

# 钢结构外露式刚接柱脚的过渡板连接设计方法

刘思印<sup>1</sup> 高兴增<sup>2</sup>

山东华科规划建筑设计有限公司

**摘要：**钢结构凭借优质的力学性能、抗震性能、环保性能等优势，在工业与民用建筑中广泛应用。而钢结构工程的最终质量水平离不开科学合理的钢结构设计工作，钢结构设计包含整体分析、构件分析、节点分析等等，其中节点设计中的柱脚设计至关重要，其能够将柱底力传递至基础，促使上部结构和基础得以有效连接，共同发挥作用。文章首先分析了钢结构柱脚的基本类型，接着详细分析外露式刚接柱脚的分类和受力特点，最后提出了外露式刚接柱脚过渡板连接设计方法，并通过工程实例予以验算。结果表明，刚接柱脚过渡板连接设计方法安全科学，能够满足钢结构柱脚各项设计要求。

**关键词：**钢结构；外露式刚接柱脚；过渡板；连接方法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.09.094

建筑钢结构一般可分为轻钢结构、普通钢结构、大跨度空间钢结构和钢混合组合结构，再细分为高层钢结构住宅、轻型门式刚架厂房、重型钢结构厂房、钢结构桥梁及网架、网壳等空间结构。与传统的砖混结构建筑相比，钢结构建筑在环保、节能、高效、工厂化生产、美观等方面具有明显的优势。在钢结构建筑中，柱脚的主要作用是将柱固定在混凝土基础或承台上，并可靠地将柱底的内力传递给基础或承台，以保证上部结构与基础或承台的有效连接，因此是决定结构承载力的主要因素，在整个钢结构中起着非常重要的作用。外露柱脚通过地脚螺栓将钢柱底板与基础混凝土连接，是一种结构简单、安装方便的支撑形式，常用于中低层钢结构建筑中。柱脚节点是钢结构与下部基础或承台有效连接的重要节点，各板件的力学性能明显影响柱脚和钢结构的应力性能。

## 一、钢结构柱脚形式概述

根据受力特性，钢柱柱脚可分成铰接和刚接两类，只承载轴向压杆的柱脚通常采用铰接形式，而用于支撑横向剪切和弯曲的柱脚，通常采用刚性接头。铰接式立柱应为外露式，而刚接式为外露式、外包式、埋入式和嵌式。关于立柱支承的选择，在各个技术规格中都有如下的说明。《建筑抗震设计规范》GB50011-2010（《抗规》）8.3.8条：钢筋混凝土框架应采取内嵌或外包形式；6、7度及不大于50米的情况下，也可以使用外露型；关于单层钢制厂房，标准9.2.16条：立柱支座必须能够稳定地进行承重的转移，以埋入式、插入式或外包式为好；6、7度时，也可以使用外露式；关于多层钢结构工厂，技术规程 H.2.8.6条：柱脚必须能确保输送柱的承载能力，以埋入式、插入式或外包式柱脚为佳，并按照单层钢结构厂房柱脚设计规定执行，多层钢结构厂房不再推荐选用外露式柱脚。结合上述各项技术指标对钢

结构柱脚的设计要求，对于不同类型钢结构工程可选用的柱脚见表1。

表1 不同类型钢结构工程可选用的柱脚

设防烈度	钢结构工程类型	柱脚			
		外露式	外包式	埋入式	插入式
6度、7度	门式刚架轻型厂房	☆	☆	☆	☆
	单层（重型）钢结构厂房	△	☆	☆	☆
	多层钢结构厂房	○	☆	☆	☆
	单层钢结构建筑	△	☆	☆	☆
	多层钢结构建筑	○	△	☆	☆
	高层钢结构建筑	○	△	☆	☆
	钢与混凝土组合结构建筑	○	△	☆	☆
	钢管混凝土结构建筑	○	△	☆	☆
8度及以上	门式刚架轻型厂房	△	☆	☆	☆
	单层（重型）钢结构厂房	○	☆	☆	☆
	多层钢结构厂房	○	☆	☆	☆
	单层钢结构建筑	△	☆	☆	☆
	多层钢结构建筑	○	△	☆	☆
	高层钢结构建筑	○	△	☆	☆
	钢与混凝土组合结构建筑	○	△	☆	☆
	钢管混凝土结构建筑	○	△	☆	☆

注：☆代表适宜采用的连接方式；△代表可以采用的连接方式，但需进行性能化设计；○代表不应选用或连接部位可不采用的连接方式。

## 二、钢结构外露式柱脚的类型及受力分析

### （一）外露式柱脚的类型

#### 1. 外露式铰接柱脚

##### （1）底板平面尺寸的确定

假设地基上的混凝土压强是以直线形式存在的，从而计算出柱足底的面积。地基承受的应力应小于地基的轴向压缩强度，按式（1）计算。

$$\sigma_c = \frac{N}{LB} \leq \beta_c f_c \quad (1)$$

式中：N为柱的轴心压力；L为柱脚底板的长度；B为柱脚底板的宽度； $f_c$ 为柱脚底板下混凝土的轴心抗压强度设计值； $\beta_c$ 为混凝土局部承压时强度提高系数。

##### （2）底板厚度的确定

在考虑地基的厚度时，假设地基上的悬挑部分与支撑桩周围的悬臂梁相似，其承受的载荷是均匀的。在柱足底下的混凝土地基上，由于受反作用力大，为了防止地基的厚度太大，可以采用加筋的方式将地基划分成分段，对分区中的基底进行单独的分析，可按式（2）计算。

$$t_{pb} \geq \sqrt{\frac{6M_{jmax}}{f}} \quad (2)$$

式中M<sub>max</sub>为根据柱脚底板下混凝土基础的反力和底板的支撑条件确定的最大弯矩。

(3) 柱脚底板与钢柱间连接焊缝计算

无论有无加劲肋置，均可按无加劲肋的情况，可以考虑采用《钢规》进行计算。焊接接头可以承受全载荷，但是鉴于目前钢材生产的现状，若能将其进行铣削，则需要将压力传力的影响纳入工件上。这时，应将焊接接头所受的柱压进行计算。在实际应用中，通常假定焊接接头只需要承担25%的柱压力，也就是这里可以减少75%，而在计算时，计算中焊缝满足柱脚内力的25%可认为焊缝设计，则可以视为焊接工艺的安全性。

(4) 锚栓的确定

由于采用了铰链式立柱的锚栓只用于固定在安装程序中，所以，螺栓的尺寸一般按其与钢板薄片的厚度及基板的厚度来决定。但一旦产生了向上的拉力，锚栓的数量应根据上拔力确定按式(3)计算。

$$A_s \geq \frac{N_{max}}{f_t^a} \quad (3)$$

式中f<sub>t</sub><sup>a</sup>为锚栓的抗拉强度设计值。

(5) 柱脚的抗剪计算

在柱脚上，一般不能用来支撑柱脚的横向剪切，这一段的横向剪切力应该通过柱的底面与其下面的砼的摩擦力来抵消，因此，当剪切力小于0.4时，可以不加剪切。另外，应该考虑安装剪切键。剪切接头的安装应使其与剪切方向保持正交，而剪切接头必须具有一定的刚性(用钢板的厚度来确保)，通常不低于50mm。也可采用型钢作为抗剪连接件。上述验算应按两个方向分别进行。

$$V_{fb} = 0.4N \geq V \quad (4)$$

式中V<sub>fb</sub>为摩擦力(抗剪承载力)。

2. 外露式刚接柱脚

(1) 板平面尺寸的确定

在柱脚弯矩M、轴向压力N和水平剪力V的影响下，由柱底偏心度来确定地基下的混凝土地基的压力，当柱底偏心距e≤L/6时，可按式(5)计算。

$$\sigma_c = \frac{N}{LB} (1 + 6e/L) \leq \beta_c f_c \quad (5)$$

式中：N为柱的轴心压力；L为柱脚底板的长度；B为柱脚底板的宽度；f<sub>c</sub>为柱脚底板下混凝土的轴心抗压强度设计值。

(2) 底板厚度的确定

底板厚度的计算可按式(2)计算。

(3) 柱脚底板与钢柱间连接焊缝计算柱脚底板与钢柱间连接焊缝计算要求同式(3)。

(4) 锚栓的确定

柱脚每侧(受拉区)所需的锚栓总有效面积应根据柱脚底板下混凝土基础反力分布情况按式(6)确定。

$$A_s = \frac{M - Na}{f_t^a x} \quad (6)$$

式中：M、N为柱脚底面在柱截面形心轴处所受的弯矩和轴心力，应取使锚栓承受最大拉力时的荷载组合内力；a为由柱截面形心轴至柱脚底面受压区压力合力线

之间的距离；x为由锚栓轴线到柱脚底受压区压力合力线之间的距离。

(5) 抗剪计算

柱脚的抗剪计算要求同式(4)。

(6) 抗震时计算要点

1) 钢柱轴力由底板直接传至混凝土基础，验算柱脚底面下混凝土的局部承压，承压面积为底板面积。

2) 在轴力和弯矩作用下计算所需锚栓的面积，按式(7)计算。

$$M \leq M_1 \quad (7)$$

式中：M为柱脚弯矩设计值；M<sub>1</sub>为在轴力与弯矩作用下按钢筋混凝土压弯构件截面设计方法计算的柱脚受弯承载力，kN·m。设截面为底板面积，受拉边的锚栓单独承受拉力，混凝土基础单独承受压力，受压边的锚栓不参加工作，锚栓混凝土的强度均取设计值。

(3) 柱与柱脚连接处，柱可能出现塑性铰的柱脚极限受弯承载力应大于钢柱的全塑形抗弯承载力，按式(8)计算。

$$M_u \leq M_{pc} \quad (8)$$

式中：M<sub>pc</sub>为考虑轴力时柱的塑形受弯承载力；M<sub>u</sub>为考虑轴力时柱脚的极限受弯承载力。

(二) 外露式柱脚的典型受力形态

在轴力和弯矩作用下，如果桩基的基面具有很高的刚性，则不会产生部分的弯矩，而基座的压合力和端面的端面是一致的，图1显示了其典型的受力形态。

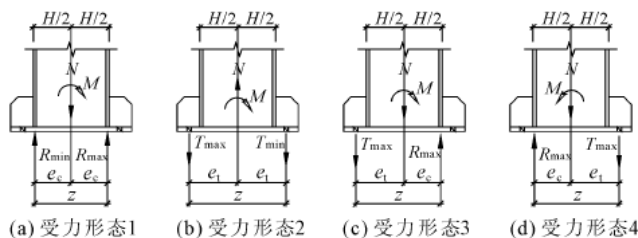


图1 外露式柱脚的典型受力形态

在该表中，N表示钢管柱基部的受力值，M表示其底部的弯矩，H表示其横断面的高度；R表示承重机翼沿下支撑的反作用力，T表示桩脚螺栓的轴向作用力，e<sub>c</sub>表示受压翼缘的中心到柱心的间距，以及由张紧锚心到柱心的间距。它的主要应力形式是：

(1) 在钢管的轴向力N是很大的，而在弯矩很小的情况下，在柱脚的底部都存在着压应力，并且在柱脚和螺栓都是被压的；在这种情况下，锚杆没有参加工作，其应力状况如图1(a)所示。

(2) 在钢筋的轴向力N是张紧力，而在弯矩小的情况下，柱脚的基底已经与地基的顶部灌浆层分离，所有的柱脚都是在张紧下的。

(3) 在桩腿受到轴向力N和扭矩M的联合影响时，桩基底部受到压力，同时受到拉，桩腿的一面受到拉，另一面受到压力。参见1(c)和1(d)。

当柱脚底部在一个受拉的一侧受力时，只有一列的柱脚，其受拉力的中心应该是这个螺栓列的核心，压力的作用是在承压的边缘上。在轴向压力和弯矩的作用

下，它们的应力形式会呈现图1 (a)、1 (c) 和1 (d) 三个方向，图1 (c) 和1 (d) 是水平力往复作用下的形态。

### 三、钢结构外露式刚接柱脚的设计方法

#### (一) 传统连接方式的不足之处

现阶段，最为常用的外露刚接桩脚的施工工艺是在桩头上焊一根底板，然后在桩基下浇注完毕后，将已埋入地基中的锚栓与底板进行牢固的联结。在钢柱安装到位后，必须进行高度和竖向的调节，因此，在柱子的底部与地基的顶部之间要留出50mm左右的空隙。在进行二次加压灌浆之前，在进行钢柱标高和竖直角度的调节。这种设计是一种常规的设计方式。常规的设计方案有如下缺陷：①后浇段预留50mm的预应力混凝土结构很难确保，且易产生空鼓，造成柱脚受压不均，从而造成安全事故。②在工程建设中，预埋式锚杆的安装部位常常存在较大的误差，与预埋件的布置存在一定的误差。③在钢立柱安装时，由于留置空间有限，施工不方便。

#### (二) 钢结构外露式刚接柱脚的过渡板连接设计方法

钢结构外露型刚接柱的过渡板连接是在地基顶部预先埋入一块钢板，然后在厂房内按照计划在厂房内采用塞焊，然后将过渡板与地基顶部预先埋入的钢筋进行焊接，然后将具有开口的钢筋与螺栓进行联接。这种新的结构形式可以有效地解决二次浇筑、预埋螺栓定位误差等问题，使得桩底剪切传递更加明确、可靠，而且易于工程实施。

#### 四、外露式刚接柱脚的过渡板连接设计方法计算实例

##### (一) 设计资料

某轻型钢构工厂H型钢柱、钢柱、锚栓、预埋板、过渡板梁和立柱底座采用Q355B型，断面为H400×260×6×12，其基础混凝土的抗压强度为C30，其内力为300KN、V=35KN、m=202KN·m。

##### (二) 柱脚底板下混凝土受压验算

柱脚布置见图2，在钢柱翼缘处初步布置3个M30锚栓。

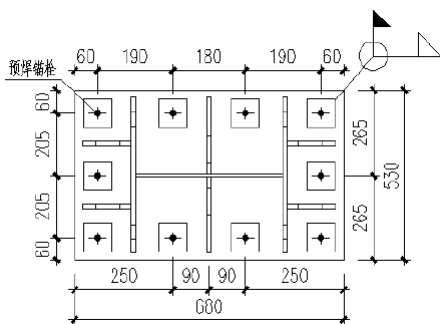


图2 柱脚锚栓布置图

经过计算：底板下的混凝土最大受压应力为： $\sigma_c = 9.5 \text{MPa} \leq \beta_c f_c = 14.3 \text{MPa}$ 。满足设计要求。

##### (三) 锚筋在剪力V、轴向压力N和弯矩M共同作用下的验算

在剪力V、轴向压力N和弯矩M共同作用下，锚筋的

布置见图3：

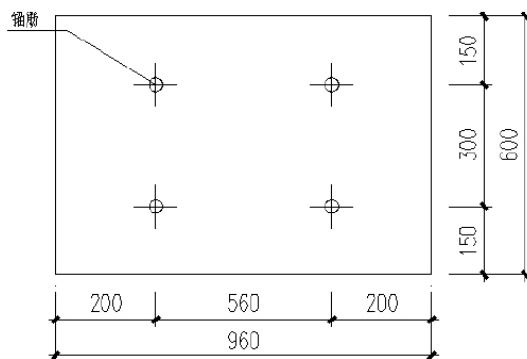


图3 基础顶部预埋钢板图

初步选择的锚筋的直径是28mm，而锚板厚度是30mm；锚板的初始大小是：480mm×960mm； $A=460800 \text{mm}^2$ ；采用HRB400型钢筋，强度为 $300 \text{N/mm}^2$ ； $f_c=14.3 \text{N/mm}^2$ ； $Z=560 \text{mm}$ ，通过计算可知：设置4个28mm的钢筋能够达到设计的需要。

##### (四) 柱脚底板与柱下端的连接焊缝验算

在不考虑加强筋等加强板与板之间的焊接时，应按照无加劲肋的情形进行计算。H型管柱周缘用角焊焊接，焊接工艺参数  $H_f=10 \text{mm}$ ，焊条E50。经过计算： $\sigma_{fs} = 52.8 \text{MPa} \leq f_f^w = 200 \text{MPa}$ 。可见：柱脚底板与柱下端的连接焊缝计算满足设计要求。

##### (五) 过渡板与基础顶面预埋板的连接焊缝验算

在过渡板和地基上预埋钢板的焊接接头应按照以下的计算方法进行计算。沿过渡板周边采用角焊缝连接，焊缝尺寸初步选定为 $h_f=10 \text{mm}$ ，焊条的类型为E50。

经过计算： $\sigma_{fs} = 60.6 \text{MPa} \leq f_f^w = 200 \text{MPa}$ 。可见：过渡板与基础顶面预埋板的连接焊缝计算满足设计要求。

综上所述，柱脚的功能是将柱支撑在钢筋基础上，将柱的压力、水平剪力、弯矩等安全可靠的传递到基础上。当前，我国有关柱脚设计的钢结构规程和手册繁多，其对柱脚设计的需求也各有不同。为此，本文介绍了一种新型的柱脚接头结构的设计。结果表明：1) 采用外露型刚接柱脚的过渡板接头可以有效地防止二次浇筑及预埋螺栓的定位误差，从而保证了柱底剪切传递更加明确可靠，而且易于工程实施。(2) 根通过工程典型实例的外露式刚接柱脚的过渡板连接方法的设计计算，并对新的方案进行了具体的计算和分析，为同类项目的施工提供了借鉴。

#### 参考文献

[1] 范康, 王晓飞. 外露式柱脚的转动刚度及其对门式刚架设计的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20 (02): 204-208.  
 [2] 杨福海, 王银春. 钢结构外露式刚接柱脚的过渡板连接设计方法[J]. 科学技术创新, 2021 (33): 126-129.  
 [3] 张淳. 装配式钢结构梁柱连接节点研究[J]. 建筑技术开发, 2021, 48 (04): 5-6.  
 [4] 刘卫辉, 郭洁, 贺志坚, 于硕. 钢结构柱脚设计要点综述[J]. 建筑结构, 2019, 49 (S2): 674-678.