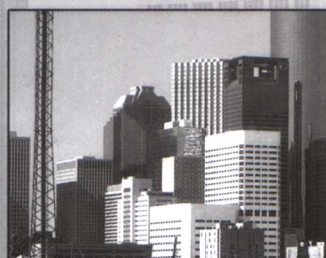


防震减灾工程

研究与进展

周福霖 张 雁 主 编
周 云 张季超 张 凌 副主编



科学出版社
www.sciencep.com

防震减灾工程研究与进展

周福霖 张 雁 主 编
周 云 张季超 张 凌 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

防震减灾工程是一个专业覆盖面极广的领域,涉及房屋建筑、地下空间、道路桥梁、铁路隧道等众多专业,关系到国计民生。本论文集内容包括有关防震减灾工程的理论、试验、计算、设计、施工和计算机应用等方面的最新技术和成果,其中不乏近年来我国许多重大工程项目在科研、设计与施工等方面所取得的成果。

本书可供结构设计、施工、监理人员以及高等院校土木工程专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

防震减灾工程研究与进展/周福霖,张雁主编. —北京:科学出版社
ISBN 7-03-016456-3

I. 防... II. ①周...②张... III. 地震灾害-防治-文集
IV. P315.9-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 132364 号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:郝 岚
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年11月第 一 版 开本:890×1240 1/16

2005年11月第一次印刷 印张:24

印数:1—1 200 字数:800 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

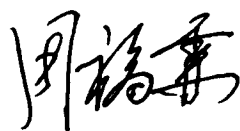
销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(VA03)

前 言

由中国土木工程学会、广州市建设委员会和广州大学联合主办,广州大学土木工程学院、广州大学工程抗震研究中心、广东省和广州市地震工程及应用技术实验室承办的“全国首届防震减灾工程学术研讨会”于2004年12月18日至20日在广州市广州大厦举行,来自国内外60多个单位近200名代表(其中包括来自澳大利亚和中国台湾省的代表)出席了研讨会。

本论文集汇编了在本次研讨会上发表的74篇论文,分为主旨论文;地震震害与安全评定;地震动与地基基础;结构抗震性能、试验方法与设计理论;结构隔震、消能减振与主动控制;爆炸灾害与抗爆;其他。共计7个专题。其内容反映了我国近年来防震减灾工程领域的理论、试验、计算、设计、施工和计算机应用等方面的成果,特别是许多重大工程项目在科研、设计与施工等方面的科技成果。论文作者既有院士、知名专家、学者,也有年轻的博士和硕士,这标志着我国的防震减灾工程领域科学技术正在不断发展,科技人员和工程技术人员队伍正在不断壮大,我国的防震减灾工程理论及技术正在迎来一个灿烂辉煌的春天。

本次学术研讨会的成功与全体与会代表的努力是密不可分的。我谨代表会议的主办单位和承办单位向全体与会代表、学术委员会和组织委员会成员,以及为研讨会顺利召开和本论文集出版作出贡献的单位和人员一并表示衷心的感谢。



2005年4月

《防震减灾工程研究与进展》

编委会

主 编 周福霖 张 雁
副主编 周 云 张季超 张 凌
编辑人员 崔 杰 浣 石 刘文光 马玉宏 孙作玉 许 勇

学术委员会

顾 问 (按姓氏拼音为序)
陈厚群 陈肇元 程耿东 崔京浩 范立础 韩大建 江见鲸
钱七虎 容柏生 沈蒲生 沈祖炎 王亚勇 项海帆 谢礼立
周锡元
主 席 周福霖
副 席 欧进萍 袁 驷
委 员 (按姓氏拼音为序)
艾永祥 白国良 蔡 健 蔡克铨(台湾省) 陈云敏 方 秦
房贞政 顾 强 韩林海 郝洪(澳大利亚) 郝际平 何若全
浣 石 黄宗明 霍 达 霍文营 姜忻良 焦兆平 金星
李爱群 李国强 李宏男 李 慧 李 杰 李 乔 李忠献
刘伯权 刘东燕 刘伟庆 吕西林 钱稼茹 邱 兴 任伟新
沙爱民 尚守平 石永久 苏经宇 陶唏暝 王自发 吴 波
吴仁友 肖绪文 叶燎原 叶志明 易伟建 于建生 宰金珉
翟伟廉 张 仁 张素梅 张永兴 章 健 周 兵 周绪红
周 云 朱华强 邹超英

组织委员会

顾 问 谭庆琰(中国土木工程学会理事长、建设部原副部长)
主 席 张雁(中国土木工程学会秘书长)
副 席 陈如桂 余国扬 禹奇才
委 员 (按姓氏拼音为序)
白晓红 陈国兴 陈 淮 陈龙珠 陈思作 陈以一 陈永亨
程绍革 崔 杰 窦远明 杜宏彪 杜社良 段忠东 傅传国
高永昭 郭院成 郭子雄 韩建平 黄世敏 黄醒春 贾 舒
金伟良 李大鹏 李 惠 李继祥 李鲁健 李英明 李永和
李正良 李正农 廖建三 廖红建 刘 峰 苗启松 缪 升
牛荻涛 史庆轩 孙建刚 陶夏新 滕 军 王毅红 王 湛
王泽云 魏德敏 翁大根 吴胜兴 冼巧玲 邢 锋 徐礼华
许成祥 薛彦涛 阎 石 闫维明 燕柳斌 杨庆山 姚谦峰
叶列平 易 成 余志武 赵玉光 周国庆 周 晶 朱宏平
朱彦鹏 朱以文

目 录

第一部分 主旨论文

大跨越高压输电塔体系抗震分析几个关键问题研究	李宏男	石文龙(1)
对土—结构动力相互作用研究若干问题的思考	宰金珉	庄海洋 陈国兴(8)
地震作用下框支剪力墙结构中落地剪力墙的合理数量	沈蒲生	刘 杨 孟焕陵(13)
我国地震灾害管理和金融手段	陶夏新	陶正如(18)
挫屈束制支撑之原理及应用	蔡克铨	赖俊维(25)
非线性分析中地基与结构相互作用的各种共振现象	姜忻良	郑希明(33)
钢框架消能减震体系研究与工程应用	翁大根	黄 伟 吕西林(37)
软土微结构的定量研究在软弱地基处理工程中的应用	李伍平 张季超 许 勇 陶建强 杨 锐 李国胜(47)	

第二部分 地震震害与安全评定

地震作用下梁式桥的易损性分析	成尚锋	张海燕	易伟建(50)
建筑物震害风险评估研究新进展	叶志明	楼思展	陈玲俐(55)
砖砌体房屋震害预测方法			姜淑珍(62)
尾水隧道掘进爆破对邻近铁路的震动影响监测分析	林从谋	逢焕东	李 彬 崔积弘(66)
我国特大地震及其烈度分布经验估计	万召侗	罗奇峰	曾心传(69)
不同结构震害指数计算模型的比较研究	刘 阳	郭子雄	杨 勇(74)
我国村镇房屋震害分析与减灾对策	周 云	郭永恒	邓雪松(79)
小城镇房屋建筑防灾减灾及其概念设计	李耀庄	王 丽(85)	
输电塔线体系抗震研究现状及前瞻	曹枚根	徐忠根(88)	
城市供水工程震害与抗震措施探讨	于 建	缪 升	叶燎原(93)
村镇木结构建筑的震害特点及应加强的抗震措施	孟 萍	缪 升	潘 文(96)
爆破地震的研究与减震方法初探			黄志辉(99)

第三部分 地震动与地基基础

人工神经网络方法在防震减灾工程中的应用	叶燎原	刘本玉	缪 升(103)
基于随机振动理论的地震动峰值加速度简化衰减关系	刘 充	陶夏新(109)	
SH 波作用下浅埋孔洞对地震动的影响			陈志刚(115)
碎石桩复合地基的地震反应与孔隙水压力分析	程博华	张鸿儒(119)	
砂土地震液化判别的 BP 神经网络模型法与淮安市地震液化势的综合评估	李方明	陈国兴(124)	
某软土地基的工程桩事故分析与处理	张季超	许 勇	王遇国(131)

第四部分 结构抗震性能、试验方法与设计理论

钢筋混凝土筒中筒结构拟动力试验研究与理论分析	陈伯望	王海波	沈蒲生(135)
钢管混凝土柱拟动力远程试验和模拟	张国伟	郭玉荣	肖 岩(141)
大跨度钢筋混凝土箱拱桥的动力特性	宗周红	许永吉	夏樟华 林友勤(147)
基于结构优化的“强柱弱梁”弯矩增大系数研究			易伟建 张 颖(152)
液槽结构模型抗震试验研究	李正农	王瑜波	吴红华 孟吉复(157)
地下结构抗震研究方法评述	庄海洋	梁艳仙	陈国兴 宰金珉(162)
地铁结构与土相互作用的非线性问题的讨论			刘如山(168)
多质点剪切型高层结构在水平与摇摆联合作用下线弹性随机振动反应分析	陆铁坚	李 芳	余志武(173)

高层建筑楼层侧向刚度变化控制准则的研究	韩小雷	李 静	郑 宜	雷 磊	(179)
基于拟力法的地震能量反应分析	刘哲峰	沈蒲生			(184)
基于位移的圆钢管混凝土柱抗震设计方法研究	毛小勇	肖 岩			(191)
竖向抗震的研究与应用进展	邓雪松	聂一恒	周 云		(195)
重力式挡土结构水平地震作用沿高度的分布	周晓岩	陶夏新	陈学良		(202)
模态 Push-over 分析在基于性能的抗震设计中的应用	吴平川	魏翠玲	高春华		(208)
弹塑性地震反应谱的比较分析	王东升	李宏男	王国新		(212)
生土墙承重的村镇建筑抗震性能分析	王毅红	苏东君	刘 挺	康 萍	(218)
结构体系地震作用下振型评价参数的理论研究				张文芳	(222)
预应力混凝土扁梁框架内节点抗震性能试验研究	程浩德	房贞政	周 翔	陈红媛	(226)
土-结构动力相互作用对框-剪结构动力特性影响分析	黄君宁	徐礼华			(231)

第五部分 结构隔震、消能减振与主动控制

设有形状记忆合金 RCD 阻尼器隔震结构的地震反应分析	王社良	惠宽堂	朱军强	赵歆冬	(236)	
复合隔震结构的研究与应用	杨树标	贾剑辉	申彦利		(240)	
开孔式软钢阻尼器在西安长乐苑招商局广场 4 号楼抗震加固中的应用探讨	王亚勇	陈清祥	薛彦涛		(245)	
SMA 阻尼隔震性能研究	王社良	惠宽堂	朱军强	赵歆冬	(251)	
耦联主次结构体系隔震减振分析			韩 森	王 亮	(255)	
某巨型钢框架结构模型动力特性分析			许 勇	张季超	(260)	
消能支撑框架结构抗震性能试验研究	惠宽堂	王社良	朱军强	赵歆冬	(265)	
马尼拉四层老人院基础隔震设计	游 冰	黄吉奇	鲁文超	黄 恒	胡 明	(269)
极低屈服点软钢阻尼器的恢复力模型及减震效果试验研究			李玉顺	刘 瑞	刘晚成	(278)
浅述钢框架梁柱刚性节点抗震设计			杨海名	缪 升	谷军明	(283)
$R-\mu$ 关系对能力谱方法的影响	卢 凉	潘 文	缪 升	黄海燕		(286)
野山河大桥地震响应分析			毕凯明	贺国京	王修琼	(290)
软钢耗能器的研究与应用进展	王廷彦	邓雪松	吴从晓			(294)

第六部分 爆炸灾害与抗爆

钢纤维混凝土抗爆炸数值模拟	焦楚杰	周 云	孙 伟	高培正	(300)
拱形隧道爆破动力响应数值模拟研究	崔积弘	林从谋			(307)
土木工程结构抗人为爆炸灾害研究	董旭华	肖 岩			(311)

第七部分 其 他

一种新的翘曲扭转刚度矩阵及翘曲扭转稳定刚度函数	刘 坚	郝际平	周观根	易 凌	刁云云	(317)
应变模态在框架结构节点损伤诊断中的试验研究				徐 丽	易伟建	(320)
建筑结构时滞控制的鲁棒稳定性准则	潘 颖	盛 严	刘立厚			(326)
建筑结构的模型参考自适应主动控制	刘栋栋	钟 昕	李瑞瑞			(334)
加固技术应用于建筑物防震减灾工程	范世平	张宏宇	苑培培	肖 毅		(340)
路面弯沉求解方法研究			魏翠玲	韩晓斌		(344)
碳纤维布加固低强度混凝土梁的试验研究	吴 斌	杨树标	梁玉国			(349)
钢管混凝土拱桥空钢管吊装施工控制	孙晓红	任伟新				(354)
高耸结构顺风向风振半解析计算方法	王 建	张永山				(359)
某工程钢结构节点原型试验研究	苏艳桃	许 勇	张季超			(363)
预应力网架结构的仿真分析		李红波	张永山			(368)
碳纤维加固法的研究和应用	陈旺洁	潘 文				(371)
工程抗震与施工质量浅谈		张月梅	缪 升			(375)

第一部分 主旨论文

大跨越高压输电塔体系抗震分析几个关键问题研究^①

李宏男* 石文龙**

(*大连理工大学土木水利学院,大连 116024; **同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘要: 根据作者提出的振动时高压输电塔体系的简化抗震计算模型及振动方程,编制了高压输电塔体系抗震计算考虑导线影响的计算程序。经大量的输电塔体系地震反应分析,得出了导线的影响随跨度的增加而增大的结论。分析结果表明,按现行《电力设施抗震设施规范》设计的大跨越输电塔体系在强震作用下是偏于不安全的。文中给出了输电塔体系振动时考虑导线影响的界限,提出了输电塔-导线耦联体系在地震作用下实用的简化抗震计算方法。

关键词: 输电塔;抗震计算;导线影响;界限;简化方法

STUDIES OF SOME KEY PROBLEMS ON SEISMIC ANALYSIS FOR COUPLED SYSTEM OF LONG-SPAN TRANSMISSION TOWERS

Li Hongnan* Shi Wenlong**

(*School of Civil and Hydraulic Eng., Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China;

** School of Civil Eng., Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: In this paper, according to the simplified model of aseismic calculation of the transmission tower presented by the authors, a computer program compiled is used to calculate the seismic responses of high voltage transmission tower under the action of earthquake. The results show that the effects of the lines on the high voltage transmission tower increase as the span between two towers becomes large. And the limit span of lines that should be considered to be important in the seismic response of high voltage transmission tower is determined based on the analyses of earthquake responses of lots of transmission towers. At the end of this paper, the simplified method of aseismic calculation is presented for the transmission tower-lines coupled system.

Keywords: transmission tower; aseismic calculation; effects of line; limits considering line influence; simplified method

1. 引言

作为输电线路重要组成部分的高压输电塔,是一种重要的生命线电力工程设施。以往对它的研究大多数是关于静力荷载、断线冲击荷载、等效静风荷载等作用的情况^[1~4],而对动力荷载作用的研究很少,我国《110~500kV 架空送电线路设计技术规程》(DL/T 5092-1999)^[5]中也没有给出输电塔体系抗震计算考虑导线影响的计算方法。对于小跨距的输电塔,因为导线的质量与塔架的质量相差很大,动

力计算可忽略导线的影响。但对于跨距较大的输电塔体系,导线的质量是非常可观的。作者及其合作者^[6~10]提出了大跨越输电塔体系的合理抗震计算简图,并对其进行了复合地震作用下的地震反应分析^[11,12]和给出了反应谱分析方法^[13],进而考虑了土-塔结构的相互作用^[14,15],指出了导线对输电塔架动力特性的影响的重要性。但对于塔架跨距为多大时导线的影响不可忽略,目前国内外尚无定论。

本文在以前研究成果的基础上,对导线的影响作进一步的分析,研究不同跨距导线对输电塔体系

^① 国家自然科学基金(59978025)、教育部骨干教师基金和地震工程与工程振动开放实验室(0005)资助项目

抗震性能的影响,确定了输电塔体系振动时考虑导线影响的界限,并提出了考虑导线影响的输电塔体系简化抗震计算方法。

2. 抗震计算模型与振动方程

根据文献[6~10]的分析与证明,对于具有任意层导线的输电塔体系,一跨导线的侧向和纵向振动模型可简化成如图1所示。在地震地面运动作用下,由导线及其塔架组成的复合体系的振动是弹性—重力耦联振动。考虑导线与塔架的相互作用,经过推演,可得到体系的侧向与纵向振动方程分别为(暂不考虑阻尼)

$$[M]_{(x)}\{\ddot{x}\}_{(x)} + [K]_{(x)}\{x\}_{(x)} = -[M]_{(x)}\{E\}\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

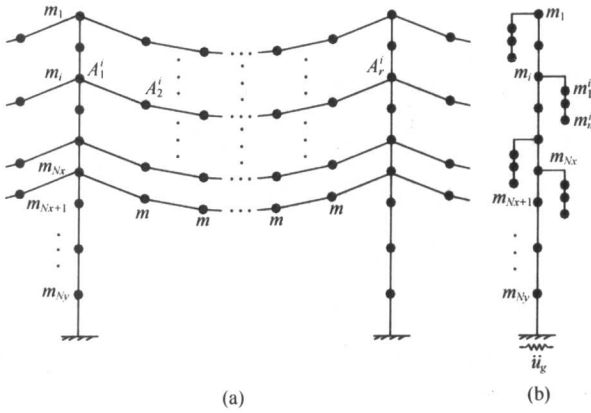


图1 输电塔-导线耦联体系抗震计算模型

和

$$[M]_{(y)}\{\ddot{y}\}_{(y)} + [K]_{(y)}\{y\}_{(y)} = -[M]_{(y)}\{E\}\ddot{y}_g(t) \quad (2)$$

式中, $\{x\}_{(x)}$ 和 $\{y\}_{(y)}$ 分别为体系侧向和纵向振动的位移向量; $[E]$ 为单位向量; $\ddot{x}_g$ 和 $\ddot{y}_g$ 分别为侧向和纵向地面加速度; $[M]_{(x)}$ 和 $[M]_{(y)}$ 分别为体系的侧向和纵向质量矩阵; $[K]_{(x)}$ 和 $[K]_{(y)}$ 分别为体系的侧向和纵向刚度矩阵。以上向量和矩阵的具体表达式见文献[16]和文献[17]。

3. 体系的状态方程

为计算输电塔体系的地震反应,采用 Matlab 语言编制了计算程序。此程序采用时程分析法进行求解,计算时采用 Rayleigh 阻尼形式。为统一写成状态方程形式,将式(1)和式(2)中表示方向的脚标去掉,地面运动表示成 $\ddot{u}_g$ 。

引入阻尼后,体系的振动方程式(1)和(2)可统一写成

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\}$$

$$= -[M]\{E\}\ddot{u}_g \quad (3)$$

式中, $[C]$ 为体系的阻尼矩阵。式(3)可化为

$$\begin{aligned} \{\ddot{x}\} = & -[M]^{-1}[C]\{\dot{x}\} - [M]^{-1}[K]\{x\} \\ & - [M]^{-1}[M]\{E\}\ddot{u}_g \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{令 } \{z\} = \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}, \text{ 则 } \{\dot{z}\} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix}, \text{ 又令}$$

$$\begin{aligned} \{\dot{z}\} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix} &= [A_1]\{z\} + [B_1]\{v\} \\ &= [A_1]\begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix} + [B_1]\{v\} \end{aligned} \quad (5)$$

补充式 $\{\dot{x}\} = \{\dot{x}\}$, 并结合式(4),得

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & E \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{Bmatrix} 0 \\ -\{E\} \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (6)$$

所以,

$$\begin{aligned} [A_1] &= \begin{bmatrix} 0 & E \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}; \\ [B_1] &= \begin{Bmatrix} 0 \\ -\{E\} \end{Bmatrix}; \{v\} = \{\ddot{u}_g\} \end{aligned}$$

状态方程可化为

$$\begin{aligned} \{\dot{z}\} &= [A_1]\{z\} + [B_1]\ddot{u}_g \\ \{z\} &= [A_2]\{z\} + [B_2]\{v\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $[A_2]=[E]$, $[B_2]=0$ 。

4. 试验验证^[18]

试验模型的照片如图2所示。由于目前振动台条件的限制,我们根据大跨越输电塔的动力特性和导线跨距与塔架尺寸与质量的比例,采用直径为10mm的钢棒来模拟输电塔,用钢链来模拟导线。三根钢棒之间通过两层钢链连接,构成输电塔-导线耦联体系的模型。中间一根钢棒上部安装有两个铁盒,这两个铁盒一方面可作为配重使用,另一方面还可



图2 试验现场图

以安装传感器(通过螺栓与铁盒固定)。钢棒下部设置有两个配重铁块。之所以选择这样的试验模型,主要是基于以下几点原因。第一,由于实际输电塔的横截面大多为正方形,且塔架四面构件的型号、截面积等均相同,这样其沿横截面两个方向的刚度也相同。选择圆截面钢棒来代替塔架,可以较好地模拟塔架在地震中的动力行为;第二,试验模型中的配重重量

和布置可以在较大程度上保证其与实际输电塔的质量分布情况相同;第三,用钢链来模拟导线,能够较好地实现导线的动力性能,钢链和塔架之间是铰接;第四,试验模型采用的三个塔架通过两跨(每跨两层)导线相连,可以较好地模拟塔架—导线之间的耦联作用。图 3 为试验模型的简图(图中尺寸单位: mm)。

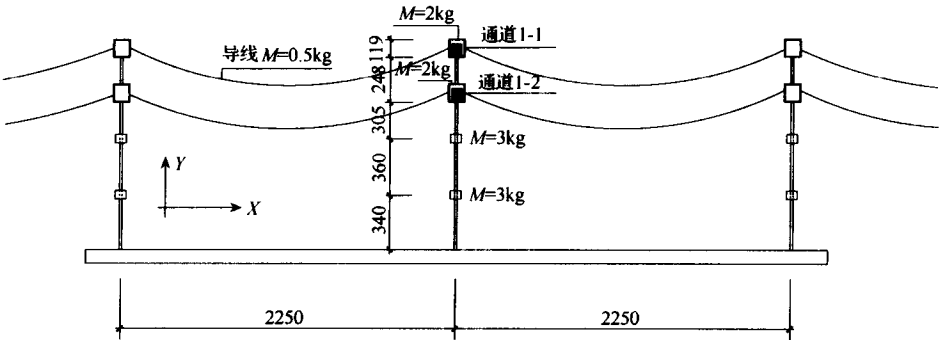


图 3 模型布置图

表 1 试验选用的地震记录

编号	场地条件	地震名称	发震时间	震级	记录地点	峰值(g)
①	软土	唐山地震	1976	7.1	天津医院	104.18
②	中等	Imperial Valley	1951	5.6	El Centro	27.56
③	硬土	唐山地震	1976	6.3	迁安县	118.91

为了对比在不同场地条件下,导线对输电塔地震反应的影响,本文选用了具有代表性的 El Centro 波、天津医院波和迁安波作为地震输入(见表 1)。试验中,地震记录的峰值均调整到 $0.1g$ 。在侧向和纵

向振动情况下,输电塔体系最大加速度地震反应理论值和试验值结果比较及误差见表 2。理论计算与试验结果比较的时程曲线见文献[9]。

从以上试验结果分析可以看出,所提出的输电塔—导线耦联体系的理论计算模型是合理的。在纵向振动情况下,当考虑导线影响时,图 3 中 1-1 通道最大误差为 8.06% ,1-2 通道为 10.6% 。在侧向振动情况下,当考虑导线影响时,1-1 和 1-2 通道最大误差分别为 4.89% 和 10.9% 。

表 2 考虑导线影响时的理论与试验结果比较

记录 振动方向	宁河波						El Centro 波						迁安波					
	侧向振动			纵向振动			侧向振动			纵向振动			侧向振动			纵向振动		
结果分析	理论	试验	误差 %	理论	试验	误差 %	理论	试验	误差 %	理论	试验	误差 %	理论	试验	误差 %	理论	试验	误差 %
1-1	0.15	0.14	4.42	0.16	0.18	7.62	0.13	0.14	4.89	0.13	0.14	8.06	0.13	0.13	4.38	0.13	0.13	4.38
1-2	0.22	0.21	3.22	0.16	0.18	8.55	0.18	0.18	1.14	0.23	0.21	6.50	0.12	0.11	10.9	0.13	0.12	10.6

5. 计算与分析

为了确定纵向振动时导线对输电塔体系动力计算的影响,我们选择了五个不同形式的实际输电塔

进行计算,如图 4 所示。其结构形式均为空间钢桁架体系,横截面为正方形。计算时,为了统一,将塔架均简化为 7 个质点,每跨电缆简化为 4 个质点。输电塔主要参数见表 3。

表 3 输电塔主要参数

	塔高/m	塔重/kg	电缆 型号	避雷线型号	电缆计算质量/(kg/km)
塔 1	74.6	33427	LGJ-500/45	GJ-70	1688
塔 2	90	40430	LGJ-500/45	GJ-70	1688
塔 3	51	15067	LGJ-400/50	GJ-70	1511
塔 4	34	11390	LGJ-400/50	GJ-70	1511
塔 5	63	16434	LGJ-400/50	GJ-70	1511

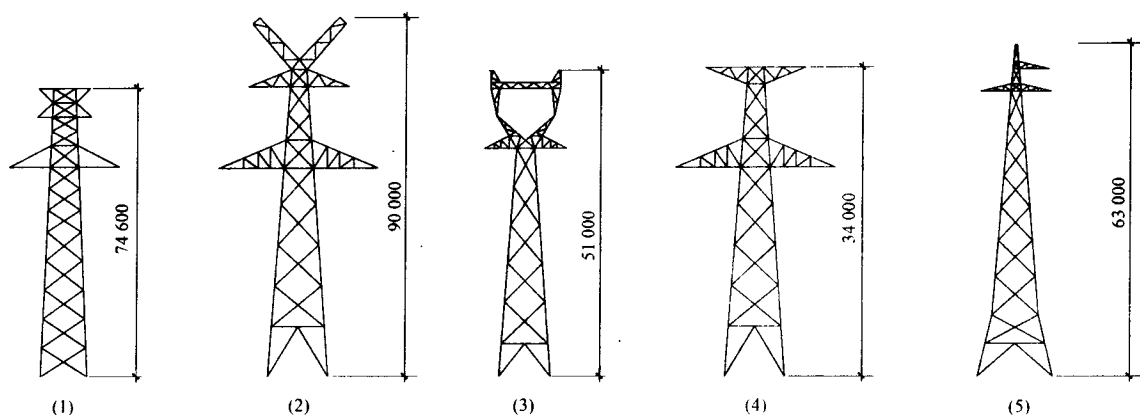


图4 输电塔计算实例

对于硬土、中硬和软弱三类场地,每类场地采用 度峰值均调整为 $0.2g$ 。选用的地震记录情况见表 4。
3 条不同的地震记录进行计算。计算时,对地震加速

表 4 计算选用的地震记录

场地类型	编号	地震名称	发震时间/(年.月.日)	震级	记录地点	峰值加速度(gal)
软弱场地	①	San Fernando	1971.2.9	6.6	PortHueneme	25.91
	②	San Fernando	1971.2.9	6.6	Univ. Avenue	56.36
	③	唐山余震	1976.11.15	7.1	天津医院	104.18
中硬场地	④	Imperial Valley	1951.1.23	5.6	El-Centro	30.35
	⑤	Kern County	1952.7.21	7.7	Taft	152.7
	⑥	Imperial Valley	1940.5.18	6.7	El-Centro	341.7
坚硬场地	⑦	Landers	1992.6.28	7.5	Baker Fire	105.58
	⑧	Landers	1992.6.28	7.5	Fort Irwin	119.85
	⑨	唐山余震	1976.8.31	6.3	迁安	118.91

计算时采用两种模型,第一种不考虑导线的影响(相应的剪力和弯矩分别为 V_1 和 M_1);第二种即本文模型(相应的剪力和弯矩分别为 V_2 和 M_2)。为了探讨不同跨度的导线对输电塔体系地震内力的影响,将塔架的跨度从小到大进行变化,计算结果通过剪力比最大值和弯矩比最大值这两个参数来体现,并分别对每个输电塔在各类场地上的三条地震记录的计算结果进行平均。图 5 和图 6 示出了输电塔 3

侧向和纵向在每类场地上三种地震记录剪力比(V_2/V_1)和弯矩比(M_2/M_1)的最大值与跨度关系的平均曲线典型结果。图中的横坐标代表导线的跨度,计算时考虑的跨度范围从 100m 至 1000m,每 100m 为一个间隔;纵坐标代表剪力比和弯矩比的最大值,即每个塔架 7 个质点中剪力比或弯矩比的最大值。

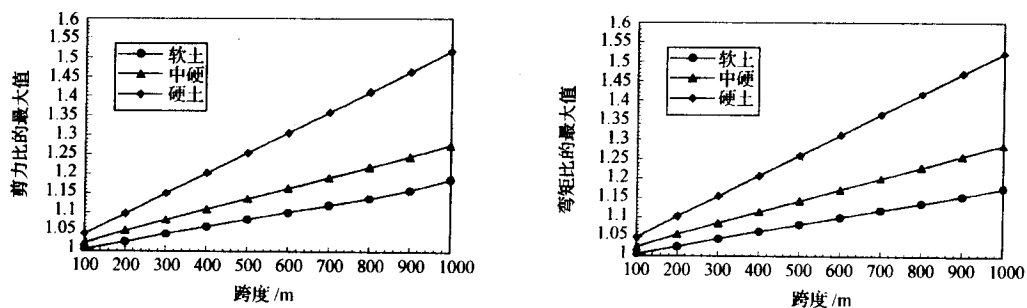


图 5 输电塔 3 侧向地震反应的平均曲线

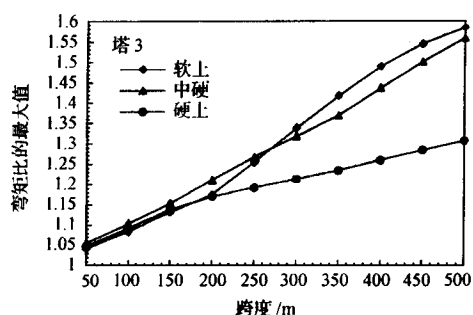
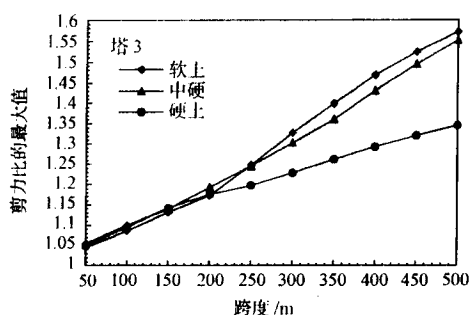


图6 输电塔3纵向地震反应的平均曲线

由图5和图6可以看出,导线对输电塔体系地震内力的影响程度随跨度的增加而增大。当导线的跨度达到表5和表6中给出的数值时,导线对输电塔体系地震内力的影响在5%以内。因此,我们可以得出结论:当导线的跨度超过表5和表6中的各数值时,在进行输电塔体系的动力计算时,应该考虑导线的影响。具体的抗震计算方法可以按照下节提出的方法进行。表中第二行所给出的导线的跨度我们称为界限跨度,记为 l_0 。表中还给出了这5个塔的导线长度为界限跨度时,计算结果的平均误差和方差。由表中的数据可以看出,计算结果的方差很小,说明在这三种场地情况下,数据的离散程度很小。

表5 侧向塔考虑导线影响的跨度界限值

场地类别		软弱	中硬	坚硬
跨度界限值 l_0/m		300	200	150
平均误差	剪力比	4.93%	3.57%	4.34%
	弯矩比	4.77%	3.53%	3.65%
方差	剪力比	0.001034	0.000837	0.000554
	弯矩比	0.000995	0.001443	0.001185

表6 纵向塔考虑导线影响的跨度界限值

场地类别		软弱	中硬	坚硬
界限跨度 l_0/m		50	50	50
平均误差	剪力比	4.7%	5.8%	4.8%
	弯矩比	4.5%	5.9%	4.6%
方差	剪力比	0.001136	0.004930	0.000932
	弯矩比	0.001294	0.005428	0.000868

6. 简化抗震计算方法的建议

《电力设施抗震设计规范》(GB 50260-96)^[19](以下简称《规范》)中规定:大跨越塔及塔高50m以上的自立式铁塔的水平地震作用宜采用振型分解反应谱法计算,并且在计算杆塔动力特性时,可不计入导线和避雷线的重量。当采用振型分解反应谱法时,可按式(12)计算地震作用:

$$F_{ji} = \zeta \alpha_j \gamma_j X_{ji} G_i \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ji} G_i}{\sum_{i=1}^n X_{ji}^2 G_i} \quad (9)$$

式中, F_{ji} 为j振型i质点的水平地震作用标准值; ζ 为结构系数; α_j 为相应于j振型自振周期的水平地震影响系数; γ_j 为j振型的参与系数; X_{ji} 为j振型i质点在X方向的水平相对位移; G_i 为i质点的重力荷载代表值,包括全部恒荷载、固定设备重力荷载和附加在质点上的其他重力荷载。

由上节对不同类型和不同跨度的输电塔—导线耦联体系大量的地震反应分析表明,按现行《规范》^[11]设计的导线跨度超过界限跨度的大跨越输电塔体系在强震作用下是偏于不安全的。因此,根据计算结果分析,我们建议的简化抗震计算方法是:在式(8)中 G_i 上增加一个附加质量 Δm 以考虑导线的影响, Δm 的计算用下式确定:

$$\Delta m = f(l_x) \times l_x \times q \quad (10)$$

式中, Δm 为考虑导线影响后塔架的附加质量(kg); l_x 为导线的跨距(m); q 为导线每千米长度上的质量(kg/km); $f(l_x)$ 称为附加质量系数,当进行输电塔体系侧向抗震计算时,由下式确定:

$$f(l_x) = \begin{cases} 0.17 + \frac{3l_x}{200l_0} & \text{软土} \\ 0.21 + \frac{l_x}{100l_0} & \text{中硬} \\ 0.35 + \frac{l_x}{20l_0} & \text{硬土} \end{cases} \quad (11)$$

[当 $f(l_x) > 0.7$ 时,取 $f(l_x) = 0.7$]

当进行输电塔体系纵向抗震计算时,由下式确定:

$$f(l_x) = 0.5 + \frac{l_x}{200l_0} \quad (12)$$

[当 $f(l_x) > 1.0$ 时,取 $f(l_x) = 1.0$]

我们采用建议的简化抗震计算方法对上述不同输电塔在不同跨度情况下进行了计算,与整体模型

结果进行了比较,吻合得很好。作为例子,将输电塔3在侧向和纵向的计算比较结果分别示于图7和图8。可以看出,对于软土和硬土这两种场地,按简化方法计算得到的结果与采用本文介绍的整体模型计算的结果十分接近,最大相差仅为3%左右;但对于中硬场地,结果偏差稍大,但最大误差也仅为6%左右,这是因为输电塔3的自振周期与场地的特征周期很接近,存在共振现象。这样的误差在工程中是完全可以接受的。

7. 结 语

综上所述,我们可以得到以下结论:

1) 导线对输电塔体系动力计算的影响程度随跨度的增加而增大。

2) 在不同场地上,当导线跨度超过本文给出的表3和表4给出界限跨度时,在进行输电塔体系抗震计算时,应该考虑导线的影响。

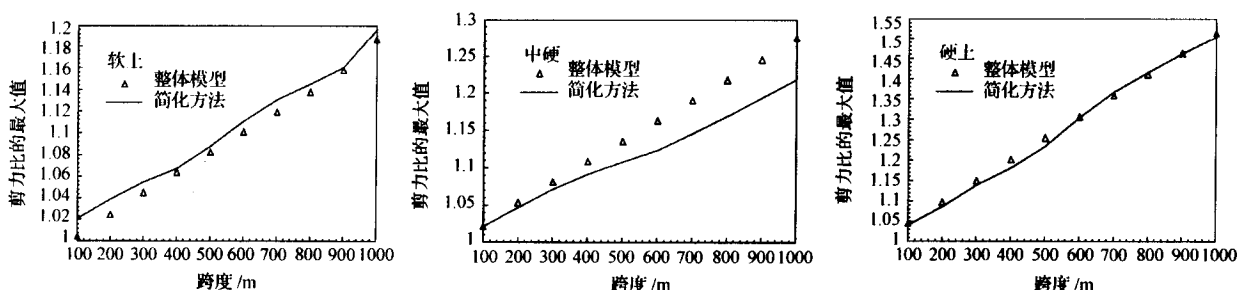


图7 简化方法与整体模型法在输电塔侧向计算的对比图

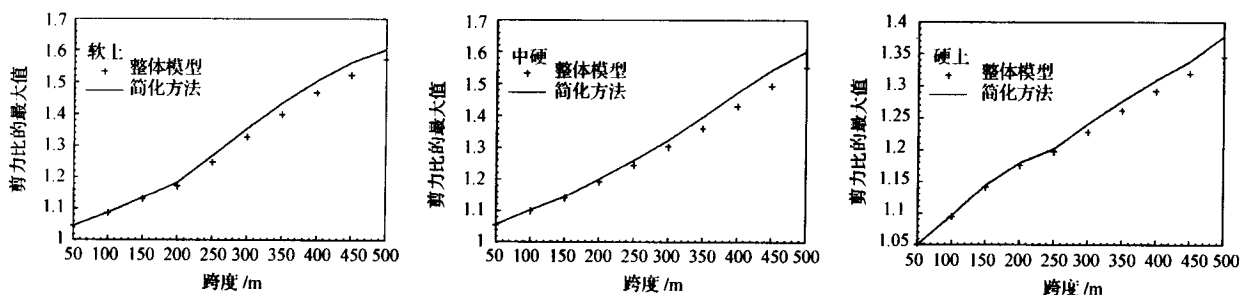


图8 简化方法与整体模型法在输电塔纵向计算的对比图

3) 本文提出的输电塔体系考虑导线影响的简化抗震计算方法可应用到实际工程设计当中。

本文结果可供编制有关输电塔体系的设计规范参考。

参考文献

- [1] American Society of Civil Engineers Committee on Electrical Transmission Structures; Loadings for Electrical Transmission Structures, ASCE Journal of Structural Division. 1982, 108 (5)
- [2] American Society of Civil Engineers; Guideline for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1991 No. 74, New York
- [3] 杨骥先等. 高压输电线路柔性腹杆铁塔的计算分析. 工程力学, 1996, 13(增刊): 46~51
- [4] Moze J. D. et al. Longitudinal Load Analysis of Transmission Line Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 5, 1977
- [5] 国家电力公司华东电力设计院. 《110~500KV 架空送电线路设计技术规程》(DL/T 5092-1999). 北京: 中国电力出版社, 1999
- [6] 李宏男, 陆鸣, 王前信. 大跨越自立式高压输电塔—电缆体系的简化抗震计算. 地震工程与工程振动, 1990, 10(2): 81~89
- [7] 李宏男, 陆鸣, 王前信. 跨越浑河输电塔电缆体系的简化抗震计算. 沈阳建筑工程学院学报, 1990, 6(3): 1~11
- [8] 李宏男, 王前信. 大跨越输电塔体系的动力特性. 土木工程学报, 1997年, 30(5): 28~36
- [9] Li Hongnan, Wang Qianxin, M. P. Singh. Seismic Response Analysis Method for Coupled System of Transmission Lines and Towers, Part II; In Plane. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(4): 37~45
- [10] Li Hongnan, Wang Qianxin, M. P. Singh. Seismic Response Analysis Method for Coupled System of Transmission Lines and Towers, Part I; Out of Plane. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(Sup): 67~75
- [11] 李宏男, 王前信. 水平与摇摆地震动作用下大跨越输电体系反应分析. 工程力学, 1991, 8(4): 68~69
- [12] Li Hongnan, Wang Suyan, Wang Qianxin. Response of Transmission Tower System to Horizontal and Rocking Earthquake Excitations. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(4): 34~43
- [13] 李宏男, 王前信. 大跨越高压输电塔导线耦联体系抗震计算的

反应谱方法,特种结构, 1996, 13(3): 24~30

- [14] Li Hong-Nan Xiao Shiyun. Model of transmission tower-pile-soil dynamic interaction under earthquake; in-plane. ASME PVP, 2002, 445(2): 143~147
- [15] 李宏男, 肖诗云. 纵向地震作用下输电塔相互作用体系分析. 岩土工程报, 1998, 20(6): 102~104
- [16] 李宏男, 石文龙, 贾连光. 考虑导线影响的输电塔侧向简化抗震计算方法. 振动工程学报, 2003, 16(2): 233~237
- [17] 李宏男, 石文龙, 贾连光. 导线对输电塔体系纵向振动的影响界限及简化抗震计算方法. 振动与冲击, 2004, 23(2): 1~7
- [18] Li Hong-Nan, Shi Wenlong, Wang Guoxin and Jia Lianguang. Simplified models and experimental verification for coupled transmission tower-line system to seismic excitations, Journal of Sound and Vibration, 2005(to appear)
- [19] 中华人民共和国电力工业部. 《电力设施抗震设计规范》(GB 50260-96). 北京: 中国计划出版社, 1996

作者简介

李宏男 博士, 长江学者特聘教授, 主要从事结构抗震、控制和健康监测方面的研究。

对土-结构动力相互作用研究若干问题的思考^①

宰金珉 庄海洋 陈国兴

(南京工业大学, 南京 210009)

摘 要: 本文就目前土-结构动力相互作用研究中几个重要问题的研究现状进行了总结, 并提出了需要进一步研究的几个课题和研究方法, 供从事土-结构动力相互作用问题的研究者思考和参考, 这些问题包括: ① 深厚软弱地基上土-高层建筑的动力相互作用; ② 软弱地基土-大型地下结构的动力相互作用; ③ 拟建建筑对周围已建建筑物抗震性能的影响; ④ 土-结构动力相互作用效应对结构主、被动控制的影响; ⑤ 土-结构动力相互作用涉及的材料和接触面非线性特性; ⑥ 土-结构动力相互作用的试验研究。

关键词: 土-结构动力相互作用; 软弱场地; 高层建筑; 地下结构

ANALYSIS ON THE SEVERAL PROBLEMS ABOUT THE DYNAMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION

Zai Jinmin Zhuang Haiyang Chen Guoxing

(Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, P. R. China)

Abstract: Several important problems about the dynamic soil-structure interaction are analyzed in this paper. Sub-problems of each one are summarized and the research methods of these problems are analyzed. It can be used by researchers who study on the dynamic soil-structure interaction. These problems are: (1) The dynamic soil-superstructure interaction in the profound soft site, (2) The dynamic soil-underground structure interaction in soft site, (3) The influence of buildings which will be built on the earthquake response of buildings which have been built, (4) The influence of dynamic soil-structure interaction on the active or passive control of buildings, (5) The nonlinear characteristics of materials and interface about the dynamic soil-structure interaction, (6) Testing study on the dynamic soil-structure interaction.

Keywords: dynamic soil-structure interaction; soft site; superstructure; underground structure

1. 概 述

无论是从静力学或动力学的角度来分析结构的受力状态, 土与结构的相互作用 (Soil-Structure Interaction) 问题都是不可忽略的, 只有把结构与基础和地基作为相互作用又相互制约的整体进行分析, 才能得到比较符合实际的计算结果。土-结构相互作用问题就是把各种结构、地基和基础看成是一个彼此协调工作的整体, 在连接点和接触点上满足变形协调的条件下求解整个体系的变形与内力^[1]。

与土-结构静力相互作用相比, 土-结构动力相互作用 (Soil-Structure Dynamic Interaction) 问题

的研究难度不仅仅体现在动力方程的求解问题上, 土体的边界效应、动力接触非线性、材料非线性和输入地震动特征等等都是该问题研究的难点所在。

对土-结构动力相互作用效应的研究, 最早起源于 1904 年 Lamb 对弹性地基振动问题的分析^[2]; 1936 年, Reissner 通过对 Lamb 解的积分, 对弹性半空间表面刚性圆形基础振动问题进行了研究; 20 世纪 40 年代, Martel 提出关于建筑物地震反应的土-结构相互作用效应; 50 年代, Bycroft 推导了圆形和矩形基础在应力边值条件下的平移、旋转和扭转、振动的顺态和稳态的解析解; 60 年代, Sandi、Lysmer、Newmark、Monge、Rosenberg、Hashiba 和 Whitman

^① 江苏省自然科学基金(BK2004124)和江苏省重点实验室基金(KJSS0201)

等人做了很多关于土-结构动力相互作用效应的研究,如地基柔性对土-结构动力相互作用效应的影响,Lysmer 提出了土-结构动力相互作用效应的集中参数法^[3],该方法在目前仍具有广泛的应用前景;到 70 年代后期经过对各种分析方法优点的争论,关于土-结构相互作用的基本现象被广泛的理解和接受;1985 年,由 Wolf J P 撰写的第一部关于土-结构动力相互作用问题的专著出版^[4],该书具体阐述了关于土-结构动力相互作用效应问题的严谨而复杂的处理过程,但所有方法都只局限于线性分析^[5~7];近 20 年来土-结构动力相互作用问题的研究获得迅猛发展,研究成果主要体现在以下几个方面:① 结构和土体动力非线性特性的考虑;② 人工边界的研究;③ 土与结构之间接触非线性的考虑;④ 数值方法的应用。

本文对土-结构动力相互作用效应的已有研究成果进行了总结,在此基础上提出几个需要进一步研究的土-结构动力相互作用问题以及这些问题的研究方法。

2. 关于土-结构动力相互作用几个重要问题的研究现状与发展

2.1 深厚软弱地基上土-高层建筑动力相互作用

以往有关结构抗震分析的研究大多数都是建立在刚性地基假定之上的,《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)中 5.2.7 条规定,一般情况下可不计入地基与结构相互作用影响;只对 8 度和 9 度时建造于Ⅲ、Ⅳ类场地的采用箱基、刚性较好的筏基和桩基联合基础的钢筋混凝土高层建筑,当结构基本自振周期处于特征周期的 1.2 倍至 5 倍范围内时,对刚性地基假定计算的水平地震剪力可进行适当的折减,规范所给的折减方法也过于简单。

关于深厚软弱地基上土-结构动力相互作用效应的研究表明:由于软弱土层的滤波作用,大部分结构的基底剪力是减小的^[8~9],但对不同的结构形式或基础埋深,也有基底剪力是增大的现象^[10],尤其是对长周期的结构物,地基越软加速度反应谱越大,软弱地基自振周期变长、振幅大、持续时间长,改变了高层建筑的振型,同时由于高层建筑的埋深变化也能改变结构的振型,这些因素都有可能对高层建筑的抗震性能造成不利影响。目前对深厚软弱地基上土-高层建筑动力相互作用的研究仍没有取得可直接指导设计的成果,因此本文建议从以下几个方面开展对深厚软弱地基上土-高层建筑动力相互作用问题的研究:

(1) 软弱土层埋深和厚度的变化对上部高层建

筑抗震性能的影响。软弱土层埋深和厚度的变化将明显改变从基岩输入的地震动的频谱特性^[11~12],从而对不同自振周期高层建筑的抗震性能有不同的影响规律和效果,利用土-结构整体分析方法,总结出不同软弱场地条件对高层建筑抗震性能的影响规律;

(2) 软弱地基上不同的上部结构形式、基础形式及埋深对高层建筑抗震性能的影响。在地震运动作用下,地基、基础与上部高层建筑形成一个复杂的动力系统,上部结构和基础的形式将直接影响这个动力系统的反应,曾有不少学者对不同基础形式高层建筑的抗震性能进行了研究^[13~14],但这些研究都没有考虑软弱地基条件。

(3) 输入地震动频谱特征对软弱地基上高层建筑抗震性能的影响。高层建筑的地震反应对输入地震动是有选择性的,同一场地上的同一建筑,在不同输入地震动条件下的地震反应可能有明显的差异。

2.2 软弱地基上土-大型地下结构动力相互作用

随着人们生活水平的不断提高,城市车辆数急剧上升,为了解决城市交通问题,地铁、地下车库和地下商场等大型地下结构应运而生,以往人们普遍认为地下结构具有很好的抗震性能,但 1995 年日本阪神地震中,地下结构遭受了前所未有的破坏,尤其是地铁车站的震害最为严重。不少学者对阪神地震中地下结构的震害进行了详细的调查和研究。周健等^[15~17]对软土地基上地铁区间隧道的地震反应规律及其计算方法进行了研究,采用的计算方法分别为有效应力有限元法、样条有限元与无限元耦合法和应力波法。目前对于地铁车站抗震性能的研究不多,曹炳政等^[18]采用 FLUSH 程序对神户大开地铁车站的地震反应进行了分析,验证了水平地震和竖向地震是大开站震害的主要因数;陈国兴等^[19]采用子结构法对软土地基上地铁车站的抗震性能进行了研究,指出了软土地基上地铁车站结构抗震的薄弱部位;Jun Seong Choi、Hongbin Huo 等^[20~21]分别采用 ANSYS、ABAQUS 等商业软件对地下盒形结构的非线性地震反应进行了分析,考虑了土与结构之间接触面的相互滑移和分离现象。纵观这些研究,关于土-大型地下结构动力相互作用问题仍有不少需要解决的问题:

(1) 软弱地基上超大型地下结构的抗震设计方法。现有地下结构的抗震设计方法主要为反应位移法,对于复杂场地软弱地基中的地下结构,该方法显然是不合适的。这就要求对各种软弱地基上大型地下结构的地震反应特征进行系统的研究,提炼出软弱地基上大型地下结构的抗震设计方法。

(2) 可液化地基中超大型地下结构的抗震稳定

性。由于地基液化产生的侧向永久变形会导致地下结构物的损伤、扭转和倾斜等破坏,因此可液化土-地下结构动力相互作用引起的土体大变形对地下结构的稳定性带来很大的安全隐患,应引起足够的重视。

(3) 竖向地震和纵向地震作用下大型地下结构的动力反应特征。由于地铁结构上覆重量很大的土层,在竖向地震作用下上覆土层将明显影响地下结构的动力反应特征;再次,地下结构属于细长结构,在纵向地震作用下很容易发生弯曲和轴向变形,此时土-地下结构接触面的切向动力相互作用将是该问题研究的重点。

2.3 拟建建筑对周围已建建筑抗震性能的影响

随着我国城市化水平的不断提高,城市用地越来越紧张,建筑物之间的距离越来越近。现行抗震设计规范中,高层建筑抗震设计方法是建立在建筑物周围为自由场地的假定之上的。姜忻良等^[22~25]对相邻建筑物-地基-土的相互作用的半解析半数值解法进行了较多的研究,得出了一些有益的结论:当 L (建筑物之间的距离) $\leq 2.5B$ (结构基底宽度)时,建筑物之间的影响要考虑,特别是当 $L \leq 0.5B$ 时,建筑物之间的影响是不能忽略的。但现有的研究还不能回答相邻建筑是如何相互影响的及其影响的规律如何,尤其是大型地下结构的建造对上部结构抗震性能的影响是急需研究的课题。陈国兴等^[27~28]对场地开挖引起场地设计地震动参数的变化进行了研究,但没有考虑上部结构参与体系的影响。因此,建议从以下几个方面对该问题进行研究:

(1) 相邻建筑-基础-地基动力相互作用问题。由于该问题涉及的研究对象比较多、空间几何效应较大,用一般的整体分析方法很难建立合适的力学模型,当采用有限元方法时,其计算工作量非常巨大,因此有必要研究能够解决该问题的高效快速的算法,如平行算法。

(2) 大型地下结构对上部结构地震反应的影响。由于大型地下结构完全深埋于土中,土-地下结构的动力相互作用将明显改变场地周围土体的动力反应特性,进而影响上部结构的地震反应特征,如何建立土体-地下结构-基础-上部结构动力相互作用的力学模型,是研究该问题的关键所在;

(3) 地下洞室群-土体动力相互作用问题。由于地下空间的不断开发,地下结构的数量也不断地增加,地下结构的距离太近时形成了地下洞室群,这些洞室之间的动力相互作用将明显会改变各自本来的动力反应特征。

2.4 土-结构动力相互作用效应对结构主、被动控制的影响

目前,有关结构主、被动控制的设计理论都是建

立在刚性地基假定之上的,把结构的基础和地基看成是刚性体,不考虑地基对结构动力反应特性的影响。但是,现有研究表明,软弱地基土-结构的动力相互作用将明显的改变上部结构的动力特性,因此,有必要开展土-结构动力相互作用效应对结构主、被动控制的影响研究。目前有关土-结构动力相互作用对结构被动控制影响的研究相对较少。辛金珉、陈国兴等^[28~29]在这方面已做了不少工作,研究了考虑土-结构动力相互作用影响时的结构主动控制算法及其对结构主动控制效果的影响,认为考虑土-结构动力相互作用效应时必须对控制算法进行修改才能达到对结构预期的控制目的;在某种情况下,当考虑土-结构动力相互作用效应时结构的实际位移反应能够自动满足刚性地基假定下的地震位移控制目标,而不需设置主动抗震控制装置。辛金珉、陈国兴等^[30~31]对考虑土-结构动力相互作用的 TMD 减震特性进行了大型振动台模型试验和数值模拟对比研究,验证了软弱地基上的 TMD 减震装置可能达不到预期的减震效果,甚至起到负面效应影响的结论。鉴于土-结构相互作用对结构主、被动控制的影响研究的重要性,以下几个问题急需研究:

(1) 软弱地基-结构动力相互作用效应对结构主、被动控制的影响。考虑软土地基-结构动力相互作用影响时,基于刚性地基假设的结构主、被动控制装置是否能够达到预期的控制效果以及如何在减震控制设计中考虑软土地基的影响;

(2) 考虑土-结构动力相互作用效应的结构主、被动控制算法及数值仿真研究。现有的关于结构主、被动控制计算方法在考虑土-结构动力相互作用效应后有可能失效,如何修正现有的计算方法、建立可行的数值计算方法。

2.5 对土-结构动力相互作用效应的非线性研究

结构力学中的非线性主要包括几何非线性、材料非线性和边界非线性,土-结构动力相互作用问题中各种非线性都明显存在。在强地震运动作用下,几何非线性主要体现在土和结构会发生很大的动力变形,模型的几何特征将发生本质的变化;材料非线性主要体现在土和结构材料在大应变时其应力-应变关系的变化;边界非线性主要体现在土与结构的接触特征上,结构和土体之间的变形不再耦合,在土体和结构接触面上会发生切向滑移和法向分离的现象。刘军等^[32]对高层建筑基础-地基相互作用的非线性特性进行了分析,考虑了基础与周围土体局部脱离所引起的非线性效应;Jun Seong Choi 等^[20]用 ANSYS 软件对地下结构与周围土体在强震作用下的相对滑移和分离所引起的接触非线性进行了数