

通用结构设计理论与实践

欧添雁 著
龚建伍 主审

华中科技大学出版社
中国·武汉

自序

当下,建筑行业有一种风雨欲来之势,很多年轻的结构工程师对未来充满迷茫。随着结构设计市场萎缩,设计人员过剩,结构设计市场的竞争将会更加激烈。结构设计市场将趋于追求“降低造价、精细设计”,仅仅靠关系维系的市场将难以为继。很多结构工程师也将会在这次危机中被淘汰。

在过去十多年里,设计市场火爆,学校扩招,结构设计从业人数暴涨。大家都忙着享受盛宴,却忽略了结构工程师设计水平的提高。我作为大型央企设计院结构工程师,国内外工程大大小小做了几十个,与很多国家的同行们做过交流,也做了很多图纸审查工作,强烈感觉到我国很多结构工程师缺乏结构分析能力和创新能力,90%的从业人员都是规范和软件的奴隶。如果将结构工程师分为画图级、简支梁级、框架级和土木级,我认为我国80%的结构工程师属于墨守成规、缺乏创新的画图级和简支梁级。这是由普遍不重视设计理念造成的。

粗劣的技术水平必然导致设计效率低下,设计压力增大。结构工程师的培养需要一场革命,培养方向是基于结构行为分析的结构设计方法(PSR方法),培养目标是结构工程师能熟练地运用结构基本理论解决结构设计问题。不管辅助软件好坏,不管有没有规范,结构工程师都能设计出合理的结构。

结构工程师的培养应该回归到正确的轨道上,软件做软件该做的事,规范做规范该做的事,工程师做工程师该做的事,要做到“我的设计我说了算”。

如何提高设计水平?本书主要从以下方面系统地介绍结构设计理论。

- (1) 设计思想:基于结构行为分析进行危机预测与设防。
- (2) 设计思路:包括设计目标、设计方法、设计决策手段。
- (3) 设计目标:系统理解设计控制目标,根据结构特点和使用要求设定合理的目标。
- (4) 设计方法:根据结构行为和设计目标采取合理的方法去实现。

设计决策手段多种多样,在明确设计目标和了解结构行为的基础上,就会找到很多简便的方法。

结构设计是有思想的,它是一门学问,也是一门艺术,做透了就像玩积木,做不透就像走迷宫。设计做得多不如想得多,想得多不如想得透。总而言之,要将结构设计做透,形成一种习惯。

欧添雁

2018年4月于武汉

前 言

结构工程师工作负担重、压力大,这是普遍现象。作者作为过来人,本着帮助年轻人的目的,这些年在网上与同行们进行了很多技术交流。但是这种交流的影响和效果有限,为了更好地与广大同行交流探讨,作者结合多年来的设计实践与工程经验,撰写了这本《通用结构设计理论与实践》。

本书阐述了基于结构分析的结构危机预测与设防控制理论(PSR 结构设计理论),分别介绍了结构设计目标、设计决策方法和手段等问题。本书将材料学、力学、数学和系统工程有机结合,从而达到结构设计“安全、经济、适用”的目标。

本书针对当前结构工程师最缺乏的设计思想作了论述,主要有以下 5 点。

(1) 结构设计目标。本书提出了结构设计三水准“小震不坏、中震可修、大震不倒”理论及其实现方法。

(2) 结构行为分析。理解结构行为是结构安全和经济控制的基础。结构设计应系统分析结构布置、构件和材料等因素对结构安全的影响。在结构因素分析的基础上作设计决策,分别介绍钢结构和混凝土常见结构体系和构件行为的本质。

(3) 结构设计手段。设计的手段和方法决定了设计的效率和质量。结构设计分为定量分析和评估决策,有的需要软件精算,有的需要简化计算,有的需要评估决策,对不同的设计对象和设计目标,应选择合适的结构设计手段。

(4) 结构安全控制。结构安全控制具有系统性和整体性。结构安全控制就是阐述荷载、材料和结构承载力的可靠性,解释结构安全控制的本质,提出结构安全评估的方法。

(5) 本书提出“大震不倒”的设计目标和实现方法,解决了工程师“出完图后晚上睡不好觉”的困扰。

总之,结构设计是一项系统工程,本书有助于结构工程师完整地认识结构设计,建立整体的结构设计思维。

本书分为 8 章,各章主要内容如下。

第 1 章,帮助结构工程师明确自己的定位,找到技术成长的方向和方法。

第 2 章,介绍结构安全控制,帮助结构工程师了解结构安全控制的理论以及理论与实践的关系。

第 3 章,介绍结构力学模型建立与分析的基本方法,重点讲解几种常见的结构体系的特点,提出整体与局部内力互等理论,让结构工程师对结构体系有新的认识,提高结构体系分析能力。

第 4 章,讲解结构抗震与设防的基本原理,将复杂的结构地震作用和抗震问题简单化,让结构工程师理解地震作用和抗震的本质。

第 5、6、7 章,分别讲解混凝土、钢结构和地基基础基本构件承载力的计算原理和速算方法。

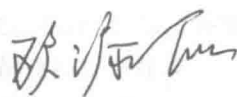
第 8 章为案例分析,展示了 PSR 结构设计方法的思想在结构设计中的应用和结构安全复核方法。

本书提出了很多新的设计思路,理论与实践相结合,是通用性结构设计理论的指导书。本书既可以作为结构工程师的指导书,也可以作为高等学校土木工程专业本科生和研究生的辅导书。

本书由武汉科技大学龚建伍博士担任主审,并提出了许多宝贵的意见和建议。在本书的撰写过程中,也得到了中南电力设计院龚敏高工等许多同仁的关心与支持,硕士研究生齐培林、温丙彦、刘天辉等参与了资料收集整理、文字输入、图片绘制等工作,在此一并表示感谢。

此外,本书也参考了一些公开发表的文献和资料,谨向这些作者表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎广大读者提出宝贵意见。读者交流微信群:结构设计理论与实践。欢迎大家加群交流,踊跃探讨。



2018年4月20日

目 录

第1章 结构工程师综合能力培养	(1)
1.1 结构工程师在工程中的角色	(1)
1.2 正确使用结构设计软件	(3)
1.3 如何成为优秀的结构工程师	(4)
1.4 PSR 结构设计方法	(6)
1.5 提高设计效率	(8)
1.6 结构工程师必读书目	(9)
1.7 小结	(10)
第2章 结构安全控制理论与实践	(12)
2.1 结构安全控制理论与实践自学指导	(12)
2.2 结构安全可靠的依据	(13)
2.3 安全控制方法	(19)
2.4 基于破坏后果的安全控制设计	(21)
2.5 小结	(24)
第3章 结构力学模型建立与分析	(25)
3.1 结构力学模型建立与分析自学指导	(25)
3.2 结构力学模型的分析基础	(26)
3.3 结构体系力学行为	(34)
3.4 结构计算模型建模分析工程实例	(47)
3.5 小结	(50)
第4章 地震作用与抗震设防	(51)
4.1 地震作用与抗震设防自学指导	(51)
4.2 地震作用	(53)
4.3 抗震设防目标及实现策略	(64)
4.4 抗震设计过程	(66)
4.5 五大抗震措施	(68)
4.6 结构抗震规范条文说明	(69)
4.7 抗震设计的问题	(74)
4.8 高层结构的抗震设计理念	(76)
4.9 小结	(76)
第5章 混凝土结构承载力设计原理	(77)
5.1 混凝土结构承载力设计原理自学指导	(77)
5.2 框架结构体系设计对象	(78)
5.3 构件破坏机理与承载力分析	(80)
5.4 结构构件快速设计的方法	(83)

5.5 构件设计速算表格的编写与应用	(86)
5.6 小结	(88)
第6章 钢结构承载力设计原理	(90)
6.1 钢结构承载力设计原理自学指导	(90)
6.2 钢结构体系	(90)
6.3 钢结构的材料性能及钢构件的破坏危机和抵抗措施	(93)
6.4 构件破坏机理与承载力分析	(94)
6.5 螺栓连接节点计算原理	(104)
6.6 钢结构的焊接选择、质量控制与计算原理	(107)
6.7 钢结构除锈防腐和运输设计	(110)
6.8 构件设计计算	(110)
6.9 常用钢结构节点设计原理	(117)
6.10 小结	(118)
第7章 地基与基础设计原理	(120)
7.1 地基与基础设计原理自学指导	(120)
7.2 地基基础设计目标	(120)
7.3 地基破坏原理	(121)
7.4 实际工程中地基土承载力的确定	(124)
7.5 地基沉降计算原理与控制方法	(125)
7.6 软弱地基处理方案选择	(129)
7.7 桩基础	(130)
7.8 独立基础	(132)
7.9 筏板基础	(133)
7.10 基础评估速算方法	(133)
7.11 小结	(136)
第8章 基于 PSR 结构设计方法案例分析	(137)
8.1 PSR 结构设计方法的核心思想	(137)
8.2 工程案例概况	(137)
8.3 荷载分析	(137)
8.4 确定结构布置方案	(139)
8.5 模型的建立	(141)
8.6 模型整体分析	(144)
8.7 结构分析	(147)
8.8 安全评估	(156)
8.9 小结	(159)

第1章 结构工程师综合能力培养



本章导读

基于某种功能需要而建设的一系列建筑群,我们称为工程。工程从规划、施工到交付使用需要经过一系列必要的程序。制定程序的目的是避免因决策失误而产生的不必要的损失和工程风险。结构工程师作为结构设计和实施的专业人员,在工程的各个环节中应充分发挥自己的能力。本章主要探讨结构工程师在工程中担任的角色和应具备的素质,以及如何成为一名能够解决工程实际问题并具有一定控制力和创造力的工程师。

1.1 结构工程师在工程中的角色

1.1.1 工程实施过程

1. 基于投资者角度的工程建设过程

投资者要投资一个项目,应按以下步骤来解决问题。

(1) 项目应报政府主管部门审批。

编写项目申请报告并报政府主管部门审批。项目申请报告的内容包括土地规划、土地预审、能源评估、环境影响评价和社会稳定风险评估五个必要项。项目申请报告主要由投资方编写,设计单位协助。

(2) 评估项目能否盈利。

编写项目可行性研究报告,作为投资单位上级部门的决策依据。另外,如果有政策补助项目,政府部门也需要审查项目可行性研究报告,确定项目能否盈利。

项目可行性研究报告由投资方和设计院共同完成。报告的目的是解决重大技术和初步评估技术可行性的问题。如果项目可行性研究报告的结论为技术可行,且投资收益率超过8%~10%时,则认为项目是可行的。

结构工程师在技术可行性研究中对投资额较大的方案作决策。重要技术方案包括地基基础方案、工艺方案和结构设计方案等。

(3) 项目确定后,应进行设计单位和施工单位的招标。

该阶段应完成初步设计,国外称为基础设计。设计成果为具体技术方案和投资额,可作为招标和银行贷款的依据。

初步设计阶段的内容包括:编写初步设计原则,确定装修材料标准和设计标准;初步完成地基基础、结构主体框架计算和图纸。初步设计应满足施工图设计和施工招标的需要。本阶段勘测应达到施工图深度。如果在施工过程中采用桩基,则应完成桩基试验,并确定桩基方案。

(4) 施工图阶段。

根据初步设计原则、工艺要求和规范规程,设计可以用于施工的图纸,与初步设计不一

致的地方需要得到业主同意。

(5) 设计修改和变更。

施工过程中,因业主要求、施工需要、方案优化等原因对施工图进行修改和变更的,应由设计院出具设计变更文件。设计变更文件与施工图具有同等效力。

(6) 竣工图。

为了满足工程结算和存档,需要真实反映工程实际实施的情况,施工过程中所有的修改都要反映到图纸上,这种图纸称为竣工图。竣工图的要求与工程实际一致,作为日后建筑物维修、加固和改造的依据。

2. 设计流程

以某水泥厂为例,其主要设计流程如下。

(1) 可行性研究阶段。

外部条件可行性包括征地、环保、地震、政策和军事管制等。

技术方案包括工艺方案、总图方案、土建基础和上部结构方案。要求根据该技术方案估算的投资误差不超过 20%。该水泥厂的土建费用占总投资的 10%~20%,比例不高,对项目的可行性影响不大。

(2) 初步设计阶段。

主要工业设备选型确定后,接下来就可以确定总图,完成地质勘查工作,确定地基方案,初步设计上部结构,提供初步设计图纸。初步设计图纸包括基础布置图和结构框架布置图,不包括详图。

(3) 施工图设计阶段。

施工图设计依据包括初步设计的方案原则、工艺和建筑要求。根据力学原理和相关规范,保证结构安全、经济,满足使用要求。

1.1.2 结构工程专业人员在工程建设各个阶段的工作内容

(1) 可行性研究阶段。

在工程建设的可行性研究阶段,地质勘查专业人员勘查场地地质情况的方法是参考周边建筑的地质情况或在拟建场地探若干个孔。结构工程专业人员根据地质勘查专业人员提供的场地的地质资料,制订场地地基的大致方案。

根据建筑和工艺布置要求,确定主要建筑物的结构方案,例如采用钢结构还是混凝土结构,采用框架结构还是剪力墙结构等。

本阶段结构工程专业人员参与较少,确定这些方案的目的是将其作为评估技术可行性和投资总量的依据。

(2) 初步设计阶段。

结构工程专业人员在初步设计阶段的工作包括:确定建筑物的地基方案和大概尺寸,确定上部结构的主要构件的大概尺寸和配筋情况。这些工作是土建招标的依据。对主要的建筑结构,结构工程专业人员应根据设计要求和设计资料,建立模型进行初步计算,基本确定结构布置,并完成基础和上部结构的初步设计图。

(3) 施工图设计阶段。

建筑、电气、水暖、工艺等专业人员为结构工程专业人员完成初步设计提供资料,最后确定结构的布置和荷载。结构工程专业人员以初步设计成果为基础展开详细设计,确保设计

成果可以用于施工。

结构施工图应确保以下4点:

- ①结构布置满足建筑和工艺专业要求,涉及工艺专业要求时,应在出版时会签;
- ②结构安全满足所有工艺荷载要求;
- ③结构方案满足施工要求,对特殊施工工艺应了解现场情况后确定;
- ④结构工程量与招标工程量相符合,施工图完成后应对工程量进行评估。

1.1.3 施工图设计阶段的基本设计过程

施工图设计阶段的基本设计过程:建立几何模型——确定荷载及工况——计算求解(软件)——分析计算目标——调整几何模型——确定构件承载力——安全评估——绘制施工图——出版。

施工图设计阶段的设计要点如下。

①建立几何模型。根据建筑、工艺等要求,初步确定结构主体受力体系的布置。根据分析结果,从结构刚度、抗震性、经济性、传力特点等方面选择合适的结构布置。

②确定荷载。分析荷载的大小、传递路径及其对结构安全的影响程度。

③分析最危险的工况组合:不同的分析对象(框架、基础、楼层)工况选择不同;不同的工作状态(正常工况、极端工况)荷载选择不同;抗震与非抗震条件下的荷载选择也不同。

④分析影响结构安全的主要构件,并根据这些构件对结构安全影响程度的不同确定不同的可靠度。

⑤确定构件内力。

⑥确定构件的合理截面。

⑦确定节点设计。

⑧基础设计。

⑨倒塌设防与安全评估。

⑩耐久性设计,满足工艺复查要求。

1.2 正确使用结构设计软件

1.2.1 结构设计软件介绍

目前结构设计最常用的计算软件是PKPM,以致于很多结构工程师对PKPM产生了依赖性,任何设计都想用PKPM解决。但是由于该软件前处理和后处理能力较差,建立和分析不规则的结构模型都很麻烦,反而浪费了结构工程师很多时间和精力。

国际认可的其他通用型软件有STAAD.Pro、MIDAS、ABAQUS、ANSYS等。大多数结构设计软件的操作思路相似,只是界面和操作方法有所不同。不同软件有不同的侧重点,难分好坏。

PKPM是一款国产软件。它的优点是能解决问题,可以进行批量式建模,具有一步到位的设计功能。它的缺点是操作界面不友好,人机互动性差,自动帮助工程师完成设计;使用时间长了会有依赖性,不利于工程师的成长,建议年轻的工程师谨慎使用。

STAAD.Pro是一款美国软件,是很好的结构分析软件。它的优点是其结构建模、荷载输入、荷载组合、结构内力分析等功能强大,操作界面友好,人机互动性强,适合工业类建筑。

它的缺点是设计功能较差。因此,使用该软件可以使工程师透彻理解整个结构设计过程,对快速提高工程师的结构设计水平很有帮助。构件设计部分工程师可以自己编写其他程序完成。

MIDAS 是一款韩国软件。它的优点是功能比 PKPM 强大,可以完成一站式设计;开放性也不错,支持数字化建模,相信不久的将来能取代 PKPM。它的缺点是相比 STAAD.Pro 互动性稍差,操作界面也不是那么友好。

ABAQUS 和 ANSYS 都是有限元分析软件,只是在特殊结构有必要作详细分析时使用,设计时不常使用。

1.2.2 对计算软件保持正确的态度

(1) 软件计算假设与实际不一致。

计算模型只是实际状态的近似假设,边界条件、约束条件和荷载条件与实际状态并不一致,需要工程师根据实际情况处理。比如四边简支板,尽管计算模型假设支座处弯矩为零,但是由于支座处存在实际约束,还是要适当配筋。

(2) 软件的计算结果仅仅是中间成果。

很多人追求软件模型与实际状态一致,其实没有必要。根据软件的计算结果知道 $A \rightarrow A_1$,工程师应该可以根据 B 和 A 关系,推算出 $B \rightarrow B_1$ 的结果。软件的计算结果仅仅是作为设计结果判断的依据。

(3) 软件使用要有目标性,应根据设计目标简化模型输入。

软件的计算结果是为了验证工程师的设想。例如,当认为板对结构内力分布没有影响时,建立模型时可以不输入板;当认为桁架节点刚接和铰接均对构件内力没有影响时,建立模型时不需要将节点连接形式设置为铰接。

(4) 软件不会分析和选择合理的设计方案,也不会揣度规范条文和考虑实际情况。结构工程师不能仅仅依赖软件完成结构方案的优化和作设计决策。

计算结果只是结构工程师根据给定的条件建立模型分析所得。而在实际工程中,结构设计有很多选择,需要工程师去判断并作出具体选择。优秀的设计需要经过反复的判断和选择。例如钢柱结构设计,软件只能根据给定的侧向支撑和侧移条件选取计算长度系数,对构件截面进行验证,并不能对这些内力数据进行分析并采取其他措施优化构件截面。

(5) 软件与结构工程师的分工。

软件的分工如下:计算结构体系的刚度和进行内力分析,计算设计需要的指标。

结构工程师的分工如下:分析结构的荷载特点,根据实际情况设定合理的计算指标,初步选择经济合理的结构体系;根据软件计算或手算结果,分析结构行为;根据结构行为,提出设计优化选择或结果;根据最终的构件内力,确定合理的构件截面;根据“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计目标,对关键部分采取必要的安全措施。

总之,软件只是进行结构设计和分析的辅助工具,结构工程师不要寄希望于软件来完成结构设计。优秀的结构设计是有思想的,而优秀的设计思想来自于优秀的结构工程师。

1.3 如何成为优秀的结构工程师

1.3.1 设计逻辑清楚

结构设计的本质是结构力学和材料力学在实际工程中的应用。熟练使用设计软件、熟

悉相关规范、画图工整等都只是为了提高设计效率。

设计逻辑比设计技术重要,结构的设计逻辑主要有以下6个方面。

- (1) 了解结构设计的核心:结构破坏预测(结构分析)与设防(结构设计)。
- (2) 掌握结构力学基本理论,了解结构行为是结构设计的基础。
- (3) 明确设计目标是结构设计的前提。
- (4) 所有结构设计参数必须是可靠的,可靠性理论是结构安全的基础。
- (5) 理清结构构件的功能,分清关键构件和次要构件。
- (6) 结构设计分为评估、精算和有限元计算。设计前,首先要对结构模型进行简化评估,当评估认为有必要时才需要采用设计软件进行精算,局部关键位置需要时才采用ABAQUS和ANSYS等有限元分析软件进行计算。

1.3.2 正确认识和使用规范

规范就像法律,最好的法律注重法理。我国的规范更注重具体要求,而不注重原理,想帮结构工程师考虑很多问题却约束了其创造性。例如,规范提了很多具体要求,但是实际工程与规范条件往往不一致,从而产生很多争议。很多结构工程师喜欢生搬硬套,做出很奇怪的设计。规范在实践过程中发现问题后就不断修订改版,结果是越来越厚。另外,很多不同行业的规范不顾自身特点,互相抄袭,失去实际工程的指导意义。当一本规范改版的时候,其他规范也忙着改版。

作为规范的使用者,结构工程师应该理解规范背后的原理,采用基本的结构原理作设计决策。不管是钢结构还是混凝土结构,高层结构还是多层结构,抗震设计还是非抗震设计,都应该回归到“荷载——结构行为——结构破坏——设防设计”这个思路上来。结构设计的问题就是结构力学和材料力学的问题。工程师只有理解规范背后的原理,才能够将几十本规范浓缩成一本,才能够对各种结构形式和各种材料的结构设计得心应手,成为一名真正的结构工程师。

1.3.3 养成良好的习惯是成为优秀结构工程师的基础

成为优秀的结构工程师需要养成以下4种习惯。

(1) 钻研的习惯。即使一个很简单的设计对象,都包含了基本的设计本质和设计原理,要静下心来弄清楚来龙去脉。对已经出完图的工程,也应继续研究,弄清楚所有设计决策的前因后果。

(2) 研究问题的习惯。研究问题需要由点及面,由此及彼,学会借助工具书和网络,参考相关文章,必要的时候动手计算或建模分析。

(3) 职业规划的习惯。

工作3~5年:掌握基本的画图技巧;了解结构设计流程;了解解决问题的办法;熟练使用基本的工具书和设计计算软件;与此同时,结合自己的设计,有意识地温习在校期间学习过的课程,努力提高设计理论水平。

工作5~10年:能根据实际情况应用基本的设计理论,能借助基本软件独立完成任何结构形式的设计;具有自己完整的设计逻辑,并根据自己的设计逻辑操控设计结果;对设计有自己的独特见解和创新性,能整体控制结构安全和造价。

工作10年以上:成为结构工程专业方面的专家,能独立完成复杂结构的设计,解决实际

工程中遇到的设计难题,对设计全局有系统性的把握能力。

(4) 使用 PSR 结构设计方法的习惯。“知其然,知其所以然”是作设计决策的基础,学习 PSR 结构设计方法是一条通往优秀结构工程师的必经之路。

1.3.4 结构工程师应具备的基本素质

结构工程师在工程中肩负着结构“安全、经济、适用”的责任,应具备以下 5 个方面的基本素质。

(1) 整体把握工程的能力。结构设计仅仅是工程的一部分,从结构方案的选择到细部设计,结构工程师应充分考虑整个工程信息后再作决策。这些信息包括地质条件、材料供应、施工能力、业主要求、质量控制等。工程师需要对所有的信息进行分析,并做出合理的设计方案。然而,当前很多结构工程师只顾埋头画图,苦练计算本领,却忽略了工程实际,缺乏对整体工程的把握能力,很难做出真正优秀的设计。

(2) 了解具体结构行为,明确具体设计目标。设定合理的设计指标是结构安全、经济的基础,工程师要做到根据具体结构的行为特点和边界条件提出具体的设计指标,不能简单盲从于规范规定和软件的计算结果。具体的设计指标包括变形、裂缝、荷载、位移、强度、构造和可靠度。指标的设定与结构本身的条件、结构工作特点和业主要求等有关。例如,声屏障钢结构与房屋建筑钢结构顶部位移的控制指标不同,轻钢结构与重钢结构的轴压构件长细比的控制指标不同,不同高度的结构抗侧向位移控制指标也不同。

(3) 沟通协调能力。沟通是获得合理设计参数的基础,仅仅根据书面资料来做设计是远远不够的。结构工程师要善于同其他专业工程师和业主工程师沟通,探讨设计输入数据的可靠性,了解工程相关各方的态度。

(4) 掌握系统的结构安全控制理论。结构工程师要分析结构安全控制因素,根据结构或构件重要性的不同,提出合理的控制目标,采取合理的措施。

(5) 做到对规范的融会贯通,合理应用软件。结构设计应做到“满足”规范,而不是“遵循”规范。结构工程师应减少对规范和软件的依赖,对结构行为、危机、设防目标有自己的判断,能用基本的设计理论找到解决结构设计问题的方法。

1.4 PSR 结构设计方法

1.4.1 PSR 结构设计方法简介

解决结构设计问题的根本是“知其然,知其所以然”。任何结构的设计思路都是一样的。了解结构工作实际情况,掌握设计逻辑,就很容易作出合理的设计决策。解决结构设计问题的思路可以概括为 PSR 结构设计方法。

P(process)为结构行为分析,包括荷载分析、过程分析、破坏分析。

S(solve)为构件内力分析,包括内力分析、强度分析。

R(resistance)为构件承载力设计,包括确定截面形式、确定配筋形式、确定构造形式、结构的评估分析。

设计目标: $S/R=K$, K 为小于 1 的系数。 K 值由结构工程师根据荷载、边界条件可靠性、结构部位、破坏后果和投资意愿等因素确定。

PSR 结构设计方法的基础包括以下 5 项。

- (1) 概率论在结构行为可靠性中的应用:分析荷载、材料、行为等各个环节的可靠性。
- (2) 荷载与结构内力分析(结构力学、材料力学、理论力学)。
- (3) 结构关键传力路径的行为和破坏分析,这是结构设计的关键。
- (4) 关键传力路径构件和节点的破坏设防(不同材料有不同的规范规定)。
- (5) 安全控制逻辑。

上述(1)(2)(3)(5)为基本设计理论,与具体规范无关,依赖于结构工程师的水平。

应用 PSR 结构设计方法来学习结构设计,可以增强结构工程师的自学能力,让结构工程师快速掌握结构设计的本质,提高其设计效率和质量,让其在短期内摆脱设计中“无重点、无章法、无路线图”的“三无”状态。

1.4.2 PSR 结构设计理论的主要内容

PSR 结构设计的理论主要内容如表 1-1 所示。

表 1-1 PSR 结构设计理论的主要内容

项 目	主要内容(从实践到规范,从规范到实践)
结构可靠性控制	(1) 荷载可靠性:荷载设计值、荷载分项系数、荷载组合与发生的概率的关系;不同类型的荷载如何取值,特殊条件下结构工程师如何进行调整。 解决问题:任意给定的荷载如何选取规定可靠度下的设计值,对任意构件如何选取最不利工况。 (2) 材料可靠性:材料承载力取值有多大的可靠度;不同荷载下对应的材料可靠度要求。 解决问题:任意给定的材料如何选取规定可靠度下的设计值。 (3) 模型可靠性:解决计算模型参数与实际状态不一致的问题,包括结构布置、节点连接形式、结构破坏行为等。 (4) 边界条件可靠性:地基承载力取值可靠性,支座可靠性。 (5) 施工可靠性:了解结构不同的位置施工难度和修复代价,根据难度和代价,控制不同的安全裕度。
结构行为与设防	(1) 各种结构的简化计算模型:结构、构件、节点具体力学分析模型的建立是正确分析结构的基础。 (2) 结构模型外力与内力关系:分析结构、构件、节点在既定的结构模型下的内力和变形。 (3) 结构荷载与结构破坏:分析结构在不同荷载下的破坏位置、破坏形式和破坏后果。 (4) 基于结构破坏后果的设防目标:通过分析结构和构件的破坏形式,确定设防目标。 (5) 基于设防目标的设计方法:结构和构件设计方法以及规范的表现形式。
结构安全评估	(1) 荷载敏感性分析,模型与实际状态的差异的分析,关键路径构件设计。 (2) 影响安全的主要因素分析。 (3) 基于“大震不倒”的可靠度所需要的安全系数控制。

续表

项 目	主要内容(从实践到规范,从规范到实践)
结构设计实践	(1) 设计输入资料要求;对资料真实性的评估。 (2) 整体分析:模型的建立、设计过程与设计结果分析,主要安全影响因素分析。 (3) 构件设计。 (4) 计算书编写。 (5) 图纸绘制。 (6) 成品校对与审核。

1.5 提高设计效率

1.5.1 明确设计任务、简化设计方法

- (1) 在接到一个设计任务时,首先要分析结构布置和荷载分布,利用力平衡、最短传力路径等结构力学的基本原理合理布置主体结构;其次,要分析主要荷载的大小和作用位置。结构的安全可靠性很大程度上取决于荷载的可靠性,而不是软件计算的准确性。
- (2) 建立简化的分析模型。首先,明确模型计算的目标,例如混凝土框架中楼板和次梁的计算使用其他小工具即可。其次,建立合适的模型,对计算目标影响较小的因素可以适当简化或忽略。
- (3) 分析模型计算结果。利用结构力学的基本原理分析模型的计算结果后,通过预测结构设计优化的方向,可快速得到优化结果。这些预测工作要求工程师精通力学理论,快速分析和判断结构行为,提高决策效率。
- (4) 快速进行构件设计。利用大型软件做构件设计优化的效率很低,而且不直观。因为各构件的设计优化目标不同,构件每优化一次,软件就要重新计算一次,太浪费时间。构件设计最高效的办法是设计直观化表格,改动任何参数可即时得到设计结果。
- (5) 复杂的、造价高的结构应采用多模型计算结果和手算结果进行比较,对结构安全性与经济性作评估。
- 经过上述步骤设计出来的结构,过程清晰,结果可靠,结构工程师能做到心中有数。

1.5.2 避免重复性的工作

- 很多结构工程师耗费大量时间在重复性的工作上,设计效率低下。明确设计思路,减少重复性的工作是提高设计效率的关键。结构工程师提高工作效率的方法有以下 7 点。
- (1) 输入设计资料要严谨,确保资料的可靠性(不是准确性)。
- (2) 编写计算书,把每一个步骤的有关控制参数写在计算书中,方便修改和复核查阅。
- (3) 明确设计方法:有的设计需要计算,有的设计可以估算,有的设计不用计算。
- (4) 选择合理的决策手段:能手工计算的用手工计算,手工计算不清楚的用软件计算。根据不同的计算目标,选择不同的计算软件,合理利用计算软件的中间成果。不要期望计算软件能解决所有的问题,那样会越做越复杂。
- (5) 缩短模型和结构分析优化的时间:模型的建立和分析,每一步都要严谨,避免反复

修改;利用结构力学的基本原理判断优化方向,不能过度依赖软件反复试算。

(6) 编写构件设计计算表格。常用的设计程序有4种。①钢筋混凝土梁板设计程序(CBD),可以在1 min内完成钢筋混凝土梁的设计,包括梁截面、配筋、抗弯、抗剪和裂缝计算以及承载力利用率统计。②钢筋混凝土柱设计程序(CCD)。③钢结构压弯构件设计程序(SUD)。④钢结构节点设计程序(SCD)。依托这几个小程序,输入一个参数就可以看到其他所有参数的变化情况,计算结果直观,设计优化就变得简单。

(7) 缩短画图时间:画图要分步,没有必要画的内容不要一次画到位,避免修改麻烦。

1.6 结构工程师必读书目

1.6.1 专业工具书

结构工程师常用的专业工具书如下:

- (1) 《混凝土结构构造手册》,中国有色工程设计研究总院主编;
- (2) 《钢结构设计手册》,中国建筑工业出版社;
- (3) 《钢结构连接节点设计手册》,中国建筑工业出版社;
- (4) 《汉英建筑工程词典》,中国建筑工业出版社;
- (5) 《12G112-1 建筑结构设计常用数据》,中国建筑标准设计研究院主编;
- (6) 《实用建筑结构静力计算手册》,国振喜、张树义主编。

1.6.2 考试工具书

结构工程师常用的考试工具书如下:

- (1) 《注册结构工程师必备规范汇编》,中国建筑工业出版社;
- (2) 《一级注册结构工程师专业考试三阶段复习法应试指南》,中国建筑工业出版社。

1.6.3 基本规范

结构工程师常用的基本规范如下:

- (1) 《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068);
- (2) 《建筑结构荷载规范》(GB 50009);
- (3) 《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223);
- (4) 《建筑抗震设计规范》(GB 50011);
- (5) 《建筑地基基础设计规范》(GB 50007);
- (6) 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94);
- (7) 《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330);
- (8) 《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79);
- (9) 《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB 50202);
- (10) 《混凝土结构设计规范》(GB 50010);
- (11) 《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204);
- (12) 《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149);
- (13) 《组合结构设计规范》(JGJ 138);

- (14)《钢结构设计规范》(GB 50017);
- (15)《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018);
- (16)《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99);
- (17)《空间网格结构技术规程》(JGJ 7);
- (18)《钢结构焊接规范》(GB 50661);
- (19)《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ 82);
- (20)《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205);
- (21)《砌体结构设计规范》(GB 50003);
- (22)《砌体结构工程施工质量验收规范》(GB 50203);
- (23)《木结构设计规范》(GB 50005);
- (24)《木结构工程施工质量验收规范》(GB 50206);
- (25)《烟囱设计规范》(GB 50051);
- (26)《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3);
- (27)《建筑设计防火规范》(GB 50016);
- (28)《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60);
- (29)《城市桥梁设计规范》(CJJ 11);
- (30)《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166);
- (31)《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62);
- (32)《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63);
- (33)《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T F50)。

1.6.4 专业基础书籍

结构工程师常用的专业基础书籍如下。

- (1)《概率论与数理统计(第四版)》(浙江大学)。
- (2)《钢结构》上、下册(陈绍蕃)。
- (3)《混凝土结构设计原理(第五版)》上、下册(东南大学等)。
- (4)《土力学》《基础工程》(华南理工大学等)。
- (5)《建筑抗震结构设计》(郭继武)。

1.7 小结

做设计,首先要明确结构工程师在工程建设各个阶段中所扮演的角色,熟悉施工图设计的全过程,了解各个设计阶段的工作内容。其次,要熟悉设计软件,尤其是对设计软件要有正确的态度,要充分利用软件,但不能完全依赖软件,不要寄希望于软件来完成结构设计。

优秀的结构设计是有思想的,而有思想的设计来自于优秀的结构工程师。一个优秀的结构工程师,要有清晰的设计逻辑,在正确认识和使用规范的基础上,要勤于钻研、敢于质疑、精于总结。“知其然,知其所以然”是作出正确设计决策的基础,学习 PSR 结构设计方法是一条通往优秀结构工程师的必经之路。



思考与练习

1. 工程从规划到实施为什么分成很多阶段,每个阶段的成果和目标是什么?
2. 假如没有规范,如何设计一个“安全、经济、适用”的结构?
3. 如何正确理解结构计算软件在结构设计中的作用?
4. 设计中遇到问题如何独立分析并作出决策?
5. PSR 结构设计方法在工程实践中如何应用?