

从结构工程学科的演变看传统学科的革新

Innovations in Traditional Disciplines as Seen from Development of Structural Engineering

刘西拉

(清华大学土木工程系,教授)

结构工程学科是古老的土木工程领域中的基础性学科。众所周知,各种建筑物、构筑物和工程设施都是在一定经济条件约束下,以工程材料制成的各种承重构件相互连成的组合体。它们在规定的使用期限内,除应满足工程的功能要求外,还必须安全地承受外部及内部形成的各种作用。这是结构工程学科研究的范畴。可见结构工程学科是一门应用性很强的传统学科。与其它传统的工程学科一样,它必须有工程应用背景,同时少不了其它基础学科的支持。

本文的目的在于从学科发展的高度来探讨结构工程这门古老的传统学科在当前的新特点,预测其发展趋势,从而看出传统学科革新是必然的。与此同时,结构工程学科的教育也须跟进。

一、结构工程学科面临的新特点

1. 电子计算机的发展引起整个学科基本构成的变革

40多年来,电子计算机器件持续高速发展超过了历史上任何一种工业产品。到目前为止,这种发展的势头不仅未见减弱,而且日益加强。几乎每隔3到7年为一周期,计算机的运算速度增加10倍,体积缩小10倍,同时价格降低10倍。现在这个周期还在缩短,到90年代中期,将出现每秒万亿次运算的超级计算机和几十亿次运算的个人工作站。在这种强大的浪潮冲击下,古老的结构工程学科不可避免地出现了变化。

(1)整个学科由理论与试验(包括实践与观察)两极构成变为理论、试验和计算的三极构成。结构工程具有很强的个性和综合性,它早期的发展主要是通过工程实践。17世纪以后,以伽利略和牛顿分别为代表的实验力学和理论力学开始同结构工

程实践结合,逐渐形成材料力学、结构力学和岩土力学等基础理论。结构工程学科才逐渐从仅仅依靠实践经验发展成为一门有理论、有试验的独立学科。过去很长一个时期,结构工程一直是由理论与试验两极构成的学科。随着计算机的发展和渗入,大量依赖低水平重复试验、通过回归方法求得经验公式的做法开始萎缩。在许多研究课题中,人们往往利用少量高水平、高精度的试验结果,建立严格的数学物理模型,然后利用计算机编制大量设计需要的表格曲线。传统的数学物理方程封闭解的应用空间十分狭窄,而以有限元方法为代表的数值方法借助计算机得到了空前发展。在这种形势下,理论与试验之间出现了一条通过计算建立联系的新途径。换言之,出现了结构试验、结构理论与结构计算三足鼎立的新学科结构。同时结构计算的出现也促进了结构试验和结构理论的发展(图1)。

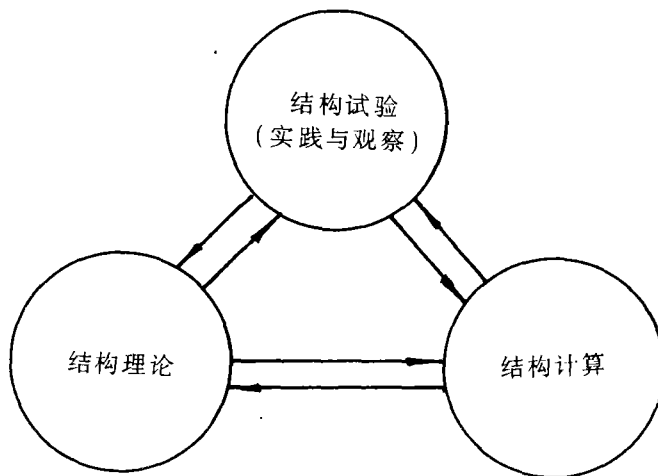


图1 结构工程学科的结构

(2)结构硬理论的软化及工程经验的硬化。

与连续生产的化工系统不同,结构工程项目不仅是离散的而且多为各不相同的单体。因此它面临的不确定因素(包括随机因素和模糊性)和不确定因素很多。由于计算机处理信息的功能迅速扩大,使分析和综合这类因素成为可能。于是,原来仅能进行确定性分析的理论出现了软化。例如,在优化方法中,寻求满足确定目标函数的“最优解”逐渐根据工程的需要变成寻找满足一些约束和标准的“满意解集”,这就是优化方法的软化。另一方面,结构工程中大量的工程经验可以利用知识工程的手段,借助计算机把它们储存起来,通过推理寻找问题的解答,这又是一种硬化。目前国内在工程建设方面大量专家系统和智能辅助系统的出现,正说明这一趋势。这种硬软相互转换的趋势构成了结构理论更新的丰富内容。

(3)工程试验开始形成一门真正的试验科学
以往的结构工程技术发展主要凭借工程实践,其主要原因是有些客观情况过于复杂,难以如实地进行室内试验。长期以来,人们必须大大地简化工作环境以进行足尺试验。现在,利用计算机控制的多维地震模拟振动台可以再现实际发生的地震;用计算机辅助的伪动力伺服加荷系统帮助人们在静力状态下量测结构的动力反应;由计算机完成的各种数据采集和自动处理系统可以准确、及时、完整地收集并表达载荷与结构行为的各种信息。从这个意义上讲,计算机加强了人们从复杂的工程实践中提炼关键因素进行试验的能力,使结构工程试验真正成为一门既来自工程实践又不同于工程实践的试验科学。

2. 系统工程的观点导致学科思想的进步

系统工程是一项伟大的创新。系统工程的思想不仅影响社会而且影响各学科的发展,结构工程学科也不例外。目前我国工程设计的主要内容多属各项具体工程的单体设计,缺少具体设计前许多必要的论证工作;有时即便有此打算,也往往缺乏科学的方法。其实论证工作是工程设计的重要组成部分,它对工程经济效果的影响远比结构设计本身为大。例如,工程设计开始前的可行性分析,包括该项工程对国计民生的重要性,与相关工程的配套性,工程建成后对社会和生态环境的影响,工程的总体布置,以及交通、动力、管理系统的规划等。这里,单目标的局部优化设计势必将发展为考虑多目标的宏观优化设计。单就结构而论,也必须综合考虑结构整个“生命周期”中的三个阶段,即建造阶段、正常使用阶段和老化阶段。建造阶段的风险多来自设计、施工的失误和疏忽;正常使用阶段的风险则主要来自各种非正常的外界活动,特别是自然和人为的灾害;老化阶段的风险却主要来自各种损伤的积累和正常抗力的丧失。以

往大量的研究大多集中在正常使用阶段,而这个阶段在正常条件下风险率往往最低(图2)。长期以来,我国的基建投资只计建房不计修房,然而在许多情况下,维修和改造费更昂贵。现在,国际上提出的“宏观造价”概念,就是要综合考虑建造和部分维修改造的费用。

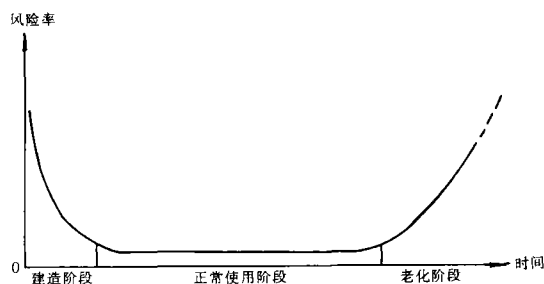


图2 结构的“生命周期”

3. 各学科之间的交叉共同构成学科的基础

结构工程学科仅仅依靠力学的时代已经过去了,现代新技术的出现和学科之间的相互渗透使结构工程学科得以不断开拓。目前所形成的地震工程、海洋工程、核能工程、风工程等新兴的边缘学科,都是由多学科交叉形成的。现代的结构设计,不仅使用力学、数学,而且渗透了系统工程、价值工程、思维科学、环境科学和美学的观点。以往许多优化程序得到的“最优结果”在实践中往往难以全部采用,原因是决策者必须综合许多其他学科领域的因素。结构物在长期温度、湿度变化和外界侵蚀作用下,寿命是有限的,而结构物寿命的计算必须具备有关的物理、化学、数学知识。结构可靠度的计算中,尽管荷载和结构抗力的统计规律还有大量的工作要做,然而对事关紧要的人为错误至今缺乏研究。其中人的可靠性和人为心理学是不可少的。例如,在工程施工过程中,人们为了浇注混凝土方便,常常加入过多的水,这势必影响结构的强度和耐久性。调查表明,少量的超量加水在工地上十分普遍,而大量过多加水并不多见。因此,此类人为错误的特点是“小错不断”“大错不犯”。这样,不同错误出现的频率是可统计的,而且它的变化特点往往又与工作性质、环境、以至操作人员的心理状态有关。

4. 工程材料的发展酝酿着学科新的飞跃

工程材料是结构工程的物质基础。历史上,结构工程学科发展的每一次飞跃都离不开材料的变革。工程材料的变革和进步往往使结构在效能上发生质的变化。从使用土、木、石材到使用钢材、混凝土,实现了结构工程的一次飞跃,这是人所共知的。目前国际上正期望着能够生产足供大量使用、效能极高的全新工程材料。然而预测表明,近几十

年还不可能如愿,结构工程由于材料更新而出现的飞跃时期尚未到来,暂时处于酝酿阶段。在此阶段,传统材料(如钢材及混凝土)的改性与新材料(如有机薄膜材料和组合材料)的探索并存,而且应以传统材料的改性为主。目前建筑钢材和混凝土两种基本工程材料的共同方向是提高强度。例如,美国70年代混凝土的平均抗压强度为40兆帕,其中预制混凝土为60兆帕,预应力混凝土为70兆帕,预计到本世纪末可达135兆帕,特种工程将达400兆帕。而我国目前的混凝土平均抗压强度仅20兆帕,预测到本世纪末可达35兆帕。显然差距还很大。如果提高强度的问题不解决,势必影响到实现更高的结构功能。

5. 信息交流已成为学科发展重要命脉

现代的信息交流是全球性的。高封闭系统没有生命力。在信息时代,这个规律对一个国家如此,对一个部门、单位亦如此。前苏联一度曾在钢筋混凝土结构理论方面有明显优势。由于长期搞封闭系统,忽视计算机对学科发展的影响,如今在国际讲坛上几乎失去了发言权。目前,我国不仅建立了与西方学术界的稳定联系,也开始恢复与独联体各共和国及东欧的联系。应该说,西方学术空气活跃,而前苏联及东欧学术的系统性强,都有可取之处。此外,我们在重视与发达国家信息交流的同时,也应注意与发展中国家的交流,后者的经验往往更加现实可用。

现代信息可利用价值的半衰期越来越短。单纯依靠国际最新杂志获取科技动态的办法已无法紧紧追踪学科前沿;国际学术交流会议、各种最新的研究报告起的作用日益加大。在诸多的信息之中,应十分重视信息的可应用背景和本学科发展的需要。

二、结构工程学科的发展趋势

现代结构工程学科已开始全面地突破其传统格式,在横向、纵向及深度三个方向上发展趋势已十分明显(图3)。

1. 横向:由单个构件的分析到整体结构及其耦联系统的综合与控制

人们发现,在结构工程学科的研究工作中存在一种常见的错误并开始纠正它,即结构局部的分析精度大大超过结构整个系统的分析精度。这就如同耗费大量精力去校准秤杆上的刻度却忘记了秤陀不准。例如,仅仅依靠数学方法加上几个很强的假定计算构件截面的失效概率,但是却不顾整个结构的失效概率。高层建筑的计算方法已经研究得很多,但将其与基础介质的条件综合考虑时,却发现某些荷载作用下,整体倾复成了更尖

锐的问题。目前国际上无论是试验还是理论计算,凡是能从结构系统及其耦联系统综合考虑的研究都引起人们的普遍关注,认为是学科前沿的水平。

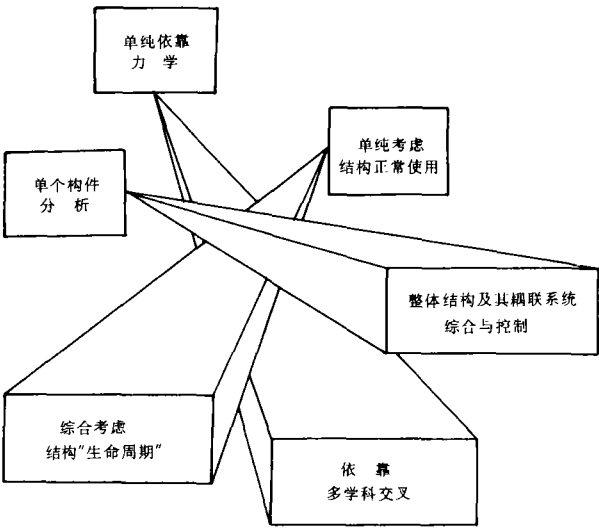


图3 结构工程学科的发展趋势

为了克服在结构设计、施工中大量数据交换的低效率和部门之间的分割,美国斯坦福大学土木工程系1988年开始的CIFE计划具有一定的代表性。他们计划投资2.5亿美元、以10年为期,建成一个将设计、施工、工艺联成整体的集成工程。其中包括三维的CAD系统和数据库,并将逻辑运算和人工智能相结合,进行施工控制、设计分析与工艺管理。他们希望用这套计划增加美国整个土木工程队伍的国际竞争力。

2. 纵向:由单纯考虑结构正常使用到综合考虑建造、使用和维护全过程

所谓“全过程”即是前面提到的结构“生命周期”。当前国际上沿这个周期的研究热点有二,一是工程抗灾减灾,一是结构耐久性。

结构在使用阶段,一旦出现人为或自然的灾害往往损失巨大,这个问题较早地引起人们的重视。联合国第44届大会通过的“国际减轻自然灾害十年决议案”反映了各国抗御灾害的共同意识。问题的难点在于一般不可能按灾害出现时的极端环境设计结构,因为严重灾害出现的概率毕竟不大。合理的途径应该是使结构能抗御一般小灾,同时大灾出现时的损失不要过大。为此在工程抗震的设计中,我国提出“小震不坏、大震不倒”的原则。总之,在这方面的研究无论国内或国外都是集中人力,大量投资的重点。

80年代后期,国际结构工程领域对耐久性方面的呼声陡然增高。问题首先发生在大量高速公

路和桥梁的老化影响交通网络的正常运行,这在高效的经济体系中尤其不能容忍。因此许多相关课题,如现有结构的可靠性评价和剩余寿命评估,各类损伤的累积模型及描述,耐久性的设置标准等,一时都成了热门课题。目前,我国设计人员对结构耐久性的意识不足,有关耐久性的许多成熟知识尚未编入国家规范。这是一个亟待改变的状况。不能再像过去,经过一次唐山地震才增加了结构设计人员的工程抗震意识,应该尽快赶上国际的步伐,尽早防止我国结构过早老化给国家造成的损失。

3. 深度:由单纯依靠力学到依靠多学科交叉

计算机的出现改变了人们在传统结构力学中的观念。人们常说:“手算怕繁,电算怕乱”。计算结构力学的出现说明人们已经开始适应从手算为主变为电算为主。然而,现在又面临从“串联运算”到“并行运算”的变化。并行计算机和并行语言的研制,促使这种变化很快地延伸到结构工程学科,它将引起结构计算又一次根本性的变化。此外,由于软件市场对软件编制的效率、可扩充性及可复用性要求越来越高,以目标导向的编程方法和语言开始在结构工程计算中迅速发展。以上事实都反映了结构工程学科与计算科学的关系。

如前所述,由于结构工程项目带有很强的个性和综合性,一般企图建立完整的数学模型是相当困难的。在许多情况下,已建工程的经验和专家的知识成为解决问题的主要依据。这正好给知识工程提供了广阔的用武之地。目前,工程技术人员在处理工程问题中的许多启发性知识、联想类比的经验都可以用规则、框架或网络的方式储存在计算机内,并可模拟人类的推理方法加以利用。由此建立的各类专家系统不仅可以用于工程的诊断,还可以用于工程的评价、决策和设计。现代土木工程中的CAD系统不仅包括有效的算法、数据库和图形显示,而且包括了知识库。新的集成的CAD系统不仅内部有灵活的交互界面,而且有便于用户全方位介入的人机界面,使知识库的CAD系统更加灵活实用。

三、关于结构工程学科的人员培养

在结构工程学科的内涵和外沿均发生了变化的今天,学科人员的培养是一个值得认真思考的问题。以下三点似应引起注意:

1. 注意培养包括结构试验(含实践与观察)、结构理论和结构计算的三极知识结构

在今后日益剧烈的学科竞争中,这三极是缺一不可的。结构试验是整个结构工程学科三极构成中的一级,是第一性的。如果说,许多计算理论

和软件可以从国外引进,那么对我国的工程材料和结构的试验必须自己完成。我们培养的专门人才即便对计算机和理论很熟悉,如果没有工程实际和试验、观察等第一性的知识,只能是“无本之木、无源之水”。结构工程界出色的理论成果往往有强烈的工程应用背景,而后被数学和力学所证实。由于计算机的发展,结构理论势必要面临改造。例如,许多基于手算的繁杂方法会被淘汰。但是,这决不意味着可以削弱结构理论的培养要求。以力学为例,除去以往的知识,还应该学会如何按照计算机的特点去实现一些手算无能为力的复杂运算。此外,也应该学会从繁杂而冗长的输入输出数据中迅速检查出问题所在。从这个意义上讲,力学的基本概念不但不可削弱而且更要加强。有一种观点认为,为了适应计算机的发展,结构力学中要多讲编制程序,实际上是应该学会调用程序。材料力学中加入电算内容时也切忌电算讲不透,反而削弱了基本训练。理论与计算的训练应该是各门课程有机的、系统的结合,不是简单的叠加。关于计算能力的培养,应注重计算方法与结构概念的结合。例如,结构刚度矩阵的病态往往可从结构本身找到原因;甚至结构刚度矩阵的建立、求逆的每一步在结构上都可以找到相应的物理意义。总之,全面、有机地考虑这种知识的三极结构是十分关键的。

2. 注意培养系统工程的学科思想

随着日益复杂、高效的现代化生产所提出的各种功能要求,土木工程的任务日益扩大。特别是与能源、交通、生产、生活息息相关的高坝大库、地铁工程、高层及大跨建筑、大型桥隧工程、核能工程和海洋及沿岸工程等,构成了现代土木工程的代表群;由此延伸出能源、交通等高效的网络系统和三维立体的城市布局,形成一个个大型工程系统。这就要求从事结构工程的工作者要有系统工程的观念。国际上一流的系统工程专家不少是出身于土木工程的,他们的许多成果已在其他学科开花。相形之下,结构工程学科领域内的系统工程教育急待加强。其实,河流流域的规划、交通线路的组织、施工进度安排、企业组织管理等问题都有共同性。目前在此类规划问题上,我们不仅在理论上落后,而且也缺乏开发大型的通用软件。

3. 注意知识更新,开拓知识面

过去由于许多从事结构工程的人员是按前苏联的教育体系培养的,知识面比较窄,他们现在遇到的压力会更大,因此知识更新显得更加迫切。对年青的一代,目前一方面要加强基础学科(如数学、物理、化学等)的训练,一方面又要及时更新教材和添置新课程。中国人识汉字是逐个输入的,这

(下转第54页)

型电机的需要。C/Cu复合材料电刷无论在材料选用,结构设计上都有创新,体现在性能有较大的突破。

碳/铜复合材料电刷可应用于各类电机,其意义不仅在本身的经济效益,而且还表现在电机使用此电刷后产生的二次效益。例如电刷电流密度提高,使同台电机电刷使用量可减少,换向器尺寸可缩小,以利简化电机结构,减轻重量,节约原材料,对大功率电机还可提高运行稳定性。又如换向火花的改善冲破了电机换向参数的限制,给电机容量的增大带来生机。同时,换向火花的改善增加了电运行可靠性,降低了事故率,提高了耐磨性能,延长了使用寿命,减轻了工人劳动强度。

3. 碳/铝复合材料及其制品

通过工艺参数和材料组分对碳/铝复合材料板材性能的影响的研究,最终研制的M40/LD₂板材的平均抗拉强度为65.75公斤/毫米²,平均弹性模量为 15.202×10^3 公斤/毫米²,室温强度和模量可保持到400℃。此外,完成了实践3号卫星复合材料镜筒研制。力学环境试验结果表明碳/铝复合材料镜筒完全达到卫星镜筒所要求的力学性能指标。复合材料镜筒端部和台阶上涂塑料膜后,进行阳极氧化发黑处理,完全符合卫星镜筒的发黑质量要求。

4. 非连续增强铝(DRA)复合材料

SiCp/Al复合材料是“七·五”期间承担的863的重大项目之一,经过几年努力已顺利达到预定指标,建成10公斤的专门装置,并挤压出2米以上的型材。Al₂O₃或硅酸铝增强铝活塞环槽已研制成功,通过技术鉴定,正在中试生产阶段。此外,还用通用卧式挤压机成功地挤压短纤维增强铝基复合材料槽型型材(尺寸为2×28×48.5毫米)和φ28×4毫米管材。与基体铝合金型材相比,其拉伸强度、弹性模量及弯曲模量都有提高,模量的提高有较大的潜力。短纤维复合材料的原料和工艺成本比连续纤维低得多,因此短纤维复合材料型材的研制成功可促进金属基复合材料推广至民用。

5. 碳纤维增强铝复合丝的制备及工艺改进

建立了国内唯一的一条具备日产1200~1500克碳纤维增强铝复合丝能力的试验线及相应的工艺。所制备的复合丝采用国产碳纤维,连续长度可以达到并超过50米,拉伸强度达到并部分超过合同规定的70~100公斤/毫米²的指标,具有80年代中期的国际水平。通过碳/铝复合材料基体的合金化研究,通过优选基体合金成分发现在铝基体中添加适量的钛、铈、锆可进一步提高复合材料界面及性能的稳定性。还发展了在碳纤维表面涂复SiO₂,并制备C(SiO₂)/Al复

合丝的方法,由于碳/铝复合材料主要用于航空、航天等领域,这条日产千克以上碳/铝复合丝生产线的建成,为在我国应用这类复合材料奠定了基础。此外,C/Mg复合材料的研究也完成了863课题的预定任务,且已制备出机器人“腿”的模拟组件。

金属基复合材料在国外已在宇航、航空和汽车工业等方面逐步获得应用。从研究中的新材料过度到实用工程材料是一个相当长的过程,其中有许多基础性的研究有待进行。根据我国当前的实际需要和已有的研究基础,一方面继续加强其在航空和兵器、工具等技术中的应用研究,另一方面应着重开发其在国民经济领域中通用机械和器件的广泛用途,同时还应致力于研究解决开发应用中的基础问题,以切实保证金属基复合材料使用性能的可靠性、稳定性和经济性。

金属基复合材料国家重点实验室的建成,为开展我国金属基复合材料的基础研究和应用基础研究提供必要的,先进的实验条件,能满足国内经济发展的需要及国内外进行高层科学研究工作的需要。

(责任编辑 肖庆山)

(上接第49页)

和西方人学拼音不一样。这可能使我们习惯于“灌输式”教学。然而,在学科交叉的新领域内,“灌输式”是行不通的。在新的学科和教材中,最需要的是激发开拓精神和占有最新信息,而不是过多指令性的教学法。

四、结 语

人们预测:从本世纪末到下世纪初的20~30年内,世界经济发展的热区是在环太平洋地区的西海岸,而中国和日本将是这个热区的中心。考虑到我国的人口数和四化建设的规模,应该说我们正在从事的是世界上最大规模的基本建设,我们正处在一个经济大飞跃的前夕。这种发展背景将为土木工程各学科,包括结构工程学科,提供优厚的发展环境。这一优势,甚至发达的西方国家目前亦不具备。我们应该认识结构工程学科面临的新特点、发展的新趋势,以及这种变化的必然性,尽快弥补自身的不足,根据国家建设需要及学科发展规律,努力奋斗,迎接严峻的挑战,争取做出更多的成果。

(责任编辑 特约编辑时学黄)