

刚度理论在结构设计中的作用和体现

张元坤 李盛勇

(广东省建筑设计研究院 广州 510010)

[提要] 结构设计中不仅必须重视属于结构外部因素的“力”,而且要牢牢地掌握及控制好属于结构内部因素的“刚度”。前者所涉及的力的平衡、结构或构件变形的协调以及由此而产生的构件内力都是通过后者所包含的绝对刚度、线刚度及相连构件之间的相对刚度来体现的。通过举例,叙述并分析刚度理论在整体结构及单一构件中的体现,从中折射出刚度理论在结构设计中所起的重要作用,有助于结构设计人员对刚度理论有一个清醒的认识和清晰的概念,并在具体的结构设计中科学地运用,避免结构产生不安全因素,以达到结构受力合理且能获得最佳经济效益的目的。

[关键词] 结构设计 力 刚度 绝对刚度 相对刚度 概念设计

In the structural design, the factors, which need to be concerned and controlled well, include not only the external forces, but also the internal rigidity. The former factors, such as the equilibrium of forces, the deformation of structures as well as the internal stresses, are all mainly lied on the later factors, including absolute rigidity, linear rigidity and relative rigidity between members. Some examples are given to present the theory of rigidity and analyze its application in members and structures to reflect the theory's importance in the structural design. It will also help the designers establish clear and correct concepts, apply them efficiently at work, avoid any unsafe factors in structures, at last achieve rational structures and best economic effects.

Keywords: structural design; force; rigidity; absolute rigidity; relative rigidity

一、前言

在结构设计过程中的结构布置(包括竖向构件和水平构件布置)和结构计算分析(包括计算假定和构件内力分析)阶段,一般的设计人员比较关注的是荷载的产生及其数值大小,即比较注重“力”的概念而往往会忽视或轻视结构或构件抵抗外力的变形能力、反映结构构件内在联系、影响构件内力及变形相互关系的“刚度”概念。事实上,结构中力的平衡、变形的协调以及由此产生的构件内力都是通过构件自身的线刚度(由截面尺寸及三维空间的第三方向尺度和材料特性三要素构成)以及连接构件之间的相对刚度的大小来体现的。换言之,属于结构外部因素的“力”——楼层作用荷载、风力、地震作用以及建筑物的自重等在结构内部的作用、传递以及所引起的结构反应都要通过属于结构内部因素的“刚度”来完成。既为内部因素,从哲学的观点来说,它比起外部因素当然更是事物的本质所在。另一个事实是,在结构技术书籍和各类结构设计规范(规程)中有关构件计算和构造方面的论述,其核心内容也常以刚度为主线。因此,结构工程师应十分重视、透彻理解结构刚度理论,尤其是对相对刚度理论。在结构设计中,对刚度理论科学地运用,从高层次、高要求的角度看就显得十分必要和重要,它不仅能够

避免结构产生不安全因素,消除结构隐患,而且可以保证构件以至于整个结构在荷载作用下,受力合理并获得最佳的经济效益。前者是对结构设计的最基本要求,当然也是最重要的要求;而后者则是对设计要求的更高、更全面的要求,也即是结构优化设计始终目标的内容。此外,对结构设计工作来说,运用了刚度理论可进行整体结构的宏观控制,具有定性且定量、准确有效、简捷方便的特点,有利于缩短设计周期,节省人力和时间,提高工作效率。

二、刚度概念贯穿于结构设计的全过程

一幢建筑物的结构设计行与不行和好与不好,关键在于结构的整体刚度和构件的相对刚度控制得是否恰当合理。事实上,结构设计人员在结构设计过程中所进行的结构布置和构件截面的调整,都是在寻求一种合理的结构刚度,所不同的是意识的强烈程度,而结构设计的基本概念以及结构设计规范的原始精神都是围绕着刚度这一基本原理来展开的。以高层抗震建筑结构为例,刚度概念则贯穿于结构设计的全过程。

1. 对楼层平面刚度无穷大的结构可以较准确地求得各抗侧力构件的内力

高层抗震结构的楼层是刚性的,则能够保证结构的竖向构件所承受的水平力是按其抗侧力刚度分配

的,从结构分析的计算数学模型假定到结构的真正受力状态都能一致地反映这一点。按此设计出来的结构,其安全度是有保证的,其构件内力分析是较准确的;相反,楼盖形成不了无限刚性——比如楼层大开洞口或凹凸太深太长,即使采用考虑楼板变形的计算程序进行计算,也很难准确了解和掌握其各竖向构件内力的大小。这就是为什么结构工程师总是希望建筑师所构思的建筑方案的楼面为刚性或近似刚性的道理。

2. 侧向刚度均匀连续变化的结构沿高度的变形不产生突变

侧向刚度均匀连续变化的高层建筑,其整体变形曲线是光滑的,在任何楼层处都不会产生位移突变,因而也就形成不了薄弱部位,这样的结构即使在遭受罕遇地震时也不至于倒塌或发生危及人们生命的严重破坏;相反,侧向刚度突变的高层建筑,在楼层刚度突变处形成薄弱部位,产生应力集中,塑性变形大,易遭受地震破坏。对有转换层的高层建筑,希望是低位转换而不是高位转换,且要求转换层上下层的抗侧刚度有一定的连续性而不是突变的,因而规范规定底部1~2层大空间的剪力墙结构,其转换层上下层的剪切刚度比 γ 宜接近1,非抗震设计时的 γ 不应大于3,抗震设计时的 γ 不宜大于2。厚板转换结构在转换层位置上下层其变形曲线也有突变。因此,一般不欢迎出现厚板式转换层的结构,就是这个道理。

3. 结构主轴方向的侧向刚度均衡可以抑制结构的扭转效应

主轴方向刚度均衡的结构,两向甚至多方向的动力特性相近,扭转效应不明显,在地震作用下甚至风力作用下,主轴平动占上风,结构的变形简单,容易保证结构安全。设计时要求抗震结构的平面长宽比小,两向的抗侧力构件分布要均匀、对称、分散、周边,就是基于此方面的考虑。

4. 解决平面刚度突变的最佳办法是设置防震缝

当建筑平面的使用功能非常优越,但出现平面薄弱部位,薄弱部位的平面刚度产生突变,即使采用“精确”的电算程序进行计算和多种构造措施加强,都很难保证该薄弱部位构件抵抗地震作用的强度和变形能力时,通常采取设置防震缝方法,从该位置将建筑物分成独立的结构单元。对于高烈度区的框架结构,为了减小防震缝两侧碰撞时的破坏,有时需要在防震缝的两侧设置抗撞墙。这是处理平面刚度突变的最佳方法。

5. 改善或减少因结构侧向刚度不足而产生的结构侧移偏大的有效办法是设置楼层加强层或伸臂

内筒-外框架甚至内筒-外框筒高层建筑或超高层建筑,由于高度大、高宽比较大,结构的侧向位移(包括

顶点位移和层间位移)可能不满足规范要求或仅达到位移限位的下限,为了改善或减小结构的侧向位移(主要是层间位移),有效且经济的方法是在一定楼层高度处设置结构加强层或伸臂,这是从加强楼层平面刚度和协调内外筒受力概念出发来抑制结构侧向位移的巧妙方法。加强层的最佳位置可由理论计算确定,其理想楼层从建筑使用功能方面考虑最好是设备转换层或避难层,而这往往与结构最佳位置并不吻合。实际设计中就需要结构与建筑互相协商,找出双方都能接受的共同点。对高宽比较大的高层建筑顶层屋盖板加厚并加强配筋在一定程度上也可以抑制结构的侧移。

6. 控制剪力墙的连接尺寸可以更好地发挥开洞剪力墙的作用

框架-剪力墙结构体系中,由于其中的剪力墙是零星、分散布置的,所形成的结构整体刚度不太大,为了增强结构整体刚度,使其中的剪力墙成为主要的抗侧力构件,故规范规定“一、二级抗震墙的洞口连梁跨高比不宜大于5,且梁截面高度不宜小于400mm”,意即要求连梁的刚度不宜太小;相反,在剪力墙结构体系(包括部分框支抗震墙结构体系)中,由于墙体多且密,所形成的结构整体刚度往往过大,不仅吸收地震能量大,对结构受力不利,而且会造成结构造价的上涨,因此,规范规定“将一道抗震墙分成长度均匀的若干墙段,洞口连梁的跨高比宜大于6”,意即要求连梁的刚度不宜太大。这是有目的地控制剪力墙连梁刚度,将结构整体刚度调整至合适程度并使开洞剪力墙发挥更大作用的显著例子。所谓“合适程度”,至少应使整体结构的位移限值满足规范的有关要求。

7. 具有足够楼层平面刚度的地下室顶板才能作为上部结构的嵌固端

上部结构以地下室顶板为嵌固端,既保证上部结构的地震剪力通过地下室顶板传递到全部地下室结构,同时也保证上部结构在地震作用下的结构变形是以地下室顶板为参照原点,这是结构整体分析的需要,也是人们对结构实际变形的期望。为了满足成为上部结构的嵌固端的要求,规范有原则性的定量规定:“地下室结构的楼层侧向刚度不宜小于相邻上部楼层侧向刚度的两倍”,具体的定性和定量规定则有:“顶板不能开设大洞口,并应采用现浇梁板结构,楼板厚度不宜小于180mm,混凝土强度等级不宜小于C30”等,这是高层建筑对确定计算简图大前提的规定,此条的重要性涉及到结构计算分析结果的可靠性和准确性。

8. 多、高层建筑采用单独柱基或单柱单桩基础,应沿两个主轴方向设置具有足够刚度的基础系梁

单独柱基或单柱单桩基础虽然受周边土(砂)层的

侧向约束,但土(砂)层毕竟存在不均匀性,如有侧向力作用,其侧向压缩变形比起钢筋混凝土基础来说要大得多。在房屋基础设计假设中,各个基础之间是不允许出现相对位移的,在柱端弯矩作用下,对基础的转动也必须加以严格限制。为了达到上述两个条件以满足上部结构的嵌固端假设,单独柱基或单柱单桩基础在其两主轴方向都必须设置刚度(包括竖向刚度和侧向刚度)较大的基础系梁。这是刚度理论贯穿于房屋基础设计中的典型例子。

三、刚度理论在整体结构和构件设计中的体现

在结构体系的确定过程以及单一构件的设计中,无时不体现刚度理论在其中所起的指导作用。也只有在结构设计全过程中紧紧抓住刚度这一重要概念,才能把结构设计做到既保证结构安全且安全度掌握得合适,同时又达到经济合理的理想境界。而要达到这种境界,仅依靠结构专业本身或到了最后进入施工图设计阶段才来运用结构刚度理论是远远不够的。在设计初始阶段,包括建筑方案和初步设计阶段,就要将结构刚度理论应用在其中,这个阶段,要求建筑师也必须具有结构刚度理论概念。“先天不足后天再补”就很难设计出建筑与结构相统一的佳品,尤其是高层和超高层建筑以及非高层的抗震建筑。然而,只要参加工程设计的结构工程师有强烈的刚度理论观念,在工作中又积极主动地配合建筑师的创作,则能创造出建筑与结构结合较为完美的作品。

下面列举刚度理论在整体结构、单一构件设计以及构件相互作用中的体现,有助于提高结构设计人员对刚度理论的感性认识。

1. 结构体系的演变体现对结构整体刚度的要求

以钢筋混凝土结构为例,随着建筑高度的不断增加,或抗风、抗震级别的提高,结构体系由纯框架结构开始,逐步演变出框-剪、剪力墙、筒体-框架、筒中筒、束筒结构,也就是随着结构层数越来越多、承受的风荷载越来越大,地震反应越强烈,对结构的整体刚度的要求就越高,因此就产生了整体刚度越来越大的结构体系(见图1)。

2. 长宽比、高宽比的限值体现高层建筑对结构宏观刚度的要求

高层建筑对结构单元平面的长宽比 A/B 、竖向的

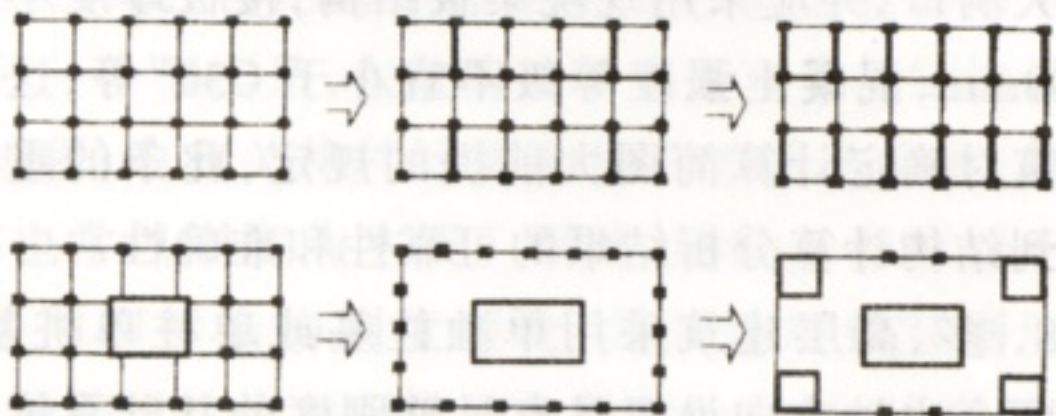


图1 结构体系的演变

高宽比 H/B 均有所限制,其表象是对高层建筑体形尺寸(宏观的三维空间尺寸)的限制,实质上是对结构整体刚度的宏观控制(包括整体刚度的大小以及整体刚度的均衡),以求在建筑方案设计阶段所构思的建筑雏形为日后的结构设计提供可行的大前提,并尽可能为取得合理的效果创造条件(见图2)。

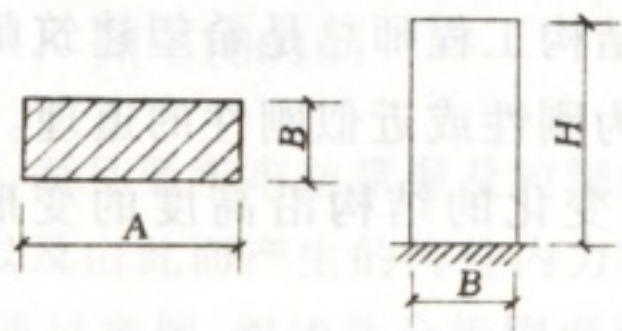


图2 长宽比及高宽比

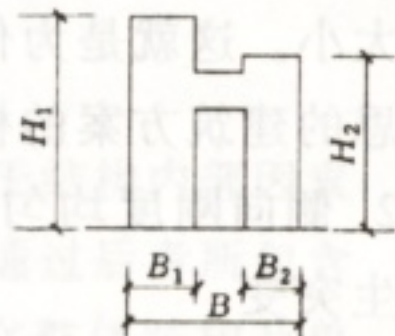


图3 连体结构

3. 连体高层建筑的产生实质是结构对整体刚度的需要

人们通常以为连体高层建筑的出现仅仅是一种新建筑风格的展示,其实不尽然。实质上是单塔高层建筑的高宽比过大、刚度太弱,而设计者(有时也包括投资者)不想或不可能通过降低高度和增加宽度来提高结构的整体刚度,而是借助于两座塔楼之间的某部分连接,使“孤单”的单塔楼互相傍靠而形成刚度很大的一个整体,因而就产生了连体高层建筑,聪明的建筑师巧妙地利用了这一结构特性创造出了一种新的高层建筑风格(见图3)。当然连体结构主要起结构稳定的作用,由于其连体部位局部刚度大了,会造成结构整体竖向刚度的不均匀,受力更复杂,震害加剧,结构分析需更详尽。从抗震角度衡量,它并非理想的建筑体型。

4. 刚度理论在板式构件中的体现

(1)矩形平面的楼板按其两向刚度比划分单向板和双向板。计算四边支承的楼板,首先根据其两个方向的板跨度决定板型:当 $l_2/l_1 \geq 2$ 时,板上荷载大部分沿板的短方向传递,故按单向板计算;当 $l_2/l_1 < 2$ 时,板上荷载沿双向传递,故必须按双向板计算。其划分原则表面以板的长短边比例作为界限,实质上是因荷载的传递方式取决于板的两个方向刚度比值,两方向的刚度相等或相近,荷载沿双向传递,相差悬殊时则为单向传递,且沿着刚度大的方向传递,即实际上是根据板的纵向与横向刚度比例划分单、双向板(见图4)。

(2)楼板边界条件取决于与相邻板的刚度比。按弹性理论计算楼板时,其支座边界条件通常是这样确定的:邻边有楼板时则假定为固定端,邻边无楼板(边跨或相邻为孔洞的情况)则假定为简支边。如果严格按刚度理论,即以相邻构件刚度的相对比值确定边界条件时,则有些例外的情况,比如当双向板为整间大楼板(即板厚度较大),而邻边为小跨度板(即板厚度较小),由于两者的刚度相差过于悬殊,往往就不宜以固

定端对待(对于小跨度板来说,当然是固定端)。又如支承端跨板的边梁为宽扁梁或近乎深梁,由于边梁的抗扭刚度甚大,此时的边梁又可作为楼板的固定端(见图5)。实际配筋构造要求应与计算假定相一致。

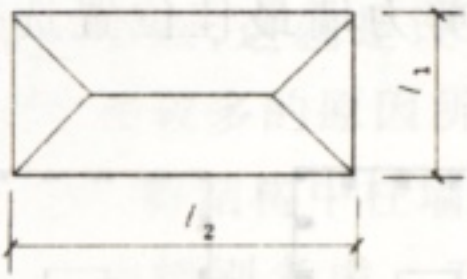


图4 板的长宽比

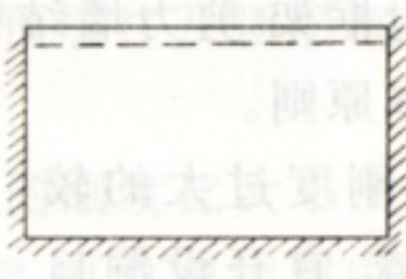


图5 板的边界条件

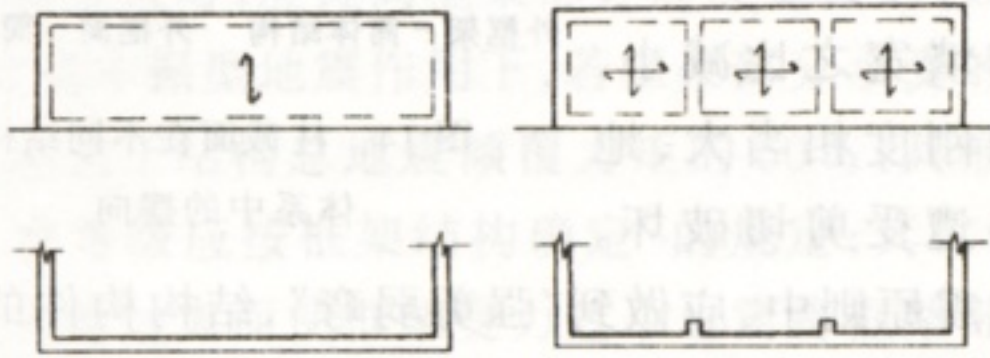


图6 地下室侧壁受力简图

(3)地下室侧壁两向刚度比决定其计算简图 地下室侧壁承受的荷载形式(土压力及水压力等)与水平放置的楼板虽有不同,但其计算简图仍取决于其周边的支承情况及由壁板两向刚度比区分为单向板或双向板。设夹壁柱之间的距离为 L , 层高为 h , 当 $L/h \geq 2$ 时按单向板计算, 反之按双向板算(见图6)。

5. 刚度理论在梁构件中的体现

(1)多跨次梁计算简图的成立有赖于支座处的主梁刚度足够大 楼盖中的多跨连续次梁计算简图的确定,其前提是支承次梁的支座——主梁(框架梁)的刚度远大于次梁,可以成为次梁的“不沉降”支点,否则,计算所得的次梁内力因未考虑支座的“沉陷”而没有反映其实际受力状态(见图7),有经验的结构工程师在次梁的配筋量及配筋方式上会给予一定的考虑,而不是绝对地按照计算结果来配筋。

(2)有相当刚度的楼层封口梁会改变传力路径 如图8所示,原设计意图是将楼层封口梁支承在框架悬臂梁及楼层悬臂梁上,两种悬臂梁平分外挑部分的荷载。而事实上由于封口梁的刚度一般都较大,加上楼层悬臂梁的刚度可能小于框架悬臂梁,结果使得封口梁的荷载大部分直接传给框架悬臂梁。这样,框架悬臂梁由于配筋少而潜伏危险(见图8)。

(3)交叉梁系的传力关系遵循刚度理论 交叉梁系的荷载传递方式取决于两个方向梁的线刚度比值。当两向梁的跨度相同或接近时(即其线刚度比值近似为1),荷载由两向梁共同承担;当两向梁的跨度相差悬殊时(即其线刚度相差较大),荷载为单向传递,荷载最终基本上由线刚度大的梁承担,结构形式虽为交叉梁系,实质上已变成主次梁系(见图9)。

(4)建筑角部边梁按刚度大小分担荷载 楼层角

部相交边梁,其截面尺寸一般都相同。当 $l_2 = l_1$ (即线刚度相等),则为双向双悬臂梁关系,平分板上传来的荷载;如 $l_2 \neq l_1$ (即线刚度不相同),则可看作主次梁关系(长跨的为次梁,短跨的为主梁)。当然,当 l_2 与 l_1 相差不很大的情况下,长跨的梁仍有悬臂受力成分(见图10)。实际设计中,为了安全起见,通常须按两种支承关系验算并作配筋调整:双悬臂时,有意加强长向梁底筋;主次梁时,有意加强长向梁的面筋。

(5)井字梁系的两向梁内力按其线刚度分配 矩形平面的井字梁楼盖,正交正放时由于短向梁的线刚度大,产生的内力较大,长向梁的截面虽与短向梁相同,但由于其线刚度小,故产生的内力也小。当 $A/B \geq 1.5$ 时,为了使两向梁受力均匀,产生的内力相近,此时不宜布置成正交正放形式而应该采用斜放井字梁形式(见图11)。

(6)构造加腋梁与变截面梁的区别在于刚度是否突变 构造加腋梁由于对其加腋尺寸有所限制,使得其轴线上各处的绝对刚度(EI)相差不很大,计算时仍可按等截面梁看待;如加腋尺寸超出限值则必须按变截面梁进行计算(见图12)。

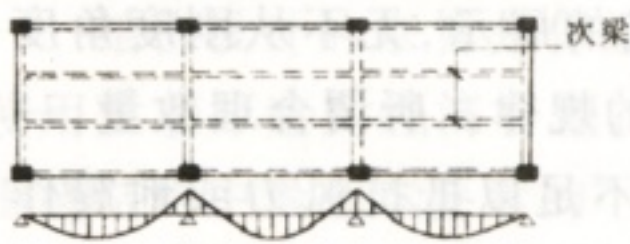


图7 连续次梁计算简图

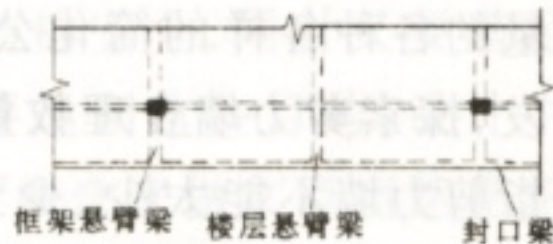


图8 外悬臂支承边梁

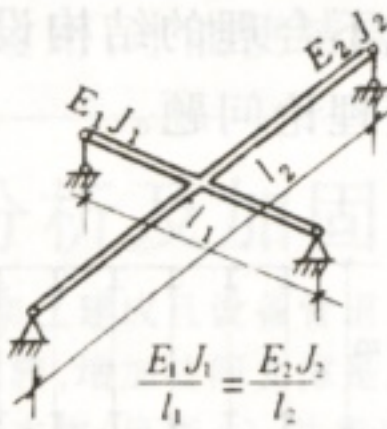


图9 交叉梁系

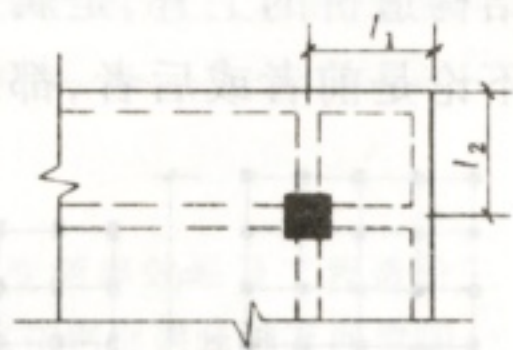


图10 相交悬臂梁

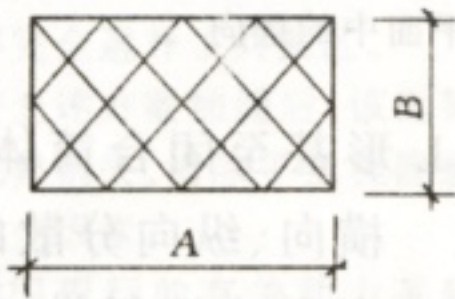


图11 井字梁系

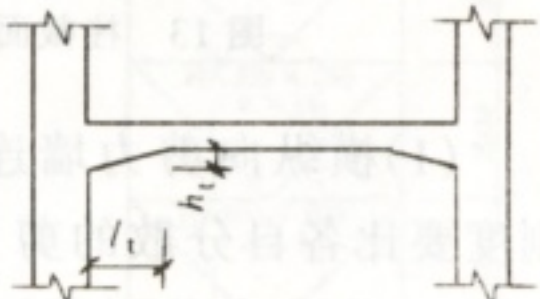


图12 加腋梁

6. 刚度理论在柱构件中的体现

在框架结构柱构件的布置中,柱子截面高宽比的不同取值或者说截面尺寸不同的摆向将在两个主轴方向产生很大的刚度差异(当然结构的侧向刚度还与两方向的梁截面尺寸有关),结构设计中完全可以,而且有必要利用这一特征来调整结构两向刚度的均衡。例如,在建筑平面尺寸 $A \approx B$ 的结构中,由于两向的跨数及跨度接近,此时柱子就应以 $h/b \approx 1$ 布置;而在长方

形的建筑平面中,由于两向的侧向刚度有差异,为了弥补 B 方向(短方向)的刚度不足,此时柱子就应以 h/b 较大值布置,且应以 h 向平行于 B 方向(见图 13),而绝不能与其相反,否则将加剧两向结构整体刚度的差距,既不利于结构的抗风也不利于结构的抗震。

尤其在高层建筑的框架-筒体和外框筒-核心筒(筒中筒)结构中,前者的侧向刚度由各榀框架-剪力墙构成,故外框架柱的 h 向应平行于框架的计算方向;而后的侧向刚度由外框筒的腹板框架构成,故其外围柱的 h 方向应平行于腹板框架方向(见图 14)。这是柱子截面尺寸在不同的结构平面及不同的结构体系中取值(或曰摆向),以取得更合理的结构整体刚度的典型例子。

7. 刚度理论在剪力墙构件中的体现

剪力墙和柱同属结构的竖向构件,但剪力墙在其平面内的刚度远远大于柱,因此在结构布置中,当有剪力墙构件时,剪力墙的截面尺寸、数量、位置和形状等对结构的刚度的影响举足轻重,刚度理论在其中的体现更是十分突出。从早期的墙率(单位建筑面积中剪力墙截面积)探讨,到以刚度为计算参数的剪力墙最低数量的各种各样的简化公式的展示,无不从刚度角度出发,探索剪力墙合理数量的规律。所谓合理数量,一是指剪力墙不能太少,少到不足以抵抗风力或地震作用是结构设计所不允许的;二是指剪力墙不宜太多,即结构刚度不宜太大,否则对抗震反而不利,而且会造成结构造价的上升,是属于不适宜或不合理的结构设计。不论是前者或后者,都涉及到刚度理论问题。

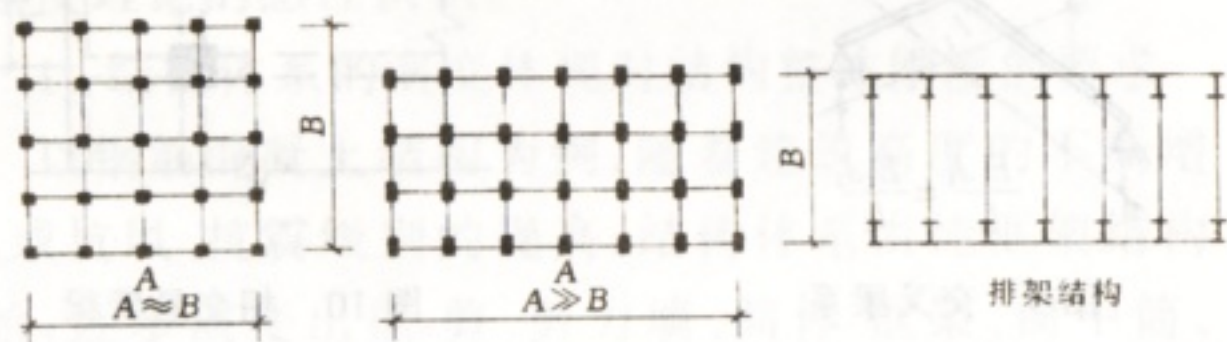


图 13 柱截面在不同平面中的摆向

(1)横纵向剪力墙连成 T、L 形甚至闭合筒体,其刚度要比各自分散的剪力墙大。横向、纵向分散的剪力墙,一个方向的刚度仅由该方向的剪力墙提供,而横向与纵向相连的剪力墙,一个方向的刚度由该方向的剪力墙及与之相连的翼缘共同提供,两者的刚度大小有时可差几倍。相同横截面积(即消耗的材料相同)形成的剪力墙,刚度大的自然比刚度小的要好,这是一个非常明显的道理。除此之外,横向纵向剪力墙相连还增加结构的稳定性,提高结构的抗震延性。

(2)框-剪结构中的剪力墙宜设置在墙面不需要开大洞口的位置,以便形成刚度较大的抗侧力构件。框架-剪力墙结构中的剪力墙,其片数总是有限的。为了

使其起到主要抗侧力构件的作用,每片剪力墙都需要具有一定的刚度,如剪力墙开大洞口,则其刚度大大地被削弱,这将与设置剪力墙的初衷相违背,因此宜将剪力墙设置在不需要开大洞口的位置上,这是从刚度理论出发对框架-剪力墙结构中剪力墙最佳位置选择的一个基本原则。

(3)刚度过大的较长剪力墙,宜开设洞口将其分为多肢剪力墙。较长的剪力墙由于墙的高度与墙宽之比减小,平面内刚度相当大,地震时易遭受剪切破坏,

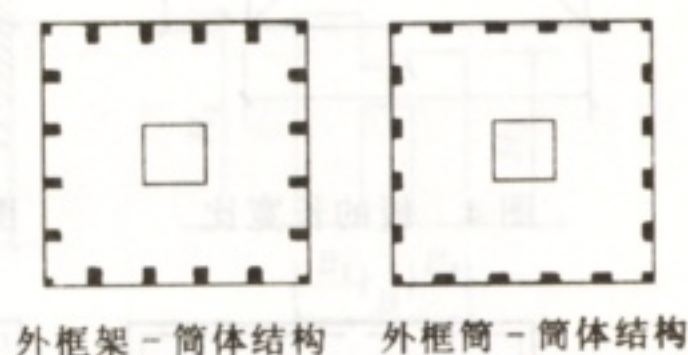


图 14 柱截面在不同结构体系中的摆向

而在抗震原则中,应做到“强剪弱弯”,结构构件的剪切破坏是要避免的。为了达到此目的,需将较长剪力墙通过开设洞口,分成较均匀的若干墙段,即将刚度很大的单肢墙通过开洞口变成双肢或多肢墙,使各墙段的高宽比大于 2,避免剪切破坏,提高其变形能力。这是合理控制剪力墙刚度的一个例子。

8. 刚度理论在构件相互作用中的体现

荷载的传递使构件产生的内力与相连构件的线刚度有关。在相同力作用下,刚度大的构件变形就小,或者,相连接的构件在一个共同力作用下,刚度大的构件产生的内力就大。由于刚度在其中起很重要的作用,因此在结构设计中就有许多有关刚度方面的考虑。

(1)梁与楼板相连,使梁的刚度增大,而梁的刚度则决定了板的边界条件。现浇钢筋混凝土结构,楼板的存在使梁截面由矩形变为 T 形或倒 L 形,不仅使梁增强了抗弯刚度而且也增强了抗扭刚度。结构计算中,区分中跨梁及边跨梁的刚度增大系数正是这个道理;而梁的抗扭刚度大小则决定了板的边界条件,直接影响板跨中的弯矩及挠度,即梁的抗扭刚度大则板跨中的弯矩及挠度就小,相反则大。当楼板的边界为边梁(或洞口梁)时,一般的计算将板在该支承边假设为简支,但当边梁为宽扁梁或深梁(或跨高比较小)时,由于其抗扭刚度很大,如完全按所假设的简支端来配筋,对该边界板支座来说往往是不合适的。

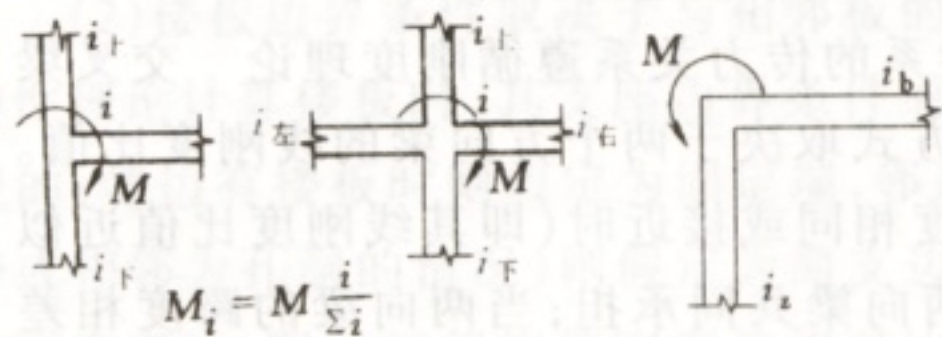


图 15 楼层节点

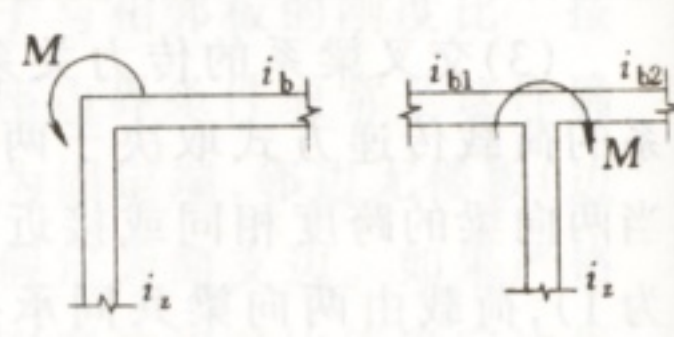


图 16 顶层节点

(2)梁与柱相连,节点处的弯矩按梁柱的线刚度比分配。框架节点的梁柱杆件所承受的弯矩按杆件自身

线刚度所占比例来分配(图 15,16),楼层节点如此,顶层节点也如此。对于梁柱杆件所承受的弯矩值大小来说,由于边节点参与弯矩分配的杆件数少于中节点,因此边节点杆件产生的弯矩通常比中节点的要大,尤其是顶层边节点,这就是设计中顶层柱及顶层框架梁端部配筋需要较多的原因所在。

(3)框-剪结构中柱墙总和的刚度比大小决定了对框架受力的特别考虑 对框架-剪力墙结构中的框架部分需特别考虑两方面:其一,当剪力墙刚度偏小而使框架受力过大时,应提高框架部分的抗震级别,故规范中有“在基本振型地震作用下,若框架部分承受的地震倾覆力矩大于结构总地震倾覆力矩的 50%,其框架部分的抗震等级应按框架结构确定”的规定;其二,当剪力墙的刚度过大而使框架受力过小也需将框架部分给予加强,故规范中有“任一层框架部分的地震剪力不应小于结构底部总地震剪力的 20% 和按结构整体分析中框架部分各楼层地震剪力最大值的 1.5 倍二者的较小值”的规定。前一种情况,框架在其中是主要抗侧力构件,必须保证其各方面的承载能力;后一种情况,由于柱的侧向刚度远小于剪力墙的侧向刚度,框架是抗震的第二道防线,为了不使框架部分过早地出现塑性变形,也必须给予它抵抗地震作用的一定能力。上述两种情况都考虑了加强框架-剪力墙结构中的框架部分,其中的定量规定都是以剪力墙部分的刚度在整体结构中占多少比例的原则来确定的。

此外,正是由于柱的侧向刚度远小于剪力墙,竖向

构件中的柱、墙分界线以其截面尺寸的高宽比来划分: $h/b \leq 4$ 划分为柱, $h/b > 4$ 划分为墙(单肢)。柱为双向压弯构件,而墙由于两向刚度相差极大(16 倍以上),故只考虑墙纵向(即平面内)的刚度而忽视其横向(即平面外)的刚度。

(4)抗震墙与楼盖相连,楼盖刚度影响了抗震墙的发挥,而纵向抗震墙刚度过大会约束楼层的变形 楼盖刚度影响抗震墙的发挥最典型的结构是多层砌体房屋和多层及高层剪力墙结构。由于抗震墙所承受的水平剪力是通过楼盖的传递来实现的,故对楼盖的刚度要有一定的要求。从宏观上衡量,作为楼盖支承点的抗震墙的间距必须有所限制,因抗震墙的间距直接影响楼盖的平面刚度,抗震墙间距过大,楼盖可能变成弹性的,会使抗震墙受力不均,影响抗震墙内力的发挥。

对于长方形平面且房屋较长的建筑,由于温度应力及楼面混凝土收缩应力对楼层的影响较敏感,此时希望抗震墙在纵长方向对楼盖的约束不要太强,否则容易在楼盖中部产生裂缝。因此规范中规定“刚度较大的纵向抗震墙不宜设置在房屋的端开间”。

四、结束语

结构设计的宗旨是保证结构安全,同时又要满足使用要求并达到经济合理。要达到这些目的,设计中围绕结构中最基本要素的“力”概念来做文章当然是正确的,但这仅是外因,只有同时将反映结构内在因素的刚度理论作为结构设计的基础,并在具体工程中加以灵活运用,才能使结构设计从必然王国进入自由王国。

某设备钢框架振动原因分析及加固处理

某化工厂氢化装置为一钢框架结构,结构平面与剖面如图 1,2 所示,钢材为 Q235。该结构于 9m 标高平台上布置一氢化反应搅拌器。钢框架的主要功能是支承该设备及其管道,并作为设备的操作平台。氢化反应搅拌器重 147t,直径 2.5m,高 13.5m。该装置开车投产后,整个钢结构出现剧烈振动,直接影响正常生产操作。

该钢框架梁柱截面均采用焊接 H 型钢,H 型钢柱强轴方向跨度 6m,为主框架方向;弱轴方向跨度 5m,设人字形支撑。该结构上有两个振动源,氢化反应搅拌器的工作转速为 104 次/min,电机工作转速为 1480 次/min。将钢框架简化成平面模型,通过现有的结构分析软件 STS 计算出结构的自振周期 $T=0.59s$,从而得出其自振频率为 $f=1/T=1.69Hz$,换算成工程频率 $n=1.69 \times 60=101$ 次/min,恰与氢化反应搅拌器的频率 $n_{机}=104$ 次/min 非常接近。由此可以得出初步结论,钢框架的振动是由与氢化反应搅拌器的共振引起的。

避免共振的措施有以下几种:1)在钢框架强轴方向增加一道柱间支撑,方法简单易行,效果明显;2)设置隔振器,通过减振装置减少设备对其支承结构传振,该方法需重新安装设备,调整工艺管道布置;3)改变梁柱截面,此方法比较简单,但效果不是很显著。从施工方便

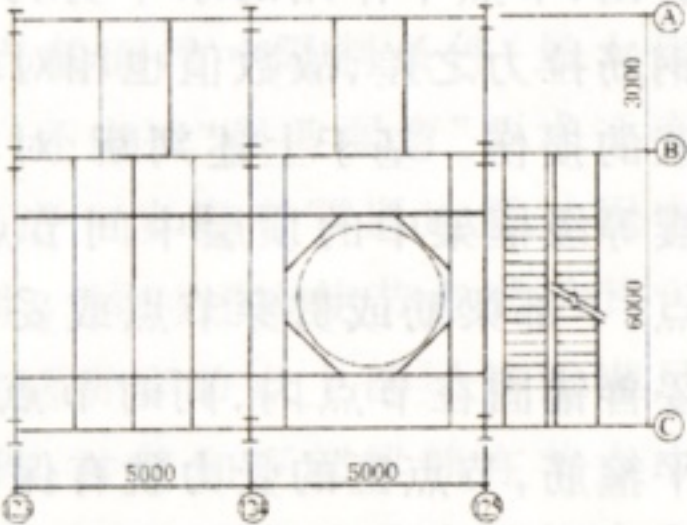


图 1 标高 9m 处的结构平面布置图

(钢框架已建成且设备管道安装完毕)、改变频率效果及工程造价三方面比较,增加柱间支撑是最优方案,因此在钢框架强轴方向增加一片柱间支撑(见图 2),并重新计算了增加柱间支撑后的钢框架的自振频率,得 $n=216$ 次/min $> 1.25n_{机}=130$ 次/min,结构的自振频率完全避开了共振区。

按上述方案加固后,该框架振动现象消失,消除了工程隐患和不安全因素。

我国现行的有关动力基础设计规范都是以振幅控制为原则编制的,往往忽略对频率的控制。在缺少设备制造厂动力资料的情况下,常常以静力荷载乘以动力系数的方法代替动力计算,框架结构的自振频率一般在 1~2.5Hz 左右,容易与低频设备产生共振,故对此类结构的设计应特别注意,必要时可采取隔振措施防止发生共振。

(中油工程设计公司东北分公司 孙新 马惠)

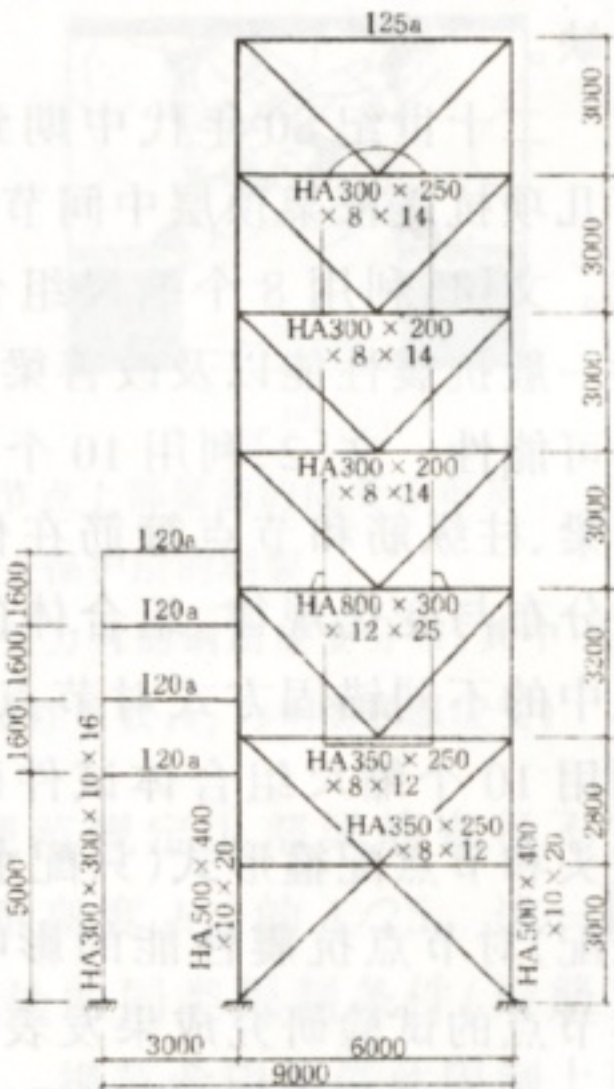


图 2 轴⑤立面图(斜杆为加固支撑,断面均为 2L 100x80x8)