

# 大型仓储建筑中固定在混凝土短柱上的外包式钢柱脚施工应用

杨 威

广州工程总承包集团有限公司 广东 广州 510310

**摘 要：**大型多层仓储建筑中，顶层门式刚架与底层混凝土框架的连接节点是结构安全的关键。传统外露式柱脚存在抗剪性能弱、易产生冷桥效应等隐患。本文依托美库成都青白江冷链供应链中心项目，提出了一种外包式钢柱脚施工技术，通过首次浇筑混凝土、预埋地脚螺栓、安装带十字形抗剪键的钢柱、二次浇筑混凝土包裹柱脚等工序，实现钢柱与混凝土的可靠连接。结合ABAQUS有限元分析，对比研究了外露式、外包式及带抗剪键外包式柱脚的受力性能。结果表明，该技术能显著改善柱脚应力分布，提升极限承载力和抗剪性能，有效阻断冷桥，为类似工程提供了可靠的技术参考。

**关键词：**外包式钢柱脚；抗剪键；施工技术；有限元分析；冷桥效应

**引言：**随着我国物流行业迅猛发展，大型多层仓储类厂房建筑规模持续扩大。钢筋混凝土框架+顶层门式刚架因受力合理、施工便捷，成为此类建筑的常用结构形式。在该结构中，顶层门式刚架的钢柱需与下部混凝土框架形成刚接，即钢柱脚需可靠固定在混凝土短柱上，节点设计至关重要。在冷库等项目中，钢柱和地脚螺栓成为热量传递通道，极易造成“冷桥效应”，导致能耗增加和结露问题。因此，亟需创新技术措施以提高钢柱脚承载性能和结构耐久性。

## 1 工程概况

该项目位于成都市青白江区，规划用地面积82612m<sup>2</sup>，总建筑面积91229.93m<sup>2</sup>，合同中标造价2.1578亿元。项目建设内容包括3栋两层A、B物流仓库，C分拨中心及卸货平台、综合楼、设备房等。其中，A、B物流仓库和C分拨中心采用的结构形式为钢筋混凝土框架+顶层门式刚架。本项目为大型装配式冷库工业厂房建筑，平面布局大，对保温隔热和结构抗风有较高要求。大量顶层门式刚架的钢柱需要安装在底层混凝土框架的短柱上。若采用传统外露式柱脚，极易产生冷桥效应，且在大风荷载作用下，结构存在失稳风险。因此，选择一种安全可靠、隔热性能优良的钢柱脚做法，成为本项目顺利实施的关键。

## 2 施工操作要点

### 2.1 工艺原理

本技术的核心原理是将钢柱脚施工分为两次混凝土浇筑。首次浇筑混凝土至短柱预定标高，浇筑前精确预埋地脚螺栓，并在短柱顶面预留抗剪键安装凹槽。待第

一次混凝土达到设计强度后，安装已在工厂完成十字形抗剪键焊接的型钢柱，将抗剪键对准预留孔洞下放，校正钢柱垂直度、标高和轴线位置后紧固地脚螺栓，随后对底板下部灌注高强灌浆料，确保底板与混凝土顶面紧密结合。最后进行第二次混凝土浇筑，将钢柱脚完全包裹在混凝土内，浇筑高度约400mm，使外包混凝土与下部短柱形成整体。通过外包混凝土的围箍包裹、地脚螺栓的深埋锚固以及抗剪键的机械咬合，形成三重受力保障，有效抵抗钢柱与混凝土间的界面滑移和分离，实现牢固的整体协同工作<sup>[1]</sup>。

### 2.2 工艺流程

本技术工艺流程包括七个主要步骤：第一步进行施工准备，包括技术交底、材料检验、机具调试及定位放线。第二步按设计要求制作短柱钢筋笼，安装纵筋及箍筋，并弯折短柱顶部竖向钢筋，为外包混凝土提供锚固条件。第三步采用定位模具精确预埋L型地脚螺栓，严格控制平面位置、标高和垂直度，本工程螺栓埋深750mm，外露200mm。第四步浇筑第一次混凝土至短柱顶面设计标高，同时预留抗剪键凹槽孔洞，浇筑后加强孔洞保护。第五步待混凝土达到强度后，安装焊接好十字形抗剪键的型钢柱，将抗剪键对准预留孔洞下落就位。第六步校正钢柱垂直度、标高和轴线位置，紧固螺栓后灌注50mm厚高强灌浆料。第七步待灌浆料达到强度后进行第二次混凝土浇筑，浇筑高度约400mm，将柱脚完全包裹，使两次浇筑混凝土形成整体。

### 2.3 主要施工工艺及技术要求

#### (1) 短柱钢筋笼制作及安装

按设计要求制作短柱钢筋笼, 安装竖向纵筋及箍筋, 并按图纸弯折短柱顶部竖向钢筋, 为外包混凝土提供锚固。外包混凝土配筋应满足: 竖向主筋含钢率大于0.2%, 不宜小于4 $\phi$ 22; 中距大于200mm时增设 $\phi$ 16架立筋; 箍筋为 $\phi$ 10@100, 外包段顶部设不少于3 $\phi$ 12@50加强箍筋。

#### (2) 预埋地脚螺栓及浇筑第一次混凝土

钢筋笼安装后, 精确预埋L型M30地脚螺栓, 埋入深度750mm, 外露200mm。必须采用定位模具固定, 确保定位精度。验收合格后浇筑第一次混凝土至短柱顶面设计标高, 同时在顶面按设计位置预留抗剪键安装凹槽孔洞。

#### (3) 安装带抗剪键的型钢柱及底板灌浆

第一次混凝土达强度后, 安装工厂焊接好十字形抗剪键的型钢柱, 将抗剪键对准预留孔洞下落, 校正垂直度、标高和轴线后紧固地脚螺栓。随后灌注50mm厚Ⅲ类高强灌浆料, 该材料微膨胀、高强度, 确保底板与混凝土顶面紧密结合。

#### (4) 钢筋混凝土短柱第二次浇筑

灌浆料达强度后, 进行第二次混凝土浇筑, 高度400mm, 将钢柱脚完全包裹。外包高度不宜小于钢柱截面高度的3.0倍。二次浇筑混凝土与下部短柱形成整体, 共同承担上部荷载。

### 3 关键技术及创新点

#### 3.1 十字形抗剪键的设置

为增强钢柱与混凝土的协同工作能力, 本技术在钢柱底板底部焊接十字形钢板作为抗剪键, 并在混凝土短柱顶面预留对应凹槽。十字形截面使抗剪键在两个正交方向具有相同抗剪刚度, 能有效抵抗任意方向水平荷载。抗剪键嵌入凹槽后, 通过机械咬合将水平剪力直接传递至混凝土短柱, 有效抵抗界面滑移, 显著提升抗剪性能。抗剪键设计需综合考虑截面尺寸和埋置深度, 前者根据最大水平剪力计算确定, 后者需满足混凝土局部承压要求<sup>[2]</sup>。本工程抗剪键采用工厂焊接, 焊缝经探伤检测合格, 确保力传递路径连续可靠。

#### 3.2 二次浇筑混凝土的包裹作用

通过二次浇筑混凝土将钢柱脚完全包裹, 在柱脚区域形成钢-混凝土组合截面, 显著改善了应力分布特征。原本集中在柱脚底板和锚栓部位的弯矩与剪力, 经由外包混凝土的围箍约束和粘结作用, 有效传递至整个短柱截面, 将点状集中受力转化为面状扩散受力, 大幅降低应力集中, 提升节点安全储备和整体刚度。外包式柱脚在初始弹性阶段具有极高的初始刚度, 可视为刚性节点; 进入塑性阶段后, 外包混凝土的围箍约束使节点表现出良好的延性变形能力。

### 3.3 阻断冷桥效应的构造措施

二次浇筑混凝土将外露的钢柱脚板和地脚螺栓完全封闭在结构内部, 形成连续完整的外包层, 切断了钢结构直接暴露于内外温差的通路, 有效避免热量通过高导热性金属构件传递, 显著减少冷库运行中的冷桥效应。冷桥不仅导致制冷能耗增加, 还会在钢柱表面产生冷凝水甚至结冰, 长期作用下可能引发钢构件锈蚀和混凝土冻融破坏。外包混凝土利用较低热导率形成热阻屏障。相比传统红木垫块做法, 外包方案耐久性和防白蚁性能更优, 无需定期更换, 保障全寿命周期保温需求<sup>[3]</sup>。

### 4 有限元分析验证

为验证本技术的优越性, 采用ABAQUS大型有限元程序, 建立了固定在混凝土短柱上的外露式、外包式、外包+抗剪键三种钢柱脚模型, 进行单调水平荷载作用下的非线性有限元分析。

#### 4.1 模型建立

模型中, 钢柱、混凝土、抗剪键等采用八节点减缩积分实体单元(C3D8R), 钢筋采用桁架单元(T3D2)。混凝土本构采用塑性损伤模型, 钢材采用理想弹塑性模型。考虑了型钢柱与混凝土间的粘结滑移, 并在短柱底部施加固定约束。

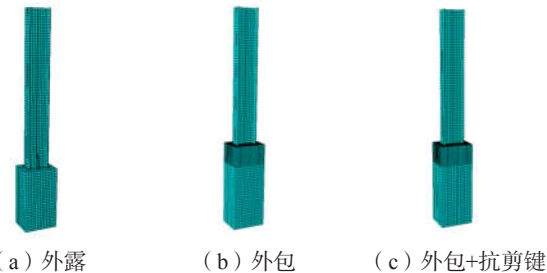


图1 有限元模型

#### 4.2 结果分析

(1) 荷载-位移曲线: 分析得到的荷载-位移曲线表明, 外包式柱脚的初始刚度和极限承载力均明显高于外露式柱脚。设置抗剪键后, 柱脚的极限承载力进一步提高, 延性也得到改善。

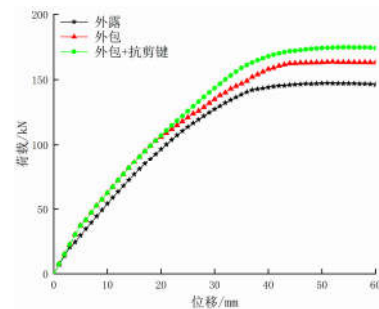


图2 固定在混凝土短柱上的钢柱脚荷载-位移曲线

(2) 承载力对比: 从仿真结果提取的数据可知, 相比外露式柱脚, 外包式柱脚的屈服荷载提升了33.32%, 极限荷载提升了11.26%。而在外包式的基础上增加抗剪键, 极限荷载又提升了6.03%。这表明外包混凝土和抗剪键对提高节点承载力均有显著贡献。

表1 固定在混凝土短柱上的钢柱脚仿真结果

| 编号     | 屈服荷载/<br>kN | 屈服位移/<br>mm | 极限荷载/<br>kN | 位移/mm |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------|
| 外露     | 53.96       | 10.98       | 147.32      | 50.98 |
| 外包     | 71.96       | 11.96       | 163.91      | 52.99 |
| 外包+抗剪键 | 71.98       | 11.96       | 173.79      | 54.87 |

(3) 应力云图分析

从有限元分析提取的各部件应力分布数据来看, 三种柱脚形式受力状态呈现显著差异。外露式柱脚的型钢应力主要集中在柱脚底板与型钢连接处, 局部应力集中明显, 柱身大部分区域应力水平较低, 材料利用率不高。外包式柱脚应力分布更为均匀, 型钢柱身参与受力范围明显扩大, 材料强度得到更充分发挥。设置抗剪键后, 柱脚底板应力峰值进一步降低, 应力传递趋于平顺。

外包混凝土和钢筋笼的应力数据验证了二次包裹的受力贡献。外包式柱脚中, 外包混凝土承担了相当比例的竖向荷载和水平剪力, 钢筋笼应力水平明显高于外露式中仅起构造作用的钢筋, 表明二者有效参与受力。抗剪键使钢柱底部水平剪力更顺畅地传递至外包混凝土和短柱, 其自身应力在弹性范围内, 满足受力要求。

从损伤分布看, 外露式柱脚混凝土损伤主要集中在短柱顶部和锚固区域, 呈局部压碎特征; 外包式柱脚由于荷载扩散面积增大, 损伤更为分散, 程度明显减轻。数据对比表明, 外包混凝土和抗剪键的协同作用改善了节点传力机制, 降低了应力集中, 提升了整体受力性能和安全冗余。

5 质量控制要点

5.1 地脚螺栓预埋精度控制。严格把控地脚螺栓预埋精度是钢柱安装质量的首要前提。采用专用定位支架固定螺栓, 确保平面位置偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$ 、垂直度偏差 $\leq 1\%$ 。定位支架须有足够刚度, 防止混凝土浇筑时振捣和侧压力导致移位。施工中应使用水准仪复核锚栓顶部标高, 并检查外露丝扣长度, 确保满足螺母紧固要求。

5.2 抗剪键焊接质量管控。抗剪键焊接质量直接关系到水平剪力可靠传递。焊接须由持证焊工严格按评定合格

的工艺操作, 确保焊缝高度和外观满足规范要求, 严禁出现焊脚尺寸不足、咬边、弧坑等缺陷。焊接完成后应对焊缝进行无损探伤检测, 排查内部缺陷。探伤合格后方可进行后续安装<sup>[4]</sup>。

5.3 预留孔洞保护与检查。第一次混凝土浇筑后, 应对短柱顶面预留的抗剪键凹槽孔洞采取覆盖保护措施, 防止杂物落入导致堵塞或孔壁受损。抗剪键安装前应对预留孔洞位置、尺寸和深度逐一检查验收, 确保与设计尺寸匹配, 发现偏差及时修整, 避免安装时无法就位。

5.4 钢柱安装与垂直度监测。钢柱安装时需采用经纬仪或全站仪在两个垂直方向同时监测垂直度。就位后先初步校正, 再逐步紧固地脚螺栓。紧固过程中须随时复测复核, 发现偏差超标立即调整, 避免因紧固移位影响后续安装精度。校正完成后应进行最终验收并记录存档。

5.5 二次浇筑前清理与振捣。第二次混凝土浇筑前, 应彻底清理柱脚底板、抗剪键凹槽、螺栓周边的杂物及积水, 并对新旧混凝土接触面凿毛处理。浇筑时须采用插入式振捣棒振捣密实, 重点关注柱脚底板下方等复杂区域, 防止出现蜂窝、孔洞等缺陷。浇筑完成后及时覆盖养护, 保证外包混凝土强度正常发展<sup>[5]</sup>。

结束语: 本文以美库成都青白江冷链供应链中心项目为依托, 系统介绍了大型仓储建筑中固定在混凝土短柱上的外包式钢柱脚施工技术。通过设置十字形抗剪键和二次浇筑混凝土包裹柱脚, 实现了钢柱与混凝土短柱的可靠连接, 有效解决了传统外露式柱脚抗剪性能弱、易产生冷桥效应的技术难题。该技术施工工艺清晰、质量可控, 可为今后类似大型仓储钢结构及冷库工程的柱脚设计与施工提供可靠的技术参考。

参考文献

[1]姜兴智,于广涛,霍永浩,等.超长混凝土跳仓法施工缝留设及控制[J].安装, 2025(12): 135-137.  
[2]肖倩.浅谈大型仓储式超市建筑防火设计与消防管理[J].中国建筑金属结构,2022(4):150-152.  
[3]薛德沅.浅谈大型仓储式超市建筑防火设计与消防管理[J].工程建设与设计,2022(21):59-61.  
[4]王维征.大型仓储建筑钢结构施工综合技术研究——以美谷美库仓储贸易港工程为例[J].城市周刊, 2025(34):100-102.  
[5]王成民.仓储建筑预制柱原位现浇施工技术[J].安徽建筑, 2023, 30(8): 19-20,82.