高层钢 - 混凝土组合门式结构消能减震体系模拟地震振动台试验研究

马玉宏¹, 金建敏¹, 韩小雷², 谭 平¹, 陈学伟², 沈朝勇¹, 黄襄云¹, 陈建秋¹, 任 珉¹

(1. 广州大学 工程抗震研究中心 ,广州大学 减震控制与结构安全重点实验室 ,广州 510405;

2 华南理工大学 高层建筑结构研究所,华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室,广州 510640)

摘要:对一幢复杂高层钢-混凝土组合门式结构消能减震体系的 1/30缩尺模型进行了模拟地震振动台试验, 深入研究了该结构的动力特性和地震反应特征,通过比较验证了粘滞阻尼器的减震效果。结果表明:结构整体空间作用 显著,两座塔楼之间扭转反应较大。有、无阻尼器结构的各项反应基本满足抗震规范的要求;从平均意义上讲,阻尼器对 整体结构的位移反应有一定的控制效果,对结构高空连廊的位移和两座塔楼之间的扭转反应控制效果较好。

关键词:粘滞阻尼器;钢-混凝土组合结构;高层建筑;门式结构;振动台试验

中图分类号: TU352 1; P315. 8 **文献标识码**: A

在建筑结构中布设粘滞阻尼器可增大结构的阻尼 比,同时,由于阻尼器内置液体,本身没有可计算的刚 度,不影响整个结构的周期和原有的设计,可对结构尤 其是复杂结构起到很好的耗能减震作用,提高结构的 抗震能力。近年来、粘滞阻尼器在土木工程中得到了 广泛的应用,目前在世界上大约有 100多个建筑工程 使用了粘滞阻尼器,涉及到高层建筑、高耸结构、桥梁、 体育馆、海洋石油平台甚至卫星发射塔。例如、墨西哥 市长大楼、多伦多机场控制塔、北京银泰中心、希腊奥 林匹克和平体育馆等均安装了粘滞阻尼器¹¹。多高层 建筑连廊结构是近年来发展起来的一种新型结构形 式,是由两个或多个多高层建筑在一定高度处设置架 空连廊相连而成的建筑结构形式。例如,在图书馆、写 字楼等功能复杂的高层建筑中,常在主体与主体、主体 与附属结构间用连廊相连以满足不同功能的各部分建 筑之间的联系和使用要求。该类建筑大多属于较为重 要的公共建筑,一旦倒塌,损失十分严重,如何确保该 类结构的地震安全性和风振舒适性显得尤为重要。高 层大跨度空间连廊结构受力复杂,整体空间作用效应 显著,目前对其在地震作用下抗震性能的研究还不够 充分,为了减轻地震和风振作用,提高建筑的抗震(振) 安全储备,通常在结构上布设粘滞阻尼器。此外,该类 结构大多属干超限审查的类型,而对此类复杂结构开 展模拟地震振动台试验则是研究其抗震性能的主要手 段。目前,我国已经对高层连廊结构开展了一些振动 台试验研究^[2-4],也对带阻尼器的高层建筑开展了一 些振动台试验研究^[5-7],但是由于受到振动台台面尺 寸和载重量等的限制,对大跨度结构振动台试验的研

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815027);建设 部科技计划项目(05 - K1 - 39,2007 - K5 - 06);广州市属高校科技 计划项目(62016,08C053)资助

收稿日期: 2009 - 04 - 20 修改稿收到日期: 2009 - 06 - 23

第一作者 马玉宏 女,博士,副研究员,1972年 9月生

究则少见报道^[8.9]。高层建筑中连廊的跨度一般均在 十几米至几十米之间,跨度超过 100 m的则比较少见。 本文对一幢装设了液体粘滞阻尼器、连廊跨度达到 114 m的复杂高层钢 - 混凝土组合门式结构的 1/30缩 尺模型进行了模拟地震振动台试验,深入研究了该结 构的动力特性和地震反应特征,并通过比较考察了粘 滞阻尼器的减震效果,验证了结构的整体抗震安全性。

本工程为一栋观光门式结构,该结构总高 86.25 m,共 11层,底层平面尺寸为 96.69 m x87.86 m,由两 栋钢筋混凝土框架 - 剪力墙结构的塔楼 (平面面积分 别为 19.27 m x11 m和 10.14 m x10 m)、45 方向 114.35 m长的钢桁架高空连廊和 95.69 m长的钢桁架 低空连廊组成,高空连廊与两栋塔楼通过型钢连接形 成门式结构。本工程抗震设防烈度为 7度,设计基本 地震加速度为 0.10 g,设计地震分组为第一组。场地 为中软场地土,建筑场地类别为 类。

本工程属于复杂高层大跨空间结构,整体结构空间作用显著,同时装设了先进的消能减震装置,需要通过模拟地震振动台试验来对结构的整体抗震性能作出 正确的评价^[10],并验证阻尼器的减震控制效果。

1 阻尼器布置及模型设计

1.1 阻尼器的布置

为了提高结构的安全性及使用的舒适性,本工程 在两栋塔楼和高空连廊上布设了粘滞阻尼器起到消能 减震(振)、提高结构抗震(振)能力的作用。根据有限 元计算结果,两栋塔楼每间隔2层布设1个阻尼器,共 布设24个液体粘滞阻尼器,见图1;高空连廊每间隔2 跨布设1个阻尼器,上、下弦共布设12个阻尼器,可参 见图3。



图 1 塔楼剪力墙上阻尼器

Fig 1 Dampers on the shearwall fortwo tower



图 2 进行振动台试验时的模型照片 Fig 2 The model fixed on the shaking table



图 3 传感器测点布置图 Fig 3 Plane figures of accelerometers

1.2 模型设计及制作

根据本工程的试验要求和试验条件,采用考虑人 工质量的混合相似模型,用一定的人工质量尽量减小 忽略重力效应产生的影响。在综合考虑振动台的性能 参数、吊装能力等因素后,模型和原型的相似关系见表 1。对于钢筋混凝土梁、柱等构件层面的设计,依据抗 弯和抗剪能力等效的原则;对于高空连廊、低空连廊等 型钢构件,采用刚度等效的原则^[11],兼顾强度等效。

表 1	模型与原型的相似关系	
Tab. 1 Sin ilitude c	oefficient between model and	prototype

相似系数	长度	弹性模量	质量	加速度	时间	频率
符号及公式	S_{l}	S_E	S_m	$S_a = S_E S_l^2 / S_m$	$S_t = S_l / S_a$	$S_f = 1/S_t$
比值 模型参数 /原型参数 /	1/30	1/3 2	1/360 0	1/0 8	0 163	6 124

对于液体粘滞阻尼器,按照阻尼力等效的原则进 行模型设计^[5]。由于模型阻尼器需要特殊定制,其生 产需要预留一定的时间,阻尼力等参数的设计无法采 用实测模型弹性模量值,只能根据初设弹性模量的相 似系数来进行。每个阻尼器在生产完成后均进行了检 测,并得到了实测参数值。在模型结构实际理论计算 时,可采用阻尼器生产厂检测后的实测参数。液体粘 滞阻尼器的阻尼力计算公式为:

$$F = C \cdot V \tag{1}$$

其中,F为阻尼力;C为粘滞阻尼系数,模型试验中两种 型号的阻尼器分别取 0 93 $kN/(m \cdot s^{-1})$ 和 1. 37 $kN/(m \cdot s^{-1})$;为速度指数,常取 0 3~1 0之间,本 试验 取 0 3和 0 4两种;V为阻尼器活塞杆的速度。

本工程模型振动台试验在广州大学工程抗震研究 中心 3 m ×3 m 三向六自由度振动台上进行 (见图 2,图 中,斜撑杆件为阻尼器)。模型混凝土采用由水泥与砂 拌制而成的微粒混凝土;钢筋用镀锌铁丝代替;型钢采 用成品矩形方钢管代替。模型施工时外模板用木板制 作,内模板用泡沫塑料制作。

2 加载和量测方案

本试验采用一条人工地震波和两条真实强震记录 (E1 Centro和 Taft地震记录),其中场地波由委托方提 供。根据该场地的地震安全性评价报告,水平加速度 峰值分别为小震 0.0417g中震 0.1116g大震 0.2038g,考虑相似系数后,振动台试验时水平加速 度峰值采用:小震 0.052g中震 0.14g大震 0.255g

测点的布置主要考虑测试模型的动力特性、结构 的地震反应以及关键部位的受力情况和弹塑性变形情况,因此需要在适当部位布设加速度传感器、位移传感 器及应变片。试验时,采用丹麦 B&K公司生产的 4381V型电荷加速度计配合 NEXUS2692 - 014电荷放 大器测量加速度和位移,采用德国 HBM公司产的 SPF DER8应变仪测量应变。本试验采用 47个加速度传感 器用于模态测试、47个加速度传感器用于测试加速度 反应、40个位移传感器用于测试位移反应。加速度和 位移测点主要布置在底座、3、5、7、9、11层及天面上,其 平面布置见图 3。应变测点重点布置在两座塔楼第 1、 5、10、12层及天面的两个角柱,以及重点关注的高空连 廊上、下弦杆或斜杆等部位处。

在进行结构地震反应试验之前,先进行结构的模 态测试,分别在 X、Y、Z三个方向输入白噪声,测定结构 震前的动力特性 (包括振型、自振频率等)。在每个地 震水准试验前后,各输入一次白噪声用以测定结构动 力特性的变化情况。其次,选用甲方提供的场地波、El-Centro波和 Taft波三个地震波进行模型结构七度小震、 中震和大震的试验,地震波的输入采用了单向(X向、Y 向)、双向或三向,以便用来与按《建筑抗震设计规范》 弹性计算的结果进行比较和验证,确定结构的最不利

地震输入方向,并体现实际地震情况。试验工况见表 2。在每个地震水准的试验过程中,均按照先进行有控试 验(连接阻尼器)、后进行无控试验(未连接阻尼器)的顺 序进行,即试验的顺序为:小震有阻尼器试验 ⇒小震无阻 尼器试验 ⇒中震有阻尼器试验 ⇒中震无阻尼器试验 ⇒大 震有阻尼器试验 ⇒大震无阻尼器试验。此外,由于本结 构中连接两个塔楼的高空连廊在大致 45 方向上,高空 连廊的平面内和平面外的反应应当重点关注。因此,在 大震时增加 X + Y(2/2 ×X + 2/2 ×X)与 X - Y(2/2 × $X - 2/2 \times X$)两个输入方向,以反算高空连廊平面内和 平面外的反应。此处的 X + Y与 X - Y两个输入方向的 输入加速度峰值相等,其数值确保 45 方向和垂直 45 方 向的输入加速度峰值为7度大震的情况。

表 2 试	验工况		
Tab 2 Test	p rocedure		
、加速度峰值 /g	工况	试验 序号	输入

工况	试验 序号	输入地震波	输入 方向	输入加速度峰值 /g	工况	试验 序号	输入地震波	输入 方向	输入加速度峰值 /g
七度 (有控)	1	场地波	X	0 052		11	场地波	X	0 052
	2	El Centro波	X	0 052	七度 小震 (无控)	12	El Centro波	X	0 052
	3	Taft波	X	0 052		13	Taft 波	X	0 052
	4	场地波	Y	0 052		014	场地波	Y	0 052
	5	El Centro波	Y	0 052		15	El Centro波	Y	0 052
	6	Taft波	Y	0 052		16	Taft 波	Y	0 052
	7	场地波	Z	0 052		17	场地波	Ζ	0 052
	8	场地波	X + Y	$0 \ \ 052 \ +0 \ \ 044 \ 2$		18	场地波	X + Y	$0 \ 052 + 0 \ 044 \ 2$
	9	El Centro波	X + Y	$0 \ 052 + 0 \ 044 \ 2$		19	El Centro波	X + Y	0 052 + 0 044 2
	10	Taft波	X + Y	$0 \ 052 + 0 \ 044 \ 2$		20	Taft 波	X + Y	$0 \ 052 + 0 \ 044 \ 2$
	21	场地波	X	0 140	七度 中震 (无控)	31	场地波	X	0 140
	22	El Centro波	X	0 140		32	El Centro波	X	0 140
	23	Taft波	X	0 140		33	Taft 波	X	0 140
七度	24	场地波	Y	0 140		34	场地波	Y	0 140
中震	25	El Centro波	Y	0 140		35	El Centro波	Y	0 140
(有控)	26	Taft波	Y	0 140		36	Taft 波	Y	0 140
	27	场地波	X + Y	0 140 + 0 119		37	场地波	X + Y	0 140 + 0 119
	28	El Centro波	X + Y	0 140 + 0 119		38	El Centro波	X + Y	0 140 + 0 119
	29	Taft波	X + Y	0 140 + 0 119		39	Taft 波	X + Y	0 140 + 0 119
	30	El Centro波2	X + Y + Z	0 140 + 0 119 + 0 091		40	El Centro波2	X + Y + Z	$0 \ 140 + 0 \ 119 + 0 \ 091$
	41	El Centro波	X	0 255	七度 大震 (无控)	43	El Centro波	X	0 255
七度	42	El Centro波	Y	0 255		44	El Centro波	Y	0 255
し <u>液</u> 大震 (有控)	45	El Centro波	X + Y	$0 \ 180 + 0 \ 180$		48	El Centro波	X + Y	$0 \ 180 + 0 \ 180$
	46	El Centro波	X - Y	0 180 - 0 180		49	El Centro波	X - Y	0. 180 - 0. 180
	47	El Centro波2	X + Y + Z	0 255 +0 217 +0 166		50	El Centro波2	X + Y + Z	0 255 +0 217 +0 166

第 6期

3 试验结果及分析

3.1 动力特性

为了分析模型结构的动力特性,在不同强度地震作用前后对模型输入加速度峰值为 0.05g频带宽为 0.1 Hz ~ 40 Hz的白噪声。利用丹麦 B&K公司的 PUL SE8.0 operational modal analysis软件对结构各部位 测点的加速度响应信号进行模态分析,从而得到有、无 阻尼器结构不同强度地震作用前后的自振频率、振型 和阻尼比。小震作用下,模型结构有、无阻尼器条件下 自振频率的比较见图 4。不同强度地震作用前后测得 的模型结构各阶频率的变化情况见图 5。



图 4 有无阻尼器结构频率比较

Fig 4 Frenquency of the buildings with and without damper



图 5 不同强度地震作用下频率的变化 Fig 5 Frenquency under three level earthquake

由图 4和图 5可见: 在有阻尼器和无阻尼器作 用下,结构模态参数的变化基本在 8%以内,平均差异 为 4%,即阻尼器对结构周期的影响不明显,这是由于 粘滞液体阻尼器不提供刚度,而阻尼比增大对周期的 影响较小造成的; 不同强度地震作用后模型结构的 各阶频率均有所变化。随着地震作用强度的增加,模 型结构的各阶频率呈下降趋势。在经历多遇地震作用 后,结构的各阶频率与震前相比变化很小,平均下降 0.46%;在经历设防烈度地震作用后,各阶频率平均下 降达到9.04%左右;在经历罕遇地震作用后,各阶频率 平均下降达到15.89%。说明随着地震动输入的增大, 结构刚度有所减小,结构局部进入弹塑性受力状态,阻 尼比增大,从而结构的频率减小。

结构的前六阶振型分别为: 135 方向一阶平动; 45 方向一阶平动; 塔楼 1一阶扭转、塔楼 2 在 135 方向一阶平动; 塔楼 1二阶扭转、塔楼 2在 0方向一阶平动; 高空连廊竖向振动、塔楼 1在 0° 方向二阶平动、塔楼 2在 90 方向二阶平动; 塔楼 1 在 0方向三阶平动、塔楼 2在 0方向二阶平动。图 6 为无阻尼器结构地震作用前进行的模态试验中的前四 阶振型。

小震作用下,模型结构有、无阻尼器条件下阻尼比的变化情况见图 7。可见,与无阻尼器结构相比,有阻 尼器结构各阶阻尼比均有所增加。

3.2 地震反应

在不同水准地震作用下,模型结构 x 向和 y 向的 位移反应规律基本相同,多向地震作用同单向地震作 用相比,结构模型变形相差不大。结构层间位移最大 值出现的层数规律基本相同,结构层间位移最大值在 x 向大多出现在底层、在 y 向大多出现在第 7 层或第 9 层。多遇地震作用下,无阻尼器结构层间位移角最大 值的平均值为 1/1155;罕遇地震作用下,结构层间位移 角最大值为 1/141,满足抗震设计规范的要求。此外, 加装阻尼器后,在多遇地震和罕遇地震下结构层间位 移角最大值均满足抗震设计规范的要求。主体结构加 速度反应沿高度分布比较均匀。在不同地震波作用 下,加速度最大值有时发生在结构顶层,有时发生在中 间层,顶部鞭端效应不是十分显著,加速度放大系数大 多数在 2 5 以内,平均值在 2 以内。







图 7 有、无阻尼器模型结构阻尼比的比较 Fig 7 Test result of damping ratio of the buildings model with and without damper

加装阻尼器后,塔楼 1、塔楼 2和高空连廊的位移 反应控制效果的平均值见表 3。可见,阻尼器对塔楼 1 和塔楼 2的位移反应有一定的控制效果 (见图 8),控制 效果最大平均值为 16 1%;对高空连廊测点 *E*的控制 效果比较显著 (见图 9),控制效果最大平均值为 36 1%;而阻尼器对加速度的控制效果不明显。图中, 天然波 1是指 El Centro波,天然波 2为 Taft波。

表 3	结构反应控制效果平均值(有阻尼器/无阻尼器)
	Tab. 3 Average value of response control

effects for the buildings(damper/no damper)

反应	工况	塔楼 1	塔楼 2	高空连廊
相对位移	小震	0. 955	0. 905	0. 833
(有阻尼器)无阻尼器)	中震	0.877	0. 975	0. 809
	大震	0. 939	1. 049	0. 866
层间位移	小震	0. 970	0. 922	0. 760
(有阻尼器)无阻尼器)	中震	0. 874	0. 972	0. 785
.40	大震	0. 952	1. 010	0. 639
层间位移角	小震	0. 989	0. 967	0. 695
(有阻尼器)无阻尼器)	中震	0. 839	0. 959	0. 720
	大震	0. 900	0. 982	0. 639
绝对加速度	小震	1. 01	0.96	1.06
(有阻尼器 /无阻尼器)	中震	1. 03	0.96	1.06
	大震	1. 04	1. 00	1. 07



图 8 中震 Y向作用下 B点顶层相对位移时程

Fig 8 D isplacement time-history of point B at floor level under moderate earthquake in the Y direction



图 9 小震双向作用 E点顶层 Y向位移时程 Fig 9 D isp lacement time-history of point E at floor level under small earthquake in the Y dirction

由于本工程为高空门架结构,塔楼 1和塔楼 2刚 度不同,在三水准地震作用下,整体结构将出现扭转反 应。在单向和多向地震作用下,塔楼 1和塔楼 2间在 顶层天面处 X方向的扭转较大,在第 11层处 Y方向的 扭转较大,塔楼 1和塔楼 2之间最大水平位移的比值 大多大于 1 2,即总体说来塔楼 1和塔楼 2之间扭转严 重。加装阻尼器后,塔楼 1和塔楼 2间扭转角的控制 效果平均值在多遇、设防烈度和罕遇地震下分别为 29.5%、22 6%、44 7%,即阻尼器对塔楼 1和塔楼 2间 的扭转有比较显著的控制效果。图 10分别为有、无阻 尼器条件下塔楼 1和塔楼 2之间扭转角的最大包络值。

总体来看,不同地震波以不同强度作用时,结构的 地震反应规律基本相同,用三种地震波平均可以代表一 般地震作用。此外,在不同水准地震作用、有无阻尼器条 件下,单向输入和多向输入时 El Centro波作用下结构的 反应均较大,而人工波作用下结构的反应较小,主要原 因是当输入地震波的频率与结构自振频率比较接近 时,结构的地震反应较大,反之,结构的地震反应较小。



图 10 塔楼 1和塔楼 2之间扭转角包络值 (10⁻³ rad) Fig 10 Maximum tortional angle between tower 1 and tower 2

第 6期

3.3 应变反应

本工程采用混合相似模型,忽略了重力效应的影 响,因此模型的应变变化情况并不能简单地换算成原 型的应力情况,但从应变的相对值的变化情况,可以定 性地判断结构应力变化情况,并根据应变的变化情况, 检测模型结构的裂缝开展情况。

由本试验应变测试结果来看,塔楼的 3~9层连梁 端部为薄弱部位,混凝土结构底部是应力较大的区域。 底层钢筋混凝土柱及钢结构高空连廊,在多遇地震作 用下,有控时的拉、压应变大体上比无控时有所减少; 设防烈度地震作用下,有控时的拉、压应变平均值比无 控时拉、压应变平均值分别减少 7.2%、0.5%;罕遇地 震作用下,有控时的拉压应变均比无控时减小更大,减 震效果明显 (Z1 柱拉压应变最大值的减震效果分别达 到 24%和 11%),说明加装了油阻尼器后对结构应变 反应的控制效果是非常显著的。

3.4 试验现象

本结构在多遇地震作用下,结构处于弹性工作状 态、混凝土核芯筒底部和柱底部是结构受力较大的区 域;设防烈度地震无阻尼器作用下,塔楼的 3~9层连 梁部位混凝土结构开始出现裂缝;罕遇地震有阻尼器 试验后进行了无阻尼器试验,已出现裂缝的部位,裂缝 进一步发展 (见图 11),其它部位基本无新的裂缝产 生,这是由于在连梁部位出现裂缝后,此处形成了结构 的薄弱部位。



无控试验后 (a) After test without

damper under

moderate earthquake

有控试验后 (b) After test (c) After test without with damper under

无控试验后

damper under

major earthquake

major earthquake 图 11 塔楼 1连梁裂缝的发展

Fig 11 Cracks of linked beam for tower 1

4 结论及建议

通过对复杂高层钢 - 混凝土组合门式结构消能减 震体系的模拟地震振动台试验研究可得到以下结论:

(1) 液体粘滞阻尼器对整体结构的周期影响不 大;与无控结构相比,有控结构各阶阻尼比均有所 增加。

(2) 阻尼器对高空连廊的控制效果比较显著,对 塔楼 1和塔楼 2的相对位移、层间位移和层间位移角 有一定的控制效果,对塔楼 1和塔楼 2之间的扭转角 有比较显著的控制效果。

(3) 从应变分析来看,有阻尼器的结构应变反应 小于无阻尼器的应变反应。

(4) 试验宏观现象和实测数据分析表明,有、无阻 尼器结构在三种地震波作用下,经历多遇地震、设防烈 度地震和罕遇地震作用后,总体上均满足初步设计目 标的抗震设防要求。

(5) 装设了阻尼器后,耗散了部分地震输入能量, 对整体结构的抗震安全性有较好的改善,但由于本工 程为空间结构,建议对阻尼器布设的位置和参数进行 进一步的优化,使得阻尼器能起到更好的减震效果。

参考文献

- [1] 陈永祁,杜义欣.液体粘滞阻尼器在结构工程中的最新进 展 [J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(3): 65 - 72.
- [2]沈朝勇,周福霖,等.带连廊-复杂体型高层结构模型试验 研究 [J]. 广州大学学报, 2004, 3(2): 143 - 149.
- [3]周颖,吕西林,卢文胜,等.双塔连体高层混合结构抗 震性能研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(5): 71 - 78
- [4] 黄襄云, 刁云云, 谭平, 等. 多塔楼高层建筑连廊结构的 柔性连接设计及试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27 (6) : 112 - 118
- [5] 孟春光,丁洁民,吕西林,等.带阻尼器高层方钢管混凝土 框架结构模拟地震振动台试验研究 [J]. 结构工程师, 2005, 21 (5): 57 - 62
- [6] 王翠坤,赵鹏飞,马宏睿,等. 深圳大梅沙酒店模型振动台 试验及减震阻尼器设计研究 [J]. 建筑结构, 2006, (36) 增 刊:8-12
- [7] 吕西林,周强.铅芯橡胶耗能器与油阻尼器组合耗能系 统的振动台试验与分析 [J]. 力学季刊, 2001, 22(1): 117 - 127
- [8] 韩强,杜修力,刘晶波,等.多维地震作用下隔震桥梁地 震反应()-模型结构振动台试验[J]. 振动与冲击, 2008, 27 (9) : 59 - 65.
- [9] 樊 珂. 大跨度结构多维多点地震响应试验研究与理论 分析 [D]. 北京:北京工业大学,2008
- [10] 建筑抗震设计规范 (GB 50011 2001). 北京:中国建筑工 业出版社,2001.
- [11] 吕西林著. 复杂高层建筑结构抗震理论与应用 [M]. 北 京:科学出版社,2007,201-219.

JOURNAL OF V BRATDN AND SHOCK

galloping of iced conductor and the nonlinearity caused by wind load, was developed by means of the virtual work principle. A three-nodes isoparametric cable element with three translational and one torsional degrees-of-freedom was employed to discretize the bundled conductor and the two-nodes Euler-Bernoulli beam elements were used to simulate the spacers The Newmark time integration and Newton-Raphson nonlinear iteration strategy were used to solve the nonlinear finite element equations A numerical example was used to demonstrate the efficiency of the presented method and the developed finite element program. The aerodynamic coefficients of iced quad-bundled conductor determined by wind tunnel test were presented Furthermore, the galloping of the quad-bundled conductors with different span lengths was numerically investigated. The obtained results provide some references for the development of anti-galloping technology. The method presented in the paper is suitable for the study of galloping of any type of bundled conductors

Key words: bundled conductor, iced; galloping; nonlinear finite element

(pp: 129 - 133)

Shaking table test study of earthquake simulation on a high-rise portal-shaped steel-concrete hybird building with viscous dampers

MA Yu-hong¹, JN Jian-m in¹, Han Xiao-lei², TAN Ping¹, CHEN Xue-w ei²,

SHEN Chao-yong¹, HUANG Xiang-yun¹ CHEN Jian-qiu¹ REN M in¹

 Earthquake Engineering Research & Test Center, Key Laboratory of Seinic Controal and Structural Safety, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2 Tall Building Structure Research Institute, State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science South China University of Technology. Guangzhou 510640, China)

Abstract: In the paper, a 1/30 scale model of high-rise portal-shaped steel-concrete hybird building with viscous dampers was tested on shaking table to study the dynamic characteristics, seismic responses and the effect of dampers on seismic behaviors of the structure. Test results show that the torsion responses between tower 1 and tower 2 is obvious, yet the seismic response of the whole structure meets the code requirement. The dampers play an important role in energy dissipation, and the displacement of the high-altitude gallery and the torsion response of the two towers are greatly reduced

Key words: viscous damper, steel-concrete hybrid buildings; high-rise building; portal-shape strucrue; shaking table test (pp: 134 - 139)

Study on the grading theory and soft-sensing of mill fill level based on information fusion

CHEN $W e_i^1$, JA M in-ping², WANG Heng²

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China;

2 College of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Factors effecting the mill fill level and the relationships among them selves were analyzed Mill fill level grading theory was offered which classifies the coal amount into three areas: uneconomical area, optimal area and dangerous area. The difficulty to obtain plenty of fill level samples was solved so that the data fusion method can be properly used to measure the fill level A soft-sensing method of mill fill level based on BP neural network was proposed and its validity was proved by analyzing the data from the operation field. The method gives the optimal operation range for ball mill and forms the basis for the optimum operation and automatic control of ball mill system.

Key words: ball mill; measurement of mill fill level; fill level grading theory; BP neural network

(pp: 140 - 143)

The phase characteristics of stiffness increase phenomena of rub-in pact rotor

XU Jie-qiong, WANG Shirm in, WANG Qi, WANG Nan

(The Research Lab of Dynamics and Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The phase characteristics of stiffness increase phenomena of a rubbing rotor were investigated It was assumed that the full annular contact will be maintained for a wide speed range even though the rotor has passed through



免费论文查重: <u>http://www.paperyy.com</u> 3亿免费文献下载: <u>http://www.ixueshu.com</u> 超值论文自动降重: <u>http://www.paperyy.com/reduce_repetition</u> PPT免费模版下载: <u>http://ppt.ixueshu.com</u>