

高等学校教材

钢结构入门

西南交通大学 钱冬生 编著

长沙铁道学院 曾庆元 主审

中国铁道出版社

1993年·北京

高等学校教材

钢结构入门

西南交通大学 钱冬生 编著

长沙铁道学院 曾庆元 主审

中国铁道出版社

1993年·北京

(京)新登字063号

内 容 简 介

本书是桥梁工程专业用技术基础课教材。内容有,概述、钢材、连接、拉杆、梁、压杆、屋架、疲劳和脆断等。主要介绍钢结构基本构件和连接的行为,以及验算方法。书中以新版《钢结构设计规范》(GBJ17—88)和《铁路桥涵设计规范》(TBJ 2—85)为主,并提供了较充分的算例。书中理论叙述深入浅出,适合于初学者。本书还适合土建工程同结构和桥梁有关的专业学习或参考。

高等学校教材
钢 结 构 入 门
西南交通大学 钱冬生 编著

*

中国铁道出版社出版、发行
(北京市东单三条14号)
责任编辑 刘桂华 封面设计 陈东山
各地新华书店经售
北京顺义燕华印刷厂印

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9.75 字数: 237 千
1993 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷
印数: 1—2000 册

ISBN 7-113-01409-7/TU·304 定价: 2.95 元

目 录

第一章 概 述	1
第一节 工程结构工程	1
第二节 荷载种类和极限状态	3
第三节 进行结构验算所用的方法	5
第四节 结构可靠度理论简介	8
第五节 本书所引用的设计规范	9
第二章 钢 材	11
第一节 概 述	11
第二节 钢结构常用钢种的牌号	13
第三节 钢的晶体结构及其性能	14
第四节 结构钢的技术条件	21
第五节 钢材强度设计值和容许应力	22
第三章 钉栓连接	25
第一节 概 述	25
第二节 钉栓接头制造工艺	26
第三节 单个钉栓在静载之下的承载力综述	29
第四节 长列钉栓接头抗剪的行为	30
第五节 钉栓连接的受力情况及其强度设计	32
第四章 焊 接	44
第一节 概 述	44
第二节 残余应力和残余变形	47
第三节 对焊接质量的控制	51
第四节 焊接接头行为和构造要求	52
第五节 焊接接头计算	54
第五章 拉 杆	53
第一节 钢拉杆在结构中的使用	58
第二节 钢拉杆的行为	59
第三节 拉杆验算	61
第六章 钢板梁(上)	65
第一节 结构中常用的钢梁	65
第二节 工形钢梁的行为概述	65
第三节 弹性工作的基本计算	66
第四节 钢板梁截面尺寸的选配	70

第五节	关于塑性抗弯承载力的考虑	71
第六节	梁在弹性工作时的弯曲剪应力分布和剪切中心	73
第七节	工形梁的总体稳定	76
第七章	钢板梁(下)	81
第一节	关于板件的局部失稳	81
第二节	关于受压翼缘的局部稳定	85
第三节	关于抗剪	87
第四节	抗弯对腹板的要求	89
第五节	关于抗弯又抗剪的考虑	91
第六节	腹板的颤曲和支承加劲肋	92
第七节	板梁的拼接	94
第八章	压杆	96
第一节	结构中钢压杆的行为	96
第二节	稳定系数和压杆验算特点	101
第三节	关于压杆计算长度, 以及规范对杆件长细比的限制	104
第四节	实腹压杆	106
第五节	空腹压杆	110
第六节	关于梁的总体稳定系数 φ_b	113
第七节	压弯杆	115
第九章	单层房屋的桁架式承重结构	119
第一节	概 述	119
第二节	檩条设计	122
第三节	屋桁架设计	124
第四节	柱桁式钢排架内力计算	130
第十章	疲劳和脆断	133
第一节	概 述	133
第二节	从常幅疲劳试验所得到的经验律	135
第三节	列在 TBJ2-85 内的疲劳验算	137
第四节	焊接梁疲劳试验的成果	138
第五节	高强度螺栓连接用于抗剪时的疲劳验算	140
第六节	将变幅应力换算为常幅应力的办法	140
第七节	关于钢结构脆断的基本知识	143
第八节	断裂力学参数和提高疲劳抗力、防止脆断的措施	147

第一章 概 述

第一节 工程结构工程

一、工程结构的共性

任何组合体，不论性质如何，都可以叫结构（例如，经济结构，产业结构）。选定某类材料，进行制造、加工，使它成为适合我们使用的事物，叫做工程（例如，生物工程，“菜篮子”工程）。用“工程”做“结构”的定语，这可以将工程结构这一类以工程材料（诸如混凝土和钢）为加工对象的事物，同其它类型的结构区分开来。

常见的工程结构有：桥梁和房屋建筑，水工结构，容器，管道，起重和运输设备，航空和航天设施，地下建筑等类。其共性则是：能在承受外界各种作用（包括荷载）的情况下，提供某些功能，满足我们使用的要求。

就功能讲，区别是很大的。例如，房屋有供办公用的，有供演戏用的，有供生产用的，有供住宿的，也有作仓库的；桥梁有行驶汽车的，有行驶铁路列车的，还有供自行车和人行使用的。对于这许多结构，工程结构工作者都应当同有关人员（含建筑师、工艺师、用户等）充分协调，在充分了解其功能的基础上将结构搞好。

承受各种作用而不受损伤，这是工程结构很重要的一个共性。作用，现分两种：一是直接作用，即荷载或外力；一是间接作用，指结构材料体积变化（因温度变化、或混凝土发生收缩等）、地基走动（包含地震在内），但结构受到约束、使变形不能自由实现而产生的力。若按习惯，这两种作用还时常被泛称为荷载。因为这两种作用都涉及到力，结构工作者就必须具备两套本领：一是学会传统的和当代的力学分析理论和实用做法，能将结构在各种作用下的内力、应力、变位、应变等推算出来；一是了解结构（及其各个构件、部件）在各种作用下的行为（反应），能进行其验算。

今先对结构行为作一简介。当力不大时，结构一般是处在弹性阶段，变形较小，叠加原理对于力和变位都适用。随着力的增加，钢材会发生延性变形（屈服），钢构件会因其几何尺寸长而瘦、在压力之下不能保持其形状而失稳（压溃），钢结构在多次重复受力之下会疲劳开裂。另外，环境条件也很有影响，例如：低温使某些钢种容易脆断，高温使钢材蠕变，腐蚀性介质使钢的裂纹迅速扩展。又如：有些荷载有时不能当作静力处理，它们（指风荷载等）会使结构振动，会影响到结构使用质量，甚至会威胁到安全。对于所有这些，结构工作者都应该从搞好自己工作出发，给予注意、关心、直至进行研究。

二、结构工程的内容

用“工程结构”一词做“工程”的定语，得“工程结构工程”，一般就简称之为结构工程。这就是指我们对于一项工程结构从开始到完成所应做的各种工作；而稍加引伸之后，则

结构的试验、分析研究和推广，现在也都是被包括在这一工程之内。

现将一项工程结构从开始到完成所应做的工作简介如下：

1. 规划 首先要从全局观点出发，认真地搞清楚对这一结构的具体功能要求，并要从经济上对于兴建这一结构的必要性、重要性、迫切性进行论证。要对设计条件和施工条件有明确规定，并且进行核实。对结构要提出构思。规划是做好各项工作的前提，若草率从事，那就有可能造成难予弥补的损失。

2. 方案编制 要针对所给具体条件，将各种有可能满足设计和施工要求的结构方案一一提出，并用粗略的几何关系或近似的力学进行分析，提出有参考意义的数据，据以初步拟定结构主要尺寸（例如：梁的高度，柱的间距及截面，基础尺寸等），考虑其是否经济合理。对于明显不合理者，可以及时淘汰。

3. 方案比选 对于有可能采用的结构方案，需要逐个进行进一步的力学分析，拟定结构主要尺寸，进而对其造价、材料数量、劳动力多少、施工方案（包含对其关键或困难的解决方法）、建成后的使用情况和维修费用等，逐项考虑，而后对所有的方案进行综合对比，从而提出推荐意见。

4. 技术设计和施工设计 在推荐的方案业经批准之后，应该对结构进行较精确的分析（所用方法必须符合规范所定的原则），据之以最终确定结构各部分的尺寸。这就可以绘制技术设计图，作为施工依据。至于施工场地布置图、施工组织设计、施工临时结构设计等工作，则主要是施工单位的事。但在当代结构日趋复杂的情况下，诸如预应力混凝土超静定结构、斜拉桥之类，其部件在施工中所受的力往往很大（同结构建成后的受力情况截然不同），且细节构造图也很多。为取得其成功，设计和施工单位必须密切合作。重要细节的设计图，设计单位应当在征求施工单位意见之后再发出。对于施工单位所做的施工设计，设计单位则有责任进行认真复核。为了能将事故消除在尚未发生之前，现在已经有必要这样地进行。

三、进行工程结构评价所用的指标

适用、安全、经济、美观，这便是进行评价所常用的指标。

适用，主要指结构在常遇到的工作荷载（外力）之下，不会发生使人感到担忧的事。所谓担忧，按习惯就是指：挠度大、振动明显、混凝土开裂、钢结构有永久性变形之类。推广开来，结构若在提供其特定功能方面有缺陷，例如：房屋对通风、采光、保温诸事的处理不够完善，那也是在适用方面所存在的问题。结构工作者虽然对那些事不负主要责任，但是，既然参与了这一工作，那就应该适当地注意。

安全，主要指：①在荷载作用之下，对于各种破坏状态都应具有必要的安全保证；②在超常的偶然荷载（例如，地震，台风，爆炸、撞击之类）作用之下，结构的破坏过程不要来得太快，最好是有预兆，使用户有可能赶紧撤出；而且，还希望修复这种遭灾结构的工作不要太难，费用不要太高。

经济，主要是指其造价和保养、维修费的综合指标要尽可能比较低。

美观，主要指结构应该和环境协调。结构体型要匀称，线条要流畅，色彩要悦目，传力途径要合理。要注意：许多结构形体很大，寿命又长，使许多人在若干年内要同它们厮守在一起，对观感、情绪都有影响。设计人若不对结构的美观效应进行考虑，有时会给社会带来不少无形损失。

第二节 荷载种类和极限状态

一、荷载简介

荷载都是随机变量，但其变异性则有大有小。在历史上，为了进行结构设计的需要，总要给不同的荷载分别制订其代表值；还要为各种有可能同时出现的荷载制订其组合的计算方法。《工业与民用建筑结构荷载规范》（TJ9-74）（以下简称TJ9-74规范）是给出荷载规范的一例。在《建筑结构设计统一标准》（GBJ68-84）（以下简称GBJ68-84标准）颁行后，建筑结构设计都应舍弃容许应力法，改以结构可靠度理论为基础的、包含极限状态法在内的办法进行设计。这样，其原先由容许应力法计算的一个笼统安全系数 n 所包含的内容，就应分解为荷载和抗力两个方面。其在荷载方面的标准值和（荷载项的）安全系数就由新的荷载规范，即《建筑结构荷载规范》（GBJ9-87）来给定（以下简称GBJ9-87规范）。而抗力安全系数、乃至对结构的间接作用，则分别由不同的结构设计规范给出，《钢结构设计规范》（GBJ17-88）（以下简称GBJ17-88规范）就是结构设计规范中的一种。

今参照GBJ9-87规范所列荷载项目，综述如下：

1. 永久荷载（恒荷载） 指在结构整个设计基准期之内，其数值变异性相当小的荷载。结构自重，特别是钢桥的结构自重，由于其尺寸和材料比重变化小，如果在自重计算中业已将焊缝、钉栓头、螺母等自重仔细计入，则其实际重量偏离计算值的变异性就会是很小。非结构物的重量也是恒荷载，诸如铁路桥桥面（钢轨、桥枕等）、公路桥面铺装等，其变异性就要比钢结构自重的变异性稍大。恒荷载标准值一般是取其按规范所给材料比重，照设计图所给尺寸来推算的计算值。在GBJ9-87规范附录一中给出了常用材料和构件的自重。

2. 使用活荷载 在GBJ9-87规范中，活荷载是可变荷载。这里的“使用”二字，是本书所添加的；添加的目的，在于强调只有这一活荷载是同我们对结构的使用要求相关。楼面 and 屋面活荷载，见GBJ9-87规范第三章。铁路桥的列车活载，见《铁路桥涵设计规范》（TBJ2-85）（以下简称TBJ2-85规范）。这些活荷载的变异性是很大的。其列在设规中的数值，现在叫标准值；而按其性质则是额定值、公称值。按习惯，将恒荷载和活荷载的这些数值直接相加，总名是叫工作荷载。规范在制订这些活荷载数值时，一般已经是参照日常所遇各值、往大的方向选取；就出现的概率讲，它们决不是频繁，其中有一些甚至是罕遇的（注：铁路标准活载——中活载，便是极为罕遇的）。

3. 雪荷载 这是可变荷载（即活荷载）之一。在GBJ9-87规范中，被列在第五章。除开启桥之外，桥梁一般地不考虑雪荷载。

4. 风荷载 这也是可变荷载之一。在GBJ9-87规范中，被列在第六章。可以说：人们对风荷载的研究虽然进行了不少，但没有搞清楚的问题仍然不少。结构因风致毁的事故，现在还是年年都有。

二、钢结构的极限状态

钢结构总是由许多基本构件组合而成。基本构件，主要是指拉杆、梁和压杆，还包括它们所用的连接。

极限状态，一般分为两类：一类是破坏性的，一类是工作达到极限状态性的。前者是指结构已不能使用了，只好报废；后者是指其状态业已使人担忧。前者是一安全问题，后者是一适用问题。在规范中，前者今被称为承载能力极限状态，后者今被称为正常使用极限状态。疲劳开裂，在其后期应属破坏状态，而在其裂纹细小时往往很难被发现，那就不宜于说它是破坏；本书现不对其分类进行讨论。文献所说的钢结构极限状态，现在主要是用于指其基本构件的各种状态。

轴向受拉的杆件，叫拉杆。其破坏状态是指屈服、拉断、脆断；工作极限状态是指振动（每指颤动）过大；此外，还有疲劳。现今钢结构总是采用结构钢来制造。而结构钢的特点之一，是屈服点 f_y 对拉力强度 f_u 之比（叫屈强比，可看表 2-2，并据之以计算 f_y/f_u ）较小（在 0.75 之下）。如果杆件毛截面的拉应力达到屈服点 f_y ，杆件的伸长量会达到杆件长度的 1.5% 乃至更多，而且，其很大一部分是永久性变形（伸长）。当桁架梁各主要杆件中出现这样的拉杆时，整个桁架梁势必就要报废。因此，毛截面全部塑化，是一破坏状态。若拉杆是用钉、栓作连接的，其净截面也有可能被拉断（条件是其净截面的拉应力达到拉力强度 f_u ）；只因净截面积对毛截面之比是 0.8 左右，这个值大于结构钢的屈强比。这种破坏状态应当很少出现。这样看来，只要将拉杆毛截面完全屈服当做主要的破坏状态就行了。但是，习惯业已使工程界接受了以净截面完全屈服为破坏状态这一更安全的准则，新的设计规范也就按着习惯、照旧办理了。对于脆断和疲劳，凡是有拉应力、剪应力之处，都要考虑；这就是说，梁和连接也有这两个问题，留在第十章讲。至于防止振动过大，则在于不让杆件过分长细。

轴向受压（或叫中心受压）的杆件，叫压杆。当杆件较短时，其全截面的屈服是一种破坏状态。当杆件较长时，由于实用杆总有一些初始弯曲，轴向压力使有初始弯曲的杆件受弯。在压弯共同作用下，杆件出现很大的屈曲变形，其轴向抗压承载力迅速到达其极大值，这叫压溃；它是一种明显的破坏状态。长而细的压杆也会振动过大，防止的办法也是不让它过分长细。

因承受横向力（横向是指垂直于杆长的方向）而受弯的杆件，叫梁。梁的主要功能是抗弯，其次是抗剪。若有相应的构造措施，使梁不致失稳，则其翼缘的法应力不难达到 f_y ；在刚刚达到此状态时，梁截面还是处于弹性状态，梁的变形不会失控，若取这一状态为“破坏”，那是较为保守的。在那之后，若继续增加荷载，梁截面也有可能达到全截面屈服（位于中性轴一侧的是受压屈服，其另一侧是受拉屈服），这叫塑性铰状态。这种“铰”将在弯矩不增加的条件下，让梁在该处的转角不断加大，这就在抗弯方面造成真正的强度破坏。此外，梁的工作极限状态，是指挠度过大，振动过大。防止的措施，一是对挠度制订限值，不允许其超过；一是不许其尺寸过于长而瘦。

结构杆件的连接，常用的是铆接、抗剪（承压）型螺栓连接、焊接，以及摩擦型高强度螺栓连接。对于前三种进行破坏试验，据以制订抗力，防止其出现破坏状态就行了。至于摩擦型高强度螺栓，因为其正常的传力方式是靠摩擦力，工程界乃有不少人将其摩擦力被认为是使连接内部发生滑动而算作“破坏”状态，但这是同破坏状态的定义不一致的。破坏状态，是指承载能力达到极限状态，并且承载能力应当按抗力最大值来决定。高强度螺栓连接在其内部发生滑动后，栓身对孔壁承压，栓身受剪，抗力就会明显地提高。对抗力的这一种提高，我们应当重视。

另外，对静定结构，一根杆件或一个截面的破坏，往往使整个结构不再能够承受荷载。

所以,在设计规范的规定中,要求我们对所有有可能起控制作用的杆件和截面,都进行破坏状态验算。可是,对于超静定梁或刚架,在其一个截面达到塑性铰状态时,整个结构却还没有丧失承载力,这就是说,它还有潜力可供挖掘。因其还没有被当前的设计实践视为常规,现只拟在“进行结构验算所用的方法”一节最后,用图1-1对它作一简介。

第三节 进行结构验算所用的方法

进行结构截面验算的目的,是证明所选择的截面尺寸能够采用。采用的原则,则是能够保证同其验算所对应的那一极限状态很少出现。

为了安全,必须让工作荷载效应 P 小于构件在破坏前所提供的抗力 R 。在历史上,抗力 R 要用大型的试件做破坏试验来决定。用 n_1 表示安全系数,所允许的工作荷载效应 P 就要满足下式:

$$P \leq R/n_1 \quad (1-1)$$

根据材料力学的知识,知道抗力 R 可以用材料强度和杆件截面特性来推算。对于拉杆及很短的压杆,由于其应力可以按匀布于全截面来计算。在取其屈服点 f_y 为结构钢强度的情况下,用 A 表示杆件的有效截面,则 $R = f_y A$;而在工作荷载效应 P 之下,匀布于截面的荷载应力 $\sigma = P/A$;将这两种关系代入式1-1,得

$$\sigma = P/A \leq f_y/n_1 \quad (1-2)$$

这就将 n_1 从 R/P 变成 f_y/σ 。 R/P 乃是荷载比,是符合安全系数这个概念的。 f_y/σ 则是应力比,在轴向受力杆这里恰好是同 R/P 等价,但不适用于梁。

对于梁,真正的抗弯强度破坏出现在塑性铰状态,其时的应力分布图大致是两个矩形〔参看图5-3(b)④〕。由于保证塑性铰出现所需的防止失稳的构造措施很严格,使常规设计难于遵照办理;于是,将翼缘应力刚刚达到 f_y 或只是稍稍超过 f_y 当作“破坏”,是可以被工程界接受的,而应力分布图在其应力刚达到 f_y 的情况是两个三角形。由于应力分布不同,就使其考虑全截面塑化时的 R/M (荷载比)同其按弹性假设推算的 f_y/σ (应力比)不等价;在这里, M 代表荷载所产生的弯矩, R 代表抗弯承载能力(塑性铰弯矩), f_y 是屈服点, σ 则是照弹性假设,用材料力学公式,按 M 推出的弯曲法应力。

采用容许应力法时,保持应力比(安全系数)为常数是其准则。参照式1-2,可写出梁的法应力验算式:

$$\sigma = M/W \leq f_y/n_2 \quad (1-3)$$

式中 W ——截面弹性抵抗矩;

n_2 ——代表应力比的安全系数;改变其下标,为的是方便于说明 $n_1 \neq n_2$ 的含义。

按照此式,应力比 $f_y/\sigma = n_2$ 。

若采用塑性设计法,就应该保持式1-1所示荷载比(安全系数) R/P 为常数。对于梁来讲,抗力 R 是其塑性铰弯矩 $f_y W_p$,对应于 P 的是其由工作荷载所产生的弯矩 M ;于是

$$M \leq f_y W_p/n_1 = f_y \beta W/n_1 \quad (1-4)$$

式中 W_p ——截面塑性抵抗矩(见第六章第五节);

β ——梁截面的形状系数,且 $\beta = W_p/W$;

n_1 ——代表荷载比的安全系数。

若就式1-3和式1-4消去 $M/(f_y \cdot W)$ ，将得 $n_1 = \beta n_2$ ；即：对于同一情况（工作荷载相同，梁截面和跨度等尺寸相同），用荷载比 n_1 所表达的安全系数比其用应力比 n_2 所表达的安全系数为大；其比值是 β 。

形状系数 β 的值，随翼缘截面积的增大而减小（若翼缘面积是零，工字形梁变成矩形梁， $\beta = 1.5$ ），它还随翼缘厚度对梁的全高之比的减小而减小。对于型钢梁， β 可高达1.15左右。对于大型钢板梁，有时低于1.10（例如，1.08）。

因为对式1-4所表示的塑性设计缺乏使用经验，GBJ17-88规范第九章将其钢材的相应强度设计值按其正常情况（该规范的第三章）所订 f 值的0.9取用（注： f 的定义见式1-8的注）。考虑到式1-3所依据的“破坏”状态偏于保守，又参照采用容许应力法的经验，对于承受静力的梁，可用下式进行验算：

$$\sigma = M/(\beta_0 W) \leq f_y/n_2 \quad (1-5)$$

式中 β_0 ——允许梁的截面出现部分塑化而引用的系数，其值比式1-4中的 β 为小。

GBJ17-88所采用的 β_0 值，见其表5.2.1。对于工字形梁， $\beta_0 = 1.05$ 。在引用 β_0 之后，式1-5右侧的 f_y/n_2 就可以同式1-2右侧的 f_y/n_1 取用同一值。（注： β_0 在GBJ17-88规范第4.1.1条中，用 γ_x 和 γ_y 表示）。

从以上所列的5个验算式不难发觉：它们都只是使用单一的安全系数， n_1 或 n_2 ，很难使恒活比值（恒荷载对活荷载之比值）不同的结构在出现破坏（失效）的机率方面接近于相等。理由是：结构设计涉及两个方面，一是荷载，二是抗力。如第二节所介绍，恒载的变异性小，活载的变异性大，按相同的“很少发生”的机会来推算其在验算式之中所应取的大值，用其相对于各自的标准值来表示，则恒载的设计值应该较小，活载的设计值应该较大。只有这样做了，恒活比值不同的结构才能在出现破坏的机会方面接近于相等，或者说，其安全度（用数值来表达的安全性）才能比较均匀。但在采用单一安全系数的前提下是做不到的。因此，正确的做法应该是：将单一安全系数分解为两类，一类是抗力系数，一类是荷载系数；且各系数都应在调查和统计分析的基础上综合考虑，而后分别制订。由此所得的验算式宜于使用下列形式：

$$\sum \gamma_i S_i \leq R = R^0 / \gamma_R \quad (1-6)$$

式中 S_i ——按荷载标准值所推算出来的效应（指轴力、弯矩之类）；

γ_i ——各个荷载系数（用于反映各该荷载变异性的 大小，借使各 $\gamma_i S_i$ 出现的机会接近于相等）；

R ——抗力设计值（可以是 fA 、 fW 之类）；

R^0 ——抗力标准值（可以是 $f_y A$ 、 $f_y W$ 之类）；

γ_R ——抗力项安全系数。

为使各种极限状态都能很少发生，就应该针对每一极限状态，都按式1-6的原则分别建立一个式子。因此，这一新的设计方法仍然适合于叫做极限状态法。对于破坏状态和工作极限状态的防止，式1-6都适用；区别是：对于破坏状态验算所用的各 γ 值取得较高，而工作极限状态验算所用的 γ 值则应取值较低（接近于1.0）。当前，由于钢结构设计所用的内力分析（即从荷载推算荷载效应）和截面应力验算都普遍地采用弹性假设，在同一性质（例如、抗弯）的两种状态（破坏及工作极限状态）验算中，两种设计应力值呈正比关系，一种状态的通过往往可用以说明另一种状态也能通过。从节省计算工作量出发，在修订规范时业已有意识地让破

坏状态验算起控制作用。这就是规范对许多性质的验算不提其工作极限状态验算的原因所在。

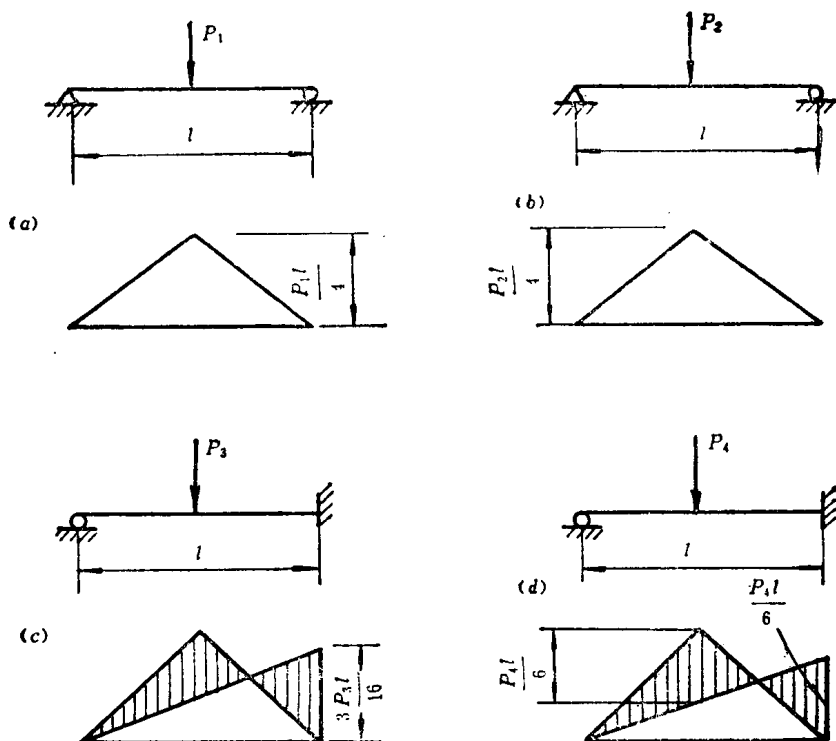


图 1-1 超静定梁同静定梁抗弯承载能力的对比

现将超静定结构潜在承载力高于静定结构的道理，用图1-1作一简介。从图1-1(a)至图1-1(d)，梁的跨度相等，荷载都是作用在跨度中点的一个集中力 P_i 。图1-1(a)和图1-1(b)是简支梁，作用弯矩同荷载 P_i 成正比。图1-1(a)按照弹性抵抗矩计算，图1-1(b)按照塑性抵抗矩计算。参照式1-3和式1-4，不考虑 n_1 和 n_2 的差别，可知 $P_2/P_1 = W_p/W = \beta$ 。图1-1(c)和图1-1(d)是右端固定、左端简支的一次超静定梁。图1-1(c)采用弹性分析，当其右端弯矩 $3P_3l/16$ 达到 $f_y W$ 时， P_3 值到达极大，由此可写出：

$$P_3 = 16 f_y W / 3l$$

对图1-1(d)采用塑性设计，当右端弯矩达到塑性铰弯矩 $f_y W_p$ 时，跨中弯矩还未出现塑性铰，“机构”还未形成，这并未破坏。现用弯矩叠加法推算其出现“机构”时的荷载 P_4 。在跨中荷载 P_4 作用下，跨中的“简支梁弯矩”是 $P_4 l / 4$ 。右端所出现的负值塑性铰弯矩作用于简支梁（其基本体系），应当使跨中产生 $-f_y W_p / 2$ 。在上述两弯矩的叠加值到达塑性铰弯矩 $f_y W_p$ 时，跨中也应出现塑性铰，使这梁成为“机构”而破坏。由此得：

$$P_4 l / 4 - f_y W_p / 2 = f_y W_p$$

即

$$P_4 = 6 f_y W_p / l$$

让这式除以 P_3 ，得 $P_4/P_3 = (9/8)\beta$ 。同 $P_2/P_1 = \beta$ 相比，可以认为超静定结构承载力的储备高于静定结构（但这一结论需要有若干前提条件，例如，有构造措施使梁能出现塑性铰，而且允许 $n_1 = n_2$ ）。

第四节 结构可靠度理论简介

在第三节第一段讲,“要能够保证……那一极限状态很少出现”。这句话中的“很少”,能不能用数量来表达呢?式1-6所示的极限状态验算表达式还没有回答这个问题。要想回答这个问题,就得开展结构可靠度理论的分析研究。今对这一理论作一简介。

结构设计涉及荷载效应 S 和抗力 R 两个方面。在最简单的情况下, S 只由一项荷载形成。若 $S < R$,则结构没有进入极限状态,是安全的。若 $S \geq R$,则进入极限状态,是不安全的,则失效。当 S 和 R 都是随机变量时,则结构失效率 P_F 的定义是:

$$P_F = P(S \geq R) \quad (1-7)$$

式中 $P(\cdot)$ ——在圆括号内的事件(现是 $S \geq R$)发生的概率。

这个 $P(S \geq R)$ 的值,就是对所说“很少”的一个回答。

今用图1-2所示 S 和 R 的频率密度图阐述失效率的含义。这两根频率密度线是根据对 S 和 R 分别调查统计分析的结果,换算到同一构件同一截面的可比量。例如,当构件是拉杆时, S 表示作用的轴力, R 表示对轴力的抗力,这两者都以kN计。频率密度曲线一般是钟状。密度分别达到极大时的 S 及 R ,是其众值,今用 $\bar{S}$ 和 $\bar{R}$ 标出。对于这个简单情况,验算式可从式1-6简化为(这式中的 S° 及 R 都是定值):

$$\gamma_1 S^\circ \leq R \quad (1-6a)$$

式中 S° ——荷载标准值所产生的效应。

每一条频率密度曲线各有若干特征值,众值是其中之一。规范所制订的设计值和这些特征值的关系,总是已知的。所以,凭式1-6a内所含的等式 $\gamma_1 S^\circ = R$,可以将两条频率密度曲线的相对位置定下来。由图可见,这两条曲线相交。图内的阴影线范围,则说明 $S \geq R$ 的情况是存在的。这就是说,虽然让结构设计满足了式1-6a的要求,由式1-7所表示的失效率仍然存在。

图1-2内所示的失效率应当如何推算,这是一个数学问题。让失效率的值是多大,就可以使人们认为有“保证”,则应该结合着对其按旧规范所实现的既有结构失效率的检算来决定。在修订GBJ17-88规范时,曾经按GBJ68-84标准所阐明的原则及做法,进行了这一工作。其由检算所得的既有钢结构失效率,是在 0.25×10^{-3} 至 1.5×10^{-3} 之间(对于延性破坏而言)。现今所颁行的GBJ17-88规范所采用的验算形式是极限状态法,其荷载系数是采用GBJ68-84标准和GBJ9-87规范所业已制订者,抗力系数 γ_R 则是按照上述失效率,凭可靠度理论决定的(目标是使按新规范设计的结构在平均的可靠度方面不比其按旧规范设计者为差,而且,按不同荷载条件、为不同极限状态所设计出来的结构在可靠度方面的均匀性要比其按旧规范办理者大为改善)。

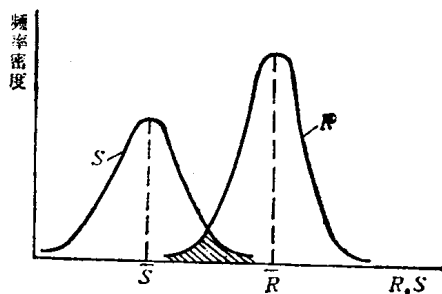


图 1-2 结构可靠度理论简介

第五节 本书所引用的设计规范

一、对设计规范的认识

规范是一种标准。正确地执行规范，就能使所实现的事物达到某种公认的标准。

结构设计规范主要的任务，就是指导设计人正确地决定结构的各主要尺寸，能保证安全，而且经济合理。为了达到这一目的，设规就必须包含：对结构的原则要求、荷载及各种抗力的设计值、选用内力分析方法的原则、进行截面验算的公式、关于构造的规定、关于工程材料和施工工艺的质量要求等。

为了搞好结构设计，设计人应该将设计规范最主要的内容吃透，并且在实践中贯彻。所以，设计规范每一版本的影响都很深远，涉及到一代设计人员，涉及到一代工程结构，而且还将通过他们而影响到下一代。为使规范跟上时代步伐，在大范围之内取得效益，对于设计规范的修订，应该积极主动；但考虑到其影响的深远，意识到每一个不很妥帖的规定都会使很多人卷入某些不必要的争论或混乱，则工作又应该慎重。对于设计规范的使用，首先是要尊重规范，接受规范的指导；对于规范正文内的各个“必须”、“应”、“不应”、“不得”、“严禁”，必须严肃对待，当作法令来遵照。但也应该认识到，规范篇幅有限，规范的修订需要时间，规范代替不了丰富的活生生的生产实践和科学研究，代替不了工程界的创造。努力用当代最新成就来武装自己，针对自己面临的特殊问题而提出解决方案，即使出了规范所认可的范围，也是一个设计人员所应该无所畏惧地做到，不应该凭托词推卸责任的。

二、关于《钢结构设计规范》（GBJ17-88）

GBJ17-88规范采用了极限状态法。而其前身（TJ17-74）则是使用容许应力法。新规范对应于式1-2和式1-5的式子是：

$$\sigma = P/A \leq f = f_y / \gamma_R \quad (1-8)$$

$$\sigma = M/\beta_0 W \leq f = f_y / \gamma_R \quad (1-9)$$

式中 f ——钢材强度设计值，今是按屈服点 f_y 除以 γ_R 来制订；对于3号钢和16锰钢，其 γ_R 都是1.087，即1/0.92。

注意这些式子中的 P 、 M 、 σ 都是和式1-6内的 $\Sigma \gamma_i S_i$ 对应。它们都是计入荷载系数 γ_i 之后的设计值。按照《建筑结构荷载规范》（GBJ9-87）第2.2.6条，一般情况下，永久荷载的 γ_i 是1.2，可变荷载的 γ_i 是1.4（附注：这两者的效应若异号，应该让永久荷载的 γ_i 为1.0）。本书将在第九章列出荷载系数 γ_i 。在其他各章，将采用“设计值”一词表示 P 、 M 、 σ 之已将 γ_i 计入者。

三、关于《铁路桥涵设计规范》（TBJ2-85）

TBJ2-85规范仍用容许应力法。其同式1-2和式1-3对应的验算式是：

$$\sigma = P/A \leq [f] = f_y / n_1 \quad (1-10)$$

$$\sigma = M/W \leq [f_w] = f_y / n_2 \quad (1-11)$$

式中 $[f]$ ——基本容许应力；对于工作荷载的基本组合（只包含恒载及使用活载）， $n_1 =$

$[f_w]$ ——实质上是 $1.05[f]$ ；这是按习惯沿用的，它和 $n_2 = 1.62$ 相对应。

注意这些式子中的 P 、 M 、 σ 都是用工作荷载[见本章第二节之一，指荷载标准值的叠加]所求出的效应。在容许应力法内，是从来不用 γ_i 的。

四、关于某些安全系数的对比

1. 试将GBJ17-88规范中的 γ_i 和 γ_R 换算成单一的安全系数，借能同容许应力法相比。

各荷载系数 γ_i ，总起来是可以用其加权平均值 γ 表示的。在恒载 $\gamma_i = 1.2$ ，活载 $\gamma_i = 1.4$ 的条件下，若恒载、活载各占0.5，则 $\gamma = 1.3$ ；若恒载占0.25，活载占0.75，则 $\gamma = 1.35$ 。

其可以同容许应力法单一安全系数相比的应当是 $\gamma \times \gamma_R$ 。对于3号钢及16锰钢， $\gamma_R = 1.087$ 。于是，若恒活比值是在上述两种情况之内，其可同容许应力法安全系数相比的是 $(1.30 \sim 1.35) \times 1.087 = 1.41 \sim 1.47$ 。

2. TBJ2-85规范所取的安全系数总是较高的原因，主要是铁路列车重量曾经在历史上不断增长。为使新建成的钢桥不致因列车重量增长而过早地报废，就要在新桥设计中故意提高安全系数。但在对既有铁路钢桥进行检定时，检定容许应力对 f 的安全系数却是1.4（基本荷载组合），它还是与钢建筑结构所曾使用的相同。

第二章 钢 材

第一节 概 述

一、钢的冶炼

钢一般是用生铁冶炼而成，但也可掺用废钢或全部用废钢进行冶炼。从高炉炼出的生铁，最好是不等其冷却，在高温熔融状态就送往炼钢炉，这样能节省燃料。生铁含碳量每高达4%~6%，而且还含有硅、锰、硫、磷，以及随矿石和焦炭而带来的其他元素和非金属杂质。

在高温状态，氧化硅、氧化磷等呈酸性，氧化钙、氧化镁、氧化亚铁、氧化亚锰等呈碱性。酸性物和碱性物相遇，就要中和，也就是起化学作用。因此，当炼钢所产生的渣是酸性时，炼钢炉的衬砌（耐火砖）也必须是酸性的；当炼钢所产生的渣是碱性时，衬砌就必须是碱性的。这样才能使衬砌免遭腐蚀。若生铁的硫、磷含量都低，采用酸性衬砌是可以的。但若其硫、磷含量不低，就必须用碱性衬砌，以便向炼钢炉内加碱性熔剂（石灰石、白云石、生石灰之类），使它同生铁中的硫、磷化合，带入到碱性渣内，借使所炼成的钢的硫、磷含量能够降低。

常用的炼钢炉有下列三类：

1. 转炉 特点是不给热源。将熔融铁水倾入炉中后，用空气或氧气进行吹炼，凭氧化所产生的热保持铁水处于液态；在吹炼好了之后，转动炼钢炉，将钢水倾倒出来。这种方法是在19世纪50年代，由英国柏塞麦提出来的。当时是用酸性衬砌，将高压空气由炉底许多管嘴向上吹。在吹炼中，由于各元素同氧的化学亲和力有差异，首先是硅、锰氧化，形成渣；其次是碳被氧化，在炉内形成一氧化碳，再在炉口外烧成二氧化碳，其火舌很长、很亮；而在碳快要烧完时，火舌顿时回缩。这时，硫、磷含量还基本不变，而酸性炉却必须出钢了；这样，所炼成钢的几个主要化学成份大致是0.03% C, 0.05% Mn, 0.01% Si。在19世纪70年代，发展了碱性炼钢转炉，它是在生铁中的碳基本烧完之后继续吹炼，凭石灰等熔剂来降低硫、磷含量。后来为了提高热效率，曾有一些转炉将底吹改为侧吹。到本世纪50年代，奥地利开始使用氧气顶吹炼钢法（因是在L-D两地开始，也叫L-D法）。所用氧气的纯度，要在99.5%以上。将高压纯氧从炉顶通过喷嘴射到铁水表面，产生FeO，但FeO迅速被铁水中的碳所还原，产生气体CO，以气泡形式造成铁水翻腾，使冶炼作用得到强化。对于高磷铁，一般是将石灰粉末投入，让磷酸钙以泡沫状态涌出。同使用空气吹炼者相比，氧气吹炼的炉温高（有时还要加废钢来降温），钢的化学成份容易控制，可以冶炼许多钢种，并能保证质量。从进料到出钢，每炉冶炼时间大致需要20至40min。每炉出钢量，可以达到30至180t，现在已经发展到300t。为达到同样的年产钢能力，这种方法所需要的基建投资要比下面所讲的平炉法节省很多。

2. 平炉 特点是用煤气、重油等在炉内燃烧,借以保持炉温($1800\sim 2200^{\circ}\text{C}$),来满足冶炼需要。炉内所进原料,可以是熔融铁水,也可以是冷料(废钢、生铁块等)。在投入的熔剂熔化并浮在铁水之上后,凭熔剂和铁水间的扩散作用进行冶炼,由此所形成的熔融渣仍然浮在上面。这种方法是19世纪60年代由西门子和马丁分别在英、法两国发明的。起初是用酸性炉,后来为适应硫、磷含量较高的生铁而比较普遍地改用碱性炉。每炉冶炼时间,现在是 $6\sim 8\text{h}$ 。每炉出钢量,一般是 $50\sim 400\text{t}$ 。钢的质量和品种,平炉钢要比空气吹炼的转炉钢好得多。所以,本世纪50年代之前,有不少主要产钢国是以平炉法炼钢为主;我国当时也是这样。但在氧气顶吹转炉的优越性得到举世公认之后,这种方法的使用已不如从前广泛。为了缩短冶炼时间,氧气顶吹这项措施现在也试用于平炉。

3. 电弧炉 可以用冷料,用电热使它熔化(在理论上,可用电阻或电感应来加热,但现今工业生产是以用电弧法者为主),在还原性气体和渣的保护下进行冶炼(因热源不靠燃烧,其气体就可以是还原性的);其合金成分可以控制得相当精确。可用于生产高质量的钢。因其成本高,现今只用于生产特种用途钢。

二、钢的脱氧

冶炼快结束时,钢水内的含氧量较高(在 $0.02\%\sim 0.07\%$ 之间)。按脱氧方法不同,有下列四类钢:

1. 沸腾钢 是直接用含氧量较高的钢水浇注钢锭,让氧在钢锭凝固过程中以CO气泡形式翻腾而出。有许多气泡将因锭的头部业已凝固而被滞留在锭身之中。这样,锭的外形尺寸就没有什么损失,使钢锭可以轧制成材的部分所占比率很高。在轧制过程中,锭内的气泡将因其壁面并未氧化而容易闭合,并不引起多大问题。但是,在钢锭凝固过程中,先凝固的是锭的外层和铁模相接触的较冷处,其成份是同纯铁相近;而钢水内的硫、磷等有害元素将较多地留在最后凝固的锭心部分。这一现象叫偏析。它使钢材化学成份不均匀,质量受到影响。

2. 镇静钢 是在冶炼后期向炉内投入较多的锰铁、硅铁、硅锰合金之类的还原剂,使其含氧量大为降低而炼成的钢。这样,在铸锭时,就没有气体翻腾,钢水表面宁静。在凝固过程中,钢的体积收缩,锭上部最后凝固的部分将因下部的收缩而形成喇叭状缩孔。由于缩孔处的材质差,在将钢锭送去轧制之前,应该切除。切除量每占 20% ,这样,钢的成材量降低,钢材成本提高。为了减少缩孔所占比率,在锭模之上,常常加一保温帽。就成材讲,镇静钢所含硅、锰等有益元素较多,材质的偏析情况较少,比沸腾钢优越得多。

3. 半镇静钢 其向炉内所投还原剂较少,使其在铸锭过程中仍有一些翻腾。同时,在凝固过程中,还可在锭的顶部盖一冷铁板,使该处和空气隔绝,不致氧化。这样,成材率可较高,材质也较好。现今在钢结构生产中,时常用半镇静钢来代替镇静钢。

4. 真空处理钢 若将钢水置于真空之中,则不仅氧气将以CO形式逸出,而且氢、氮也将被抽出。和其他用硅、锰等还原剂脱氧者相比,其他有渣,而这种处理没有渣。所以,当需要“洁净”的钢(指夹杂很少者)时,就应采用这种方法。

又:上述四类钢都是先铸锭,后轧制,而现今正在推广的连续浇注法,则是让液态钢连续地冷却成固态长条,并且及时将它弯转、切割为“钢锭”,以便轧制。其成材率乃提高很多。