



第一届“全国土木工程研究生学术论坛”论文集

现代土木工程 理论与实践

主 编◎吴胜兴

副主编◎高玉峰 朱召泉

THEORY AND PRACTICE OF
MODERN CIVIL ENGINEERING

河海大学出版社

TU-53
W545

第一届“全国土木工程研究生学术论坛”论文集

5-1

现代土木工程 理论与实践

主 编◎吴胜兴
副主编◎高玉峰 朱召泉

THEORY AND PRACTICE OF
MODERN CIVIL ENGINEERING

河海大学出版社

HA100/04

图书在版编目(CIP)数据

现代土木工程理论与实践/吴胜兴主编. —南京:
河海大学出版社, 2003. 9

ISBN 7-5630-1873-5

I. 现... II. 吴... III. 土木工程-文集
IV. TU-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 030183 号

书 名/现代土木工程理论与实践
书 号/ISBN 7-5630-1873-5/TV · 228

责任编辑/陈玉国

特约编辑/陈吉平 刘润生 许宇鹏

封面设计/杭永鸿

出 版/河海大学出版社

地 址/南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话/(025)3737852(总编室) (025)3722833(发行部)

印 刷/河海大学印刷厂

开 本/850 毫米×1168 毫米 1/16 47.75 印张 1400 千字

版 次/2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

定 价/120.00 元

会 议 组 织

顾问委员会(按姓氏笔画为序,以下同):

王思敬 吕志涛 严 恺 吴中如 陈肇元 陈厚群
林萍华 郑颖人 赵国藩 姜弘道 钱七虎

学术委员会:

主 席: 江见鲸

副主席: 吴胜兴 李爱群

委 员: 卫 军 白国良 叶列平 叶志明 吕西林 刘汉龙
刘松玉 刘伟庆 刘立新 宋二祥 李 杰 李正良
李远富 李宏男 陈以一 陈云敏 陈国兴 尚守平
周 云 周绪红 金伟良 邹超英 张素梅 张永兴
贺国京 徐礼华 姜忻良 栾茂田 袁 驹 袁迎曙
曹平周 黄宏伟 黄醒春 寇新建 霍 达 蔡 健
燕柳斌

组织委员会:

主 席: 张长宽

副主席: 徐卫亚 周志芳

委 员: 丁雪梅 方祯云 任旭华 朱召泉 李同春 肖蕴诗
汪基伟 吴世友 吴宁萍 宋瑞平 邹积岩 陈皓明
杨树峰 施建勇 高玉峰 赵跃宇 赵 坚 胡敏强
潘正初

秘书长: 宋瑞平

序

21 世纪是高科技时代。在新的世纪里,工程科学技术将成为经济发展重要的资源和不竭的动力;在新的世纪里,要建更多的厂房,造更多的住宅,架更多的桥梁,挖更多的隧道,筑更多的大坝……因此,土木工程学科的发展也必将迈上新台阶。

土木工程是一门古老的学科,它随着人类的基本需求而诞生,又随着人类社会的进步而发展。在十几个世纪的发展和演变中,它不断丰富着自己的内涵,特别是材料的变革和力学的发展起着有力的推动作用。今后一个时期,土木工程将引进更多的高新技术,促进自身提高、创新和发展,并将向太空、海洋、荒漠开拓,土木工程材料将向轻质、高强、多功能化发展,设计方法日趋精确化,设计工作日益自动化,信息化施工和智能化技术也将全面应用于土木工程。因此,社会对土木人才的培养提出了更高更全面的要求。正是在这样的背景下,由河海大学研究生院和中国土木工程学会教育工作委员会共同发起主办的第一届“全国土木工程研究生学术论坛”应运而生。这既是新世纪我国土木工程研究生的一次盛会,一个舞台,也是一次尝试,在时下属于研究生自己的学术活动和学术交流还很不足的今天,显得尤为可贵。

“河凝聚智慧,海孕育文明。”河海大学是一所历史悠久的高等学府,她的历史可以追溯到 1915 年创建于南京的“河海工程专门学校”,甚至更早。长期以来,形成了以水利、土木为特色的办学传统。此次论坛承办单位——河海大学土木工程学院,充分利用学校资源,发挥土木学科优势,通过努力将论坛办成具有创新意识和有影响的学术会议,并以此为契机,坚持不懈,使论坛成为土木工程研究生的学术交流和创新园地。

我们欣喜地看到各高校研究生踊跃投稿、积极参与,也才有了这样一本丰厚的论文集的出版。本论文集所收录的论文涉及到土木工程领域的各个方面,集中反映了当代研究生在土木工程的基本理论与工程实践及相关领域所取得的新研究成果。整本文集,处处闪耀着青年学子思辨的才华与创新的火花,体现了“凝聚研究生智慧,畅想 21 世纪土木”的论坛精神。

青年是祖国的未来。青年一代土木研究生肩负着攀登科学技术高峰和现代化建设的历史重任。我深信,第一届“全国土木工程研究生学术论坛”必将激励成千上万青年学子不断创新,在知识的海洋里乘风破浪,在科学的殿堂里敏思笃行,树土木之新风,谱写伟大祖国建设的新篇章。

吴志清

中国工程院院士
东南大学教授 博士生导师
2003 年 8 月

目 录

第一部分 混凝土和钢筋混凝土结构

超高层外钢框架-混凝土核心筒混合结构研究概况	武敏刚	吕西林(1)
钢筋混凝土板三维单元非线性有限元分析	周 昕	沈蒲生(6)
Classical algorithm and its improvement for material nonlinearity problems	Liu Xila	Wang Kaijian(11)
FE modeling of beam-column-slab joint under axial compression	Bashir Ahmed Memon	Su Xiaozu(16)
An experimental research for shear capacity of R. C. deep flexural members	Chen Meng	Liu Lixin(22)
Calculation of adiabatic temperature change of mass concrete of foundation in high-rise building	Zhu Pinghua	Yu Jing Peng Shuquan(26)
Experimental and analytical studies on seismic behavior of high-strength concrete frame joints	Xiao Liangli	Liu Cuilan(31)
新型梁柱-板柱(住宅)结构体系抗震性能分析	李 萍	蒋永生 徐 坚(36)
预弯预应力混凝土组合梁的参数分析与研究	孟 涛	孙建渊 李国平(40)
超长混凝土地下室侧墙裂缝成因及控制技术	李晓春	吴胜兴(45)
超大面积钢筋混凝土现浇楼板裂缝机理与控制技术综述	魏 敏	吴胜兴(49)
我国建筑物整体平移技术及工程应用进展	吴二军	李爱群(54)
钢筋混凝土超长框架结构温度和收缩裂缝控制技术	康 庆	吴胜兴 易仁来(60)
高层混合结构水平荷载下的受力性能	龚胡广	方 辉 沈蒲生(65)
柱外包钢加固法在某工程中的应用	徐春燕	徐文平(70)
高层混合结构竖向荷载下的受力性能	方 辉	龚胡广 沈蒲生(75)
柱-墙下桩承台空间桁架模型的现场实测与分析	赵飞宇	蒋永生 侯善民(80)
往复荷载下锈蚀钢筋与混凝土的粘结性能	戴靠山	袁迎曙 姬永生(86)
后张预应力混凝土桥梁的裂缝成因分析	徐俊祥	朱为玄 徐道远(91)
坑状锈蚀对钢筋性能影响的有限元分析	卞汉兵	吴胜兴(95)
双层桥面钢管混凝土拱桥模型试验及理论分析	王 博	曾明根 章关永 石志源(99)
粘钢加固技术在梁补强中的应用	朱方之	吴庆安 吕恒林 秦海兰(105)
碳纤维布(CFS)补强加固混凝土结构的新技术	刘 艳	章定国 谢剑利(110)
组合梁负弯矩区混凝土板裂缝性能分析	过轶青	郑德胜(114)
高层建筑结构中的平面外墙梁节点的研究	艾 侠	(119)
ANSYS 对弹性地基上自由板的求解	宗 敏	曹 朗(125)
钢筋混凝土有限元分析中四结点联结单元长度取值的讨论	徐海华	汪基伟 刘体锋(128)
水工混凝土结构裂缝检测方法	施 昱	江 泉(132)
钢绞线的粘结锚固性能小议	曹 俊	王志浩(137)
II 型断裂试件尺寸效应有限元分析	姜 娟	吴智敏(142)
南京长江二桥高性能混凝土徐变性能试验研究	李 军	黄卫兰(146)

第二部分 钢结构与钢-混凝土组合结构

我国超高层建筑结构分析方法的现状	雷淑忠 沈祖炎 王 强(150)
大空间建筑火灾计算方法综述	黄珏倩 李国强(155)
Force-slip experiments of shear connectors in concrete-steel composite beams under fire Zhou Hongyu Li Guogiang He Tiansen Shen Liyuan(160)	
Effect of roof configuration of tank on natural period	Adnan Almani(164)
钢结构抗火设计综述	吴建霞 董 军(170)
500 kV 江阴大跨越工程施工用抱杆结构分析及方案比较	肖军利 董 军(174)
不同连接形式的钢框架在低周往复荷载作用下的试验分析	吴 芸(180)
非线性接触方法在大跨度斜拉桥索梁锚固分析中的应用	颜 海 范立础(185)
交错桁架体系在水平荷载作用下考虑土与结构共同作用的变形模式研究 蒋建国 周绪红 邹银生(190)	
冷弯型钢构件的局部相关屈曲和直接应力法理论简介 郑秋菊 叶志明 侯 娟 欧培莉 涂冬根(196)	
薄壁构件空间变形计算理论浅议	谢 华 熊晓莉 余 洋 李开禧(201)
大型钢壳体结构吊装过程的有限元分析	陈廷国 朱荣华(207)
数值积分在受弯构件的弹塑性弯扭屈曲分析中的应用	李继才 朱召泉(211)
偏心支撑钢框架抗震性能和设计方法研究	吴华英(216)
单跨轻钢门式刚架横梁挠度的简化计算	秦海江 曹平周(221)
单跨等截面门式刚架侧移的简化计算	张 帆 曹平周(226)
剪切变形对钢框架结构二阶效应的影响	陈 刚(231)
空腔砌块复合墙体钢框架抗震性能试验研究	张 溶(236)
南京长江第三大桥桥塔的受力特性分析	苏庆田 曹劲松(240)
体外预应力加固简支实腹钢梁桥的设计计算	孙 云 孙宝俊(246)
轻钢构件力学分析应用软件研究综述	欧培莉 叶志明 涂冬根 郑秋菊 侯 娟(250)
一种新型组合梁——预应力复合梁的探讨	李秉南 孙宝俊(254)
斜拉桥扁平钢箱梁正交异性桥面板计算方法研究	邢中凯 吴 冲 石志源(257)
斜拉桥的拉索锈蚀损伤与健康监测	汪永兰 李爱群(262)
新型方钢管混凝土柱与型钢梁节点的拟静力试验研究	于 旭 刘伟庆 葛 卫(267)
新型高效耗能支撑非线性位移的简化计算	周丰富 董 军(272)
轻钢结构风灾损失特点及其工程措施研究	王士奇 董 军(277)
轻钢结构新型连接研究	彭雅珮 董 军(281)
轻钢龙骨复合承载墙体抗震性能研究	夏冰青(286)
能量法在预应力张弦梁结构分析中的应用	马瑞挺 董 超(292)

第三部分 岩土工程

Numerical simulation of saturated-unsaturated seepage in earth dam Wang Ruigang Yan Shuwang Li Shaoming(296)	
Optimization of earthmoving equipment selection by genetic algorithms Cheevin Limsiri Piet Lubking Gerard Kruse Zhang Ting Xu Xiang tao(301)	
沉入式大圆筒结构抗倾承载力的上限极限分析	魏峰先 栾茂田 杨 庆(307)
砂土多机构边界面塑性模型	丰土根 洪胜利 费 康(312)

高层建筑基础设计智能决策支持系统	李正良	晏致涛	刘小勤(317)
大直径现浇砼薄壁管桩水平承载性状有限元数值分析计算研究	何筱进	费 康	周云东 丰土根(322)
青藏铁路多年冻土隧道隔热保温及防排水技术	张德华	王梦恕(326)	
考虑桩土相对分离效应的单桩水平动力阻抗计算方法	孔德森	栾茂田(332)	
巷道喷层结构内力的简化计算	雷金波	姜弘道	雷呈凤(338)
量化记忆模型参数的确定及其在土石坝地震反应中的应用	宋振河	迟世春(344)	
混凝土、岩石类材料的弹性粘塑性动力损伤有限元模型	邱战洪	张我华	余功栓(349)
卫生填埋场研究中的随机量问题浅议	彭功勋	施建勇(354)	
土的物理性质指标与土的力学性质的关系分析	张之好	余湘娟	房 震(360)
角钢对插入式基础应力分布的影响	彭立才	程永峰	张必春(363)
非线性弥散关系在缓坡方程中的应用	潘丽红	冯卫兵	潘军宁(367)
基于强度折减的有限元方法分析土坡稳定性	关立军(372)		
钢渣混凝土薄壁管桩复合地基的开发利用	姜陈钊	丰土根	费 康(377)
低应变反射波法测桩中的几何弥散效应	朱 波	李 微(381)	
区域降水条件下预测边坡坍塌强度的神经网络模型	汪华安	王 媛	陈秀华(384)
双联拱隧道中隔墙设计方法与施工工艺探讨	李 鹏	王耀峰(389)	
某砂岩微结构分形特征	刘敬辉	洪宝宁	张爱军(393)
岩石 I—II 型复合裂纹扩展的声发射(AE)试验分析	洪海春	续建科	牟 宏(398)
地质编录信息系统中的数据库设计	高云霄(402)		
迭代自组织数据分析法在水文地质条件分析中的应用	戴春华(407)		
苏州西塘河疏浚泥固化处理研究	范昭平	张春雷	冯志超(411)
真空预压法在杭宁高速公路南庄兜收费站软基处理工程中的应用	付天宇	陈永辉	刘汉龙(415)
真空-堆载联合预压法在淮河入海水道马集涵闸软基加固工程中的应用	王 强	顾长存	谢冬云(419)
环境同位素和水化学在堤防渗漏研究中的应用	凡哲超	陈建生	杨松堂(424)
参数优化反分析在树根桩加固边坡中的应用	孙少锐	吴继敏	魏继红 李 枫(428)
超载预压法在市政道路软基处理中的应用	温世清	余湘娟	刘汉龙 黄景义 张晓健(433)
厦门莲黄隧道爆破监测与分析	尹志政	张家生	阳生权(437)
南京市中级人民法院某综合楼基坑支护设计与监测	金雪莲	蒋永生(442)	
应用数值方法预测某工程中的岩爆问题	李 枫	吴继敏(447)	
武汉地区基坑工程事故地质条件分析	郑先昌	胡 恒	杨文甫 卫中营(451)
大直径桩承载力确定方法综述	朱 骏	陈国兴(456)	
化学植筋的研究现状及工程应用实例	李 辉(461)		
地下水运移模拟的随机分析方法研究综述	汪北华	童海涛(466)	

第四部分 防灾减灾工程及防护工程

A numerical method for isolating vibration analysis of viaduct system in urban light rail	Peng Bo	Sun Honggang	Chen Meng	Jiang Cangru(472)
Review of vibration-based methods in damage detection of civil engineering structures	Yue Yanfang	Lu Lingyi	Song Qigen(477)	
The FEM on the anti-seismic capability of the structure with large-space in the bottom				

.....	Wang Yulan Jiang Cangru Li Shujin(483)
结构振动控制 Benchmark 研究发展综述.....	张春巍 欧进萍(489)
基于 GIS 的城市防震减灾智能信息系统研究.....	徐敬海 刘伟庆 邓民宪(497)
设置粘滞阻尼墙结构的减震控制理论分析.....	章征涛 刘伟庆 欧 谨(501)
斜拉索减振用油阻尼器的试验研究.....	周海俊 孙利民(506)
用层次分析法确定隧道病害分级中各影响因素的权重.....	吴江滨 王梦恕(510)
铁路桥抗采动影响的研究.....	于广云 夏军武(515)
丰满大坝变形数学模型研究.....	魏建武 周 晶 李 昕(519)
一种摩擦耗能装置在相邻结构减震控制中的应用研究.....	彭凌云 闫维明(524)
含有互层土地土体的动参数试验研究及其地震反应分析.....	庄海洋 刘雪珠 陈国兴(530)
倾斜放置的粘滞阻尼支撑对柱轴力影响研究.....	陈 瑜 刘伟庆 陆伟东(536)
地震作用下高层建筑上部结构—桩筏基础—地基相互作用体系的计算分析	
.....	周 友 徐礼华(541)
连续桥梁隔震的简化模拟分析方法.....	杨兴富(546)
弹塑性结构地震作用下的位移反应对比研究.....	刘中田(551)
加劲阻尼(ADAS)装置减震结构的非线性时程分析.....	汤昱川 张玉良(556)
混凝土重力坝抗震可靠度的人工神经网络预测模型.....	余功栓 张我华 邱战洪(561)
金水桥抗震分析.....	杜义欣 刘晶波 聂建国 樊建生(566)
弹性支承平台结构振动特性的参数分析.....	左中杰 刘伟庆 陈 骝(571)
平坦薄膜结构临界风速初探.....	刘瑞霞(576)
离散涡方法在南京三桥抗风性能分析中的应用.....	王达磊 周志勇 陈艾荣(581)
爆炸载荷作用下地下指挥所弹塑性动力分析.....	谭一鸣 张智勇 赵 海 王 玮(586)
基于径向基神经网络的建筑结构损伤诊断的仿真分析.....	程 涛 王靖涛(590)
地下铁道车站对列车引起地面振动响应的影响.....	张昀青 刘维宁 刘加军(595)
轻轨交通中轨道噪声的一种预测方法.....	黄 飞 何 钊 魏俊红 郑慧明(599)
碳纤维复合构件的受弯性能试验研究.....	彭 亚 刘伟庆 陈程林(604)
植筋混凝土压弯构件的恢复力特性.....	周新刚 吴江龙 初明进 李 强(609)
反射波法在工程检测中的局限性探讨.....	杨 杰 李 微 郝文璐(614)
海水环境下粉煤灰混凝土抗侵蚀性试验研究.....	唐军务(618)
有限元法在桥梁改造方案可行性分析中的应用.....	路江龙 陈健云 周 晶(623)
基于两次 POA 的整体损伤模型.....	张国彬 武建华(628)

第五部分 其他

The management of government-invested project cost.....	Zhou Shufa(632)
Re-development of ANSYS for structural design	
.....	Cai Yunfan Zhu Ronghua Sun Hanqi Yu Xin(637)
绿色建筑评估系统海外发展动态及比较.....	杨 宁 江见鲸(641)
政府投资工程中低效率问题的研究.....	丁婷婷 王冠男 朱宏亮(646)
压制低水胶比条件下硅酸盐水泥-粉煤灰体系的水化与抗压强度研究.....	王甲春 阎培渝(652)
离散单元法及其在建筑工程中的应用.....	王 强 吕西林(656)
结构摄影测量图形自动识别系统.....	陆新征 王海波 严吉洁 叶列平 江见鲸(662)
日本的城市化及对我国的启示.....	沈 悦(667)
伙伴关系管理模式初探.....	张巧玲 朱宏亮(672)

住房市场结构分析的数理模型探讨	郑思齐	刘洪玉(677)
以新型模板技术推动墙体改革	郑晓冬 王立久	任铮钺(682)
润扬大桥安全监测系统的设计	席广永	(686)
赣江大桥应力谱模拟与剩余使用寿命评估	徐 磊 陈惟珍	王春生(691)
水电工程中的风险分析及工程应用	宋瑞平	张贵金(696)
上海高架轨道交通引起环境振动的实测研究	张 昕	蒋 通(701)
关于几何非线性问题中变形度量定义的讨论及其单元刚度矩阵	胡加珠	岳艳芳(707)
沥青混合料体积指标测定方法试验研究	李 强	李 峥(712)
市政工程特种结构有限旋转构件位移法	张 靖	彭宣茂(718)
路面混凝土湿度场干缩应力场计算理论及应用	聂跃高 刘 庆 嵇才苏	刘勇军(722)
一种公交线网优化的数学模型	胡启洲	常玉林(727)
便携式停车场收费系统的设计与开发	郭建锋 曹 铭 张建平	赵怀恩(731)
台阶式溢洪道的消能效果研究	曾东洋	张志昌(736)
浮式防浪堤消浪性能分析与计算	杨 蔚 严建国	孙芦忠(742)
加铺层层底应力场影响因素的正交分析	岳福青	杨春风(747)

超高层外钢框架-混凝土核心筒 混合结构研究概况

武敏刚 吕西林

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 外钢框架-混凝土核心筒结构体系在我国超高层建筑中占有相当重要的位置, 但对这种结构体系的抗震分析还很不充分. 本文将对混合结构整体抗震分析的国内外研究状况加以介绍; 详细阐述分层模型、杆系模型、平面应力元模型在混合结构抗震分析中的应用以及分析结果.

关键词: 混合结构; 弹塑性分析; 抗震分析; 模型试验

1 概 述

外钢框架-混凝土核心筒结构体系在我国超高层建筑中占有相当重要的位置^[1,2,3,4]. 通过对我国目前高度为前 30 名的建筑(174~460 m)所做的统计(如表 1), 钢-混凝土混合结构占了将近一半的数量, 且在结构体系中, 又以框架-筒体体系为主, 而钢框架-混凝土核心筒是采用最多的一种结构形式, 所占比例高达 36.7%. 钢结构和混凝土结构各有所长, 前者具有重量轻、强度高、延性好、施工速度快、建筑物内部净空大等优点, 而后者刚度大、耗钢量少、材料费省、防火性能好. 统计分析表明, 高层建筑采用钢-混凝土混合结构的用钢量约为钢结构的 70%, 而施工速度与全钢结构相当, 在综合考虑施工周期、结构占用使用面积等因素后, 混合结构的综合经济指标优于全钢结构和全混凝土结构的综合经济指标. 钢框架-混凝土核心筒的主体构造系由钢筋混凝土核心筒及铰接或刚接钢框架所组成的混合结构体系. 混凝土核心筒在各个方向上都具有较大的抗推刚度, 在结构体系中, 成为主要的抗侧力构件, 将承受风或地震作用所产生的大部分水平荷载. 核心筒外围的钢框架主要承受竖向荷载, 并分担按刚度分配所得的小部分水平荷载. 但是这种结构国内外研究得很少. 同普通钢筋混凝土高层结构相比, 混凝土核心筒刚度在结构的总刚度中所占的比重更大, 承担的地震力也更多, 外框架只承担了极小的地震作用. 但从构件的屈服强度来看, 内筒混凝土结构的屈服强度要比外钢框架要小很多. 混凝土核心筒相对刚度有余, 强度不足, 外钢框架相对强度有余, 刚度不足, 使得钢-混凝土混合结构抗震性能不协调. 当结构遭遇罕遇大震时, 塑性铰主要出现在混凝土核心筒上, 这样的塑性铰机制对结构抗震很不利, 一旦核心筒发生过大的变形和严重破坏, 外钢框架结构因刚度不足就会导致整个结构或局部结构的倒塌. 所以, 对该种结构体系的深入研究迫在眉睫. 本文将对这种结构体系研究的一个重要方面, 即混合结构整体抗震分析的国内外研究状况加以介绍.

表 1

范围	材 料			体 系			
	钢筋混凝土	混合结构	钢结构	筒中筒	框架-筒体	框架-支撑	框架-剪力墙
30 栋	15	12	3	9	17	3	1
	50%	40%	10%	30%	57%	10%	3%

作者简介: 武敏刚(1976--), 博士生, 研究方向为超高层混合结构

高层结构弹塑性动力分析早在 20 世纪 70 年代末期就已经在我国高层建筑抗震设计中应用. 钢框架-混凝土核心筒混合结构由两种不同特性的结构组成, 其刚度特征、滞回曲线不同. 文献[5]中将混凝土剪力墙和钢框架分别作为分层多质点体系, 组成并联双列多质点振动模型, 采用直接积分方法求解动力方程. 对于高层建筑剪力墙的质量和钢框架的质量分别集中于楼面成为集中质量 m ; 质量矩阵 $[M]$ 为对角矩阵, 结构刚度矩阵可分为钢框架部分和混凝土剪力墙部分, 即 $[K] = [K]_c + [K]_s$, 从而建立动力方程:

文献[5]进行弹塑性分析时,钢筋混凝土部分采用的是三线性滞回曲线,钢结构部分采用双线性滞回曲线. 程序计算结果表明,在结构底部区域,混合结构中钢框架部分承担剪力约为总剪力的 2%~10%,钢框架部分的抗倾覆力矩约为总倾覆力矩的 5%~8%. 虽然看上去筒体承受了绝大部分地震力作用,钢框架以承受竖向荷载为主,似乎有利于发挥两种材料的优势,但是结构抗震防线过于单一的问题便显得尤为突出.

龚炳年在文献[11,12]中介绍了中国建筑科学院所做的一个 23 层的混合结构模型试验,模型的比例为 1:20.分两次对试验模型进行了动力特性试验.试验主要采用脉动法、锤击法和初位移张拉释放法(自由振动法).试验主要方向为模型长向(南北向).试验分两个阶段,第一阶段为模型空载(未加配重)动力特性试验,第二阶段为模型满载(施加配重)后的动力特性试验.试验结果表明:(1)在整个试验阶段,模型的整体工作性能较好,由于钢-混凝土混合结构将钢结构和钢筋混凝土结构有效地组合在一起,使之具有优于钢结构的刚度特性,优于钢筋混凝土结构的变形性能,特别是在受力较大时(试验后期),由于两种结构的优势互补,其整体性能更优于钢结构和钢筋混凝土结构.因此钢-混凝土混合结构在震区具有广阔的应用前景,根据目前的试验结果,完全可以应用于 8 度地震区;(2)钢-混凝土混合结构的顶点位移限制值可以根据钢结构部分与钢筋混凝土结构部分的比例取为 $(1:300 \sim 1:700)H$,其极限位移约为 $1:40H$ (H 为建筑物总高);(3)为了保证钢-混凝土混合结构的整体工作,钢梁与钢筋混凝土墙体的有效连接是至关重要的,应采取可靠措施,确保在强震作用下,梁与墙之间亦有可靠连接.(4)钢-混凝土混合结构的阻尼比约为 $3\% \sim 4\%$.



中国建筑科学研究院的程绍革在文献[13]中对北京国贸二期工程进行了弹塑性反应分析。该工程的主体部分采用了钢筋混凝土核心筒、钢结构外框架体系。标准层平面图如图2所示,采用了平面杆系分析程序,将结构简化为 x, y 两个方向的等效框架。 x 方向计算时,将中央的核心筒部分按抗侧刚度等效成二跨、39层的宽柱框架,外围钢框架部分简化为九跨、38层的框架结构; y 方向计算时,将中央的核心筒部分简化成两跨、39层的宽柱框架,外围钢框架部分简化为八跨、38层的框架结构;计算时仍沿用刚性楼板的假定,因此在宽柱框架与外围框架间用不计轴向变形的二力杆相连。假定杆件不发生弹塑性轴向变形,杆件的屈服仅发生在其端点集中塑性铰处,构件的弹塑性恢复力曲线取双折线模型,构件的轴力-弯矩屈服关系采用以下类型:(1)弯曲屈服型:假定构件的屈服仅由弯矩造成,主要用于框架梁;(2)压弯屈服型:假定构件的屈服是由弯矩和轴力造成,可用于等效墙柱、钢柱和SRC柱。

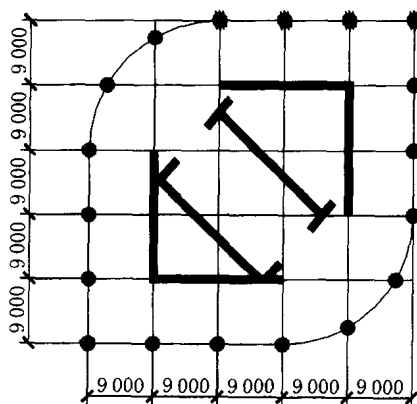


图2

对该等效框架结构进行了结构自振周期、楼层位移的计算,结果与用TBSA进行空间整体计算的结果接近,表明上述方法是可行的,能够反映结构在地震作用下的反应特性。同时输入四条地震波计算结构的地震反应。从计算的结果分析中,笔者给出如下几点建议:(1)混合结构的抗侧刚度及位移控制:对于混合结构,外框柱截面小、柱距大,抗侧刚度则主要取决于内筒刚度,也就是内筒的高宽比。故笔者建议混合结构的高宽比最好不大于相应混凝土结构的高宽比值,取8~10为宜。当外框柱距较密时该值可适当提高。混合结构的位移控制主要是层间位移的控制。在小震作用的弹性阶段取混凝土结构的限值,进入罕遇大震弹塑性阶段取钢结构的限值。主要出于两个方面的考虑,小震阶段,内筒承担全部的水平荷载,应保证内筒完好无损地处于弹性阶段。内筒一旦开裂,结构整体刚度迅速下降,变形大大增加,结构过早地进入弹塑性阶段。较高烈度地震作用时,结构进入非弹性大变形阶段,通过控制层间变形可减小 $P-\Delta$ 效应;(2)混合结构的塑性铰机制:同普通的钢筋混凝土高层结构相比,内筒刚度在结构的总刚度中所占的比重更大,承担的地震力也更多,外框架只承担了极小的地震作用。但从构件的屈服强度来看,内筒的屈服强度比外钢框架相对要小得多。内筒“强度不足、刚度有余”,外框架“刚度不足、强度有余”是其主要特点。遭受罕遇大震时,塑性铰主要出现在内筒剪力墙上,这样的塑性铰机制对结构抗震很不利,一旦内筒发生过大变形和严重破坏,外框钢结构失稳将造成整个结构或局部的倒塌。对此类结构,应有一个框架部分适宜的强度与刚度的比值,使之承担更多的地震作用,同时内筒剪力墙配筋率尤其是暗柱配筋率应适当提高;(3)混合结构的加强层设置:普通的钢筋混凝土高层结构中,设置加强层可减小结构变形,但会造成上下楼层的相对薄弱,外框柱过早破坏。混合结构由于外框柱为钢柱,强度很高,加强层对其影响不大,因此设置水平加强层是解决其变形过大的有效方法。笔者曾对本工程进行过内外斜撑拉结加强、外框增设支撑形成巨型桁架加强两种方案的比较计算,结果前一种方案效果较明显,原因是外框柱距较大,内外协同性能差。

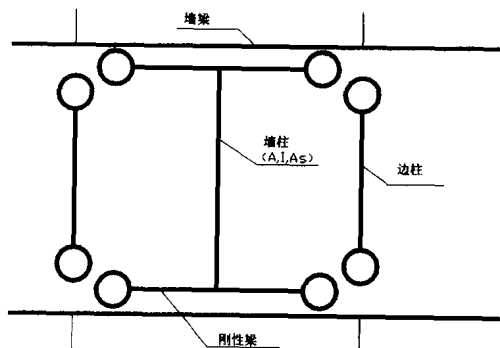


图3

笔者曾对本工程进行过内外斜撑拉结加强、外框增设支撑形成巨型桁架加强两种方案的比较计算,结果前一种方案效果较明显,原因是外框柱距较大,内外协同性能差。

日本的Hiroyuki在文献[14]中详细地介绍了一栋200 m高的钢框架-混凝土核心筒结构的设计以及分析。分析中,将梁、柱、桁架作为梁单元,剪力墙作为墙元,如图3所示,楼板假定为刚性。分析的结果表明:混凝土核心筒承担大约70%的倾覆弯矩,同时巨型桁架的存在减少了核心筒的弯矩;而在核心筒内部,连梁又承担了大约80%的倾覆弯矩;连梁从上至下(5~25层)都出现塑性铰,剪力墙仅

在结构底部(5~7层)出现塑性铰。

丁翔在文献[17]中介绍了同济大学所做的一个缩尺混合结构震动台模型。实测结果表明:小震阶段模型顶点位移为结构高度的 $1/600\sim 1/1000$,大震阶段顶点位移可达结构高度的 $1/45$,说明模型具有较好的延性;钢框架梁与混凝土核心筒连接节点受力复杂,预埋件与混凝土之间的粘结易遭到破坏;在地震作用下,当混凝土核心筒变形进入弹塑性阶段,刚度大幅度下降时,钢框架却依然处于弹性阶段,没有明显的破坏现象,因而,此时钢框架分担的地震力比例会明显增大;随着地震强度的加大,损伤加剧,阻尼增大,自振频率不断降低;混合结构的破坏主要集中于混凝土核心筒底部,属于整体弯曲形破坏。同时该文将混合结构分离为钢筋混凝土剪力墙结构和钢结构分别研究其材料或构件的本构关系以及滞回模型、破坏准则,针对剪力墙区域以及钢框架的不同力学特性,划分不同单元。对于高层建筑混凝土剪力墙,完全采用非线性板壳单元来分析,自由度多,数据输入麻烦,又费时,在实际工程设计中是有困难的。一般来说,联肢剪力墙的弹塑性区集中在剪力墙底部和弱连梁,对该区域可用细化墙元,而对底部以上的剪力墙可采用弹塑性有限条方法分析。然后再进行弹塑性梁单元、墙单元、有限条三维分区耦合求解,来完成整个混合结构的非线性静动力分析。经过与试验值对比分析,该方法能够反映混合结构地震反应过程中的弹塑性力学状态。

文献[18]通过对两组五个钢筋混凝土核心筒试件的低周反复荷载试验,研究了不同轴压比和剪跨比的核心筒破坏机理、承载能力、延性和耗能能力等方面的抗震性能。从本次试验过程看,竖向荷载和水平荷载同时作用下,钢筋混凝土核心筒可能发生的破坏模式有:(1)剪力引起的斜向受拉破坏;(2)剪力引起的斜向受压破坏;(3)薄壁墙截面的压屈失稳或受压主筋压曲;(4)竖向刚度突变引起界面上剪切滑移破坏;(5)墙体底部受弯钢筋屈服破坏;(6)连梁弯曲剪切破坏等。前四种破坏形式均为脆性破坏,破坏发生时,结构的强度和能量耗散能力急剧下降;后两种则是比较理想的破坏形式,即当塑性铰发生在连梁端头和墙体根部时,结构能够以比较稳定的形式耗散地震能量。理想的能量耗散模式是指结构所有的连梁都达到塑性极限状态,所有的墙体底部都产生塑性铰。连梁最直接的功能就是把几组联肢墙连接起来组成核心筒,另一主要作用是传递联肢墙之间的剪力。在连梁中传递的剪力主要是由梁中斜向混凝土压杆承担,它的工作机理与空间桁架相似。在连梁中配置斜向钢筋,由它来传递斜向拉伸和压缩能使连梁具有较好的延性和耗能特性。轴压比的增加对筒体连梁的开裂和破坏影响不大,但对筒体本身的承载能力、破坏模式、延性、耗能有较大影响。

文献[18]中还提出了一种反复荷载下混凝土材料的本构模型。该本构模型采用平面应力状态下的弥散正交裂缝假设,包括正应力与剪应力两个方面本构关系的定义,采用了钢筋弥散假设,考虑了钢筋屈服、应变硬化、循环卸载与再加载规则等因素。采用八结点平面应力单元建立了钢筋混凝土核心筒体非线性有限元分析模型,编制计算程序进行了单向和循环荷载下的非线性分析,计算结果与试验结果吻合较好。

3 总 结

本文介绍了国内外超高层混合结构整体抗震分析的研究状况。从国内外的研究方法上看,对混合结构的弹塑性抗震分析正从先期的混合分层模型向杆系-分层模型甚至平面应力元模型发展。层模型自由度较少,计算工作量也较少,但其计算精度较低,只适合设计方案的估算;杆系模型较分层模型计算精度高,但对剪力墙和筒体的模拟离散性较大;最近发展起来的应力元模型其计算的精度大大提高,但该模型对混合结构的弹塑性分析仍有很多难点,如:多向受力混凝土的本构关系;钢筋与混凝土的粘结;混凝土裂面效应等一系列处于研究状态的问题。采用平面应力元对混合结构进行非线性地震反应分析与实际工程设计相比,尚有不小的差距。

参 考 文 献

- [1] 郑浩,王全凤. 对外钢框架-混凝土核心筒结构的初步探讨. 福建建筑, 2000, (3): 24~26
- [2] 郑敬有,丁翔. 高层建筑钢-混凝土混合结构研究概况. 造船工业建设, 1999, (2): 46~47
- [3] 王燕. 世界超高层建筑结构材料发展分析. 青岛建筑工程学报, 1997, (3): 26~30
- [4] 李国强. 当代建筑工程的新结构体系. 建筑结构, 2002, (7): 22~26
- [5] 赵西安. 高层建筑组合结构分层模型弹塑性动力分析. 建筑结构学报, 1989, (6)
- [6] John W Wallace, Akira Wada, hybrid wall systems: us~japan research, 12WCEE
- [7] 李国强,丁翔等. 高层建筑钢-混凝土混合结构分区耦合分析模型及开裂层位移参数分析. 建筑结构, 2002, (2): 21~25
- [8] 李国强,姜丽人等. 高层建筑钢-混凝土混合结构简化分析模型. 建筑结构, 1999, (6): 12~14
- [9] 李国强,周向明. 高层建筑钢-混凝土混合结构模型模拟地震振动台试验研究. 建筑结构学报, 2001, (4): 2~7
- [10] 姜丽人. 高层建筑钢-混凝土混合结构地震反应简化分析模型及位移参数分析. 同济大学硕士论文
- [11] 龚炳年,郝锐坤. 钢-混凝土混合结构模型动力特性的试验研究. 建筑结构学报, 1995, (6): 37~42
- [12] 龚炳年,郝锐坤. 钢-混凝土混合结构模型试验研究. 建筑科学, 1994, (1): 10~14
- [13] 程绍革. 钢-混凝土筒混合结构弹塑性反应分析及探讨. 建筑结构, 1998, (6): 33~36
- [14] Hiroyuki Kuribayashi, Design Example of Core~RC and Exterior-Steel-Frame Combined High-rise Building, Proceedings of 6th ASCCS conference, Los Angeles, USA, March 22—24, 2000
- [15] 吕西林,李俊兰. 钢筋混凝土核心筒体抗震性能试验研究. 地震工程与工程震动, 2002, (3)
- [16] 周向明,李国强等. 高层钢-混凝土混合结构弹塑性地震反应简化分析模型. 建筑结构, 2002, (5): 26~30
- [17] 丁翔. 高层建筑钢-混凝土混合结构非线性抗震性能理论与试验研究. 同济大学博士论文
- [18] 李俊兰. 钢筋混凝土核心筒体抗震性能研究. 同济大学博士论文

Research summarization of reinforced concrete core wall-steel frame hybrid structures in super high-rise buildings

Wu Mingang Lu Xilin

(Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: It is very important for reinforced concrete core wall-steel frame hybrid structures in super high-rise buildings. But earthquake resistant analysis of this structure is not enough. This paper will introduce both the research state of earthquake resistant analysis about hybrid structures and the application of layer model, linkage model, plant stress element model, also including the result of analysis at home and abroad.

Key words: hybrid structure; elasto-plastic analysis; earthquake resistant analysis; model test

钢筋混凝土板三维单元非线性有限元分析

周 昕 沈蒲生

(湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 本文在非线性有限元分析理论的基础上, 编写了可用于钢筋混凝土双向板非线性分析的程序. 程序中采用带钢筋膜的八结点六面体单元, 应用初应力法避免非线性分析中每次组装和分解总刚, 使计算较快收敛. 计算结果能全过程分析钢筋混凝土双向板的受力至破坏过程, 与实验结果吻合较好.

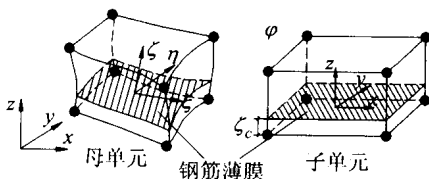
关键词: 钢筋混凝土板; 带钢筋膜的八结点六面体单元; 初应力法; 增量法

1 引 言

现有钢筋混凝土板有限元分析是根据小挠度理论建立基本方程, 采用分层组合式模型^[1,2], 按平面应力问题处理材料非线性. 但钢筋混凝土双向板的单元, 特别是支座处和集中力作用处的单元, 处于三向受力状态, 因此宜采用三维钢筋混凝土有限元方法进行数值分析. 本文主要目的是用能反映混凝土主要受力特征的本构模型, 探讨用三维钢筋混凝土非线性有限元方法分析钢筋混凝土板的受力特征与极限承载力. 引入初应力法^[3], 节约了大量的计算时间.

2 带钢筋膜的八结点六面体单元^[4]

八结点六面体单元(见图 1)为等参元, 假定钢筋与混凝土之间无相对滑移, 与一般均匀连续体不同之处在于这种组合单元包括了钢筋对单元刚度的贡献.



$$\text{取形函数: } N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi_i)(1 + \eta_i)(1 + \zeta_i) \quad (1)$$

未计钢筋贡献的单元刚度矩阵的表达式:

$$[K_c] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] [J] d\xi d\eta d\zeta \quad (2)$$

图 1 带钢筋薄膜的八结点六面体单元

现考虑等效钢筋薄膜的贡献. 如图 1, 钢筋薄膜中面坐标为常量. 钢筋只考虑面内应变:

$$\{\epsilon'\} = \{\epsilon'_x \quad \epsilon'_y \quad \epsilon'_{xy}\}^T = \left\{ \frac{\partial u'}{\partial x} \quad \frac{\partial v'}{\partial y} \quad \frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right\}^T \quad (3)$$

钢筋薄膜对单元刚度的贡献矩阵为: $[K_s] = \iint [B]^T [L]^T [D_s] [L] [B] t dA \quad (4)$

$$[L] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & l_1 m_1 & m_1 n_1 & n_1 l_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & l_2 m_2 & l_2 m_2 & l_2 m_2 \\ 2l_1 l_2 & 2m_1 m_2 & 2n_1 n_2 & (l_1 m_2 + l_2 m_1) & (m_1 n_2 + m_2 n_1) & (n_1 l_2 + n_2 l_1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

l_1, m_1, n_1 和 l_2, m_2, n_2 是坐标轴 ξ 和 η 的方向余弦.

最后,包括混凝土和钢筋贡献在内的整个单元刚度为: $[K] = [K_c] + [K_s]$ (6)

3 材料非线性

3.1 混凝土本构关系

根据 Bathe 提出的方法,采用 Murray 等效应力-应变曲线,按应力阶段将混凝土看成各向同性、正交各向异性材料,按等效应力应变曲线来计算变化的切线模量,并结合混凝土的开裂和压碎情况.

Elwinad - Murray 应力应变曲线:

$$\sigma = E_0 \epsilon / \left[1 + \left(R + \frac{E_0}{E_c} - 2 \right) \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - (2R - 1) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 + R \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^3 \right] \quad (7)$$

$$\text{式中 } R = E_0 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_u} - 1 \right) / E_c \left(\frac{\epsilon_u}{\epsilon_0} - 1 \right)^2 - \epsilon_0 / \epsilon_u \quad (8)$$

三维应力应变本构关系具体计算公式如下:

(1) 拉伸而未开裂,压应力很小的情况下,把混凝土看成各向同性材料,其切线模量取为初始弹性模量,物理矩阵 D 取为弹性矩阵 D_e .

(2) 三向受压时,最大压应力小于 0.4 倍单轴峰值应力即 $|\sigma| \leq 0.4\sigma_c$ 时,可处理成各向同性非线性材料: $[D]_p = \frac{E_1}{E_0} [D]_e$ (9)

E_i 为等效切线模量,取为三个主应力 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 方向上的切线模量按应力的加权平均值.

(3) 当压应力较大,即 $|\sigma| \leq 0.4\sigma_c$ 时,把混凝土处理成正交异性的非线性材料.

$$[D]_p' = \frac{1}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} (1-\mu)E_1 & & & & & \\ \mu E_{21} & (1-\mu)E_2 & & & & \\ \mu E_{31} & \mu E_{32} & (1-\mu)E_3 & & & \\ & & & \frac{(1-2\mu)}{2}E_{12} & & \\ & & & & \frac{(1-2\mu)}{2}E_{23} & \\ & & & & & \frac{(1-2\mu)}{2}E_{31} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 E_{ij} 取为 E_i 和 E_j 的应力加权平均值.

(4) 某主拉应力超过混凝土的抗拉强度时,认为沿主拉应力方向混凝土开裂,并取

$$[D]_p' = \frac{E}{(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} n_n & & & & & \\ \mu n_n & 1-\mu & & & & \\ \mu n_n & \mu & 1-\mu & & & \\ & & & \eta \frac{1-2\mu}{2} & & \\ & & & & \frac{1-2\mu}{2} & \\ & & & & & \eta \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 n_n, η 称为残余刚度系数. 本文计算中 $n_n = 0.001, \eta = 0.5$.

(5) 当达到破坏时,认为 $E_i = 0$ (本文计算中取 $0.001E_0$)

破坏准则选用 W. F. Chen 的三参数屈服准则: