

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2022.01.012

欢迎按以下格式引用:淳庆,贾肖虎. 建筑结构技术发展史概述及其教学框架探索[J]. 高等建筑教育,2022,31(1):93-104.

建筑结构技术发展史概述 及其教学框架探索

淳庆,贾肖虎

(东南大学建筑学院,江苏南京 210096)

摘要:建筑结构作为建筑学、土木工程学等专业教学体系的一部分,一直以来侧重以工科思维向学生传授结构概念及原理,而建筑结构技术发展史则是结合历史学展示其动态发展的过程,不仅涵盖了不同类型结构基本原理的讲解,还涉及材料选用、发明创造、历史人物、体系构建、地域文化等多重视角的深入解读。以东南大学建筑学院建筑技术与科学研究所近年来为硕士研究生开设的建筑技术发展史课程为契机,在建筑结构技术发展史课程相关教学探索成果的基础上,结合相关文献资料与学科知识,梳理建筑结构技术发展的脉络,以期为高校建筑学专业结构课程教学提供一种全新的视角,为建筑技术发展史系列教学体系建设注入新时代的活力。

关键词:建筑结构技术;发展史概述;教学框架

中图分类号:TU-098.6

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2022)01-0093-12

在维特鲁威(Marcus Vitruvius Pollio)的《建筑十书》中(图1),主张一切建筑物都应考虑“适用、坚固、美观”。其中,“坚固”一词是对结构在建筑物中的关键性作用作出的回应。建筑结构作为建筑学、土木工程学等专业教学体系的一部分,侧重以工科思维向学生传授结构概念及原理,而鲜有成体系的建筑结构技术发展史教学体系,为此探索建筑结构技术发展史概述及其教学框架的背景与缘起具有重要的意义。

国内外相关学者对此进行了相关研究,罗西子^[1]从历史出发,以西方现代建筑技术历史为研究对象,归纳总结其发展的阶段性特征。钟星鸣^[2]阐述了建筑结构历史的发展过程,从古代木结构到现代钢结构进行了简要的整理与分析。金永权^[3]对建筑结构设计的发展历程进行了研究。金新阳等^[4]对国家标准《建筑结构荷载规范》编制修订的发展历程进行了回顾。在建筑结构史的教学方面,高冲平^[5]较早就建筑结构发展历史对人才培养的作用进行了初步探讨。王骏阳^[6]在2015年世

修回日期:2021-05-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51778122;52078111)

作者简介:淳庆(1979—),男,东南大学建筑学院教授,博士生导师,主要从事建筑遗产保护技术研究,(E-mail)cpnj1979@163.com;(通信作者)贾肖虎(1995—),男,东南大学建筑学院硕士生,主要从事建筑遗产保护技术研究,(E-mail)archjxh@163.com。

界建筑史教学与研究国际研讨会上,从结构和环境调控两个方面论述了建筑技术史在建筑学教育与研究中的重要性。叶静贤^[7]试图提供建造史学科领域最新研究方向、方法,及其研究动因和未来发展。

综上所述,有关建筑结构技术发展史的教学与研究尚属空白,亟待展开较为全面而系统的梳理。东南大学建筑学科创始人杨廷宝、刘敦桢、童寯等在教学过程中非常重视建筑工程中的技术问题,积极探索建筑技术和设计的关联性。自20世纪30年代刘敦桢、张镛森等老一辈学者研究中国古建筑和近现代建筑中的建筑技术以来,建筑技术学科取得了很大发展。2018年,东南大学建筑学院面向硕士研究生首次开设建筑技术发展史课程,由建筑技术与科学研究所教师分别授课,主要包含建造技术、结构技术、暖通技术、声学技术发展史等。以此教学成果为基础,对建筑结构技术发展史进行概述。从东南大学建筑学院对建筑学硕士研究生的培养目标、培养框架及课程体系设置来看(图2,括号内“必”代表“必修”;“选”代表“选修”),建筑技术发展史作为建筑技术与科学方向的必修课程之一,面向建筑设计及其理论、建筑历史与理论方向的学生开设,有助于实现知识层面的多学科交叉。同时,通过课前阅读、课内讲授、课后研讨等教学方式的融合,有助于学生从宏观视角认知建筑学科,从而自主开展科学研究。

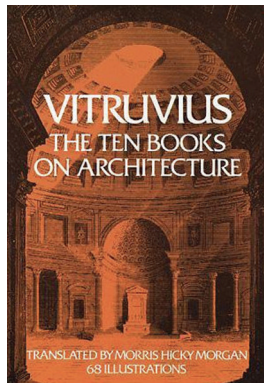


图1 《建筑十书》封面

A. 公共学位课	B. 公共基础课	C. 专业必修课	D. 非学位限选课
中国特色社会主义理论与实践研究(必)	现代建筑理论(必)	建筑设计及其理论	各方向
		建筑设计理论(必)	自然辩证法概论(必)
学位英语(必)	文献阅读与论文写作(必)	现代城市设计方法(选)	前沿课程系列(必)
		数字技术与建筑学(选)	建筑设计及其理论
		建筑历史与理论	建筑设计专题研究(必)
		宋清营造法式(选)	建筑历史与理论
	建筑设计(选)	西方古典建筑专题(选)	建筑评论(选)
		建筑技术科学	建筑遗产保护学(选)
		建筑技术发展史(必)	建筑历史研究方法(选)
		设计与建造过程(选)	专题研究(选)
		城市物理环境与可持续发展(选)	专题设计(选)
		建筑节能技术(选)	古建筑鉴定与考察(必)
	建筑结构技术与建筑造型(选)	建筑技术科学	
	建筑材料、构造和结构的生成与表现(选)	建筑技术与环境设计专题研究(必)	

图2 东南大学建筑学专业硕士研究生课程体系设置

由于建筑结构技术涵盖材料技术、设计技术、施工技术,概述难以面面俱到,故从时间线索与材料线索出发,摘取古代至近现代建筑结构发展过程中具有代表性的结构类型,通过对比结构用材、结构设计及东西方差异,清晰展现建筑结构技术发展的历史脉络,再通过对教学材料的初步梳理,结合教学过程中的实际情况,形成建筑结构技术发展史的教学框架,从而为相关教学纲要与体系的建立提供范式。

一、古代建筑结构技术的发展史概述:东西方材料选用与结构体系的对比

古代建筑结构技术的发展可从东西方建筑结构谈起,对比东西方建筑材料选用及其主要结构体系类型的异同之处。研究对象从较为典型的建筑实例中选取,时间暂以 1840 年为分界线,1840 年之前的时间段视为古代。

(一) 东方建筑结构的材料选用与结构体系发展

东方建筑结构在材料选用上,多以木材为主,少量采用砖石。以中国古代建筑为例:最初建筑用于解决人们居住问题,居住形式分为穴居与巢居,前者逐步发展为半穴居地面建筑,后者逐步发展为干阑式地面建筑,最终发展为以木构架为主体结构的建筑。北方官式建筑多用抬梁式结构,即在柱上放梁、梁上放短柱、短柱上再放短梁,逐层累叠,如北京故宫、山西五台山佛光寺大殿(图 3)等;南方传统木构建筑多用穿斗式结构(图 4),即以柱直接承檩条,柱架间穿枋相连,如皖南民居、苏州民居等。

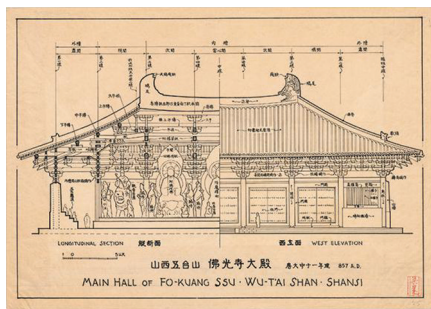


图 3 北方殿堂佛光寺大殿抬梁式构架

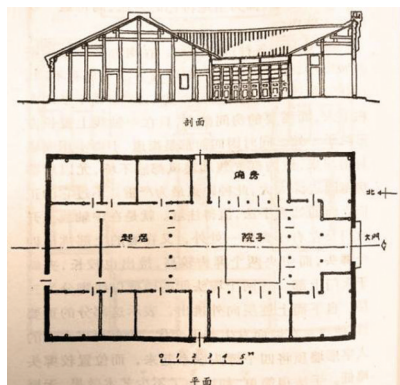


图 4 南方传统住宅穿斗式构架

传统木构建筑结构体系主要分为屋面、柱架、台基三部分,随着建筑等级的提高,还会在柱架之上设置铺作层(斗拱层)。荷载通过梁架屋面传递至铺作层、柱架层,而后通过木柱传递至台基、基础,传力路径较为明确。建筑结构从单层的殿堂、厅堂、余屋等,逐步向多层的楼阁、木塔等转变。目前中国最早的木构建筑为山西五台山南禅寺大殿(公元 782 年,图 5);楼阁代表为蓟县独乐寺观音阁(公元 984 年,图 6),上下层柱采用叉柱造交接,是中国现存最早的楼阁式木构建筑;木塔代表为山西应县佛宫寺释迦塔(公元 1056 年,图 7),是中国现存最高最古老的木构塔式建筑。

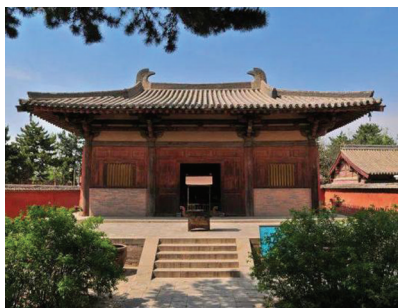


图 5 五台山南禅寺大殿外观



图 6 蓟县独乐寺观音阁渲染图

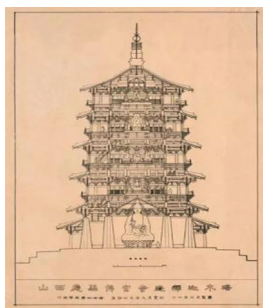


图 7 应县木塔剖面

另一类为砖石砌体结构,多应用于古墓穴、古寺庙、古桥、城墙等建筑中。利用砖石砌体抗压性能较好的特征,采用砖石拱券或穹顶的方式形成空间的跨越和稳定的受力,出檐则采用叠涩的砌法

层层叠砌向外挑出。典型实例如:中国现存最古老的砖砌佛塔河南登封嵩岳寺塔(公元520年),由糯米汁拌黄土泥做浆、青砖垒砌而成;苏州开元寺无梁殿(公元1618年),使用磨砖嵌缝纵横拱券结构,不施木构梁柱檁椽;南京溧水蒲塘桥(公元1508年),采用含砾凝灰质砂岩用纵联分节并列砌置的方法砌筑而成。

(二) 西方建筑结构的材料选用与结构体系发展

西方建筑结构在材料选用上多以砖石为主。以西方传统砖石建筑结构发展脉络为线索,可归纳如下:古希腊建筑采用石材,在柱网之上搁置梁以形成框架体系,由于柱高较大,柱断面相应增大且分段制作后通过直榫相连,上部石梁由于无法跨越较大距离而形成密柱形式,如帕特农神庙使用大理石密柱网与石梁(公元前447年开始兴建,图8),许多类似三陇板等木质构件也使用石材进行雕刻;之后在希腊亚平宁半岛附近,由伊特鲁里亚人创造了采用规整石块错叠而成的叠涩拱技术,形成了最初的拱结构原型。

至古罗马时期,一方面,对叠涩拱结构进行了改进,开始使用楔形石块砌筑形成拱券结构,实现了石材在长度方向上的跨越。如法国加尔桥是石灰岩砌筑的石拱桥,为古罗马时期的高空引水渡槽(公元前1世纪,图9)。另一方面,由于当地石材资源较少,多火山灰,通过火山灰、石灰、砂土调制而成了最早意义上的“混凝土”,该材料具有水硬性的特点,使得砌筑的结构更加耐久牢固,在古罗马被广泛使用。如罗马斗兽场(公元72—80年),看台部分采用“混凝土”砌筑筒形拱;罗马万神庙(公元120—124年,图10),最著名的穹顶部分亦由“混凝土”砌筑而成,底部厚6 m,顶部厚1 m,为减轻自重而在内表面形成网格状方形凹格,门廊柱采用花岗石与大理石制作。

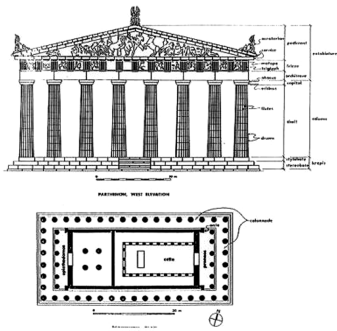


图8 帕特农神庙平/剖面



图9 法国加尔桥

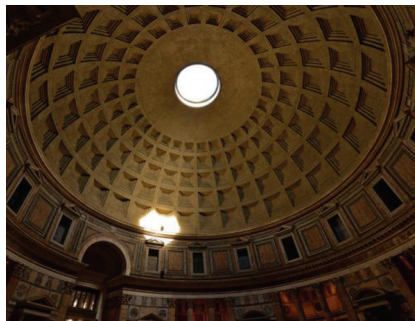


图10 罗马万神庙

随着时间的推移,又产生了不同风格的建筑形式且结构各具特色。一是拜占庭式建筑,诞生于公元395年前后,东罗马帝国形成的建筑类型,结构采用帆拱(图11),解决了方形平面向圆形穹顶过渡的问题,如圣索菲亚大教堂(公元532—537年)、圣马可大教堂(公元829年始建)等。二是哥特式建筑,兴盛于中世纪高峰与末期,结构特点包含尖肋拱顶与飞扶壁,尖肋拱顶(图12)将拱的推力作用于拱底石,使得拱顶的高度与跨度不受限制;飞扶壁(图13)起到分担拱侧主墙压力的作用,如法国巴黎圣母院(公元1163年始建)、德国科隆大教堂(公元1248年始建)等。

(三) 东西方建筑材料选用与结构体系对比分析

东西方建筑结构在材料选用上存在较大差异,产生这一差别的原因可从其文明发源地进行分析。东方国家以中国为例,古文明发源于黄河流域,这一区域主要为黄土,覆盖有茂密的森林,故在建造构筑物时多采用木材。西方文明发源于希腊,地处地中海沿岸,地表多裸露的石头,故建造构筑物时多采用石材。材料的易取性决定了主要用材类型。

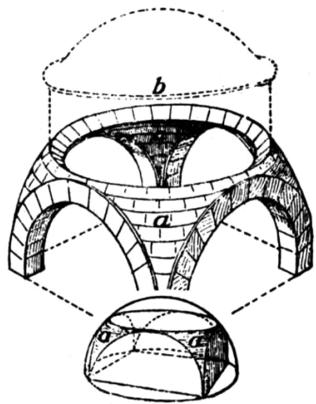


图 11 帆拱结构

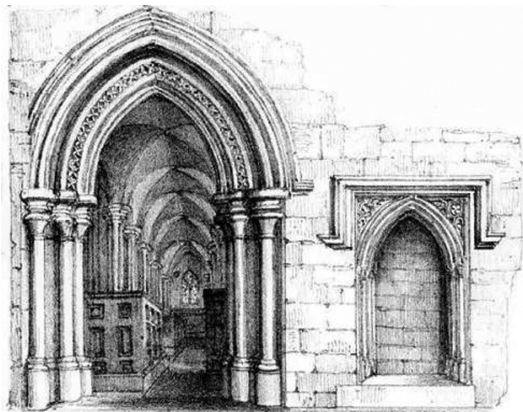


图 12 尖肋拱顶

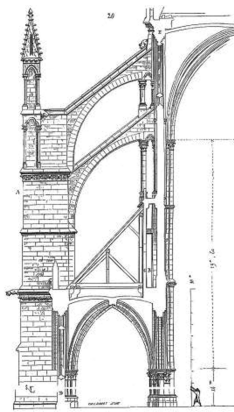


图 13 飞扶壁

从东西方国家的建造观念看:东方建筑营造从选址堪輿开始便呈现出对大自然的敬畏之情^[8],这种观念也影响到建筑选材,取材于自然,交融于自然,归隐于自然,于是便形成了以木材为主要建筑材料的状态;西方国家,从现存的若干古代建筑遗迹可见,大多属宗教类型建筑,以物质的永恒性为出发点,从而最终选取石材作为主要的建筑材料。从建筑材料自身特性看:木材具有比重轻、强重比高、弹性好、易于加工等优点,又因其材料不均匀、不耐潮湿、易腐朽、易变形等缺点而出现若干问题,为此也带来了建筑结构的演变,如南方潮湿多雨地区采用底部吊脚、屋檐深远、陡坡屋面等方式来减少雨水的蓄流,使木结构免受水分侵蚀。石材具有强度高、耐久性强、导热储热能力强、易于雕刻等优点,但由于平砌而成的砌体结构抗拉性能和抗剪性能差,无法实现较大跨度,从而推动了拱砌体结构和穹砌体结构的起源与发展。

材料的选用间接影响到建筑结构体系的选取:以中国传统木构建筑为例,为实现大跨度空间,北方多采用抬梁式木构架体系,南方多采用穿斗式木构架体系,充分利用木材抗弯性能较好的特性;西方国家石质建筑多采用梁柱砌体结构、拱砌体结构、穹砌体结构等,充分利用石材抗压性能较好的特性。由此可见,建筑材料的选用需考虑当地文明发源地地理特征、建筑营造理念、材料特性等综合因素,从而形成主要用材类型,再由其材料特性间接影响建筑结构体系的选择与演变,并影响着建筑材料与结构形式的发展。

二、近现代建筑结构技术发展史概述:砌体—钢—钢筋混凝土结构体系

(一) 砌体结构从古代到近现代建造上的发展

砌体结构在古代建筑结构体系中便已形成。砌块主要采用砖块与石块,黏结材料西方多用石灰砂浆、掺火山灰的“混凝土”等,中国古代则多用石灰砂浆、掺桐油或糯米汁的石灰砂浆。以我国砌体结构的发展为例:最早于公元 595—605 年建成的河北赵州桥(图 14),是世界上最早修建的空腹式圆弧石拱桥。从北魏时期十二边形的嵩岳寺塔,到唐代四边形的大、小雁塔,再到宋元明清大量的八边形的砖石古塔,见证了中国砖石古塔砌筑工艺的演进过程。明代兴起的砖砌无梁殿建筑是我国古代建筑中的特殊样式,具有特殊的内部结构和独特的外部仿木构殿堂式装饰构造手法,全部由青砖和石灰砂浆砌筑,主要采用砖砌拱券或砖砌穹顶结构支撑建筑,整体结构中没有木梁和木柱构件,通过各种砖砌工艺,模仿传统木构建筑中的藻井、斗拱、出檐、木柱、额枋、柱础等特色细部构造。

在民国之前,砖的烧制多采用馒头窑,烧制效率和产量都较低,为缩短制作周期,多使用青砖。民国时期,一方面由于“西风东渐”的影响,对于红砖砌筑的建筑愈发青睐;另一方面,随着从西方传入的霍夫曼窑在全国各地的使用,制砖效率显著提升,因而红砖产量有了较为迅速的增长^[9](图15)。中华人民共和国成立后,建筑墙体主要采用黏土红砖砌筑,起初多用于单层民用住宅,之后随着工业化与经济发展,逐步用于多层住宅、办公楼等民用建筑及中小型工业厂房等。1956年,开始推行标准砖模式,标准砖尺寸为 $240\text{ mm}\times 115\text{ mm}\times 53\text{ mm}$ 。20世纪60年代,小型空心砌块与多孔砖的发展得到了提升,自此砌块砖生产中的环境保护问题开始得到关注,新型砌块材料逐渐涌现。20世纪90年代之后,在学习借鉴国外配筋砌体结构研究与实践成果的基础上,我国砌体结构的设计得到了新的发展,以概率理论为基础的极限状态设计方法、砌体抗震设计等多种设计理论得到了进一步完善。



图14 河北赵州桥拱券细部

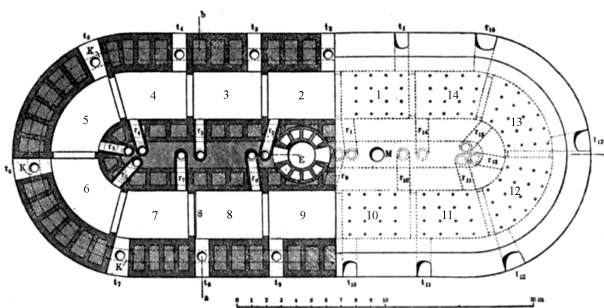


图15 霍夫曼窑典型平面示意

(二) 单层厂房—摩天大楼—异形钢结构

金属结构的使用最早可追溯至东汉时期云南景东地区澜沧江上的兰津桥。最初还多以铁质金属为主,如湖北当阳玉泉寺铁塔(公元1061年,图16)等。1840年后,随着锻铁技术的发展,铸铁逐步被锻铁取代。1870年后,钢材轧制技术已经为钢材的工业化生产提供了基础,钢材逐步替代了锻铁材料。19世纪到20世纪早期,钢结构构件的连接基本采用铆钉连接或螺栓连接,直到20世纪早中期,随着焊接技术与高强度螺栓连接方式的出现,钢结构技术的发展显著加快。

中国钢结构的发展与西方国家相比较为缓慢,19世纪末才逐步引入钢结构,初期以借鉴国外既有经验为主。中华人民共和国成立后,钢结构的材料生产、结构设计、构件计算、施工技术才有了较为明显的进步。首先广泛建设的工业厂房等,以其轻质高强、建造便捷等优势迅速推广开来;随后又多用于高层、超高层建筑结构的建设中,实现了建筑结构在垂直方向上的突破,但因高层建筑钢结构相比钢筋混凝土结构刚度较低,故通常结合钢筋混凝土核心筒、剪力墙结构共同实现高层、超高层建筑结构的刚度与稳定性需求;再之后,随着人民生活水平的提高,钢结构的设计与施工又不断向“新”而“异”的方向转变:“新”体现在结构体系之新,不同于传统钢结构,跨度大、悬挑大、变化多成为现代钢结构设计所面临的新挑战;“异”体现在结构外形之异,与传统规整的建筑形体不同,现代钢结构建筑在外形上已发生了很大变化,结构逐步成为表达建筑个性的重要元素。例如:北京国家体育场鸟巢(2003—2008年,图17)、北京中央电视台总部大楼(2004—2012年)、上海中心大厦(2008—2016年,图18)等。

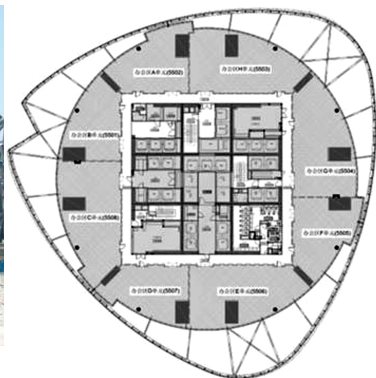


图 16 当阳玉泉寺铁塔

图 17 北京国家体育场钢结构建造过程

图 18 上海中心大厦结构布置

(三) 钢筋混凝土结构的发展及在我国的引入

1756年,英国工程师约翰·斯密顿(John Smeaton)在修建灯塔(图19)时意外发现,将黏土与石灰石按适当比例混合后煅烧可形成较高强度的材料,这成为水泥的雏形。1824—1840年,约瑟夫·阿斯普丁(Joseph Aspdin)与威廉·阿斯普丁(William Aspdin)父子,总结了使用石灰石、黏土、矿渣等配比混合煅烧“水泥”的方法。由于水泥硬结后的颜色、强度与英国波特兰岛上的天然石材类似,故称为“波特兰水泥”,即普通硅酸盐水泥,最早用于泰晤士河底隧道建设中。法国、德国分别于1840年、1855年建设了水泥制造厂,随后水泥在世界各地迅速推广使用。

1849年,法国园丁约瑟夫·莫尼尔(Joseph Monier)将铁丝与混凝土结合,制作了花盆,解决了混凝土抗拉强度低的问题。此后他又陆续发明了铁筋混凝土管道、水箱、幕墙板等,并在1875年设计了第一座钢筋混凝土桥(Chazelet Bridge)。法国工程师弗朗索瓦·埃纳比克(Francois Hennebique)受其启发,将这种材料推广至建筑结构领域,于1892年发明了全套铁筋混凝土建筑建造系统(图20)。至此,开启了钢筋混凝土结构领域的探索与研究。1888年,美国工程师杰克逊(P. H. Jackson)提出了预应力混凝土概念,但最初的尝试并不成功。1928年,法国工程师斐斯奈特(E. Freyssinet)提出必须采用高强钢材和高强混凝土,以减少预应力损失的影响,并率先采用了极限强度为1 725 MPa的高强钢丝。之后,他和麦格奈尔(G. Magnel)分别发明了锥形锚具和麦氏楔形锚具,用于后张法预应力工艺。霍伊尔(E. Hoyer)研究出了不靠锚具的先张法预应力工艺。1950年,国际预应力混凝土协会FIP成立,借战后重建的机会,预应力混凝土结构大量代替钢结构,推动了其理论和技术的蓬勃发展。1956年,林同炎完成了经典著作《预应力混凝土结构设计》一书(图21),提出“荷载平衡法”理论。

中国最早于民国时期开始使用钢筋混凝土结构,但其结构计算方法基本来源于西方国家,采用容许应力法进行计算分析。这种方法将结构材料当做理想弹性体,根据线弹性理论,计算不同荷载下结构应力,并规定构件的任一截面上的各点应力 σ 不大于材料容许应力 $[\sigma]$ 。此法虽然公式简单、实用方便且易于掌握,却忽视了材料具备的塑性能力,钢筋混凝土构件中的两种材料都具有一定的塑性能力,因此,采用上述方法进行计算与设计时,难免有不合理之处。至20世纪50年代,受苏联规范HNTY 123—55影响,采用三系数(荷载的超载系数、材料的均质系数和构件的工作条件系数)按三种极限状态(强度、变形和裂缝)进行设计。20世纪60年代初期,在基本按照苏联规范HNTY 123—55的基础上,颁布了《钢筋混凝土结构设计规范》(草案),确定了我国混凝土结构设计的基本模式。20世纪60年代中期,修订和颁布了BJG 21—66《钢筋混凝土结构设计规范》,核心

内容仍参照苏联规范的规定,按多系数极限状态计算。1974年,颁布了TJ 10—74《钢筋混凝土结构设计规范》,内容受苏联规范的影响仍较大,采用综合安全系数的计算方法。1991年,颁布了第一部基于自主科研、具有鲜明中国特色的GBJ 10—89《混凝土结构设计规范》,采用基于可靠度理论的概率极限状态设计方法。2002年,颁布了修订后的GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》,继续补充和完善基本设计方法,从构件计算向结构设计过渡,增加了结构分析内容,引入了混凝土本构关系及多轴强度准则,适度提高结构安全度设置水平及材料强度等。2011年,颁布了修订后的GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》。

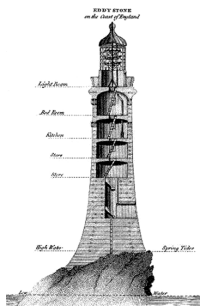


图19 斯密顿灯塔

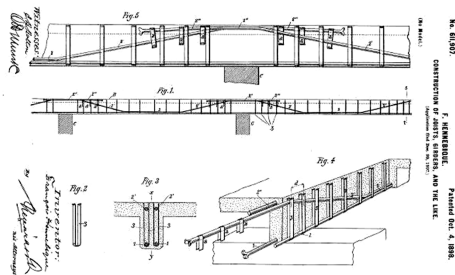


图20 埃纳比克提出的钢筋混凝土建造系统

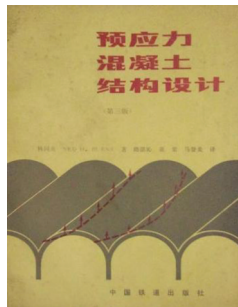


图21 林同炎著书封面

三、结构与计算技术发展史概述:从定性判别到定量分析的转变

(一) 建筑结构设计及计算技术的起步与探索阶段

对于建筑结构的设计与计算,东西方国家在早期工程实践中便有所体现,但这些建筑结构的设计大多停留在定性判别与经验总结,还未涉及较为精确的定量判别,尚属起步与探索阶段。

中国自古以来,便注重匠人精神,建筑的营造之法也由一代代工匠心口相传。建筑结构设计及计算,从中国建筑史上若干著作中便可窥见一斑。北宋时期由李诫编撰的《营造法式》(图22),对建筑设计、施工用料进行了规定,其中:“凡梁之大小,各随其广分为三分,以二分为厚”,即梁的高宽比为3:2,这种构件截面尺度比例受力性能较佳。清雍正1734年刊行的《工程做法则例》(图23)中记载:“凡里金檩以步架四份定长短。如步架四份深一丈四尺,即长一丈四尺。外加一头交角出头分位,按本身之径一份,又加柱径半份,得通长一丈五尺一寸五分”,其经验判别暗含了模数化设计思路以及结构构件的截面设计。

西方学者、建筑师也有对结构设计计算的定性判别与方法总结:西班牙著名建筑师安东尼奥·高迪(Antonio Gaudi)在设计圣家族大教堂时,采用悬链逆吊法(图24),获取了合理受力下拱结构的形态;达·芬奇(Leonardo da Vinci)在其手稿中研究并讨论了柱所能承受的荷载大小;伽利略(Galileo di Vincenzo Bonauti de Galilei)在其《关于两种新学科的对话》中研究了固定端悬臂梁的承载能力问题;马略特(Edme Mariotte)重新进行了伽利略的悬臂梁试验,由于在截面上采用的平衡条件不同,故结果也产生了偏差;雅克比·伯努利(Jacob Bernoulli)开展了关于梁的研究,即如今的伯努利梁理论。这些对于结构选型、材料力学方面的研究,奠定了之后混凝土结构以及钢结构在建筑结构设计计算上的发展。

(二) 建筑结构设计及计算技术的发展与成熟阶段

19世纪初期,随着建筑工业化发展,人们开始设计各类大规模工程结构,提出了对其进行精确

分析与计算的需求。工程结构的分析理论与方法开始独立出来。1826年,法国的纳维(Claude-Louis-Marie-Henri Navier)提出求解超静定结构问题的一般方法。1847年之后的数十年间,学者们采用图解法、解析法等研究静定桁架结构的受力分析,奠定了桁架理论的基础。19世纪中期,结构力学开始成为一门独立学科。1864年,英国麦克斯韦(James Clerk Maxwell)创立了单位荷载法和位移互等定理,并用单位荷载法求出了桁架位移,得出求解超静定问题的方法^[10]。

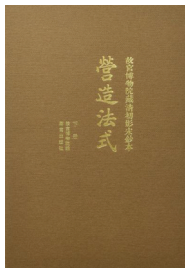


图 22 《营造法式》封面

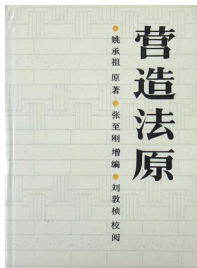


图 23 《营造法原》封面



图 24 悬链逆吊法装置

20世纪初期,大量学者对动荷载下梁的动力学理论和自由振动及受迫振动进行了研究。由于航空工程的发展,促进了对薄壁结构和加劲板壳的应力和变形分析,以及稳定性问题的研究。1914年,德国的本迪克森(A. Bendiksen)开创转角位移法,以解决刚架和连续梁问题。20世纪20年代,从试验和理论分析两个层面对动荷载进行了研究,疲劳问题、断裂问题及复合材料结构问题先后进入人们的研究视野。至此,结构的设计与计算还停留于二维框架层面。到20世纪中叶,电子计算机和有限元法的问世,使得大型结构的复杂计算成为可能,结构力学的研究与应用从二维分析转向三维计算。

传统结构分析与手工计算书在当下被多种多样的结构分析计算软件所替代,如:PKPM、盈建科结构设计软件、广厦结构设计软件、ETABS、SAP2000、ANSYS、ABAQUS、Midas等,为当代复杂结构体系的设计与计算提供了便捷(图25—图27)。除了对结构的精细化建模与数字计算外,还常结合相关结构试验开展分析。为测定材料物理力学参数,为理论计算与构件设计提供基础而进行的材性试验;为获得构件受力、位移、挠度、裂缝宽度、破坏或失稳形态等进行的构件试验;为确定结构线性动力特性以及结构非线性性能而进行的抗震试验;为确定复杂高层建筑体型系数、测定风荷载作用下建筑的整体受力与风振响应等进行的风洞试验;为了解重复荷载作用下结构的性能及其变化规律而进行的疲劳试验等,针对不同结构设计及计算出现的问题,选择相应的试验,有助于掌握结构工作性能的相关参数,确定结构对于使用要求的符合程度,检验和发展结构计算理论。

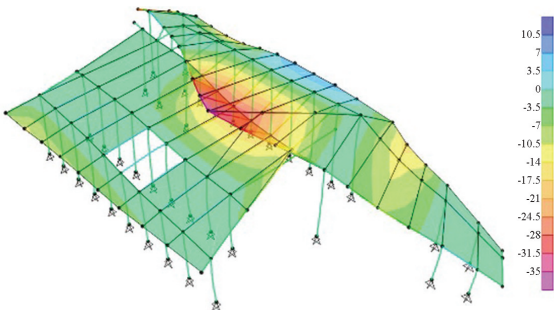


图 25 江西大仓讲习所 SAP2000 分析

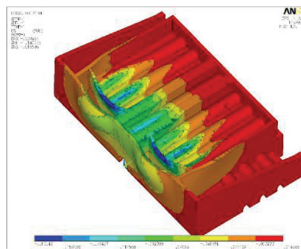


图 26 南京中华门城堡 ANSYS 分析

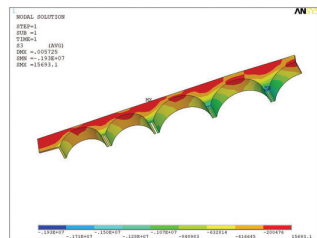


图 27 南京蒲塘桥 ANSYS 分析

四、建筑结构技术发展史的教学框架梳理

基于上述对建筑结构技术发展史教学内容的研究,大致勾勒出了教学纲要(图28),同时根据实际教学情况对教学模式进行优化,不局限于所涉及的课堂讲授内容,还应将教学活动适当扩展、延伸(图29)。

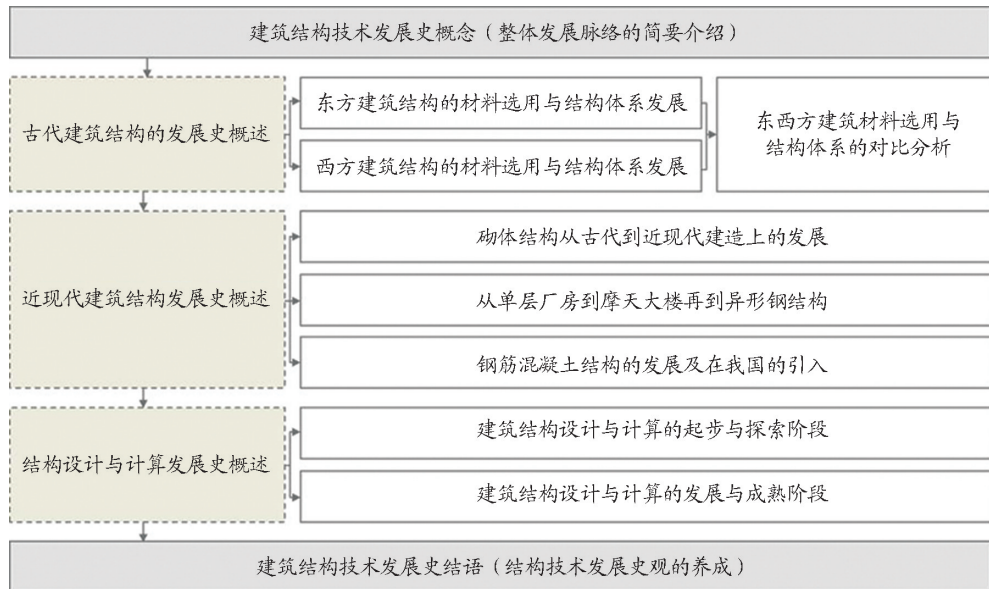


图28 建筑结构技术发展史课堂教学纲要

在课前,选取较为经典的读物作为切入点,如《中国建筑史》(潘谷西)、《外国建筑简史》(刘先觉,汪晓茜)、《现代建筑理论》(刘先觉)、《Building the Future》(Pfammatter Ulrich)等中外读物,从建筑及其设计视角,梳理不同历史时期、不同结构类型的建筑的结构技术,并采用文献阅读、小组讨论等方式,对感兴趣的话题展开深入研究。随后,进入课程主体即教师讲授,该部分包含但不限于上文中梳理的教学纲要与内容,由于课程时长等客观因素,在课堂讲授中着重以时期线索、材料线索、案例线索等方式展开,首先对某一类型结构的发展脉络作概述,而后以重要建筑案例为切入点,探讨该类建筑结构技术在不同历史背景条件下的变化与发展,对这类建筑结构在当下的应用及其发展前景进行探讨,串联起某类建筑结构技术从过去、到当下,再到未来的整体发展脉络。最后,以小组的形式(2~3人为宜)就前两阶段中感兴趣的某一点或



图29 建筑结构技术发展史教学框架

几点展开研究,并以一定的形式进行展示汇报,不限于演示文稿、影音视频等,可在组间交流汇报,达到组与组之间相互学习的目的,最终实现对建筑学硕士研究生的培养。

不难发现,在教学框架中,教师在整体教学时长中仅占30%~50%。作为硕士研究生课程,更多应强化学生中外文献的阅读能力、知识内容的梳理能力、学术研究的探索能力、团队协作的沟通能力、多元材料的表达能力等。相较于本科生的单方面传授知识,应着重培养学生自主学习与探索的

主观能动性,教师在此过程中作为第三视角下的引导与观察者身份,在教学纲要与内容上已对建筑结构技术发展史的特征进行了梳理,短时间的课堂教学无法面面俱到,只能勾勒出关键脉络与基本框架。课堂讲授中不一定完全遵循“发展脉络→案例切入→应用前景”(过去—当下—未来)的固定程序,可依据学生课前阅读完成情况,在课后汇报中发散学生的思维,采用不同的形式进行汇报,充分挖掘学生的科研潜力。

五、结语

通过时间与材料两条线索对建筑结构技术发展史进行了简要概述,初步展示了建筑结构发展史的脉络与发展,并形成了建筑结构技术发展史的教学框架。分别从古代建筑结构的发展史、近现代建筑结构发展史、结构与计算发展史三部分展开,其中穿插以中国为例的东方国家与西方国家在不同历史时期下建筑结构发展的脉络,并通过典型案例增进学生对其的理解。

(1)在古代建筑结构的发展史概述中,对东西方建筑结构材料选用及其内在动因进行了分析,分别就以木材为主要结构材料的东方建筑与以石材为主要结构材料的西方建筑结构体系发展与演变进行了简要论述。建筑材料的选用与当地文明发源地地理特征、建筑营造理念、材料特性等综合因素有关,由其材料特性间接影响到建筑结构体系的选择与演变,并影响建筑材料与结构形式的发展。

(2)在近现代建筑结构发展史概述中,就砌体结构、钢结构与钢筋混凝土结构这三大结构类型从材料简述、建造演变、国内进展、典例列举、规范完善等方面作了概述。无论是霍夫曼窑的引进、轧制钢技术的引入,还是钢筋混凝土材料的引入、钢结构与钢筋混凝土结构技术规范的学习,外来文化与建造工艺在一定程度上对我国建筑结构的发展有着深远影响,随着我国经济实力水平的提高,在此基础上发展并形成了适应于我国发展的建筑结构相关设计方法与技术。

(3)在结构与计算技术发展史概述中,突出结构与计算从定性判别、经验积累到定量分析、科学研究的转变。对结构的设计与计算在早期工程实践中便体现出来,但这些结构的设计大多停留于定性判别与经验总结,尚属起步与探索阶段。19世纪之后,从理论层面开展了若干关于结构计算与设计的研究。20世纪中叶,电子计算机和有限元法的问世,使得大型结构的复杂计算成为可能,其研究与应用从二维分析转向了三维计算,并发展形成不同目的的结构试验,以进行结构分析与计算验证。

(4)本文形成的建筑技术发展史概况及教学框架从学科角度存在多学科交叉的特性,将建筑学中设计为主的思想、结构学中理性为主的观念、历史学中人文等因素相融合,与单纯讲授建筑结构理论不同,从一种更为全方位的视角反观建筑结构技术的发展,有助于学生认识建筑结构技术的发展脉络,厘清建筑结构技术发展流变中的科学原理,思考未来建筑结构技术的发展趋势。同时与中国建筑史、外国建筑史的理论构架也有所区别,在论述历史的同时强调结构在其中的影响与作用,有助于激发学生对于建筑结构知识的兴趣,增强学生的创新意识,促进知识的交融贯通,培养学生全面、动态分析问题的能力,并逐步形成建筑技术史系列教学活动中的一个重要分支。

以上概述成果及教学框架为高等建筑院校建筑学专业结构课程教学提供了一种全新视角,同时也为建筑技术发展史系列教学体系的完善、为传统建筑学专业教学注入了新活力。所举之处难免举一漏万,但仍可向学者、读者提供一种建筑学教学视角、一种建筑结构技术发展史的教学方法、

一种建筑与结构并行设计的思维模式。

参考文献:

- [1] 罗西子. 西方现代建筑技术发展及其对新中国建筑影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [2] 钟星鸣. 浅析中国建筑结构史[J]. 企业导报, 2011(11): 231.
- [3] 金永权. 建筑设计的发展历程[J]. 门窗, 2015(6): 140.
- [4] 金新阳, 陈凯, 唐意. 《建筑结构荷载规范》发展历程与最新进展[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 49-54, 32.
- [5] 高冲平. 试论建筑结构史及其对人才培养的作用[J]. 高等建筑教育, 1985(3): 39-42.
- [6] 王骏阳. 对建筑技术史教学和研究的一点思考[J]. 城市建筑, 2016(1): 86-88.
- [7] 叶静贤. 理性之路, 从建造史看传统走向现代[J]. 建筑师, 2018(5): 32-37.
- [8] 李玲. 中国古建筑和谐理念研究[D]. 济南: 山东大学, 2011
- [9] 李海清. 剖面与身体 在中国霍夫曼窑设计变迁背后可以发现什么[J]. 时代建筑, 2019(6): 132-137.
- [10] 杨迪雄. 结构力学发展的早期历史和启示[J]. 力学与实践, 2007(6): 83-87.

Overview of the development history of building structure technology and its teaching framework exploration

CHUN Qing, JIA Xiaohu

(School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: As a part of the teaching system of architecture and civil engineering, building structure has always focused on teaching structural concepts and principles to students with an engineering mindset. While the history of the development of building structure technology is combined with historiography to show students the whole process of its dynamic development. It not only covers the explanation of the basic principles of different types of structures, but also involves in-depth interpretation of multiple perspectives such as material selection, invention, historical figures, system construction and regional culture. The course of development history of building technology, which has been offered by the Institute of Building Technology and Science, School of Architecture, Southeast University, for master students in recent years, is taken as an opportunity. Based on the results of the teaching exploration of the course of development history of building structure technology, combined with the relevant literatures and knowledge, the lineage of the development history of building structure technology is integrated. It provides a new perspective for teaching structural courses to students in higher architecture schools, completes the series of teaching system of the development history of building technology and injects the vitality of the new era.

Key words: building structure technology; overview of the development history; teaching framework

(责任编辑 梁远华)