

# 组合结构

张正国 编著

Composite  
Structures

河南科学技术出版社

# 组合结构

张正国 编著

江苏工业学院图书馆  
藏书章

河南科学技术出版社

## 组 合 结 构

张正国 编著

责任编辑 马文翰

河南科学技术出版社出版发行

河南第一新华印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 12印张 236千字

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数：1—5,000册

ISBN7-5349-0387-4/T·421

---

定价 3.50元

## 前 言

组合结构是一门发展中的学科，其良好的结构性能正日益为人们所认识和掌握。国内外学者对组合结构进行了大量研究，并为其推广应用付出了辛勤的劳动，取得了丰硕的成果。然而组合结构在国内发展很缓慢，且各地区发展极不平衡。可喜的是，组合结构目前已受到结构工程界的普遍重视，成为我国建筑结构的发展方向之一，它必将在我国的社会主义经济建设中发挥巨大的作用。

我们在开展组合结构研究中，收集整理了大量国内外文献资料，结合我们的研究成果，汇成《组合结构》一书，旨在为读者提供一个“组合结构”的全面概貌，推动组合结构的迅速发展。

本书在收集整理文献资料及定稿过程中，始终受到郑州工学院左明生教授、孙国良教授、龚绍熙教授和郑州工学院综合设计研究院吕证福高级工程师、宋雅涵高级工程师的热情指导和大力支持，特此仅表示衷心地感谢。中州大学胡玉琳老师参加了本书第二章的编写和全书的整理及审核工作。

本书共分八章，主要含钢—混凝土组合梁（包括压型钢板组合楼层）、劲性钢—混凝土组合柱和钢管混凝土组合柱三大部分，系统地介绍了组合结构的特点、发展概况、设计

原理，介绍了各种基本构件的力学、结构性能及设计计算方法，以及结构构件的连接等。本书采用新的国家标准《建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语》GBJ83-85颁布的国际符号和以国际单位制(SI)为基础的法定计量单位，设计方法采用《建筑结构设计统一标准》GBJ68-84规定的“以概率为基础的近似概率极限状态设计方法”。本书可用作工业与民用建筑专业本、专科学生的教材，也是工程技术人员设计组合结构的必备资料，同时可供研究人员和研究生参考之用。

由于作者水平所限，不当之处在所难免，望读者不吝指正。

作 者

1988年5月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
第一节 组合结构的特点 .....	( 1 )
第二节 组合结构发展概况 .....	( 3 )
第三节 组合结构设计原理 .....	( 8 )
<b>第二章 组合结构的材料</b> .....	( 15 )
第一节 结构钢材和钢筋基本力学性能 .....	( 15 )
第二节 混凝土基本性能 .....	( 20 )
<b>第三章 剪力连接</b> .....	( 31 )
第一节 概述 .....	( 31 )
第二节 简支迭合板梁 .....	( 33 )
第三节 掀起 .....	( 38 )
第四节 剪力连接方法 .....	( 40 )
第五节 剪力连接件试验研究 .....	( 44 )
第六节 剪力连接件强度计算 .....	( 51 )
第七节 剪力连接件的构造要求 .....	( 61 )
第八节 部分交互作用 .....	( 63 )
第九节 滑移对应力和挠度的影响 .....	( 66 )
<b>第四章 简支组合梁和组合板</b> .....	( 72 )
第一节 概述 .....	( 72 )

第二节	组合楼层中的钢筋混凝土连续板	( 73 )
第三节	组合梁弯曲强度	( 77 )
第四节	连接件的数量和间距	( 85 )
第五节	混凝土板中的横向配筋	( 93 )
第六节	使用极限状态下组合梁的应力和挠度	( 104 )
第七节	混凝土的收缩对组合梁挠度的影响, 温度效应	( 127 )
第八节	部分交互作用设计	( 129 )
第九节	压型钢板组合楼层	( 134 )
第十节	支承压型钢板组合板的组合梁	( 155 )
第十一节	大跨度组合楼层的振动	( 161 )
<b>第五章</b>	<b>连续组合梁</b>	( 168 )
第一节	概述	( 168 )
第二节	连续组合梁的负弯矩区特性	( 169 )
第三节	塑性理论在连续组合梁中的应用	( 186 )
第四节	正常使用荷载下连续组合梁的应力 和挠度	( 198 )
第五节	连续组合梁的裂缝宽度控制	( 213 )
第六节	侧锚钢-混凝土组合梁基本概念	( 222 )
<b>第六章</b>	<b>劲性钢-混凝土组合柱</b>	( 224 )
第一节	劲性钢-混凝土组合柱的一般概念	( 224 )
第二节	用演变法设计劲性钢-混凝土组 合柱	( 225 )
第三节	巴苏-沙莫维尔设计方法 (Basu-	

Sommerville) .....	( 232 )
第四节 用迭加法计算劲性钢-混凝土组合柱 .....	( 254 )
第五节 外包钢混凝土组合柱 .....	( 262 )
<b>第七章 钢管混凝土组合柱 .....</b>	<b>( 271 )</b>
第一节 钢管混凝土组合柱的基本性能 .....	( 271 )
第二节 按极限强度法计算圆钢管混凝土柱 .....	( 282 )
第三节 用套箍理论计算圆钢管混凝土柱 .....	( 297 )
第四节 用强度理论计算圆钢管混凝土柱 .....	( 301 )
第五节 方钢管混凝土柱 .....	( 334 )
<b>第八章 组合结构的构件连接 .....</b>	<b>( 343 )</b>
第一节 组合柱的非节点拼接接头 .....	( 344 )
第二节 梁柱节点构造 .....	( 351 )
第三节 组合柱的柱脚 .....	( 362 )
<b>参考文献 .....</b>	<b>( 368 )</b>



# 第一章 绪 论

## 第一节 组合结构的特点

一般来说，组合结构泛指结构构件由两种或两种以上材料组成，共同承担外部作用，完成各种使用功能要求的结构。例如三角形钢木屋架（图1.1），钢木迭合梁（图1.2）等。但作为一门学科进行研究，作为一个结构分支在土木工程

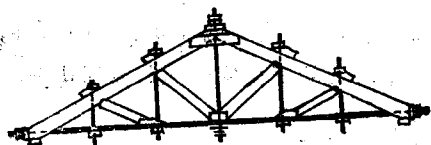


图 1.1



图 1.2

中大量使用，它指的是除钢筋以外的各种型钢（包括钢板）和混凝土通过各种方式组合成整体而共同工作和协调变形的结构；它与钢筋混凝土结构的差别，在于后者采用钢筋作为骨架，而前者的骨架为除钢筋以外的各种截面形式的钢材，称之为结构钢材。

在组合结构中，结构钢材与混凝土紧密结合形成一个整体，共同工作，协调变形，能充分发挥各自的材性优势，最

大限度地克服其缺点。具体来说，它具有下列特点：

一、组合结构可以充分利用钢材和混凝土的强度。例如在简支组合梁中，结构钢材全部或大部位于受拉区，不存在局部稳定问题。而混凝土全部或大部位于受压区，可以充分发挥其抗压强度高的特长，从而充分利用了钢材和混凝土各自的抗拉和抗压的强度优势。在轴心受压圆钢管混凝土柱中，钢管中的纵向压力被转化为环向拉力，而对核心混凝土形成侧向约束作用。在侧向约束作用下，核心混凝土的纵向承载力提高量远大于钢管纵向承载力的降低量，从而提高了整体承载能力。

二、结构钢材与混凝土组合成整体后，截面上的质量分布可以达到较好的状态而提高结构的抗弯刚度。例如组合梁可以采用板托以增大截面高度，以达到降低挠度的目的。在钢管混凝土结构中，弹性模量较大的钢材集中在截面周边上，因而具有较大的截面刚度。

三、结构钢材和混凝土相互依托，互为支承，它们的整体稳定和局部稳定性能均得到改善。例如钢管混凝土柱，当两种材料各自独立工作时，钢管的极限承载能力经常受局部稳定控制，其变形能力也较弱，而混凝土则可能过早地发生整体失稳破坏。二者共同工作时，稳定性都得到相对加强。

四、采用组合结构可以加快施工进度，缩短施工周期。例如在压型钢板组合楼层中，压型钢板作为楼层配筋，同时又是浇灌混凝土的模板。各个楼层可以同时浇灌混凝土，并且免除了模板制造、支撑、拆除等工序，从而大大加快了施工

进度。组合柱施工时，下部柱完工后可紧接进行上部结构施工，不必等待混凝土凝固，也可提高施工效率。

五、采用组合结构具有相当好的经济性。由于在很多种情况下可以不用模板，因而节约绝大部分木材。与钢结构相比可节约钢材近50%，与钢筋混凝土结构相比，可节约60%以上的混凝土，而用钢量大致相等或略大。在某些厂房结构中，可节约大量预埋件。由于结构自重减小，设计荷载相应降低，从而减小了地基基础处理的难度，并节约基础造价。

六、组合结构适用于大型、高层及重型建筑与构筑物。因为减小了构件尺寸，增大了使用空间，并且建筑上美观、轻盈，一改“肥梁、胖柱、重楼盖”的老旧结构型式，具有很广泛的适用性。

七、组合结构与钢筋混凝土结构相比，具有耐火性差、容易锈蚀的缺点。但与钢结构相比，耐火性能和防锈蚀性能都有很大改善。

## 第二节 组合结构发展概况

组合结构是应用比较早的结构形式之一，它的应用大约比钢筋混凝土结构早20多年，而应用最早的是组合柱。1879年完工的英国赛文铁桥的桥墩首次采用了组合结构型式，其截面为圆钢管混凝土。

本世纪初，人们才开始有目的地研究组合结构。1901年，Swell, J.S. 第一个发表文章报道了钢管混凝土柱的应用。开

始他为了防止钢管内部锈蚀而在钢管内填上混凝土，结果意外地发现柱的承载能力有很大提高。他得出的初步结论是：钢管混凝土柱的刚度至少比纯钢管增大25%。1907年，美国 Lally 公司首次给出了圆钢管混凝土柱的安全承载能力公式，并命名这种柱为 Lally 柱，作为一项专利为该公司所有，限制了其理论原理的推广。这个时期应用组合柱，都要进行真形试验。

第一次世界大战以前，受钢铁冶炼技术的限制，钢材质量较差，钢材强度在 $210\sim 240\text{N/mm}^2$ 之间变化，相应屈服应变仅略高于0.1%，塑性变形能力很小。在这样低的应变下，混凝土根本不能充分发挥其强度，因此设计人员常常采用铸钢作为竖向承重构件。为了防火和防锈，在铸钢柱外面包上混凝土壳，而不考虑混凝土的承载作用，这就是最初的劲性混凝土柱。

50年代以后，组合柱的研究才广泛地在世界范围内展开。1953年，Russell, W. A. 对内填轻质混凝土、重混凝土和普通混凝土的圆钢管混凝土柱进行研究，给出了允许荷载计算公式。1957年，Kloppel和Goder对圆钢管混凝土柱进行了更广泛深入的研究，考虑了长细比效应和徐变效应等，给出了相应的设计公式。50年代，日本对各种组合柱进行了全面的研究。日本建筑学会，福岗市九州工业大学，东京大学等对各种劲性混凝土柱和钢管混凝土柱进行了大量研究工作，充分利用组合柱延性变形能力强的特点，使之起抗震作用。苏联在1931年就开始研究组合柱，但只限于圆钢管混凝

土柱。60年代，组合柱进入规范化时期。苏联1963年由罗斯诺夫斯克提出了“钢管混凝土桥梁结构设计和施工的推荐规范”，日本1967年制订了组合柱设计规范。美国、英国、加拿大等国家也先后用规范形式肯定了组合柱。

钢-混凝土组合梁的研究开始于20年代。1922年，H. M. Maeking等对外包混凝土的工字形钢梁进行了试验研究，结果表明钢与混凝土交界面上的粘结作用使二者产生交互作用，从而提高了梁的抗弯能力。后来 R. H. H. Kirkheim 和 H. M. Macking 等人进行了钢与混凝土粘结强度的试验研究，提出了采用机械剪力连接件来保证二者共同工作的概念。同时，V. Lapsins 等又将钢梁上翼缘进行变形处理，以增大钢梁与混凝土板之间的摩擦阻力和机械咬合力，试验结果发现二者交互作用很好，同时也提出了混凝土板掀起引起的脆性破坏模式。50年代初期，欧、美、苏联等国家，已开始将钢-混凝土组合梁应用于铁路和公路桥梁上，接着又推广到多层及高层建筑中。

德国在1955年出版了公路桥组合梁规范 DIN 1078；1956年制订了建筑结构组合梁规范 DIN 4239；1974年出版了钢-混凝土组合梁设计与施工规范补充条文。英国在1965年制订了建筑结构简支组合梁规程 CP117 第一部分；1967年制订了桥梁组合梁 CP117 第二部分。其它如美国、苏联、日本、加拿大、澳大利亚等国家，也先后制订了组合梁设计规程。

压型钢板组合楼层在30年代就开始应用于多层建筑。然

而开始时压型钢板只是用作永久性模板，目的在于提高施工速度，而不考虑它与混凝土板的共同工作。1950年，Friberg首先对压型钢板混凝土组合板的整体工作性能进行了研究，并与钢筋混凝土板进行比较，提出了压型钢板组合楼层的设计方法。1967年Bryl详细分析了压型钢板组合楼层体系的最终承载能力，根据大量试验结果，提出了更为切合实际的设计方法。压型钢板的应用推动了压型钢板组合楼层的研究，进而推动了多种形式性能各异的压型钢板的生產，从而使压型钢板组合楼层结构得到了迅速发展。60年代末期，美国钢结构协会，国际桥梁和结构工程联合会开始着手制订压型钢板组合楼层设计规程，现已列入国际性的组合结构典型规程中。

国内对组合结构的研究开始于50年代，但到目前为止还没有制订规范，发展比较缓慢。然而工程界并没有因为没有规范而放弃这种结构。工程技术人员冲破重重阻力，为推广应用组合结构进行了不懈的努力。

我国50年代建造的武汉长江大桥上层公路桥采用了钢-混凝土组合梁。70年代后期，郑州工学院、北京电力建设研究所、北京电力设计研究院、西南电力设计院、同济大学等单位，先后开展了组合梁及其剪力连接件的试验研究工作。1978年以来，郑州工学院先后进行了上百个连接件推出试验，9根组合梁试验、9根组合梁柱刚性节点和组合梁负弯矩区工作性能的试验研究。

随组合梁试验研究工作的开展，组合梁的工程应用日趋

增多。例如鸟山桥、衡阳的湘江桥、承德钢厂的18米跨吊车梁，天津市交通局总调大楼，临涣煤矿副井塔架等很多工程都采用了钢-混凝土组合梁。1986年新修订的钢结构设计规范，铁路及公路桥梁设计规范中已编入了组合梁设计条文。

国内对组合柱的研究主要集中于钢管混凝土柱。其中对圆钢管混凝土柱的研究处于世界领先地位。目前其理论体系已趋于成熟。1959年，原中国科学院哈尔滨土建研究所，首先开始了圆钢管混凝土结构基本性能和应用的研究工作。1963年，北京地铁工程局对圆钢管混凝土柱的工作机理展开了较系统的实验研究工作，首先在北京地铁工程中采用了圆钢管混凝土柱。1965年，冶金建筑研究总院等单位结合实际工程进行了一定程度的实验研究。原建材部苏州水泥制品研究院1967年开始研究圆钢管混凝土柱的基本性能，提出了紧箍力作用假设，并详细分析了紧箍力的产生原因和核心混凝土的破坏机理，建立了一套设计公式。哈尔滨建筑工程学院1975年开始系统地研究圆钢管混凝土结构，先后用统一的最大剪应力强度理论、莫尔综合强度理论和塑性理论分别分析钢管和核心混凝土，建立了独立的理论体系和设计公式。建筑科学研究院从1980年开始，做了一系列圆钢管混凝土短柱、长柱、偏压柱试验研究，以螺旋套箍混凝土柱理论为基础，深入研究了圆钢管混凝土柱的基本性能，给出了简易的设计公式。从1983年开始，郑州工学院开展了方钢管混凝土结构的试验研究，目前已完成了52根方钢管混凝土轴压短柱和18根偏压短柱的试验研究，初步探讨了短柱的工作性能和约束

机理，并给出了轴压短柱和偏压短柱的极限承载能力设计公式。

对于其它形式的组合柱，国内应用及研究不多。郑州工学院等单位在70年代进行过外包钢筋混凝土柱的试验研究，提出了实验报告。

设计方面，哈尔滨建筑工程学院于1983年9月编印了“有关钢管混凝土结构设计与施工的几点建议”。目前正在酝酿讨论正式规范的制订，预计不久将出版钢管混凝土柱设计规范。

### 第三节 组合结构设计原理

结构设计的主要问题是考虑荷载的随机性，材料强度的变异性 and 构件尺寸的施工误差进行设计和计算，保证结构在正常施工过程中和建成以后正常使用期间能安全承担各种可能出现的作用，包括各种荷载、温度效应和地基不均匀沉降等；要保证结构物在正常使用期间能满足各种使用要求，具有良好的工作性能；在正常维护下具有足够的耐久性；在偶然事件如地震、爆炸、撞击等发生时及发生后仍能保证必要的稳定性。同时要考虑经济性问题。也就是如何用最经济的方案来满足安全性及适用性等要求，使结构设计最合理，造价最低。

为了寻求可靠性与经济性之间的最佳平衡，组合结构的设计理论及方法在不断地演变和改进。组合结构的设计最初



采用容许应力法，利用线弹性理论分析结构的内力及变形，使最大荷载下按线弹性理论计算得到的构件截面上最大应力不超过材料的容许应力，结构的最大变形不超过容许值。后来发展为极限状态设计方法，采用塑性理论分析结构构件在承载能力极限状态下的截面抗力，使其不小于最大设计荷载作用下的截面内力。

结合我国新的建筑结构设计标准的颁布与实施，本书拟采用以概率为基础的近似概率极限状态设计方法讨论组合结构的设计问题。

## 一、两种极限状态

结构能否满足正常使用要求以及安全性要求，可用“可靠”和“失效”两个概念来评价，而极限状态是区别可靠与失效的界限。

极限状态可分为两类，即承载能力极限状态和正常使用极限状态。前者指结构或构件达到最大承载能力或出现不适于继续使用的过大变形，包括材料强度破坏、疲劳破坏、丧失稳定、整体倾覆、结构转变为机构或出现过大的塑性变形等。后者指结构或构件出现影响正常使用或外观的变形、影响正常使用或耐久性的局部损坏、影响正常使用的振动等。

## 二、近似概率极限状态设计方法基本原理

影响结构构件可靠性的因素多种多样，而这些因素往往是不确定的，它们的代表值与实际值之间存在着一定的差