

结构模型的振动台试验研究

科学研究报告集 第5集



结构模型的振动台试验研究

清华大学抗震抗爆工程研究室



清华大学出版社

TU312-53

清华大学抗震抗爆工程研究室

科学研究报告集

第 5 集

结构模型的振动台试验研究

清华大学出版社

2092/30

清华大学抗震抗爆工程研究室
科学研究报告集（第5集）
结构模型的振动台试验研究

☆

清华大学出版社出版
北京 清华园
清华大学印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：11.25 字数：260 千字

1990 年 4 月第 1 版 1990 年 4 月第 1 次印刷

印数：0001-2000

ISBN 7-302-00611-3/TV·61

定价：3.50 元

Research Laboratory of Earthquake and
Blast Resistant Engineering
Tsinghua University
Technical Reports TR-5

**Experimental Investigation of Structural Models
on Shaking Table**

Tsinghua University Press

前 言

近几年来,清华大学抗震抗爆工程研究室在国家教育委员会、国家自然科学基金会及有关部委和部门的支持下,对结构模型的振动台试验进行了多方面的研究工作。本论文集选编了结构模型振动台试验研究方面的论文,共 13 篇,以研究课题进行的时间顺序排列。论文涉及的面比较广,包括高层建筑剪力墙结构、底层大开间结构、大板结构、筒体结构、框架结构及近海采油平台结构等。试验深入研究了结构模型在振动台上经受地震荷载后的反应和破坏机理,还有重点地讲述了模型试验的方法和记录数据的分析处理技术。

本论文集中大部分课题的试验是在清华大学抗震抗爆工程研究室的振动台上进行的。部分试验是在水利水电科学研究院大型的三维振动台上进行的,得到了水科院抗震室的大力支持与帮助,在此谨表谢意。

由于我们的水平有限,论文中缺点和错误在所难免,望专家和读者批评指正。

清华大学结构工程研究所 沈聚敏
抗震抗爆工程研究室

1989 年 6 月

目 录

五层装配式钢筋混凝土板柱结构模型振动台试验研究	李德森	沈聚敏 (1)
有机玻璃正方形框筒结构模型动力试验	傅平均 张吉平	裘宗濂 (18)
框筒模型振动台试验研究	王卫东 高象波	裘宗濂 (26)
钢筋混凝土开洞剪力墙模型模拟地震振动台试验研究	朱宏亮	沈聚敏 (32)
重力式平台模型的地震反应试验	钱稼茹	陈 聘 (44)
钢筋混凝土框支剪力墙结构模型的地震反应试验	黄宗瑜	沈聚敏 (55)
底层大空间鱼骨式剪力墙结构模型模拟地震振动台试验研究	朱宏亮	方鄂华 (74)
钢平台结构局部非线性地震反应试验研究	刘印博	陈 聘 (84)
钢筋混凝土框筒结构模型的动力试验研究	张一兵 沈聚敏	王炯明 (97)
推广卡尔曼滤波算法在结构模型动力参数识别中的应用	史文月	宝志雯 (109)
振动信号的计算机处理	王玉庭 王际芝	王宗纲 (120)
钢筋混凝土框架结构模型的地震反应试验研究	霍晓鸣 王炯明	沈聚敏 (130)
底层大空间无翼缘剪力墙结构体系模型振动台试验 研究	傅平均 方鄂华	王宗纲 (149)

Experimental Investigation of Structural Models on the Shaking Table

Contents

Test of Models of Precast R/C Flat Slab Building Structures on Shaking Table	Li Desen Shen Jumin (17)
Dynamic Experiments of Square Frame-Tube Plexiglass Model.....	Fu Pingjun Zhang Jiping Qiu Zonglian (25)
Model Test of a Tube Structure on Shaking Table.....	Wang Weidong Gao Xiangbo Qiu Zonglian (31)
Shaking Table Tests of R/C Shear Walls with Openings	Zhu Hongliang Shen Jumin (43)
Tests of Earthquake Response of Gravity Platform Models.....	Qian Jiaru Chen Dan (54)
Experimental Study on Earthquake Response of Structural Models with Discontinuous Shear Walls Supported on Frames.....	Huang Zongyu Shen Jumin (73)
Experimental Investigation of Shear Wall Structures with Large Space in Ground Floor on a Shaking Table.....	Zhu Hongliang Fang Ehua (83)
Earthquake Response of Steel Platform Models With Local Nonlinearity	Liu Yinbo Chen Dan (95)
The Dynamic Experiment of the Models of Reinforced Concrete Framed Tube Structure	Zhang Yibing Shen Jumin Wang Xianming(108)
Dynamic Parameter Identification of Structural Models by Means of Extended Kalman Filter Algorithm.....	Shi Wenyue Bao Zhiwen(119)
Computer Process of Vibrating Signals	Wang Yuting Wang Jizhi Wang Zonggang(129)
Experimental Study on the Earthquake Response of R/C Frame Structure Models	Huo Xiaoming Wang Xianming Shen Jumin(148)
Shaking Table Test of a No Flange Shear Wall Structure Model with Large Space at the First Story	Fu Pingjun Fang Ehua Wang Zonggang(170)

五层装配式钢筋混凝土板柱 结构模型振动台试验研究

李德森 沈聚敏*

提 要

本文对三个几何尺寸缩比为 1/10 的装配式钢筋混凝土板柱和板柱-剪力墙结构模型进行了静力、动力特性和模拟地震反应的振动台试验研究。模型设计为五层两跨两开间。研究了该类结构体系的动力特性、弹塑性地震反应和破坏形态。通过板柱结构简化为等效梁框架,剪力墙简化为弯曲杆,对该类结构体系所进行的地震反应分析表明,在弹性、开裂和弹塑性阶段,理论计算结果与实测值吻合良好。

一、前 言

早在本世纪初,钢筋混凝土板柱结构已在欧洲开始得到应用,当时主要用于仓库和冷藏储库等建筑中。到本世纪中叶,在美国,板柱结构被广泛地应用于居住建筑中。三十年代初,苏联和美国等国家都相应拟订了有关钢筋混凝土板柱结构设计规程,但是这些规程都针对垂直荷载作用下的设计和分析。从建筑设计角度看,板柱结构体系应用于居住建筑,具有平面布置灵活、空间利用好和施工方便等优点,因而得到广泛的采用。近十年来,随着新型轻质墙体材料的发展和大量居住建筑的兴建,装配式板柱结构体系已在我国非地震区得到了广泛的应用,并已开始推广应用于地震区的建筑中。钢筋混凝土板柱结构能否应用于地震区,国内外学者持有不同观点,主要是因为目前缺乏足够的科学依据,也缺乏实际地震作用的考验。目前,比较普遍的看法是,板柱结构侧向刚度差,为能有效地抵抗水平地震荷载,控制结构的水平位移,在板柱结构中设置剪力墙是十分必要的。

近一二十年来,对板柱节点在地震荷载下的性能进行了比较深入的研究,取得了一批有关板柱节点强度、刚度和延性等方面有价值的研究成果。这些研究工作大都是针对现浇整体板柱结构的,有关装配式板柱节点抗震性能的试验研究工作不如现浇整体节点来得充分和深入。在南斯拉夫发展了一种装配式预应力板柱结构体系,在国际上已推广到匈牙利、古巴和南非等国。这种结构体系曾经受住了 1969 年西班牙鲁卡地震的考验,该地区的地震烈度为 8 度,共有 17 幢该类结构体系的房屋,除 3 幢因未设剪力墙内外墙遭受严重破坏外,其余 14 幢都只有轻微的非结构损坏,表现出良好的抗震性能。近年来,有关水平地震荷载作用下板柱结构的静力弹性分析的研究工作有了较深入的开展,

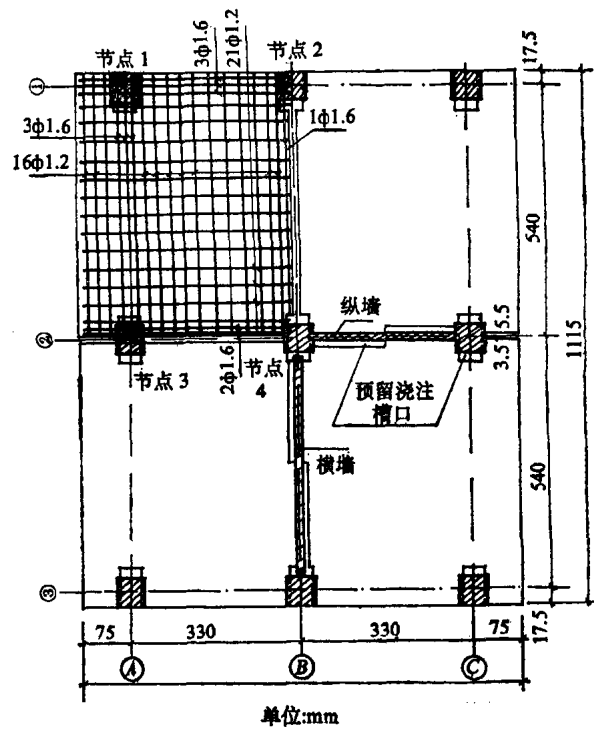
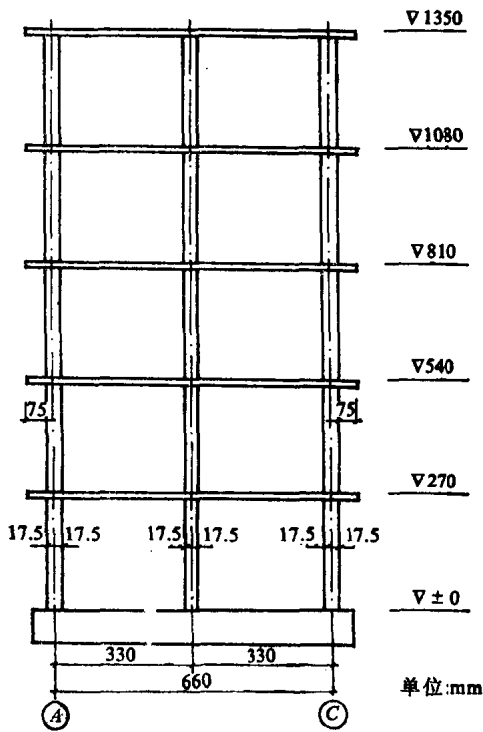
* 傅平均同志参加了部分模型设计、制作和试验等工作。

但在弹塑性和动力分析方面则研究得甚少。

本文对装配式板柱结构和板柱-剪力墙结构模型进行了振动台试验,研究了它们的动力特性、弹性和非弹性地震反应以及结构的破坏形态。

二、模型设计

模型为预制装配式板柱结构,节点现浇。根据原型结构,模型设计为五层两跨两开间,几何尺寸缩比为 1:10。楼板、柱和墙板均为预制,装配后固定在基座上。共进行了三个模型试验。其中两个模型设置剪力墙,分别简记为 FDW 和 FFW。前者在纵横方向都设置剪力墙,后者只在横向设置剪力墙。第三个模型未设置剪力墙,简记为 FNW。模型的剖面 and 平面图分别示于图 1 和图 2 中。



钢材采用镀锌钢丝,其物理力学性能见表 1。为保证钢丝的焊接强度,进行了焊接强度试验,试验结果列于表 2 中。

楼板、柱和墙板均采用水泥砂浆预制,节点灌浆采用高标号微膨胀水泥砂浆,其物理力学性能见表 3。水泥砂浆立方体试块尺寸取为 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$,棱柱体试块尺寸取出 $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}$ 。

楼板、柱和墙板的配筋按照与原型构件在等强度下配筋的原则配置。5 层柱均采用截面为 $35 \times 35 \text{ mm}$ 的实心柱,柱的配筋见图 3。

表 1 镀锌钢丝力学性能

模 型	型 号	直 径 (mm)	屈服强度 (N/mm ²)	极限强度 (N/mm ²)	弹性模量 (N/mm ²)
FDW, FFW	16*	1.6	269	344	1.99×10^5
FNW			283	385	1.94×10^5
FDW, FFW	18*	1.2	357	427	1.85×10^5
FNW			347	420	1.81×10^5
FDW, FFW, FNW	20*	0.9	327	392	—

表 2 焊接试验 (平焊, 一面)

试 件	焊缝长度 (mm)	极限强度 (N/mm ²)	破 坏 强 度
16#—1	19	330	焊 缝 外 断
16#—2	19	351	焊 缝 断
16#—3	21	351	焊 缝 外 断
18#—1	18	341	焊 缝 断
18#—2	20	441	焊 缝 外 断
18#—3	25	525	焊 缝 外 断

表 3 水泥砂浆的力学性能

模 型	水 泥	砂	立方体强度 (N/mm ²)	配 合 比 水泥:水:砂(重量)	弹性模量 (N/mm ²)
FDW, FFW	普通 425 号	中 砂	46.2	1:0.5:2.5	2.67×10^4
FNW	普通 325 号	中 砂	30.1	1:0.4:1.89	2.36×10^4
节点、板缝	明矾石 600 号	标准砂	44.2 (FDW) 44.2 (FFW)	1:0.5:2.0	—
节点、板缝	明矾石 600 号	标准砂	34.2 (FNW)	1:0.6:2.0	—

模型中的楼板设计为平板, 板厚 18mm。楼板厚度按与原型肋形大板几何缩比后具有类同的抗弯刚度选取, 板的上下层配筋相同, 配筋详见图 2。墙板厚 10mm 为实心墙, 贯穿结构全高设置, 配筋详见图 4。由于模型中的剪力墙缩尺后仅为 10mm

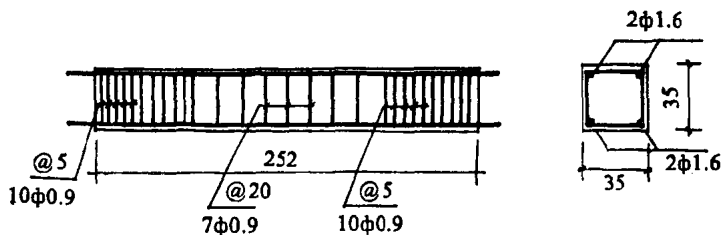


图 3 柱配筋图

厚, 考虑到制作上的困难, 未按原型结构在剪力墙水平接缝处设置齿槽。

构件相互连接处均采用钢筋焊接, 然后浇注高标号微膨胀水泥砂浆捣实。横向板缝上下通长放置 $\phi 1.6\text{mm}$ 镀锌钢丝各 1 根, 并与胡子筋焊接在一起。在原型结构中, 通过柱节点在板缝中另加 1 根长 1.46m $\phi 16\text{mm}$ 的负筋, 而板缝放置的 1 片钢筋骨架未贯通柱节点。楼板预留浇注口, 板中钢筋由此伸出, 在预留口处不断开, 节点构造如图 5 所示。

剪力墙与楼板之间的接缝采用高标号微膨胀水泥砂浆浇注成整体, 而剪力墙与相邻柱之间没有连接, 留有 3mm 狭缝。

根据人工质量动力模拟条件, 用一系列集中质量来代替地震时的有效质量。有效质量的相似系数为

$$M_r = E_r I_r^2$$

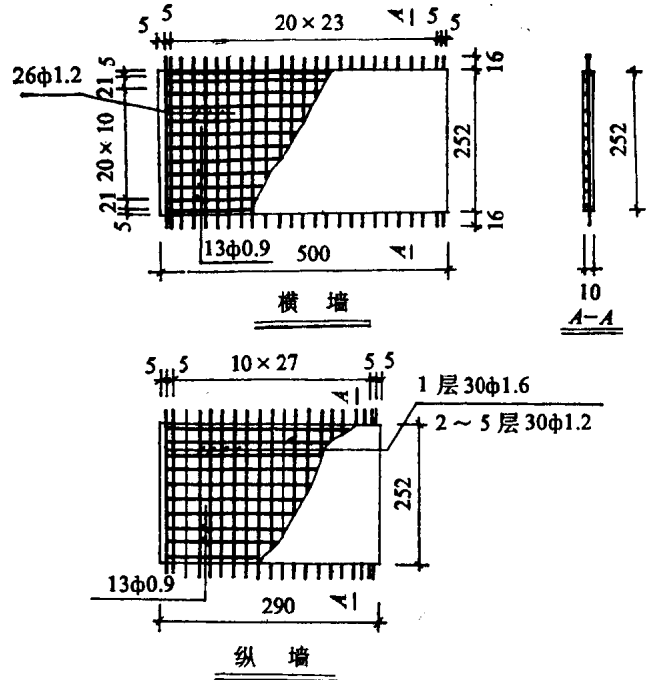


图 4 墙板配筋图

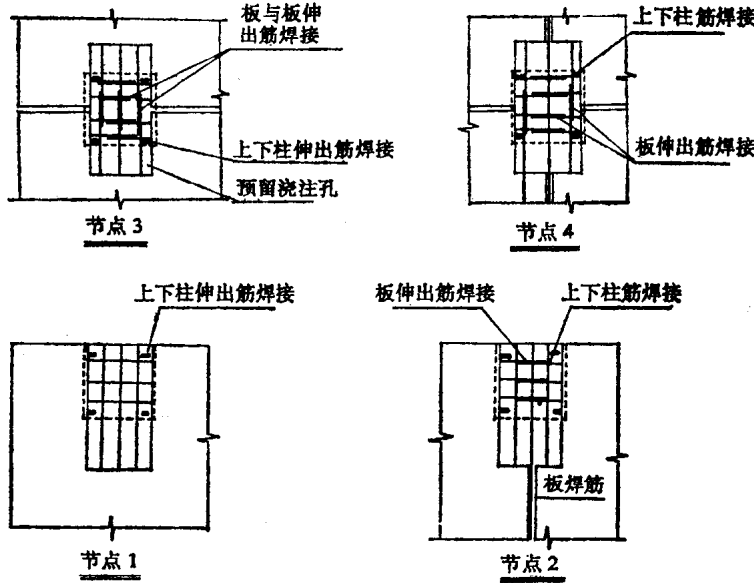


图 5 节点构造图

其中, E_r ——弹性模量相似系数;

l_r ——几何尺寸相似系数。

由于振动台条件的限制, 上述条件难以满足, 在本项试验中仅考虑了其中一部分: 在顶层只放置质量为 30kg 的铅块, 而其余各层只放质量为 50kg 的铅块。

三、试验概况

对三个模型分别进行了动力特性试验和振动台模拟地震反应试验, 同时对模型 FNW 和 FFW 在动力试验前还进行了静力试验, 测量模型的柔度矩阵和板柱结构体系的等效板宽。

(一) 静力试验

模型固定在支座上, 在各楼层处放置千分表量测位移, 水平力通过分配梁逐点分级加到各楼层处, 并由力传感器和电阻应变仪量测。根据实测的位移分布曲线, 可以得出模型的实测的柔度矩阵, 并据此可算出模型的各阶频率, 推算出板柱结构体系的等效板宽。静力试验的量测装置及其全貌示于图 6 中。

(二) 动力特性试验

1. 脉动试验

脉动量测系统由 701 型拾振器、701-5 型放大器、磁带记录仪和光线示波仪组成。

2. 敲击试验

用带有力传感器的锤子逐点敲击各楼层处, 响应信号由布置在各水平楼层处的加速度传感器接收, 并采用磁带记录仪记录。

3. 白噪声激振试验

采用小振幅的白噪声信号对模型激振, 白噪声具有较宽的频谱, 能激发起结构的各阶频率响应。白噪声信号输入振动台电磁激励装置, 振动台台面产生水平运动。结构的响应信号由安装在各楼层处的加速度传感器接收, 并记录在多通道磁带记录仪上。

(三) 振动台地震反应试验

模型固定在振动台台面上, 基座和各楼层处设置加速度和位移传感器, 位移传感器的另一端固定在地面支架上, 因此, 量测的是绝对加速度反应和绝对水平位移反应。磁带记录仪记录响应信号, 地震波信号输入给振动台电磁激励装置, 产生台面水平方向激振, 并采用光线示波仪监控。试验装置见图 7, 振动量测系统见图 8。图 8 中的框图表示了振动台模型试验的量测过程。

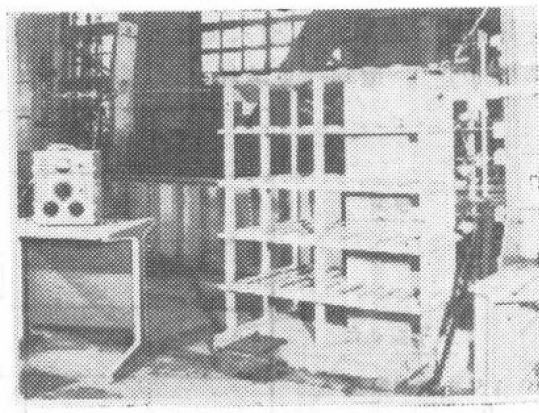


图 6 静力试验装置

地震波采用时间缩比为 10 的 El Centro 1940NS 加速度记录, 缩减后的持续时间为 4.6s。同时, 对模型 FDW 和 FFW 还进行了正弦扫频波激振, 扫频范围为 5—400Hz, 由手动控制。

模型 FDW 的振动台试验过程为: 首先输入最大加速度峰值 (单峰) 为 0.1g 的正弦扫频波, 然后依次输入加速度峰值分别为 0.1g、0.2g、0.3g、0.4g 和 0.7g 的 El Centro 1940NS 地震波进行试验。最后, 输入加速度峰值为 0.75g 的正弦扫频波, 在此情况下模型 FDW 遭到严重破坏。

模型 FFW 的振动台试验过程为: (1) 输入最大加速度峰值为 0.12g 的正弦扫频波进行激振; (2) 依次输入加速度峰值分别为 0.16g 和 0.34g 的 El Centro 1940NS 地震波进行试验; (3) 输入加速度峰值为 0.22g 的正弦扫频波进行激振; (4) 依次输入加速度峰值分别为 0.6g 和 1.0g 的 El Centro 1940NS 地震波进行试验; (5) 输入加速度峰值为 0.75g 的正弦扫频波进行激振。在第二次输入加速度峰值为 0.75g 的正弦扫频波激振情况下, 产生共振时模型 FFW 遭到严重破坏。

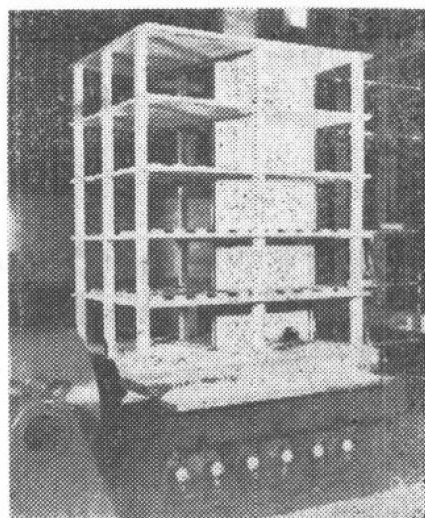


图 7 振动台模型试验装置

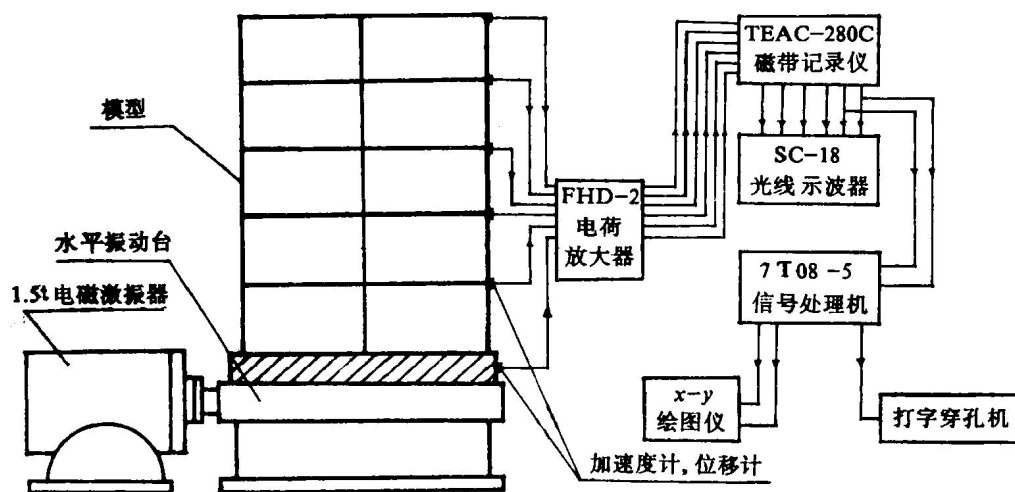


图 8 振动台量测系统

模型 FNW 的振动台试验过程为: 依次输入加速度峰值为 0.10g、0.16g、0.40g、0.79g、1.50g 和 1.80g 的 El Centro 1940NS 地震波进行试验。在输入加速度峰值为 1.80g 地震波后, 发现模型 FNW 遭到了严重破坏。

(四) 数据处理与分析

动力试验所测的数据在 7T08 信号处理机上进行处理, 数据经过处理后, 可以获

得模拟量信号的自谱、互谱、传递函数、相干函数等。7T08 信号处理机采用FFT（快速福里叶变换）软件，离散采样点数为 1024 个。根据模型的自振频率范围，采样时间间隔对模型 FDW 和 FFW 取为 3ms，对模型 FNW 取为 6ms。此时离散样本能较准确地代表原信号，满足了频率分辨率的要求。7T08 信号处理机同时处理两个通道的信号，在信号处理过程中应保证同一次记录信号采样触及的一致性。

当阻尼较小而结构相邻的两个固有频率又不很接近的条件下，对应结构的每一个固有频率，传递函数只出现一个峰值，据此可确定结构的各阶固有频率。采用半功率带宽法确定各阶固有频率下的临界阻尼比。结构各质点在某一个固有频率下，对任意选定点的传递函数的幅值比，对应着该频率下的主振型，由相频特性判断质点相位，由相干系数确定其置信程度，就可得到各阶主振型。随着阶数的增加，识别精度有所降低。对于敲击量测信号，由于锤击是以较小的能量分布在较宽的频率范围内，因而将会引起识别的误差。

本项试验完成于 1983 年。

四、试验结果

（一）动力特性

模型 FNW 和 FFW 在混凝土未开裂和开裂两个阶段实测的前 3 阶频率值列于表 4 中。在表中同样列出了按杆系模型^[1]和简化模型^[2]理论计算求得的结果。

表 4 实测频率与计算值的比较

模 型			FNW			FFW		
频率 (Hz)			f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
未 开 裂 阶 段	计 算 值	杆 系 模 型	8.7	28.5	54.3	25.9	117.5	268.0
		简 化 模 型	8.8	25.6	40.7	23.5	98.7	268.2
	实 测 值	脉 动	9.2	29.6	—	27.3	—	—
		白噪声激振	8.8*	23.4*	38.6*	27.3	99.5	189.2
		柔 度 矩 阵	8.8	26.8	41.9	26.1	102.3	186.3
开 裂 阶 段	计 算 值 (杆 系)		7.2	22.9	41.7	18.7	99.5	267.8
	实 测 值		7.4	22.5	37.6	21.5	83.9	158.1

* 敲击试验

从表 4 的比较中可见，采用不同试验方法所测得的前 3 阶频率具有较好的一致性，用脉动方法测得的频率值比其他方法测得的稍偏高。随着模型混凝土的开裂，各阶频率随之降低。模型 FFW 的频率比模型 FNW 高得多，基频约高 3 倍，而其它各阶频率相差尤为悬殊，这表明剪力墙的设置大大提高了整个结构的刚度。理论计算结果与实测值符合较好，而第三阶频率的计算值较实测值偏高。

表 5 和表 6 分别列出了模型 FNW 和 FFW 在不同试验阶段实测的前 3 阶自振频率值。对于模型 FNW, 在输入加速度峰值为 0.16g El Centro 1940NS 地震波作用下, 模型尚未发现裂缝, 处于弹性阶段, 而模型 FFW 在输入加速度峰值为 0.16g 和 0.34g El-Centro 1940 NS 地震波作用下, 混凝土也尚未开裂, 处于弹性阶段。

表 5 模型 FNW 实测频率值(Hz)

序号	试 验 过 程	第 1 频率	第 2 频率	第 3 频率
1	上台前脉动	9.2	29.6	—
2	静 力 试 验	8.8	26.8	41.9
3	地震波试验前白噪声	8.8	23.4	38.6
4	0.16gEl Centro 波	8.2	20.7	35.8
5	0.40gEl Centro 波	7.4	19.7	33.1
6	0.79gEl Centro 波	7.4	19.4	31.8
7	1.50gEl Centro 波	5.5	18.3	29.2

表 6 模型 FFW 实测频率值(Hz)

序号	试 验 过 程	第 1 频率	第 2 频率	第 3 频率
1	上台前脉动	27.3	—	—
2	静 力 实 验	26.4	102.3	186.6
3	上台前敲击	27.3	99.5	189.2
4	0.12g 正弦波扫频	25.4	90.8	175.7
5	0.16gEl Centro 波	25.4	90.8	175.7
6	0.34gEl Centro 波	21.5	83.9	158.1
7	1.0 gEl Centro 波	14.6	57.6	—
8	0.75g 正弦波扫频	11.7	—	—

图 9 表示了模型 FNW 和 FFW 在不同试验阶段测得的基本频率的变化规律。图中是以模型在振动台试验前利用脉动试验方法测得的基本频率作为标准的。由表 5 和表 6 及图 9 可见, 随着输入地震波加速度峰值的增加, 模型基本频率随之剧烈下降。实测表明, 模型 FNW 屈服破坏后的基本频率已下降到开裂前频率的 47%, 而模型 FFW 已相应下降为 43%。

表 5 和表 6 中所列的按柔度矩阵法确定的自振频率, 系根据分层施加侧向静力荷载, 量测模型相应各层水平位移而得到的。模型 FNW 和 FFW 的柔度矩阵系数相应列于表 7 和表 8 中。在表 7 中, 每层柔度系数列有两个数值, 分别表示加载面和非加载面上的实测值, 二者稍有差异。带撇号的为加载面上实测得到的柔度系数。

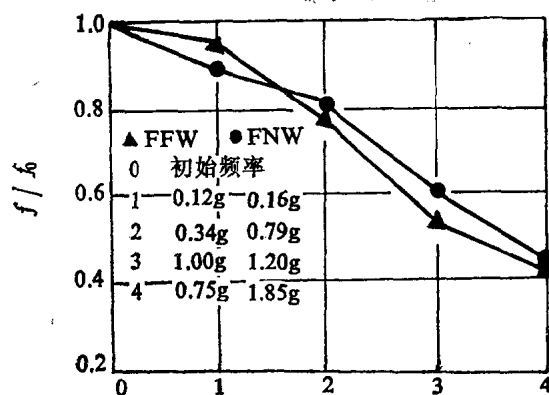


图 9 实测基频的变化图

表 7 模型 FNW 实测柔度系数 (mm/980N)

加 载	测 点	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'	5	5'
1	层	0.178	0.160	0.216	0.200	0.204	0.215	0.205	0.206	0.207	0.208
2	层	0.210	0.206	0.497	0.490	0.522	0.536	0.526	0.522	0.518	0.519
3	层	0.215	0.210	0.532	0.538	0.884	0.908	0.913	0.927	0.930	0.924
4	层	0.216	0.193	0.528	0.517	0.883	0.980	1.224	1.222	1.240	1.181
5	层	0.213	0.192	0.534	0.521	0.930	1.020	1.243	1.240	1.516	1.518

表 8 模型 FFW 实测柔度系数 (mm/980N)

加 载	测 点	1	2	3	4	5
1	层	0.012	0.013	0.015	0.018	0.020
2	层	0.012	0.038	0.044	0.056	0.062
3	层	0.016	0.044	0.057	0.078	0.093
4	层	0.017	0.056	0.092	0.126	0.136
5	层	0.019	0.061	0.110	0.164	0.221

比较表 7 和表 8 可见, 模型 FNW 的整体刚度显著地低于模型 FFW, 模型 FNW 顶点位移值约为模型 FFW 的 6.9 倍, 这与实测的基频比值是相对应的。

利用不同试验测得的模型 FNW 和 FFW 在不同试验阶段的基本振型曲线分别列于表 9 和表 10 中, 在表中同样列出了理论计算求得的结果。实测的基本振型曲线表明, 模型 FNW 的基本振型以剪切变形为主, 随着自振频率的下降, 剪切型特征愈益明显, 底下三层匀有外凸趋势; 模型 FFW 的基本振型以弯曲变形为主, 随着自振频

率的下降,基本振型曲线在底下两层有外凸趋势,这表明底下两层的层间刚度在减小。

表 9 模型 FNW 实测和计算的基本振型曲线

过 程 楼 层	理 论 计 算	振 前 白 噪 声	静 力 试 验	0.16g El Centro 波	0.40g El Centro 波	0.79g El Centro 波	1.50g El Centro 波
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	0.89	0.86	0.90	0.85	0.85	0.88	0.88
3	0.69	0.60	0.76	0.57	0.62	0.78	0.80
2	0.43	0.32	0.48	0.33	0.36	0.50	0.53
1	0.15	0.13	0.20	0.12	0.12	0.23	0.32

表 10 模型 FFW 实测和计算的基本振型曲线

过 程 楼 层	理 论 计 算	振 前 敲 击	静 力 试 验	0.13g 正弦扫频	0.16g El Centro 波	0.34g El Centro 波	0.22g 正弦扫频
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	0.72	0.71	0.76	0.71	0.72	0.72	0.74
3	0.45	0.31	0.53	0.46	0.48	0.45	0.59
2	0.23	0.24	0.31	0.24	0.33	0.34	0.41
1	0.07	0.14	0.15	0.15	0.13	0.18	0.17

图 10 表示模型 FNW 和 FFW 根据地震反应试验,在不同台面加速度峰值下,测得的水平位移沿结构高度的变化规律与实测的静力位移曲线和基本振型曲线的比较。

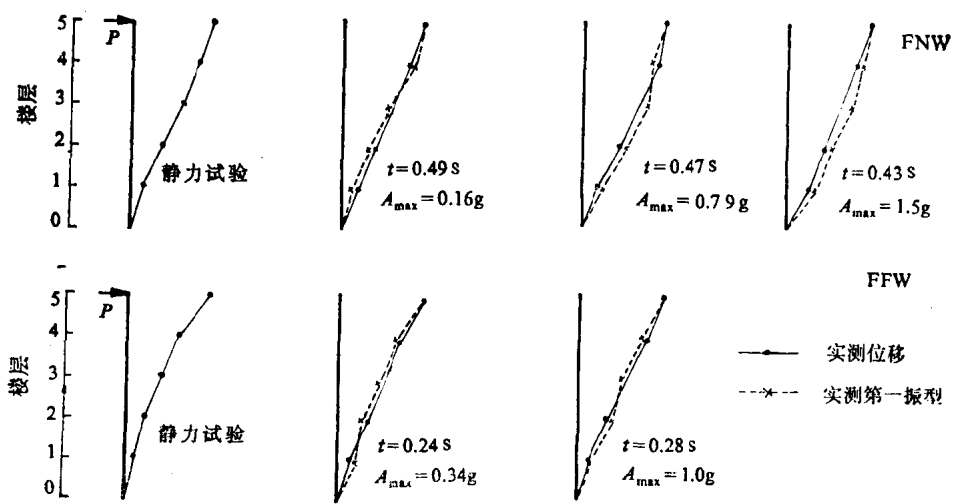


图 10 动力位移曲线与静力位移曲线和基本振型曲线的比较