从楼盖设计想到的

——写给成长中的结构工程师

徐 珂/北京清华城市规划设计研究院

像许多结构新人一样，我刚毕业的时候被安排做一个工业转运站的楼层梁板设计，因为头一次做，所以很小心地问前辈，“梁这样布置行不行，板的受力方式可不可以？”前辈已经工作近四十多年，笑眯眯地看着我说，“可以，去做吧！”我心满意足地画图去了。看了一些图纸、资料后，感觉原来的布置好像有点问题，心有不甘地跑到前辈那说，“我想把平面布置改一下，这样可不可以？”前辈看完后还是笑眯眯地说，“可以，去做吧！”心里有些奇怪地接着改图去。改了两天又琢磨出一种布置格局，心里有些惴惴不安地问前辈，“改成这种方案行吗？”结果前辈还是笑眯眯地说，“可以，去做吧！”顿时有一种要崩溃的感觉，清晰地记得自己很赌气地对前辈说，“你不能这样，为什么不直接告诉我哪种布置是最好的？”前辈听了还是笑眯眯地说，“肯定还有更好的方案，但是你怎么知道我告诉你的就一定是最好的方案？不好的设计方案也要清楚缺点在哪里，你自己不去尝试，如何知道结构方案的好与坏？”

工作很多年后终于明白，结构设计其实就是不断寻找最合适结构方案的过程，既要满足结构安全需要，又要满足建筑使用功能要求，随着设计深入都会发生变化，单纯满足一方面要求的方案往往不是好方案。作为建筑师最重要的合作伙伴，为什么结构工程师在很多建筑师的眼里是没有创造性、墨守陈规的家伙？其实往往是结构工程师们想的不够多或不愿意多想，不能给建筑师带来更多的选择。

每个结构工程师都设计过楼盖体系，很多人抱怨跟着别人画来画去就是那几种方案，学不到东西。设计中无论小楼还是高层使用最多的是 7.5~9.0m 的柱网，这是综合考虑多种因素后的结果（如经济性、地下室停车位布置、上部办公面积合理性等），这样看来楼盖方案留给结构工程师发挥的余地很小，结构工程师似乎也有理由不再对方案进行深入思索，但其实结构思维是贯穿整个结构设计过程的，普通的楼盖设计也一样能做出亮点。特别是超高层设计中如果不重视减轻楼盖自重，往往对结构抗侧力体系、基础工程产生不利影响，增加不必要的结构工作量。

以楼盖设计为例，看看有多少方案可以选择，也从而了解结构设计的“小变化”给工程带来的影响。

结构尺寸往往是与其他专业出现配合问题的最大因素，在既定尺寸的情况下，抛开抗侧力体系和楼层因素来思考，结构工程师一般情况下会想到图 1 所示的四种方案。

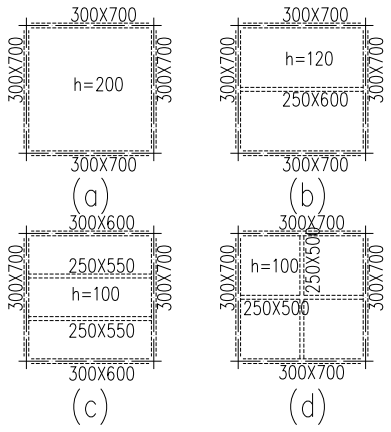

图 1 梁板布置方案

方案（a）和（d）是双向受力体系，二者区别在于荷载是均布传递还是集中传递给框架梁，当有次梁布置时，在验算斜截面受剪承载力的同时考虑集中力抗剪设计，这就是方案变化带来的设计差异。（b）和（c）是单向受力体系，区别在于单向传力的分散度。简单来看这些方案，确实没有什么可以再总结的，但深入思考一下，重点不放在板厚和次梁数量的变化上，而是放在承重体系的荷载转化上。方案（a）中框架梁受力均匀，每根梁承担 1/4 荷载总值，与（d）相同，区别在于通过次梁将荷载集中到中部，弯矩峰值和剪力分布就有差异，当这根梁是抗侧力体系重要构件时，（a）和（d）的受力效果就有区别，理解这些差异也就很自然地知道在剪力墙设计中避免选用次梁搭在连梁上的方案。（b）和（c）中支承次梁的主框架梁承担约 1/2 荷载总值，如果在抗侧向力体系中是主力的话，这榀框架的负担就很重，以比喻的方式来说明这个问题，（a）和（d）是四个壮汉在承担，（b）和（c）是两个成年人带两个小孩扛重担，这种方案有利之处是与次梁平行的框架梁在重力荷载的作用下的荷载效应小于另一方向的框架梁，设计中可以根据实际效果确定不同的梁截面。

单向受力形式中，当次梁数量足够多的时候，受力体系转变为密肋结构，对于支承次梁的框架梁是有

利变化。（d）的情况与之类似，会转变为井字梁结构，当梁的数量足够多的时候，梁的高度逐步变小，梁间楼板消失，又会转变成（a）的大板结构，于是在实际应用中出现两种施工工艺，一种是钢筋桁架楼承板体系，一种是双向空心板体系，它们在施工上都有创新的因素，在设计上也并没有超出结构师的能力范围，如果能理清这些结构受力关系，灵活运用各种新工艺，对结构师来说其实是一个很享受的事情。

结构楼盖方案再好，也是需要其他专业同意才可以，梁板体系在限高建筑中往往不受欢迎，于是结构师又想出图 2 的两种方案。

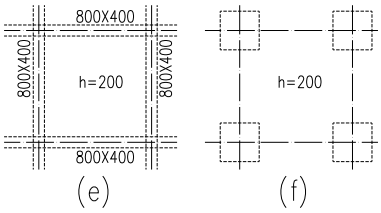

图 2 限制结构高度楼盖方案

方案（e）是宽扁梁体系，通过增加梁宽度来弥补高度降低带来的刚度损失，当荷载重、梁高很矮时，梁的宽度会比框架柱截面尺寸大，当宽度增加到柱网宽度时就转化为（f）无梁楼盖体系，代价就是钢筋用量增加，从结构造价角度出发是不划算的，但层高得以满足综合需求，设备管线也可以灵活布置，如果一层节省 350mm，10 层就可以节省 3.5m，又可以增加一层建筑高度，在综合对比中可能是比较好的方案，因此结构专业在制定方案时，首先要服从建筑设计总体指导思想，然后再强调结构专业的特殊性。特别是建筑师不了解这些差异时，结构师就更要把可用方案的优缺点指出来，比如无梁楼盖在地上建筑使用时，节省层高的代价是结构造价增加，如果运用到地下建筑特别是覆土停车库、人防结构时则是较为经济的方案。常规设计时一般采用经验系数法或等代框架法计算配筋，并未考虑柱帽形成的拱效应，在精细化设计中，将这一有利因素考虑进去，配筋量会进一步减少。而拱的有效性又取决于结构师在与其他专业配合中获得多大柱帽尺寸，图 3 给出不同尺寸的柱帽形式，与楼板形成的楼盖物理刚度不一样，从左到右拱效应逐步增加，对于最终混凝土和钢筋用量会产生差异。从空间使用出发，建筑师可能选择最左边的方案，甚至希望取消柱帽设计，因为这样处理在安排各专业使用时可以完全不考虑结构尺寸的影响。这是较为极端的情况，荷载完全由板来承担，配筋率增加，经济性下降，应用时就要跟建筑师说明造价增加的大致比例，让其在与甲方交流时有数据支持。当造价因素不重要时，结构专业就要想办法在板厚的范围里解决冲切问题，例如设置箍筋直至做钢骨，这时候考验的是结构工程师对材料的应用能力。在不影响其他专业使用时，一般会做成中间两种形式，钢筋用量随着柱帽的增大而减少。使用这类方案时要通知各专业柱帽的立体尺寸，建筑图纸中往往只表达整体剖面，设计人员很容易忽略柱帽的平面尺寸对于设备转弯时的影响，造成后期安装困难。如果柱帽变化成最右边的形式并继续扩大，最后柱帽上沿连为一体时，由板承重体系转化为拱承重体系，结构配筋也转化为拱构造设计，在某些时候建筑师可能就需要这种造型设计，如果结构师没有将这种扩展性介绍给建筑师的话，也许就失去了成就一项双方都满意的作品的机会。

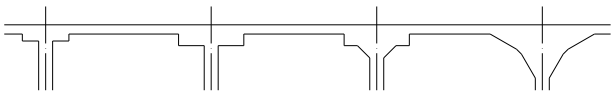

图 3 柱帽形式举例

除了上述楼盖方案，是否还有其他选择呢？有！作为结构工程师一定要记住，结构设计最重要的就是看能否将掌握的知识灵活有效地应用，以下是几个关于楼盖方案的进一步思考。

第一个思考是结构布置是否只能是梁板体系或者是无梁体系，有没有其他选择？将两种体系结合起来使用，一个方向使用有梁体系，另一个方向采用无梁体系，就是一种新的思路，该方案在一个方向上满足结构尺寸要求，在另一个方向满足其他专业层高要求，这样的设计只需要结构工程师在前期方案时跟各专业沟通，将设备机电专业的主管线沿一个方向布置，将次管线高度垂直布置于结构梁下，层高因素就能得到很好的协调。

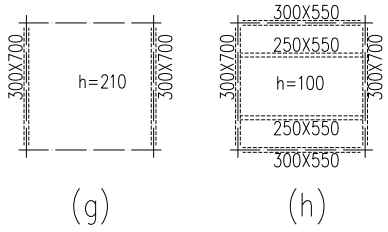

图 4 两个思考方案

第二个思考是对于方案（c），为什么结构师在布置两根次梁时总是采用三分法布置？采用不等间距布置对结构承重体系有何影响？比如 8.1m 柱网可以采用 2.1m+3.9m+2.1m 的方式布置，增加中间板跨度，这样次梁受荷面积有所增加，减少了平行框架梁的受荷面积。由于次梁向支座处移动，有效减少了主框架梁的弯矩峰值，不利的影响是增加中间板块的板受荷面积，相比重要的梁构件，这样的变化对于结构主体安

全性和经济性都是有利的。平行于次梁的框架梁由于重力荷载效应减少，就可以有效减少梁高，这在一定程度上也可以达到第一种思考的效果。图 4 为这两个思考的结构布置。

第三个思考是，变截面梁是经常用到的方案，那么楼板是否可以做成变截面的？比如方案（a）的板厚都是 200 厚，如果将支座处变为 250，板中 1/4 的区域变成 150 厚，整体混凝土用量减少，结构自重减轻，中部薄板因周边变截面板的支承效应，板底配筋并不会增加很多，这个方案的好处在于边支座板厚增加后可以有效减少支座上筋的配筋量，在整体上既减轻自重又减少钢筋用量，但实施中要注意考虑增加板厚对梁柱的影响，梁刚度增加对“强柱弱梁”的抗震设计要求是不利的。

通过上面三个思考可以看出，结构设计应该是很灵活的事情，工程师只需多思考一下结构实现的可能性，就会为建筑师提供更加灵活的创作空间，反过来建筑师也愿意为勤于思考的结构师提供展示能力的舞台。坚持从细节出发思考结构问题，形成良好的结构思维，一定会为自己提供更广阔的发展之路。

作者简介：徐珂，结构工程师，参与计算、画图 20 年，关注结构新技术及精细化设计，就职于北京清华城市规划设计研究院。从 2006 年开始写个人博客，随时记录工作中的想法和解决方案，希望通过不断的积累与更新，为下一个满意的结构作品做准备。博客地址：http://www.jiegoublog.cn/