

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.011

考虑半刚性节点与变截面立柱的 早拆脚手架体系屈曲分析

陶 骞¹, 王庆丰¹, 曾林林¹, 李瑞松¹, 董 伟²

(1. 中国五冶集团有限公司, 四川 成都 610063; 2. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 脚手架是承受上部结构自重与提供作业平台的重要支撑结构, 为了提高构件利用率并加快施工进度, 提出了一种具有早拆功能的脚手架体系。考虑立柱与横梁连接节点的半刚性, 计算了早拆节点的转动刚度, 推导了半刚性节点条件下立柱的计算长度系数计算公式; 考虑插管-套管立柱的变截面, 计算了变截面立柱的等效惯性矩; 开展了考虑半刚性节点与变截面立柱的早拆脚手架体系屈曲分析。结果表明: 立柱高度相同时, 随着套段长度的增加, 脚手架体系屈曲承载力增加; 套管长度相同时, 随着立柱高度的增加, 脚手架体系屈曲承载力迅速降低; 早拆脚手架体系屈曲荷载受立柱间距影响不显著, 随着立柱间距的增加, 屈曲荷载小幅度降低。

关键词: 脚手架; 早拆; 半刚性节点; 屈曲分析; 数值模拟

中图分类号: TU731.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0075-07

Buckling Analysis of the Early Dismantlement Scaffolding System Considering Semi-rigid Nodes and Variable Cross-section Columns

TAO Qian¹, WANG Qingfeng¹, ZENG Linlin¹, LI Ruisong¹, DONG Wei²

(1. China Fifth Metallurgical Construction Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610063, China;

2. Faculty of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Scaffolding is a critical support structure that bears the self-weight of the upper structure and provides a working platform. To improve component utilization and accelerate construction progress, a scaffolding system with early dismantlement functionality was proposed. Considering the semi-rigidity of the connections between columns and beams, the rotational stiffness of the early dismantlement joints was calculated, and formulas for the effective length factor of columns under semi-rigid joint conditions were derived. Taking into account the variable cross-section of the inserted tube-sleeve tube columns, the equivalent inertia moment of such columns was computed. A buckling analysis of the early dismantlement scaffolding system was conducted, incorporating semi-rigid joints and variable cross-section columns. The results indicate that with the same column height, the buckling load-bearing capacity of the scaffolding system increases as the length of the sleeve segment increases. When the sleeve length remains constant, the buckling load-bearing capacity decreases rapidly with an increase in column height. The buckling load of the early dismantlement scaffolding system is not significantly affected by column spacing, showing only a slight decrease as the column spacing increases.

Keywords: scaffolding; early dismantling; semi-rigid joint; buckling analysis; numerical simulation

在建筑工程中, 脚手架体系具有承受上部结构自重与提供作业平台的重要作用。建筑行业广泛采

用的脚手架体系主要包括扣件式、盘扣式和碗扣式三类。这些传统脚手架通常需待上部结构混凝土达

收稿日期: 2026-01-16

修稿日期: 2026-03-22

基金项目: 中国五冶集团有限公司重点研发专项科研课题(WY2023B007)

作者简介: 陶 骞(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事智能建造技术研究工作。E-mail: mrchristao@163.com

通讯作者: 董 伟(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土断裂力学研究工作。E-mail: dongwei@dlut.edu.cn

到设计强度后方可整体拆除,导致大量杆件在施工后期闲置,周转效率较低。为提高构件利用率并加快施工进度,工程界逐渐发展出早拆模板体系。早拆技术的核心理念是在混凝土达到一定强度后,提前拆除模板和部分支撑梁,仅保留立柱继续承载,从而实现模板的快速周转。然而,现有早拆技术多聚焦于模板系统本身,针对配套的支撑脚手架体系的系统研究仍较少,特别是考虑早拆节点特殊构造及其对整体稳定性的影响尚缺乏深入探讨。

脚手架体系的失效通常源于梁柱构件连接不紧固或局部立柱屈曲引发的连续坍塌。一旦失效,新浇筑的混凝土构件随之破坏,不仅造成巨大的经济损失,而且严重威胁施工人员的安全。因此,深入研究脚手架支撑体系的力学响应与失效模式至关重要^[1]。学者们对脚手架体系屈曲行为的影响因素开展了大量研究,包括材料特性^[2]、初始缺陷^[3]、支撑布置^[4-5]等。此外,数值模拟方法也被广泛用于计算脚手架体系的屈曲载荷^[6-9]。根据现有研究可知,脚手架体系的屈曲承载力主要取决于杆件截面、材料特性及边界条件^[10]。在边界条件研究中,梁柱节点的连接特性是关键因素之一^[11]。传统钢结构设计通常将梁柱节点简化为刚性或铰接节点,但 Faridmehr 等^[12]学者的研究表明,实际工程中大多数梁柱节点呈现半刚性特性。采用刚性或铰接假设可能高估或低估实际约束作用,导致屈曲承载力评估出现偏差。在脚手架领域,学者们已认识到半刚性节点的重要性并开展了相关研究^[13]。为了描述半刚性节点的刚度特性,学者们提出了多种数学模型,例如 Reza 等^[14]提出的三参数指数型力矩-旋转角度模型、Zheng 等^[15]提出的两阶段、四参数力矩-

旋转角度模型。Liu 等^[16]通过试验揭示了扣件式钢管脚手架节点刚度的非线性特征;谢向阳等^[8]发展了半刚性节点的多参数模拟方法,这些研究为理解脚手架节点的力学行为奠定了基础。在立柱稳定性分析方面,欧拉公式是计算受压立柱屈曲载荷的经典方法,其中计算长度系数反映了边界条件对屈曲行为的影响。对于变截面立柱,吴亚平^[17-18]基于能量原理提出了计算等效惯性矩的等效刚度法,并增加了变形相等的约束条件,为变截面压杆稳定分析提供了理论工具。然而,现有研究大多针对传统脚手架体系,对兼具早拆功能、节点半刚性与立柱变截面三重特点的新型脚手架体系的屈曲行为研究鲜有报导。

综上所述,现有研究存在以下局限:①早拆技术研究多集中于模板系统,对配套支撑脚手架体系,特别是早拆节点的力学特性与构造形式研究不足;②脚手架节点半刚性研究主要针对传统扣件式、盘扣式节点,对新型早拆节点的转动刚度缺乏定量分析;③尚未有研究同时考虑节点半刚性与立柱变截面两个因素对早拆脚手架体系屈曲行为的耦合影响。基于此,本文提出一种新型早拆脚手架体系,设计了一种具有早拆功能的梁柱节点,采用有限元方法精确计算早拆节点的转动刚度,基于节点转动刚度推导了半刚性条件下的立柱计算长度系数修正公式,通过数值模拟系统分析了套管长度、立柱高度、立柱间距等因素对早拆脚手架体系屈曲承载力的影响规律,研究结果可为工程应用提供理论依据。

1 早拆脚手架体系与早拆节点构造

本研究提出了一种具有早拆功能的脚手架体系,如图 1 所示。

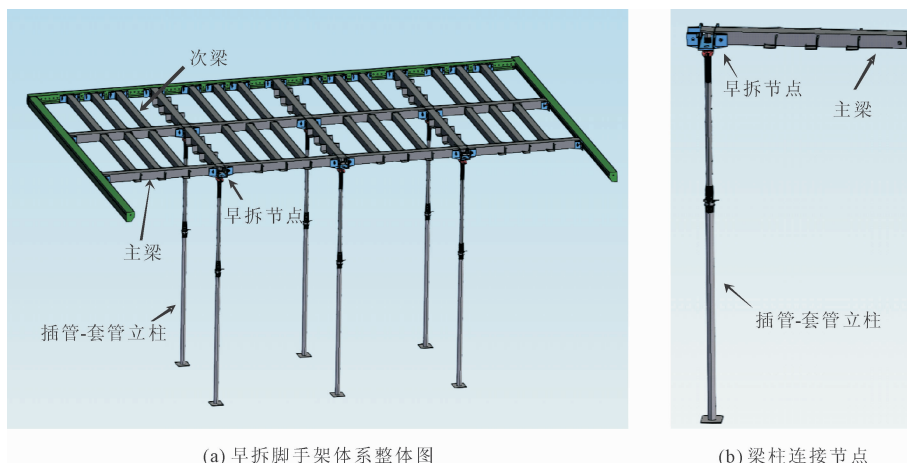


图 1 早拆脚手架体系

该脚手架体系包含高度可调的插管-套管立柱、通过螺栓固定在立柱顶部的早拆节点、连接两个相邻节点的主梁以及搭接在主梁上的次梁。从荷载传递的角度,上部楼板的自重荷载通过次梁传递至主梁,主梁荷载通过早拆节点传递至立柱。上部楼板达到一定强度后拆除主梁与次梁,此时,上部楼板的自重荷载完全由立柱承担。早拆脚手架体系可大大提高主梁与次梁的利用率,节约成本的同时也加快了施工进度。

早拆节点是早拆脚手架体系的关键构件,本研究提出的早拆节点构造如图2所示。节点中心设置圆形孔洞,立柱通过该孔洞穿过节点,实现对上部楼板的支撑。立柱上部设置螺纹,通过调节螺栓位置实现早拆节点的上升与下降。节点四周间隔 90° 设置四个矩形凹槽,矩形凹槽内部尺寸与主梁端部外部尺寸相同,主梁直接嵌入到凹槽内,通过插入销钉将主梁与节点连接为一体。楼板浇筑前,将节点、主梁、次梁依次连接,旋拧立柱上部的螺栓,使主梁顶部与立柱顶部在同一平面内。上部楼板达到一定强度后,反方向旋拧立柱上部的螺栓,使次梁、主梁、节点整体脱离,拔出销钉,分别拆除次梁与主梁。主要

构件尺寸如下:节点中心圆孔孔径 48 mm ,主梁端部截面外部宽 100 mm 、高 100 mm 、厚 3 mm ,凹槽内部宽 100 mm 、高 100 mm 、厚 5 mm ,节点下部楔形支撑高 40 mm 、长 117 mm 、宽 5 mm 。

采用的构件尺寸主要基于以下工程背景确定:立柱插管外径 48 mm 、壁厚 3 mm 是当前脚手架工程中最为常见的规格,与《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011)中规定的公称外径 48.3 mm 基本吻合;主梁截面 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、壁厚 3 mm 是轻型钢结构中常用的方钢管规格,具有良好的承载性能和经济效益。早拆节点中的凹槽尺寸与主梁端部相匹配,确保连接紧密可靠。需要说明的是,本文选取的尺寸参数代表了工程中广泛应用的一类典型规格,其分析结果可为同类型脚手架体系的设计提供参考。对于不同尺寸规格的早拆脚手架体系,其屈曲承载力的变化规律可通过文中提出的分析方法结合相应的几何参数进行求解,本文第3节也通过参数分析探讨了立柱高度、套管长度、立柱间距等关键参数变化对屈曲承载力的影响规律。

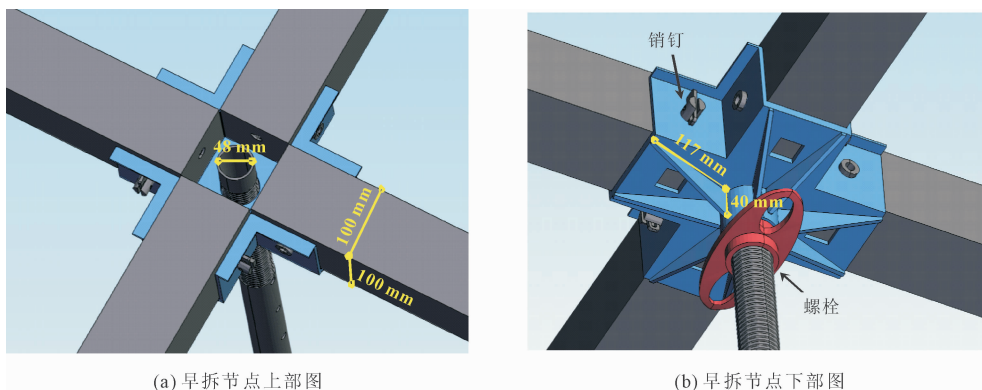


图2 早拆节点构造

2 早拆节点转动刚度与插管-套管立柱等效惯性矩计算

2.1 早拆节点转动刚度计算

采用有限元软件 ABAQUS 计算早拆节点的转动刚度。选用 ABAQUS 单元库中的 C3D8R 实体单元,根据主梁与节点的实际尺寸,建立带有等截面立柱的子结构三维模型。网格划分过程中,对各部件采用不同的网格控制策略:早拆节点几何形状复杂、应力梯度较大,进行局部加密处理,最小网格尺寸为 1.6 mm ;主梁和立柱几何形状规则,采用相对稀疏

的网格,主梁网格尺寸为 25 mm ,立柱网格尺寸为 3 mm ,子结构三维有限元模型如图3所示。子结构的主梁、节点与立柱均选用 Q355 钢材,钢材采用理想弹塑性本构,弹性模量为 210 GPa ,泊松比为 0.3 ,屈服屈服应力为 355 MPa ,屈服应变为 0.00172 。主梁与节点之间的接触设置为摩擦接触,摩擦系数为 0.5 ,为简化计算,将立柱与节点的螺栓连接简化为绑定约束,立柱底部节点施加位移与转动约束,四个主梁端部施加 100 N 的竖向集中荷载,子结构有限元计算结果如图4(b)所示,提取有限元计算结果

中主梁端部竖向位移为 2.465 mm, 根据竖向位移计算节点处的转角, 根据集中力与主梁长度可计算

节点处的弯矩, 由此可得出节点转动刚度为 77.67 (kN·m)/rad。

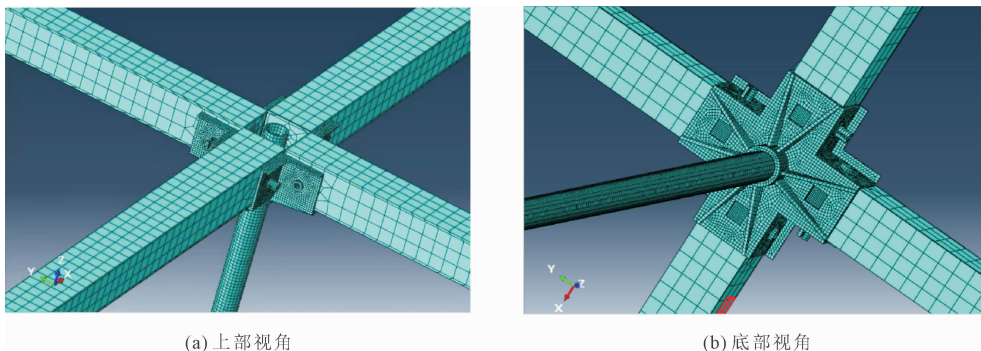


图 3 子结构三维有限元模型

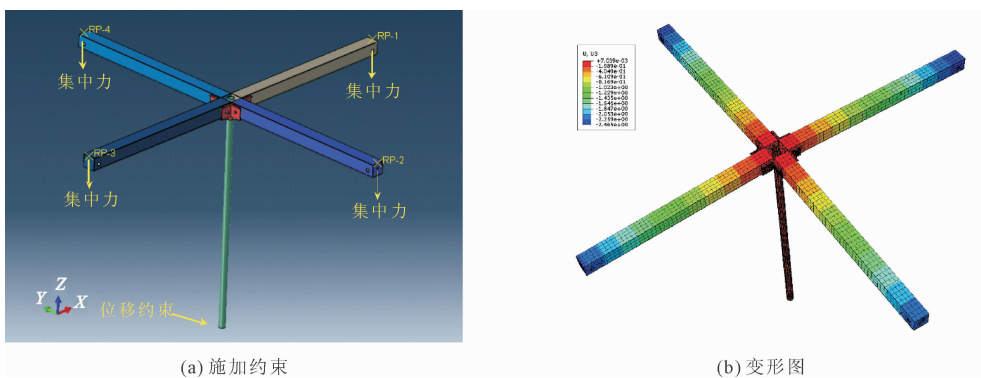


图 4 子结构有限元模型施加约束与计算结果

由此可见, 脚手架节点为具有一定转动刚度的半刚性节点, 不能将其简化为纯刚性节点或纯铰接节点。为进一步分析节点半刚性对结构稳定性的影响, 参考《钢结构设计标准》中关于多层多跨钢结构稳定性分析, 本研究将节点半刚性特性纳入计算模型, 提出了考虑节点半刚性的框架柱计算长度系数 μ 。对于无侧移框架柱, 其计算长度系数 μ 为:

$$\mu = \frac{0.64K_1K_2 + 1.4(K_1 + K_2) + 3}{1.28K_1K_2 + 2(K_1 + K_2) + 3} \quad (1)$$

式中: K_1 为横梁上部线刚度总和与立柱线刚度总和的比值; K_2 为横梁下部线刚度总和与立柱线刚度总和的比值。根据《钢结构设计标准》规范, 当立杆底部与地面铰接时, $K_2 = 0$; 当立杆底部与地面刚接时, $K_2 = 10$ 。

立柱上端与横梁为半刚性连接时, 节点实际的转动约束介于刚接与铰接之间, 需引入修正系数以反映节点半刚性的影响, 从而得到修正后的计算长度系数 μ 。对于双立柱-单横梁体系, 梁柱节点为半刚性节点, 外荷载作用下左节点转角 θ_1 与右节点转角 θ_2 大小相等、方向相反, 即 $\theta_1 = -\theta_2$; 梁左端弯矩 M_1 与右

端弯矩 M_2 大小相等、方向相反, 即 $M_1 = -M_2$; 横梁左端弯矩-转角方程为:

$$M_1 = \frac{EI_b}{L_b} \left[4 \left(\theta_1 - \frac{M_1}{R} \right) + 2 \left(\theta_2 - \frac{M_2}{R} \right) \right] \quad (2)$$

式中: E 为材料弹性模量; I_b 为横梁截面惯性矩; L_b 为横梁长度; R 为横梁左端与右端节点的转动刚度。对式(2)进行化简, 可得:

$$M_1 = \frac{2EI_b}{L_b} \cdot \frac{1}{1 + 2EI_b/(L_bR)} \quad (3)$$

将式(3)与刚性连接情况下弯矩公式进行对比可知, 半刚性连接时, M_1 有一定程度的折减, 将折减系数定义为半刚性节点的横杆线刚度修正系数 α , 计算公式为:

$$\alpha = \frac{1}{1 + 2EI_b/(L_bR)} \quad (4)$$

式中: EI_b 为横杆抗弯刚度; R 为节点转动刚度。

进而可以得到半刚性节点连接时无侧移框架柱的计算长度系数 μ , 计算公式为:

$$\mu = \frac{0.64\alpha K_1 \alpha K_2 + 1.4\alpha(K_1 + K_2) + 3}{1.28\alpha K_1 \alpha K_2 + 2\alpha(K_1 + K_2) + 3} \quad (5)$$

2.2 插管-套管立柱等效惯性矩计算

提出的早拆脚手架体系中,立柱采用插管-套管的连接形式以实现高度自由调节,但该构造使传统等截面立柱转变为变截面立柱,导致经典压杆稳定理论难以直接适用。为准确描述变截面立柱的屈曲行为,本文引入等效刚度法确定变截面立柱的等效惯性矩,该方法的理论基础是能量原理,将变截面立柱等效为发生屈曲破坏时内部储存相同弯曲应变能的等截面立柱。该方法的能量平衡方程式为:

$$\frac{1}{2} \int_0^L EI_{eq} y(x)^2 dx = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) y(x)^2 dx \quad (6)$$

式中: $I(x)$ 为变截面立柱的惯性矩函数; I_{eq} 为待求的等效惯性矩; $y(x)$ 为立柱挠曲线函数。

由于本研究提出的早拆脚手架体系同时包含半刚性节点与变截面立柱,难以精确给出满足边界条件的挠曲线函数。

采用有限元软件 ANSYS 计算包含半刚性节点与变截面立柱钢框架屈曲荷载 P_{cr} , 根据欧拉公式反推变截面立柱的等效惯性矩 I_{eq} , 如下式:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eq}}{(\mu L)^2} \quad (7)$$

包含半刚性节点与变截面立柱的钢框架有限元模型如图 5(a) 所示,立柱底部设定为刚接约束,立柱顶部与横梁连接处设置弹簧单元,以表征二者之间的半刚性连接,弹簧单元的转动刚度设定为 $77.67 \text{ (kN} \cdot \text{m)}/\text{rad}$ 。在立柱顶部施加竖向集中力,进行特征值屈曲分析,有限元计算结果如图 5(b) 所示。提取其一阶屈曲模态及其对应的屈曲荷载 P_{cr} , 将该屈曲荷载视为相同材料与相同长度的等截面立柱的屈曲荷载,将该荷载代入式(7),此外,根据式(5)确定计算长度系数 μ 并代入式(7),可计算得到插管-套管立柱的等效惯性矩 I_{eq} 。该方法的适用条件如下:①发生整体屈曲的脚手架结构体系,屈曲模态以立柱弯曲为主;②变截面段的几何变化沿立柱轴向连续或呈分段恒定特征;③等效惯性矩仅适用于所对应的屈曲模态和边界条件,当立柱高度、套管长度或节点刚度发生较大变化时,需重新计算。通过上述方法,可在综合考虑节点半刚性与截面变异性的前提下,合理确定变截面立柱的等效惯性矩,为后续脚手架体系屈曲分析提供统一的截面参数。

3 早拆脚手架体系屈曲行为数值模拟

采用有限元软件 ANSYS 对早拆脚手架体系屈曲行为进行数值模拟。选用 ANSYS 单元库中梁单

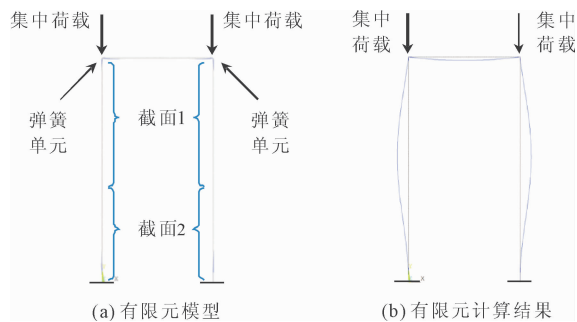


图5 包含半刚性节点与变截面立柱的钢框架屈曲分析

元 BEAM188 进行早拆脚手架体系建模,立柱外径为 48 mm 、内径 42 mm 、壁厚 3 mm ,套管外径 60 mm 、内径 54 mm 、壁厚 3 mm ,横梁为空心矩形,截面外轮廓尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,壁厚 4 mm ,在梁柱节点施加弹簧单元,设定弹簧单元的刚度为 $77.67 \text{ (kN} \cdot \text{m)}/\text{rad}$ 。早拆脚手架体系边柱与地面刚接,在边柱底部施加位移与转动约束,以限制立柱的平动与转动;早拆脚手架体系内柱与地面铰接,在内柱底部仅施加位移约束,仅限制立柱的平动;在横梁与立柱上施加均布荷载。以 $L = 1\,000 \text{ mm}$ 、 $H = 4\,000 \text{ mm}$ 、 $H_1 = 1\,500 \text{ mm}$ 为例,早拆脚手架体系有限元模型如图 6(a) 所示,早拆脚手架体系屈曲行为数值模拟结果如图 6(b) 所示。为了验证本研究采用的数值模拟的可行性,将数值计算结果与理论计算结果进行对比。以立柱间距 $L = 1\,200 \text{ mm}$ 、立柱高度 $H = 4\,000 \text{ mm}$ 、套管高度 $H_1 = 1\,948 \text{ mm}$ 为例,根据 2.2 节可计算立柱的等效惯性矩 $I_{eq} = 149\,522 \text{ mm}^4$,根据 2.1 节式(5)可得到立柱计算长度系数 $\mu = 0.743$,将上述参数带入欧拉公式可得到屈曲荷载为 $35\,085 \text{ N}$,数值模拟得到的屈曲荷载为 $35\,116 \text{ N}$,数值模拟结果与理论计算结果吻合良好,验证了本研究采用的数值模拟方法的准确性。

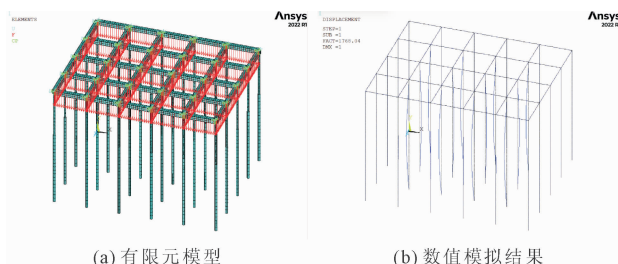


图6 考虑半刚性节点与变截面立柱的早拆脚手架体系屈曲行为数值模拟

为了分析立柱高度 H 与套管长度 H_1 对早拆脚手架体系屈曲行为的影响,设定立柱间距 L 为 $1\,200$

mm, 立柱高度 H 为 3 000 ~ 5 000 mm, 套管高度 H_1 为 1 820 ~ 2 480 mm, 计算不同工况下早拆脚手架体系的屈曲荷载 P_{cr} , 各工况对应的几何尺寸、计算长度系数 μ 、屈曲荷载 P_{cr} 如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 在立柱高度相同的情况下, 随着套管长度 H_1 的增加, 脚手架体系的屈曲承载力显著提高。以 $H=3\ 000$ mm 为例, 当 H_1 由 1 820 mm 增加至 2 480 mm 时, 屈曲荷载由 68 247 N 提升至 75 201 N, 增幅约为 10.2%。从稳定性机理分析, 这一现象主要源于套管长度的增加提高了立柱截面的整体抗弯刚度。根据欧拉公式, 屈曲荷载与等效惯性矩呈正比。表 1 中数据表明, 随着套管长度增加, 等效惯性矩由 $171\ 482\ \text{mm}^4$ 增大至 $191\ 741\ \text{mm}^4$, 直接提升了立柱的抗弯刚度, 从而增强了体系的屈曲承载能力。同时, 套管长度的增加也改善了插管-套管连接处的刚度连续性, 减小了截面突变对屈曲行为的不利影响。在套管长度相同的情况下, 随着立柱高度的增加, 脚手架体系的屈曲承载力迅速降低。以 $H_1=2\ 480$ mm 为例, 当立柱高度由 3 000 mm 增加至 5 000 mm 时, 屈曲荷载由 75 201 N 下降至 23 565 N, 降幅达 68.7%。根据欧拉公式, 屈曲荷载与立柱计算长度的平方成反比。立柱高度增加导致立柱几何长度 L 增大, 同时计算长度系数 μ 也随节点约束相对刚度的变化略有减小, 但几何长度的平方项起主导作用, 使得屈曲荷载快速下降。这一规律符合典型压杆稳定理论, 表明立柱高度是影响早拆脚手架体系稳定性的关键因素。

表 1 不同立柱高度与套管长度条件下早拆脚手架体系屈曲荷载

立柱间距 L/mm	立柱高度 H/mm	套管长度 H_1/mm	等效惯性矩 I_{eq}/mm^4	计算长度 系数 μ	屈曲承载力 P_{cr}/N
1200	3000	1820	171482	0.761	68247
1200	3500	1820	154873	0.749	46680
1200	3000	1948	179461	0.763	71005
1200	3500	1948	162850	0.751	48811
1200	4000	1948	149522	0.743	35116
1200	3000	2480	191741	0.766	75201
1200	3500	2480	188460	0.758	55519
1200	4000	2480	177464	0.749	40941
1200	4500	2480	164777	0.742	30639
1200	5000	2480	154000	0.736	23565

为了分析立柱间距 L 对早拆脚手架体系屈曲行为的影响, 设定立柱高度 H 为 3 000、5 000 mm, 套管高度 H_1 为 1 820、1 948、2 480 mm, 立柱间距 L 为

800 ~ 1 800 mm, 计算不同工况下早拆脚手架体系的屈曲荷载 P_{cr} , 各工况对应的屈曲荷载 P_{cr} 如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 对于不同的立柱高度与套管长度组合, 早拆脚手架体系的屈曲荷载随立柱间距的增加而小幅降低, 变化幅度总体不超过 2%。以 $H=3\ 000$ mm、 $H_1=2\ 480$ mm 为例, 立柱间距由 800 mm 增至 1 800 mm 时, 屈曲荷载由 75 414 N 降至 74 939 N, 降幅仅 0.63%。从结构稳定性机理分析, 立柱间距的变化主要影响横梁对柱顶的转动约束刚度。根据式(5)中计算长度系数 μ 的表达式, μ 依赖于横梁线刚度修正系数 α , 而 α 与横梁长度 L_0 呈反比关系。随着立柱间距增加, 横梁长度增大, 其对柱顶的转动约束能力减弱, 导致计算长度系数 μ 略有增大, 从而使屈曲荷载轻微下降。但由于本体系统中节点转动刚度较大, 且横梁截面尺寸较大, 立柱间距在 800 ~ 1 800 mm 范围内变化时, 其对整体稳定性的影响远小于立柱高度与套管长度的影响。基于上述分析, 为确保早拆脚手架体系的安全性与经济性, 需在满足调节范围需求的前提下, 尽可能选用较长的套管, 可有效提高早拆脚手架体系的屈曲承载能力。立柱间距介于 800 ~ 1 800 mm 内时, 对承载力影响不显著, 可根据施工空间和材料经济性灵活选择。

表 2 不同立柱间距与立柱高度条件下早拆脚手架体系屈曲荷载

立柱高度 H/mm	套管长度 H_1/mm	不同立柱间距 $L(\text{mm})$ 下的屈曲荷载/N					
		800	1000	1200	1400	1600	1800
3000	1820	68460	68348	68247	68152	68060	67972
3500	1820	46830	46751	46680	46614	46551	46489
3000	1948	71222	71108	71005	70908	70816	70726
3500	1948	48966	48884	48810	48741	48675	48612
3000	2480	75414	75301	75201	75110	75023	74939
3500	2480	55688	55599	55518	55448	55380	55314

4 结 论

(1) 所提出的早拆脚手架体系中, 梁柱节点的转动刚度经有限元计算为 $77.67\ (\text{kN} \cdot \text{m})/\text{rad}$, 属于半刚性节点范畴。在此基础上, 推导了考虑节点半刚性的无侧移框架柱计算长度系数 μ 的修正公式, 为脚手架体系的稳定分析提供了更为准确的边界条件描述。

(2) 开展了考虑半刚性节点与变截面立柱的早拆脚手架体系屈曲分析, 立柱高度与套管长度对屈曲承载力影响显著。在立柱间距 $L=1\ 200$ mm 条件

下,当立柱高度 $H=3\ 000\ \text{mm}$ 时,套管长度由 $1\ 820\ \text{mm}$ 增至 $2\ 480\ \text{mm}$,屈曲荷载由 $68.25\ \text{kN}$ 提高至 $75.20\ \text{kN}$,增幅约 10.2% ;当套管长度固定为 $2\ 480\ \text{mm}$ 时,立柱高度由 $3\ 000\ \text{mm}$ 增至 $5\ 000\ \text{mm}$,屈曲荷载由 $75.20\ \text{kN}$ 降至 $23.57\ \text{kN}$,降幅达 68.7% 。

(3) 立柱间距在 $800\sim 1\ 800\ \text{mm}$ 范围内对屈曲承载力影响较小,变化幅度不超过 2% 。以 $H=3\ 000\ \text{mm}$ 、 $H_1=2\ 480\ \text{mm}$ 为例,立柱间距由 $800\ \text{mm}$ 增至 $1\ 800\ \text{mm}$ 时,屈曲荷载由 $75.41\ \text{kN}$ 降至 $74.94\ \text{kN}$,降幅仅 0.63% 。工程应用中可在满足施工空间需求的前提下优先选用较长套管,以提高体系的屈曲稳定性。

参考文献:

- [1] 张志超,陈向荣,林 冰,等. 脚手架立杆套管接长下轴压稳定性研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(01):228-238.
- [2] Peng Juilin, Wang Shuhong, Wang Chunsheng, et al. Stability study on scaffolds with inclined surfaces and extended jack bases in construction[J]. Advanced Steel Construction, 2021,17(01):73-83.
- [3] Liu Hongbo, Jia Li, Wen Suolin, et al. Experimental and theoretical studies on the stability of steel tube-coupler scaffolds with different connection joints[J]. Engineering Structures, 2016,106:80-95.
- [4] Liu Hongbo, Meng Yi, Jia Li, et al. Structural behavior of steel tube and coupler scaffolds with stability strengthening details[J]. International Journal of Steel Structures, 2018,18(01):79-95.
- [5] Yan Renzhang, Ji Haoping, Wang Shuai, et al. Impact of vertical pipe splicing on the stability of disk-buckle scaffolding[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2026,239:110252.
- [6] 贾 莉,刘红波,陈志华,等. 扣件式钢管满堂脚手架整体稳定试验与有限元分析[J]. 建筑结构学报,2017,38(06):114-122.
- [7] 杨建民,熊 方. 榫卯式钢管脚手架极限承载力试验研究与数值分析[J]. 建筑结构,2017,47(04):72-74.
- [8] 谢向阳,陈 果,殷 磊. 钢管扣件式脚手架半刚性节点多参数模拟法[J]. 土木与环境工程学报,2019,41(04):92-103.
- [9] 张艳霞,程啸天,张爱林,等. 插销式脚手架临时看台支架架体试验研究与计算模型分析[J]. 工业建筑,2025,55(09):209-217.
- [10] 罗尧治,郑延丰,谢俊乔,等. 建筑施工临时支撑结构分类及稳定性分析[J]. 建筑结构学报,2016,37(04):143-150.
- [11] Zhao Zhongwei, Liang Bingbei, Li Shuoran, et al. Buckling capacity of socket template scaffold with random bending stiffness and capacity[J]. Structures, 2025,71:108152.
- [12] Faridmehr I, Tahir M, Lahmer T. Classification system for semi-rigid beam-to-column connections[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2016,13(11):2152-2175.
- [13] 刘京红,李文坡,张凌博,等. 承插型盘扣式钢管支撑脚手架试验及有限元分析[J]. 北京理工大学学报,2023,43(05):478-484.
- [14] Reza M, Nooshin H, Harding J. Proposed mathematical model for semi-rigid joint behaviour (M- θ) in space structures[J]. International Journal of Space Structures, 2014,29(02):71-80.
- [15] Zheng Yongfeng, Guo Zhengxing. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021,177:106415.
- [16] Li Pengcheng, Chen Guohan, Qiu Jianyue, et al. Experimental and numerical investigation into the load-carrying capacity of aluminium alloy H-sectional stocky columns under axial compression[J]. Journal of Building Engineering, 2024,87:108777.
- [17] 吴亚平. 变截面压杆稳定性计算的等效刚度法[J]. 力学与实践,1994(01):58-60.
- [18] 吴亚平. 对变截面压杆稳定性计算的等效刚度法的改进[J]. 兰州铁道学院学报,1998(04):5-7.