

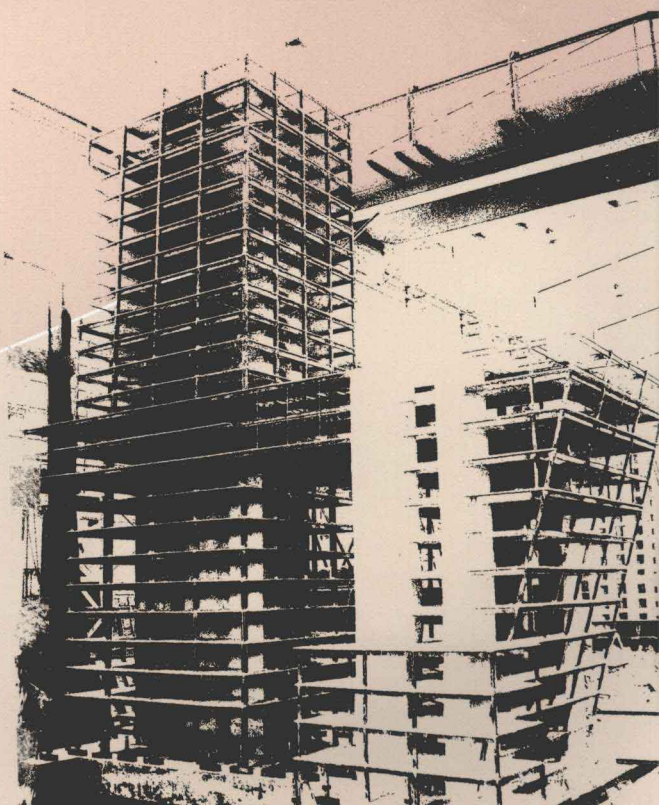
建筑结构振动台模型 试验方法与技术

周 颖 吕西林 著

Method and Technology for
Shaking Table Model Test of
Building Structures



科学出版社



建筑结构振动台模型 试验方法与技术

周 颖 吕西林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较系统地阐述建筑结构振动台模型试验的方法与技术。内容包括建筑结构振动台试验相似关系、建筑结构振动台试验模型材料、建筑结构振动台试验模型设计、建筑结构振动台试验模型边界模拟与施工技术、建筑结构振动台试验方案设计、建筑结构振动台试验准备、建筑结构振动台模型试验数据分析方法等。

本书可供土木工程研究、设计和试验人员参考,也可作为土建类专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构振动台模型试验方法与技术/周颖,吕西林著. —北京:科学出版社,2012.6

ISBN 978-7-03-034488-5

I. ①建… II. ①周… ②吕… III. ①建筑结构-结构振动-模型试验
IV. ①TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 110365 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:张怡君

责任印制:闫 磊 / 封面设计:迷底书装

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2012 年 6 月第一次印刷 印张:10

字数:200 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

模拟地震振动台试验通过向振动台输入地震波,激励起振动台上结构的反应,从而很好地再现地震过程,因而振动台试验是考察结构地震反应和破坏机理最直接的方法,也是研究与评价结构抗震性能的重要手段之一。国际上第一台计算机控制的、可模拟地震波的振动台出现于20世纪60年代,由美国加州大学伯克利分校建成,尺寸为 $6\text{m}\times 6\text{m}$ 。经过近50年的发展,据不完全统计,目前国内外已建和在建的振动台数量超过百台。应该认识到,在振动台发展逐渐呈现大型化、多台化、综合化趋势的同时,绝大部分振动台由于台面尺寸和设备能力所限,仅能进行缩尺模型的模拟地震振动台试验研究。本书从建筑结构角度,详述振动台模型试验的方法与技术,内容包括建筑结构振动台试验相似关系、模型材料、模型设计、边界模拟与施工技术、方案设计、试验准备、数据分析方法。

本书第一作者在2003年初完成第一个建筑结构模型振动台试验研究,为避免振动台试验像“黑箱效应”一样的不可获知性,撰写了《振动台模型试验研究大纲》,多年来作为同济大学土木工程防灾国家重点实验室的内部参考资料。《振动台模型试验研究大纲》经过近10年的使用与完善,将以下几部分特色内容重新推导整理于本书中。

(1)在建立振动台模型相似关系时,主要问题是振动台试验物理量繁多,很难全部满足相似关系。本书提出“似量纲分析法”,选用可控相似常数,求出其余相似常数。该方法以可控相似常数为主要矛盾,将振动台试验包含诸多物理量的复杂问题简单化。

(2)在振动台模型设计时,一个主要问题是不同模型材料很难满足同一相似关系。本书提出把握整体结构层面的相似原则,详细给出钢筋

混凝土结构、钢结构、考虑土-结共同工作结构、桁架结构、组合楼板、消能减震结构、隔震结构、砌体结构、预应力结构的模型设计方法。

(3)在确定振动台试验工况时,地震激励的选择与输入顺序是影响试验结果的一个关键问题。本书提出以主要周期点处地震波反应谱的包络值,与设计反应谱相差不超过 20% 的方法选择地震波;按主要周期点处多向地震波反应谱的加权求和值大小确定地震波输入顺序。此方法已经过振动台试验验证。

(4)本书有关振动台试验准备和数据分析的内容,对振动台试验的具体操作,具有现实指导意义。

本书的主要内容源自以下研究项目的部分成果:国家自然科学基金项目(50708071,51078274,51021140006)、“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ13B01)、北京市科技计划重大项目(D09050600370000)、土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题(SLDRCE09-D-11)、上海市教育委员会科研创新项目重点项目(12ZZ036)、中央高校基本科研业务费专项资金项目。

本书的成果是在同济大学土木工程防灾国家重点实验室振动台试验室中完成的,书中的工程实例来源于国内的几个大型设计研究院和房地产公司,在此对他们多年的支持表示衷心的感谢。也特别感谢同济大学振动台试验室卢文胜教授十年来的帮助与支持。

本书侧重从结构工程角度,阐述振动台模型试验方法与技术。由于作者水平所限,书中难免有疏漏之处,衷心希望读者不吝指正。

作 者
2012 年 2 月

目 录

前言

第 1 章	引言	1
第 2 章	建筑结构振动台试验相似关系	3
2.1	结构模型相似的概念	3
2.2	结构模型相似关系的建立方法	3
2.3	结构抗震模型试验的相似常数	7
2.4	结构振动台试验的相似关系	11
第 3 章	建筑结构振动台试验模型材料	16
3.1	模型试验材料要求	16
3.2	常用的结构振动台试验模型材料	16
第 4 章	建筑结构振动台试验模型设计	20
4.1	钢筋混凝土结构模型设计	20
4.2	钢结构模型设计	21
4.3	考虑土-结共同工作结构模型设计	24
4.4	桁架结构模型设计	25
4.5	组合楼板模型设计	25
4.6	消能减震结构模型设计	26
4.7	隔震结构模型设计	27
4.8	砌体结构模型设计	27
4.9	预应力结构模型设计	27
第 5 章	建筑结构振动台试验模型边界模拟与施工技术	29
5.1	边界模拟基本原则	29
5.2	底座结构类型及设计要点	30
5.3	模型施工技术与质量控制	32

第 6 章	建筑结构振动台试验方案设计	34
6.1	模型安装位置及方向	34
6.2	传感器布置原则	34
6.3	传感器类型	35
6.4	试验工况设计	38
6.5	地震激励选择及输入顺序	40
第 7 章	建筑结构振动台试验准备	47
7.1	试验模型上振动台前	47
7.2	试验模型上振动台后	51
第 8 章	建筑结构振动台模型试验数据分析方法	54
8.1	模型结构动力特性	54
8.2	模型结构加速度	63
8.3	模型结构位移	64
8.4	模型结构地震作用	65
8.5	预测原型结构的抗震性能	67
第 9 章	结语	69
参考文献		70
附录 A	同济大学振动台试验设备主要性能参数	71
附录 B	已完成高层建筑结构振动台模型试验一览表	73
附录 C	建筑结构振动台模型试验实例(上海国际设计中心)	76
C.1	概述	76
C.2	试验设备与仪器	78
C.3	模型设计与制作	79
C.4	模拟地震振动台试验	86
C.5	模型结构试验结果分析	107
C.6	原型结构抗震性能分析	144
C.7	结论	152

第 1 章

引 言

模拟地震振动台试验通过向振动台输入地震波,激励起振动台上结构的反应,从而很好地再现地震过程,因而振动台试验是实验室研究结构地震反应和破坏机理最直接的方法,也是研究与评价结构抗震性能的重要手段之一。

同济大学在 1989 年引入美国 MTS 公司生产的振动台,之后进行了建筑结构、桥梁结构、机械设备、电子设备、核反应堆安全壳、核电设备等多种不同体系的模拟地震振动台试验研究。这些试验按试验要求,可以划分为两类:一类是基础性试验,一类是工程验证性试验。基础性试验旨在对一种抗震新方法或新技术进行探索和研究;工程验证性试验则是验证一种结构新体系或设备的抗震性能。本书从建筑结构角度,详述振动台模型试验的方法与技术。这些方法与技术,均适用于建筑结构模型的基础研究性振动台试验和工程验证性振动台试验。

本书主要内容包括建筑结构振动台试验相似关系(第 2 章)、建筑结构振动台试验模型材料(第 3 章)、建筑结构振动台试验模型设计(第 4 章)、建筑结构振动台试验模型边界模拟与施工技术(第 5 章)、建筑结构振动台试验方案设计(第 6 章)、建筑结构振动台试验准备(第 7 章)、建筑结构振动台模型试验数据分析方法(第 8 章)等。各章节内容与振动台试验过程的逻辑关系如图 1.1 所示。

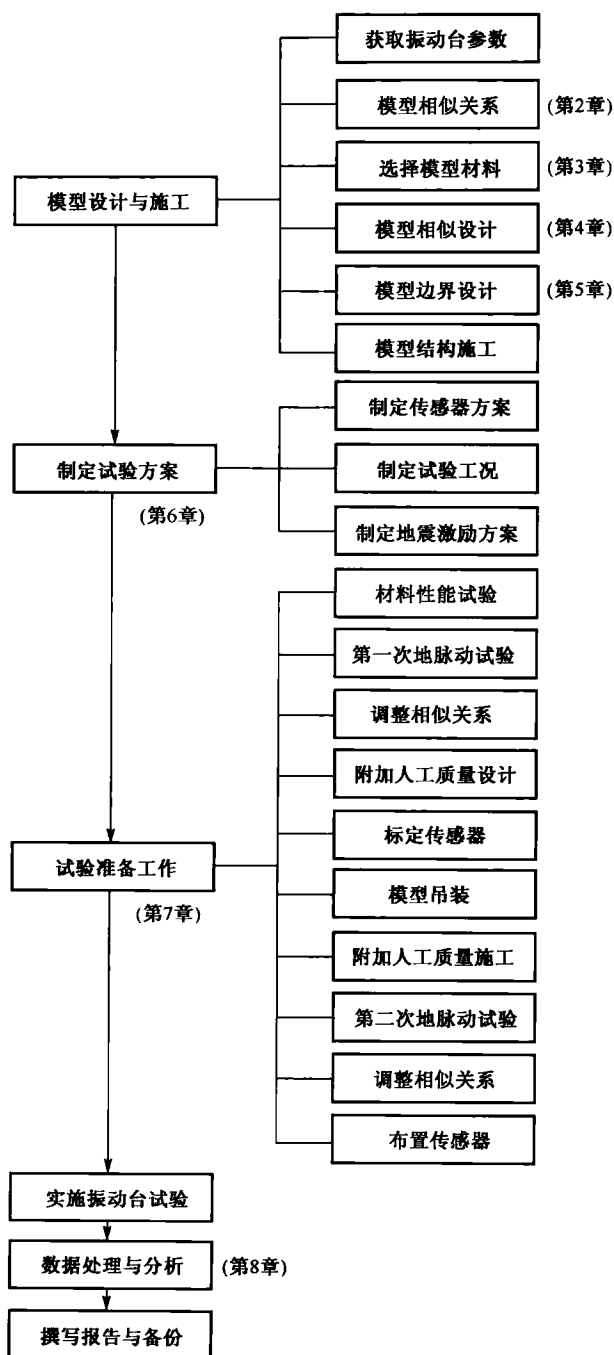


图 1.1 振动台试验过程与各章节内容的逻辑关系图

第 2 章

建筑结构振动台试验相似关系

严格地讲,结构试验除了在原型结构上所进行的试验外,一般的结构试验都是模型试验,结构抗震试验也可以采用模型试验。模型是根据结构的原型,按照一定的比例制成的缩尺结构,它具有原型的全部或部分特征。对模型进行试验可以得到与原型结构相似的工作情况,从而可以对原型结构的工作性能进行了解和研究。模型试验的核心问题是如何按照相似理论的要求,设计出与原型结构具有相似工作情况的模型结构。本章即介绍结构振动台试验中的相似理论与相似设计。

2.1 结构模型相似的概念

结构模型试验旨在设计出与原型结构具有相似工作情况的模型结构,其相似设计中既包含了物理量的相似,又包含了更广泛的物理过程相似。简单地说,结构模型相似主要解决下列一些问题:

- (1)模型的尺寸是否要与原型保持同一比例;
- (2)模型是否要求与原型采用同一材料;
- (3)模型的荷载按什么比例缩小和放大;
- (4)模型的试验结果如何推算至原型。

具体的结构模型相似设计将涉及几何相似、材料相似、荷载相似(动力、静力)、质量相似、刚度相似、时间相似、边界条件相似等。

2.2 结构模型相似关系的建立方法

结构模型与原型之间的相似关系,通过模型结构与原型结构相似常数之间的关系予以反映,即相似条件。模型设计的关键就是要给出各相

似常数之间的相似关系。确定相似条件一般有方程式分析法和量纲分析法两种。

1. 方程式分析法

运用方程式分析法确定相似条件,必须在进行模型设计前对所研究的物理过程各物理量之间的函数关系,即对试验结果和试验条件之间的关系提出明确的数学方程式,然后才能根据数学方程式,确定相似条件。用方程式分析法确定相似条件,方法简单、概念明确,许多文献有详细介绍,本书不再详细讨论。

2. 量纲分析法

当待考察问题的规律尚未完全掌握、问题较为复杂没有明确的函数关系式时,常采用量纲分析法确定相似关系。

量纲(也称因次)的概念是在研究物理量的数量关系时产生的,它说明量测物理量时所采用单位的性质。一般来说,选取三个物理量的量纲作为基本量纲,其余物理量的量纲可以作为导出量纲推导得到。例如,在一般结构工程问题中,各物理量的量纲都可由长度、时间、力三个基本量纲导出,此系统称为绝对系统;或由长度、时间、质量三个基本量纲导出,此系统称为质量系统。建筑结构模型试验常用物理量的质量系统量纲见表 2.1。也可以选用其他量纲作为基本量纲,只要基本量纲是相互独立和完整的,各物理量之间的量纲关系实际满足的是一种量纲协调。

表 2.1 建筑结构模型试验常用物理量的质量系统量纲

物理量	物理量符号	相似常数符号	质量系统量纲
长度	l	S_l	$[L]$
时间	t	S_t	$[T]$
质量	m	S_m	$[M]$
位移	d	S_d	$[L]$
应力	σ	S_σ	$[ML^{-1}T^{-2}]$
弹性模量	E	S_E	$[ML^{-1}T^{-2}]$



续表

物理量	物理量符号	相似常数符号	质量系统量纲
泊松比	μ	S_μ	[1]
应变	ϵ	S_ϵ	[1]
刚度	K	S_K	[MT^{-2}]
密度	ρ	S_ρ	[ML^{-3}]
力	F	S_F	[MLT^{-2}]
弯矩	M_b	S_{M_b}	[ML^2T^{-2}]
速度	$\dot{x}$	$S_{\dot{x}}$	[LT^{-1}]
加速度	$\ddot{x}$	$S_{\ddot{x}}$	[LT^{-2}]
阻尼	c	S_c	[MT^{-1}]

量纲分析法需要遵循二个相似定理,即:相似物理现象的 π 数相等(第一相似定理); n 个物理参数、 k 个基本量纲可以确定 $(n-k)$ 个 π 数(第二相似定理)。运用量纲分析法确定相似条件的步骤可以总结为:列出与所研究的物理过程有关的物理参数,根据相似定理使得模型和原型的 π 数相等,得到模型设计的相似条件;遵循量纲和谐的概念,确定所研究各物理量的相似常数。

可以看出,方程式分析法只是量纲分析法中的一种特殊情况,它以各物理量之间满足的方程式作为 π 数,各物理量的量纲也一定遵循量纲协调条件。

3. 似量纲分析法

量纲分析法从理论上来说,先要确定相似条件(π 数),然后由可控相似常数,推导其余的相似常数,完成相似设计。在实际设计中,由于 π 数的取法有着一定的任意性,而且当参与物理过程的物理量较多时,可组成的 π 数也很多,将线性方程组全部计算出来比较麻烦;另一方面,若要全部满足与这些 π 数相应的相似条件,将会十分苛刻,有时是不可能达到也不必要达到的。综合上述两点,结合多年研究和试验经验,在结构模型相似常数建立过程中,并不需要明确的求出诸多 π 数的表达式,可以采用更为实用的设计方法,即先选取可控相似常数,利用一种近似

量纲分析法的方法,求出其余的相似常数。因其原理本质仍为量纲分析法,故称为“似量纲分析”,其步骤简述如下。

相似理论求得的 π 数是独立的无量纲组合,它表示要求已知物理量的量纲与待求物理量的量纲组合为 [1],即已知物理量与未知物理量组合的基本量纲的幂指数之和为零。根据这一原则,很容易由幂指数的线性变换确定各相似常数之间的关系。

例如,一般建筑在地震作用下的结构性能研究中包含下列物理量:

- 几何性能方面,长度 l 、位移 D 、应变 ε ;
- 材料性能方面,弹性模量 E 、应力 σ 、泊松比 μ 、质量密度 ρ 、质量 m ;
- 荷载性能方面,集中力 F 、线荷载 p 、面荷载 q 、力矩 M ;
- 动力性能方面,刚度 K 、周期 T 、频率 f 、阻尼 c 、速度 $\dot{x}$ 、加速度 a 等。

在结构振动台试验中,常选用长度、应力、加速度三个物理量的相似常数作为可控相似常数,在质量系统中,它们对应的量纲分别是 $[L]$ 、 $[ML^{-1}T^{-2}]$ 、 $[LT^{-2}]$ 。以求解弯矩相似常数为例,将长度、应力、加速度的质量系统量纲幂指数以列矩阵的形式列于表 2.2;查取表 2.1 中弯矩的质量系统量纲为 $[ML^2T^{-2}]$,将其相应幂指数以列矩阵的形式填入表 2.2;进行线性列变换,直至变换后的列矩阵子项均为零。其中, S_l 为模型几何尺寸与原型几何尺寸之比, S_{M_b} 为模型弯矩与原型弯矩之比。

表 2.2 似量纲分析法求解弯矩相似常数表

物理量 质量 系统量纲	已知物理量			未知物理量量纲的线性列变换		
	L	σ	a	M_b	$M-\sigma$	$M-\sigma-3L$
$[M]$	0	1	0	1	0	0
$[L]$	1	-1	1	2	3	0
$[T]$	0	-2	-2	-2	0	0

此时的变换系数即为物理量之间相似常数的幂指数,即

$$S_{M_b} \cdot S_{\sigma}^{-1} \cdot S_l^{-3} = 1 \Rightarrow S_{M_b} = S_{\sigma} \cdot S_l^3 \quad (2.1)$$

再以阻尼相似常数为例。查表 2.1 可知,阻尼的质量系统量纲为



$[MT^{-1}]$, 量纲幂指数按列矩阵的形式列入表 2.3。

表 2.3 似量纲分析法求解阻尼相似常数表

物理量 质量 系统量纲	已知物理量			未知物理量量纲的线性列变换		
	L	σ	a	c	$2c - 2\sigma + a$	$2c - 2\sigma + a - 3L$
$[M]$	0	1	0	1	0	0
$[L]$	1	-1	1	0	3	0
$[T]$	0	-2	-2	-1	0	0

$$S_c^2 \cdot S_\sigma^{-2} \cdot S_a \cdot S_l^{-3} = 1 \Rightarrow S_c = S_\sigma \cdot \sqrt{\frac{S_l^3}{S_a}} \quad (2.2)$$

结构振动台试验中的其余相似常数均可由似量纲分析法予以确定。

2.3 结构抗震模型试验的相似常数

结构抗震试验一般可分为结构抗震静力试验和结构抗震动力试验两大类,其中结构抗震静力试验又分为拟静力试验和拟动力试验;结构抗震动力试验分为模拟地震振动台试验和建筑物强震观测试验。结构抗震静力、动力试验模型设计均要满足物理条件相似、几何条件相似和边界条件相似的要求。

1. 结构抗震静力模型相似常数

常见的钢筋混凝土结构静力模型相似常数如表 2.4 所示。在钢筋混凝土结构中,由于混凝土材料本身具有明显的非线性性质以及钢筋和混凝土力学性能之间的差异,要模拟钢筋混凝土结构全部的非线性性能是很不容易的。从应力与弹性模量量纲相同的含义来说,要求物体任何点的应力相似常数与弹性模量相似常数相等。实际上受力物体各点的应力大小是不同的,亦即各点的应变大小不同。对于不同的应变,要求弹性模量相似常数不变,这就要求模型与原型的应力-应变关系曲线相似,如图 2.1 所示。要满足这一关系,只有当模型与原型采用相同强度和变形的材料时才有可能,这时就要求满足表 2.4 中“实用模型关系式”的要求。

表 2.4 钢筋混凝土结构静力模型相似常数

物理性能	物理量	相似常数符号	一般模型关系式	实用模型关系式
几何性能	长度	S_l	S_l	S_l
	面积	S_A	S_l^2	S_l^2
	线位移	S_l	S_l	S_l
	角位移	1	1	1
材料性能	应变	1	1	1
	弹性模量	S_E	S_e	1
	应力	S_e	S_e	1
	质量密度	S_p	S_e/S_l	$1/S_l$
	质量	S_m	$S_e \cdot S_l^3$	S_l^3
荷载性能	集中力	S_F	$S_e \cdot S_l^2$	S_l^2
	线荷载	S_q	$S_e \cdot S_l$	S_l
	面荷载	S_p	S_e	1
	力矩	S_M	$S_e \cdot S_l^3$	S_l^3

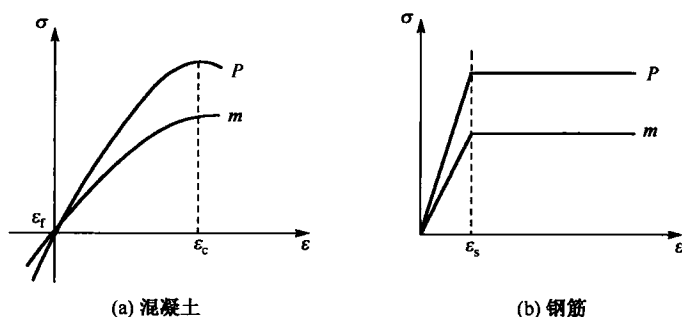


图 2.1 模型与原型应力-应变关系相似图

国外从 20 世纪 50 年代开始就开展了砖石结构模型试验的研究,国内也曾开展过这方面的研究工作。砖石结构静力模型相似常数如表 2.5 所示。由于砖石结构本身是两种材料组成的复合材料结构,因此制作模型时在所有的细节上都要按比例缩小,这无疑给模型制作带来了一定的困难。由于试验要求模型砌体有与原型相似的应力-应变关系,因此,一个实用的途径就是采用与原型相同的材料。



表 2.5 砌体结构模型相似常数

物理性能	物理量	相似常数符号	一般模型关系式	实用模型关系式
几何性能	长度	S_l	S_l	S_l
	面积	S_A	S_l^2	S_l^2
	线位移	S_l	S_l	S_l
	角位移	1	1	1
材料性能	应变	1	1	1
	弹性模量	S_E	S_σ	1
	应力	S_σ	S_σ	1
	质量密度	S_ρ	S_σ/S_l	$1/S_l$
	质量	S_m	$S_\sigma \cdot S_l^2$	S_l^2
荷载性能	集中力	S_F	$S_\sigma \cdot S_l^2$	S_l^2
	线荷载	S_q	$S_\sigma \cdot S_l$	S_l
	面荷载	S_p	S_σ	1
	力矩	S_M	$S_\sigma \cdot S_l^3$	S_l^3

2. 结构抗震动力模型相似常数

结合上一节的似量纲分析法,得到的常用结构动力模型相似常数如表 2.6 所示。在实际设计模型时,要全部满足表中的相似条件只有在模型比较大的情况下才能实现。当模型比例较小时,或者不能采用相同材料时,往往难以全部满足表中的相似条件。在这种情况下,一般可以根据试验目的对模型设计的要求有所侧重。

(1)如果试验目的是为了验证一种新的理论,而这种理论适用于某一类型的结构,而不是某一个具体结构,那么这种模型只要求表现这种结构的共同特点,即要求这类结构在主要方面(如几何尺寸和动力性能方面)相似。对这种新理论的检验,可以通过理论结果与模型试验结果相比较进行。此类模型称为弹性模型,主要用于基础研究性试验,其制作材料不必和原型结构材料完全相似,只需模型材料在试验过程中具有完全相同的弹性性质。

(2)如果试验目的是为了检验设计或提供设计依据,例如设计某一

比较复杂的结构或新型结构,有时对计算结果没有把握,而必须依靠模型试验来判断和检验,就要求模型与原型严格相似,并能把试验结果正确地应用到该设计中去。此类模型称为强度模型,主要用于工程验证性试验,通常要求模型材料与原型材料一致,高层建筑结构振动台试验多属于此类。

表 2.6 结构动力模型相似常数

物理性能	物理量	相似常数符号	关系式	备注
几何性能	长度	S_l	S_l	控制尺寸
	面积	S_A	S_l^2	
	线位移	S_l	S_l	
	角位移	1	S_σ/S_E	
材料性能	应变	1	S_σ/S_E	
	弹性模量	S_E	$S_E = S_\sigma$	控制材料
	应力	S_σ	S_σ	
	质量密度	S_ρ	$S_\sigma/(S_A \cdot S_l)$	
	质量	S_m	$S_\sigma \cdot S_l^2/S_A$	
荷载性能	集中力	S_F	$S_\sigma \cdot S_l^2$	
	线荷载	S_q	$S_\sigma \cdot S_l$	
	面荷载	S_p	S_σ	
	力矩	S_M	$S_\sigma \cdot S_l^3$	
动力性能	阻尼	S_c	$S_\sigma \cdot S_l^{1.5} \cdot S_a^{-0.5}$	
	周期	S_T	$S_l^{0.5} \cdot S_a^{-0.5}$	
	频率	S_f	$S_l^{-0.5} \cdot S_a^{0.5}$	
	速度	S_v	$(S_l \cdot S_a)^{0.5}$	
	加速度	S_a	S_a	控制试验
	重力加速度	S_g	1	

在表 2.6 所列的相似条件中,并没有考虑尺寸效应和加载速率对材料力学性能的影响。国内外研究结果表明:

(1)随着试件尺寸的减小,材料的强度将逐渐提高;