



# IDEA 钢节点抗震能力设计

筑信达 吴文博 张志国

能力设计是一种常用于延性结构抵抗大地震作用的设计方法，在新西兰规范、欧洲规范和美国规范中有广泛的应用，我国规范中的“强柱弱梁”、“强剪弱弯”和“强节点弱构件”等设计概念也是源自于能力设计。能力设计方法通常有以下内容：

1. 确定出结构上潜在的塑性铰区域的位置，把塑性铰区域截面的强度设计成尽量接近地震作用下的需求强度，保证地震作用下塑性铰区域尽早屈服，但不会过早屈服。同时要塑性铰区域进行详细的构造，保证塑性铰区域有足够的延性。例如我国规范中的“强柱弱梁”就是类似的概念。
2. 在含有塑性铰的构件中，例如剪切破坏或锚固失效等不良破坏模式，应确保产生这些破坏的强度超过考虑超强情况下塑性铰的能力来加以阻止。例如我国规范中的“强剪弱弯”就是类似的概念。
3. 对于潜在的脆性区域，如节点、短柱等，需保证它们的强度超过塑性铰的超强要求，进而确保脆性构件在地震中不发生破坏。例如我国规范中的“强节点弱构件”就是类似的概念。

在能力设计中，工程师往往需要评估在耗能构件出现塑性铰的前提下，节点以及非耗能构件能否安全可靠且无显著变形地传递构件内力。鉴于此，IDEA 软件在节点抗震能力设计（Capacity Design）方面进一步完善和改进，以期辅助用户完成钢结构节点的性能化设计。

## 1 能力设计中的各类强度

强度是用来描述一个构件或截面的抵抗能力，但是对于能力设计而言，这个强度不是确定，实际上强度也是在一定范围内变动的，因此我们需要针对设计的目的选取适当的强度，以下将介绍各强度的意义与应用范围。

### 设计强度

用于确定构件的抗力，钢材的设计强度可通过屈服强度除以材料分项系数获得。在常规节点设计中，螺栓、焊缝等的校核使用的就是设计强度。

### 屈服强度

一般是以钢材  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线上屈服段的最低点（即所谓下屈服点）的应力值定为屈服强度，但是钢材牌号（例如 Q345）中的数值，其实是描述一类材料的屈服强度名义值，简称屈服强度。在常规节点设计中，板件的本构关系中使用了屈服强度。

### 超强强度

超强强度是考虑了实际情况下，钢材的实际屈服强度会大于名义的屈服强度。在欧标中会使用超强系数  $\gamma_{ov}$  与名义屈服强度的乘积确定超强强度，而我国新钢标的条文说明 17.1.6 条中也有关于超强系数  $\eta_y$  的相关描述。

### 强化强度

有时也被称为硬化强度。是考虑大变形时由于应变强化而引起钢材强度的额外增加。在欧标中会使用应变强化系数  $\gamma_{sh}$  与超强强度的乘积确定强化强度，而我国抗震规范条文说明 8.2.8 条中也有相关描述。

## 2 强化的应力-应变曲线

基于钢结构节点的抗震能力设计，耗能构件在地震作用下发生显著的塑性变形用于消耗地震能量，减小地震作用下的结构内力或变形。同时，耗能构件在循环荷载作用下应避免发生断裂破坏，非耗能构件则应能传递由耗能构件屈服所引起的构件内力。因此，对于耗能构件区域应考虑超强强度和应变强化强度，为了考虑耗能构件的塑性铰的实际变形能力，IDEA 采用应变强化（Strain-Hardening）的应力-应变曲线代替理想弹塑性的应力-应变曲线，如图 1 所示。

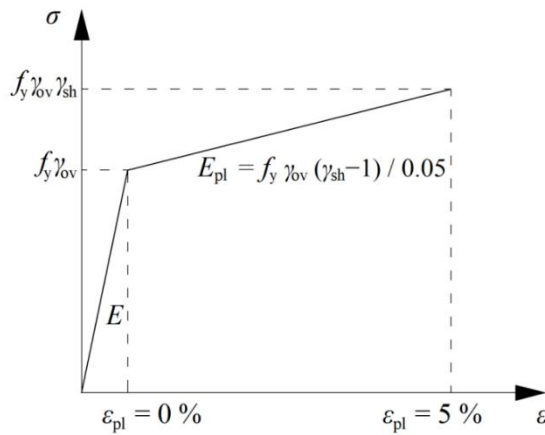


图1 耗能构件的应力-应变曲线

其中， $\gamma_{sh}$ ——应变强化（Strain-Hardening）系数，推荐取值 1.1（EN 1998-1）或 1.2（EN 1993-1-8）。

$\gamma_{ov}$ ——超强（Overstrength）系数，推荐取值 1.25。

以上两个参数均可在【耗能项】中操作修改默认值。同理，耗能构件的抗拉强度自动调整为  $f_{u,max} = \gamma_{ov} f_u$ 。

用户在进行抗震能力设计时，应先指定耗能构件，一旦构件被指定为耗能构件（通常为梁或支撑），其材料的本构关系将使用强化的应力-应变曲线，而其他非耗能构件（如柱）使用的则仍为不考虑超强系数的理想弹塑性的应力-应变曲线。这样既可以确保耗能构件按实际情况变形，也能够保证非耗能构件有足够的力量在地震作用下不发生破坏。

### 3 荷载及荷载作用点

在 IDEA 抗震能力设计中，用户在选定耗能构件后，需要人为确定塑性铰的位置，并且据此手动计算出耗能构件塑性铰处的内力分量而不再是依据荷载组合下的内力，再将计算得到的内力分量施加于塑性铰位置处。以梁的塑性铰为例，用户可根据以下公式计算弯矩设计值和剪力设计值。注意，在抗震能力设计中，用户必须选用非平衡的荷载选项。

$$M_{Ed} = \gamma_{sh} \cdot f_{y,ov} \cdot W_{pl}$$

$$V_{Ed} = \frac{2 \cdot M_{Ed}}{L_h} + V_{gravity}$$

其中， $W_{pl}$  —— 梁截面的塑性截面模量

$L_h$  —— 相邻塑性铰之间沿梁轴线的绝对距离，如图 2 所示。

$V_{gravity}$  —— 地震工况组合中重力荷载作用下的剪力设计值。

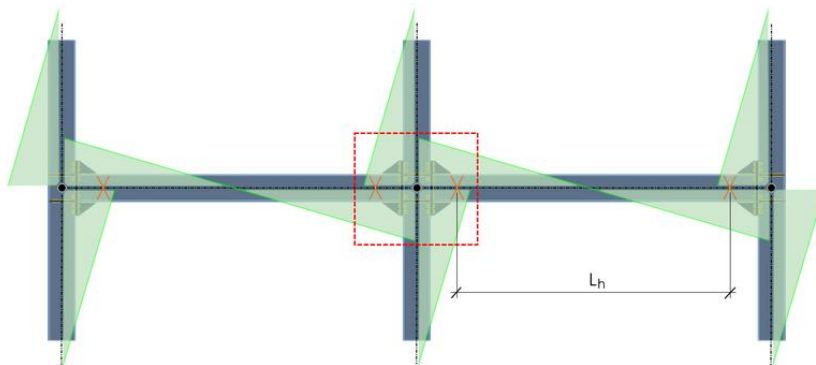


图2 塑性铰之间的距离示意图

注意，梁的构件参数中应选择“N-Vz-My”模型类型，用于考虑竖直平面内的弯矩和剪力，但忽略关于截面弱轴的弯矩。除此之外，用户还应自行判断塑性铰出现的位置，用于指定耗能构件的荷载作用点。针对不同的耗能构件，用户往往需要凭



借经验或试验确定塑性铰的位置。

#### 4 算例

本算例为一框架节点，框架梁与柱翼缘通过端板连接，并且框架端部设置了加腋。框架端部荷载为 $M_y = 389 \text{ kNm}$ ， $V_z = -173 \text{ kN}$ 。

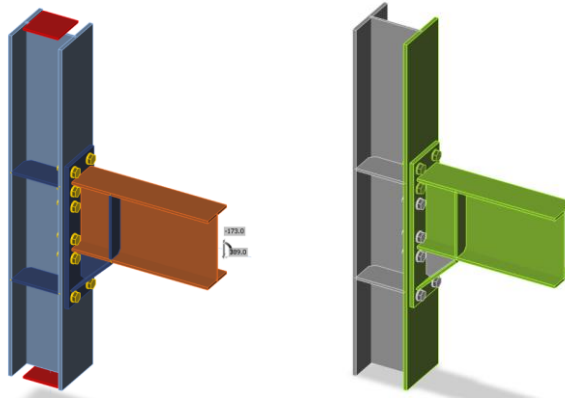


图3 原始节点的应力/应变分析

如图3所示的梁柱节点，对于常规的应力/应变分析，该节点中的各个组件均可通过校核。在此基础上，用户可选择梁作为耗能构件并基于此进行节点的抗震能力设计。具体操作步骤如下：

第一，修改梁的模型类型为“N-Vz-My”，如图4所示。考虑到塑性铰多出现在加劲板后方，荷载作用点可取为365mm。

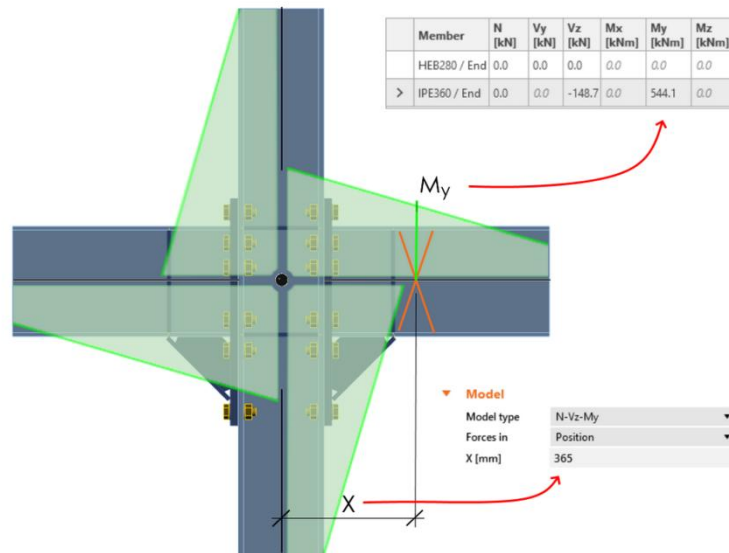


图4 塑性铰位置及荷载大小

第二，根据前述公式计算作用于塑性铰处的弯矩设计值和剪力设计值，具体计算过程如下。需要注意的是，用户应复制当前荷载工况并修改剪力和弯矩的正负号，以此定义内力异号的第二个荷载工况。

$$M_{Ed} = \gamma_{sh} \cdot f_{y,ov} \cdot W_{pl} = 1.2 \times 443.75 \times 10^6 \times 1.0218 \times 10^{-3} = 544.12 \text{ kNm}$$

$$\gamma_{sh} = 1.2$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_{y,ov} = f_y \cdot \gamma_{ov} = 355 \times 1.25 = 443.75 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{ov} = 1.25$$

$$W_{pl,IPE360} = 1.0218 \times 10^6 \text{ mm}^3$$



$$V_{Ed} = \frac{2 \cdot M_{Ed}}{L_h} = 2 \times \frac{544.12}{7.32} = 148.67kN$$

$$L_H = 7.32m$$

第三，指定梁为耗能构件并查看或修改应变强化系数  $\gamma_{sh}$  和材料超强系数  $\gamma_{ov}$ 。其中，应变强化系数在耗能构件的属性窗口中修改，默认值 1.2；材料超强系数在材料属性中修改，默认值 1.25。

完成上述操作后即可运行节点的抗震能力设计。整体来讲，与常规的应力/应变分析相比，抗震能力设计中作用于梁端的弯矩值更大（ $544kN \cdot m > 389kN \cdot m$ ），节点和非耗能构件在当前设计方案中的安全性存在一定风险。从图 5 可以看出，当前节点中的大部分组件均无法通过校核，用户必须修改设计方案。

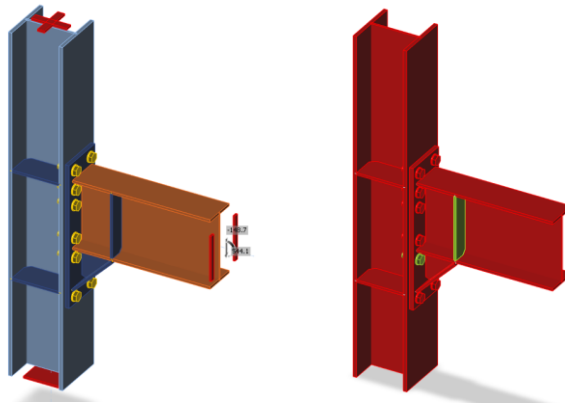


图 5 原始节点的抗震能力设计

在原始节点的基础上修改设计方案，采用增加端板厚度和柱腹板贴焊补强等措施可以显著改善节点的抗震性能。如图 6 所示，新节点中的节点和非耗能构件均可通过校核，而耗能构件则出现预期的塑性铰（详见图 6 中的等效应变云图）。

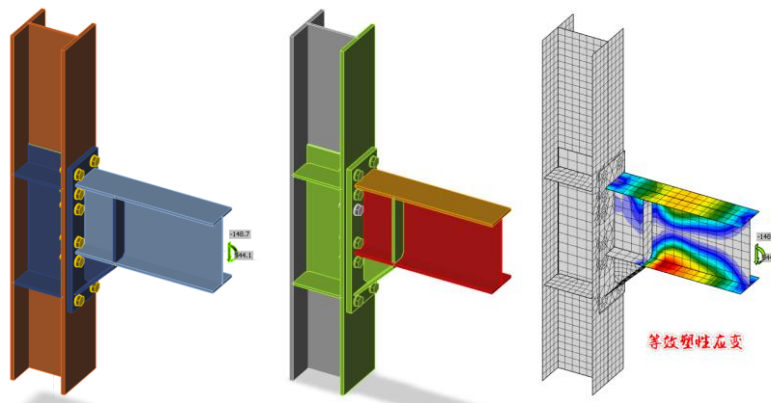


图 6 新节点的抗震能力设计

## 5 小结

本文首先简单介绍了能力设计的基本概念，并且介绍了能力设计中涉及到的各类强度以及各个强度在不同设计目标下的应用。然后介绍了强化应力-应变曲线在 IDEA 中的实现，以及能力设计中荷载大小的计算以及荷载施加位置的确定。最后，通过一个简单的算例对比了常规设计和能力设计下，节点的不同表现。

希望以上内容可以帮助众多的 IDEA 用户或爱好者更加深入地理解和应用此软件，以期解决实际工程中遇到的有关性能化设计的计算问题。