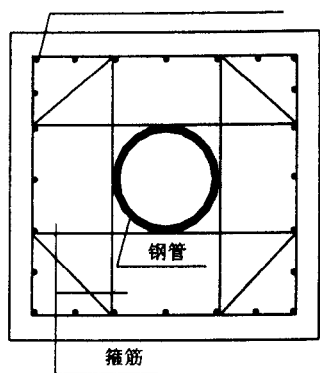


图1 柱横截面

Fig.1 Cross-section of

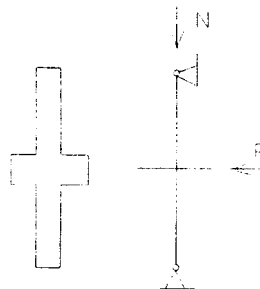


图2 试件模型和加载方案简图

Fig.2 Simplified models of test specimens and loading arrangement

2. 试验概况

在给出柱子的截面弯矩曲率关系数值分析之前,先简要介绍一下1节中提到的抗震性能试验研究^[2]的主要情况。图2给出了试件模型和加载方案的简图,试验所用柱试件是按框架柱受力特征,将上、下两层柱在中点(反弯点)截断,试件中部伸出突梁,用以模拟节点承受反复水平荷载;主要试验参数为轴压比、配箍率和钢管含钢率;试验采用5000KN长柱试验机施加竖向荷载,在长柱试验机的活动平台上配置了一个水平加荷框架装置,给柱试件施加反复水平荷载。试验是在大连理工大学土木工程系结构实验室完成,试验的细节可以参见文献^[2]。

试验结果,可以观察到各柱的破坏过程和形态,以及各柱试件在某确定轴力 N_u 下的水平极限荷载值 P_u (P_u 值与弯矩极限值 M_u 之间存在关系 $M_u = P_u H_u / 2$,其中 H_u 为柱净高),可以用以校核下文要讨论的数值方法的精确性。

3. 数值分析方法^[3, 4, 5, 6]

对核心柱弯矩曲率关系的数值模拟采用了基于有限元的条带模型法,它采用以下假定:平截面假定,不考虑剪切变形,忽略受拉区混凝土的作用。

在用条带模型模拟柱横截面时,首先将截面划分为如图3所示9个区域,其中区域1、2、3、4和7构成钢管外围约束混凝土部分,区域5、6和9构成钢管部分,区域8为钢管内核心混凝土,计算时将各区域沿y轴再细分为若干个条带进行计算,纵筋按具体位置单独计算。程序流程图见图4所示。

4. 材料本构模型

4.1 钢材(钢管和钢筋)

钢材采用理想弹塑性模型,其应力---应变关系可用下面的表达式描述:

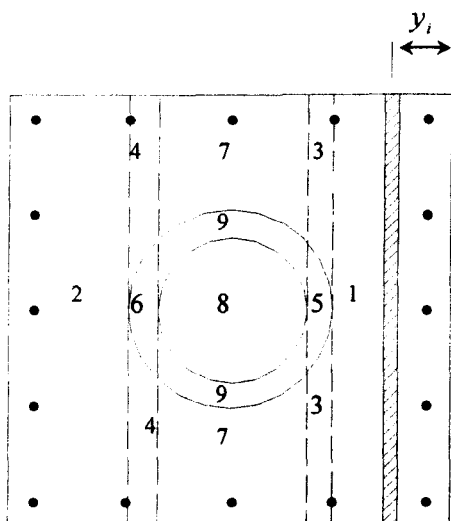


图3 柱截面条带划分

Fig. 3. Fiber division of column cross-section

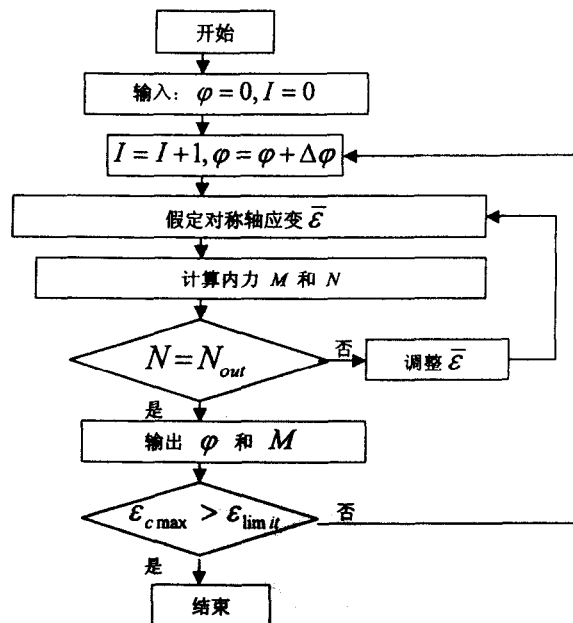


图4 程序流程图

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \varepsilon_s E_s & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma_s &= f_y & \varepsilon_s > \varepsilon_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 σ_s 为钢材应力; ε_s 为钢材应变; E_s 为钢材弹性模量; ε_y 为钢材屈服应变; f_y 为钢材的屈服强度。

4.2 钢管内高强混凝土^[7]

本文用于钢管内高强混凝土的本构模型是由钟善桐和韩林海提出的, 可用下面的表达式描述:

$$\sigma_c = \sigma_0 \left[A \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - B \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (\varepsilon_c \leq \varepsilon_0) \quad (2)$$

$$\sigma_c = \begin{cases} \sigma_0(1-q) + \sigma_0 q \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^{0.1\xi} & (\xi \geq 1.12) \\ \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) \frac{1}{\beta \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)} & (\xi < 1.12) \end{cases} \quad (\varepsilon_c > \varepsilon_0) \quad (3)$$

式中 σ_c 为混凝土应力, ε_c 为混凝土应变, 且

$$\sigma_0 = f_{ck} \left[1.194 + \left(\frac{13}{f_{ck}} \right)^{0.45} (-0.07485\xi^2 + 0.5789\xi) \right]$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + \left[1400 + 800 \left(\frac{f_{ck} - 20}{20} \right) \right] \xi^{0.2} \quad (\mu\varepsilon)$$

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 14.93 f_{ck} \quad (\mu\varepsilon)$$

$$A = 2.0 - k$$

$$B = 1.0 - k$$