

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2023.01.012

欢迎按以下格式引用:纪晓东,钱稼茹,赵作周.清华大学高层建筑结构精品课程及教材建设[J].高等建筑教育,2023,32(1):88-95.

# 清华大学高层建筑结构 精品课程及教材建设

纪晓东,钱稼茹,赵作周

(清华大学土木水利学院,北京 100084)

**摘要:** 回顾总结了40年来清华大学高层建筑结构课程教学实践和教材建设,重点介绍了近20年来以“厚基础、重实践、求创新”为特色的人才培养,以及“价值塑造、能力培养、知识传授”的“三位一体”教育理念在高层建筑结构课程和教材建设中的践行,包括:(1)教材组织架构创新,更符合结构设计的思维逻辑;(2)突出基本概念和设计理论,重点讲授“活”的、“可迁移”的知识;(3)通过课外程序计算和设计型作业延展课堂,有效形成课内、课外双轮驱动;(4)结合新结构体系的发明,采用问题导向式的研讨型授课,启发创新思维。

**关键词:** 高层建筑结构;课程建设;教材建设;人才培养;创新思维

中图分类号:G642.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2023)01-0088-08

## 一、课程和教材建设的沿革

现代高层建筑是商业化、城市化和工业化的产物,于19世纪末起源于美国。当今,高层建筑已遍及全球,成为现代城市的标志,为人类的经济、文化和生产活动提供空间。高层建筑结构是承担各类荷载、抵抗风和地震的骨架(图1)。我国是一个多地震国家,按《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)<sup>[1]</sup>,我国所有国土面积均需抗震设防。在地震作用下,建筑结构的倾覆力矩与其高度的平方成正比,顶部水平位移与其高度的4次方成正比。建筑越高,抗震设计难度越大。设计安全、经济、高效的抗震结构,是我国高层建筑设计的主要任务。

20世纪70年代中后期,北京建造前三门住宅工程,成为内地高层建筑快速发展的起点。随着改革开放的不断深入,社会发展和经济发展提出了建造更高更多高层建筑的需求。如何设计安全、实用、经济、美观的高层建筑结构,对于不熟悉高层建筑结构抗震设计的工程技术人员是一个很大

修回日期:2022-12-25

成果获奖:2021年北京市高等教育教学成果奖二等奖;2020年度清华大学优秀教材特等奖

作者简介:纪晓东(1979—),男,清华大学土木水利学院土木工程系长聘副教授,博士,主要从事高层建筑结构抗震教学与研究,(E-mail)

jixd@mail.tsinghua.edu.cn。

的挑战,培养相关专业技术人员迫在眉睫。为此,清华大学于1978年在国内率先开设了高层建筑结构课程,作为土木工程系(当时为建筑工程系)本科生建筑结构类的专业课,并组织编写了《多层和高层建筑设计》讲义。40余年来,该课程一直是清华大学土木工程系的主要专业课,为培养专业技术人才做出了贡献。

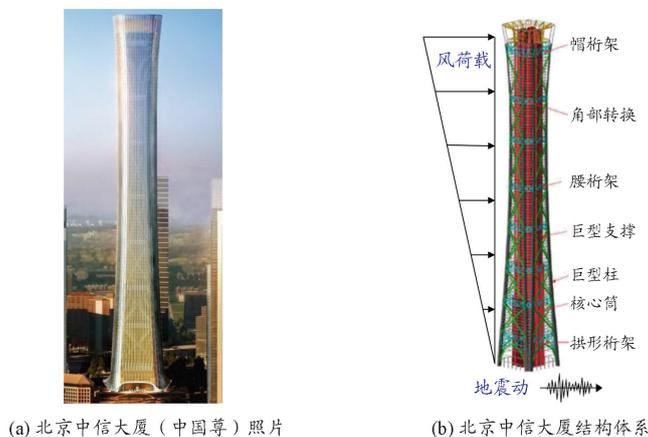


图1 高层建筑及其结构

纵观40余年来该课程的教学实践和教材建设,可大致分为两个阶段,这两个阶段与我国高层建筑的发展密切相关。第一阶段为1980—2000年,我国内地的高层建筑建设经历第一个发展期,高层建筑以钢筋混凝土结构为主,结构计算为手算和简单程序计算。这一阶段的课程教学内容主要介绍高层建筑钢筋混凝土结构体系、近似计算方法和抗震设计方法。为支撑课程教学,包世华教授和方鄂华教授于1985年编写了第一代《高层建筑设计》<sup>[2]</sup>。这是国内的最早一批高层建筑设计教材。该教材内容深入浅出,具有科学性、系统性和实践性。在结构计算方面,根据当时我国高层建筑设计状况,主要介绍适合手算的近似计算方法,辅之以介绍适合电算的矩阵位移法;在结构设计方面,重点介绍高层建筑钢筋混凝土结构的抗震概念设计和抗震设计方法。该教材通过介绍国内外最新科研成果(例如:底部大空间剪力墙结构和筒中筒结构的计算方法,剪力墙结构的抗震设计等),开阔学生的眼界。该教材也成了建筑设计人员的参考书,在建筑结构工程界有广泛的影响。1987—1989年间,建筑结构的主要设计规范和规程先后完成修订,高层建筑设计理论和施工的理论也有所发展。1990年修订出版了第二版《高层建筑设计》(图2a),在清华大学的高层建筑结构课程教学中一直使用到2002年。第一代《高层建筑设计》教材被国内众多高校土建类专业教学所采用,为我国建筑结构工程人才的培养发挥了积极作用。



图2 《高层建筑设计》教材

2000年至今为第二阶段,我国高层建筑建设进入全盛期,建筑高度突破600 m,发展之快在全世界史无前例,中国一跃成为世界上高层建筑最多的国家。图3所示为1949—2021年我国超高层建筑的数量统计。截至2021年,我国100 m以上的建筑达到9 719栋,150 m以上的建筑达到2 970栋,250 m以上的建筑达到247栋;其中大部分是2000年之后建造的。与丰富的工程实践相伴的是高层建筑结构设计和建造的理论研究及技术创新的极大发展。新型结构体系和高性能组合构件大量涌现,钢结构、钢-混凝土混合结构广泛用于高层建筑,消能减震技术在高层建筑中推广使用,复杂的弹塑性计算分析和性能化设计成为超限高层建筑结构设计日常。第一阶段的课程内容和教材已经不能适应新的要求,迫切需要调整和扩充教学内容,编写新的教材,支撑课程建设。清华大学高层建筑结构方向的主讲教授和骨干教师于2003年编写出版了第二代《高层建筑结构设计》教材<sup>[3]</sup>,并于2012年和2018年两次修订(图2b)。该教材已累计印刷37次,印数23.07万本,被国内上百所高校选用,受到广泛好评。该教材是高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材(“经典精品系列教材”),被列入普通高等教育土建类学科专业“十五”规划教材、普通高等教育土建类学科专业“十二五”规划教材、“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材,获清华大学优秀教材特等奖、北京市高等教育教学成果二等奖。

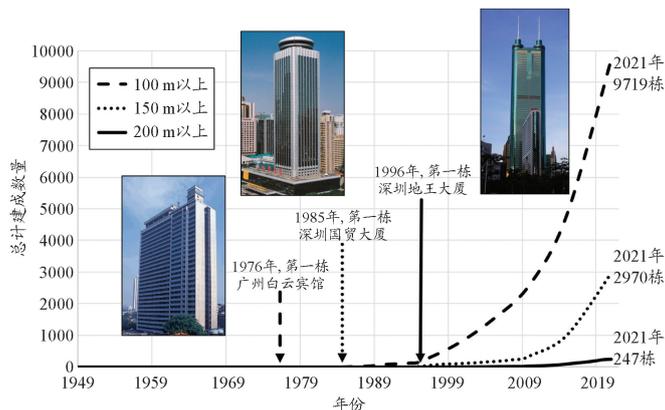


图3 我国高层建筑发展<sup>①</sup>

## 二、新时期教学改革和教材建设的挑战

2003年第二代《高层建筑结构设计》教材出版以来的20年间,清华大学教育教学理念不断发展,课程和教材是体现大学教育教学理念的主要载体,高层建筑结构的课程改革和教材修编也呈现、反映和回应教育教学理念的发展。

2010年清华大学总结建校百年来人才培养的经验,明确“厚基础、重实践、求创新”是清华人才培养的特色,其中“求创新”是新时代的突出要求和清华新百年必须承担的历史责任。土木工程结构设计本身就兼具理论性和实践性,高层建筑结构又是土木工程的一门重要专业课,其课程教学理应具有“厚基础”和“重实践”的特色。如何“求创新”,这是本课程教学改革的难点和重点。

2014年,清华大学召开了第24次教育工作讨论会,确立了价值塑造、能力培养、知识传授“三位一体”的教育理念。相应地,课堂教学由“以教师为中心”向“以学生为中心”转变,强调培养学生自

<sup>①</sup> 该图数据由中国建筑科学研究院有限公司陈才华研究员提供。

主学习和独立思考能力;授课方式由“讲授型教学”向“研究型教学”转变,培养学生的批判性思维和创新思维。高层建筑结构课程教学如何实现转变,如何培养学生的创新思维 and 创新能力,这也是本课程教学改革的难点和重点。

近 20 年来,高层建筑结构课程不断探索教学改革创新,两次修订了《高层建筑设计》教材,目前正在进行第三次修订,授课教师和教材编者反复思考并力争回答上述教学改革中的挑战性问题,目的是建设一门高质量、有内涵的精品课程,打造一本经得起检验、与时俱进的精品教材。

### 三、课程和教材建设的特色创新

近 20 年来高层建筑结构课程和教材建设中,主要开展了以下四个方面有特色的创新工作。

#### (一) 教材组织架构创新,体现先进性

内容创新是一本教材创新的灵魂,第二代《高层建筑设计》教材从内容体系上进行变革,构建了全新的内容构架。(1)第一代教材只介绍高层建筑钢筋混凝土结构设计,本教材增加了民用建筑钢结构设计、高层建筑混合结构设计、消能减震结构设计三个章节,极大地丰富和扩展了教材内容,反映了这三种结构类型在我国高层建筑中的应用与发展。(2)第一代教材分 5 章用大量篇幅介绍不同结构体系的近似计算方法,本教材加大了结构程序计算的比重,减弱了近似计算方法的公式推导,保留了近似计算方法的基本内容,将重点放在通过近似计算阐明结构概念和结构受力变形规律,形成“近似计算方法”和“结构程序计算”两个并重章节。(3)本教材体现高层建筑设计的要求,将各类结构(钢筋混凝土结构、钢结构、钢-混凝土混合结构)的设计基本要求集中到设计要求这一章介绍,便于学生理解和使用。

通过上述改革,形成了结构体系—结构荷载—设计要求—结构计算(近似计算和程序计算)—结构设计(钢筋混凝土结构、钢结构、钢-混凝土混合结构、消能减震结构)这一全新的教材架构体系<sup>[4]</sup>,如图 4 所示。围绕这一架构设置 11 章,各章彼此联系,前后呼应,有机结合,更符合结构设计的思维逻辑,便于学生学习掌握。

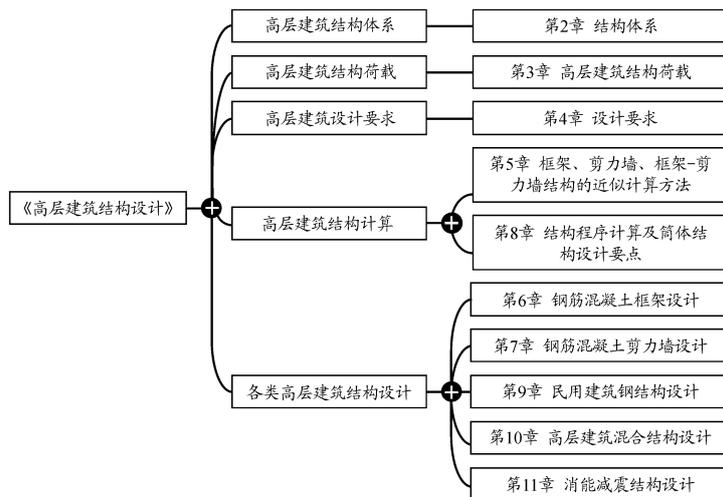


图 4 教材内容架构

#### (二) 突出基本概念和设计理论,强调“活”的知识

设计理论包括设计的概念和原理,其中概念是理论的基石,原理反映理论的思想本质。在如今

信息查取方便、结构设计高度程序化的时代,规范计算公式中某些参数的具体取值,已经无需作为讲授重点;设计原理和基本概念才是结构设计知识的本质和精华,是“活”的、“可迁移”的核心知识,而“唯有‘活’的知识才有助于学习者以新颖的方式理解和解决问题,‘死’的知识反而会束缚学习者的思维”<sup>[5]</sup>。高层建筑结构课程教学和教材编制突出强调了抗震基本概念和抗震设计理论,通过震害分析、结合科研成果,深入阐述高层建筑结构抗震基本概念和抗震设计原则。比如:能力设计法、延性结构等基本理论,正是高层建筑结构抗震设计中需要深度理解的“活”的知识,需要花时间、下力气讲清楚其内容和背后的思想,使学生知其然、知其所以然。

在讲授各类高层建筑结构体系和结构构件的抗震设计时,采用基本设计理论统摄繁复的设计规定,并在具体的设计规定中让学生反复体会和深入理解设计理论的精妙之处。比如:Robert Park教授和Thomas Paulay教授提出能力设计法,其思想本质是用工程智慧解决地震动不确定性造成的结构响应和破坏模式的不确定性问题,“告诉结构在地震中怎么做”<sup>[6]</sup>。如图5所示,其基本原理:(1)设定有利于结构抗地震倒塌的屈服机制,预设允许屈服的构件及其屈服的部位;(2)调整承载力大小关系,使屈服发生在预设构件的预设部位,同时避免不利于构件抗震的破坏模式;(3)对预设构件的预设部位进行构造设计,使其具有所需的变形能力,避免达到峰值承载力后突然丧失承载能力。在钢筋混凝土框架抗震设计的讲授中,梁铰屈服机制属于(1);强柱弱梁、强节点、强剪弱弯的承载力调整属于(2);框架梁端、柱端箍筋加密属于(3)。在剪力墙设计、钢支撑框架设计等不同章节讲授中,一以贯之地通过能力设计法这个总纲来挈领设计规定,力争学生能够举一反三,从繁复的设计规定中找到知识的内在联系。

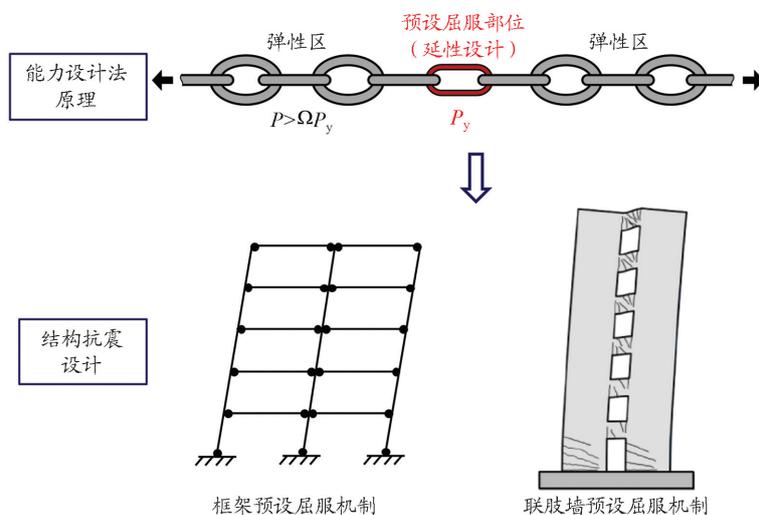


图5 能力设计法原理及应用

### (三) 与设计规范和程序计算结合,彰显实践性

结构类课程的教学不能纸上谈兵,高层建筑结构课程应该是连接基本理论和实际工程的“桥梁”。为了让课程更加贴近工程实际,更有利于学生在后续的本科毕设或工作后尽快进入角色,课程教学和教材内容都重视实践性。《高层建筑结构设计》教材将理论与设计规范、程序计算有机结合,比较系统地介绍了我国现行规范关于高层建筑结构设计的荷载、计算方法、设计要求和抗震措施,以及常用结构设计软件的程序计算原理。一方面将课程知识外延拓展到规范规定和程序计算,另一方面,学习规范规定和程序计算可加深对基本理论的理解。

为培养学生分析、解决实际问题的能力,课程教学中引入“做”,通过完成程序计算作业和设计大作业,让学生在动手中掌握、深化课堂知识,形成课内学习和课外学习双轮驱动。目前,结构设计分析软件(如 SAP2000、PKPM、盈建科等)为本科生完成设计计算类作业提供了便利。针对高层建筑结构中的一些重要概念,比如框架结构和剪力墙结构侧移模式、框筒结构剪力滞后、模拟施工计算、联肢墙的耦合效应等可以设计为计算作业,学生通过定量计算加深对结构概念的理解,达到强化、硬化概念的效果,在“做”中提升用程序解决工程问题的能力。设计大作业融汇课程的主要知识点,通过大作业定期课外辅导,形成与课堂学习并行的另一条学习主线。图 6 所示为某次设计大作业,要求学生完成北京一栋 50 层高层建筑框架-核心筒结构方案设计。学生需综合应用课程所学,把多个章节知识点串起来才能完成该作业。大作业设置了展示讲评环节,邀请有设计经验的工程师点评,加深了学生对结构抗震设计概念和设计要求的理解,也锻炼了学生总结陈述的能力。大作业的效果,与题目能否引起学生的兴趣、能否对学生能力形成挑战有关,也与辅导、讲评、讨论的质量相关,需要教师和助教相当大的投入,可以说是一种“昂贵”的教学形式。清华大学土木工程系高层建筑结构课程是小班教学,设计大作业的成效显著,较好地锻炼了学生自主学习的能力和解决工程问题的能力。

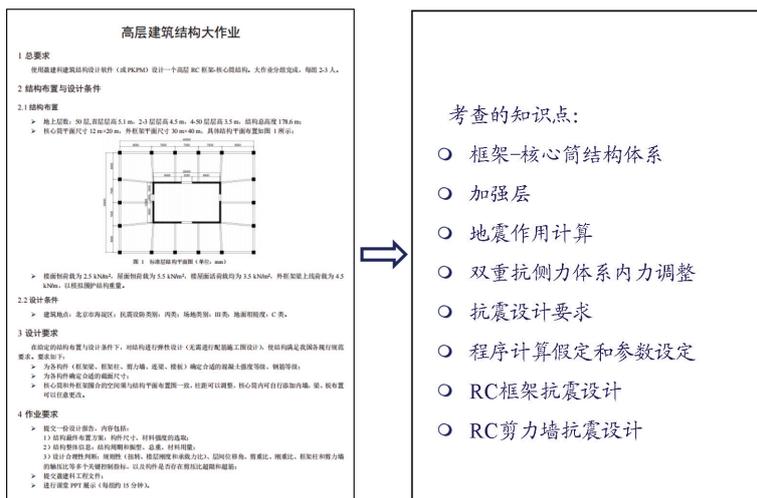


图 6 课程大作业及考查的知识点

#### (四) 结合新结构体系的发明,采用问题导向式的研讨型授课,启发创新思维

高层建筑结构是土木工程系本科第 4 学年课程,作为结构工程方向的“收口”课程,从知识上需从“基本构件”上升到“结构体系”;从能力和创新思维培养上,需要掌握如何用基本构件形成高效抗震结构体系。为此,《高层建筑结构设计》教材从以下方面加强对结构体系的介绍分析。(1)系统阐述高层建筑各类结构体系的特点、适用高度,在风、地震作用下的受力性能,及其抗风、抗震基本要求。(2)收集整理了大量国内外典型高层建筑结构工程实例,通过对工程实例的分析,加深学生对结构体系的理解。

随着建筑高度不断增加,学者和工程师们不断发明新的结构构件和新的结构体系。在课程讲授中,不只是讲授新构件、新结构的特点,还采用问题导向式进行研讨,追根溯源,引导学生讨论如何“用思想解决问题”,从而启发学生创新思维和深度思考。比如:介绍 1960 年代美国高层建筑“高度加价”效应时,引导学生讨论为什么框架结构限制了建筑的高度,再讲授 Frazlur R. Khan 博士发

明的框筒结构、束筒结构等,引导学生讨论为什么这些结构可以更高,且实现了安全与经济的统一;又如,由钢框架抗侧刚度不足和墙板延性不足为问题导向,讲授武藤清教授发明钢框架-带竖缝混凝土墙板体系的思想 and 实践;再如,由中心支撑的受压屈曲为问题导向,讲授美国 Egor P. Popov 教授<sup>[7]</sup>和日本 Akira Wada 教授等<sup>[8,9]</sup>,分别研发偏心支撑框架和防屈曲支撑框架的创造性工作(图7)。问题导向式的研讨型授课能激发学生兴趣,将学生快速带入深度思考状态。在课堂中启发创新思维,关键是让学生面临挑战性问题,并呈现给他们真正创新性的工作,让他们“有榜样”可鉴。此外,授课教师选择性地将自己在高层建筑结构领域的最新研究引入课堂,将当前高层建筑工程实践中的挑战性问题引入课堂,现实感和代入感更强,也能激发学生的科研兴趣和创新热情。

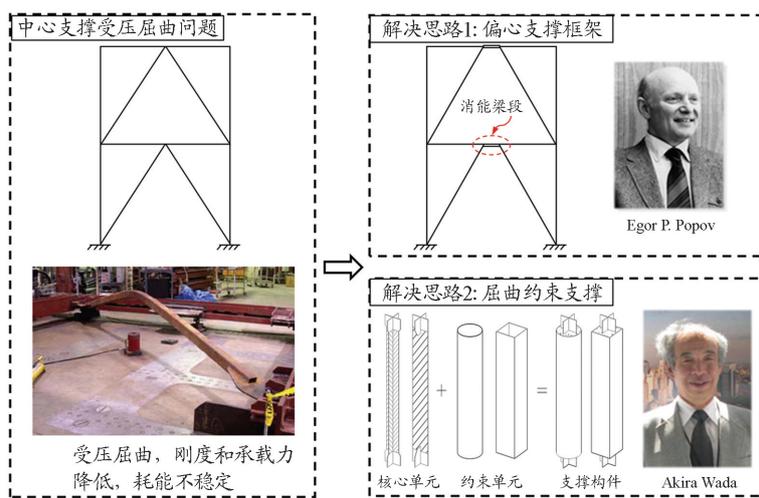


图7 支撑受压屈曲问题及解决方法

## 四、结语

“厚基础、重实践、求创新”是清华大学人才培养的特色。这一特色体现在高层建筑结构课程教学和教材建设就是“学”“做”“思”三个维度:学“活”的、“可迁移”的知识,做工程设计型大作业,在问题导向式的研讨中多思考。“学”以收获知识,“做”以巩固知识提高能力,“思”以开启创新思维,“学”“做”“思”互为促进、相互融通。

高层建筑结构课程作为一门土木工程领域的专业课,其内涵和外延必须随高层建筑的发展而发展。当前,轻质、高强、耐久、高性能结构材料不断涌现,基于延性的抗震设计向基于韧性的抗震设计跨越,结构设计向智能化、信息化发展。有必要将新理论、新知识和新技术引入到课程教学和教材中,作为“源头活水”,为培养创新型人才不断提供真材实料。

### 参考文献:

- [1] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [2] 包世华,方鄂华. 高层建筑结构设计[M]. 北京:清华大学出版社,1985.
- [3] 方鄂华,钱稼茹,赵作周,等. 高层建筑结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [4] 钱稼茹,赵作周,纪晓东,等. 高层建筑结构设计[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [5] 郑泉水. 一万小时天才理论——谈谈精深学习[J]. 水木清华,2015(53):58-65.
- [6] Paulay T, Priestly MJN. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings [M]. John Wiley & Sons, 1992.

- [7] Roeder C W, Popov E P. Eccentrically braced steel frames for earthquakes [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1978, 104(3):391-412.
- [8] Fujimoto M, Wada A, Saeki E, Watababe A, Hitomi Y. A study on the unbonded brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube [J]. Journal of Structural Engineering, 1988(34B):249-258. (in Japanese)
- [9] Watanabe A, Hitomi Y, Saeki E, Wada A, Fujimoto M. Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube [C]. Proceeding of 9th World Conference on Earthquake Engineering. 1988, IV:719-724.

## Development of excellent course and textbook of high-rise building structure in Tsinghua University

JI Xiaodong, QIAN Jiaru, ZHAO Zuozhou

(School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

**Abstract:** This paper reviews the teaching practice and textbook writing of the high-rise building structure course in Tsinghua University in the past 40 years. It mainly presents the effort in the course development and textbook writing in the past 20 years to reflect the talent cultivation featured with “deep foundation, practice training and innovation capability” and “three-pronged approach” of education that integrates the shaping of values, the cultivating of skills and the imparting of knowledge. The following aspects are included: (1) to reorganize the structure of the textbook to make it more consistent with the logic of structural design; (2) to highlight the basic concepts and design theories, and focus on teaching “living” and “transferable” knowledge; (3) to extend the class through the program-based calculation and design-type homework, thus effectively forming “dual wheel drive” in class and out of class; (4) to adopt the problem-oriented teaching in the introduction of the structural system innovation, for inspiring students’ innovative thinking.

**Key words:** high-rise building structure; course development; textbook compilation; talent cultivation; innovative thinking

(责任编辑 梁远华)