

王 天 著

古 代 大 木 作
静 力 初 探

文 物 出 版 社



古代大木作静力初探

王 天

文 物 出 版 社

(京)新登字056号

责任编辑 黄 遯

封面设计 仇德虎

古代大木作静力初探

王 天

文物出版社出版发行

冠中印刷厂印刷

新华书店经销

1992年3月第一版第一次印刷

787×1092 1/16 印张 13

ISBN 7-5010-0578-8/T·6 定价:11元

序

陈明达

研究中国古代建筑已经半个世纪了。实物调查测绘，不下数百处，古代建筑史也写过近十次，正式发表了两本，成绩是巨大的。然而作为一门学科来看，她仍处在童年时期，需要深入探讨的课题还很多，有些如古代建筑的理论、原则等，几乎都还是空白。

古代建筑大木作的结构力学，就是许多空白点中之一。这个研究课题，过去几乎无人敢于问津。一般致力于古代建筑的研究者，都缺乏结构力学的基础；而专攻结构力学的学者，又缺乏古代建筑的知识，因此两方面均因无从着手而退避三舍。本书著者专业结构力学，但他不畏艰辛，毅然先从学习古代建筑知识开始，竭数载之劳而成此专著，为填补这一空白，立下了功绩，值得钦佩。

本书以宋李明仲《营造法式》所记大木作规范及材份制为基本依据，必要时参用现存实例进行分析验算。众所周知，《营造法式》系总结宋代以前经验而编制的规范，其影响下及元代，故以之为基本依据所取得的结果，自然符合唐～元这一历史阶段的普遍状况。而明清阶段，则自当别论。

我对结构力学是外行，但从事古代建筑研究数十年，深知研究工作之奥秘：脚踏实地，循序渐进，不尚浮夸，力避空论，必有所获。本书著者正是以此种精神从事研究，他不是看见两条柱子顶着一根横梁就断言符合现代的门式结构；也不是看见殿堂分槽结构就视为符合现代双层套筒结构；而是着力于分析各种结构的受力状况，探求其功效，故所取得的结果，不问巨细，必定是切实的、有益的。

事业之难莫过于创始。这部著作是一部创始之作，前无古人，无可

遵循。敢于创始，就是一个贡献。研究古代建筑者，渴盼已久的课题，终于得到一个较系统、较切实的开始，应当向著者庆贺。因为是创始，所以不可能尽善尽美、无所缺漏或无失误之处。如何继续深入探索，去芜存精，使之茁壮成长，不仅是著者的任务，也是广大有志于此者之责。

一九八四年十二月

目 录

绪 论	(1)
第 一 章 材份制	(4)
第 二 章 荷载	(14)
一 屋面自重	(14)
二 木构架自重	(17)
第 三 章 椽	(20)
一 举折	(20)
二 檐椽和脊椽	(24)
三 椽距、椽栿联结、角椽	(36)
第 四 章 栿	(40)
一 栿的三种支座	(41)
二 两材榫间支座的分析	(45)
第 五 章 榫间	(48)
第 六 章 下平栿、檁檐方、阑额	(54)
第 七 章 梁	(63)
一 殿堂	(64)
二 厅堂	(75)
三 亭	(81)
四 梁头受剪与受压	(82)
五 梁的支承	(86)
六 梁断面的高宽比	(89)

七 梁架的科学意义	(91)
第八章 铺作	(96)
一 下昂	(98)
二 上昂	(105)
三 华栱与横栱	(105)
四 斗	(107)
五 跳长与日照	(108)
第九章 栌斗	(110)
一 栌斗实负荷载	(111)
二 栌斗边广的探讨	(118)
第十章 柱	(122)
一 柱子负荷能力	(124)
二 柱高	(126)
三 副阶材减殿身一等	(127)
四 柱身卷杀	(129)
第十一章 檼头、替木	(132)
第十二章 构架整体性	(137)
一 殿堂构架	(139)
二 应县木塔的构架分析	(145)
三 构架抗震几点总结	(153)

附表目录

表1	一至八等材等比数列求材宽·····	(156)
表2—1	《法式》各等材截面矩量比·····	(156)
表2—2	一至六等材等比数列求材宽·····	(156)
表2—3	一至六等材相邻两材宽比·····	(157)
表3	甃瓦体积及重量·····	(157)
表4	甃瓦体积及重量·····	(157)
表5	甃瓦甃瓦结瓦每垄长一丈重量·····	(158)
表6—1	屋面结瓦每一平方丈重量·····	(158)
表6—2	折合各等材每百份 ² 屋面重量·····	(159)
表7	垒脊瓦当沟合脊瓦每长一丈重量·····	(160)
表8—1	垒脊每长一丈总重·····	(160)
表8—2	各等材每份长垒脊重量·····	(161)
表9	鸱尾兽头估计重量·····	(162)
表10	材份米尺宋尺当量表·····	(162)
表11	椽每份长折合各等材重量·····	(163)
表12	栿每条材积及重量·····	(163)
表13	阑额顺脊串等用材积及重量·····	(164)
表14	托脚蜀柱等材积及重量·····	(165)
表15	梁枋材积及重量·····	(165)
表16	柱每根材积及重量·····	(166)
表17—1	铺作每间用方桁、遮椽板数·····	(167)
表17—2	方桁、遮椽板每根(块)材积及重量·····	(167)
表18—1	殿阁外檐每补间铺作一朵材积·····	(168)
表18—2	殿阁外檐每补间铺作一朵各等材重量·····	(169)
表19—1	殿阁身槽内每补间铺作一朵材积·····	(169)

表19—2	殿阁身槽内每补间铺作一朵各等材重量	(170)
表20—1	殿阁外檐每柱头铺作一朵材积	(170)
表20—2	殿阁外檐每柱头铺作一朵各等材重量	(171)
表21—1	殿阁身槽内每柱头铺作一朵材积	(172)
表21—2	殿阁身槽内每柱头铺作一朵各等材重量	(172)
表22—1	殿阁外檐每转角铺作一朵材积	(173)
表22—2	殿阁外檐每转角铺作一朵各等材重量	(175)
表23—1	殿阁身槽内每转角铺作一朵材积	(175)
表23—2	殿阁身槽内每转角铺作一朵各等材重量	(176)
表24—1	楼阁平坐每补间铺作一朵材积	(177)
表24—2	楼阁平坐每补间铺作一朵各等材重量	(177)
表25—1	楼阁平坐每转角铺作一朵材积	(178)
表25—2	楼阁平坐每转角铺作一朵各等材重量	(180)
表26	楼板平基屋面活荷载	(181)
表27	椽距椽出长度飞子挑长	(181)
表28	圆形截面几何特性	(181)
表29	矩形截面几何特性	(182)
表30	木材计算强度	(183)
表31	弹性模量 E	(183)
表32	钢木销钉承载能力	(184)
表33	用材与瓦宽	(184)
表34	脊砖内力	(185)
表35	平砖内力	(185)
表36	殿堂梁枋内力	(185)
表37	厅堂梁枋内力	(186)
表38	炉斗承载能力	(186)
表39	几种构架炉斗实负荷载	(186)
表40	柱实负荷载	(187)

插图目录

图1—1	石器时期构架榫卯	(5)
图1—2	材广厚比	(6)
图1—3	材分八等	(10)
图1—4	截面矩量曲线	(12)
图3—1	举折	(22)
图3—2	举折与直坡屋面梁架	(23)
图3—3	瓦前张口缝	(23)
图3—4	瓦后张口缝	(23)
图3—5	两种屋面比	(23)
图3—6	檐椽	(24)
图3—7	殿堂檐椽计算简图	(26)
图3—8	厅堂檐椽计算简图	(31)
图3—9	殿堂檐椽计算简图	(33)
图3—10	椽径椽距与瓦宽	(37)
图3—11	椽栿钉结	(37)
图3—12	椽栿钉结	(37)
图3—13	角檐	(39)
图3—14	角椽荷载面积	(39)
图4—1	单斗替木	(41)
图4—2	弯曲示意	(41)
图4—3	一材榫间	(42)
图4—4	两材榫间	(43)
图4—5	受力状态(1)	(45)
图4—6	受力状态(2)	(45)
图4—7	受力状态(3)	(46)

图4—8	受力状态(4)	(46)
图5—1	上层樑间	(50)
图5—2	枋计算简图	(50)
图5—3	上层樑间计算简图	(51)
图5—4	下层樑间	(52)
图5—5	下层樑间计算简图	(52)
图6—1	补间八铺作	(56)
图6—2	檁方计算简图	(56)
图6—3	阑额计算简图	(56)
图6—4	下平枋计算简图	(56)
图6—5	计算简图	(57)
图6—6	下平枋计算简图	(57)
图6—7	下平枋计算简图	(58)
图6—8	阑额计算简图	(59)
图6—9	六铺作简图	(60)
图6—10	下平枋计算简图	(60)
图7—1	殿堂十架椽身内双槽副阶周匝各两椽	(64)
图7—2	殿堂十架椽身内分心斗底槽	(65)
图7—3	殿堂八架椽身内单槽副阶周匝各两架椽	(65)
图7—4	佛光寺大殿叉手平梁	(66)
图7—5	计算简图	(68)
图7—6	计算简图	(68)
图7—7	计算简图	(68)
图7—8	计算简图	(69)
图7—9	计算简图	(69)
图7—10	计算简图	(69)
图7—11	计算简图	(70)
图7—12	加入垫块	(71)
图7—13	计算简图	(71)
图7—14	计算简图	(73)

图7—15	计算简图	(74)
图7—16	厅堂乳栿对六椽栿用三柱	(76)
图7—17	厅堂十架椽屋分心用三柱	(76)
图7—18	平梁叉手	(77)
图7—19a	计算简图	(77)
图7—19b	计算简图	(77)
图7—20a	计算简图	(78)
图7—20b	计算简图	(78)
图7—21	计算简图	(79)
图7—22	计算简图	(79)
图7—23	计算简图	(80)
图7—24	计算简图	(80)
图7—25	计算简图	(81)
图7—26	亭	(82)
图7—27	梁枋项	(83)
图7—28	梁枋项	(83)
图7—29	梁枋	(85)
图7—30	梁枋	(85)
图7—31	敦栿	(86)
图7—32	垫方	(86)
图7—33	替力梁架	(92)
图7—34	单梁	(93)
图7—35	梁到屋架	(95)
图8—1	柱头铺作	(97)
图8—2	内槽补间铺作	(98)
图8—3	计算简图	(99)
图8—4	下昂受力状态	(99)
图8—5	骑昂头	(102)
图8—6	昂头开子荫	(102)
图8—7	昂背作卷头	(102)

图8—8	斜斗	(103)
图8—9	昂头削平口	(103)
图8—10	昂头下杀	(104)
图8—11	法隆寺方头昂	(104)
图8—12	招提寺方头昂	(104)
图8—13	晋祠圣母殿平出昂头拱	(104)
图8—14	插昂	(104)
图8—15	真武阁昂嘴	(105)
图8—16	上昂	(105)
图8—17	拱头卷杀	(105)
图8—18	释迦塔方头华拱	(107)
图8—19	法隆寺拱	(107)
图8—20	挑檐与日照	(109)
图9—1a	栌斗尺寸	(111)
图9—1b	栌斗透视	(111)
图9—2	泥道拱开槽	(119)
图9—3a	柱径同栌斗	(120)
图9—3b	栌斗边广与柱径	(120)
图9—4	柱径小于斗边广	(121)
图9—5	卷杀斗欹	(121)
图9—6	柱径大于斗边广	(121)
图9—7	柱头栌斗都卷杀	(121)
图9—8	卷杀柱头	(121)
图10—1	柱	(129)
图10—2	卷杀	(129)
图10—3	柱身挠曲	(131)
图11—1	大树枝杈	(132)
图11—2	分杈处木纹	(132)
图11—3	计算简图	(133)
图11—4	计算简图	(134)

图11—5 雀替卷杀	(135)
图11—6a 雀替的应用	(136)
图11—6b 雀替的应用	(136)
图11—6c 雀替的应用	(136)
图11—6d 雀替的应用	(136)
图12—1 方的联结	(140)
图12—2 副阶檐柱变位	(140)
图12—3 柱侧脚	(142)
图12—4 拔榫	(143)
图12—5 枋榫受力状态	(143)
图12—6 (阑额、柱头) 鐳口鼓卯	(145)
图12—7 柱顶平面	(145)
图12—8 山墙受力状态	(145)
图12—9 木塔侧样	(147)
图12—10 木塔南立面	(148)
图12—11 木塔分层示意	(149)
图12—12 木塔底层平面	(151)

绪 论

耕者知谷,匠者知木,学过结构力学的人自然会对力学感兴趣。每当我见到一座座古代建筑物时,不是先去欣赏它的艺术美,而是好从结构力学去琢磨。这也许是从从事这一专业的人一种职业通病,但却引起我试图从力学角度探讨大木作的兴趣。一方面,我尚有点浅薄的力学基础,入门较方便;另一方面,前辈从事古建筑研究已进行了半个世纪,取得巨大的成就,这给力学研究打下了扎实的基础。

在我观察古建实例时,总是思考着一些问题:

比如,现代建筑的柱子,与基础结成一体,构成插在地上的悬臂梁,有力地抗拒地震力和水平机械力;然而古建筑中的柱子却平搁浮摆在柱础上,如此结构是如何抗拒地震力的呢?

又如,现在我们建造大跨度房屋用组合屋架;但古建筑的屋架又是采用什么样的形式呢?

又如,古建筑屋檐下布列着硕大的斗拱,出檐可达4~5米远。如此大跨度的挑檐又如何保持古建筑的稳定和安全呢?等等。

这些问题,拨动了我的力学之弦,设想从力学角度揭开古建结构之谜。

众所周知,古建筑是采用材份制来进行平立面设计和结构设计的,这与现代建筑设计不同。采用材份制设计梁、枋、柱可不分房屋大小,不用大量图纸,甚至不必一一计算,仅用一根有刻度的杖杆即可。这种工具,既是尺又是图,小则数尺,大则数丈,低如民舍,高如千仞之塔,莫不如是,所设计出的构件均在安全范围之内。可见,材份制包括材料力学的内容和结构力学的设计。因而,探索材份制的奥秘,也是研究古代建筑的一个重要内容。

从力学的角度研究,首先要了解构架的整体,然后再了解细部构造和构件的长

短尺寸,这样才能正确地确定研究顺序。若对整体构架尚不明了,就急于用假设作条件,计算的结果往往偏离实际。例如开始时曾认为栌斗是一只关键性的构件,突破这一构件,其他构件的问题也可迎刃而解了。但结果事与愿违,因为对整体构架了解不清,铺作的构造不甚明白,屋面结瓦的构造自然也知之了了。用不准确的估计荷载为条件,算得的结果很不可信。最终还是按照结构的特点,从屋面至柱础,层层而下的顺序研究,才顺利地得到较满意的答案。

古代大木作构架和现代木结构不一样,用现代木结构计算公式直接套算古代大木作构架并不都合适,甚至还会出现错误。例如梁榑入柱卯或入铺作,梁端的构造节点受力是怎样的呢?若按照两端嵌固的计算公式求得梁的内力,则内力很小,不真实。实际上梁在外力的作用下,可以有微小的角变位,已不是处在嵌固状态了。若按照铰接的节点考虑,梁端为简支求内力,又偏于安全,梁榑实际能承受一部分转角弯矩,呈现出嵌固作用。梁枋项列华拱伸入铺作长度可达四跳,有一定的嵌固作用。除此以外还有梁的负荷大小,也会引起榑卯中的应力变化,再加上制作榑卯精确度不一、木材干缩湿胀的变化、竣工年代的长短等因素都会影响梁端的受力状态。计算时充分考虑这些因素,使用某种公式,应于计算前作计算整理的准备工作,使之符合公式的意义,计算的结果才可望近于实际。

再如:有补间铺作的檼檐方如何计算内力呢?若按照简支梁计算,补间可能起到支撑作用,并不是简支梁;若按照连续梁计算,补间铺作随阑额挠沉而消失一些支座的作用,呈现了简支梁的状态。此外下平栿的挠沉,通过下昂增强了跨中支座的作用,檼檐方的弯曲应力有所降低。所以核算檼檐方的内力,必须把阑额、下平栿一并考虑,综合分析,作大量的计算整理,求出各自负荷,再以荷载形式采用相应的计算公式算出内力。

大木作构架的构造是复杂的。许多构件不是简支梁,有的介于简支梁和连续梁之间的形式,有的用几根构件作空间组合。至于支承节点,往往是铰接与嵌固之间的状态,受力过程中孰主孰次,时有互易。因此受力状态到底是何种情况,迄今并不很清楚,尽管采用多种计算方法,也难免与实际有出入。笔者期望将来能在实验室里先测试一番,这对研究古代建筑大有助益。

最后,谈谈本书使用的计量单位的问题。按照现代建筑结构的计算,使用的

长度和重量单位都是公制。但核算古代大木作构架的一切构件，究竟使用何种计算单位较好呢？开始，我也曾一度采用现在通行的计算单位，把已知的材份和宋斤，换算成公制。但没有想到，经这样一改，尽管是同一构件，也须重新换算一番，如此反复，十分繁琐，浪费了许多时间，影响了计算速度。更重要的是抹煞了一个非常重要的问题：即材份制。例如，襜间厚十份，若换算成公制，则要得出八个带小数的尺寸，很不方便，更破坏了材份制的直观效果。本来，材份制是一种科学的简化，换算成现代计量单位后反而变得复杂繁琐了，走了两年的弯路。幸而迷途知返，仍采用宋代的材份制和计量单位。如一宋尺折合公制为 32 厘米，一等材一份则等于 1.92 厘米，二等材一份等于 1.76 厘米；又如，一·六宋斤折合公制为 1 公斤，若木材顺纹受拉计算强度是 100 公斤/厘米²，那么，一等材顺纹受拉计算强度为 590 斤/份²，二等材顺纹受拉计算强度为 496 斤/份²……。以此类推，将荷载、弹性模量 E 值、各种计算强度分别按各等材制表，使用何等材，就选用相应材等的荷载和计算强度。本书基本建立了材份制的计算体系，从而为研究古建筑或维修、加固工程提供了方便。

本书蒙陈明达先生热心指教，特表谢意。

一九八四年于北京