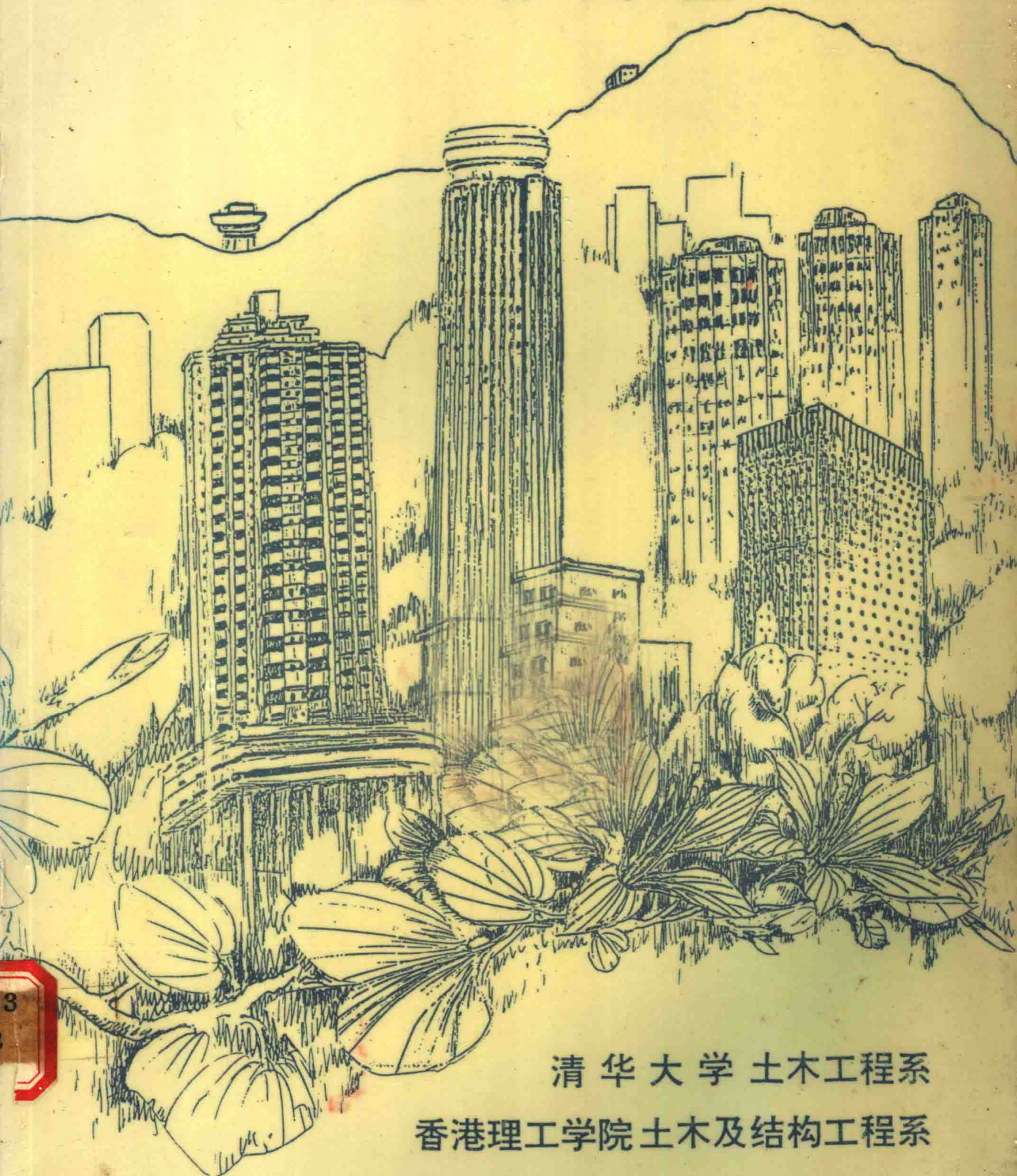


香港几幢高层建筑 的脉动试验



清华大学土木工程系

香港理工学院土木及结构工程系

香港几幢高层建筑的 脉动试验

清华大学土木工程系
香港理工学院土木及结构工程系

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是介绍香港五幢高层建筑的现场试验与数据分析所获得的结果。其中三幢是 30 层左右的住宅，两幢分别是 50 层和 65 层的商业大厦。

书中阐述了用随机信号数据处理确定结构物动力特性的理论基础，详细地描述了现场试验的情况及建筑物的概貌，列出了各个建筑物实测得到的固有频率、振型和阻尼比等动力特性以及其它一些有用的数据。

在附录中列出了部分的分析谱图和有关结构物的参数。

本书对从事抗震理论研究、工程抗震设计和结构动力试验的教师、工程技术人员都有参考价值。也可供高等院校有关专业结构试验课教学参考。

香港几幢高层建筑的脉动试验

清华大学土木工程系 香港理工学院土木及结构工程系



清华大学出版社出版发行

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷



开本：787×1092 1/16 印张：11 字数：260 千字

1985 年 12 月第一版 1985 年 12 月第一次印刷

印数 0001~1000

统一书号：15235·244 定价：2.40 元

研 究 小 组 成 员

清华大学土木工程系

宝志雯*

陈志鹏

李兴埔

王际芝

王宗纲

邝守仁

香港理工学院土木及结构工程系

高赞明*

古国纪

黎钧衍

刘世龄

罗绍湘

黄智慧

王志勇

* 编辑

序 言

1982 年 10 月,清华大学土木工程系抗震抗爆工程研究室宝志雯副研究员访问了香港理工学院土木及结构工程系,交流了清华大学抗震抗爆工程研究室在结构物动力试验研究方面的概况和进展,并和香港理工学院土木及结构工程系的老师们进行了学术讨论。经过讨论,双方认为对香港现有高层建筑进行动力特性的实测研究是一项有意义的研究课题。

此后,香港理工学院土木及结构工程系和清华大学土木工程系两系之间进一步进行了讨论,决定联合进行此项研究工作,由香港理工学院土木及结构工程系负责在香港提供实测建筑物等试验条件,由清华大学土木工程系负责提供现场试验所需的仪器。此项研究计划得到香港理工学院研究委员会及清华大学有关部门的支持。

1983 年 7 月香港理工学院土木及结构工程系高赞明博士访问了清华大学土木工程系,共同制订了详细的试验研究计划。

1983 年 9 月及 1984 年 9 月,香港理工学院土木及结构工程系与清华大学土木工程系的高层建筑动力特性实测研究小组在香港合作进行了两次现场试验,这份联合研究报告是两次现场试验实测数据的分析总结。

编 者

1985.12.

ABSTRACT

This research project is concerned with an experimental study of the dynamic characteristics of tall buildings in Hong Kong. Three concrete residential buildings, with shearwalls and corewalls, have been chosen for the field observation. All of them are about 30-storeys in height; two have similar superstructures but different foundation depths. Two concrete commercial buildings with corewalls and frame-tube, have also been selected in the study. One is 50 storeys in height and rectangular in plan while the other is 65-storeys in height and circular in plan.

Ambient vibration measurement were taken in these buildings. The recorded data were processed with the aid of real-time analysis equipment based on the use of Fast Fourier Transforms. Transfer Functions and Coherence Functions were determined in order to assist in the determination of natural frequencies and mode shapes of vibration as well as the damping ratios of the structure. The results of the dynamic behaviour of each building are presented in this report.

感 谢

本项研究工作得到了香港理工学院土木及结构工程系主任黄启杰博士和清华大学土木工程系主任陈肇元教授和王国周教授的支持。

香港理工学院院长 H.S.Ward 博士自始至终关心这项研究工作, 提出了宝贵的意见, 并到现场参观指导。

我们也非常感谢香港房屋署, John.C.Lo 设计事务所, 隆地企业有限公司, 华润集团、胡应湘设计事务所和合和实业有限公司为我们提供了现场试验的条件。

特别要感谢香港理工学院研究委员会和对外关系顾问处及清华大学有关部门对本项研究工作的支持和资助。

试验的成功也由于得到了香港理工学院技术人员的大力支持和帮助, 尤其是 M.C.Ng 先生和 T.T.Wai 先生。此外, 每次试验都有香港理工学院高年级的同学参加, 保证了现场试验工作的顺利进行。

符 号 说 明

$f_j(t)$	第 j 阶振型的力
k_j	第 j 阶振型的正则化刚度
m_j	第 j 阶振型的正则化质量
$n(t), m(t)$	输出的噪声函数
${}_n G^I(\omega)$	f_n 的自谱
${}_m G^I(\omega)$	f_m 的自谱
${}_n G^V(\omega)$	$Y_n(t)$ 的自谱
$G_K^V(\omega)$	$V_K(\omega)$ 的自谱
${}_m {}_n G^I(\omega)$	$f_m(t)$ 和 $f_n(t)$ 的互谱
$G_{Kl}^V(\omega)$	$V_K(t)$ 和 $V_l(t)$ 的互谱
$G_K^V(\omega_m)$	真实响应 $V_K(t)$ 在 ω_m 点的自谱的谱值
$G_{Kl}^V(\omega_m)$	$V_K(t)$ 和 $V_l(t)$ 在 ω_m 点的互谱的谱值
$H_n(i\omega)$	在 n 阶振型的频率响应函数
$C_{Kl}^V(\omega_m)$	$G_{Kl}^V(\omega_m)$ 的实部
$Q_{Kl}^V(\omega_m)$	$G_{Kl}^V(\omega_m)$ 的虚部
$V_K(t)$	在第 k 个自由度上的真实的位移响应函数
$Y_j(t)$	第 j 阶振型的位移响应函数
$Y_j'(t)$	第 j 阶振型的速度响应函数
$Y_j''(t)$	第 j 阶振型的加速度响应函数
${}_m \phi_K$	第 m 阶振型在第 k 个自由度上的正则化振型矢量
${}_n \phi_K$	第 n 阶振型在第 k 个自由度上的正则化振型矢量
$\gamma_{Kl}(\omega)$	度量 $V_K(t)$ 和 $V_l(t)$ 之间关系的相干函数
ξ_j	第 j 阶振型的阻尼比
ω_j	第 j 阶振型的固有圆频率

目 录

序言	I
提要	II
感谢	II
符号说明	III
第一章 前言	1
第二章 脉动信号的量测	2
2.1. 现场试验所用的仪器	2
2.2. 传感器的布置	6
2.3. 建筑物概貌介绍	6
第三章 随机数据分析	20
3.1. 理论基础	20
3.2. 分析处理	23
第四章 现场量测的结果	29
4.1. 大埔塔式住宅建筑	29
4.2. 观塘塔式住宅建筑	36
4.3. 《大宝阁》住宅建筑	44
4.4. 华润大厦	56
4.5. 合和中心	64
4.6. 顶层扭转分量与平移分量的比例关系及其它	76
第五章 总结	81
参考文献	81
附录 A——附录 H	83

第一章 前 言

近年来高层建筑的动态特性已引起很大的兴趣。这部分是由于这样的事实，对于高层建筑物来说整个建筑物的结构的安全和服务设施比之中等高度的建筑物是更加重要。而现代的高层建筑物往往是柔性结构，阻尼比小，重量也轻，这样的结构物对动态作用是相当地敏感。因而，能有更好的方法使设计者可以较精确地估计动态响应是很有必要的。从建筑物安全检测的角度来看，对现有高层建筑了解其动态特性及其响应也是很需要的，可以作为若干年后，（或经受自然灾害以后）对该建筑物进行性能评定的一个重要的原始数据。

尽管计算机能力的增长，结构动力学的水平已有了引人注目的发展，但对于分析一些复杂而大型的结构物（比如像高层建筑），要选择一个合适的简化的数学模型，而这模型又能反映在动态作用下的基本结构构件的力学性能和材料特性也还是不容易的，（例如，阻尼特性的确定仍然是一个困难的问题）。为了既经济又有效地研究高层建筑物的动态问题，我们将理论分析与试验分析的方法结合起来进行。作为高层建筑动态特性的研究工作的第一步，是对高层的原型结构物作脉动试验（由环境激励的振动试验）。该课题的理论分析工作也将继续进行。

脉动试验是近年来有新的发展的一种方法。测量结构物在环境振动下的响应并用随机信号数据分析的方法，确定足尺结构物在小振幅情况下的各种动态特性。频率、振型和阻尼比都可以确定，并具有足够的精度。这个方法，与老的方法比较，它不需要任何激振设备就可进行试验。因此，该方法比较简单、方便，特别适合于已建好的建筑物。

1983 年夏天做试验的三幢高层住宅建筑物，它们是：

1. 32 层塔式深基础的住宅建筑。
2. 36 层塔式浅基础的住宅建筑。
3. 35 层核心墙形式的深基础的建筑物。

前面两幢房子由香港房屋署提供，第三幢是由 John.C.Lo 设计事务所提供。所有这三幢全是剪力墙与核心筒结构形式的高层建筑物。

1984 年夏天又对两幢商业大厦进行了试验量测，它们是：

1. 具有深基础的 50 层高的华润大厦。
2. 具有浅基础的 65 层高的合和中心。

这两幢大厦都是外面是框筒，里面是核心墙的高耸建筑物。

在下面的章节里将详细介绍：现场的试验工作，数据分析的理论根据和这五幢建筑物的脉动信号分析的结果。

第二章 脉动信号的量测

2.1 现场试验所用的仪器

在现场的脉动信号量测中，主要是用了加速度传感器、放大器和磁带记录器，并同时用两套装置进行试验。下面分别列出这两套试验装置。

主要的一套试验装置包括以下一些设备：

(a1) 伺服加速度传感器 V401R (JAPAN AKASHI) 12 个

这是带有前置放大器的伺服加速度计。当作很低电平的脉动信号量测时，还需要有放大器。

测量范围： $\pm 1.0g$

灵敏度： $5V/g$

分辨率： $5 \times 10^{-6}g$

频率范围：DC—400Hz

(b1) 直流电源 (中国制造) 1 台

为伺服加速度传感器及其放大器提供 ± 12 伏的直流电源。

(c1) 放大器, GCF—6 (中国, 宝应) 12 通道

频率范围: A.C. 0.2—3kHz

D.C. 0—3kHz

增益: 0.01—2500

(d1) 磁带记录器, 型号 R—280C (JAPAN TEAC) 1 台

这是一台模拟信号的磁带记录器。在本文所述试验中选用 2.375cm/s 的记录速度。

通道数: 14 通道

磁带速度: 2.375cm/s—76.20cm/s

频率范围: DC—20kHz

输入电平: $\pm 1V$ — $\pm 10V$

(e1) 光线示波器 (中国上海电表厂) 1 台

用光线示波器来监视每个通道的传感器和放大器工作是否正常。

通道数: 24 通道

图片 2.1—2.2 是以上这组仪器装置的照片。

第二套试验装置包括以下一些设备：

(a2) 加速度传感器 8306 型 (丹麦 B&K 公司) 4 个

这是有前置放大器的压电晶体型的加速度计。对于微弱的振动测量，需要有电荷放大器。它能够提供电荷或者电压输出。

量测范围: $\pm 1.0g$

灵敏度: $10V(\text{or } 10nc)/g$

频率范围: $0.2Hz-1000Hz$

(b2) 直流电源

4 台

它提供 28 伏直流电源供加速度传感器内的前置放大器用。

(c2) 放大器, 2635 型 (丹麦, B&K 公司)

4 台

这是由电池供电的电荷放大器。

频率范围: $0.1Hz-200kHz$

增益: $0.01mV-10V/PC$

(d2) 磁带记录器, 7003 型 (丹麦 B&K 公司)

1 台

这是一台模拟信号的磁带记录器。在这次试验中磁带速度选用 1.5 吋/秒, 是调频 FM 的记录方式。用这个速度对于整盘 1200 英尺的磁带最长的记录时间约可达 2 小时 40 分钟。

通道数: 4 通道

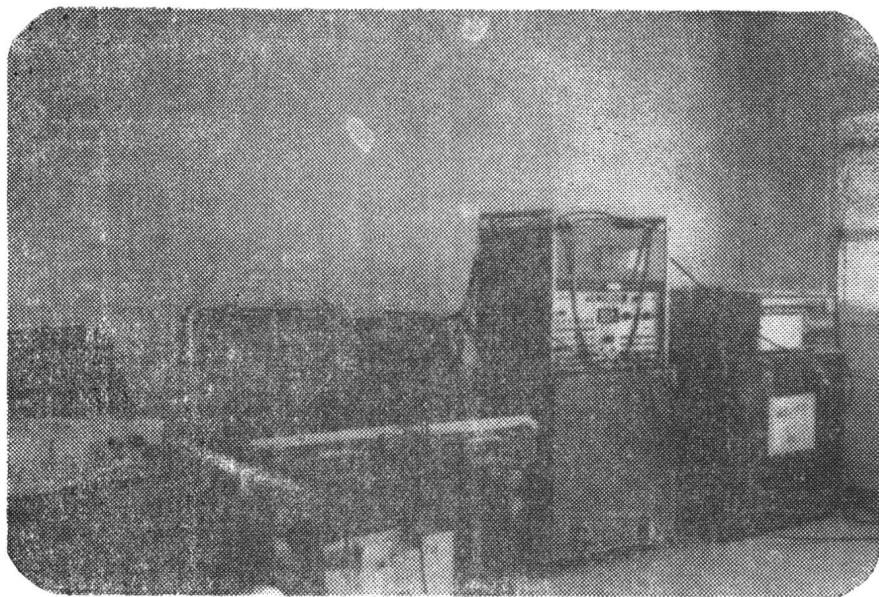
磁带速度: 1.5 吋/秒—15 吋/秒

频率范围: $DC-50kHz$

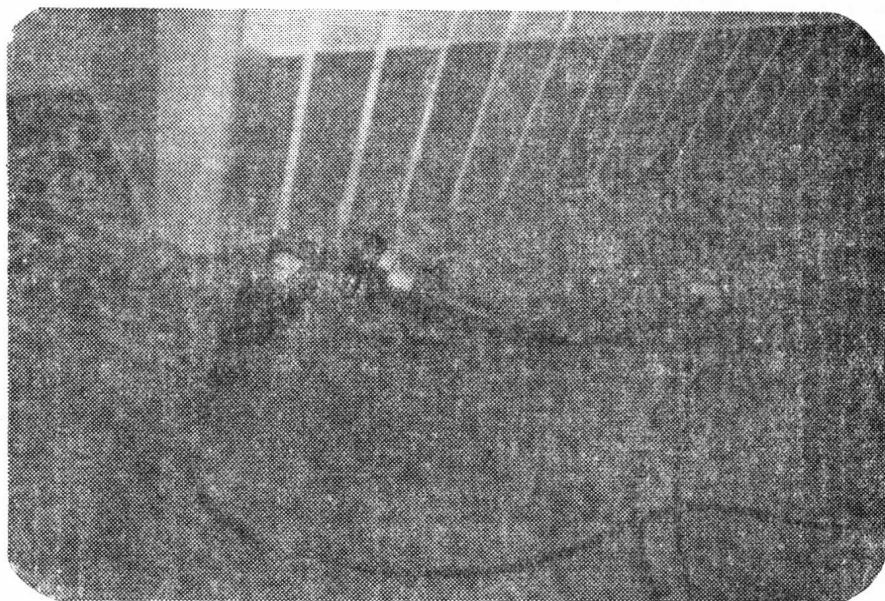
输入电平: $1V-50V$ RMS

图片 2.3—2.4 是有关第二套装置的照片。

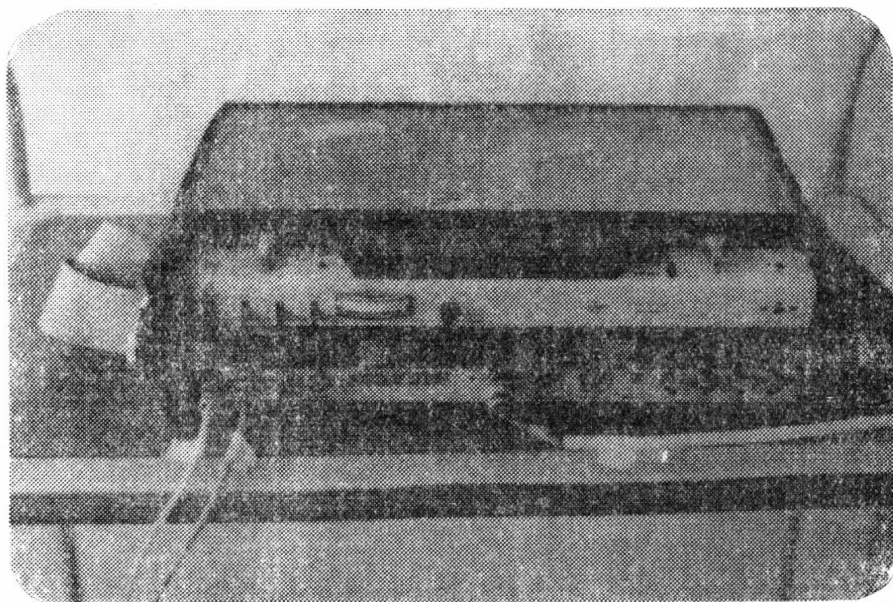
图 2.1 是量测系统的示意图。



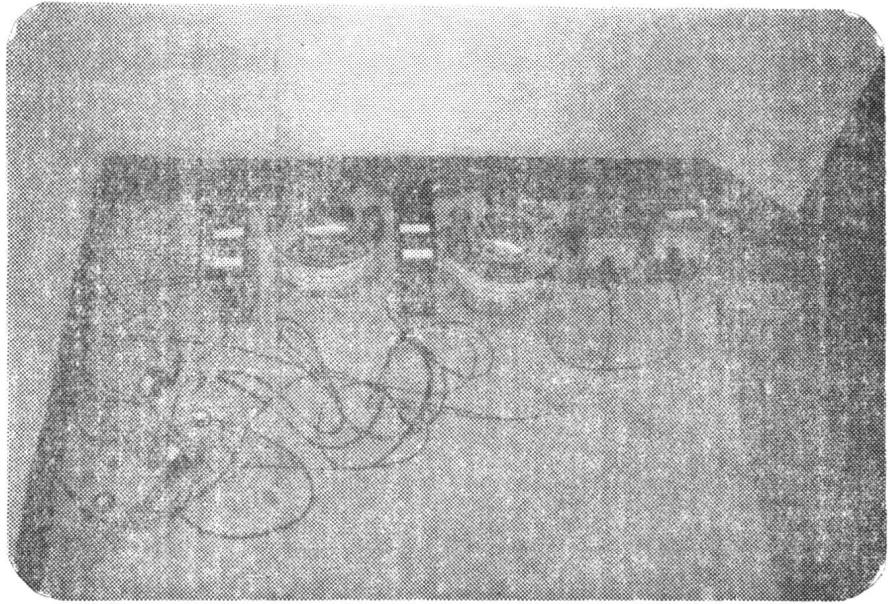
照片 2.1 记录系统 1 (由清华大学提供)



照片 2.2 伺服加速度传感器 (由清华大学提供)



照片 2.3 记录系统 (由香港理工学院提供)



照片 2.4 B&K 8306型加速传感器 (由香港理工学院提供)

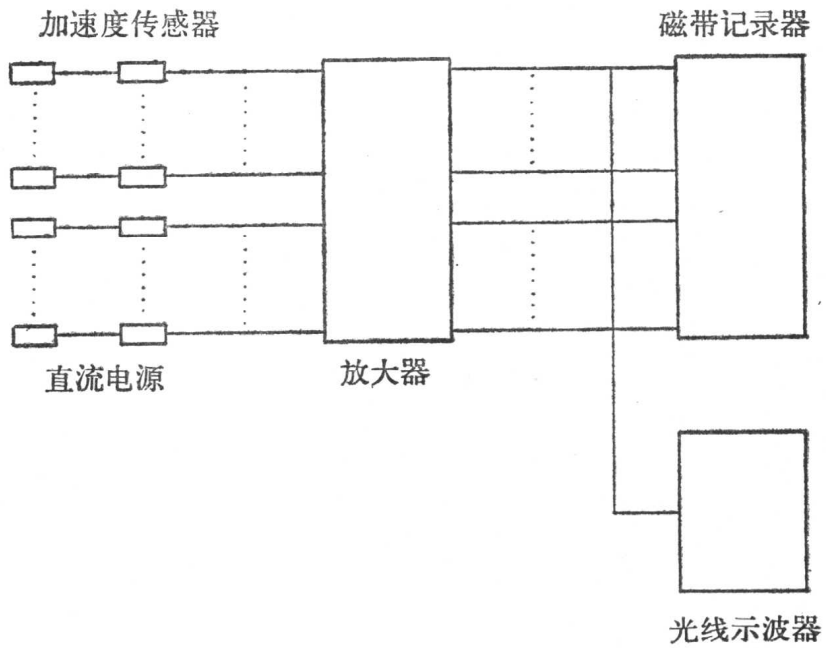


图 2.1 量测系统示意图

2.2 传感器的布置

大部分的传感器是用来测量两个水平方向的振动信号，只有小部份是用来记录结构物的垂直振动信号。垂直加速度的信息和数据主要是用来估计基础的摆动以及有没有在水平的振动信号中增添附加的成份。有时候，垂直加速度计的放置对识别外加的激励是有帮助的。

一般来说，由于一次记录传感器的数量不够，对每个建筑物进行两到三次的脉动试验记录。每次大约布有 12 个到 16 个传感器，每次记录长度从 30 分钟到 100 分钟不等。在第一次记录时，传感器是沿高度差不多等间距地分布在若干层楼板上，测量横向和纵向的振动。并使传感器尽可能地放置在建筑物横截面的中心，以便减小扭转振动分量的影响。在做试验时，互相垂直的两个方向的振动信号或同时记录，或者第一次记录完毕，再将传感器转 90° ，作第二次记录。两个互相正交的方向应尽可能地靠近横截面的主轴。以便在每次量测中一个主轴的弯曲振动的响应分量突出出来。弯曲振动的信号记录完毕后，又进行扭转振动信号的记录，一对对的传感器沿高度重新布置。每对传感器放在建筑物同一层的两端。利用这样记录的信号来研究扭转振动。

此外，还可以在特别有兴趣的部位，放上传感器提取信号。例如，在第三幢建筑物中，在同一楼层里沿着纵轴大约等间距地布置了几个传感器，同时记录横向振动，以便检查水平楼板的刚性。

1983 年和 1984 年的夏天总共完成了五幢高层建筑物的现场试验。

2.3 建筑物概貌介绍

2.3.1 大埔塔式住宅建筑

该建筑物座落在九龙大埔，是由房屋署设计的塔式 II 型住宅建筑。该建筑物建在吐露港湾的填海造地上。建筑物的基础是 30 多米深的混凝土沉箱桩，以便将上部的荷载传到下面的基岩。照片 2.5—2.6 是该建筑物的外貌。其平面似风车形，总共 32 层，高约 97 米。中间核心筒作为电梯井用，在中心筒的四周有四片剪力墙，这之间的空间用来安排楼梯和走廊。在“风车”的每端布置有两个互相垂直的剪力墙，如图 2.2 典型层平面图上所示。核心筒与这些剪力墙共同起到抗侧向剪力和扭转剪力的作用。

所有这些墙厚度的变化范围是从 150mm 到 300mm，并且沿高度有一些变化。楼板的厚度是 130mm。

在做现场试验时，整个建筑物接近竣工，可还没有人居住。



照片 2.5—2.6 大埔塔式住宅建筑

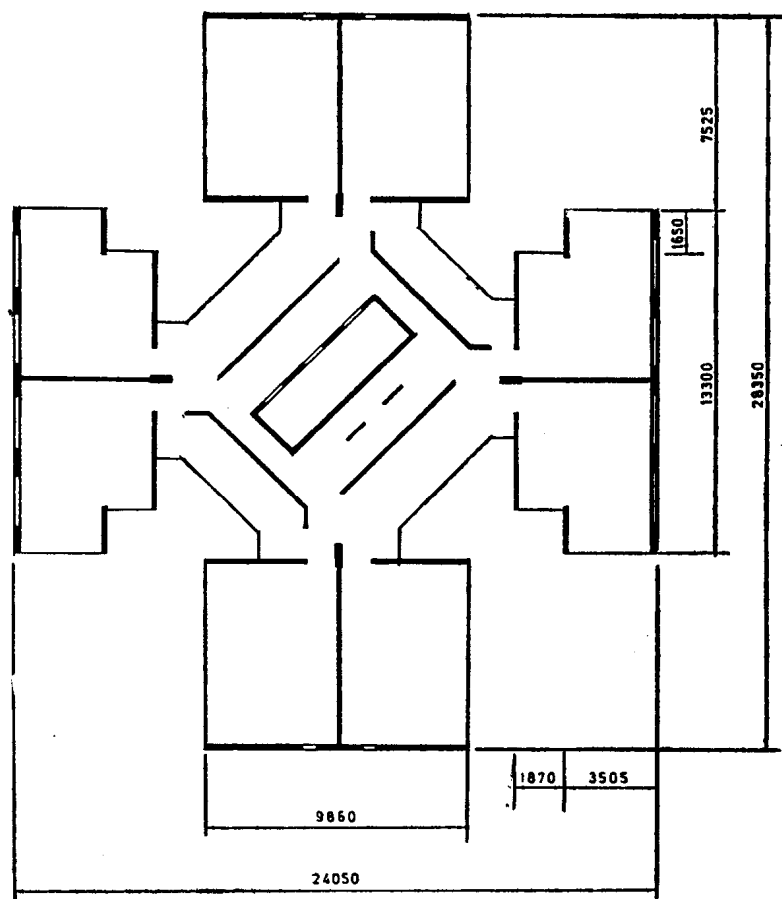
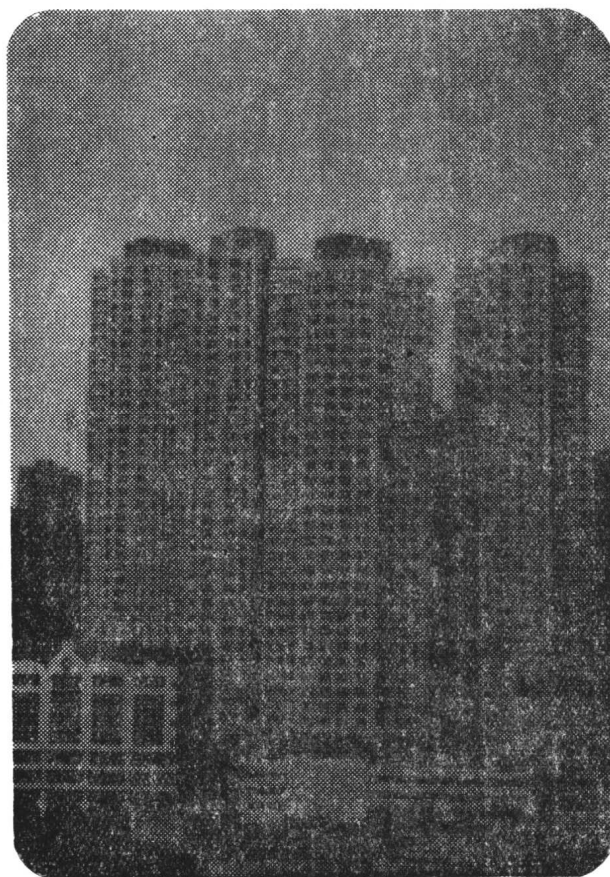
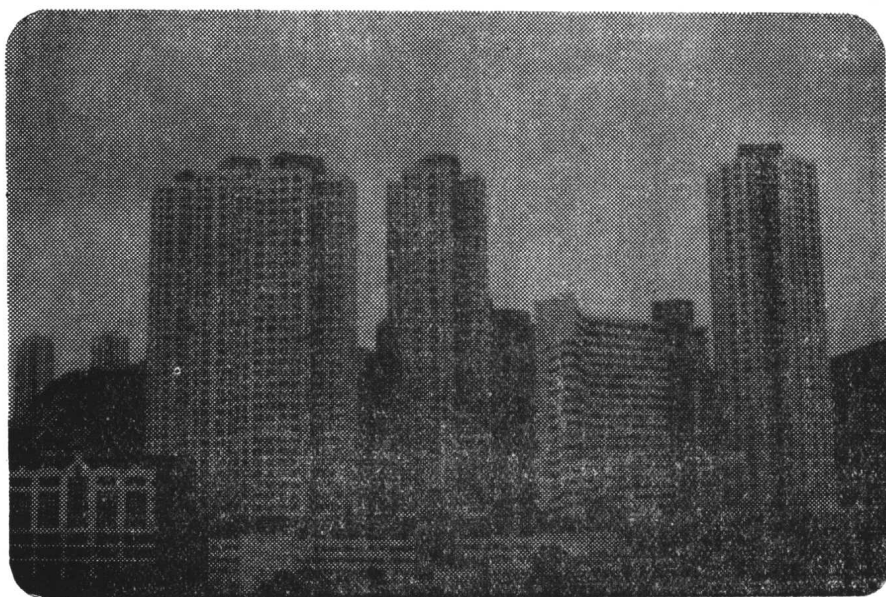


图 2.2 大埔塔式住宅建筑典型层平面图

2.3.2 观塔塔式住宅建筑

第二幢建筑是在九龙观塘区靠近山坡。因为其花岗岩基岩十分靠近地表面，所以只有几米深的混凝土沉箱桩基作为该建筑物的基础。从照片 2.7—2.8 可以看到，它也是一幢塔式Ⅱ型的住宅建筑。因此，上部结构与第一个建筑物基本上是相似的，它平面是一个“风车”型。它们所不同的只是这里在底层平面有一个很大的平台，而在平台以下有 4 层比上部面积大的停车层。停车层结构和主结构设计得连结在一起。换言之，第二个建筑物可认为是包括 4 层停车场，总共有 36 层的塔式Ⅱ型住宅建筑。

做试验时，主结构已经施工完毕，但是一些设备还没有装完，有些收尾工作仍在进行中。从照片 2.9—2.10 可以看到这情况。



照片 2.7—2.8 观塘塔式住宅建筑