

国家自然科学基金委员会资助

建筑环境与结构工程 最新发展

那向谦 龚晓南 吴硕贤 主编

浙江大学出版社

建筑环境与结构工程最新发展

那向谦 龚晓南 吴硕贤 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

内 容 简 介

本论文集收集的论文反映我国建筑环境与结构工程学科领域部分中年专家近年来取得的学术成就和他们所从事学科领域的科技发展方向,从中可了解我国建筑环境与结构工程领域近年来的发展水平。

可供从事建筑、水利、交通、铁道、环境工程等领域技术人员及土木工程专业大专院校师生学习参考。

建筑环境与结构工程最新进展

邢向谦 龚晓南 吴项贤 主编

责任编辑 李桂云

* * *

浙江大学出版社出版发行

杭州钟声电子技术服务部电脑排版

浙江工业大学印刷厂印刷

* * *

850×1168 1/32 8.875 印张: 239 千字

1995 年 4 月第 1 版 1995 年 4 月第 1 次印刷

印数 0001-1000

ISBN 7-308-01408-8/TU · 027 定价: 15.00 元

前 言

建筑环境与结构工程科学是与人类的发展与进步密切相关的学科。古埃及的金字塔、古罗马的架空输水渠道、中国的万里长城，展现了这一学科古代的科技辉煌。近现代的铁路与公路运输网，跨海越江的隧道与桥梁，人类聚居的城市群与摩天大楼显示了它最新的成就。

中国国家自然科学基金委员会于1986年正式成立，它的基本任务是依据国家发展科学技术的方针、政策和规划，有效地运用科学基金，指导、协调和资助科学研究，发现和培养人才，促进科学技术进步，推动社会和经济的发展。依据上述宗旨，国家自然科学基金会成立伊始即建立了建筑环境与结构工程学科，8年来共资助了重大、重点及年度科学基金近600项，有效地促进了这一学科领域内的科学研究工作的开展。

1994年5月受国家自然科学基金委员会材料与工程科学部的委托，浙江大学土木工程学系承办了“建筑环境与结构工程学科领域中年专家学术交流会”。所谓“中年专家”在这里特定的含意是指在中华人民共和国成立前夕及建国初期出生的，陪伴着共和国成长起来的一代科技人才。这代人的多数是在“文革”十年动乱中离开学校，或“上山下乡”或深入工程建设的第一线，经其磨练并与劳动人民有其水与血汗的交融。在中国共产党的十一届三中全会以后，在我国蕴育着的新一次科学技术与国民经济腾飞的春天中，重新回到高等学校深造，并从此留在科技界担当起“承上启下”重责。这次研讨会应邀有20余人到会，本论文集收集和发表的论文

• 浙江大学葛坚、史美东参加论文征集、编排及校稿工作。

代表了他们近年取得的学术成就及他们所从事的学科领域的科技发展方向。

本世纪的最后十年及下个世纪的前叶,是我国国民经济发展及科技事业是否能重振雄风、赶上发达国家进入世界先进行列的关键年代,也是当代“中年专家”所面临的挑战与机遇。希本次学术研讨会的召开与本论文集的发表,能够激励这一代人在科技领域内不断的探索前进,为中华民族的发展与人类的进步作出贡献。

国家自然科学基金委员会

1994 年 10 月

目 录

前言

结构工程科学的进展与国家科学基金的资助	那向谦(1)
现代建筑设计方法研究概况	栗德祥(15)
厅堂声学一百年	吴硕贤(27)
中国园林阴阳观	李先遼(40)
现代城市防洪的方略和措施	吴庆洲(54)
港口的实验室环境水力学模型	俞国平(68)
结构分析的新型半解析法—有限元线法 ...	袁 驷(88)
荷载缓和体系的概念及应用	单 健(106)
网壳结构稳定分析进展	钱若军(114)
空间结构发展的理论及技术基础	钱若军(127)
均布载荷作用下无自由角点的矩形板弯曲通用解法 ...	许琪楼(137)
房屋隔震技术新进展	施卫星(156)
地震模拟振动台结构试验与分析	吕西林(177)
土的本构关系研究的发展	李广信(190)
地基处理技术在我国的发展	龚晓南(210)
复合地基理论框架	龚晓南(224)
软土地层深大基坑围护结构的发展	李永盛(240)
灰土井桩桩径对承载力影响特性研究	张之颖 强靳毅 杨 荣(272)

结构工程科学进展与国家科学基金资助

那向谦 (国家自然科学基金委员会)

前言

近代科学的理论方法和计算方法不断创新,近源和远源学科之间的日益交叉渗透,使得基础性科学研究和应用技术开发之间的界限趋于模糊,并由此导致了科学研究的视野与领地的空前扩大。

基于近代科学发展的规律,结构工程这个作为古老土木工程专业的主干学科面临着严峻的挑战,同时又蕴育着一个得以蓬勃发展的新的机遇。国家自然科学基金委员会成立的第二年,1987年初,我们开始着手进行学科发展战略的研究,发表了一系列研究报告。与此同时,8年来,我们在组织、审批国家自然科学基金设置的面上、重点、重大项目三个层次的资助项目中密切注视学科发展的规律,寻找和鼓励学科发展的新生点。本文为上述工作的一个总结,也是我们抛砖引玉力图勾划出结构工程科学在下一个世纪发展的框图。

一、结构工程发展的趋势

结构工程科学是与国民经济建设紧密相关的基础性科学。它

服务于工程建设工作,又从工程建设中吸取值得研究的素材。我国从70年代末开始的全国范围的基本建设高潮,尤其是沿海省份对外经济开放后,城市发展、重大工程项目及道路桥梁的建设为结构工程的科学研究提出了一系列新的课题。西方和欧洲国家,在世界上国家间新格局和新关系下,将用于国防和空间争霸的科学研究经费,转而用在国家的基础性工程建设和现有工程项目的改造和修复工作,同时为土木工程、结构工程学科的科学研究的提供了较为充裕的研究经费。对我国结构工程界而言,抓住机遇,确立正确的战略目标,编制科学发展规划为下个世纪初科技事业的发展打好基础,是当前十分重要的任务。

研究分析近10年来国内外学术动态及国际国内学术会议与刊物发表的文献,可以看出,结构工程科学研究发展呈现四大趋势。

(1)结构物的单体或局部的强度与稳定的研究相对成熟。研究方向开始转向结构的体系化问题。例如将结构物的地基视为半无限体,基础、结构物与其耦联,利用有限元方法分隔为不同的界面,做整体的所谓“结构—基础—地基”之间共同工作的计算分析为典型的例子。在时域范围内,尤其是动态的灾害性载荷(风和地震力)作用下,对结构物做时域的动力响应分析,即做弹性、塑性直至破坏与倒塌分析。空域与时域的结构问题的研究构成了总体的体系性的“四维”问题研究。

(2)传统的结构物设计与结构物的力学分析过程,通常是依据知识和经验框出计算简图(假设),再用数学、力学分析进行求解,对于重要的工程还应用试验方法进行验证。容易出现的一个偏差是结构工程师的关注点集中在力学分析求解问题上,忽视了结构物及外部载荷大量的不确定因素的存在,其结果是“粗糙的假设,精细的求解,粗糙的或不可靠的结果”。

近年提出的结构体系的总体性优化和可靠度的研究,将结构

分析概念拓宽至工程大系统的全局性优化设计,即考虑工程项目的社会与经济效益决策、工程的可行性分析论证、总体规划、设计可靠性、施工的可能性等。这个所谓工程大系统问题的提出,引起学术界的争论。问题的解决仍存在着难点,但可以预见,随着计算机科学的发展,人类的经验与知识的积累与建库,大系统优化和可靠性问题会进入应用阶段。

(3)结构物在动态载荷作用下(如地震,风及其他意外事故载荷),引起的结构物动态响应常常超出其设计允许的极限强度值与变位值。在建筑结构物的抗震与抗风设计中,采用增加结构物断面尺寸和增强材料的强度值的方法来抵御灾害性动态载荷引起的破坏是有其局限性的。社会与经济的发展要求结构物能够达到的高度与跨度不断地增长,(如正在施工的我国上海电视塔已达468m高,江阴长江大桥采用钢索吊桥结构体系其单跨跨度达1600m)。世界上百层以上的建筑达几十幢,目前正在筹建200~300层的巨型建筑其高度超过500m。这类巨型建筑除要求其在风与地震作用下的安全性外还要求平常使用状态下的稳定性与舒适性(不允许产生过大的加速度动态响应)。特殊功能的结构物,如核电站,保险公司的计算机房等要求在罕遇的灾害地震作用下不得产生过大的振动。这一切为建筑结构物的设计提出了新的要求。

从70年代起,伴随着近代科学技术的发展,在结构工程领域中通过下述三种途径的科学研究解决上述提及的问题。

①利用结构自身的框架梁、柱结点、剪力墙的连系梁体系或在结构体系中增设耗能支撑的杆件体系,做为自适应耗能体系解决在地震作用下结构物的减震与耗能问题以达到可靠性的目标;

②对于结构自身具有较大刚度的建筑物,在遇到强烈地震作用时,不允许出现过大的振动(峰值较高的加速度地震响应),可采用基础隔震措施,如用橡胶隔振垫及各类型阻尼器将结构物的基础与地基隔开。

③对于高柔或大跨度的长柔结构物,为避免在风或地震作用时的过大振动,可在其顶部或跨中设置固体振荡阻尼器(TMD)或液体振荡阻尼器(TLD)吸收振动能量,实现其减振的目的。

在上述三种途径的科学研究中,我国对第一种途径的研究已有一定的试验积累,但缺少理论总结与优化筛选。第二、三种研究则刚刚起步,与工业发达的国家相比存在较大的差距。

(4)随着近代科学发展,学科之间的渗透,电子计算机的容量与速度的飞速增加,结构工程发展的另一大趋势是专业概念的展宽。

应用计算机存储信息、数据、以至人的知识和经验,利用计算机做逻辑推理、系统分析寻求优化解,这一切使得大量的不确定性的一次性结构计算分析问题可以求解。加上已经成熟的计算机辅助设计(CAD)系统,结构设计与结构分析将出现革命性的变革,结构工程将向更为宏观并更符合客观实际的方向发展。

近年来处于上升发展的交通工程与城市防灾工程,均是借助于计算机与系统工程分析的发展而兴旺起来。

传统的结构方案设计、结构体系优化、结构损伤识别、施工组织设计、房地产业的决策与管理这些依靠专家的知识与经验的工作,转向用机器做分析和决策。1987~1992年之间,国家自然科学基金委员会会同8个部委联合资助的“工程建设中智能辅助决策系统的应用研究”汇集了国内20几个科学研究院与高等学校的结构工程、建筑学、环境工程与计算机等专业的科学家集中力量联合攻关,使我国在这一处于起步阶段的研究领域进入国际先进行列。这一研究所完成的现有建筑物与城市的震害损伤与评估对策系统、工程项目的投标报价系统、铁路线改建方案决策系统等进入实用阶段。用于土木工程智能决策系统的研究仍在深入,它将伴随着计算机硬、软件水平的提高及数学和系统分析方法的发展而发展。

结构工程专业概念拓宽的另一重要工具是计算机仿真技术。本世纪 60 年代发展起来的这一方法,由初始的数值模拟与计算机图形技术向与信息论、模拟论、控制论、人工智能、多媒体视景系统等现代科学方法结合的方向发展,在土木工程中的应用领域日益展宽。工程规划与设计现场实景环境的模拟、灾害环境作用的模拟、结构物损伤破坏过程的模拟以及工程设计的模拟,房地产投资风险、利润效益预测的概率分析模拟等,均已取得研究成果。计算仿真技术(又称模拟技术)不仅改善了结构工程的设计分析和试验手段,更为深刻的是这一技术的引入和深化,促进了结构工程专业概念和专业领域的深刻变化。智能决策与仿真系统的应用,将结构工程师由繁杂的计算中解放出来,有时间和精力去思考更为宏观的结构大系统问题。

近 20 年来,传统的数理科学、地理科学、工程地质科学等争相开发新的学科领域。它们借助坚实的专业基础理论,应用上述现代科学方法,发展了“专家决策系统”、“地理信息系统”、大区域范围内的灾害性载荷在岩土介质中或大气环境中的传递与分布模型等。这些土木工程需要而还未解决的科学问题,由相关的其他学科领域解决了,相比之下建筑与结构工程专业的学科发展则相对滞后。

为适应当今科学技术发展日新月异,科学试验、理论与计算方法不断创新,近源和远源学科之间日益交叉渗透这一趋势,我们从 1990 年开始在科学基金申请指南中,明确地把土木工程(广义结构工程)分化成三个领域:结构工程、交通工程及城市与减灾工程。岩土工程(含地基与地下结构物周边介质问题)、建筑材料工程则在其他近源学科中渗透发展。八五期间,国家科委与国家自然科学基金委员会联合资助实施的“城市与工程减灾基础研究”除做为国家级的一项重大研究课题外,在学科拓宽发展的意义上,将促使城市规划、地理信息处理、计算机应用与结构、水利及力学工程相

互交融,为这一新的专业研究领域的产生奠定基础。

二、国家自然科学基金在结构工程科学中近期优先资助领域的考虑

国家自然科学基金的基本任务为:依据国家发展科学技术的方针、政策和规划,遵循科学研究的自身规律,关注科学前沿问题;有效的运用科学基金,指导、协调和资助基础研究和应用基础研究工作;发现和培养人材;促进科学技术进步和经济及社会的发展。

遵照上述基本任务所规定的原则,在结构领域近期优先资助的范围为:

1. 结构物总体分析与结构设计的可靠度准则研究

结构的可靠性可以作为协调结构安全适用与经济的最佳结合点。

由于土木工程中大量的不确定因素,使得可靠性研究必须综合、合理地考虑整个结构的“生命周期”,而且也应该在一定程度上考虑整个工程系统的约束。该项研究事实上是整个设计的基础工作。它包含结构最优可靠性风险决策的理论及考虑多目标的模糊优化的方法等。研究工作中势必要遇到信息的缺损及处理大量的随机、模糊因素,无论是数学建模还是寻优手段都有相当难度,而这部分工作完成的质量又是关系到设计成败的最关键部分。

2. 灾害环境下结构物的破坏及损伤模式研究

结构计算中,常常是计算方法的精度很高而输入的荷载与各种环境因素不准确。这种差距使整个计算丧失了应有的精度。尽管对风力、地震力已做了大量的研究,但由于局部环境的影响,真正作用到结构上的灾害力的估计还不能满足设计的需要。因此,各

种荷载与荷载谱的大量统计和测试工作必须引起足够的重视,必须考虑荷载的不确定性,研究荷载本身的随机性及其取值的主观性。

对灾害性荷载作用下结构物动态响应历程、屈服后滞回模型、非线性动力失稳及三维破坏性荷载输入条件下的结构破坏准则等问题仍应深入研究。

在结构屈服后的分析中还有大量数值方法问题未解决。实际结构在灾害作用下 破损实测以及根据记录的反演也是必须的。只有对不同类别的结构系统倒塌的基本现象作出机理性的解释后,才能使防止和控制破坏倒塌的相应理论方法得到解决。

3. 灾害性环境、灾害性荷载在不同介质中的传播规律与灾害预测、对策研究

与工程有关的自然灾害主要是风、地震、洪水、火、滑坡等,其中风工程与地震工程已相继发展为独立的学科。在城市中,人为所造成的火灾(例如电火、燃火)以及恶性爆炸等已形成对人民生命财产越来越大的危害。人们不但要增强工程结构的抗御和减灾能力,还要解决修复和预测其灾害后的寿命等问题。

以地震为例,由于地面运动特性的复杂性使整个结构抗震变得非常复杂。作为这一工程的基础与出发点,首先必须掌握我国强震地面运动的特点。此外,在局部场地条件对地震动特性的影响方面还需实测数据和可靠的计算模型。在如何考虑地面转动和地震动空间变化对结构的影响方面还是空白。在风荷载方面,我们也缺乏大量风作用荷载的实测记录。在荷载谱、荷载与结构本身的耦合作用方面还有大量工作要做。当火灾出现时,工程材料出现的损伤以及在高温下本构关系的研究在我国刚处在起步阶段。直接爆炸效应的研究目前还进行得很少。

城市的抗灾系统工程是一门综合性的学科,应根据科学的方法进行决策,针对实际问题划分若干领域,由有关部门进行联合研

究。就城市抗灾而言,它关系到城市规划、土地利用、能源(包括水、电、煤气、热力)、交通、通讯工程、住宅、公用建筑和工业建筑抗灾对策、灾害对环境的可能污染、场地与地基的稳定性、重要设备与设施的抗灾措施、灾害的社会经济影响、灾害保险、医疗救护、救灾技术与防灾训练等等。必须在上述各方面进行分项研究,完成决策的基础工作,然后进行整个城市抗灾的综合决策。

4. 结构物的损伤积累与耐久性研究

结构在长期自然环境和使用时逐渐损坏,这是一个不可逆的过程。应该指出,工程耐久性的问题在我国更为突出。由于我国人口众多,大量的老房、危房仍在使用中。据1985年国家统计局统计,我国城市中大约有46亿平方米建筑,其中使用20年以上的占41%。就工业厂房而论,我国目前约有5亿平方米,覆盖的固定资产有5千亿元左右。

建筑与工程结构除承受大气腐蚀外,还有长期温、湿变化所造成的结构在物理化学性质方面的变化。目前以钢材锈蚀、混凝土碱骨料反应及冻融现象最为典型。这方面的研究,在我国除对沿海港口设施和寒冷低温地区做过一些实测及少量理论工作外,基本上还处于探索阶段。所谓使用环境的破坏作用主要是指材料和结构的疲劳。疲劳按其周期可以分为一般疲劳,低周疲劳和脉动疲劳。一般疲劳如吊车、车辆荷载,常以百万次计,结构会因此出现较大的应力变化幅值。对这种疲劳作用下结构性能的研究已经很多。一些低周疲劳常常导致结构多次超越屈服点或极限状态,其特点是大变形。对此目前正在研究中。地震引起的结构反应就属于这类。脉动疲劳是以千万次甚至亿万次计,结构只产生很小的应力变化幅值,疲劳导致的破坏主要是由于构件在长期使用过程中损伤积累超过了材料可以承担的极限,从而使构件退出工作或遭破坏。海洋工程在波浪力作用下的损坏就十分明显。目前,对于不同的工程材料在不同疲劳周期作用下损伤累积的机理还不清楚。人

们曾经探讨用各种不同的损伤度来定义材料、构件和结构的损伤程度,以求得定量的计算。应该说,这些方法多半还是纯经验性的,关于损伤累积的理论研究和试验还进行得很少。

5. 建筑结构的隔震及结构控制与结构体系的耗能减震自适应体系研究

从我国国民经济建设的实际需要出发,对未来工程建设中将遇到的问题进行探索性、超前性的研究是我国工程科学研究的基本任务。

建筑结构的隔震研究应以吸收国外已有的研究成果为主,结合我国的实际情况,开发经济简便的隔震耗能装置。华南建设学院与华中理工大学研制的橡胶隔震垫与阻尼系统已用于示范房屋中。今后研究的重点应结合特种结构物的功能需要(如地震区中建设的核反应堆),研制高性能、材料稳定性强的隔震与阻尼装置,建立振动监测系统使用周期内的跟踪研究。

基于我国目前的工业基础状况,结构控制研究以研制被动性的固态质量振荡阻尼器(TMD)与液体振荡阻尼器(TLD)为主,结合工程建设的实际进行应用研究。国家自然科学基金资助的“建筑结构抗震与抗风振动控制研究”以两桥(江阴长江吊桥,汕头跨海吊桥)两塔(南京,上海电视塔)做为研究范例,就是遵循这一原则。主动控制的研究目前在我国仍处在试验室中进行理论与可行性探索阶段。结构控制的研究应注意学习与引进国外已成熟的经验与成果,特别是日本已建成的工程实例。

结构体系的耗能减震自适应体系的研究在我国已有近 20 年的历史。发表的大量论文主要是针对钢筋混凝土框架体系、框支剪力墙与剪力墙体系,少量为钢框架体系。今后的研究重点应为归纳总结性的理论研究,力求优化出典型方案用于指导工程设计,并形成条文进入工程设计规范中。

上述三个领域的研究应力求避免盲目性,不可以认为某种装

置是万能的可用于一切结构中。一般的规律是：隔震器用于具有较大刚度或以剪切变形为主的建筑结构物的减震设计中；结构的被动与主动控制装置用于解决高、长、轻的柔性结构的抗风与抗震问题；耗能减震自适应系统用于多层与高层钢筋混凝土结构体系。现代科技多学科交叉和相互补充的特点已体现在这个领域的科学研究中。

6. 高强与高性能结构材料的研究

在结构工程学科的发展中，材料是最重要的因素之一。我国具有宏大的建设规模，但目前所用的材料大多处在低质水平和数量不足的状态。这种状态使结构工程技术不能达到高效率地实现建筑结构功能要求的水平。而一些高功能或特种功能的结构则因材料的原因只能有限度的实现。解决这个问题，一方面应从材料科学入手，将现有工程材料改性或发展新材料；另一方面应强调材料与结构统一的设计概念，强调在结构工程中注重应用可预见的优良的改性材料或新材料，创造新结构型式。

高强与改性混凝土是指传统的水泥混合料中掺入新材料，以提高抗拉强度和减少脆性。目前国外大力研究发展这种掺入料，例如性能优异的以树脂改性水泥浆为基体制成的无宏观缺陷水泥(MDF)的制品(抗折强度提高5倍)。由石油或煤沥青制造的沥青基碳纤维，估计不久可广泛用作水泥基材料的加筋纤维。当掺入量为5%时，抗拉强度可提高3倍。国外在钢纤维混凝土、耐碱玻璃纤维混凝土、合成纤维混凝土方面已有较系统的研究工作。但目前价格尚高。

7. 结构试验与工程仿真的研究

结构试验是整个结构工程科学发展的基石。如果说，许多计算理论和软件可以从国外引进，那么材料和结构的试验则必须自己完成。唐山地震后的10年内，我国进行了大规模工程抗震的试验，投入的人力物力之大也是国际上罕见的。这些努力及获取的成果

使我国工程抗震的科学研究达到了国际先进水平。大量的科研成果已经在我国的工程建设中应用。我国同时兴建了一批抗震试验室,引进了一批多自由度的模拟振动台、拟动力试验机等。我国在工程抗震方面的整体实力已经处在世界前列。

结构试验中的三个基础性问题尚待解决:

(1) 结构试验模型的相似理论问题

灾害模拟试验(包括地震、风、火等)以及结构耐久性的快速模拟试验都遇到许多相似理论的问题,例如重力相似、几何相似、材料相似以及时间相似等。这些相似关系多是非线性的,具有很大的难度。这些问题不解决,试验室内小比例尺的结构模型试验只能停留在提供定性依据的水平上;而在这些问题上哪怕是微小的一点突破,都可能对结构工程试验技术产生重大的影响。

(2) 结构实验与计算机联网的混合模拟试验技术

这一技术的优点在于可以用较少的钱和较小的设备进行大型的结构试验,其原因就在于此种试验允许人们对模型的实现方法进行选择,适宜在物理上实现的就选择物理模型,适宜在计算机上实现的就选择计算模型。以一次大规模的试验为例,其物理实现部份只是几个构件,而非一个完整的结构物。对于混合模拟动力试验目前应重点发展高精度、大吨位的加载设备,以适应大刚度构件以及估算高振型影响时加载的需要。在这方面,具有机械、液压和数字化加载器优点的混合型伺服加载装置有可能取代传统的电液伺服式加载器。这种加载器的位移精度可望达到 $1/100$ 毫米,出力达到上百吨,而价格比电液式便宜得多,且易于调整。此外,利用这类装置对结构、构件、节点在多向荷载作用下,考虑多自由度特征的性能测试也正兴起。

(3) 结构试验中的仿真技术

仿真技术的优点在于它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全过程各种完整清晰的数据和图形,省