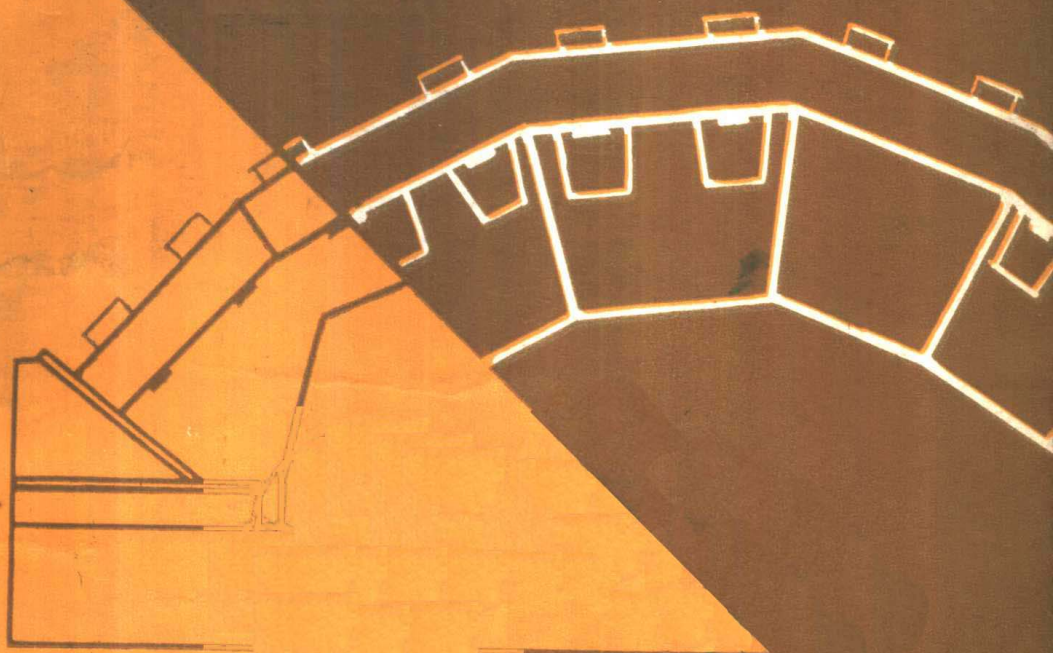


[美] H.G. 哈里斯 编 朱世杰 译



混凝土结构动力模型

地震出版社



混凝土结构动力模型

〔美〕 H. G. 哈里斯 编

朱世杰 译 徐宗和 校

地震出版社

1987

内 容 简 介

本文集由美国混凝土协会出版，共有论文11篇，讨论的课题是结构工程人员相当感兴趣的动力学问题，包括动力模型的相似要求，模型混凝土的动力试验，框架结构、大坝及桥梁的地震特性，钢筋混凝土结构在大气冲击波荷载下和冲击荷载下的效应，以及板形房屋结构的动力性态等。

本书可供从事工程抗震的设计、科研人员及大专院校师生参考。

Dynamic Modeling of Concrete Structures

Harry G. Harris

1982

混凝土结构动力模型

[美] H. G. 哈里斯 编

陈世杰 译 徐宗和 校

责任编辑：陈焕新

地震出版社出版

北京复兴路63号

建外印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 7.5 印张 189 千字

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

印数 0001—3000

统一书号：13180·373 定价：2.15 元

译 者 序

在结构工程的研究与设计中，结构模型常常具有突出的作用。而在结构力学和结构工程的教学过程中，模型（缩尺结构）实验也是很重要的一环。此外，在结构研究领域内，对于那些分析技术尚不适用的许多复杂的动力课题，实践证明，小比例动力模型技术是扩展知识和了解结构性能的有力工具。

本文集的主编是美国费城德雷克塞尔（Drexel）大学土木工程教授H.G.哈里斯（Harries）。他还是美国混凝土协会（ACI）混凝土结构动力模型分会的主席。近年来，他和美国哈佛大学G.M.萨布尼斯（Sabnis）及其他大学的教授们共同写作了《结构模型和试验技术》一书（已于1983年问世）。

本文集是混凝土结构动力模型实验方面的专辑。全书选用了有代表性的论文11篇，其中大部分取自美国的研究，少数取自新西兰、英国及瑞典的研究。文集反映了当前动力模型技术的先进水平，阐述问题深入浅出，实用性强。

我国自海城和唐山两次大地震后，工程抗震工作受到极大重视，科研实验正方兴未艾。很多人认为，为了带动整个抗震试验技术的发展与提高，结构模型抗震试验技术的研究应作为近几年的重点课题。

基于上述情况，为了吸取他人工作中有益东西，缩短差距，谨此译出本文集供同行参考。由于译者水平所限，错误和缺点在所难免，敬请读者批评指正。

译 者

前 言

本文集是由美国混凝土协会 (ACI) 委员会 444 混凝土结构模型、混凝土结构动力模型分会筹备的, 其中讨论的是结构工程师相当感兴趣的问题。经过大量准备工作, 组织了两次为时半天的讨论会, 一次是1980年3月2—7日在内华达拉斯维加斯召开的 ACI 年会; 另一次是1980年9月21—26日在波多黎各圣胡安召开的 ACI 秋季会议。两次会议的重点都放在“钢筋混凝土动力模型”这一课题上。所提论文的范围从动力模型的相似要求及模型材料的动力特性, 到地震荷载下房屋、桥梁及大坝等方面的研究。

在第二次世界大战以后的年代里, 当许多涉及动力荷载的结构问题不得不加以解决的时候, 混凝土结构的模型试验方法得到很大的发展。由于随时间变化的荷载的复杂性和对结构的影响, 使得在这种荷载下利用小比例模型实验技术, 来和相同基点上的更为传统的分析方法进行竞争成为可能。结构工程师感兴趣的动力荷载的范围很广, 从风或车辆引起的弹性振动, 直至可能导致相当多的结构破坏的爆炸冲击荷载都包括在内。人们特别感兴趣的课题是地震荷载, 由于它分布广泛, 并且具有潜在的破坏性, 特别是最近几年来, 世界上具有地震危险性的许多地区越来越城市化。

在有关教育、研究和设计的课题中, 结构动力模型对实验起着重要的作用。在示范振动的基本概念方面, 简单的实验室实验对大学生及研究生都是十分有用的。在结构研究领域内, 对于分析技术不适用的许多复杂的动力课题, 小比例动力模型对扩展知识和了解结构的性能确实是一个强有力的工具。精细制造模型的技术也是同等重要的, 在许多主要是动力荷载的结构设计中, 模型起

着重要的作用。

选入本文集的11篇论文中，开头两篇论述相似要求及模型材料的动力特性。接着的4篇形成本文集的最大的一个部分，它们着重讨论结构的地震荷载。其中第一篇框架结构的抗震问题，是根据新西兰的研究工作写成的；第二篇是关于框架-墙结构的抗震问题；第三篇论述拱坝的地震荷载；第四篇论述长跨桥梁的地震特性。其后一篇论文是关于地下钢筋混凝土结构在大气冲击波荷载下的效应问题。在所谓的冷战年代里，它对小比例极限强度模型的研制起了很大的推动作用。

再两篇是关于钢筋混凝土结构受冲击荷载时的效应的论文。其中一篇选自英国的研究，讨论梁与柱节点处这种重要细部构造上的冲击荷载问题；另一篇选自瑞典，研究在钢筋混凝土板上冲击荷载的效应。

最后一类论文是关于板形结构的振动分析。一篇涉及楼板上的振动分析；另一篇讨论大板房屋建筑中预制混凝土剪力墙结构的动力性态。

这本专题论文集，既不是主办单位也不是美国混凝土协会的官方报告。但是，委员会认为，对结构的动力性态感兴趣的结构工程师来说，它无疑是一本出色的参考文献。

搜集在文集里的全部论文，都按照美国混凝土协会的程序进行过审议。筹备委员会对参加这一审议工作，以及根据意见和建议做了修改工作的全体人员致以谢意。编者衷心感谢论文全体作者所给予的合作并使本文集得以出版，特别感谢动力模型分会会员，尤其感谢R.J.克雷格（Craig）和S.L.保罗（Paul）两位博士的大力支持。在筹备和出版本文集的工作中，美国混凝土协会给予了大力协助，在此表示衷心感谢！

美国混凝土协会委员会 4 4 4 混凝土结构模

型、混凝土结构动力模型分会主席 H.G.哈里斯

目 录

动力模型的相似要求.....	
	H.克拉温克勒, P. D. 蒙卡日 (1)
模型混凝土的动力试验.....	J.费里脱 (21)
两个小比例三维多层钢筋混凝土框架的静力及动力荷载 试验.....	G.K.威尔比, R.帕克, A.J.卡尔 (33)
钢筋混凝土小比例模型结构的性状.....	
	D.P.艾布拉姆斯 (63)
用地震模拟装置研究拱坝模型.....	
	R.W.克拉夫, A.尼瓦 (80)
长跨桥梁的地震模拟试验.....	W. G. 戈登 (103)
空中爆炸荷载作用下钢筋混凝土地下结构比例模拟.....	
	J.K.格兰, J.R.布鲁斯, J. D. 科尔顿 (121)
钢筋混凝土梁柱节点的冲击荷载试验.....	
	A.J.沃森, J.E.英克斯特 (138)
钢筋混凝土板的钢柱冲击试验.....	
	L.尼尔森, S.萨林 (160)
楼板模型的平面内振动和剪切试验技术.....	
	H.F.卡拉多甘, 卢磊武, 黄惕 (181)
大板建筑预制混凝土剪力墙模型的静力和动力 试验.....	H.G. 哈里斯, G.王耀杰 (196)

动力模型的相似要求

H. 克拉温克勒 P.D. 蒙卡日

提 要

本文讨论动力模拟理论的技术发展动态和模拟理论在钢筋混凝土结构缩尺模型中的应用。量纲分析可用于改进相似要求的研究。按照相似要求,模型的几何形状、初始条件、边界条件、材料特性以及荷载都应和原型彼此相关,这样,原型的性状就可以用模型性状的函数来表示。本文集中讨论用来模拟结构在弹性及非弹性范围内动力反应的几类模型,概述获得满意相似性时普遍遇到的问题,并估计这些问题对于原型反应预测的可靠度的影响。

引 言

在预计结构的构件、组件以及复杂结构受到重力作用、风或地震作用、冲击、挤压(增压)、沉降、时间及温度作用、或者在它们的任何组合作用下的反应时,用缩小比例物理模型做实验,常常是一种可行的方法。反应时的可靠度,很大程度上取决于在模型尺度内再现所有原型性能的能力,它影响了模型试验要预计的数量或参数。这些原型的性能随模型试验的目的不同而不同,因此,静力和动力模型、线弹性和极限强度模型、或者用来研究温度相关效应的模型,都可能有不同的模拟要求。

本文简单回顾了适用于一般物理模型问题的模拟理论原理。重点论述在重力及动力作用的效应下,各种钢筋混凝土结构的极限强度模型相似要求的改进。这些模型在地震工程中是很有意义

的。其超弹性反应特性和防止破坏的安全性最为突出，整体结构的实验室实验大多局限于缩尺模型（常常是相当小的比例），尽管在大多数情况下改进理论上的模型相似要求是比较容易的；可是，在实现所有这些相似要求时，会遇到很大的困难，因此常常允许有一定的失真。不过，将这些失真的影响减到最小，或者计算出失真对反应的影响，通常是可以做到的，因此，允许模型试验结果的定量估计用于原型。本文讨论在实现相似要求时所遇到的几个问题。

模 拟 理 论

模拟理论成立的规则是，模型的几何形状、材料特性、初始条件、边界条件和外部影响（荷载）必须和原型相关，所以原型的性状可以用模型性状的函数来表示。模拟理论的目的，在于推导出一整套独立的确定模型与原型彼此对应的相关函数（相似定律）。已经建立起来的量纲分析原理^[1,2]，可用来推导这些相关函数。

量纲分析是基于这样的前提，即每个物理现象都可用式(1)所示的量纲齐次方程来表示：

$$q_1 = F(q_2, q_3, \dots, q_n) \quad (1)$$

其中， n 是所涉及的物理量的总数； q_1 是待计算的量； q_2 至 q_n 是 q_1 所依赖的量。根据白金汉(Buckingham) Π 定理，包括 n 个物理量的每一个量纲齐次方程，都可简化成由完备的 $n-M$ 个独立的无量纲乘积（ Π 因子）构成的函数关系式，其形式为

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-M}), \quad (2)$$

其中， Π_1 至 Π_{n-M} 是 q_1 至 q_n 的幂的独立的无量纲乘积。 N 是量纲矩阵的秩，而且通常等于描述该物理量所需的基本单位的数目。

由于式(2)等同于式(1)，因此它描述的是同一个物理现象，而且，由于它是无量纲的，如果实现了相似性，则式(2)

对于原型和模型必然同样有效。因此，完全相似的充分条件是

$$\left. \begin{aligned} (\Pi_1)_p &= (\Pi_1)_m \\ (\Pi_2)_p &= (\Pi_2)_m \\ \vdots \\ (\Pi_{n-N})_p &= (\Pi_{n-N})_m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中，下标 p 及 m 分别表示原型和模型。这些方程中的第一个通常称为预测方程，其它方程则构成模型的设计条件。

为保证预计的反应量 q_1 是可靠的，且使建立物理模型的工作量减到最小，应小心确定式(1)中物理量的正确数目。如果把一些不明显影响 q_1 的物理量考虑进去，就会对模型设计硬性地加上一些不必要的限制；如果忽略了有显著意义的量，又会产生不正确的结果。譬如，在线弹性范围内，只有振型和频率是有意义的，而重力加速度和应力时间历程的模拟是不需要的，这时，最主要的是边界条件的正确模拟。

如果实现了全部相似要求〔式(3)〕，这样的模型通常叫做真实模型。在失真模型，即违背了一个或多个相似要求的模型中，预计反应时，必须考虑失真效应。对于违背一个相似律的校正值，通常可以通过其它相似定律来调整。如果主要关心的预计量仅有一个（例如破坏荷载），那么，从几个破坏形式相同而尺寸不同的模型试验，通过内插外推，常可估计出预计值的失真。

利用量纲矩阵，可以方便地导出既完备又独立的一组 Π 因子，在此，量纲矩阵是由物理量的量纲指数组成的，其中物理量以独立的基本量为单位。基本量的选择并不是唯一的，通常基本量不是采用力、长度、时间和温度（FLT系统），就是采用质量、长度、时间和温度（MLT系统）。把有关物理量的量纲适当地排成量纲矩阵，并通过比较每个量和其量纲的相关性，就可相当简单地求出无量纲乘积。为保证这些乘积组成一个完备而独立的集合，并保证它们有获得最佳控制设计的可能，使模型实验得以实现，遵循参考文献〔3〕中详细论述的一系列指南，将大有

裨益。

从观测中可以得出一个重要结论：所有的物理量都可以用独立的基本量来表示。因此，描述问题所需的基本量有多少个，能任意按比例确定的量就有多少个（在物理约束的范围内）。于是，所有按比例确定的一切其它量，就是这些被选比例的函数。任意按比例确定的量必须是独立的；它们不同于其它的量，而是模型设计者所能选择的量。

为了举例说明相似要求的推导过程，让我们来研究一下在动力作用例如地震地面运动作用下预计结构应力反应的课题。在最简单的情况下，应力历程 σ 将是位置矢量 $\vec{r}$ 、时间 t 、质量密度 ρ 、材料刚度 E 、加速度时程 a 、重力加速度 g 、特征长度参数 l ，以及可以描述初始条件的初始应力 σ_0 及初始位置矢量 $\vec{r}_0$ 等的函数。在此情况下，式（1）可写成

$$\sigma = F(\vec{r}, t, \rho, E, a, g, l, \sigma_0, \vec{r}_0) \quad (4)$$

在需要时，这一关系式还可扩展，以便把可以引入课题的其它物理量包括进去。

在 MLT （质量、长度、时间）系统（忽略温度相关性）中，量纲矩阵的形式如下：

	σ	$\vec{r}$	t	ρ	E	a	g	l	σ_0	$\vec{r}_0$
M	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0
L	-1	1	0	-3	-1	1	1	1	-1	1
T	-2	0	1	0	-2	-2	-2	0	-2	0

于是，10个物理量之幂的乘积可以组合成 $n-N=10-3=7$ 个独立的无量纲项（ Π 因子）。通常影响相似要求，因而也影响模型设计的无量纲项的选择并不是唯一的。就本例的一组适宜的 Π 因子而论，按式（2）的排列形式是：

$$\frac{\sigma}{E} = f\left(\frac{\vec{r}}{l}, \frac{t}{l}\sqrt{\frac{E}{\rho}}, \frac{a}{g}, \frac{al\rho}{E}, \frac{\sigma_0}{E}, \frac{\vec{r}_0}{l}\right) \quad (5)$$

借助于物理模型的方法达到应力历程的真实相似，在这个方程式中的每一项，模型和原型都应相等。

对于大量的包含动力效应的模型问题，式（5）可作为导出相似要求的基础。然而，对于某些课题（例如线弹性课题），因为此式中容许放松某些相似要求，所以它包括了过多的物理量。对于另一些课题，也许需要把影响应力历程的一些其它量（例如温度、粘滞性、摩擦系数等）包括进去；自然，这些量会导致附加的相似要求。式（5）经过较精细的检验后表明，对钢筋混凝土极限强度模型，很少能满足真实模型的全部相似要求，除非忽略重力效应。此外，通过忽略除刚度 E 以外的所有材料特性，意味着在构件材料中，以及在材料间的相交面（连接）上，与时间和尺寸有关的效应完全被模拟了。因此，大量的问题存在于设计合理的模型和模拟材料的特性等方面。然而，在许多实用性的模型研究中，有可能克服这些困难，并获得可靠的原型反应的预计值。下面要讨论的目标是：提出适合于预计动力模型反应特性的各类模型，实现相似课题的要点和可供解决问题的技术。

钢筋混凝土结构动力模型

真实极限强度模型

如果式（4）中的全部物理量均对应力历程有明显的影响，则真实模型的相似要求可直接从式（5）导出。由于描述该课题需要三个独立的基本量（质量、长度、时间），故可选择三个物理量作为独立的比例尺度。实际上，因为在模型和原型中重力加速度是相等的，即 $g_m/g_p = 1$ ，故在此只能自由地选择两个物理量。除了 g 以外，如果把 l 和 E 选作独立的比例尺度，真实模型则需满足表1（1）栏的相似要求。表1中的下标 r 表示该物理量的模型和原型的尺度比（例如， $l_r = l_m/l_p$ ）。

式（5）中的 $al\rho/E$ 项是最受限制的相似要求，因 $a_r = g_r = 1$ ，

表1 动力模型的相似要求

模型类别		真实极限强度模型	有人工质量模拟的模型	忽略重力的线弹性模型	具有应变失真的模型
尺度参数		(1)	(2)	(3)	(4)
长 度	l_r	l_r	l_r	l_r	l_r
时 间	t_r	$l_r^{1/2}$	$l_r^{1/2}$	$l_r (E/\rho)_r^{-1/2}$	$(e_r l_r)^{1/2}$
频 率	ω_r	$l_r^{-1/2}$	$l_r^{-1/2}$	$l_r^{-1} (E/\rho)_r^{1/2}$	$(e_r l_r)^{-1/2}$
速 度	v_r	$l_r^{1/2}$	$l_r^{1/2}$	$(E/\rho)_r^{1/2}$	$(e_r l_r)^{-1/2}$
重力加速度	g_r	1	1	忽略	1
加 速 度	a_r	1	1	$l_r^{-1} (E/\rho)_r$	1
质量密度	ρ_r	E_r / l_r		ρ_r	$e_r E_r l_r^{-1}$
应 变	e_r	1	1	1	e_r
应 力	σ_r	E_r	E_r	E_r	$E_r e_r$
弹性模量	E_r	E_r	E_r	E_r	E_r
特殊刚度 $(E/\rho)_r$		l_r		$(E/\rho)_r$	$l_r e_r^{-1}$
位 移	δ_r	l_r	l_r	l_r	$l_r e_r$
力	F_r	$E_r l_r^2$	$E_r l_r^2$	$E_r l_r^2$	$E_r l_r^2 e_r$
能 量 $(EN)_r$		$E_r l_r^3$	$E_r l_r^3$	$E_r l_r^3$	$E_r l_r^3 e_r^2$

故该项需满足 $(E/\rho)_r = l_r$ 。这个公式要求模型材料较原型材料有更小的刚度或者更大的密度。对钢筋混凝土，原型材料和模型材料的刚度及密度通常是相近的，这就几乎排除了在包括超弹性性状和重力效应在内的动力研究方面真实模型的使用。

只要在能产生高匀加速度场的离心机上作模型试验，甚至采用与原型相近的材料，理论上即可进行真实的极限强度模型试验。在此，既可充分控制重力加速度 g 的比例尺度，又可消除 $(E/\rho)_r = l_r$ 的相似要求。如果使用原型材料，则 $(E/\rho)_r = 1$ ，而且 g_r 必须等于 l_r^{-1} ，所以对于小比例模型就要求用非常大的加速度。

用人工质量模拟的极限强度模型

非常实用的钢筋混凝土结构动力模型是用高密度材料来增加结构上有效的模型材料的密度,而且这种高密度材料并不影响结构性能,只是让其满足 $(E/\rho)_r = 1$ 这个相似要求。实际上,这就要求附加适当分布的重物,而且,这些重物必须用一种不改变结构强度和刚度特性的方法加到结构构件上。由于附加重物会改变接近连接点的局部应力历程,所以这样的模型不是真实模型;但只要重物分布适当,它接近的又是非关键的应力历程点,这样的模型,将提供十分满意的实验结果。

如果质量在空间分布的准确模拟是主要的,那就有必要把具有结构效应的材料的质量密度 ρ_0 和附加材料的质量密度 ρ_1 分离开,因为 ρ_1 是加在模型中的,而不是原型的组成成分。从式(5)中的 $a/\rho/E$ 项,质量密度 ρ_1 可由下式得出:

$$\rho_1 = \left[\frac{E_r}{l_r} - (\rho_0)_r \right] (\rho_0)_p \quad (6)$$

例如,比例为 1 : 4 的模型,也用原型材料时 $[E_r = (\rho_0)_r = 1]$, 则其密度应增加 3 倍。

对于线性构件,附加到模型上单位长度的质量 μ_1 由下式给出:

$$\mu_1 = [E_r l_r - (\mu_0)_r] (\mu_0)_p \quad (7)$$

式中, μ_0 为在结构上有效应的材料的单位长度质量。

大多数桥梁结构动力模型都是按照这些准则设计的,并获得了很好的反应预计值(例子请见参考文献〔4〕)。在房屋结构模型中,每当墙体、楼板及框架构件的质量分布对动力反应有明显影响时,就需应用这些准则。

当质量在空间分布上的准确模拟不是主要时,模型设计可以相当简化。把结构及非结构质量,集中到譬如房屋楼板面这样的特定位置上,往往是有可能的。这些集中质量的比例定律为

$$M_r = E_r l_r^2 \quad (8)$$

其中, E_r 是结构材料的刚度比例。这个公式由 $(E/\rho)_r = l_r$ 乘以 l_r^{-3} 求得。利用雷利法, 按类似的方式, 把分布在楼板面之间的质量包括在集中质量中还是可能做到的。

房屋结构的集中质量模型, 正被广泛地用于地震反应研究方面 (文献〔5〕至〔7〕)。对于两维系统 (框架及墙) 动力反应的模拟, 用集中质量模型容易做到; 但是, 诸如楼板与框架相互作用之类的许多三维的效应则不适用。如果这种相互作用是重要的, 就应把离散的重物以某种方式布满楼板使重力效应及惯性力效应得到模拟。

归纳在表 1 (1) 栏中的相似要求, 除了 $(E/\rho)_r = l_r$ 可由公式 (6) 至 (8) 来代替外, 均适用于有人工质量模拟的模型。为了完整起见, 把这些相似要求重复列在该表 (2) 栏内。

不模拟重力的极限强度模型

对于某些类型的结构形式, 重力效应引起的应力比动力效应产生的应力历程小得多。在这种情况下可以从式 (4) 及 (5) 中省略重力加速度 g , 即排除约束条件 $g_r = 1$, 并且容许选择第三个独立的模型比例。为此, 如果选择材料密度 ρ , 即可导出示于表 1 第 (3) 栏中的模型相似要求。此外, 非结构系统部分的所有重物, 都需按照 $M_r = E_r l_r^3$ 进行换算。如选用的模型材料和原型相同 ($E_r = \rho_r = 1$), 此栏中的全部比例系数可用 l_r 项表示。由于这类模型不需要模拟人工质量, 所以易于制作。然而, 由于时间 ($t_r = l_r$) 及加速度 ($a_r = l_r^{-1}$) 的比例要求甚大, 因而使测量精度及动力激振的再现发生问题; 同时也会增大材料应变率的影响。

在超弹性试验中, 重力总是影响应力历程的。因忽略重力效应而引起的误差是否容许, 要由模型分析者来确定。如果误差太大, 显然, 模型会失真, 不论是预计公式还是对取决于 a/g 的无量纲乘积都必须加以修正, 以便调整误差。如果试验包括材料和几何非线性性质, 这将是一件十分困难的工作。

有些结构适合做不模拟重力的模型试验，例如密闭容器；在这样的容器中，重力本身引起的应力和由内部增压及动力效应（如冲击或地震地面运动）引起的应力历程相比较，前者甚小。如果细长剪力墙及其边界单元引起的重力甚小，这类不模拟重力的模型，也可用来研究细长剪力墙的动力反应。

线弹性模型

如果一个模型试验仅和线弹性性状有关，通常总可以把重力效应和动力效应分离开。这样，模型试验可以在不考虑重力加速度比例尺度的情况下来模拟结构的动力反应特性，还可利用表1中第(3)栏的相似要求。线弹性试验的模型设计是一种较简单的工作，之所以简单，是由于唯一材料限制是在线性范围之内用 E 表征的；当然，如有必要，还要由泊松比 ν 及材料阻尼特性来表征。然而，在这类模型中，不能适当模拟由几何非线性引起的次生效应。

具有应变失真（畸变）的极限强度模型

真实极限强度模型的一个相似性要求，是模型和原型的全部无量纲量都应相等。因此，应变必须相等（ $\epsilon_r = 1$ ），同时，模型及原型材料的应力-应变相关曲线也应相同，而在应力方向〔见图1(a)〕上的乘积常数 E ，例外。要满足这一模型材料的严格相

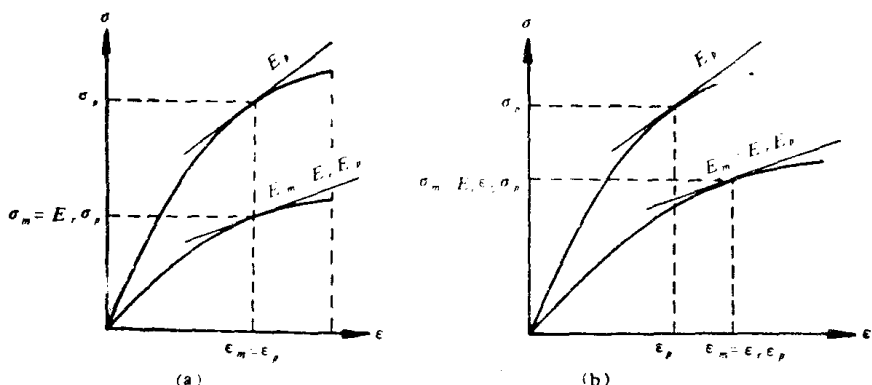


图1 应力与应变的相似要求

似要求,有时是不可能的,因而不得不容许应变失真。如应变失真是常数,亦即假如它可以用一个单一参数 ϵ_r 〔图1(b)〕来描述,那么,借助修正示于式(5)中的 Π 因子,似乎就可以计算出这一失真。

罗查(Rocha)〔8〕建议,引入应变作为量纲矩阵中附加的基本量,并且选定一个适于取决于 ϵ 的所有量的量纲指数。这样将导出表1第(4)栏所示的相似要求。由于位移和长度用的比例各不相同,所以在应变失真的模型中,不能正确地模拟由几何非线性特性引起的次生效应。在动力问题中,物理量对应变的依赖关系的线性假设,也许还需要进一步验证。

如在应变失真模型中采用钢筋,则钢筋的面积比例应由 $E_1 I_2^2$ 和当量应变 ϵ_r 来确定。这就需要在钢筋和混凝土之间实现应变相似的相容性。

在此不意味着讨论的各类模型进行动力模型研究的可能性。就特殊课题而言,人们可以利用现有物理知识,在模型设计时,允许有各种失真效应。因此,尽量减小失真效应,并估计失真对反应预计值的影响,就交给模型设计者来发挥创造性了。

附加的相似条件

模型研究的特殊目的,在于确定上述相似要求必须达到的程度,以及由此引入模型实验的附加条件。这些条件可能包括初始条件及边界条件的模拟,动力荷载的机理,时间,材料特性对温度和尺寸的依赖性,以及温度和尺寸对动力反应及破坏模式的影响。

以下的简单讨论,试图给出模拟问题及求解技术的综述,而不是对任何方面作具体说明。至于详细资料,读者可参考这一领域中的广泛的文献,本文参考文献〔10〕至〔14〕有一些典型例子。