

Research on the Effective Length of Columns in Dense-Column Steel Grid Frame

Fusheng Zhai, Zhengxian Bai, Tengfei Zhang, Hongyang Guan

College of Architecture and Civil Engineering of Beijing University of Technology, Beijing
Email: zhaifs@yeah.net, zxbai@bjut.edu.cn

Received: Sep. 3rd, 2016; accepted: Sep. 18th, 2016; published: Sep. 21st, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Dense-column steel grid frame columns have large lateral stiffness and a good application prospect in steel structure residence. The column in this system constrained by horizontal support constraints could not directly apply the present code of steel structure design suggested length coefficient calculation method. It is inconvenient to its stable design. This paper, using ABAQUS software, through reasonable selection of multi-columned steel grid frame stability analysis simplified model, considering the influence of welding residual stress, initial bending and material nonlinearity carries out the nonlinear buckling analysis of dense column. After solving the nonlinear buckling critical load, the effective length factor of the steel frame column in the plane and out of the plane is calculated. This paper combining with software to analysis, has higher research level and application value. The results show that the solution according to the current standard of calculated length coefficient is relatively conservative, and deviation is 6.76% to 27.93%. Lateral brace position and quantity have a certain influence on out-of-plane calculated length coefficient, lateral brace position and pillars. The horizontal support in the position of the center of the column to the top of the column can reduce the out-of-plane calculated length coefficient of frame column to some extent.

Keywords

Dense-Column Grid, Steel Frame, Dense-Column, Effective Length Factor, Nonlinear Buckling Analysis

密柱网格式钢框柱计算长度系数研究

翟福胜, 白正仙, 张腾飞, 关洪阳

北京工业大学建筑工程学院, 北京
Email: zhaifs@yeah.net, zxbai@bjut.edu.cn

收稿日期: 2016年9月3日; 录用日期: 2016年9月18日; 发布日期: 2016年9月21日

摘 要

密柱网格格式钢框架抗侧移刚度大, 在钢结构住宅中有很好的应用前景。该体系中的密柱因横向支撑的约束无法直接套用现行钢结构设计规范中建议的计算长度系数计算方法, 这对其稳定设计带来不便。本文采用ABAQUS软件, 通过合理选取密柱网格格式钢框架稳定分析简化模型, 同时考虑密柱的焊接残余应力、初弯曲以及材料非线性等因素的影响, 对密柱进行非线性屈曲分析, 得出非线性屈曲临界荷载后, 反推其在平面内和平面外的计算长度系数。本文结合软件进行分析, 具有较高的研究水平和研究应用价值。结果表明: 按照现行规范求得的面内计算长度系数较为保守, 偏差值为6.76%~27.93%, 横撑位置和数量对平面外计算长度系数有一定的影响, 横撑在柱中至柱顶位置时可在一定程度上减小框架柱平面外计算长度系数。

关键词

密柱网格格式, 钢框架, 密柱, 计算长度系数, 非线性屈曲分析

1. 前言

钢框架结构在钢结构建筑中是较常用的结构形式, 其主要优点有可形成大空间、施工速度快、便于装配等, 而框架结构抗侧移能力较弱、最大适用高度较低、构件截面尺寸较大等一直是制约钢框架结构在高层住宅结构中应用的重要因素。框架-支撑结构较纯框架结构抗侧移能力有所增强, 但支撑的布置在一定程度上影响住宅建筑内部大空间与采光等要求。马克俭提出了钢网格盒式结构体系, 并对该体系进行了详细的理论研究和并将其应用于实际工程[1] [2]。孙涛[3]介绍一种新型钢结构住宅体系——现浇工业石膏外墙钢网格格式盒式结构体系, 并详细研究了该结构的水平体系和竖向体系的力学性能。本文提出的密柱网格格式钢框架如图1所示, 为增强框架结构的抗侧刚度, 根据房间布置的需求, 改变个别主轴框架的布置形式, 用密布的小截面柱替代较大的框架柱, 在柱间设置横向的刚接网格梁, 较小截面的柱通过墙体的包裹, 减小所占用的空间。这种对框架结构的改进也可以推广应用到钢框架-剪力墙结构、钢框架-核心筒结构中。该体系中的密柱因横向支撑的约束无法直接套用现行《钢结构设计规范》(注: 以下简称为《钢规》)中建议的计算长度系数计算方法, 这对其稳定设计带来不便。本文采用 ABAQUS 软件, 综合考虑构件的焊接残余应力、初始几何缺陷和材料非线性等因素的影响, 对有侧移平面密柱网格格式钢框架进行特征值屈曲分析和非线性屈曲分析。根据密柱的非线性屈曲临界荷载后, 求出整体稳定系数, 再依据《钢规》[4]反推其框架柱的计算长度系数。通过对平面内、外钢框柱的分析计算, 可对规范形成补充。

2. 密柱网格格式钢框架屈曲分析方法

为验证本文所选取的材料本构模型、焊接残余应力模型和初始缺陷引入方法对框架柱非线性屈曲分析的适用性, 首先对单层单跨钢框架算例进行非线性屈曲分析, 求其极限荷载; 反推其整体稳定系数及计算长度系数。将分析计算结果与按《钢规》求解的计算长度系数进行对比, 验证本文研究方法的可靠性。

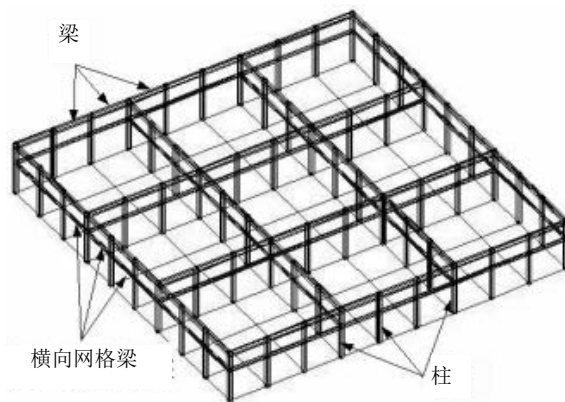


Figure 1. The schematic diagram of dense-column steel grid frame

图 1. 密柱网格格式钢框架示意图

2.1. 基本假定

引入钢框架结构的整体屈曲模态，考虑焊接残余应力对框架结构构件的影响，对模型进行非线性屈曲分析。对框架柱进行考虑材料及几何非线性的非线性屈曲分析时，采用以下基本假定[5]：

- 1) 框架只承受竖向节点荷载；
- 2) 失稳时同层的柱子同时屈曲；
- 3) 不考虑平面外的荷载和位移。

2.2. 模型几何参数

本文选取的单层单跨钢框架算例的构件几何尺寸如表 1 所示。构件的钢材为 Q345。

2.3. 有限元模型的建立

模型分析采用 Mises 屈服准则及相关流动准则。模型中钢材的应力 - 应变关系曲线采用双线性随动强化模型。模型采用二维平面框架，采用梁单元 B31 进行分析。梁柱节点为刚性连接，柱底端约束所有自由度。

2.4. 屈曲分析和模型验证

屈曲分析包括线性屈曲分析和非线性屈曲分析。首先对模型进行线性屈曲分析，在各柱顶节点施加 $F = -1 \text{ N}$ 的单位荷载，采用 Buckling 方式求解，分析得到模型失稳的线性临界荷载值为 $1.067 \times 10^8 \text{ N}$ 。定义框架左端柱为所求柱，将得到的第三阶屈曲模态作为所求柱的初始缺陷，引入到非线性屈曲分析中，缺陷比例因子定义为 $H/350$ ， H 为框架柱的高度。采用 $H/350$ 的比例相对于 $H/1000$ 考虑了焊接残余应力的不利影响[6]。框架屈曲模态如图 2 所示。

非线性屈曲分析采用 Riks 弧长法，改变原加载点上的载荷，输入参考荷载 N_{ref} 。求解完成后输出 LPF- Δ 曲线，即载荷比例因子——位移曲线如图 3 所示。令 λ 为载荷比例因子即 LPF 值，则非线性屈曲分析临界荷载 N_{cr} 可定义为[7]：

$$N_{cr} = \lambda N_{ref} \quad (1)$$

本次求解得到的载荷比例因子最大值为 0.283656，弧长法加载步中输入的参考荷载为 $1.98 \times 10^7 \text{ N}$ ，故非线性屈曲分析的临界荷载 $N_{cr} = 5.63 \times 10^6 \text{ N}$ 。根据《钢规》轴心受压构件整体稳定计算公式：

Table 1. Geometric parameters of column & beam
表 1. 算例梁柱截面几何参数

| 构件 | 截面 | A/cm ² | I _x /cm ⁴ | Lz/mm |
|----|--------------------|-------------------|---------------------------------|-------|
| 柱 | 300 × 300 × 16 | 182 | 24511 | 3300 |
| 梁 | 400 × 200 × 8 × 13 | 82 | 22965 | 3300 |

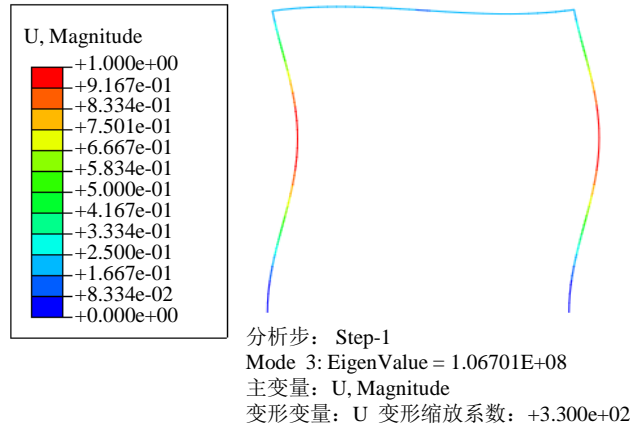


Figure 2. The third buckling mode of the steel frame
图 2. 钢框架第三阶屈曲模态图

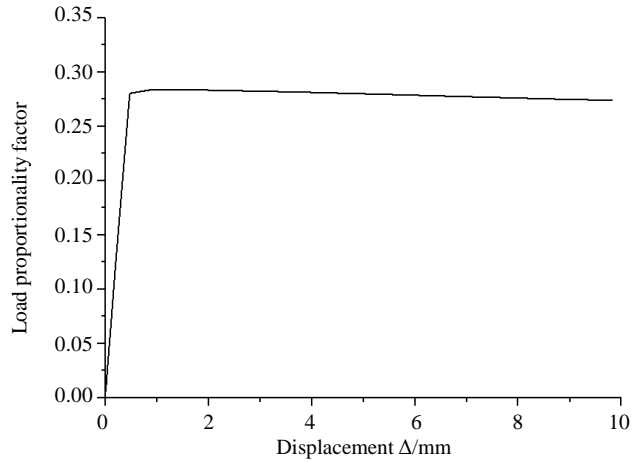


Figure 3. Curve: Load proportionality factor—displacement relationship of the analysis example
图 3. 算例钢框架 LPF-Δ 曲线

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \frac{\sigma_{cr}}{\gamma_R} = \frac{N_{cr}}{Af_y} \frac{\sigma_{cr}}{\gamma_R} = \varphi f \quad (2)$$

则

$$\varphi = \frac{N_{cr}}{Af_y} \quad (3)$$

柱子截面分类确定后，整体稳定系数 φ 与构件的长细比 λ 是一一对应的。构件的计算长度系数与其长细比 λ 的关系如下[8]:

$$\mu = \frac{\lambda}{l} \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{\lambda i}{l} \quad (4)$$

根据上述方法求得的计算长度系数为 1.19, 根据《钢规》求得的框架柱计算长度系数 1.17, 两者非常接近, 说明本文采用的非线性屈曲分析方法是可行的。

3. 网格式钢框架平面内计算长度系数

3.1. 框架平面内简化数值模型选取

本文所述应用于钢结构住宅中的密柱网格式钢框架由于不设置刚性支撑, 故为有侧移框架。首先选取平面内首层单层单跨密柱钢框架结构作为屈曲分析有限元模型, 并将构件的截面、材料属性、周边约束情况等反映到密柱钢框架结构有限元模型中, 然后对模型进行非线性屈曲分析。如图 4 所示的有侧移框架模型中, 将网格柱 AB、BC、DE、EF 作为研究对象, 同时考虑框架梁 AD、DG 与层间网格梁 BE、EH 的约束影响, 通过整体屈曲分析得到的框架柱的极限承载力与《钢规》求解的框架柱计算长度进行对比。本模型中柱 AB 两端约束最弱, 极限承载力最小, 故模型整体屈曲分析得到的计算长度系数应与 AB 柱的计算长度系数相吻合。

3.2. 密柱网格式钢框架平面内简化模型屈曲分析

按图 5 所示的密柱网格式钢框架柱稳定分析简化模型建立 ABAQUS 有限元分析模型, 模型中柱高为 $H = 4.2 \text{ m}$, 梁跨为 $L = 2.1 \text{ m}$ 。钢框架及网格梁均为 H 型钢, 截面尺寸均为 $H 400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$, 柱截面尺寸为 $B \times t = 300 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$, 钢材为 Q345。分析模型中柱底为实现刚接约束全部六个自由度, 选取全部构件约束 U3、UR1、UR2, 将三维框架转变为平面内的二维框架。在全部柱顶节点施加 $F = -1$ 的单位荷载进行线性屈曲分析, 得到密柱网格式框架柱简化模型的二阶变形模态如图 5 所示。密柱网格式钢框架线性屈曲临界荷载为 $8.5 \times 10^6 \text{ N}$ 。将二阶屈曲模态作为屈曲模态引入非线性屈曲分析, 缺陷比例因子取考虑过构件焊接残余应力的 $H/350$, H 为模型框架柱高度。

采用上述 Riks 弧长法对钢框架进行非线性屈曲分析, 分析中定义的参考荷载为 $1.0 \times 10^7 \text{ N}$, 分析得到的荷载比例因子最大值为 0.499, 荷载比例因子 LPF-位移 Δ 曲线如图 6 所示, 由式(1)计算得到模型的非线性屈曲荷载为 $4.99 \times 10^6 \text{ N}$ 。代入公式(2)~(3), 求得框架柱的稳定系数为 1.42。通过《钢规》查得柱子 AB、BC、DE、EF 的计算长度系数依次为 1.33、1.18、1.17 和 1.11。通过对比 AB 柱计算长度系数可知《钢规》在求解密柱网格式钢框架柱计算长度时偏于保守, 偏差值为 6.77%~27.93%。

4. 网格式钢框架平面外计算长度系数

4.1. 框架平面外简化数值模型选取

密柱网格式钢框架在平面内由于设置密柱横撑, 故稳定性较好, 但在平面外除楼板约束外无较强支撑, 当采用与平面内计算长度系数相同的计算方法时所得到的结论与上文相同。文献[9]为考虑楼板面外较强的刚度, 以及楼板平面内竖向可压缩的受力特征, 选取了两对边简支、另两对边一夹一固和两临边固支、两临边夹支的边界条件下的网格式框架, 本文根据实际情况选取了底部固支、两侧边铰支、上部滑动的边界条件下的密柱网格式钢框架, 计算简图如图 4 所示。

4.2. 密柱网格式钢框架平面外简化模型屈曲分析

密柱框架柱平面外计算模型基本参数同平面内的简化模型。边界条件设置如下: 密柱下部约束全部六个自由度, 上部约束平面外平动自由度 U3, 左右两端为实现铰接, 仅约束平面外平动自由度 U3。在

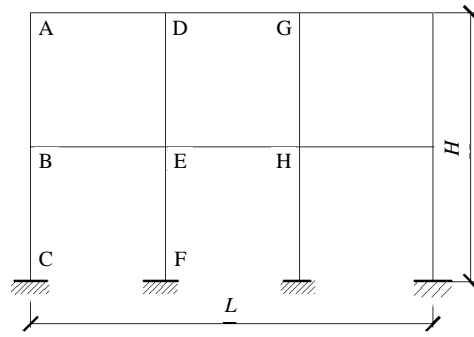


Figure 4. The buckling analysis simplified model of dense-column steel grid frame

图 4. 密柱网格式钢框架屈曲分析简化模型

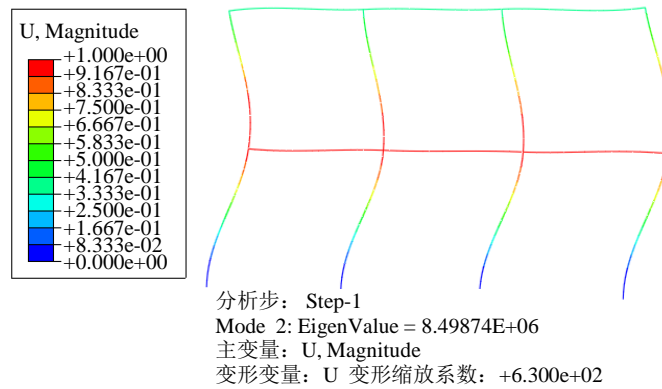


Figure 5. The second in-plane buckling mode of dense-column steel grid frame

图 5. 密柱网格式框架面内屈曲二阶模态图

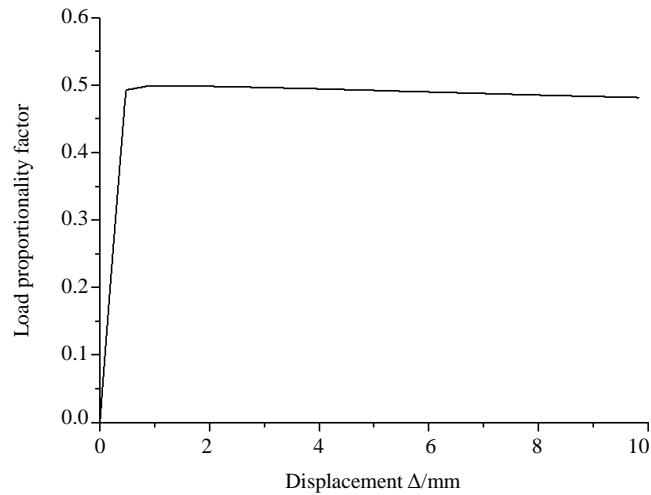


Figure 6. Load proportionality factor—displacement relationship of the in-plane dense-column steel grid frame

图 6. 密柱网格式框架面内荷载比例因子—位移曲线

柱顶节点施加 $F = -1$ 的单位荷载进行线性屈曲分析，得到密柱网格式框架柱平面外简化模型的二阶变形模态如图 7 所示。

密柱网格格式框架柱平面外线性屈曲临界荷载为 5.45×10^6 N，将二阶屈曲模态引入非线性屈曲分析中，屈曲缺陷比例因子取考虑过构件焊接残余应力的 H/350，H 为模型框架柱高度。采用上述 Riks 弧长法对钢框架进行非线性屈曲分析，分析中定义的参考荷载为 1.0×10^7 N，分析得到的荷载比例因子最大值为 0.437，荷载比例因子 LPF-位移 Δ 曲线如图 8 所示。计算得到模型的非线性屈曲荷载为 4.37×10^6 N，代入公式(2)~(4)，求得框架柱的平面外计算长度系数为 1.79。

4.3. 横撑位置对密柱网格格式钢框柱平面外计算长度系数的影响

在密柱网格格式钢框架结构住宅体系中，横撑的位置通常会根据建筑布局和采光等因素进行变换。为研究横撑位置变换对钢框柱平面外计算长度系数的影响，本文建立横撑位置分别在柱底 1/3L、柱顶 1/3L 的密柱网格格式钢框架，模型荷载边界条件同上，得到二阶屈曲模态如图 9 所示。其线性屈曲临界荷载分别为 5.33×10^6 N 和 5.46×10^6 N，将二阶屈曲模态引入非线性屈曲分析中，屈曲缺陷比例因子取考虑过构件焊接残余应力的 H/350，H 为模型框架柱高度。采用上述 Riks 弧长法对钢框架进行非线性屈曲分析，分析中定义的参考荷载均为 1.0×10^7 N，分析得到的荷载比例因子最大值分别为 0.424 和 0.441，计算得到模型的非线性屈曲荷载分别为 4.24×10^6 N 和 4.41×10^6 N，代入公式(2)~(4)，求得框架柱的平面外计算长度系数分别为 1.87 和 1.77。

通过与上述网格格式钢框架对比分析可知网格梁在靠近柱顶 1/3L 处时对框架柱计算长度系数几乎没有影响，而网格梁在靠近柱底 1/3L 处时框架柱的计算长度系数会稍微增大。

4.4. 横撑数量对密柱网格格式钢框柱平面外计算长度系数的影响

通常增加密柱网格格式框架横向网格梁的数目会增加框架的抗侧刚度但也会增加结构的经济成本，为研究网格梁数目对框架柱计算长度系数的影响，在柱中有网格梁基础上增设靠近柱顶 1/3L 处的网格梁，网格梁截面尺寸、模型边界条件、分析方法同上，计算得到的框架一阶屈曲变形模态如图 10 所示。其线性屈曲临界荷载为 5.59×10^6 N，将一阶屈曲模态引入非线性屈曲分析中，屈曲缺陷比例因子取考虑过构件焊接残余应力的 H/350，H 为模型框架柱高度。采用上述 Riks 弧长法对钢框架进行非线性屈曲分析，分析中定义的参考荷载为 1.0×10^7 N，分析得到的荷载比例因子最大值为 0.452，计算得到模型的非线性屈曲荷载分别为 4.52×10^6 N，代入公式(2)~(4)，求得框架柱的平面外计算长度系数为 1.70。

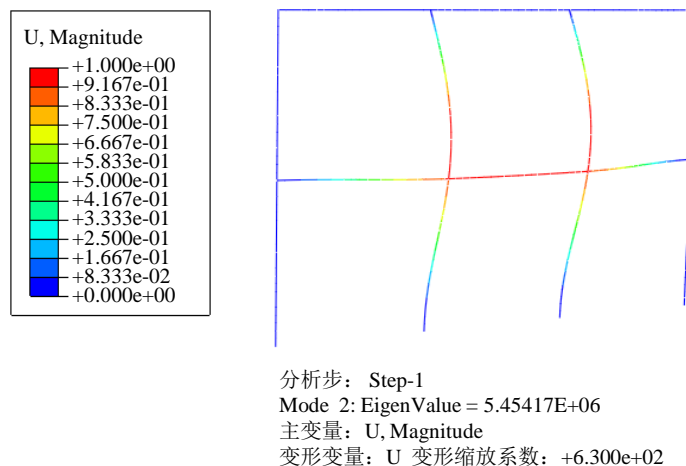


Figure 7. The second out-of-plane buckling mode of dense-column steel grid frame

图 7. 密柱网格格式钢框架面外屈曲二阶模态图

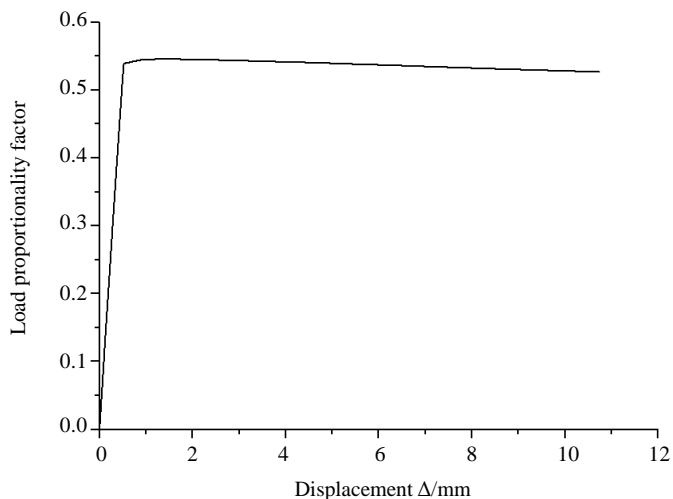
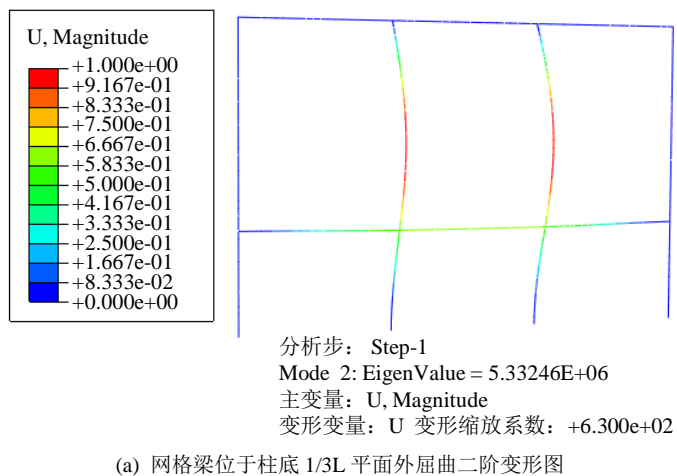
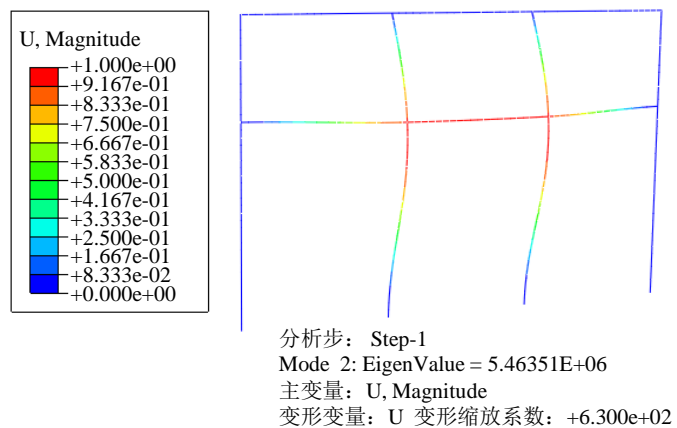


Figure 8. Load proportionality factor—displacement relationship of the out-of-plane dense-column steel grid frame
图 8. 密柱网格式钢框架平面外荷载比例因子—位移曲线



(a) 网格梁位于柱底 1/3L 平面外屈曲二阶变形图



(b) 网格梁位于柱顶 1/3L 平面外屈曲二阶变形图

Figure 9. The out-of-plane buckling mode of dense-column steel grid frame when transforming grid beam position
图 9. 变换网格梁位置时密柱网格式钢框架平面外屈曲模式图

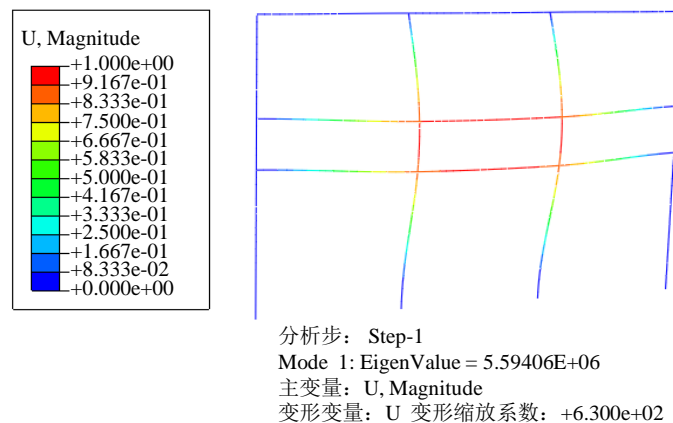


Figure 10. The out-of-plane buckling mode of dense-column steel grid frame when increasing the grid beam number

图 10. 增加网格梁数量时密柱网格式钢框架平面外屈曲模式图

通过与上文分析结果对比可知, 网格梁数量增加会在一定程度上减小钢框柱的计算长度系数, 但减小程度有限, 而且网格梁的位置宜尽量靠近柱中位置。

5. 结论

1) 通过对密柱网格式钢框架平面内计算长度系数的分析结果与《钢规》求解结果对比, 表明《钢规》在框架平面内的求解结果相对本文结果较为保守, 本文分析结果可为《钢规》提供补充。

2) 通过变换横撑位置, 对密柱网格式钢框架分析平面内计算长度系数的分析, 可知网格式钢框架平面外计算长度系数受网格梁位置和网格梁数量的影响, 网格梁在柱中或靠近柱顶 $1/3L$ 位置时, 平面外计算长度系数较为接近, 当网格梁靠近柱底 $1/3L$ 位置时, 框架柱的计算长度系数会稍微增大。在靠近柱中位置增加网格梁会一定程度上减小框架柱的计算长度系数。

参考文献 (References)

- [1] 彭登, 马克俭. 新型装配整体式空间钢网格“筒中筒”盒式结构在超高层结构的研究与应用[J]. 空间结构, 2012, 18(4): 13-18.
- [2] 曹守刚, 马克俭, 等. 装配整体式空间钢网格盒式结构在多层大跨工业厂房中的应用[J]. 建筑结构, 2013, 43(4): 38-41.
- [3] 孙涛, 于浩, 马克俭, 等. 石膏墙体钢网格盒式结构在小高层住宅中的应用[J]. 空间结构, 2014, 20(3): 15-23.
- [4] GB 50017-2003. 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [5] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 138-143.
- [6] GB 50017-201X. 钢结构设计规范报批稿[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [7] 王凤, 王文达, 史艳莉. 钢管混凝土框架柱计算长度研究[J]. 工程力学, 2015(1): 168-175.
- [8] 刘学春, 徐阿新, 张爱林. 模块化装配式斜支撑节点钢框架结构整体稳定性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2015(5): 718-727.
- [9] 张华刚, 吴琴, 宋玲玲, 贾晓飞, 马克俭, 赵敏. 网格式框架的整体稳定分析[J]. 空间结构, 2015(2): 55-59.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org