

# 浅谈钢结构抗震性能化设计

李青龙

固原龙源电力勘测设计咨询有限公司 宁夏 固原 756000

**摘要：**随着我国经济形势的变化，钢材产量也是形成逐年攀升的态势，钢结构建筑的形式也日益丰富，不同形式的钢结构建筑亦是层出不穷。目前钢结构工程应用广泛，建设规模空前，建筑钢结构的制造业已形成规模产业。至今几乎80%以上的高层建筑、体育场馆、会议中心、机场航站楼以及高塔结构等都采用了钢结构。为贯彻我们国家提出“合理用钢”的经济政策，为使钢结构建筑抗震设计达到高度“艺术化”的设计效果，《钢结构设计标准》GB 50017-2017提出了钢结构性能化的设计，与传统的《建筑抗震设计规范》GB50011-2011相对比增加了钢结构构件和节点的抗震性能化设计内容，设计人员在钢结构建筑的抗震性能化设计中可以根据塑性耗能区的承载性能等级和延性等合理匹配，结合不同的建筑结构形式选择“低延性高承载力”或“高延性低延性”两类设计方式从而达到既定的抗震设防目标。

**关键词：**钢结构；抗震性能化；塑性机构；延性等级；承载性能等级

前言：钢材是具有明显的屈服台阶，应力应变曲线呈两折线式，属于理想的弹塑性材料，沿各个方向材料性能相同，计算时可以充分考虑各种缺陷的影响，钢结构的实际受力状态与力学计算的结果比较接近也比较可靠。钢材具有良好的塑性变形能力，通过塑性变形来消耗地震能量使得钢结构的抗震性能比较好；钢材的抗拉、抗压强度比较高一般不会出现强度破坏，但钢材也有明显的不足就是稳定问题比较突出。钢材相对于其他建筑材料相比强度高，结构质量轻，可减轻基础的负荷，降低地基的承载。钢结构的工程施工比较方便构件便于工厂加工和现场的拼接，生产效率高，施工周期短，符合我国建筑工业化和产业化生产制造的技术政策要求。

## 1 钢结构抗震性能化设计概述

基于我国是一个多地震国家，钢结构建筑的广泛使用。《钢结构设计标准》GB50017—2017以下称为新钢标的发行和实施对于钢结构建筑抗震提出了不同的性能设计，具有划时代的意义。区别于《建筑抗震设计规范》GB50011—2010（2016年版）以下称为抗规提出的三水准设计，即基本的抗震设防目标是：小震不坏、中震可修、大震不倒。要达到这三水准的抗震设防目标，抗规采取的是两个阶段的方式，小震下结构进行弹性计算，和罕遇地震下结构进行弹塑性变形验算，再通过抗震措施和抗震构造措施来提高塑性耗能区的变形能力，消耗地震作用，使得结构达到既定的设防目标，结构在多遇地震下的承载力功能函数需满足： $S \leq R/\gamma_{RE}$ 。可以看出整个抗规的设计思路是“低承载力—高延性”的设计方

法。新钢标的性能化设计是做设防地震下的承载力抗震验算： $S_{E2} \leq R_K$ 。<sup>[1]</sup>

## 2 钢结构抗震性能化设计基本理念

2.1 钢结构抗震性能化设计的第一大理念：新钢标提出的抗震性能化设计主要是承载力和延性的匹配，应根据建筑物的抗震设防分类标准、拟建建筑物本地区的设防烈度场地的坚硬程度、结构体系的类型和结构平面及竖向的不规则程度综合评定将结构构件塑性耗能区的抗震承载性能等级分为7个等级，性能1到性能7在不同的地震动水准下承载性能由高逐渐到低。结构构件塑性耗能区的延性等级从高到低依次从Ⅰ级到Ⅴ级共五个等级。要讲清楚新钢标提出的钢结构的性能化设计首先得明确提出的一个截面板件宽厚比等级的划分，在钢结构承载能力的计算中其稳定承载力占据着主要地位，即受压屈曲失稳。其钢结构抗震设计的核心理念就是通过控制结构的变形来消耗地震能量，这样就必须要求结构的塑性耗能区具有很强的变形能力，确保受弯构件或者压弯构件在压应力作用下不提前失稳。在进行受压或者压弯构件的计算时，截面按照组成它的板件翼缘宽厚比以及腹板的高厚比依次分为：S1至S5五个等级，根据弯矩与曲率的关系从S1到S5塑性变形能力依次是降低的。在截面的宽厚比划分时有两个重要的原则：按照宽厚比小于规范表格限值划分板件等级，例如一受弯构件材质Q235钢，翼缘的计算宽厚比为10，小于11，翼缘的宽厚比就判断为S2级；按照板件的最大宽厚比等级来划分截面的等级，例如某一受弯构件，翼缘的宽厚比判断为S1而腹板的高厚比判断为S4，那么组成整个截面的等级就

是S4级。在钢结构建筑结构体系中，常见的结构形式有框架结构、支撑结构（塔架类）、框架支撑结构（其中包括框架--中心支撑结构和设置耗能梁段的框架--偏心支撑）这几种常见的体系，其中新钢标能够满足的抗震性能化设计的设防烈度不超过8度（0.2g），框架结构不超过100m。不同结构体系塑性耗能区的划分和承载性能系数确定的基本原则：整个结构中不同部位的构件、同一部位的水平构件和竖向构件，有不同的性能系数；框架结构的承载性能系数从大到小依次是：同层的框架柱 > 同层的框架梁；对于支撑结构和框架中心支撑结构的支撑系统，承载性能系数从高到低依次是：框架柱 > 同层框架梁 > 支撑。对于设置耗能梁段的框架--偏心支撑结构，承载性能系数从大到小依次是：同层框架柱 > 支撑构件 > 框架梁 > 消能梁段。为避免头重脚轻的现象，底层框架柱的承载性能等级普遍高于上层的框架柱的承载性能系数。抗震设计仅是在利用有限的财力，使得地震造成的损失控制在合理的范围内，由于地震也属于一种特殊的偶然作用具有不确定性，对于结构来说提高结构构件的延性比控制承载力更为重要，因此对于高层民用钢结构建筑为达到安全性和经济性一般按照较低的承载力计算，通过比较严格的构造措施提高结构的延性。而对于工业建筑中的钢结构厂房造价成本比较高为降低造价成本，按照较高的承载力计算，结构的抗震措施相对比较放松延性较低的设计方法。关于“构件塑性耗能区实际性能系数 $\Omega_i$ ”的理解，钢结构在中震下的承载力满足照新钢标17.2.3-1，现在以框架结构塑性耗能区（框架梁端）受弯承载力为例， $M_{GE} + \Omega_0 M_{EHK2} + 0.4 M_{EVK2} = W_{Efy}$ 的公式做变形，就可以得到 $\Omega_0 = (W_{Efy} - M_{GE} - 0.4 M_{EVK2}) / M_{EHK2}$ ，这就可以看出构架塑性耗能区的实际承载性能系数 $\Omega$ 就是构件的承载力扣除重力荷载和竖向地震以后与水平地震的比值，这就从数学的角度可以看得出该值大小就能反映出承载性能的大小。塑性耗能区的实际性能系数也理解为中震的打折系数，结构的抗震设计具有循环论证以及自我实现的性质，塑性耗能区构件的承载力越高，则结构的地震作用越大，当取某一性能系数乘以设防地震作用作为地震作用，进行内力分析并据此验证塑性耗能区的构件满足承载力要求时，则塑性耗能区构件的性能系数，将不低于事先设定的性能系数，这种性质可极大地简化性能化设计方法。新钢标17.2.2-1的表格主要分析性能6的性能系数为0.35，从数值上可以看出来，如果按照性能6来设计，结构的抗震承载力就和抗震规范的小震系数完全吻合。再看性能3的性能系数为0.7可以写成 $2 \times 0.35$ ，即2倍的多遇地震就是中震的设计，如此的高

承载力必须对应于低延性，才能达到较好的抗震性能设计。抗规对于一般的结构，构件的截面板件宽厚比为A级延性较高，A级相当于新钢标的S1级，截面转动的过程中承载力不降低，如若结构能承受1.5倍多遇地震的内力组合时，构件的截面板件宽厚比等级为B级，截面的塑性变形能力较A级差，相当于新钢标的S2级，在抗规中特别说明结构能承受2倍多遇地震的内力组合时，截面板件宽厚比要满足钢标的C级，现在新钢标就为S4级，只有截面边缘达到屈服其他部分为完全弹性截面，这个理念在平时的钢结构厂房设计中普遍应用。两本规范完全体现了钢结构抗震性能化设计的承载力和延性相匹配的理念。

2.2 钢结构抗震性能化设计的第二大理念：塑性耗能区连接的极限承载力不应小于构件的屈服承载力，梁柱的刚性连接中受弯和受剪的承载力，柱脚与基础连接的受弯承载力等。连接系数的大小直接反映了连接的构造强度，特别要注明的是在梁柱的刚性连接中对于梁翼缘焊接直接采用焊接的连接系数腹板螺栓连接采用螺栓连接的连接系数，对于摩擦型高强螺栓的连接，可分为两个阶段，在多遇地震下是由螺栓杆施加的预拉力提供抗剪的作用，在罕遇地震下螺栓滑移，螺栓杆与孔壁接触面的预拉力消散，这个阶段就是承压型的连接，在经历了两个阶段的变形，这样就可以看出来螺栓连接的连接系数略大于焊接的连接系数。

2.3 钢结构抗震性能化设计的第三大理念：强节点的要求，节点域即梁柱的刚接节点处及柱腹板在梁高范围内上下边对于H型钢设有加劲肋箱型截面柱设置隔板的区域。框架梁柱采用刚性连接时，H型钢和箱型截面柱的节点域抗震承载力在计算上需要满足强节点弱构件的要求，当结构构件的延性等级不同时，采用不同的公式来计算，一般要求节点域不先于梁柱梁柱进入塑性。对于新钢标17.2.10-1和17.2.10-2两公式的理解，延性等级为I级和II级的中柱，节点域的弯矩系数为0.85，这儿的中柱可不是结构布置图中的中间柱子，而是在所验算方向左右或者上下都有梁的柱，称为中柱，中柱节点域的弯矩系数 $\alpha_p = 0.85$ ，边柱的节点域弯矩系数 $\alpha_p = 0.95$ 。当节点域不满足计算要求时，通常采用加强柱的腹板厚度或者贴焊补强板的措施。为保证柱腹板的屈曲破坏<sup>[2]</sup>。

2.4 钢结构抗震性能化设计的第四大理念：结构的基本抗震构造措施来保证强节点弱构件即节点的破坏不先于构件的破坏，同时通过不同的延性要求相应的构造来保证设计的经济性。由于地震作用是强烈的动力作用，因此节点的连接要满足承受动力荷载的要求，另外地震作用的不确定性，而截面板件宽厚比S5级的延性等级

较差,因此对高烈度和较高层的建筑做了截面宽厚比等级的限值。结构构件在塑性耗能区板件的连接形式应采用全熔透的对接焊缝;支撑、梁宜采用不间断的整根材料。框架结构的塑性耗能区在框架梁端,框架梁端梁的受压翼缘要满足足够的正则化长细比的限值,如若正则化长细比超限,就需要布置横向加劲肋提高梁的变形能力,加劲肋间距不大于2倍梁高,或者通过在梁的上下翼缘设置隅撑,两段隅撑所支撑的长度为0.15L来保证梁的侧向受压失稳。柱与梁的焊接过焊孔有两种分别是常规型和改进型的过焊孔;在梁柱节点或者潜在的塑性耗能区板件的连接焊缝形式应采用全熔透的对接焊缝,来保证强节点的要求。框架柱的承载性能等级高于框架梁的承载性能等级,那么对于框架柱的整体稳定就通过长细比的限值来控制;节点域的受剪正则化宽厚比的限值亦要满足要求。为满足强节点弱构件的要求,新钢标对于框架结构梁柱节点为保证塑性铰外移梁端采用加强梁翼缘的方式:按照弯矩图的包络思想,塑性耗能区出现在弯矩较小的部位所以翼缘加强的方式有两种,一种是翼缘采用盖板加强、另一种是采用翼缘加宽的方式;翼缘加宽后的宽厚比等级不宜大于S3级即 $13\epsilon_k$ 。当柱子为箱型截面时宜增加梁翼缘的厚度。同样为满足强节点弱构件塑性铰外移的设计原理,新钢标还规定了“骨式连接”

的要求,在最小的梁截面位置处出现塑性铰,无论是加强梁翼缘还是削弱梁翼缘的“骨式连接”都是为了满足框架结构的强节点弱构件的要求,让塑性铰最大限度地出现在框架梁端<sup>[1]</sup>。

#### 结束语

由于地震的无规律性,结构的抗震概念设计远大于地震作用的计算,为达到结构既定的性能目标安全性、适用性、经济性、耐久性的目标新钢标提出了钢结构抗震的“延性”和“承载力”的相互匹配的关系。让结构在设防地震强度最强的时段到来之前,结构的部分构件先屈服来消耗地震能量,降低刚度,增大周期,让结构周期与地震波强度最大时段的卓越周期不同时出现,从而避免共振发生使得结构对于地震具有一定程度的抵抗功能,达到抗震设防的基本目标。

#### 参考文献

- [1]GB50017-2017《钢结构设计标准》[S].北京海淀三里河路9号.中国建筑工业出版社出版.2017年12月;
- [2]GB50011-2010《建筑抗震设计规范》(2016年版)[S].北京西郊百万庄.中国建筑工业出版社出版.2010年5月;
- [3]JGJ99-2015《高层民用建筑钢结构技术规程》[S].北京西郊百万庄.中国建筑工业出版社出版.2016年4月。