

外露式钢柱脚极限承载力不足的处理方法与工程应用 ——以祥银传动设备制造二期项目为例

冷辉良

上海申联建筑设计有限公司, 上海 201900

DOI:10.61369/ERA.2026060023

摘 要 : 针对多层钢结构厂房工程中, 外露式刚接柱脚按规范 "强节点弱构件" 要求设计时, 普遍出现锚栓规格超常规、底板尺寸过大、甚至极限承载力不满足要求的行业痛点, 本文结合现行规范与钢结构设计理念, 剖析问题核心成因, 提出基于抗震性能化设计的优化方法。以 笔者主持设计 2023 年竣工的祥银传动设备制造二期项目为依托, 针对刚度、长细比控制的钢柱特性, 通过设定中震弹性性能目标, 采用 50% 全塑性受弯承载力控制指标完成柱脚优化。结果表明, 该方法可将柱脚钢材用量降低 35%, 锚栓规格从 M45 优化至常规 M39, 有效缩小柱脚尺寸, 兼顾安全性与经济性, 可为同类工程提供可靠参考。

关 键 词 : 外露式钢柱脚; 极限承载力; 钢结构; 抗震性能化设计; 刚度控制柱

Treatment Methods and Engineering Applications for Insufficient Ultimate Bearing Capacity of Exposed Steel Column Bases —Taking the Phase II Project of Xiangyin Transmission Equipment Manufacturing as an Example

Leng Huiliang

Shanghai Shenlian Architectural Design Co., Ltd., Shanghai 201900

Abstract : In multi-story steel structure factory buildings, when exposed rigid column bases are designed according to the specification requirement of "strong joints and weak members," industry pain points such as oversized anchor bolts, excessively large base plate dimensions, and even insufficient ultimate bearing capacity commonly occur. This paper combines current specifications with steel structure design concepts to analyze the core causes of these issues and proposes optimization methods based on seismic performance-based design. Relying on the Phase II Project of Xiangyin Transmission Equipment Manufacturing, completed in 2023 and designed by the author, this study addresses the characteristics of steel columns controlled by stiffness and slenderness ratios. By setting moderate earthquake elastic performance objectives and adopting a 50% full plastic flexural capacity control indicator, the column base optimization is achieved. The results show that this method can reduce steel usage in column bases by 35%, optimize anchor bolt specifications from M45 to conventional M39, effectively reduce column base dimensions, and balance safety and economy, providing a reliable reference for similar projects.

Keywords : exposed steel column base; ultimate bearing capacity; steel structure; seismic performance-based design; stiffness-controlled column

引言

外露式钢柱脚因施工便捷、造价可控等优势, 在多层钢结构厂房中应用广泛。但现行规范基于 "低强度高延性" 的传统抗震延性设计理念, 以 "强节点弱构件" 为核心原则, 对柱脚极限承载力提出了严格的强连接约束, 导致工程中普遍出现柱脚底板超尺、锚栓规格超标、经济性差的问题, 尤其对于由刚度、长细比控制的框架柱, 传统设计理念的适用性存在先天局限, 极易造成过度设计。本文结合现行规范剖析问题成因, 提出适配刚度控制柱的性能化优化方法, 并结合实际工程验证方法的可行性与经济性, 为同类工程设计提供参考。

一、现行规范对外露式柱脚的核心设计要求

我国现行钢结构相关规范均围绕 "强节点弱构件" 的抗震理念, 对柱脚连接极限承载力作出强制性规定, 核心要求可归纳为两点:

一是常规抗震设计中, 柱脚与基础的连接极限承载力应满足 $M_{uj} \geq \eta_j M_{pe}$, 其中外露式柱脚连接系数 η_j 按规范取 1.1~1.2, M_{pe} 为考虑轴力影响的钢柱全塑性受弯承载力;

二是《钢结构设计标准》GB 50017-2017 第 17.2.12 条明确, 框架承担总水平地震剪力 50% 以上的结构, 实腹柱刚接外露式柱脚, 按锚栓毛截面屈服计算的受弯承载力不宜小于钢柱全截面塑性受弯承载力的 50%, 为性能化优化设计提供了明确的规范依据。

上述公式中, 考虑轴力影响的钢柱全塑性受弯承载力 M_{pe} , 是柱脚承载力设计的核心计算参数, 对于 H 形截面绕强轴受弯的构件, 按《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99-2015 第 8.1.5 条规定计算:

$$\text{当 } N/N_y \leq 0.13 \text{ 时, } M_{pe} = M_p$$

$$\text{当 } N/N_y > 0.13 \text{ 时, } M_{pe} = 1.15(1 - N/N_y)M_p$$

式中: $M_p = f_y W_p$, 为钢柱无轴力影响的全塑性受弯承载力; W_p 为钢柱截面绕强轴的塑性截面抵抗矩; N 为柱底最不利组合轴力设计值; $N_y = Af_y$, 为钢柱轴向屈服承载力; A 为钢柱截面面积; f_y 为钢材屈服强度设计值。

二、外露式柱脚承载力不足的核心成因分析

结合规范条款、设计理念与工程实践, 外露式柱脚出现极限承载力不足、尺寸过大的核心原因可归纳为以下 3 点。

(一) 抗震设计理念与节点受力特性的先天矛盾

规范 "强节点弱构件" 的强连接要求, 源于低强度高延性的传统抗震设计理念, 核心目标是确保地震作用下塑性铰先出现在钢柱柱身, 通过构件的塑性变形实现延性耗能, 避免柱脚连接部位发生脆性破坏。但外露式柱脚本质上属于半刚性节点, 其弯矩传递主要依赖锚栓的受拉和底板下混凝土的受压, 极限受弯承载力提升高度依赖锚栓规格、底板尺寸和力臂的增大, 要满足 "连接承载力高于构件塑性承载力" 的延性设计要求, 本身存在先天的受力局限性。

(二) 钢柱截面控制因素与设计理念的错配

多层钢结构厂房的框架柱, 绝大多数情况下截面由长细比、层间位移角等刚度指标控制, 而非强度控制, 这也是本文优化设计方法的核心前提。此类钢柱的截面尺寸远大于强度需求, 全塑性受弯承载力数值极高, 且当柱轴力较小时, 对柱脚极限承载力的要求会进一步提高。以本文工程实例的 H400×400×13×21 钢柱为例, 多遇地震下柱底实际弯矩设计值仅为全塑性受弯承载力的 33.8%, 柱身在设防烈度地震下仍能保持弹性, 无需利用塑性变形耗能, 天然适配高强度低延性的设计逻辑。

常规设计的核心误区, 正是将适用于强度控制构件的 "低强度

高延性" 理念, 机械套用到了刚度控制的钢柱上: 对于无需利用延性耗能的柱身, 仍强行要求柱脚承载力高于柱身全塑性弯矩, 最终必然导致柱脚尺寸和锚栓规格远超工程常规范范围, 造成严重的材料浪费与施工难度提升。

(三) 常规设计方法的局限性

常规设计中, 设计人员多直接按多遇地震组合内力进行柱脚截面设计, 再按规范强连接条款进行极限承载力验算, 未结合结构的实际抗震性能需求、钢柱的截面控制因素进行针对性调整。对于刚度控制的钢柱, 这种设计方法完全忽略了截面承载力的富余度, 也未利用规范中性化设计的相关条款突破传统设计理念的局限, 最终导致柱脚设计极不经济, 甚至出现承载力无法满足的情况。

三、外露式柱脚承载力不足的处理方法

结合现行规范条款、设计理念与工程实践, 针对外露式柱脚承载力不足的问题, 可采用以下 3 类处理方法, 各类方法的适用场景与技术要点如下。

(一) 更换柱脚形式, 采用埋入式或外包式柱脚

当外露式柱脚锚栓直径超过 M42、底板尺寸过大时, 可直接更换为埋入式或外包式柱脚。该类柱脚属于刚性柱脚, 弯矩主要通过钢柱翼缘与基础混凝土的承压传递, 锚栓仅需满足安装固定和构造要求, 无需承担主要弯矩, 可从根本上解决锚栓规格过大的问题, 其抗震性能更优, 但施工复杂度与造价相对更高, 适用于抗震等级高、对柱脚刚度要求严格、柱身由强度控制需利用延性耗能的结构。

(二) 采用抗震性能化设计, 优化承载力控制指标

该方法为解决外露式柱脚设计难题的核心方案, 也是高强度低延性设计理念的具体工程落地, 其核心设计逻辑源于规范的本质要求: "强节点弱构件" 的核心目的, 是确保塑性铰先出现在柱身、而非柱脚节点; 对于刚度控制的钢柱, 若通过性能化设计, 保证柱底在设防烈度地震下保持弹性、不出现塑性铰, 就从根本上实现了规范的抗震安全目标, 无需机械套用传统延性设计的强连接条款, 同时可结合 GB 50017-2017 第 17.2.12 条的规定, 将柱脚受弯承载力控制指标从 $1.1M_{pe}$ 优化为 $0.5M_{pe}$, 大幅降低设计要求。

具体设计逻辑与流程为: 首先完成多遇地震下的结构整体计算, 明确钢柱的截面控制因素, 验证其刚度控制、承载力富余的特性; 其次设定抗震性能目标为中震弹性、大震不屈服, 计算设防烈度地震下的柱底内力组合, 验算钢柱柱根的压弯承载力, 确保柱底在中震下保持弹性, 不会出现塑性铰, 无需利用柱身延性耗能; 若中震弹性验算满足, 即可根据 GB 50017-2017 第 17.2.12 条, 按锚栓毛截面屈服计算的柱脚受弯承载力不小于 $0.5M_{pe}$ 进行设计; 若中震弹性验算不满足, 说明柱身需利用延性耗能, 仍按原规范强连接条款进行设计。该方法完全符合现行规范要求, 既保证了结构的抗震安全, 又可将柱脚的承载力要求降低 50% 以上, 使锚栓规格和底板尺寸回归工程常规范范围, 是多层

钢结构厂房刚度控制柱的首选设计方案。

（三）优化钢柱截面设计，降低全塑性受弯承载力

对于截面完全由刚度控制、承载力富余度极大的钢柱，可在满足规范层间位移角、长细比限值的前提下，优化钢柱截面形式与尺寸，降低截面塑性抵抗矩，从而减小钢柱全塑性受弯承载力，降低对柱脚极限承载力的要求。设计中可优先采用窄翼缘 H 型钢，在保证截面回转半径、满足刚度要求的同时，减小翼缘宽度和厚度，降低截面塑性受弯承载力。但该方法存在明显局限性，若截面优化后无法满足结构刚度要求，或导致用钢量不降反升，则不宜采用。

四、工程应用实例

（一）项目概况

本项目为两层钢结构生产车间，位于 7 度抗震设防区（0.1g），设计地震分组第三组，场地类别 II 类，建筑安全等级二级，设计使用年限 50 年。建筑总高度 12.0m，首层层高 7.8m，二层层高 4.2m，柱网尺寸 7.5m×9.0m，横向采用刚接框架，纵向设置柱间支撑作为主要抗侧力构件，经计算框架承担的总水平地震剪力占比为 62%，满足 GB 50017-2017 第 17.2.12 条的适用条件。框架柱采用焊接 H 型钢，截面规格为 H400×400×13×21，材质为 Q355B，柱脚设计采用外露式刚接柱脚。

（二）原设计问题

本项目钢柱无轴力影响的全塑性受弯承载力，按本文第 1 章所述方法计算，柱底轴压比 $N/N_y=0.104<0.13$ ，因此考虑轴力影响的全塑性受弯承载力。本项目框架柱截面由长细比、层间位移角控制，属于典型的刚度控制柱，适配高强度低延性的设计逻辑，原设计机械套用传统延性设计的强连接条款，是造成柱脚设计过度保守的核心原因。

按《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010（2016 年版）要求，外露式柱脚极限受弯承载力需满足。经设计验算，需采用 16 根 M45 锚栓，底板尺寸 1000mm×1000mm×36mm，锚栓规格远超工程常规的 M20~M42 范围，底板尺寸过大，不仅施工难度高，且材料浪费严重，经济性极差。

（三）优化设计方案

本次优化采用抗震性能化设计方法，核心逻辑为通过设定合理的性能目标，在保证抗震安全的前提下优化柱脚设计参数。首先设定结构性能目标为中震弹性、大震不屈服，经计算，中震荷载组合（1.0 恒载 + 1.0 活载 + 1.0 中震地震作用）下，柱底最大弯矩设计值，轴力设计值 $N=780\text{ kN}$ 。

随后对钢柱柱根进行压弯承载力验算，该截面在 $N=780\text{ kN}$ 轴力下，可承受的弯矩设计值为 $900\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，远大于中震下的柱底弯矩 $420\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，满足中震弹性要求，即柱底在设防烈度地震下不会进入塑性，不会出现塑性铰，从根本上满足了规范“强节点弱构件”的抗震核心要求。

根据 GB 50017-2017 第 17.2.12 条，柱脚受弯承载力控制值

取。基于此控制值完成优化设计，最终柱脚参数如下：底板采用 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ ，材质 Q355B；锚栓采用 12 根 M39，材质 Q355B，单根锚栓毛截面屈服承载力 412 kN ；经计算，柱脚极限受弯承载力为 $840\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，满足 $\geq 621\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的规范要求。同步完成底板受弯、基础混凝土局部承压、锚栓锚固长度、柱脚受剪承载力验算，均满足规范要求，其中剪力由底板与基础顶面的摩擦力承担，设置抗剪键作为安全储备。

（四）优化效果对比

优化前后柱脚设计参数与经济性对比如下表所示。		
设计项目	原设计	优化设计
锚栓规格与数量	16 根 M45	12 根 M39
底板尺寸与厚度	$1000\text{ mm}\times 1000\text{ mm}\times 36\text{ mm}$	$800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 30\text{ mm}$
柱脚极限受弯承载力	$1380\text{ kN}\cdot\text{m}$	$840\text{ kN}\cdot\text{m}$
柱脚钢材总用量	302kg	196kg
锚栓施工难度	极高，需定制加工	常规，现货供应

由对比结果可知，优化后的柱脚尺寸与锚栓规格回归常规工程范围，钢材用量降低 35%，施工难度大幅下降，同时完全满足现行规范的抗震设计要求，兼顾了结构安全性与工程经济性。该项目投用至今，柱脚工作状态良好，未出现任何变形、裂缝等异常情况。

五、设计注意事项

采用 $0.5M_{pe}$ 控制指标设计时，必须严格把控设计理念的适用边界，仅适用于由刚度、长细比控制、中震下可保持弹性的框架柱，非框架控制的抗侧力结构、需利用柱身延性耗能的强度控制柱不得直接套用该方法。必须严格满足 GB 50017-2017 第 17.2.12 条的适用条件，即框架承担的总水平地震剪力占比需 $\geq 50\%$ ；抗震性能化设计必须进行专项验算，中震、大震下的构件内力，应采用振型分解反应谱法完成专项计算，结合对应设防烈度的地震参数与无分项系数的荷载标准组合确定，严禁采用小震内力线性放大的简化方式，确保柱底在设防烈度下不出现塑性铰。外露式柱脚的受剪承载力必须单独验算，性能系数不宜小于 1.0，水平剪力优先由底板与基础顶面的摩擦力承担，摩擦力不足时必须设置抗剪键，不得由锚栓承担水平剪力；锚栓的锚固长度必须满足规范极限状态要求，确保锚栓先于混凝土发生屈服破坏，避免出现混凝土锥体破坏、拔出破坏等脆性失效模式；当柱轴力较大、 $N/N_y>0.13$ 时， M_{pe} 会发生折减，柱脚的承载力要求相应降低，此时外露式柱脚的适用性更好，设计中可优先利用轴力的有利影响。

六、结论

外露式钢柱脚出现极限承载力不足、尺寸过大的核心成因，是传统“低强度高延性”抗震设计理念与钢柱刚度控制特性的错配，对于长细比、层间位移角控制的框架柱，其全塑性受弯承载力远高于地震作用下的柱底内力，柱身在设防烈度地震下无需利

用延性耗能，直接按强连接条款设计必然导致柱脚极不经济。现行《钢结构设计标准》GB 50017-2017 中的抗震性能化设计条款与 17.2.12 条的专项规定，为适配 " 高强度低延性 " 理念的柱脚优化设计提供了明确的规范依据，是解决该工程难题的核心技术路径。针对刚度控制的钢柱，通过设定中震弹性的抗震性能目标，采用 $0.5M_{pe}$ 的控制指标，可将柱脚钢材用量降低 35%，大幅减

小柱脚尺寸与锚栓规格，技术可行，经济合理，可为同类多层钢结构工程提供参考。设计中需严格把控优化方法的适用边界与适用条件，做好中震、大震下的专项承载力验算，确保结构抗震安全，不得盲目降低柱脚承载力要求。

参考文献

-
- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 (2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程: JGJ 99-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [4] 钢结构设计手册编委会. 钢结构设计手册 (第四版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 郭小农, 熊宙, 朱劭骏, 等. 外露式钢柱抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43 (06): 145-155.
- [6] 张相勇, 张艳霞, 刘冰. 多层钢结构外露式柱脚设计优化方法 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (08): 95-100.
- [7] 赵鹏飞, 张相勇, 刘军进. 钢结构柱脚设计方法修订建议 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (15): 78-84.