

外包式钢结构柱脚受力性能分析及工程设计算例研究

曾 琳

中国十九冶集团有限公司 四川 成都 610000

摘 要:在现代钢结构建筑中,柱脚是连接上部结构与基础、传递荷载的关键节点,其受力、刚度及破坏模式直接影响结构整体安全与抗震性能。外包式钢柱脚作为介于外露式与埋入式之间的刚性组合柱脚,施工便捷、刚度大、抗震性能优良,多用于多层钢框架、工业厂房工程。该节点由钢柱、底板、锚栓、外包钢筋混凝土及抗剪栓钉协同工作,荷载传递呈分段特征,外包顶部为最不利受力截面。国内相关试验资料偏少,规范偏于构造要求,工程常存在外包尺寸、配筋锚固不合理等问题。本文依据《钢结构设计标准》GB50017-2017、《高层民用建筑钢结构技术》JGJ99-2015,分析其受力性能、破坏模式与影响参数,结合工程设计算例完成各项验算,总结设计施工要点。研究表明,设计需把控外包混凝土抗弯、箍筋抗剪、纵筋锚固、顶部局部承压四项核心,实现延性破坏,贯彻“强剪弱弯、强节点、弱构件、强锚固、强局部承压”原则,可为同类工程提供参考。

关键词:外包式钢柱脚;构造要求;受力性能;破坏模式;工程算例

引言:在钢框架、门式钢架、框架-支撑等钢结构体系中,柱脚承担钢柱轴力、弯矩与水平剪力的传递,是保障结构稳定的关键构件。钢柱脚分为外露式、外包式、埋入式三类:外露式施工简便但刚度弱,多用于轻型或非抗震工程;埋入式刚度可靠但施工复杂,受场地条件制约。外包式柱脚为钢混组合节点,在钢柱下段设置外包钢筋混凝土短柱,兼具施工便捷、高刚度与良好抗震性能,适用于中多层钢结构、厂房及公共建筑。其传力特点为轴力由底板传递,剪力由外包短柱承担,弯矩由外包混凝土短柱与钢柱共同承担。现行规范对其内力分配、配筋计算等核心内容界定不清,工程易存在外包高度、锚固、局部承压等设计隐患,相关试验与标准化算例不足。本文分析其受力性能,梳理计算方法并结合工程算例开展设计,总结设计常见误区与施工质量控制要点,可为同类工程设计提供参考。

1 外包式柱脚受力机理与工作性能分析

1.1 荷载传递路径与内力分布规律

外包式钢柱脚在竖向力、水平力与弯矩共同作用下,各构件受力与传力路径具有分段控制特征。竖向轴力主要通过钢柱底板与基础顶面接触面传递,外包混凝土短柱基本不承担竖向压力,因此轴力传递设计需重点把控底板尺寸及基础混凝土局部承压性能。弯矩由钢柱翼缘内力→外包顶部区域→水平加劲肋→外包混凝土柱与钢柱共同作用→基础顶面,弯矩由外包混凝土短柱与钢柱共同承担;钢柱脚不考虑剪力贡献,剪力由外

包混凝土短柱的斜截面受剪承载力承担;栓钉设置于钢柱翼缘外侧,属于构造加强措施,主要作用是约束钢柱与外包混凝土之间的相对滑移,提高组合作用与节点延性,一般不参与剪力与弯矩的计算。

1.2 典型破坏模式

外包式柱脚在荷载作用下主要出现以下四种破坏模式,设计应优先保证延性破坏,避免脆性破坏。外包混凝土局部压溃破坏,钢柱翼缘压力集中作用于外包顶部,造成混凝土局部压碎、剥落,属于脆性破坏,一旦发生将快速降低节点刚度,危及结构安全。外包短柱斜截面剪切破坏,水平剪力与弯矩共同作用下,外包段出现斜裂缝,箍筋配置不足时发生剪切破坏,属于典型脆性破坏,应严格避免。纵向钢筋锚固失效破坏,纵筋伸入基础锚固长度不足,受拉钢筋从混凝土中拔出,导致抗弯能力突然丧失,属于脆性破坏。纵向受拉钢筋屈服破坏,纵筋配置适中,受拉钢筋先屈服,随后混凝土受压区逐步发展,节点具有良好延性与耗能能力,为设计所期望的破坏模式。根据抗震设计原则,外包式柱脚应满足:强剪弱弯、强锚固、强局部承压、强节点、弱构件,确保结构在地震作用下具有足够的安全储备与变形能力。

1.3 影响受力性能的关键参数

外包短柱高度, H 形截面柱不宜小于柱截面高度的 2 倍,矩形管柱或圆管柱宜为矩形管截面长边尺寸或圆管直径的 2.5 倍,当没有地下室时,外包宽度和高度宜增大 20%,当仅有一层地下室时,外包宽度宜增大 10%^[1],

外包高度不足将导致弯矩无法有效传递,刚度不足。外包厚度对 H 形截面柱不宜小于 160mm,对矩形管或圆管柱不宜小于 180mm,同时不宜小于钢柱截面高度的 30%,厚度过小易发生混凝土劈裂。混凝土强度不应低于 C30,保证局部承压与斜截面抗剪能力。纵向钢筋承担主要抗弯作用,应满足强度与锚固要求。箍筋控制斜截面抗剪,顶部箍筋应加强加密,并不应小于 3 根直径 12mm 的 HRB335/HRB400 级热轧钢筋。锚固长度外包层内纵向受力钢筋在基础内的锚固长度 (l_a , l_{aE}),且四角主筋的上、下都应加弯钩,弯钩投影长度不应小于 $15d^{[2]}$,保证钢筋不被拔出。

2 外包式柱脚设计原则与计算方法

依据现行规范要求,外包式刚性柱脚的设计内容主要包括:外包短柱截面尺寸确定、抗弯承载力计算、抗剪承载力计算、纵向钢筋与箍筋配置、柱底板设计、锚栓设计、钢筋锚固验算、栓钉构造等。

2.1 基本构造要求

柱底板厚度不宜小于 16mm,混凝土强度等级不低于 C30;外包高度 H 型钢不宜小于 $2h_c$,箱形柱不宜小于 $2.5b_c$;外包厚度 H 型钢不宜小于 160mm,箱形柱不宜小于 180mm;箍筋间距不大于 100mm,外包顶部 150mm 高度内设 3 道加密箍,直径不小于 12mm 的 HRB335/HRB400 级热轧钢筋;纵筋锚固长度抗震设计应满足 l_{aE} ,非抗震应满足 l_a ;栓钉宜布置在翼缘,作为构造措施。

2.2 计算方法

抗弯承载力计算:当前国内规范给出短柱与钢柱共同承担的计算公式,但实际钢柱与短柱的弯矩分配界定模糊,鉴于安全钢柱底部采用铰接连接,弯矩全部由外包短柱承担。取外包柱底部截面作为控制截面。该截面弯矩效应最大,同时承受轴力、剪力耦合作用,地震往复荷载下易发生开裂与刚度退化,因此短柱应进行抗弯承载力验算,且短柱柱脚极限受弯承载力应大于钢柱的全塑性受弯承载力,保证节点延性,规避脆性破坏风险。

抗剪承载力计算:外包式柱脚的水平剪力全部由外包短柱斜截面抗剪承担。地震往复作用下短柱会承受剪压复合受力,易产生斜裂缝甚至剪切破坏,因此短柱应进行抗剪承载力计算,且短柱柱脚的极限受剪承载力应满足规范标准,避免发生脆性剪切失效,保障节点抗剪储备。

柱底板设计:柱底板尺寸依据局部承压计算确定,底板传递的竖向压力作用于基础顶面,底板下混凝土平

均压应力需满足局部承压验算要求^[3],防止基础混凝土发生局部压溃破坏,保障钢柱轴力可靠传递。

锚栓设计:外包钢柱脚铰接的锚栓一般仅按构造要求设置,主要作用为施工阶段钢柱的安装定位与临时固定,不参与节点抗弯受力。锚栓选型满足安装要求即可。

3 工程设计算例

某多层钢框架结构,无地下室,层高均为 6 米,抗震设防烈度 7 度 0.1g,钢材采用 Q355B,钢柱采用 H 型钢截面 $H600 \times 300 \times 14 \times 20$ (S1 级,面积 $A = 19840 \text{mm}^2$,塑性截面模量 $W_E = 4577600 \text{mm}^3$);柱脚采用外包式刚性连接;外包混凝土等级为 C30,纵筋核箍筋强度等级 HRB400;基础为钢筋混凝土筏板基础。(柱脚内力设计值 $M = 720 \text{kN} \cdot \text{m}$, $V = 360 \text{kN}$, $N = 2200 \text{kN}$)

外包短柱尺寸确定:钢柱截面高度 $h_c = 600 \text{mm}$,外包高度 $l_r \geq 1.2 \times 2 \times 600 = 1440 \text{mm}$,取 $l_r = 1450 \text{mm}$ 。外包厚度取 300mm,外包截面外轮廓: $b = 300 + 2 \times 300 = 800 \text{mm}$, $a = 600 + 2 \times 300 = 1200 \text{mm}$,钢筋保护层厚度 $c = 25 \text{mm}$,有截面效高度 $h_0 \approx 1150 \text{mm}$ 。

抗弯承载力计算:

$$A_s \geq M / (0.9 f_y h_0) = 720 \times 10^6 / (0.9 \times 360 \times 1150) \approx 1934 \text{mm}^2$$

$$N_y = A f_y = 19840 \times 345 / 1000 = 6844.8 \text{kN} > N = 2200 \text{kN}$$

$$M_{pc} = M_p = W_E f_y = 4577600 \times 345 / 10^6 = 1580 \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_u \geq a M_{pc} = 1.2 \times 1580 = 1896 \text{kN} \cdot \text{m} = \min (M_{u1}, M_{u2})$$

$$M_{u1} = M_{pc} / (1 - l_r / l) = 1580 / (1 - 1.45 / 4) = 2478 \text{kN} \cdot \text{m} > 1896 \text{kN} \cdot \text{m}$$

$M_{u2} = 1896 \times 10^6 \leq 0.9 A_s f_{yk} h_0 = 0.9 \times A_s \times 400 \times 1150$, $A_s = 4580 \text{mm}^2$,取 $10\Phi 25$, $A_s = 4910 \text{mm}^2$,抗震锚固长度 $l_{aE} = 40d = 1000 \text{mm}$,伸入基础锚固长度取 1050mm。当基础厚度 $< 1100 \text{mm}$ 时,直锚段的长度不应小于 $20d$,弯折段的长度不应小于 150mm 。

抗剪承载力验算: $V = 360000 < b_c h_0 (0.7 f_t + 0.5 f_{yv} \rho_{sh}) = 600 \times 1150 \times (0.7 \times 1.43 + 0.5 \times 360 \times \rho_{sh})$, $\rho_{sh} < 0$

$M_u / l_r = 1000 \times 1896 / 1.45 < V_u = b_c h_0 (0.7 f_{tk} + 0.5 f_{yv} \rho_{sh}) = 600 \times 1150 \times (0.7 \times 2.01 + 0.5 \times 400 \times \rho_{sh})$, $\rho_{sh} > 0.0025$,箍筋配置 $\Phi 10 @ 100 (4)$, $\rho_{sh} = 4 \times 79 / (600 \times 100) = 0.0053 > 0.0025$,短柱顶部 150mm 范围内 3 道 $\Phi 12$ 加密箍。

钢柱底板设计:底板尺寸 $750 \text{mm} \times 450 \text{mm}$,厚度 $t = 20 \text{mm}$ 。局部承压应力 $\sigma = N / A = 6.52 \text{N} / \text{mm}^2 < f_c = 14.3 \text{N} / \text{mm}^2$,满足要求。

锚栓与栓钉构造:锚栓按构造采用 4-M30,钢柱翼缘

设置 $\Phi 19@150$ 栓钉, 加强钢柱与混凝土的连接作用。

算例结论: 本外包式铰接柱脚的外包短柱尺寸、配筋、锚固长度、底板及细部构造均符合现行钢、混凝土规范。经复核, 其抗弯、抗剪、局部承压承载力充足, 抗震验算满足设防要求。节点传力清晰, 可抵御地震往复作用, 避免脆性破坏, 在设计工作年限内安全可靠。

4 设计常见误区与施工控制要点 4.1 设计常见误区

4.1 设计常见误区

未考虑极限承载力验算, 导致外包短柱配筋不足; 外包高度偏小, 无法形成有效嵌固; 箍筋间距过大, 顶部未加密, 易发生剪切破坏; 纵筋锚固长度不足, 存在拔出风险; 栓钉按受力计算, 造成过度设计; 忽视局部承压, 存在混凝土压溃隐患。

4.2 施工质量控制要点

钢柱安装定位准确, 底板不得悬空; 锚栓定位牢固, 避免浇筑偏移; 钢柱表面清理干净, 保证混凝土粘结; 外包混凝土振捣密实, 避免蜂窝、孔洞; 纵筋锚固长度、弯钩严格按图施工; 顶部三道加密箍筋不得遗漏; 栓钉焊接质量应现场检查。

结束语

外包式钢柱脚是性能优异的钢-混凝土组合刚性节点, 传力路径清晰, 这也是其区别于外露式、埋入式柱脚的核心特征。节点受力分工明确, 竖向轴力经钢柱底板传给基础混凝土, 柱底弯矩与水平剪力由外包钢筋混凝土短柱承担, 短柱底部截面为弯矩验算控制截面。厘清钢与混凝土受力边界, 能够简化计算模型, 降低内力分配不确定带来的设计偏差, 保证节点受力可控。外包

式柱脚存在四类破坏模式: 混凝土压溃、斜截面剪切破坏、钢筋锚固拔出、纵向钢筋屈服。前三者属于高风险脆性破坏, 纵筋屈服为延性破坏, 变形与耗能性能良好。因此设计应优化参数, 促使节点优先发生纵筋屈服, 规避脆性破坏, 提升抗震储备。设计需遵循“强剪弱弯、强节点、弱构建、强锚固、强局部承压”原则, 控制外包短柱尺寸、混凝土强度、配筋率、箍筋加密与锚固长度, 实现抗弯、抗剪、局部承压、锚固性能协调。工程算例表明, 按现行规范完成外包尺寸、正截面抗弯、斜截面抗剪、底板局部承压、锚固及细部构造设计, 可保障节点受力, 兼顾安全经济, 满足刚性连接与抗震要求。设计人员应区分三类柱脚受力特点, 避免经验化设计; 施工重点管控钢筋锚固、箍筋加密、核心区混凝土密实度, 保证节点性能与设计相符。伴随钢结构工程推广, 外包式柱脚应用持续增多。后续可对刚接外包式柱脚开展节点试验与精细化有限元分析, 完善钢混协同内力分配模型, 弥补规范细则短板, 为节点精细化设计、标准化应用与规范修订提供理论和试验支撑。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50017-2017 钢结构设计标准 [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.JGJ99-2015 高层民用建筑钢结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50010-2010 混凝土结构设计标准 (2024 局部修订) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.