

# 结构工程科学中 若干计算结构力学问题的研究展望

范志良

上海同济大学结构工程学院 (邮政编码200092)

**提要** 本文概述了计算结构力学的形成过程, 评述了结构工程科学中以下7个需要重点研究的计算结构力学问题: 数值方法基本理论问题(误差估计理论、网格自适应加密技术、多变量有限元理论和半解析数值方法)、工程结构优化设计、结构施工力学、计算机数值模拟和仿真技术、本构模型、计算机技术新发展的影响、计算机辅助设计。并论述了数值计算、理论和试验这三者之间相互依赖、相互促进、相互交叉又相互制约的辩证关系。

**关键词** 结构工程; 计算力学; 结构力学; 数值方法

## 1 引言

结构力学是研究工程结构在静力、动力等各种荷载和温度变化、支座位移等因素作用下强度、刚度和稳定性的计算原理和计算方法以及结构组成规律和合理形式的一门学科。由于在工程结构发展史中最先需要研究的对象是梁和杆系结构, 因此传统结构力学的含义是比较狭窄的, 它只局限于弹性状态下的梁和杆系结构。随着工程技术的发展和各种结构或对象解法上的特殊性, 除狭义的结构力学外, 还产生了板壳力学、薄壁杆件力学、弹性力学、塑性力学等。事实上, 这些关于工程结构的力学在基本概念和理论上是同出一源, 只是按其不同的受力特点作解析而已。对于一般弹性问题, Navier 和 Cauchy 在 1820 年就提出了弹性理论的基本方程, 经过很长时间的发展, 在理论体系上已完善、成熟并且经典化了。但问题一般归结为一个难有数学封闭解的高阶微分方程组, 采用经典的数学分析解则只能对一些十分简单和特殊的几何形状、边界条件和荷载分布情况得到解答。这还只是静力弹性分析的情况, 对动力、稳定、断裂、非线性等问题更是举足艰难。因此, 在计算机出现之前, 结构工程科学工作者的主要任务是研究结构计算方法的简化和通过大量试验或实测归纳出实用的经验公式。

第二次世界大战后不久, 第一台电子计算机在美国出现, 并在以后20年中得到了迅速的发展。这种强大的计算工具的出现使复杂的数字运算不再成为不可逾越的障碍。过去人们创

造的 Ritz 法、Galerkin 法、有限差分法等把力学问题演化成的线性方程组，已可用计算机轻松求解。这些方法虽好，但遇到略为不规则的或复杂一些的结构边界形状和条件就难以应付了。至少没有统一的途径和步骤来让计算机自动建立这些方程组。50年代末出现了有限元法，使过去各种数值法建立线性方程组的困难得到解决。该方法可以灵活地适应结构的各种边界形状，也可以适应内部各种要求，并可反映各种复杂的材料性质，且易编成系统化和通用化的电算程序，因此其一出现便受到工程界的欢迎。数学工作者也从变分原理和离散数学角度，阐明有限元的数学基础，并论证了离散化的收敛条件，使有限元有了牢固的理论基础和广泛应用的可能性。

计算结构力学的形成和发展对结构工程科学的发展起着巨大的推动作用。它在结构工程实践中显示出了巨大的威力。现在高层建筑、桥梁、水坝、压力容器、海洋平台等大型结构物原则上都可以进行整体分析，得出其静态和动态的应力和变形分布状态，并可以考虑种种以前难以处理的复杂情况，例如复杂的工况，包括温度、地震、结构-基础-土(桩)和结构-流体的耦合作用；复杂的破坏因素，包括局部断裂、损伤、塑性大变形；复杂的材料性质，包括非匀质、各向异性和人工复合材料以及随时间或温度变化的粘弹性、粘塑性和热粘塑性等材料特征<sup>[1]</sup>。所有这些都以前都是很难处理或根本无法处理的，需要采取种种简化假设和粗略的手段。现在则可以通过计算机做比较常规的分析，而且由于可以采用更接近于实际的计算模型，分析结果的正确性得到提高。更为重要的是，计算结构力学的发展使人们不再局限于被动地对给定的结构方案进行分析校核，而且可以主动地对结构进行优化设计。

## 2 数值方法基本理论的发展

### 2.1 误差估计理论和网格自适应加密技术

目前一般的结构分析均可用已有的有限元软件包来完成。但如何合理地划分网格和评定其离散误差，即在保证精度的前提下使分析成本达到最低呢？尽管工程师和理论研究者对这一方面给予了极大的关注，但至今尚未见任何一个大型有限元系统具有误差估计和自适应改进的功能。因此，需要对误差估计与控制执行过程中的理论、策略和算法做进一步的工作，以建立可靠的手段来评估有限元计算结果，并发展高效自适应改进策略以及实施这些策略的计算机程序<sup>[2]</sup>。这是保证有限元分析质量的一个重要手段。

### 2.2 多变量有限元理论

目前广泛使用的有限元软件包几乎全部采用位移法进行有限元分析。但构造完备协调的  $C^1$  连续性板壳位移元存在着困难，现有大型软件中的板壳单元性能并不十分理想。按 Mindlin-Reissner 理论建立的  $C^0$  连续性板壳位移单元虽然简单，但对薄板壳给出过于刚性的响应（闭锁）。对此已提出了一些解决方法，如缩减积分、假定自然应变法、模态分解投影法和罚函数法等，但对其鲁棒性的进一步研究十分必要。

使用多场变分原理的有限元理论研究已引起了人们的广泛兴趣。这种多变量元可能把位移、应变和应力都看作独立场变量，且放松了单元间的位移协调条件和应力平衡条件，克服了不连续性问题 and 闭锁现象，使应力计算的精度得到提高。迄今为止，文献中已提出很多杂交、混合板壳元，但由于对这类单元性能的全面评估远比位移元复杂，特别是其稳定性和收敛性的数学分析工作还做得不够，因此在工程实际中至今未得到大量应用。进一步建立可靠、有效的杂交混合元，并将其编入重要软件系统的单元库中是近期研究的方向之一。

### 2.3 半解析数值方法

结构工程中常碰到诸如 3 维、组合、复合、动态、无限域、非线性等问题，用有限元法求解时所需单元数、内存和计算工作量十分惊人，造成原则上都能解决，而实际上由于经费和计算机条件所限在工程应用上难以实现的状态。解析与数值手段相结合的方法——半解析数值法（也称解析与数值结合法），是解决这一问题的极好途径。此方法的提出与发展只是近十多年来的事，但发展相当迅速、类型众多。主要有分向结合法（即半解析单元法，如有限条法），分域结合法（如边界元法）、分部结合法（如加权残数法）、分区结合法（即耦合法）、有限元法，样条结合法、康托洛维奇法和有限元线法等<sup>[3]</sup>。这些方法各有其适用范围，可以根据求解问题的要求加以灵活应用。特别在目前有限元难以适应的高维、无限域及耦合、奇异等问题中更能显示出其独特的优越性。这些方法理论上（特别是收敛性、稳定性、误差估计等）的进一步深入研究和在工程实践中的推广应用须同步进行。

### 3 工程结构优化设计

计算结构力学的发展，已使人们从分析和校核一个既定结构方案发展为设计和创造一个优化方案，这也可以说是从被动地认识世界到主动地改造世界的一种飞跃。结构优化设计基本方法有优化准则法、数学规划法和两者的组合——混合法，其中混合法是近十多年来发展起来的较为有效的优化方法（据此已编制出一些大型的优化软件包，如 ACCESS, DDDU 等）<sup>[4]</sup>。按目前的水平，对于给定几何、拓扑和材料的情况下，只有构件截面可变的一般优化设计已基本成熟。目前已向着较高层次的优化——结构形状优化发展，文献中已有薄壳等形状优化的研究<sup>[5]</sup>。更高层次的优化应包括结构拓扑优化（譬如给定一个杆系结构的节点布置，要求确定那些节点间应用杆件连接）、结构类型优化设计（譬如，将一组荷载传递到支座，可以有梁、桁架和拱等不同类型进行优化）、材料选择优化和考虑不确定性因素的结构优化设计问题。这些优化设计，除应用力学知识外，还要依赖人的经验和判断，优化过程中人工干预将必不可少，人工智能将是一个重要组成部分。

结构优化方法已在结构工程科学实践中开始采用，如桁架结构、框架结构、多层建筑、高耸结构、桥梁、水坝的优化设计已收到了较好的效果，但这种应用还远不够广泛。今后急需大力开展结构优化设计的应用研究，如开展有关设计思想和优化设计的普及工作，编制符合设计实际需要的优化电算程序，包括集结构通用分析软件、优化方法软件、人机交互功能、图形功能等于一体的高效实用的结构优化设计软件包的开发。另一方面，需要继续深入进行结构优化设计的理论研究工作，如结构动力设计优化、离散值设计变量优化、随机规划和模糊规则、大规模优化问题中的敏度计算方法的改进、有效的重分析技术、分解算法和多级优化技术等。

顺便指出，目前结构优化设计一般还只局限于单目标的局部优化问题。事实上，工程结构的优化往往具有多项目标。目前我国工程设计的经济原则是在满足规范要求的前提下造价最低的方案就是最优方案。但是即使单纯从经济的观点来看，这种方案也不是经济的，因为没有考虑长远的经济利益。工程设计最少要考虑 3 个目标：造价、维护费用和遇到自然灾害时的损失期望值。这种大系统多目标优化的思想值得重视<sup>[6,7]</sup>。

### 4 结构施工力学

现代工程结构施工中一系列问题需要用计算结构力学方法求解，在此将这一类问题统称

为结构施工力学问题。工程结构建造过程中所处的状态往往比其建造之后的正常使用状态危险。大量的调查表明,无论在美国还是在苏联和东欧,大约50%以上的事故是发生在施工过程中<sup>[7]</sup>。

在目前房屋建筑设计习惯中通常不考虑施工方法和施工过程产生的最危险情况。大多数设计者认为这是工地施工人员应该考虑的事。而建筑公司在按照图纸施工时,则较多地按照工地现有的条件安排施工,一般很少计算,即使有时做一些复核也是经验性的。对设计者而言,施工时越保险越好,而对施工人员来讲,施工进度加快可以赢得更高的利润。这种对施工力学分析的忽视往往是事故发生的重要因素之一。以板柱系统的高层钢筋混凝土结构施工为例,随楼层的不断加高,新浇注的楼层支撑在下面几层楼板上。此时整个建筑的抗水平力部分并不一定完成。大量的施工荷载和设备还在施工面上,这样一种由未完成框架及支撑系统组成的暂态结构常常是危险的<sup>[7]</sup>。

桥梁工程发展中现代化施工技术起着举足轻重的地位。这一点在大跨度桥梁中特别突出。对于预应力混凝土连续梁桥、斜拉桥和悬索桥等,设计和施工是不能也无法截然分开的。结构的设计必须考虑施工的方法、施工内力与变形,而施工方法的选择应符合设计要求,形成设计与施工相互制约、相互配合、不断发展的关系。预应力混凝土连续梁桥在施工中常常出现体系转换等,因此需计算因施工方法和施工程序不同产生的施工内力、以及张拉预应力筋和混凝土徐变收缩等所产生的次内力等。不同的施工方法,在施工各阶段的内力也不同,有时结构的控制设计出现在施工阶段。一个更典型的问题是斜拉桥施工中拉索张拉控制和索力调整问题。通过拉索的张拉要实现预先要求的设计状态,即获得预计的结构几何线形和最优的受力状态。这是一个较为复杂的反问题,需要计算(考虑几何非线性)、控制和现场实测等多方面的综合。

在岩土结构工程中,施工力学也正在形成和发展。譬如,由于涉及深基础开挖和地下空间利用必然产生地面变形,必须分析其对已有建筑物和地下管线的影响程度。根据土体的本构关系、施工方法、掘进速率等可以预估地面变形的数量级和影响范围的大小,以便选择适宜的掘进方法和速率,减小和消除上述危害。对大断面地下结构(如大跨、高边墙的地下水电站厂房等)分步开挖施工过程中围岩位移和应力场及其与衬砌支护的相互作用分析表明,按粘弹塑性理论模拟隧洞围岩与支护混凝土材料的蠕变性能,并用非线性有限元法作施工分析是合适的途径<sup>[8]</sup>。

可见,现代大型工程结构的施工力学分析已是一个不容忽视的环节。结构施工力学不仅涉及计算结构力学、工程施工,还涉及系统工程理论、控制理论和优化理论等,是一门复杂的交叉学科。它的进一步发展将是必然的,也是非常有价值的。

## 5 计算机数值模拟和仿真技术

日常结构工程设计中通常仍采用依据简化的弹性分析和从试验研究得到的计算模型和经验公式。直接由试验值的统计规律确定的计算模型和经验公式往往力求让计算模型去符合比较单一试验条件下的试验结果并以其符合程度衡量计算模型和经验公式的精度,继而将此计算模型推广到任意情况,这样往往得不到结构在特定服务目标下的经济合理的设计。另一方面,由于试验中存在着偶然因素和随机因素,特别是混凝土材料试验结果的分散性较大,少量的试验数据难以反映内在的规律性,要从试验中了解特定结构在各种荷载下的性能,相当

多的试验是必不可少的,因此长期以来结构工程的试验规模大,耗资多和周期长已为人共知。随着科学技术的迅速发展,要求对结构在各种外因作用下的非线性等性能有更深入的了解,传统的试验研究方法就显得越来越不适应。况且对于海洋平台、核反应堆安全壳、压力容器和未来大型空间结构(如大型天线、大型太阳帆板和空间站)等有重大经济效益而又需精细设计以确保安全的新型结构,若以传统的试验研究方法来获得合理的设计几乎无法想象。目前数值分析方法的发展已使人们可能根据精确试验得出的本构关系和调查得到的荷载过程对各种结构进行分析,并可能结合成熟的数值图形显示技术与图像技术进行试验过程的数值模拟和仿真。这一方法不受空间尺寸和时间长短的限制,可以提供人们有关结构行为的各种完整清晰的数据和图形(其中有些数据在试验中由于量测手段等局限性无法获得),省去大量的人力、物力和时间,减少试验量,甚至代替一些无法进行的现场试验。

计算机数值模拟和仿真技术的研究主要包括以下几个方面:①建立各种材料(如金属、混凝土、岩石、土和复合材料等)在不同荷载(静载、动载、重复荷载、持续荷载和冲击荷载等)作用下、各种使用环境(高温、低温、室温、湿热、辐射和腐蚀等)下和各种变形阶段(小变形、有限变形)的合理本构关系。②数值方法的研究,包括结构几何、物理非线性和接触非线性等处理方法,结构响应中屈曲、分叉路径的追踪,材料和结构的软化造成刚度矩阵非正定与(或)非对称而引起的数值计算稳定性问题,结构初始缺陷的模拟,含有不确定性参数的数值分析方法(如概率有限元法)等。③成熟的数值图形显示技术与图像技术的研究。这是一个众多学科共同关注的热点,国际上发展速度很快。

虽然目前高级的数值模拟和仿真技术已进入结构物的碰撞性、耐撞性及灾难性破坏有关的动力学问题等领域<sup>[2]</sup>。但总的来说,这方面还存在不少问题,包括一些高难度的理论问题等。

## 6 本构模型

非线性结构响应等数值模拟的可靠性,关键取决于符合实际的材料本构模型的建立。目前本构模型的发展状况与现代数值分析方法精确化程度是不相适应的。这一点在混凝土、岩石、土等常用结构工程材料上表现得尤为明显。材料本构模型已成为限制计算机数值模拟能力的主要障碍。

一个合理的本构模型应该综合理论上的严格性、参数上的易确定性和计算机实现的可能性3个方面。目前,本构模型的研究方法主要分两类,一类仍采用传统的唯象学等方法,建立关于小变形及有限变形的更符合实验观察到的材料特性的塑性本构关系。正在提出和讨论用新模型代替传统的与塑性应变增量直接有关的强化模型。含内变量的塑性本构理论也作为一个新方向引起注意,把这一理论扩展到高应变率、高温状态的研究工作也正在进行<sup>[3]</sup>。对混凝土、岩石等材料,非线性弹性本构模型仍有一定的发展。另一类研究工作是在微观材料结构和细观力学模型的基础上建立宏观本构关系。混凝土、岩石等材料在初始状态下就呈现普通显微镜即可观测到的大量微观(细观)缺陷(如微裂缝),它的存在及其演变规律是影响材料力学性能的重要因素,因而本构关系中必须考虑这种影响,即必须依据一定的细观或微观力学原理,建立细观或微观力学模型,并借助一定的宏观力学方法以建立宏观本构关系。从目前的情况看,要正确处理混凝土、岩石等材料的应变局部化、破坏的尺寸效应等现象,采用细观和宏观相结合的方法是一条合理的途径。

## 7 计算机技术新发展的影响

计算机技术的高速发展有目共睹。目前,国际上新一代计算机系统是并行机或向量机。目前并行机系统的执行方式主要是MIMD (Multiple Instruction-Multiple Data Stream),即多指令多数据流系统。它的各个运算过程通常具有高度的“自治性”,即异步并行地运算,各过程间只有少量的信息交换,这样大大地加快了运算速度和规模。计算机发展的这种“并行化”趋势必然会导致算法的“并行化”,使传统的数值计算方法有一个根本性的变革。同时以前因硬件限制而几乎无法完成的大型和复杂结构分析和设计(如高层建筑和高耸结构的动力响应和非线性响应、结构-基础-土(桩)在地震荷载下的共同作用分析以及结构在包括荷载、环境、材料特性等不确定因素作用下的随机响应研究等)也将在更精良的结构分析模型上得以实现<sup>[10]</sup>。

并行计算机系统的发展对有限元基本理论估计不会有影响,但对计算方法和程序设计将有很大的冲击。如传统的单元刚度矩阵的形成和组装、线性方程组的直接解法、求单元内力等过程不适应并行计算,必须彻底改造。原有的迭代方法,如共轭梯度法、动态松弛法会重新引起极大的关注。总之,这方面的前景是十分诱人的。遗憾的是国内学术界由于缺乏硬件设备,在这方面进展相对较慢。但这种局面估计近几年内即可打破。在并行计算机上研制开发一系列强有力的并行算法和软件,也将是迫切需要重视的一个动向。

## 8 计算机辅助设计(CAD)

计算机辅助设计是利用计算机系统辅助工程中设计的产生、修改、分析、优化和检验。在工业先进国家,CAD已产生了重大的经济利益,被称为一次新的工业革命。一般认为,一个高级CAD系统应该具有以下主要功能:几何造型和图形处理,工程计算和对设计的模拟、检验和优化,计算机绘图和文档编辑、工程信息的有效存贮、管理和共享,建立在专家知识基础上的人工智能。关键的支撑软件包括交互式图形支撑系统和工程数据库及其管理系统。

在计算机辅助设计中,有限元分析是其工程计算部分最强有力的工具。CAD中的有限元分析应具有完善的前后处理功能,用户可以在图形终端上交互式地构造、修改几何模型,由程序系统自动地划分有限元网格,生成几何、拓扑数据,边界条件,荷载及其他基本数据。有限元计算结果也可由图形方式迅速地输出给工程师,例如变形图、振型图、应力等值线图等等。通过数据传递,将计算结果与后续设计联接起来。

目前,我国自行开发了一批建筑结构、桥梁结构等CAD系统,但大多只能进行校核性设计,一般先由用户根据预先约定的顺序和格式输入,离散成数据的模型,让计算机根据预先编制好的程序进行结构分析、钢筋混凝土构件的配筋计算和施工图的绘制等工作。众所周知,工程设计是一项综合性工作,是工程师根据科学的方法、凭借自身积累的经验,遵循国家规范、按使用要求和施工条件等诸多因素,进行分析、比较、判别,最后用图纸和文字资料表达设计产品的过程。这就要求工程CAD系统不仅能进行校核性设计,而且应该能思维、有知识、会咨询,也即具有纠错、优化、决策支持能力,因此有着更为广阔前景的将是智能型CAD系统。

## 9 结语

计算结构力学的发展促使了结构工程科学研究方法的变革,即从理论和试验(包括实践

和观察) 两极转变为理论、试验和数值计算三板。数值计算已和理论分析、试验测试一样成为结构工程科学中强有力的方法。数值计算、理论分析和试验测试之间相互促进、相互渗透又相互制约。理论对数值计算的发展是必不可少的。精细的数值计算一方面对理论和试验提出了愈来愈高的要求, 另一方面有可能揭示出一些前所未有的现象和规律, 促进理论和试验的发展。试验对于建立计算模型和检验数值计算的正确性十分重要。通过试验又可发现新现象, 促进理论的发展。理论和数值计算对试验有着重要的指导作用。当前, 上述三种方法的相互结合正显示出强大的生命力和广阔的应用前景。理论分析(主要指解析法)和数值计算的结合形成了一类新的分析手段——半解析数值方法。工程界常用的半经验、半理论公式则是理论分析方法和试验方法相结合的最生动的实例。数值计算和试验技术结合应用于单用试验技术或单用数值计算不能求解的问题, 也是一个值得注意的发展动向。这种应用的一个简单例子是在数值计算程序中输入用试验确定的初始条件和边界条件, 从而提高预测结构响应的精度。目前国内外流行的用计算机-试验机联机系统进行结构拟动力试验的方法则是试验技术、数值计算和理论分析等的有机结合。就目前材料本构关系的研究而言, 理论上微观力学、断裂力学和损伤力学等的介入使研究的深度和广度有了很大发展, 而利用计算机模拟材料的微观结构、分析微观结构的各种模型和众多参数正在成为探讨材料各种力学现象的机理和本构关系的一种手段。试验则是了解材料基本性能和确定本构关系中一些基本参数的基本手段。可以预料, 随着科学技术的发展, 数值计算、理论分析和试验测试将相互依赖、相互交叉、协调发展。对结构工程这样一门应用性很强的学科, 工程和生产实践中经常会提出一些新问题, 譬如高耸结构和大跨桥梁的风载和风振问题(属于固体-流体耦合问题)。对于这些高难度的问题, 更应该充分发挥基础理论、高度发展的数值计算和现代化试验技术的综合力量。

计算结构力学的发展给结构工程的科研、设计和施工等各个方面带来了崭新的面貌。但应该看到, 数值解有其固有的弱点, 它不能给出函数形式的解析表达式, 较难发现和预见问题的一般规律和特征。这一方面对结构理论, 特别是结构承载机理学的研究特别重要<sup>[11]</sup>。还有一个极为重要的问题是实际有效的计算模型的建立。建立模型的基本假定是否合理? 模型是否符合实际? 如果计算模型不合理, 那么数值计算再精确也是毫无意义的。

感谢石洞、宋启根、丁大钧、洪锦如等同志对本文工作的支持和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 钱令希. 谈谈计算结构力学的现状和今后的工作. 计算结构力学及其应用, 3, 3 (1986): 1—6
- 2 Noor A K, Atluri S N. Advances and trends in computational structural mechanics. *AIAA*, 25, 7 (1987): 977—995
- 3 曹志远. 解析与数值结合法及其应用. 计算结构力学及其应用, 9, 2 (1992): 220—226
- 4 程耿东. 结构优化新方法及其计算机实现. 力学与实践, 14, 1 (1992): 1—6
- 5 Bletzinger K U, Kimmich S, Ramm E. Interactive shape optimization of shells. in *Numerical Methods in Engineering: Theory and Applications* (Eds Pande G.N, Middleton J). Elsevier: Applied Science (1990): 464—473
- 6 结构工程科学发展青年研讨会论文集. 国家自然科学基金会, 哈尔滨 (1992)
- 7 结构工程科学的未来. 全国结构工程科学的未来研讨会论文集 (清华大学土木系编). 清华大学出版社, 北京 (1991)
- 8 孙钧, 汪炳鉴. 地下结构有限元法解析. 同济大学出版社, 上海 (1988)
- 9 钟万勰, 沈为平, 张秉雷. 计算结构力学的研究现状和展望. 上海力学, 10, 3 (1989): 41—46

- 10 中国建筑学会建筑结构学术委员会. 2000——建筑结构. 中国建筑学会建筑结构学术委员会第二届年会论文集, 北京 (1991)
- 11 丁大钧. 结构机理学. 东南大学学报, 22, 3 (1992): 9—19

## DEVELOPMENT PROSPECTS OF STUDIES ON SOME COMPUTATIONAL STRUCTURAL MECHANICS PROBLEMS IN STRUCTURAL ENGINEERING SCIENCE

Fan Zhi-liang

Structural Engineering College, Tongji University, Shanghai, 200092

**Abstract** After a review of the growth of computational structural mechanics, a survey is made for the following seven important computational mechanics problems in structural engineering science: (1) Basic theoretical problems of numerical methods (including error estimation theory and adaptive mesh refinement strategy, multi-variable finite element theory and semi-analytical numerical method). (2) Optimum design of engineering structures. (3) Structural construction mechanics. (4) Numerical modelling and simulation by computers. (5) Constitutive models. (6) Influence of new development in computer technology. (7) Computer aided design. It is revealed that the numerical computation, theory and experiment are closely interrelated.

**Keywords** *structural engineering, computational mechanics, structural mechanics, numerical method*