

**第18届
全国结构工程学术会议
论文集**

第Ⅲ册

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

No. III

主编：崔京浩

**《工程力学》杂志社
2009.10**

序

2008 年金秋时节，举世瞩目的北京奥运刚刚闭幕，凭借“同一个世界，同一个梦想”的强劲东风，踏着“和平、友谊、进步”的北京乐章，迎来了第 17 届全国结构工程学术会议，使我们的会议平添了几分喜庆和昂扬。

这次会议出版论文集 3 册，共收录论文 352 篇，内容包括：力学分析与计算；钢结构、材料与构件；钢筋混凝土结构、材料与构件；岩土、地基与基础、隧道及地下结构；公路、铁路、桥梁、水工与港工；抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；舰船、车辆、航空航天结构及交叉学科等 8 个方面，几乎囊括了国民经济的各个行业和技术科学的各个领域。

本届会议的主办单位之一华中科技大学，是直属教育部领导，涵盖文、理、工、医、农等多达 11 个学科门类的综合性高校，是国家“211 工程”和“985 工程”重点建设的高水平大学。它的土木工程与力学学院是学校传统的重点学院，众所周知的《固体力学学报》由该院承办，该学报的英文版是我国最早被 Sci 收录的期刊之一，是我国力学界公认的历史悠久的上乘学术刊物。

本届会议的大量会务工作是由学校土木工程与力学学院承担的，对他们的辛勤劳动，我们表示衷心的感谢。

今年(2008 年)正值中国力学学会结构工程专业委员会成立 10 周年，为此我们撰写了一篇祝贺结构工程专业委员会成立 10 周年的文章“十年铸剑 初见成效”，发表在论文集第 I 册的前面，它既是一份汇报，又是一份征求意见的公示书。热诚欢迎专家们建言献策。

崔京浩



2008 年 8 月

第 18 届全国结构工程学术会议论文集目录

第Ⅲ册目录

6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

新型多层住宅结构抗震研究现状与展望.....	曹万林 杨兴民 张建伟 董宏英 (001)
地震作用下深水高桩承台体系桥梁结构——水相互作用分析.....	曹新建 袁万城 高 永 魏 凯 (008)
非线性随机介质场地的地震反应分析.....	陈 原 李 杰 (015)
简化的能力谱法及其应用.....	陈兴冲 夏修身 (021)
考虑温度影响下的混凝土梁桥的模式参数识别研究.....	狄生奎 王立宪 杜永峰 李 慧 (025)
单自由度结构地震激励下瞬时均方根响应的小波变换估计.....	杜 鹏 孙 智 (032)
广东科学中心 E 区隔震支座监测预警指标研究与应用.....	范 雁 张季超 许 勇 (037)
LRB 基础隔震结构在近断层脉冲型地震作用下的碰撞响应.....	符 蓉 叶 昆 李 黎 (041)
椭圆曲线滑道辊轴摩擦摆隔震系统性能的分析计算.....	葛 楠 苏幼坡 王兴国 (046)
同时设置金属和粘滞阻尼器的钢框架结构减震效果初探.....	郭道远 裴星洙 (052)
网络化结构实验室-桥梁结构远程拟动力试验平台开发与应用.....	郭玉荣 范云蕾 曾 东 肖 岩 (056)
设防水准对典型框架结构土建工程造价的影响.....	韩 淼 李守静 刘健兵 (061)
烟囱爆破拆除方案的模拟研究.....	何 煌 魏万鑫 (067)
纵向地震动输入下的大型渡槽结构减振控制研究.....	黄 亮 王 博 徐建国 侯玉洁 (071)
非结构构件地震破坏机理及抗震性能分析.....	黄宝锋 卢文胜 (077)
爆炸试验中电磁脉冲对测试信号的影响.....	黄家蓉 王 幸 孙桂娟 (084)
静动力分析法及其在高层框架-核心筒结构减震分析中的应用.....	黄瑞新 李爱群 张志强 赵耕文 (089)
悬吊煤斗结构减震理论与振动台试验研究.....	纪金豹 张士练 闫维明 马 华 (096)
混凝土 SHPB 试验的数值模拟.....	焦楚杰 李 楦 高 乐 (101)
多维地震动输入下钢筋混凝土高层结构的弹塑性反应分析.....	李 兵 赵乃志 陈 鑫 (107)
地震作用下隔震桥梁的动力稳定分析.....	李 黎 刘文静 张 行 (111)
防屈曲支撑的实时能量守恒子结构试验.....	李 妍 吴 斌 欧进萍 (116)
土与结构相互作用振动台试验模型土设计方法分析.....	李 岳 姜忻良 (123)
某核安全壳的隔振减震分析.....	李冬梅 陈树华 侯钢领 (127)
广东科学中心 E 区结构模型振动台试验研究.....	李鹏程 张季超 许 勇 (131)
泡沫铝-钢层合板衰减爆炸荷载数值模拟.....	林 茂 余晓青 徐一洋 (136)
四渡河悬索桥抖振响应时域分析.....	龙晓鸿 李 黎 胡 亮 (140)
单地震动记录随机增量动力分析.....	吕大刚 于晓辉 王光远 (145)

钢筋混凝土框架结构抗震性能水平划分标准.....	吕伟荣 谭 磊 王 猛 刘锡军 (150)
错层建筑在汶川地震中受损分析.....	毛蓉萍 (155)
曲线钢箱梁立交桥地震反应分析.....	苗 峰 张 哲 李斐然 (159)
一座新型协作体系桥地震响应分析.....	牟瑛娜 张 哲 汤铮飞 苗 峰 (163)
重物冲击下悬臂梁动力响应的能量法.....	牛文杰 (168)
Pushover 方法在既有结构安全性鉴定中的应用.....	潘 毅 赵世春 杨 成 林拥军 代 杰 (173)
双三角形激励冲击响应谱数值分析.....	彭 彪 王 基 (178)
纤维层合板抗弹性能数值模拟分析.....	卿尚波 晏麓晖 (182)
松软基础上几幢高层建筑振动特性测试.....	史文海 李正农 (187)
Kelvin 模型阻尼器连接相邻结构减震优化分析.....	孙黄胜 陈士海 (191)
矩形底扁球面网壳非线性振动的频率特性.....	王 钢 韩明君 王新志 (197)
变电构架柱地震反应时程分析.....	王 磊 吕 涛 朱爱珠 朱宏平 (201)
空中爆炸大跨度桥梁冲击波荷载初探.....	王 赟 蒋志刚 胡 平 (206)
最小二乘时滞实时在线估计方法的试验研究.....	王 贞 吴 斌 (211)
顶点斜向冲击荷载下 K8 单层球面网壳的动力响应.....	王多智 支旭东 范 峰 沈世钊 (219)
工程结构隔震理论与技术.....	王林建 刘树堂 (224)
组合结构桥梁抗震潜力及性能研究.....	魏 凯 袁万城 曹新建 (229)
某超限高层结构软钢阻尼器振动控制的试验研究.....	闻 辉 鲁 亮 (235)
地震波时变谱估计方法比较研究.....	吴巧云 朱宏平 (241)
半刚性连接对钢框架结构抗震性能的影响.....	吴兆旗 姜绍飞 (247)
抗震框架结构位移和滞回耗能响应随结构损伤的变化分析.....	肖明葵 王肖巍 边 江 (253)
基于小波技术改进的 AR 算法在随机场模拟中的应用.....	徐 林 叶继红 (258)
烈度指标函数对 IDA 曲线离散性的影响.....	杨 成 潘 毅 赵世春 李彤梅 李英民 (264)
不同矢跨比对支承网壳动力性能的影响.....	杨 飏 李 娜 王 凯 (269)
匀速移动均布荷载作用下弹性支座简支梁冲击系数研究.....	杨 予 (273)
大跨度斜拉桥的地震位移控制.....	杨喜文 (279)
多级力控制随机 Pushover 方法.....	于晓辉 吕大刚 王光远 (283)
火灾全过程后钢筋混凝土柱滞回性能试验研究.....	张家广 霍静思 肖 岩 (288)
再生混凝土中高剪力墙的抗震性能研究.....	张建伟 曹万林 朱 珩 董宏英 (293)
土钉长度对边坡抗震性能影响的研究.....	张明聚 吕 琦 李立云 王诚浩 (298)
一种新型全钢防屈曲支撑抗震性能的试验研究.....	赵俊贤 吴 斌 欧进萍 (303)
黏弹性边界在土石坝地震反应分析中的应用.....	周晨光 孔宪京 邹德高 胡志强 (310)

7. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

CFRP 加固 H 型钢梁数值模拟分析.....	曹 靖 王建国 完海鹰 (317)
碳纤维布折叠多层制作的 CFRP 片材力学性能的测试.....	陈小英 陈明政 李唐宁 (321)
软岩大断面隧道施工对地表的影响.....	邓洪亮 付孝银 (326)

旧水泥砼道面沥青加铺层抗反射裂缝试验研究.....	董 昊 谢卫红 李高健 辛家宝 (331)
基于无网格法的反向器拓扑优化设计及性能测试.....	杜义贤 田启华 吴正佳 (335)
改进蚁群算法在空间桁架中的应用研究.....	段敬民 陈少杰 赵洪波 (342)
思南路 47、48 号街坊风貌保护区砖木结构别墅的检测.....	樊建良 郑玉庆 (347)
最大熵法可靠度理论在工程应用中的改进.....	高 渊 叶继红 (353)
定日镜结构优化分析.....	宫 博 李正农 王莺歌 王志峰 (359)
基于中介状态的串联工程系统抗震优化设计.....	韩 侠 沈小伟 王大均 (363)
扣件式钢管模板支架的试验和数值模型研究.....	胡长明 曾凡奎 王 静 沈 勤 (372)
旧水泥砼路面碎石化施工技术及应用.....	黄斌宇 梁维广 冯在高 (377)
基于最大裂缝宽度的钢筋混凝土桥梁可靠度分析.....	焦美菊 孙利民 (382)
聚合物钢网架仓库的性能化防火设计.....	兰 静 张 旭 王晓纯 白玉星 高建岭 (388)
加固钢箱预推力作用下的混凝土拱桥内力分析.....	李大庆 舒正超 殷俊华 李应钦 汤 鹏 (394)
结构动力可靠度的条件反应估算法.....	刘 佩 姚谦峰 (401)
城市化建设带来的水问题.....	刘 颖 茅泽育 (405)
已破损非预应力钢筋混凝土吊车梁的试验研究.....	刘海生 (409)
浅谈超限高层建筑结构抗震设防审查.....	刘利惠 鲁 亮 (413)
位移约束桁架尺寸优化设计的改进齿形法.....	刘树堂 (419)
医院医用流体系统施工技术.....	刘越岭 (425)
基于单位脉冲相应的框架结构损伤检测.....	吕中荣 刘济科 (430)
风力发电塔井格梁板式预应力锚栓基础设计研究.....	马人乐 孙永良 黄冬平 (434)
碳纤维布约束混凝土圆柱抗压性能研究.....	苏 骏 (439)
某梁式转换层双塔结构的抗震设计.....	苏艳桃 许 勇 (444)
现代竹结构住宅抗震性能研究.....	肖 岩 陈 国 杨瑞珍 余立永 周 泉 (448)
时代广场时代大厦桩基设计探讨.....	田秀荣 (454)
基于 ANSYS 的等截面臂架腰绳优化.....	王 欣 张 静 郑亚辉 高顺德 (459)
基于可靠度指标的空心钢管混凝土轴心受压构件设计.....	王宏伟 钟善桐 (467)
某地下室混凝土裂缝灌浆堵漏补强工程施工技术探讨.....	韦莲红 张季超 (472)
防护工程综合防护的模型构建及其优化研究.....	夏逸平 陶西贵 (476)
装配式竹结构房屋在汶川地震灾后安置的应用.....	肖 岩 余立永 单 波 (480)
历史保护建筑砖材强度检测方法研究.....	肖煌俊 刘卫东 谈晓青 杨伟波 (488)
高大模板支架极限承载力的计算方法.....	谢 楠 王 勇 李 靖 (492)
基于群锚效应的后锚固受拉计算方法分析.....	谢 群 陆洲导 (498)
大型 LNG 低温储罐预应力施工.....	杨建江 杜 帅 冯 迪 (504)
既有砌体结构建筑抗震加固和节能改造一体化的提出及应用.....	杨 博 李 珠 (511)
现代竹结构车行桥梁的建造与研究.....	肖 岩 周 泉 单 波 (516)
在役历史保护建筑结构时变安全性分析.....	杨伟波 刘卫东 苏海华 (523)
石化企业钢结构聚合物仓库性能化防火设计.....	杨彦海 高建岭 白玉星 王晓纯 (527)
冲击荷载下混凝土结构的有限元分析.....	杨建江 王蓉蓉 崔秋君 (531)

基于灰色关联度和经济优化相结合的服役桥梁维修加固决策.....	张 爽 谢 剑 (538)
青岛游泳跳水馆复杂异形网架结构抗震性及可靠性研究.....	张纪刚 张同波 欧进萍 (544)
飞机滑行道桥健康状况动静载力学分析.....	张宇辉 张献民 (551)
深圳宝安体育场屋盖索膜结构的找形和索的剖断分析研究.....	赵 冉 魏德敏 孙文波 李 頔 (555)

8. 舰船、车辆、航空航天结构及交叉学科

充气悬臂梁的弯曲失效行为研究.....	陈 帅 李 斌 杨智春 (560)
基于概率的车载电子设备隔振性能分析.....	陈建军 杨林硕 朱增青 (566)
高职院校建工专业教学改革的探讨.....	丁 恒 (570)
蜂窝板 GA-PSO 模型修正.....	孔宪仁 秦玉灵 罗文波 (575)
FDPSO 立管涡激振动响应分析.....	雷 松 张文首 赵 岩 岳前进 (580)
复合材料 T 型单元损伤演化的声发射特性研究.....	李 仲 黄华斌 魏宏艳 白生宝 张德俭 (586)
加筋板多处损伤的预制及检测方法、维修寿命分析.....	刘秀丽 陈 莉 魏玉龙 闫文伟 (593)
结构初始广布疲劳损伤发生预估的概率模型.....	薛景川 弓云昭 (597)
不同浮重比水中悬浮隧道动力特性的实验研究.....	陆 维 葛 斐 王 雷 龙 旭 洪友士 (601)
电阻应变计的技术要求、试验方法及应变电测方法的应用技术.....	沈观林 (608)
嵌入法求解直井多级抽油杆柱系统纵向振动问题的频率和振型函数.....	徐永君 赵清清 于俊波 张传绪 (612)
复合材料微波修复技术在舰艇结构损伤抢修中的应用.....	许陆文 董 露 (620)
金属薄壁结构剩余强度估算方法研究.....	薛景川 张 茂 樊优优 窦秋芳 (624)
基于非线性动力学理论的故障诊断方法与进展.....	张庆虎 高普云 (628)
轮胎承载机制有限元分析.....	张士恒 危银涛 (632)
钻柱纵向振动固有频率分析.....	张治勇 何 洋 胡中伟 (638)
《工程力学》论文编排格式命令操作步骤.....	黄丽艳 (642)

新型多层住宅结构抗震研究现状与展望

曹万林, 杨兴民, 张建伟, 董宏英

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 多层住宅适用于低密度住宅小区建设, 是目前中小城市和大城市周边城镇采用较多的住宅形式。粘土砖禁用后, 研究替代传统的实心粘土砖住宅结构的新型多层住宅结构备受关注。本文介绍了几种常见的新型多层住宅结构体系, 并分析比较了它们的优缺点, 在此基础上, 介绍了笔者提出的施工简便、易于推广、经济效益明显、应用前景广阔的新型多层剪力墙节能住宅结构的研究与应用概况。

关键词: 多层住宅; 砌体结构; 混凝土结构; 轻钢结构

1 引言

住宅建筑是与人们生活最密切的建筑类型之一, 在人类社会发展和生活环境变迁过程中扮演着重要的角色。我国是一个多地震国家, 结构的抗震安全性十分重要。我国又是一个发展中国家, 为了节约土地和可持续发展, 各大中城市已逐步禁止建造传统的多层实心粘土砖住宅结构。为此, 研究和开发新型抗震节能多层住宅体系是十分必要和有意义的。本文就目前我国新型多层住宅建筑体系的研究应用状况及特点作简要介绍, 并介绍了笔者关于多层住宅的研究情况, 探讨了施工简便、易于推广、经济效益明显、应用前景广阔的新型多层剪力墙节能住宅结构。

2 砌体新型多层住宅结构体系

砌体结构具有因地制宜、就地取材、造价低、施工方便的优点。目前, 我国绝大部分多层住宅仍采用砌体结构。国内外已发生的地震震害证明, 砌体结构经强烈地震破坏是严重的。我国已有很多大中城市已禁止使用实心粘土砖, 为防止对土地资源的破坏, 采用工业废料生产的各类砖, 如煤干石、页岩、粉煤灰等作为原料制成的实心和多孔砖来取代粘土砖。我国较长一段时间内还会应用这种已有上千年应用历史的砌体结构。

混凝土小型空心砌块砌体结构是一种新型的砌体结构形式。混凝土小型空心砌块取材广泛、施工方便、造价低廉、强度高、延性好, 是代替实心和多孔粘土砖墙材的主导产品。和粘土砖相比, 砌块建筑的最大优势在于其生产不毁坏耕地和能耗较低, 符合国家技术发展政策, 这是砌块结构得以发展的根本前提。

在国外, 砌块建筑有较为广泛的应用。美国在 19 世纪末、20 世纪初就开始将混凝土小型空心砌块应用于建筑业中。在国内, 砌块建筑起步较晚, 自 60 年代起, 在我国广西、贵州等地, 由于山多地少, 粘土资源缺乏而砂石资源丰富, 率先将混凝土砌块推入建筑市场。1983、1986 年在广西南宁修建了配筋砌块砌体 10 层住宅楼和 11 层办公楼试点房屋, 但是因缺乏系统试验没有得到推广。90 年代初, 在总结国外配筋混凝土砌块试验研究的基础上, 我国在配筋砌块的配套材料, 配套应用技术的研究上获得了突破^[1], 1995 年颁布实施的《混凝土小型空心砌块建筑技术规程》(JGJ/T 14—95), 对我国砌块建筑的推广与应用起到了促进作用^[2]。在此基础上开展了更具代表性和针对性的试点工程, 如: 1997 年根据哈尔滨工业大学等单位的试验研究, 由中国建筑东北设计院设计, 在辽宁盘锦建成了一栋 15 层配筋砌块砌体剪力墙住宅楼, 所

基金项目: 北京市科技攻关课题 (Y060506000007022); 国家十五科技支撑计划课题 (2008BAJ08B14)

作者简介: *曹万林 (1954-), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 主要从事工程抗震研究 (E-mail: wlciao@bjut.edu.cn)

杨兴民 (1979-), 男, 河北沧州人, 博士研究生, 主要从事工程抗震研究

张建伟 (1971-), 男, 河北丰润人, 副教授, 主要从事工程结构抗震及加固技术研究

董宏英 (1966-), 女, 辽宁锦州人, 副教授, 主要从事工程结构抗震研究

用砌块是由美国引进的砌块成型机生产的,砌块强度等级达到 MU20^[3-4]。1998 年在同济大学、哈尔滨工业大学、湖南大学等单位合作试验研究的基础上,上海住宅总公司在上海市园南新村建成一栋配筋砌块砌体剪力墙 18 层住宅,所用砌块也是用美国设备生产的 MU20 砌块。《砌体结构设计规范》(GB50003—2001)中增加了配筋砌块砌体剪力墙结构的设计方法、计算公式和构造要求,适应了城市建筑和墙体改革的需要,使建筑中高层乃至高层配筋砌块砌体剪力墙结构成为可能。

2004 年,新的《混凝土小型空心砌块建筑技术规程》(JGJ/T14—2004)总结了近十年来砌块建筑设计与工程实践经验,增加了防止砌块建筑墙体开裂的构造措施,对不同抗震设防地区提出了增强抗震性能的构造措施。在《砌体结构设计规范》(GB50003—2001)的基础上,新规程的颁布实施必将有力推动我国砌块建筑的推广与应用。

混凝土小型空心砌块建筑遍及公寓、别墅、办公楼、教学楼及其它公用建筑,有低层也有多层。在混凝土小型空心砌块建筑的推广应用过程中,发现其存在以下问题:

1. 结构普遍存在“热、裂、渗、漏”等质量问题,在施工工艺上也难以把握。
2. 结构的抗剪、抗拉强度由砌块的实体部分面积与砂浆的粘结强度来决定,使得砌体的抗剪、抗拉强度很低,因此在结构或构件中存在着裂缝开展过早、过大、抗剪强度低、抗震性能及节能效果差等问题。
3. 在混凝土小型空心砌块的结构施工过程中,柱子立筋像筷子一样插入砌块竖向空腔的芯柱内,钢筋成束状、没有绑扎箍筋,钢筋不能充分发挥其作用。
4. 芯柱内灌注混凝土无法振捣密实,砌筑砂浆不易饱满,难以保证其抗震的可靠性。

3 轻钢多层住宅结构体系

轻钢多层住宅是以工厂化生产的钢梁、钢柱为骨架,同时配以轻质墙板等新型材料作为围护结构和内隔墙建造而成。它与同面积的建筑楼层相比,钢结构住宅楼的重量可减轻近 30%。同时,由于钢材具有较强的延展性,能较好地消除地震力,抗震性能好^[5-8]。我国钢结构住宅于 20 世纪 80 年代开始,目前正处于起步的阶段,尽管在北京、上海等地都有了钢结构住宅建筑试点工程,但是在应用过程中存在如下几个问题^[9-11]:

1. 我国目前还没有钢结构体系住宅专门的技术规范,使用时仅能参考已有的钢结构设计规程、高层民用建筑钢结构设计规程、建筑防火设计规程、住宅建筑设计规范等。技术水平及标准参差不齐,需进一步研究开发并设计出经济合理的具有广泛推广价值的钢结构体系。
2. 住宅建筑的平面布局决定了钢结构的柱网间距较小,加之多层建筑的总高度低,钢构件强度高、自重轻的材料性能优势难以发挥,每建筑平方米用钢量较高。据统计,钢结构多层住宅的造价,高于普通的钢筋混凝土结构 20~30%。
3. 钢结构多层住宅的墙体,大多采用轻型砌块,难以避免抹灰层的空鼓开裂。型钢与砌体之间的温度线膨胀系数差异较大,钢材与砌体之间的衔接处是产生温度裂缝造成外墙渗漏的多发部位。
4. 钢结构柱的安装,通常是一节跨三层,钢结构框架自身的稳定、以及与电梯井筒钢筋混凝土结构的水平连接都还存在一些问题。
5. 型钢构件的防锈、防腐处理难度较大。诸多因素使钢结构住宅造价高、技术不成熟、质量有缺陷、难以被市场广泛接受。

4 混凝土新型多层住宅结构体系

钢筋混凝土多层住宅结构体系包括矩形柱框架、异形柱框架和短肢剪力墙等三种结构。其中,现行的《建筑结构抗震设计规范》(GB50011—2001)对矩形柱框架结构的高度作了详细的规定,高宽比和层数作了限制,对抗震设计方法作了规定。对于异形柱框架住宅结构国家还没有系统的规范,目前只有少数地方

定了相应的地方规程。如广东省标准《钢筋混凝土异形柱设计规程》(DBJ/T15—15—95), 1995、天津市标准《大开间住宅钢筋混凝土异形柱框轻结构技术规程》(DB29—16—98), 1998、安徽省地方标准《安徽省异形柱框架轻质墙结构(抗震)设计规程》(DB34—222—2001), 2001, 这些地方规程在设计和施工中起到了一定的指导作用。异形柱框架在使用时, 当柱截面、轴压比、抗侧刚度不能满足要求时, 常用的做法是, 增大异形截面的肢长, 使墙肢高宽比大于 4.0, 从而演变为短肢剪力墙。我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2002)对短肢剪力墙的定义是: 短肢剪力墙是指墙肢截面高度与厚度之比为 5~8 的剪力墙。

4.1 矩形柱框架结构体系

钢筋混凝土矩形柱框架结构是由梁、板、柱及基础组成的一种建筑结构体系, 由框架梁、柱及基础构成平面框架, 各平面框架再由连梁联系起来, 形成空间结构体系。该体系结构合理, 力传导路径明确, 其传力方式为荷载由楼板传递给梁, 再由梁传递给柱, 由柱传递给基础, 设计方法相对比较简单。

矩形柱框架结构的优点如下:

1. 在合理的高度和层数的情况下, 框架结构能够提供较大的建筑空间, 其平面布置灵活, 可适合多种工艺与使用功能的要求。需要时, 可用隔断分割成小空间, 或拆除隔断恢复成大空间。
2. 外墙用非承重构件, 可使立面设计灵活多变。如果使用轻质隔墙或外墙, 就可以大大降低房屋自重, 节约材料。特别是当底部作为公共设施时, 由于竖向构件数量少且都是柱子, 对平面布置较有利。
3. 框架结构的构件较单纯, 施工简单且周期较短。

矩形柱框架结构的缺点如下^[12~13]:

1. 由于住宅的房间分割一般都不规整, 柱网难以布置。若在分开隔墙相交处设柱, 则难以形成规则的框架柱网若按规则框架要求设柱, 则柱位与分隔墙相错开, 影响平面使用和抗震性能。
2. 不论如何布置柱网, 都存在由于柱截面大于隔墙厚度而造成柱子的外凸特别是分隔墙较薄时, 影响建筑平面和使用要求。
3. 从受力的角度看, 框架结构抗侧力性能较差, 当为不规则柱网时更为明显。因而往往会难以满足抗侧力的需要而大大加重中部筒体的负担。虽然可以通过与建筑设计的配合、合理调整构件布置及尺寸等而获得解决, 但难度较大, 往往受条件限制而难于实现。
4. 框架之间的填充墙一般用非承重砌块, 非承重砌块填充墙本身也存在“热、裂、渗、漏”的弊病。

4.2 异形柱框架结构体系

由于在多层住宅设计中, 采用普通矩形柱截面, 会在室内露出较大的梁柱棱角, 影响到整个房间的美观平整, 也不利于每个家庭的二次装修和家具的布置, 因而在多层住宅如果根据建筑平面布置, 全部或部分采用异形柱截面, 较好地解决了上述问题, 从而改善了建筑空间与使用条件。

异形柱是指柱肢的截面高度与柱肢宽度的比值在 2~4 之间, 相对于普通矩形柱而言是异形的柱子。异形柱框架轻型结构体系是近年来逐渐形成和发展起来的, 它的推广应用能够产生较好的经济效益、环保效益和社会效益。钢筋混凝土异形柱框架的边柱为 T 形、中柱为十字形、角柱为 L 形, 此外楼梯间处还常出现 Z 形截面柱。

异形柱框架轻型结构有着许多显著的优点:

1. 提高有效面积比。异形柱框架结构由于能够避免采用矩形柱而形成的柱楞, 从而使房间的视觉和平面布置得到极大改善, 因此受到用户广泛欢迎。该体系的优点是异形柱的肢厚与墙厚相等或稍宽, 与一般框架结构相比, 这种结构可增加使用面积 5~10%左右。
2. 房间使用质量高。室内空间整齐, 家具摆设容易, 尤其在层数较多的情况下, 如采用矩形柱, 柱子外露较多, 使用受到相当大的限制, 而且不美观
3. 可使用新形墙体材料。由于框架承重, 墙体可采用轻质墙体材料碎渣砖、粉煤灰加气混凝土砌块等, 可以节约耕地, 利用大量工业废料, 减少污染, 净化环境。
4. 实现住宅大开间结构。由于采用全框架结构, 与砖混结构相比, 可获得较大的空间, 满足接待、学习、工作等多种功能要求, 而且墙体均为填充墙, 可用轻质墙体材料任意分隔, 墙下可不设梁, 极大程度

地满足了住户个性化需求。

虽然异形柱在一定程度上可以解决普通框架矩形柱给室内装饰和家具布置带来的不便,但是也存在如下问题^[14-18]:

1. 异形柱结构要求结构布置须均匀、对称、小柱网。

2. 轴压比要求严格,限制了房屋的层高。

3. 异形柱通常在短柱($H/h \leq 4$)范围,且属薄壁构件,剪切变形占有相当比例,构件变形能力下降,弯曲变形性能有限,延性较差。

4. 柱肢厚度薄,梁柱节点部位截面较窄,增加了施工难度。

4.3 短肢剪力墙结构体系

对于多层住宅,如采用一般剪力墙结构会造成结构刚度过大,结构自重大,导致地震反应过强,使结构构件设计困难,也不经济,基础和结构造价提高。为弥补一般剪力墙结构体系存在的上述缺点,使结构刚度调整到适宜,以剪力墙结构为基础,吸收框架结构的优点,就形成了短肢剪力墙结构体系。

短肢剪力墙结构体系的特点是:

1. 结合建筑平面,利用间隔墙位置来布置竖向构件,基本上不与建筑使用功能发生矛盾。

2. 墙的数量可多可少,肢长可长可短,主要视抗侧力的需要而定,还可通过不同的尺寸和布置来调整刚度中心的位置。

3. 由于减少剪力墙的数量且局部以轻质墙体替代,建筑物的自重减轻,这样可以减小地震反应和降低工程造价。

4. 短肢墙高宽比增大,延性较好,其破坏以弯曲破坏类型为主。

5. 连梁跨高比较大,其破坏以弯曲破坏为主,地震作用下首先在连梁的端部出现塑性铰,能起到很好的耗能作用。

目前,钢筋混凝土短肢剪力墙结构正广泛应用于我国多层、小高层住宅中,国内已经对短肢剪力墙结构进行了大量的研究^[19-24]。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2002)虽然在一般规定中列入了短肢剪力墙的条文,但更有针对性的截面设计与构造要求尚待完善。正如高层规程条文说明所述:近年兴起的短肢剪力墙结构,有利于住宅建筑布置,又可进一步减轻结构自重,但短肢剪力墙抗震性能较差,地震区应用经验不多。为安全起见,规程对这种结构抗震设计的最大适用高度、使用范围、抗震等级、筒体和一般剪力墙承受的地震倾覆力矩、墙肢厚度、轴压比、截面剪力设计值、纵向钢筋配筋率作了规定。显见,高层规程中的这些规定是建立在地震区应用经验不多基础上的,尚少深入的研究和实际地震的考验。

4.4 单排配筋混凝土剪力墙结构体系

钢筋混凝土剪力墙结构具有良好的抗震性能和防火性能,是住宅建筑中最常用的结构形式,剪力墙结构在建筑物中不仅承受着结构的竖向荷载,还承受风荷载、地震荷载等水平荷载,同时可以作为维护及房间分隔构件,其性能直接影响着整体结构的性能,因此需要开发抗震性能较好的多层钢筋混凝土剪力墙结构。目前混凝土结构设计规范(GB50010-2002)、高层建筑混凝土结构技术规程(JGJ3-2002)和建筑抗震设计规范(GB50011-2001)中所规定的剪力墙设计方法,也主要是以高层结构和双向双排配筋为主的。为了探索如何在多层住宅结构中应用钢筋混凝土剪力墙结构,并考虑设计方法的合理性,施工方法的简便和造价的经济性,有必要对多层住宅采用剪力墙结构进行系统研究。

笔者研发了“墙厚较薄、单排配筋、合理构造、保证抗震、施工方便、造价相对低”的单排配筋混凝土剪力墙结构,能较好的解决了目前常见多层住宅结构存在的问题,能满足人们对高品质住宅的要求,具有重要的研究价值和良好的实际工程应用前景。这种单排配筋混凝土剪力墙的特点是:墙肢厚度为140mm;墙体配筋由原来的双排配筋改为在墙体中部设置一排钢筋,可根据具体情况采取较小的配筋率;墙肢节点构造简单;施工采用免拆模板技术,可以解决混凝土干缩开裂的问题。

本课题组共进行了45个双向单排配筋剪力墙结构和构件的抗震性能试验研究,包括8个剪跨比为1.0、8个剪跨比为1.5、8个剪跨比为2.0的混凝土剪力墙和页岩砖砌体剪力墙的低周反复荷载试验研究;10个

剪力墙墙肢与连梁节点试件的低周反复荷载试验研究；2 个带洞口剪力墙的低周反复荷载试验研究；6 个截面形状为 L 形、T 形和 Z 形的单排配筋剪力墙的低周反复荷载试验研究；1 个单排配筋剪力墙结构单元的工作性能研究；1 个三层单排配筋剪力墙结构的低周反复荷载试验研究；1 个 4 层单排配筋剪力墙结构的模拟地震振动台试验研究。笔者在文[25]中介绍了双向单排配筋混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究情况，在文[26]中介绍了双向单排配筋混凝土中高剪力墙抗震性能试验研究情况，在文[27]中介绍了双向单排配筋混凝土高剪力墙抗震性能试验研究情况，文[28] 中介绍了双向单排配筋剪力墙节点抗震性能试验研究情况，在文[29]中介绍了双向单排配筋剪力墙与连梁节点的抗震性能试验研究情况，在文[30]中进行了单排配筋剪力墙结构设计方法的研究，给出了其适用范围，提供了其抗震构造措施。

(1) 单排配筋混凝土剪力墙的抗震性能

笔者分别对单排配筋混凝土剪力墙、双排配筋混凝土剪力墙和页岩砖砌体墙进行了抗震性能比较试验研究。图 1 为不同剪跨比的单排配筋混凝土剪力墙与页岩砖砌体墙的实测滞回曲线比较。其中，SW1.0-1、SW1.5-1、SW2.0-1 为双向单排配筋混凝土低矮剪力墙，剪跨比分别为 1.0、1.5、2.0；SW1.0-2、SW1.5-2、SW2.0-2 为相应的页岩砖砌体剪力墙。

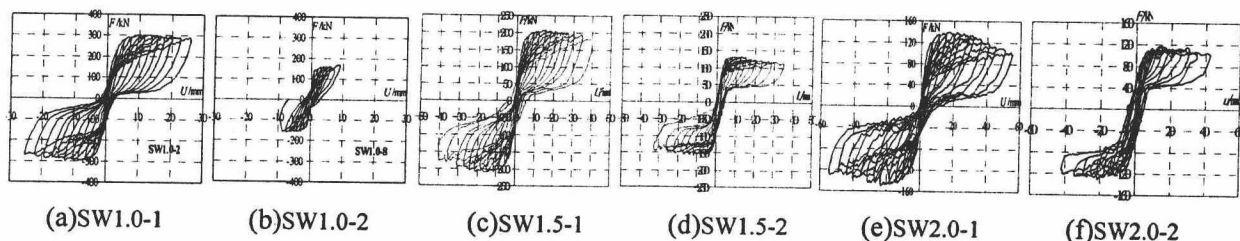


图 1 滞回曲线

由图 1 可见，单排配筋混凝土剪力墙承载力高、延性好、滞回环中部捏拢较轻、耗能能力强。

试验研究表明：双向单排配筋混凝土剪力墙抗震性能明显优于带端部约束的配筋砖砌体墙；同等配筋率的条件下，单排配筋剪力墙平面内的抗震性能优于双排配筋剪力墙平面内的抗震性能；双向单排配筋墙体和双向双排配筋墙体与楼板共同工作的性能接近。

(2) 单排配筋混凝土剪力墙的破坏形态

为了比较单排配筋混凝土剪力墙与传统双排配筋混凝土剪力墙的破坏形态，进行了 1 个缩比为 1:3 的三层剪力墙结构模型的低周反复荷载试验研究，试验模型一层层高为 1167mm，二层至三层层高均为 1000mm，墙肢厚度为 47mm，一侧墙体采用双向双排配筋，竖直分布筋和水平分布筋均为 $\Phi 4@306$ ，另一侧墙体采用双向单排配筋，竖直分布筋和水平分布筋均为 $\Phi 4@153$ ，两侧墙体的配筋率均为 0.17%。图 1 为试件的最终破坏照片。其中图 1 (c)中左侧为单排配筋墙体翼缘，右侧为双排配筋墙体翼缘。

由图 2 可见：无论是墙体还是翼缘，单排配筋混凝土剪力墙比双排配筋混凝土剪力墙破坏较轻；单排配筋墙体的裂缝分布区域更大，数量更多，宽度较小；这是由于虽然墙体的配筋量一样，但是双排配筋的间距是单排配筋间距的 2 倍，因此双排配筋约束混凝土裂缝开展能力的比单排配筋的要低些。

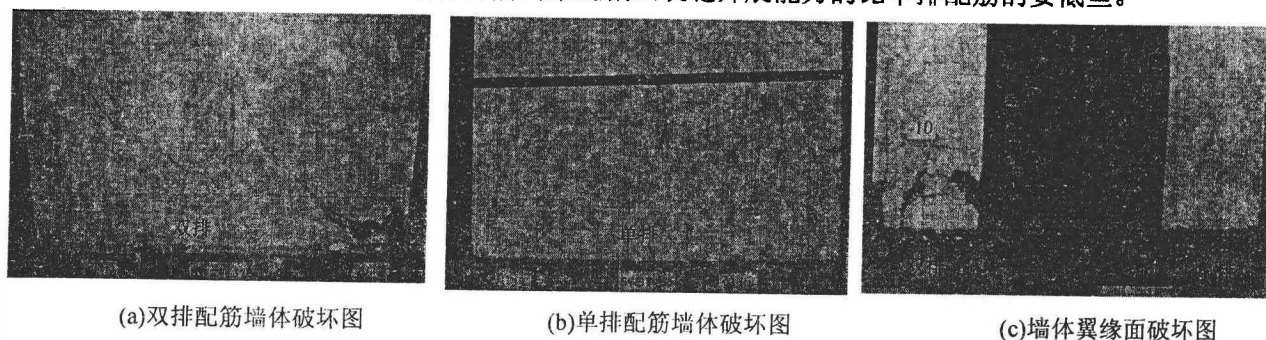


图 2 剪力墙的破坏形态

(3) 单排配筋混凝土剪力墙的动力性能

进行了 1 个缩比为 1:4 的四层剪力墙结构模型的模拟地震振动台试验,模型的平面由四个对称布置的、几何尺寸完全一致的 L 形截面剪力墙组成,四个 L 形墙肢之间通过连梁和楼板相连。一层层高 875mm,二层至四层层高均为 750mm,墙肢厚度为 35mm,一面墙体采用双向双排配筋墙体,垂直分布筋和水平分布筋均为 $\phi 2.2@120$,一面墙体采用双向单排配筋,垂直分布筋和水平分布筋均为 $\phi 2.2@60$ 。

图 3 为台面加速度峰值达到最大值 0.693g 时模型顶点的加速度时程曲线。虽然本双向单排配筋剪力墙结构的垂直钢筋和水平钢筋配筋率仅为 0.18%,小于建筑抗震设计规范(GB50011-2001)规定的最小配筋率 0.25%,墙肢厚度为建筑抗震设计规范^[7]规定的最小值,但是台面的加速度峰值达到了 0.693g,为建筑抗震设计规范(GB50011-2001)规定 9 度地区设计基本地震加速度 0.40g 的 1.733 倍。

图 4 为台面加速度峰值达到最大值 0.693g 时模型顶点的位移时程曲线。建筑抗震设计规范(GB50011-2001)规定钢筋混凝土剪力墙结构在罕遇地震作用下结构薄弱层弹塑性层间位移角限值为 1/120,若把二层位移角近似作为层间位移角,当位移角达到 1/151 时,台面输入最大的地震加速度为 0.600g,接近 9 度罕遇地震对应的地震加速度时程曲线最大值 0.620g。

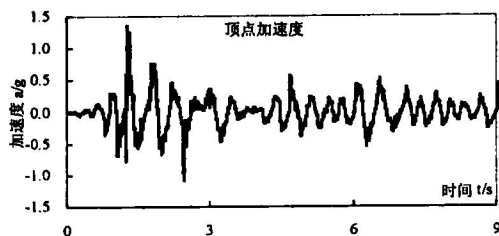


图 3 模型顶点加速度时程曲线

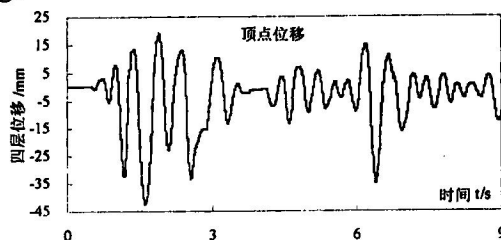


图 4 模型顶点位移时程曲线

(4) 工程应用

双向单排配筋混凝土剪力墙,经过合理设计与构造,能够满足多层住宅结构抗震性能要求。单排配筋混凝土剪力墙的研究成果已用于实际工程,获得较好的社会效益与经济效益,图 5 为部分应用工程图片。

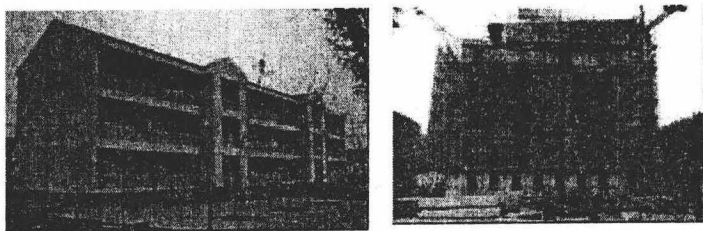


图 5 部分应用单排配筋混凝土剪力墙的工程

5 展望

(1) 多层住宅结构体系的确定是一个复杂的综合性问题,它需要综合地考虑建筑物的重要性、高度、抗震设防烈度、场地条件、地基基础、材料供应情况以及施工条件等,并结合每一种结构体系的抗震、经济指标,才能选择最恰当的结构体系。

(2) 从前面的分析中可以看出,各种新型多层住宅结构体系都有其突出的优点,但也有其不足之处或需进一步改进的地方。砖混结构抗震性能差,加之全国各地都在大力限制粘土砖的使用,故其发展前途较为有限;混凝土小型空心砌块结构符合国家的产业政策导向,可以节约能耗,减轻结构自重。但在如何进一步改善结构体系的受力性能、改进施工措施上都有不少问题值得进一步的探讨;轻钢多层住宅在我国还处于起步阶段,然而其发展势头非常迅猛,并且具有良好的应用前景和巨大的经济价值;对于混凝土框架结构和短肢剪力墙结构,建议在进行多层住宅结构选型时,可以采用短肢剪力墙结构体系,以获取良好的经济效益,使结构具有更好的受力和抗震性能。

(3) 笔者所研制的单排配筋混凝土剪力墙结构住宅能满足人们对高品质住宅的要求,比混凝土砌块结构和传统的粘土砖房抗震性能显著提高,适应于高烈度地震区的多层住宅建筑抗震设计,具有重要的研究价值和良好的实际工程应用前景。

参考文献:

- [1] 杨伟军, 施楚贤, 胡庆国. 配筋砌块砌体剪力墙的研究与应用[J]. 工业建筑. 2002, 32(9):64~66
- [2] 王汉东, 王墨耕. 配筋砌块砌体剪力墙配筋方法的商讨[J]. 建筑砌块与砌块建筑. 2005,(5):10~12
- [3] 苑振芳, 刘斌. 配筋混凝土砌块砌体剪力墙建筑设计要点[J]. 建筑砌块与砌块建筑. 2002,(1):11~13
- [4] 苑振芳, 刘斌. 配筋混凝土砌块砌体剪力墙建筑设计要点(续) [J]. 建筑砌块与砌块建筑. 2002,(2):12~16
- [5] 张运田, 郁银泉. 钢结构住宅建筑体系研究进展[J]. 钢结构住宅建筑. 2002 (6):22-23、28
- [6] 弓晓芸, 严虹. 浅谈轻钢结构低层住宅[J]. 钢结构. 2001(6):67-68
- [7] Morganti, Renato; Tosone, Alessandra. Buildings for housing: Steel technologies in the twentieth century[J]. International Journal for Housing Science and Its Applications. 2008, 32(2): 133-147
- [8] 薛发. 钢结构住宅的发展现状与前景[J]. 工程建设与设计. 2004(3):23-24
- [9] 袁宗元. 现代住宅钢结构面临的问题与优势[J]. 四川建材. 2006,4:246-247
- [10] 赵丽颖. 我国钢结构住宅发展现状及需要注意的问题[J]. 辽宁师专学报. 2005 (4):93-95
- [11] 秦晓亚. 浅议钢结构的三大隐患[J]. 山西建筑. 2008,34(35):97、99
- [12] 张春东, 张海军. 框架结构填充墙裂缝原因及预防措施[J]. 山西建筑. 2009,35(2):146-147
- [13] 张中. 高烈度区多层钢筋混凝土框架结构的位移控制[J]. 工程抗震与加固改造. 2008,30(1):78-81
- [14] 曹万林, 徐金荣. 钢筋混凝土异形柱框架结构抗震设计的若干措施[J]. 世界地震工程. 2002, 18 (1): 62~65
- [15] 肖建庄, 葛亚杰等. 异形柱结构内力分析研究[J]. 结构工程师. 2002(3):30-36
- [16] 唐剑, 段朝程等. 不规则钢筋混凝土异形柱框架结构的抗震性能[J]. 重庆建筑大学学报. 2007,29(4):90-94
- [17] 孙鹏程, 吴祖安等. 水平地震力作用下钢筋混凝土异形柱框架结构设计[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版). 2008,9(3): 293-297
- [18] 余时波. 钢筋混凝土异形柱结构设计浅析. 四川建筑科学研究[J]. 2006,32(2):46-48
- [19] 容柏生. 高层住宅建筑中的短肢剪力墙结构体系. 建筑结构学报[J]. 1997,18 (6): 14-19
- [20] 曹万林, 张建伟等. 带暗支撑短肢剪力墙及核心筒抗震研究与应用[J]. 2005, S1:94-106
- [21] 倪薇. 短肢剪力墙结构在“小高层”中的应用. 住宅科技[J]. 2000 (11): 23-25
- [22] 丁永君, 纪刚. 短肢剪力墙结构层间极限变形能力的计算[J]. 天津大学学报. 2000,33 (3): 363-366
- [23] 程文灏, 金向前等. 短肢剪力墙的设计与研究. 建筑结构[J]. 2001, 31(7): 51-52
- [24] 宋建学, 彭少民, 刘立新. 短肢剪力墙低周反复试验研究[J]. 华中科技大学学报. 2002, 19 (1): 91-94
- [25] 曹万林, 吴定燕, 杨兴民等. 双向单排配筋混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2008, 24(4): 19-24
- [26] 曹万林, 殷伟帅, 杨兴民等. 双向单排配筋中高剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动. 2009, 29(1):103~108
- [27] 曹万林, 孙天兵, 杨兴民等. 双向单排配筋混凝土高剪力墙抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2008, 24(3): 14-19
- [28] 曹万林, 孙超, 杨兴民等. 双向单排配筋剪力墙节点抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(3): 104-109
- [29] 曹万林, 孙超, 杨兴民等. 双向单排配筋剪力墙与连梁节点的抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2008, 24(3): 84-88
- [30] 张建伟, 杨兴民, 曹万林等. 单排配筋剪力墙结构抗震性能及设计研究[J]. 世界地震工程. 2009,25(1):77-81

地震作用下深水高桩承台体系桥梁 结构—水相互作用分析

*曹新建, 袁万城, 高永, 魏凯

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用动水附加质量的方法计算地震作用下深水高桩承台体系桥梁的结构—水相互作用。承台的动水附加质量采用 Bhatta 和 Rahman 推导的公式求解; 单桩的附加质量采用莫里森方程求解, 并用群桩系数修正群桩体系中各单桩的附加质量。最后通过一个实桥的算例阐述了考虑结构—水相互作用的动水效应计算方法。

关键词: 结构—水相互作用, 莫里森方程, 附加水质量, 附加阻尼系数, 高桩承台

Analysis of Structure-Water Interaction of Elevated Pile Cap Bridge under Earthquake Action

Xinjian CAO, Wancheng YUAN, Yong GAO, Kai WEI

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The structure-water interaction of elevated pile cap bridge under earthquake action is studied in this paper. Added mass approach is adopted to account for the hydrodynamic effects due to earthquakes. The hydrodynamic added mass of pile caps have calculated by the concise closed form expressions deduced by Bhatta and Rahman. Morison Equation is applied to calculate the added mass of a single pile. Grouping effect of piles is considered by correcting the single pile's calculated hydrodynamic added masses with grouping effect coefficient. Finally, the calculation method with structure-water interaction considered of an example bridge was discussed.

Keywords: structure-water interaction, Morison equation, added mass, added damper coefficient, elevated pile cap

1 引言

深水基础问题是跨江(海)桥梁建设迫切需要解决的课题之一^[1-2]。我国跨江(海)桥梁采用的深水基础形式包括沉井(箱)基础、管桩基础、钻孔桩基础、双壁钢围堰钻孔桩复合基础、套箱围堰。桩基础由于能够穿透土层而达到较深的持力层, 而且在深水基础施工中, 高桩承台基础方案比其他基础形式在适应自然建设条件、降低施工难度、缩短施工周期、节约造价等方面具有相当大的优势, 因此从上世纪 90 年代后高桩承台基础在我国长大跨桥梁中得到了广泛应用^[3-4]。

工程界对结构—水的相互作用给予了足够的重视。学者对地震和海流作用下近海结构物动水力的计算方法进行了大量的研究, Westergaard^[5]首次对地震作用下垂直坝体的动水力进行了严格的分析。对于特征

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(50778131); 国家科技支撑计划项目(2006BAG04B01)

作者简介: *曹新建(1978-)男, 江苏人, 博士生, 主要从事桥梁抗震研究(exj_nj@163.com);

袁万城, (1962-), 男, 江西人, 教授, 主要从事桥梁振动与抗震研究;

高永, (1981-), 男, 河南人, 博士生, 主要从事桥梁抗震研究;

魏凯, (1984-), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事桥梁抗震研究。

尺寸远小于水流波长（圆柱体直径 D 与波长 L 之比小于 0.2）的圆柱体，Morison^[6] 推导出了目前仍被广泛应用的 Morison 方程。对于大型的水下圆柱体，线性绕射理论^[7] 提供了一致的波浪力的表达。Bhatta 和 Rahman^[8] 研究了有限深度波浪对漂浮竖直圆柱体的散射和辐射问题，并推导出波浪力、附加质量和阻尼系数矩阵的解析解。赖伟^[9] 通过理论推导和实验研究的方法对地震和波浪共同作用下的深水桥梁的动力响应。我国的《公路工程抗震设计规范》（JTJ004-89）中规定了“位于常水位水深超过 5 米的实体桥墩、空心桥墩的抗震设计，应计入地震动水压力”。2008 年公布实施的《公路桥梁抗震设计细则》（JTG/T B02-01-2008）第 5.5.3 条给出了作用于桥墩上的地震动水压力的计算公式，但对其适用条件未作明确规定，且对大小尺度的结构物计算方法未做区分。因此，有必要在桥梁抗震计算中对下部结构上的动水压力及其对桥梁结构的影响进行缜密的分析和研究工作。

本文首先介绍了不同尺度结构物动水效应的计算方法，然后以九堡大桥为例，分析地震作用下深水高桩承台体系桥梁结构—水相互作用的特点。采用附加质量和阻尼系数矩阵的解析解来求解承台上的动水力；采用 Morison 方程计算单桩上的动水力，并用群桩效应系数修正单桩的动水力来计算群桩的附加动水力。

2 结构—水相互作用

2.1 基本方程

由动力学知识，结构在地震作用下的动力方程为：

$$M \ddot{u}_s(t) + C \dot{u}_s(t) + K u_s(t) = -M \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中 M , C , K 分别代表结构的质量矩阵，阻尼矩阵和刚度矩阵。 $u_s(t)$, $\dot{u}_s(t)$, $\ddot{u}_s(t)$ 分别代表结构的位移，速度和加速度。 $\ddot{u}_g(t)$ 为地基的加速度。

考虑动水效应后，等式（1）可以写成：

$$(M + M^a) \ddot{u}_s(t) + C \dot{u}_s(t) + K u_s(t) = -(M + M^a) \ddot{u}_g(t) - C^a \left| \dot{u}_t(t) \right| \dot{u}_t(t) \quad (2)$$

式中 M^a , C^a 分别为动水附加质量矩阵和附加阻尼系数矩阵； $u_s(t)$, $\dot{u}_s(t)$, $\ddot{u}_s(t)$ 分别为结构相对于水的相对位移，速度和加速度； $\dot{u}_t(t)$ 为结构运动的绝对速度，并且 $\dot{u}_t(t) = \dot{u}_s(t) + \dot{u}_g(t)$ 。

图 1 示出了高桩承台体系桥梁计算结构—水相互作用的数学模型，只需分别求出承台和桩身各质点的附加质量和附加阻尼，就可以通过有限元模型对复杂的结构—水相互作用进行简化分析。

对于高桩承台体系的群桩基础，当地震波沿水平向输入时，其最大竖向位移和最大转角相对于水平位移可以忽略不计。因此，本文仅分析地震波沿水平向输入的情况。由于小尺度和大尺度两类结构物的计算采用不同的方法，下面将对承台和桩的动水力进行分类阐述。

2.2 承台—水相互作用

2.2.1 圆形截面

文献[8]研究了有限水深中截断圆柱体的散射和辐射问题，其计算用坐标系统及各参数含义如图 2 所示。动水附加质量 μ 和附加阻尼系数 ν 的计算式如下：

$$\mu + i \frac{\nu}{\sigma} = \pi \rho a^2 h \left[\frac{N_{\lambda_0}^{-1/2} \gamma_{10}}{\lambda_0 h} \{ \sinh \lambda_0 h - \sinh \lambda_0 (h-b) \} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{N_{\lambda_j}^{-1/2} \gamma_{1j}}{\lambda_j h} \{ \sin \lambda_j h - \sin \lambda_j (h-b) \} \right] \quad (3)$$

其中： σ 为角频率， λ_0 为波数， λ_j 为特征值，由式 (4)、(5) 给出

$$\sigma^2 = g \lambda_0 \tanh \lambda_0 h = -g \lambda_j \tan \lambda_j h \quad (4)$$

$$N_{\lambda_0} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sinh(2\lambda_0 h)}{2\lambda_0 h} \right), \quad N_{\lambda_j} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sin(2\lambda_j h)}{2\lambda_j h} \right) \quad (5)$$

γ_{10} 和 γ_{1j} 是待定系数。

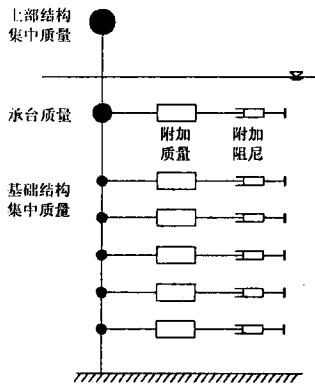


图 1 结构-水相互作用数学模型

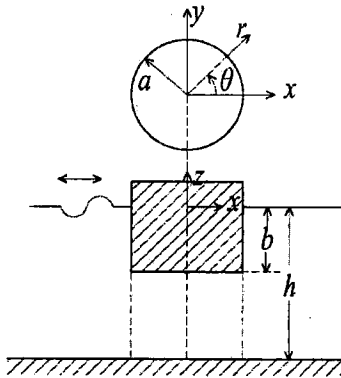


图 2 有限水深中截断圆柱体坐标系

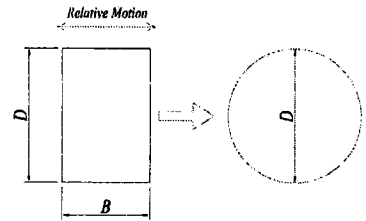


图 3 不同截面换算关系

2.2.2 矩形截面

求解矩形截面承台的附加质量和附加阻尼系数的步骤如下：a. 将矩形截面的承台换算成圆形截面，矩形截面与圆形截面之间的换算关系如图 3 所示；b. 采用上述方程式 (3) 求解附加质量和附加阻尼矩阵；c. 矩形截面柱体单位高度上动水附加质量和附加阻尼系数通过等效圆柱体单位高度上的动水附加质量和附加阻尼系数乘上一修正系数 K_c 来得到。其中 K_c 与矩形截面形状参数 D/B 有关。

基于对不同长宽比 D/B 矩形截面的动水力实验结果，赖伟^[9]拟合计算附加质量的修正系数 K_c 如下式所示。

$$K_c = 0.94732 + \frac{2.59648}{1 + \left(\frac{D/B}{0.09516} \right)^{0.54638}}, \quad 0.1 \leq D/B \leq 10 \quad (6)$$

2.3 桩-水相互作用

对于单桩，假定沿桩长方向为 Z 轴，水平向为 X 轴，其水平向位移为 $u_x(z, t)$ ，桩身周围水粒子的位移为 $u_w^x(z, t)$ ，二者的相对位移为：

$$r_x(z,t) = u_w^x(z,t) - u_z(z,t) \quad (7)$$

根据莫里森方程，作用在 z 处单位桩长上的动水力为：

$$P(z,t) = (C_m - 1)\rho\Delta V \frac{\partial^2 r_x(z,t)}{\partial t^2} + \rho\Delta V \frac{\partial^2 u_w^x(z,t)}{\partial t^2} + C_D \frac{\rho}{2} D\Delta Z \frac{\partial r_x(z,t)}{\partial t} \left| \frac{\partial r_x(z,t)}{\partial t} \right| \quad (8)$$

其中： C_m 为动水惯性力系数， C_D 为拖曳力系数， ρ 为水的密度， u 为 z 处桩的位移， ΔV 为 z 处单位桩长的排水体积， D 为桩的外径， ΔZ 为 z 处单位桩长。

假设地震时桩由静止状态沿 X 轴运动，此时水粒子的初速度和初始加速度均为零，式（8）可以改写为：

$$P(z,t) = C_a \rho \Delta V \frac{\partial^2 r_x(z,t)}{\partial t^2} + C_D \frac{\rho}{2} D\Delta Z \frac{\partial r_x(z,t)}{\partial t} \left| \frac{\partial r_x(z,t)}{\partial t} \right| \quad (9)$$

其中： C_a 为动水附加质量系数， $C_a = C_m - 1$ ，对于桩，可取 $C_a = 1$ 。

单位桩长上的动水附加质量为：

$$m_a = C_a \rho \Delta V \quad (10)$$

单位桩长上的动水附加质量阻尼为：

$$C_w = C_D \frac{\rho}{2} D\Delta Z \quad (11)$$

袁迎春^[10]研究了动水附加阻尼对桥梁桩基地震反应的影响，研究表明：动水附加阻尼对桥梁桩基的地震反应贡献很不，可以忽略不计。因此，动水对桩的作用可只考虑附加质量的效应。

目前，在考虑群桩效应方面比较方便的处理方法是采用群桩系数 K_g 来计算群桩上的波浪力，即把作用于单桩上的波力乘以相应的群桩系数 K_g 。群桩系数 K_g 同相邻桩的间距 S 与桩径 D 之比值有关，我国的《海港水文规范》（JTJ 213-98）中建议的群桩系数，如表 1 所示。

表1 群桩系数 K_g

l/D 桩列方向	2	3	4	l/D 桩列方向	2	3	4
	1.5	1.25	1.0		0.85	0.9	1.0
垂直于波向				平行于波向			

3 算例

3.1 工程概况与计算模型

某桥主桥采用结合梁拱桥方案，跨径布置为 $3 \times 210 = 630\text{m}$ 。主、副拱肋为钢结构，主梁为等截面结合梁，下部结构采用近 V 形薄壁墩形式，顺接拱肋线形。V 墩顶设支座支撑结合梁梁体，并设纵梁平衡斜腿水平分力。通过墩顶纵梁线形的调整和优化，使结合梁与 V 墩线形浑然一体。图 4 示出了主桥的立面布置，