



上海市科技专著出版基金资助

工程结构透视

——结构的发展和原理纵横谈

余安东◎著



上海市科技专著出版基金资助

工程结构透视

——结构的发展和原理纵横谈

余安东◎著

同济大学出版社

内 容 提 要

本书通过纵横两条线索对工程结构,主要是建筑结构进行剖析和透视。第1—9章,选出结构与安全、外力、几何、能量、刚度、延性、可靠、建模及设计等要素的关系,横向贯通工程结构各门力学和结构的基本原理,希望读者能更深入地认识工程结构的本质。第10—12章,理顺工程结构的历史,纵向贯通工程结构的来龙去脉,希望读者能动态地认识工程结构的发展。

本书作者结合他在国内外五十余年的教学、科研和设计经历,畅谈亲身体会,写成这本独具特色的专业书:融会且贯通、温故而创新。

本书可用作工程结构有关专业高年级学生、研究生和年轻工程师的专业参考书和相关课程的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构透视 / 余安东著. --上海:同济大学出版社, 2014.10

ISBN 978-7-5608-5657-5

I. ①工… II. ①余… III. ①工程结构—透视 IV. ①TU3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第235254号

本书出版由上海市科技专著出版基金资助

工程结构透视——结构的发展和原理纵横谈

余安东 著

责任编辑 高晓辉

责任校对 张德胜

版式设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社

(www.tongjipress.com.cn 地址:上海四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 常熟市华顺印刷有限公司

开 本 787 mm × 960 mm 1/16

印 张 18

字 数 365 000

版 次 2014年10月第1版 2014年10月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5657-5

定 价 46.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

序一 有感而发的真知灼见

余安东教授是我的同事，也是我的校友，更是我的老友。他最近写了一本书，书名为《工程结构透视——结构的发展和原理纵横谈》，要我写序，并将书稿给我。我与安东教授相识已逾五十载，虽然我们的研究领域不同，但在业务和工作上也有不少联系，他在这本书中也有提及。通过长期交往，我非常了解安东教授，他视野宽广，思维敏捷，文理兼备，才华横溢，我相信他在这部著作中必有许多独到的见解。鉴于此，我欣然同意，我认真阅读了这部书稿，从头至尾，一字不漏，看到了安东教授有感而发的许多真知灼见，尤其是对一些极不合理的建筑，言简意赅地道出其不合理之处，并一针见血地给予评价，甚至斥之以“丑陋建筑”，“结构工程师的噩梦”，等等。真是一本值得一读的好书！

我在给每一届土木工程专业本科生讲授“土木工程概论”课程时，都会告诉他们，目前大学本科生的课程学习均按照该门课程所属学科的体系由浅入深、循序渐进的方法进行的。这是一种以分析为主，分学科的学习方法。但是土木工程本身却是综合性的，不同学科的问题错综复杂地交织在一起，解决问题时必须综合运用多学科的知识。现在培养的本科生和研究生的综合分析问题和解决问题的能力较为欠缺，是目前工科教学最大的不足，欲弥补这一点，又苦于缺少合适的教学参考书。读了余安东教授所写的《工程结构透视》后，觉得这是一本这方面的极佳的教学参考书，真

有“踏破铁鞋无觅处，得来全不费工夫”之感。

纵观全书十二章的内容，章章都有用极为精辟的语言将结构与其他学科间的内在关系加以阐述的内容。读者细心品味也就不难领悟，作者是怎样针对结构工程的各种性能和原理，运用多学科的理论通过综合分析后得出精辟而全面的理解的。读者也会因此受益，有利于培养和提高自己运用多学科的知识解决结构工程复杂问题的能力。

我也特别赞同安东教授在书中的许多提法，例如：

1. 对于结构工程师的提法

(1) 应保持清醒的头脑，回忆并运用最基本的力学和结构基本概念，让电脑和软件作为你的工具，而时刻警惕不要沦为规范和电脑的奴隶。(第七章)

(2) 最好像电影导演那样，把外力想象成一辆小汽车，从直接接触风力的外墙开始，让它一路开下去，直到大地母亲。如果哪一个路段断了，就要采取措施。(第三章)

(3) 如果不能像交响乐指挥那样把整个结构的“总谱”烂熟于心，就不能得心应手地把每一个构件像每一件“乐器”那样控制得当，而让每一种每一处的荷载像每一个“音符”那样处理得恰到好处。(第三章)

2. 对于结构的提法

(1) 一种高效的结构，应当能承担比自重多得多的荷载。一个连承

担自重都显得吃力的结构，不是好的结构。（第三章）

（2）“真善美”是不可分割的。虚假的涂抹是不真，奢华的繁琐是不善，表面的绚丽未必美。结构工程师特别希望看到的是，结构的力量内涵与功能、美观的统一。最不能容忍的是虚假造作的建筑。（第十章）

（3）若以“天”代表自然，结构是“以天为本”的，建筑则是“以人为本”的。“自然”和“人”的关系正好对应于“结构”和“建筑”的关系。所以结构与建筑如果能达到“天人合一”的境界，就会出现好的作品。但是，“天人合一”的建筑还并不完美。还缺什么？就是“地”。建筑结构一定要有地方特色。建筑、结构加上地方特征，三者兼顾，融合得好，才有好的建筑结构。“天地人”的和谐，是我们的追求。（第十二章）

安东教授对结构工程师所作的这些富有想象力的比拟和对结构工程具有中国哲理的诠释，给人以无限的遐想和启迪，也从另一个角度阐述了结构工程是一个多学科的综合体的理念。

余安东教授的新作《工程结构透视》一书的内容能够满足土木工程专业教学改革的需要，作为教学参考资料可以提高本科生和研究生综合思考和运用知识的能力；同时也能满足结构工程师继续教育的需要，作为技术参考资料可以提高结构工程师独立思考和工作的能力，引发创新的激情。

我衷心希望此书能早日出版，能为结构工程人才培养质量的进一步提高起到良好的推进作用。

沈祖炎 (沈祖炎)

2014年8月14日

沈祖炎，钢结构专家。1935年6月5日出生于浙江省杭州市。1955年毕业于同济大学，获学士学位，1966年同济大学结构理论专业研究生毕业。曾任同济大学副校长。现任国家土建结构预制装配化工程研究中心技术委员会主任委员，同济大学教授、博导，英国土木工程师学会和英国结构工程师学会资深会员。

从事钢结构领域科研、实践和教学工作60年，为中国钢结构学科发展和工程建设作出了重大贡献。发表论文400余篇，出版《钢结构学》、《钢结构基本原理》等著作23部，主、参编钢结构有关技术标准16本。主持50余项国家及省部级科研项目和30余项重大工程项目的结构理论分析和试验研究，为国家大剧院、上海环球金融中心、浦东国际机场航站楼、广州新体育馆、南京奥体中心等提供了关键技术支撑，获国家级和省部级科技进步奖33项，其中“高层建筑钢结构成套技术”获1993年国家科技进步二等奖；“多高层建筑钢结构抗震关键技术研制与应用”2010年获上海市科技进步一等奖。重视教学改革和人才培养，获省部级以上教学成果奖13项。2001年获“全国模范教师”称号，2006年获全国“第二届高等学校教学名师奖”。

2005年当选为中国工程院院士。

序二 真善美 天地人

在同济大学土木工程学科百年诞辰之际，余安东教授的力作《工程结构透视》一书的出版，是一份珍贵的大礼。我阅读了他的书稿后深感这是他近六十年来从事工程结构教学、科研和设计工作经验的深刻总结。余安东教授以其独特的视角和思维方式，从纵横两条线索引导读者去探索结构的奥秘，以达到两个融会贯通的目标。

本书从各类结构失效的典型事例出发提出问题，然后分章剖析工程结构的静力学、动力学、可靠性和耐久性的原理和分析方法，在融会贯通的基础上，再将设计理念回归到建立合理的概念设计方法和结构建模方法，我感到这是十分正确和睿智的编排，可谓观察独具匠心，分析入木三分，读来引人入胜，收获良多。

接着，余教授简要回顾了中外工程结构的历史发展，并以“列传体”的形式介绍了历代大师们一些具有里程碑意义的传世杰作。在最后一章“结构的感悟”中，他梳理了长期工作中的重要心得和师友情谊，并以西方哲学家的“真善美”和中国道家的“天地人”作为结构工程师的共同追求和信仰。这一结束语包含了余安东教授的深切感悟和对未来的期望，可谓意味深长。

余安东教授是我的好友，又一起共事多年，他在德国二十余年的工作经历和对结构原理的探索很值得国内同行学习和借鉴。特别是对于土木工程专业的女子和刚走上工作岗位的年轻一代结构工程师，本书是一本能启迪创新，帮助深刻理解力学和结构关系，进而建立正确设计理念的优秀著

作。我衷心祝贺本书的出版，相信一定会对培养中国21世纪结构工程师的创造力发挥重要的作用。

项海帆 (项海帆)

2014年6月

项海帆，1935年12月生于上海，原籍浙江省杭州市。1955年毕业于同济大学桥梁与隧道专业本科，1958年毕业于同济大学桥梁专业研究生，现任同济大学土木工程学院荣誉资深教授(Professor Emeritus)、顾问院长，土木工程防灾国家重点实验室名誉主任。

长期从事桥梁工程的教学与科研，是我国大跨度桥梁抗风研究的开拓者和我国风工程学科的主要学术带头人。现任国际桥梁与结构工程协会(IABSE)资深会员和名誉会员(因2001-2009年曾任IABSE副主席)，中国土木工程学会桥梁与结构工程分会名誉理事长，中国风工程学会首席顾问。

曾获得国家科技进步奖一等奖和二等奖、国家自然科学基金二等奖和四等奖，荣获了国际桥梁与结构工程协会“工程及教育奖”(Anton Tedesko Medal)和“功绩奖”(IABSE Merit)、美国土木工程师学会“风工程与空气动力学奖”(ASCE Robert H. Scanlan Medal)和国际风工程协会“终身成就奖”(IAWE Davenport Medal for Senior)。这四大国际奖项标志着他为中国的桥梁与结构工程界和风工程界在国际上赢得了一席之地。

1995年当选为中国工程院院士。

序三 书，是这样被读薄的

回想当年读书时，一堂接一堂的课将新知识劈头盖脑地灌下来，日复一日，头胀欲裂。幸而，各门知识间似乎产生了排斥效应，于是大多数化为轻烟，逃逸无踪，只剩少数积压于脑底。毕业后工作数十年，大脑却要给纳米、互联网、新技术腾挪空间，不得不将辛苦积攒的存货清除大半。大浪淘沙之下，当初学来的种种知识被时间洗刷得所剩无几，但这余下的少得可怜的核心知识却挥之不去，常伴左右，且如珠玑般继续闪光。人到此时方才蓦然醒悟：书，原来是可以越读越薄的。

胞兄安东的新书正是这样的一部学海淘珠的精华掬萃之作。行云流水般的讲述，如同抽丝剥茧，引领我们一步步窥视工程结构分析的奥秘与精髓。娓娓道来的一段段故事和多姿多彩的一幅幅图片，同公式充填的教科书和不着边际的空洞说教相比，更是鲜活灵动了不知多少倍。安东先生于同济大学耕耘教学科研二十余年，后在德国投身大型结构设计又是二十余年，在工程结构领域可谓理论实践武艺双全。读了这本书，感受到他厚积薄发、举重若轻的功力果然非同一般。

书不厚，但其间的理念和智慧的确值得细细品味。大家来读一读这本已被读薄的书吧！

 (余同希)

2014年6月

余同希，北京大学本科及研究生毕业，英国剑桥大学哲学博士、科学博士。曾任北京大学力学系教授、博士生导师，英国曼彻斯特理工大学机械工程系教授。1995年在香港科技大学先后担任机械工程系讲座教授、工学院副院长、机械工程系系主任、协理副校长、霍英东研究院院长等职。现为香港科技大学荣休教授、香港科技大学副校长(研究与研究生教育)的资深顾问，兼任浙江大学包玉刚讲座教授、宁波大学包玉刚讲座教授，北京大学杰出访问教授。研究工作主要集中于冲击动力学、塑性力学、结构与材料的能量吸收、复合材料与多胞材料等领域。

2001年获中国高校科学技术奖一等奖。

前 言

在同济大学土木工程学院讨论修订课程设置的过程中，笔者提出设置土木工程或工程结构通论的设想。也想把笔者毕生从事工程教学、科研和设计的一些心得写出来，作为通论的参考读物。其实土木工程概论已经存在多年了，那么通论和概论有什么区别？

土木工程概论是针对刚入学的学生介绍这一行业的概况。而工程结构通论的宗旨则是针对即将毕业的学生和初出茅庐的土木工程技术人员。他们已经基本学完各门力学和结构课程，但是还需要领会两个融会贯通：一是力学和结构各门课程间的融会贯通，二是从材料更新、施工技术和建筑潮流等对结构的影响，理解从古到今发展的融会贯通。其实，对一门貌似严肃枯燥的科学技术，只有细心品味，领会其精华所在，透过现象看本质，才能觉得有滋有味，兴趣盎然，运用自如。

本书拟从纵横两条线索来引导读者领会两个融会贯通。

横向是论述工程结构十几个贯穿力学和结构各门课程的基本原理，让读者从各门课程相互分割的学习方法，引导到充满联想的思维方法，使今后在毕业设计或走上工作岗位时所必需的综合思考和运用知识的能力得到加强。

纵向是论述工程结构的过去、现在及未来的发展脉络，并举出历代大师的事例，同时谈谈自己毕生从事工程结构工作的一些体会，希望引导读者去深入学习并思考如何面对书本上没有的实际问题，提高独立思考和独立工作的能力，引发创新的激情。

什么是结构？结构是各种元素的合理组合而成的体系（如社会结构、经济结构、人员结构……），组合不合理就会出现结构性问题。结构的反面是解构。

工程结构是指把各种工程的元素加以合理组合而成的体系。

例如，由构件组成的结构：由刚片（杆件、板或壳）组成的非机动体系。边界约束个数等于结构自由度就是静定结构，边界约束个数大于结构自由度就是超静定结构。工程师追求的是把各种元素加以合理构成，达到经济、适用、美观、耐久等要求，或者说，解决功能（好）、高效（快）和节约（省）间的矛盾。

本书希望以一些笔者认为是工程结构学科，主要是建筑结构学科精华所在的课题作为切入点，和读者一起去透视结构的奥秘。

工程结构最基本的任务是在设计使用条件的寿命期之内不失效，使之能抵御各种设定的外界作用乃至极端恶劣的自然灾害。工程师应该把安全第一作为座右铭。

本书涉及面较广，不可能替代各门课程，提到的原理也不作详细推导，这些内容，读者都可以在已学过的各种教科书中找到。本书的重点是试图用综合的方法，回顾土木工程各门学科相通的概念，梳理脉络，理顺思路，再结合工程中的实例和笔者工程实践中的体会，促使读者对纷繁科目的总体把握并增加在工程实践中应用理论的信心。而笔者由于自己学识和经验的局限，其实是以房屋结构为讨论的重点。

笔者自1955年进入同济大学工业与民用建筑专业学习土木工程，毕业后入土木工程这一行，算来已将近一个甲子。在同济大学有三十年的工龄，历经了教学、科研、设计以及出版工作；之后在德国的大学和建筑公司做研究、咨询和设计约二十余年，至今依然没有完全脱离专业工作。

但工程结构这个古老而又弥久常新的学科博大精深，笔者穷毕生之力，能学通和能得心应手运用的也只是沧海一粟。真切感到知识的边界之外就是无知，知识越多，感受到的无知也就更多。本书尝试以随笔式的写法，不想面面俱到，体例也不希望雷同。各章篇幅不求一致，有话则长，无话则短。只想结合自己读书和实践，选点滴切身的心得体会和读者共享结构之精华，探索结构之奥秘，透视结构之真谛，相信每一个热爱结构专业的人，也会和笔者一样，从中得到乐趣。

土木工程是一门古老的学科，工程结构发展也很成熟。本书的任务不是对某一课题的深入研究和创新，而是以笔者的眼光加以综合整理。本书中有些是笔者曾经以各种形式发表过的看法，力求观点鲜明，而也有许多则是学习的体会。在此，对引用过的各种参考资料的作者以及有关规范的编者表示深切的感谢。本书是一种尝试，必有不恰当和不成熟之处，希望各方面专家和年轻的同行们不吝指出。



于上海、达姆斯达特

2014年6月

目 录

序 一 有感而发的真知灼见 沈祖炎	1
序 二 真善美 天地人 项海帆	5
序 三 书,是这样被读薄的 余同希	7
前 言	1
第一章 结构与安全 失效和破坏形式	1
第二章 结构与外力 内外力的平衡和力引起的变形	15
第三章 结构与几何 形状的力量	25
第四章 结构与能量 能量原理和动力方程	37
第五章 结构与刚度 刚度和强度	53
第六章 结构与延性 延性和耗能	67
第七章 结构可靠性 确定性和非确定性	87
第八章 结构与模型 建模的原则和技巧	97
第九章 结构与设计 概念设计的重要性	119
第十章 结构的历史 结构发展的逻辑和回顾	141
第十一章 结构的丰碑 大师和大作	171
第十二章 结构的感悟 学习和创新	213
读后感一 一本透视工程结构的好书 张传增	247
读后感二 一本结构学通论的好书 韩宁旭	251
读后感三 深入浅出 获益匪浅 唐陞韡	254
读后感四 灯火阑珊处 赵宪忠	258
读后感五 一本与众不同的工程结构著作 吴建乔	261
后 记	265
参考文献	269



第一章 结构与安全 失效和破坏形式

“豆腐渣”——“楼倒倒”——“阳伞吹喇叭”

工程结构的首要任务就是要在预设寿命期中，确保有效，防止任何形式的失效。

“豆腐渣工程”是质量不达标的工程，一般是结构的强度不足可能导致结构局部或整体失效，通常是局部的。

“楼倒倒”是指结构的机动问题，结构形成机动往往就是整体问题，而且是突发的和灾难性的。

“阳伞吹喇叭”是结构失稳的一种，构件失稳是瞬间发生的，结构整体失稳就是灾难。

“豆腐渣”

首先从“豆腐渣工程”说起。

以“豆腐渣工程”用来形容不够坚固、容易毁坏的工程已经成为大众语言。结构（习惯上狭义的结构单指承重结构）是承担工程全部外力的骨架，“豆腐渣工程”实质上是指“豆腐渣结构”。工程中如果结构不出问题，只是非承重结构和装修出了问题，就像脱了一层皮，骨架子还在，不会立即引起整栋房屋的倒塌。这就难怪一栋建筑成功了，大家称赞的大都是建筑师，而一旦某个工程倒塌，要找的就是结构工程师了。结构工程师要终生对自己设计、施工的结构负责。

混凝土这种材料的生成过程和豆腐有一点相像。和浓浓的豆浆变成豆腐相似，水泥和砂、石加水搅拌成浆体后能在空气或水中硬化，将砂、石等散粒材料胶结成砂浆或混凝土。如果偷工减料，少加了水泥或者水或骨料太多，混凝土就无法形成强度足够的人工石材，而变成“豆腐渣”。

工程结构的毁坏或倒塌，就是结构失效。而“豆腐渣”只是导致结构失效的原因之一。结构要能承受外界的各种作用，还要有良好的工作性能和足够的耐久性能。而且，即使出现了较小概率的偶然事件，结构也要能保持其整体稳定性。

如果结构构件的强度不足，即所谓“豆腐渣”，结构就会承受不住外界各种作用（如重力、风或地震）而失效。这些失效（损毁）可能是局部的，也可能是整体的。在大多数情况下是局部的，结构的某一个构件或节点失效。局部的开裂甚至损毁，还可以加固补救。当然，局部的失效有时也会扩大到整体，千里之堤，溃于蚁穴，这就和结构体系的特征有关了。

在地震重灾区，钢筋混凝土框架结构的梁柱破坏极为普遍，结构柱的破坏在柱顶、柱身、柱底等部位都有发生，有些柱出现水平裂缝或斜裂缝、局部钢筋保护层脱落主筋外露；有些出现混凝土脱落、压碎、压酥、主筋压曲外露、箍筋崩落等破坏现象。现场调查发现，有些破坏是框架柱的箍筋设置存在严重缺陷，箍筋间距过大和箍筋过细，不少混凝土骨料基本都