

探讨钢柱脚与混凝土基础刚接连接设计方法

李军

四川省建筑设计研究院有限公司

摘要：本文针对钢柱脚与混凝土基础的刚接连接问题进行研究，探讨其设计方法、使用范围及构造要求。本文对钢柱脚与混凝土基础的刚接连接进行概述，介绍钢柱脚接口部分的设计原则和要求，并详细探讨刚接柱脚类型与之相对应的构造要求与计算方法，阐述钢柱脚与混凝土基础刚接连接设计方法。通过上述探讨，得出较为全面可靠的钢柱脚刚接连接设计方法，为工程实践提供指导参考。

关键词：刚接连接；设计方法；柱脚类型；构造措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.12.017

钢柱脚是钢结构上部结构与下部基础连接的关键节点，它将钢柱下端的轴力、剪力、弯矩直接传递给下部基础。柱脚的设计对于建筑结构的稳定性和安全性有着至关重要的作用。因此，研究钢柱脚与混凝土基础刚接连接的设计方法、柱脚类型、及其适用范围和相关构造要求，对于提高建筑结构的水平技术和安全性具有重要意义。因此有必要进一步深入探讨钢柱脚刚接连接设计方面的问题，并提出一套可靠、适用的设计方法。

一、钢柱脚与混凝土基础的刚接连接概述

钢柱脚与混凝土基础的刚接连接设计是建筑结构中的重要一环。该连接部分设计过程中需要考虑多种因素，如连接方式、柱脚类型及埋置深度等。钢柱脚类型包括外露式、外包式、埋入式，各自具有不同的特点和适用范围。

钢柱脚与混凝土基础的刚接连接问题涉及多个方面的计算和构造要求，需要从多个角度进行分析和研究。在抗震设计时，需要考虑钢柱脚与基础连接的极限承载力要求。故本文从上述方面入手，探讨如何选取最优的连接方式和最合适的刚接柱脚类型，为工程实践提供参考。

二、钢柱脚与混凝土基础的刚接连接的重要性

钢柱脚与混凝土基础的刚接连接设计是钢结构设计中极为重要的一环。在建筑上部结构荷载作用下，柱脚将上部荷载传递到混凝土基础上，确保上部结构的安全性和稳定性。因此，钢柱脚的设计要严格依据相关国家规范要求，结合工程实际情况，选择合适的柱脚型式，以提高钢柱脚与混凝土基础连接的承载能力，保障结构的整体安全性^[1]。

三、钢柱脚与混凝土基础的刚接连接设计方面存在的问题

在实践中，钢柱脚与混凝土基础的刚接连接设计仍存在着一些问题，常见的问题如下：

第一，在选择刚接柱脚型式时如何兼顾工程项目的经济合理性。

第二，选择的钢柱脚连接方式是否满足施工现场的可实施性。在实际工程施工中，现场施工人员对设计院

设计的柱脚难以施工，柱脚设计节点过于复杂，从而影响了施工质量对结构的安全性留下隐患。

第三，刚接柱脚连接方式须具备一定得灵活性，以满足不同的施工需求。

因此，在钢柱脚与混凝土基础的刚接连接设计方面，需要进一步结合工程实际情况，选用合适的柱脚类型，以满足现场施工的可行性。

四、设计原则和要求

（一）钢柱脚力学性能要求

钢柱脚力学性能是钢柱脚刚接连接设计的核心问题，其要求包括强度、极限承载力、刚度等方面。具体而言，钢柱脚应具有足够的强度和刚度，能够承受上部钢结构荷载下的承载力和变形要求，同时保证连接不会失稳或发生塑性变形，并保证其结构安全。因此，钢柱脚的刚接连接设计要保证足够的力学性能要求，以满足工程实践的需要。

（二）钢柱脚安全性要求

钢柱脚与混凝土基础连接的安全性对整个结构的稳定性和承载能力有着至关重要的影响。因此，在设计钢柱脚接口时，必须考虑安全性的要求，确保连接能够满足规范要求。

首先，在钢柱脚与混凝土基础的连接设计中，应遵守相关的国家规范和标准。同时，应充分考虑钢柱脚和混凝土基础的材料特性和共同受力情况，合理选择连接方式和材料，并进行必要的力学分析和计算，以确保柱脚与基础连接能够承受预期的荷载。

其次，钢柱脚与混凝土基础的连接点应该设有足够的安全冗余度，例如预埋件、钢柱脚底板、加劲板、基础截面尺寸大小等，以增强连接节点的可靠性，达到强节点弱构件的结构概念。同时，连接节点的设计应该考虑钢结构焊缝要求、地脚螺栓间距、以及钢柱脚现场临时施工的局部稳定性等技术问题，避免焊接缺陷和焊缝应力集中等问题。在连接点的选择和设计中，还需要考虑连接的拆卸和更换问题，便于后续的维护、改造工作^[2]。

最后，钢柱脚与混凝土基础的连接点应该进行合理的检测和评估，避免存在隐形的安全隐患。在工程实践中，应充分考虑连接点的使用环境、连接方式和荷载情况，进行定期的检测和评估，发现问题并及时采取相应的措施，保证连接节点的安全性。

五、设计计算方法和公式

（一）设计柱脚类型和槽口长度的计算方法

钢柱脚与混凝土基础刚接连接设计中，柱脚类型和槽口长度是重要的计算参数，具体计算方法及相关公式如下。

1. 设计柱脚类型的计算方法

设计柱脚类型需要考虑以下因素：钢柱脚尺寸、承

载能力、预埋件尺寸及数量等。设计柱脚要满足以下条件：①承载能力符合设计规范要求；②预埋件数量和尺寸并符合《钢结构设计手册》的规定；③预留的空间符合规范要求以及施工条件要求。

2. 槽口长度的计算方法

槽口长度是指用于容纳预埋件的混凝土槽口的长度。槽口长度的计算需要考虑以下因素：预埋件数量、尺寸和间距，以及混凝土槽口的尺寸等。其中，槽口宽度应保证预埋件的安装和连接，一般每边宜大于或等于钢柱直径+200mm。同时，槽口侧面混凝土厚度应根据结构设计要求确定^[3]。

在进行槽口截面计算时，需要特别注意预埋件的间距，避免因预埋件过于集中而导致受力不均和现场施工困难等不利因素，影响施工质量和结构安全。

(二) 钢柱脚计算公式

目前钢柱脚的计算公式主要是按照《钢结构设计手册》和《钢结构设计标准》进行设计。同时，需按照《抗规》8.2.8条进行柱脚与基础的极限承载力要求进行复核算。

1. 外露式刚接柱脚计算公式

外露式刚接柱脚需考虑柱脚底板的尺寸、厚度、锚栓的计算、加劲肋的计算以及焊缝的计算等，具体详见《钢结构设计手册》第13章节点连接相关公式。

2. 外包式刚接柱脚计算公式

外包式刚接柱脚需考虑柱脚底板的尺寸、厚度、外包混凝土的宽度和高度等，具体公式详见具体详见《钢结构设计手册》第13章节点连接相关公式。

3. 埋入式钢结构柱脚计算公式

埋入式刚接柱脚需考虑柱脚底板的尺寸、厚度、柱脚埋入基础内的深度以及离基础边缘的边距等要求，具体公式详见具体详见《钢结构设计手册》第13章节点连接相关公式。

六、钢柱脚与混凝土基础刚接连接设计方法及构造要求

(一) 外露式柱脚设计方法

外露式柱脚是用埋入混凝土的锚栓将钢柱和混凝土基础相连，属常见的刚接连接方式，如支撑加劲肋和靴梁式刚接柱脚。《抗规》9.2.16条明确规定，6、7度时可采用外露式柱脚，即外露式柱脚只适用抗震设防烈度为7度以下的钢结构建筑^[4]。具体设计方法主要包括以下几个方面：

第一，确定柱脚尺寸和形状：先根据建筑设计和荷载计算确定钢柱的尺寸和形状，再根据柱脚与基础的连接方式确定柱脚下部的形状和尺寸，使其满足连接方式的要求。

第二，确定柱脚预埋板的尺寸和形状：根据柱脚下部的形状和连接方式的要求，确定预埋板的尺寸和形状，包括长度、宽度和厚度等。

第三，确定加劲板的尺寸大小和厚度：加劲板的截面和厚度是影响连接柱脚强度和稳定性的重要因素，同时应根据下部基础的截面大小和形状、钢柱荷载和预埋板自身的承载能力等多个因素进行综合考虑。

第四，确定预埋板与钢柱的连接方式：预埋板与钢

柱的连接方式主要包括焊接、螺栓连接，应根据钢柱材质、连接方式的可行性和要求等进行选择。需要特别注意的是，连接方式的选择应保证连接强度和稳定性要求，并且方便施工和后期的维护。

第五，确定焊缝形式和厚度，钢柱与底板的连接焊缝应采用全熔透坡口焊接，焊缝质量等级为一级，加劲板与钢柱和底板的焊接宜采用全熔透坡口焊接，焊缝质量等级宜为二级，以达到强节点弱构件的结构概念设计方法^[5]。

第六，柱脚的防腐要求。柱脚在地面以下部分则需要采用C15混凝土将其柱脚进行二次包裹，保护层厚度宜大于等于75mm以上；同时，应保证二次包裹的混凝土应高出室外地面150mm以上，室内地面宜大于50mm。当钢柱脚底面在建筑地面以上时，柱脚的二次包裹应相应的高出室外地面100mm以上，室内地面50mm以上。

第七，钢柱底板下方应设置抗剪键，以抵抗水平剪力，抗剪键深度不宜小于200mm。

综上所述，外露式钢柱脚的设计内容包括确定柱脚尺寸和形状、确定柱脚预埋板的尺寸和厚度、确定锚栓的规格、材质、长度、数量和加劲板的厚度、宽度以及高度等多个方面的构造要求，需要根据工程实际情况进行综合考虑和选择。下图为常用的几种外露式刚接柱脚。

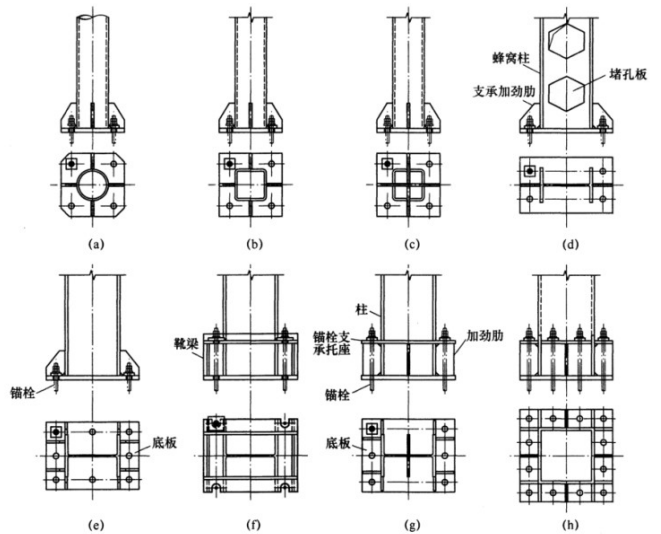


图1 外露式柱脚示意

(二) 外包式柱脚设计方法

外包式柱脚是钢柱脚与混凝土基础常见的一种连接方式。它由钢柱和混凝土共同组成受力模式。一般情况下，在圆钢管柱、矩形钢柱内浇筑自密实混凝土，浇筑高度宜高出1倍钢柱直径。外包式柱脚的优点在于其连接强度高、刚度好，并且施工方便，适用于大型建筑物的钢结构设计，能够有效地提高建筑结构的稳定性和抗震性。外包式柱脚的设计需要注意以下几点：

第一，柱脚的外包混凝土厚度需要根据结构的具体情况计算，并满足规范规定的构造要求，以达到足够的承载力和稳定性。对于H钢柱外包混凝土的厚度宜大于等于200mm，矩形钢柱和圆钢管柱宜大于等于

220mm，同时宜大于钢柱本身截面高度方向的30%以上，以方便现场施工和保证施工质量。在无地下室的情况下，外包宽度宜加大20%以达到加强节点刚度和稳定性要求。

第二，柱脚的外包混凝土高度对于H钢柱外包高度宜大于2倍钢柱截面高度，矩形钢柱和圆钢管柱宜大于等于2.5倍钢柱截面高度，同时宜大于钢柱本身截面高度方向的30%以上。在无地下室的情况下，相应外包高度宜加大20%。

第三，钢柱与底板的焊缝应采用全熔透坡口焊接，焊缝质量等级宜为一级。

第四，在外包高度范围内钢柱外应设置栓钉，栓钉规格和数量应按规范进行计算，栓钉直径一般采用16mm、19mm、22mm三种规格，栓钉长度不应小于4倍直径（一般取100~150mm），栓钉的间距一般取200mm。

第五，外包混凝土的强度等级不宜小于C30，钢柱内的混凝土强度等级宜大于C40。

第六，外包高度范围内钢柱不应涂刷防腐涂料，外包高度以外的防腐做法同外露式防腐做法。

通过采用上述构造要求，可以有效地提高外包式柱脚与基础连接可靠性，为结构的安全性提供有力的保障。下图为外包式柱脚示意图。

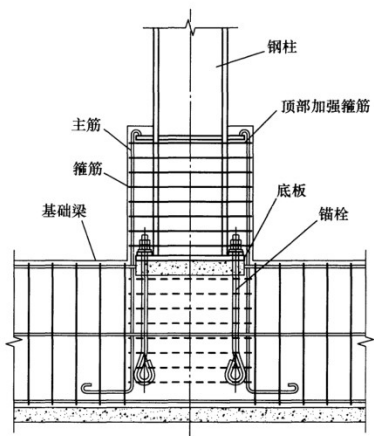


图2 外包式柱脚示意

（三）埋入式柱脚设计方法

埋入式柱脚的主要特点是钢柱脚直接嵌入混凝土基础中，通过钢柱翼缘与混凝土基础的侧压力所形成的弯矩，以平衡钢柱的弯矩和剪力。对于混凝土基础和钢柱脚的刚接连接，埋入式柱脚是一种最好的刚接柱脚设计方法。在设计时，需要充分考虑柱脚的埋入深度、柱脚截面形状和尺寸、混凝土强度等级、基础的截面尺寸等因素，以保证连接的可靠性和稳定性。此外，对于大型钢柱脚，还需要考虑运输和安装的问题，必须在设计中充分考虑这些因素。埋入式柱脚设计方法的优点是可以提高连接的承载能力和稳定性，而缺点则主要是基础截面尺寸偏大、安装的困难度较大，施工工序相对负责，工程成本偏高。为此，在设计中需要综合考虑各方面因素，选择最佳的连接方式。埋入式柱脚的设计需要注意以下几点：

第一，埋入深度要求对于H钢柱宜大于2倍钢柱截面

高度，矩形钢柱的埋置深度应大于2.5倍钢柱直径，圆钢管柱埋置深度应大于3倍钢柱截面直径，底板应设置固定螺栓与混凝土基础可靠连接。

第二，钢柱埋入部分的四周保护层厚度。对于中柱，保护层厚度需大于250mm以上，同时需要大于等于钢柱受弯矩方向的截面尺寸的1/2以上；对于边柱，保护层厚度需大于400mm以上，同时大于等于钢柱受弯矩方向的截面尺寸的75%以上。

第三，埋入范围内钢柱应设置栓钉，栓钉规格及要求与外包式混凝土做法类同。

第四，圆钢柱和矩形钢柱埋入混凝土基础深度范围内的钢柱内宜采用自密实混凝土，且应高出基础以上1倍的钢柱直径。

第五，埋入混凝土范围内钢柱不应涂刷防腐涂料，钢柱除基础外的防腐做法同外露式防腐做法。

通过上述设计，能满足强节点的概念设计要求，下图为埋入式柱脚示意图。

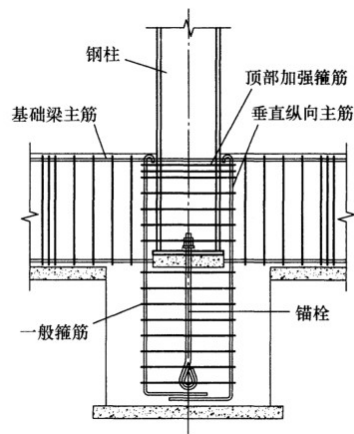


图3 埋入式柱脚示意

结束语

综上所述，钢柱脚与混凝土基础的刚接连接在建筑结构中发挥着关键作用。在钢柱脚设计时，需依据相应设计规范要求，结合工程项目实际情况，选择合理的节点型式，从而满足安全性、经济性、合理性的要求。

参考文献

- [1]周佳, 童根树, 李常虹, 刘宜丰, 费少洋, 王铭意.《钢结构与钢-混凝土组合结构设计方法》的理解与应用——钢柱脚[J]. 建筑结构, 2023, 53 (05): 148-151+126.
- [2]张一爽, 倪永松. 外包式钢柱脚的设计方法[J]. 建筑结构, 2022, 52 (S1): 1236-1240.
- [3]陈敏刚. 基于预应力锚栓技术的悬挂式单轨钢柱脚设计[J]. 城市道桥与防洪, 2021, (07): 95-96+132+14.
- [4]徐辉, 逯志斌. 钢柱脚与混凝土基础连接节点二次灌浆层的处理措施[J]. 住宅与房地产, 2021, (16): 115-116.
- [5]丁磊, 童根树, 张磊. 外露式钢柱脚节点的抗剪性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54 (01): 73-82+117.