

建筑结构模型分析

张汝愉 著
徐乾易 审校

西北工业大学出版社
1993年3月 西安

学部分之论述作了仔细的审校，提出了宝贵的意见，并编写了附录。本书内插图 2.5、4.8、4.9、4.12、5.8 及 5.10 引自 G. M. Sabnis 等著的 Structural Modeling and Experimental Techniques 一书，承美国 Prentice-Hall 公司无偿给予翻印权。特此致谢。

作 者

1992 年 1 月

(陕)新登字 009 号

【内容简介】结构模型分析就是运用模拟理论来指导模型的设计、试验和结果分析,从而推断实际结构在荷载作用下的反应。它既是一种独立的分析方法,也是数学分析的有力佐证和补充。在工程结构的设计、研究和教学中有着广泛的应用。

本书叙述了模型分析的适用对象、模拟理论、结构模型的制作、加荷技术、量测手段、数据采集以及结果分析处理,书末附录还给出了量纲公式和 π 定理的简明推导。本书是一本介绍结构模型分析方面的入门书,可作为建筑结构及相关专业研究生的课堂教材,也可供结构设计或研究者参考。

建筑结构模型分析

张汝愉 著

徐乾易 审校

责任编辑 王夏林

责任校对 樊力

*

©1993 西北工业大学出版社出版发行

(西安市友谊西路 127 号 邮编 710072)

陕西省新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0495-7/TU·4

*

开本 787×1092 毫米 1/32 6.375 印张 155 千字

1993 年 3 月第 1 版 1993 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—3190 册 定价:5.00 元

前 言

结构模型分析是近年来在工程结构设计、研究、教学中广泛应用的一种分析手段。作为一种独立的分析方法、也作为数学分析的有力佐证和补充,模型分析对于各种特殊体形式荷载作用下的结构,常能给出非常直观可靠的分析结果。

本书述及模型分析的适用对象、模拟理论、结构模型的制作、加荷技术、量测手段、数据采集以及最终的分析处理。全书可供从事结构设计、研究和教学工作的人员参考;也可作为建筑结构及相关专业研究生的课堂教材。书中有部分习题供学生练习。教师可根据本校实验室条件另安排一定课时的实验课。

传统的模拟关系常偏重量纲分析的论述。由于结构形式的多样化和计算公式千变万化,不便作广泛的数学证明,但在今天,已有可能用矩阵方法统一解决。作者在本书第二章中给出了这方面的一些初步结果,并期望得到海内外学者的指点和支持,以求理论上更加完备。

美国康奈尔大学工学院副院长、原土木及环境工程学院院长、荣获康奈尔大学詹姆士学派杰出工程学教授称号的 R. N. White 教授为作者在该校对模型分析的进修提供了宝贵的指导并提供大量资料;西安冶金建筑学院何保康院长对本书原稿提出了宝贵的意见与建议;中国建筑西北设计院前院长、结构电算专家徐乾易副总工程师对本书及有关数学、力

目 录

第一章 结 论	1
1.1 什么是结构模型分析	1
1.2 模型分析是数学分析的有力补充	2
1.3 模型分析的优点与存在的问题	6
1.4 模型的分类	9
第二章 模拟理论	15
2.1 引言.....	15
2.2 模拟理论.....	19
2.3 各类模型的模拟关系.....	34
第三章 弹性模型与钢筋混凝土模型	64
3.1 弹性模型.....	64
3.2 钢筋混凝土模型.....	68
3.3 材料蠕变的影响.....	78
第四章 加荷、数据量测与转换	83
4.1 模型试验加荷系统的概述.....	83
4.2 数据的量测与采集.....	96
4.3 数据的转换	118
第五章 从实例来研讨模型分析的作用	137
5.1 作为研究手段的模型分析实例	137
5.2 作为设计辅助手段的模型分析实例	153

5.3 原型试验实例	159
第六章 差误与可靠性	170
6.1 三种不同性质的差误*	170
6.2 常见差误的来源	174
6.3 发现和消除可纠正误差	177
习题与思考题	181
附录 量纲公式及π定理	188

第一章 绪 论

1.1 什么是结构模型分析

结构模型分析，就是以所要研究的工程结构为原型，运用模拟理论定出各个有关物理量的缩小比例并按此比例做成结构模型；对结构模型施加一定的模拟荷载并量测它在模拟荷载作用下的反应；最后根据量得的反应来推断原型在实际荷载下的反应的一种分析方法。

Janney 等学者关于钢筋混凝土结构模型，是这样定义的：

结构模型是指一切以缩小比例(与全尺寸的原型相比)制成并用以作试验的，其试验结果必须以模拟理论来加以转换的结构构件或构件的组合物。

按照模型分析的要求，设计、制作结构模型，配置相应的荷载及量测装置的过程，称为模型化过程。

在模型化过程中，按照模拟要求进行改变的物理量，称为模拟量。

学习和掌握模型分析，既要通晓它的基本理论和转换关系；又要掌握基本的模型制作、加荷和量测的技术。尤其对于对结构工程科学作进一步学习的研究生，更应通过大量的实践，积累经验，熟练地掌握这一有用的分析方法，并把它

用于各项课题与实际工程的设计工作。

1.2 模型分析是数学分析的有力补充

自从牛顿、莱布尼兹等一大批经典数学家创立微积分学以来，几百年间，高等数学与力学相互促进，相互渗透，有力地推动了工程科学的发展。每一种新的建筑材料的应用、每一种新的结构形式的出现，几乎都立即伴随着新的数学分析方法的出现。计算已成为结构工程师——特别是从事设计研究工作的工程师的专业标志。用数学方法分析各种工程结构，过去和现在都是主要而且有效的方法。

近年来，电子计算机在工程结构的分析上得到了广泛的应用。发展出了有限元分析——矩阵运算——电子计算机求解三位一体的现代分析方法，解决了大量极为复杂的、过去无法想象其求解的工程结构的分析问题，在实践中获得了巨大的成功。这一切，充分显示了数学分析的威力。这一点，无论工程界、学术界，都深信不疑。

但是，在数学分析支持下工程科学迅猛发展的同时，人们也越来越深刻地认识到：数学方法再完善，也决不是万能的。虽然，作为客观世界数量关系纯粹抽象的数学过程本身及其表现形式是精确、完美的，但当将数学用于现实的工程结构时，却必然受到多方面现实因素的制约而使得计算分析的结果不那么完美。在实际工程分析中，常常会发现计算结果与实际有较明显的出入。有时，特别在用计算机进行多达数 10 万次，数百万次运算的分析时，发现计算结果在某些地方令人怀疑，但设计人员又无从判别和寻错。

拿常见的钢筋混凝土框架结构计算为例。近年来，发展出了许多实用的计算机软件并得到了广泛的应用，以致于许多设计者不愿再花时间去研究计算与实际的出入，以及有无进一步改善之可能。而是简单地认为：经过计算机几十万次、几百万次运算后打印出来的结果，是至少人力不可能再加以改进的。

但是，计算机据以进行千百万次运算的程序，是根据一些什么样的条件编制的呢？首先，我们是将框架的梁、柱，简化为一个个等刚度弹性直线杆单元来处理的（假定所讨论的框架其几何形状符合此条件）。在此基础上运用结构力学方法建立单元刚度矩阵并进而汇合为结构的总刚度矩阵。全部的计算过程，在这个关于杆件刚度性质描述的基础上进行。但是人人知道，钢筋混凝土是一种由弹塑性材料混凝土与弹性材料钢筋构成的复合材料。当它受力以后，位于不同受力部位的混凝土其弹性模量是不同的。同时，沿着杆轴方向上又发生正负弯矩作用下的开裂，使杆沿其长度方向上各个截面变为不相等。如果我们回忆材料力学关于杆轴线的定义是沿着杆长各个截面形心的连线，就可以明白此时的杆轴线已不成其为一根直线。（事实上，材料力学关于杆轴线的定义，其理论基础又在于材料的全弹性和弯曲时的平截面假定、或曰受弯时截面应力的三角形分布。混凝土是远不能满足这一假定的。所以严格来说，即使没有开裂，只要杆上各截面应力不呈直线分布，杆轴线就有可能不是直线）。这样，计算者将面临一个由众多的变刚度曲线杆单元组成的力学体系。他需要耗费大量精力求解每一个杆的开裂状况及其单元刚度矩阵的表达，然后再归入总刚度矩阵求解。这样也许可以得出一

个简单结构的二级近似解。再重复上面的过程以求更高一级的近似解……。这是多么巨大的工作！仅仅材料性质的原因，就会对计算产生如此大的影响，更不必提复杂体形的结构为了数学上求解的可能而作的种种简化假定了。我们还可以加上其它许多数学难以预测的因素，诸如 填充墙对结构刚度的影响，结构与地基的相互作用，地震力及其它反复作用的动荷载的作用，等等。这些因素都使得计算结果与实际的结构反应有明显的出入。

当然，在实际工作中，这些差异往往被超静定结构的内力重新分布性质和建筑结构较丰裕的安全度储备这两大有利因素所调整和掩盖，通常不但不引起严重事故，甚至不被人所发现。以致常被公认为可行的方法，没有怀疑余地的方法。但是在不少特殊情况下，也会发生令人难以接受的结果。

例如，某设计单位曾对一幢高层住宅进行计算。打印结果却表示这幢高宽比小于 1 的建筑在水平地震力下有近 $1/3$ 的柱子根部出现拉力。对程序检查的结果未发现问题，数据的填写也完全正确。最后反复分析的结果，认为该幢大楼有较多的杆件实际尺寸过于短粗，其实际工作状况与计算假定有较大出入，导致了计算结果的偏差。但究竟怎样具体一步步地“跟踪”电子计算机查找具体的不协调范围，就很困难了。当时由于没有更合适的计算程序，这幢大楼最后只能凭设计人员的经验，加大各杆件的安全度来解决问题。当然这不是个好办法。

为了克服以上种种矛盾，许多计算结构力学工作者做了大量努力，也取得了显著的成效。目前在各研究、设计单位里，已经有了不少考虑到许多影响因素，计算质量大大提高

的软件供应用。但是这些软件，也不可能完全反映实际结构的受力情况，通常要求计算机具有较大的内存容量、较长的机时。学习和掌握这些软件又必然占去很多时间。初次应用者往往要试算多次，才能掌握正常的运算条件。其结果由于责任重大而又没有其它方法校验，常让设计人员放心不下。

因此，作为一种独立的分析手段，也作为数学分析的有力补充，模型分析法“应运而生”，在近年来得到了重大的发展。

模型分析可以在哪些方面起作用呢？概括起来说，在结构研究方面，模型分析可用于帮助建立新的、特殊结构的数学模型。通过模型分析可以显示结构受力后的变化特征，使研究者抓住主要矛盾，提出合理的基本假定，建立合理的数学模型并进行数学分析。特别对于非完全弹性的结构体系、结构形式与尺寸超出常规的结构，各种异形的壳体、实体结构等，模型分析的作用是比较大的。它不但是数学分析的出发点，而且也同时在终点与数学分析再次相遇，作为对数学分析结果进行控制性校验的有力手段。在工程设计方面，模型分析除作为独立的分析方法与数学分析相对比、相补充外，还用于确定特殊体型结构的风荷载分布，地震反应、港口构筑物的波浪冲击力等等。特别对下面一些建筑物、构筑物，模型分析是常用的辅助分析手段：

(1) 高层建筑、塔式结构、高耸构筑物及各种大跨度桥梁。

(2) 形状特殊的壳体结构及壳体的组合。

(3) 核动力结构，包括反应堆结构、核动力站的安全壳结构等。

- (4) 具有复杂几何形状的结构板、块体及它们的组合。
- (5) 复杂体型的以及曲线走向的桥梁。
- (6) 各种大坝。

(7) 特殊防护结构，指特殊用途（军事、科研等）设施的、承受特殊作用力的结构。例如，美国陆基战略核导弹的地下发射井，为了能在敌方的第一次打击后保持核报复能力，军方要求其井盖承受每平方米 10 000 N 以上的冲击波作用力。这样的井盖结构的安全度，关系到国家的存亡大事。用模型分析来辅助设计，无疑是必要的和有效的。

此外，模型分析的量测与数据采集技术，还可用于对现存实际建筑物、结构物的评估。这时的测试对象，已不是缩小比例的模型，而是原型本身。在现实生活中常遇到要求对已有结构物的强度，耐久性，适用程度进行评价。旧有结构物的原始资料如图纸，材料测定报告等可能已散失；隐蔽工程又无从确认；在长期使用过程中遭受过人为的或自然力的损伤而这一损伤又没有准确的记录；某些外力的损伤也难以用数字或公式描述（如火灾、爆炸、台风等）。种种原因要求人们进行结构的现存能力量测。我们把对实际结构的量测，可看作是一种比率为 1：1 的模型分析。

1.3 模型分析的优点与存在的问题

在人类的物质生产过程中，人们可以对大量生产的产品取样品作各种实际的测试。由于样品与千百万同类产品出自同样的原料，按照同样的设计，经过同样的工艺过程生产出来，因此，样品的质量具有对于大量产品质量的代表性。这

一测试相对的耗费较低。但在绝大多数情况下，不可能用实际的建筑物当试验品作直到破坏阶段的荷载试验。越是大型、复杂、特殊的建筑、结构物，就越不可能拿来作试验。不能想象为了弄清一座高大建筑物或异形大桥、大坝的受力状态，而花同样多的时间和金钱去修建一座专供试验用的同样的结构物。因此，特别是对于造价大，工期长的建筑物、构筑物，模型分析的优点是明显的。它给出的结果直观可靠。当然，比原型本身的耗费要小得多。例如做某一原型的 $1/20$ 比例的模型，那么它耗用的材料就只有原型的 $(1/20)^3 = 1/8\ 000$ 。试验用的均布荷载总量将依受荷面积的缩小比例缩小为 $(1/20)^2 = 1/400$ 。假如我们仅仅作弹性阶段的试验，那么可以考虑用弹性模量较原型为低的材料来做模型，那么加荷还可以按二者的弹性模量之比再减少。在上例中假设原型是一个钢筋混凝土结构，用有机玻璃来做它的弹性阶段的模型，那么均布荷重的总量还要进一步由 $1/400$ 减为 $1/3\ 000$ 左右。

正如没有一个数学分析方法能做到百分之百准确一样，除了原型测试以外，也不存在一个能百分之百模拟实际结构的模型。模型化的过程中，必然有一些参数发生改变。这一点在以下的关于模拟理论的论述中还要再深入分析。总的来说，考虑一个结构的模型分析，有以下几方面的问题必须加以注意：

为了减小材料及加荷的量，模型当然应当力求小些。但过于细小的模型，常因制作精度的原因反而增大成本。同时模型过于细小会带来加荷与量测上的种种不便而使试验的精度下降。图 1.1 表示模型比例与模型成本的曲线关系。当缩小比例超过某一合理的限值后，其模型成本反而上升。但要

记住：制作模型的成本并非决定模型比例这一唯一因素。因为模型分析的最终目的是要求得结构的受力状态，所以必须综合考虑制作、加荷、量测，采集等各个环节的要求来决定模型的制作比例。

有一些量在模型化过程中的缩减，会导致模型的受力状态与原型的受力状态之间不一致。这也就是前面说的不存在一个能百分之百模拟原型的结构模型的意思最明显的，例如结构物的自重和自重应力的关系。当用与原型的材料相同材料制作

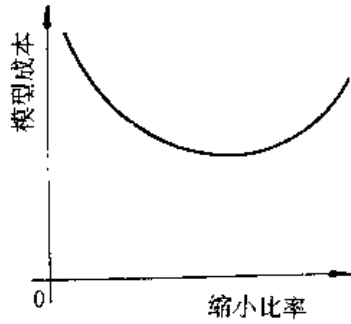


图 1.1

模型时，其体积（即代表自重）将按线尺寸缩小比例的立方缩小；同时，结构的断面面积则按该比例的平方缩小。因此，自重在模型柱内产生的应力要小于原型柱内的自重应力。在实际的模型化过程中，如要保持模型与原型的自重应力一致，就必须采用一种比重比原型材料大若干倍（相当于线尺寸的缩减倍率）的材料来制作模型。这样才能使模型与原型的自重应力相等。但是这样做了以后，人们将发现很难同时做到保持这两种材料的其它特性仍相协调，如弹性模量、泊松比、强度、屈服极限、极限延伸率等等。因此会产生更大的矛盾。这一点在模拟理论的论述中还要详细讨论并探讨其补救的办法。

和全尺寸的原型测试相比，模型分析固然是大大节约成本的。但无论如何，与传统的数学分析或者现今大多数的计

算机数学分析相比,它毕竟是一种费钱费时间的分析方法。对于那些已经有较成熟经验与计算手段的结构分析,运用电子计算机计算或者甚至人工手算,都可能比模型分析更快更省。在实际工作中,要根据情况灵活考虑。

模型分析本身,当然也存在技术上的精度问题。从材料性质、加工制作、加荷过程,量测及数据的采集等等各个方面,都存在产生误差的根源。即使采用完全相同的材料,当试件绝对尺寸减小时,其单位强度也有可能上升。这就是常说的体积效应。以上诸种因素,很难在模型分析过程中完全消除。

1.4 模型的分类

结构模型可以从各个不同角度加以分类。关键在于我们通过模型分析想要达到什么目的,对模型加以什么样的荷载并测试到什么阶段。这些不同的要求,当然与原型的结构特性相联系,同时也决定了模型的分类。

1.4.1 弹性模型

这一类模型主要用于模拟并测定结构在弹性阶段的工作状况。它的特点是模型的几何形状与原型严格相似,所有的线尺寸都按同一比例缩小,所有的对应角都相等,但是,并不一定要用与原型同样的材料。通常,为了制作的方便(制作的方便常常带来模型相似程度的提高),选用匀质而易加工的弹性材料。普遍采用的材料有各种有机玻璃,聚氯乙烯塑料的板材,杆件等。这些材料由于弹性模量较实际工程材料

即原型的材料的弹性模量低，而使得在模拟过程中加荷后变形较大，易于观察和量测。当然，它们仅用于结构弹性极限之内的工作，而不可用于观察钢材屈服，或混凝土进入塑性阶段，或开裂后的工作状态。

在弹性模型中，一个特例是弹性非直接模型。这种模型通常用以观测结构由于支座变位或其他外加变位因素影响造成的结构挠曲形态。因此，它常常只模拟结构各根杆件之间的相对刚度，而不模拟每根杆的截面之几何形状。这种模型目前较多用于课堂教学演示（见图 1.2），而不再用于实际工程的模型分析。

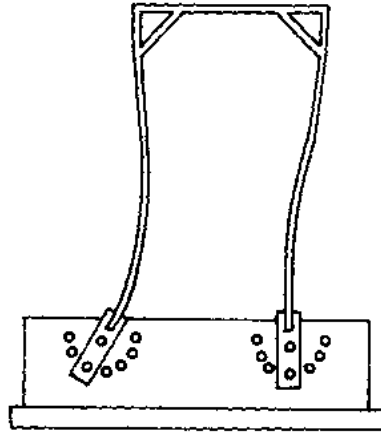


图 1.2

图 1.2 表示弹性非直接模型门式刚架右支座转角产生各杆挠曲的情形。对于这样一类刚度比明确的弹性杆件体系，数学方法分析已经发展到相当成熟，相应的计算机软件也很普遍，完全可以在短时间内求得满意的解答而无需用模型分析。

除上述弹性非直接模型外，凡几何形状与原型保持完全相似的弹性模型，都称为弹性直接模型。或简称为弹性模型。这类模型当作用荷载符合模拟理论要求时，其应力、应变都具有对于原型的对应量的代表性。

1.4.2 强度模型

强度模型指对模型的加荷观测要一直进行到发生强度破坏阶段。不但要求在整个加荷过程中，模型各关键点的应力应变值对原型的相应值有代表性；而且要求在加荷过程中的许多其它现象如钢材的屈服、混凝土的开裂、压杆的失稳、结构的局部与整体破坏甚至倒塌，在它们的出现阶段、出现位置方面，都要对原型的同类现象具有相当程度的代表性。这样的模型，显而易见，仅仅有几何形状与原型相似、荷载符合模拟条件这两条是不够的。模型的材料特性，甚至细部构造都必须与原型至少相类似，特别是对钢筋混凝土结构模型。为要使模型开裂状况能在一定程度上反映原型的开裂，模型的配筋形式与数量就得仔细加以推敲。

这类模型对真实结构即原型的模拟程度比之一般的弹性模型要高。牵涉到的影响因素也多得多。为了做得准确，其缩小倍率常比弹性模型低，即其模型的绝对尺寸要较大些。制作之前要进行周密的设计。由于牵涉到材料指标的模拟，如前已述，很可能会有一些量在模拟过程中会被迫失去应有的模拟关系。这就要求设计人灵活运用结构理论和模拟理论进行转换。这类模型通常要耗用较多的人力和资金。

弹性模型与强度模型还有一个差别就是弹性模型的量测结果适用力学的叠加原理。一个弹性模型可以将各种荷载分别作用并进行量测，将测得的反应值叠加作为综合荷载下的反应。但是，叠加原理不适用于强度模型。为了测定不同荷载组合下强度模型的极限状态，就需要两个或多个模型。