

钢螺旋楼梯结构的直接分析法研究

黄德泓¹, 刘耀鹏^{2*}, 李明扬¹, 张志坚³, 余志祥¹, 白睿³

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510641;
3. 中山大学 土木工程学院, 广州 510275)

摘要: 钢螺旋楼梯结构因其特殊的异形结构, 受力情况复杂, 使得在进行稳定性设计时, 尤其是在确定计算长度时, 无法通过传统线性分析来准确预测其力学响应。引入直接分析法以克服这些限制, 综合考虑结构整体性和构件初始缺陷, 为此类结构的分析和设计提供一种高效且安全的解决方案。以一个具体工程为例, 使用NIDA软件进行直接分析法的稳定性研究, 并将所得结果与一阶线性分析的结果进行对比。研究考察了在全跨满载、左半侧满载、右半侧满载和不同扇形组合活荷载分布下楼梯结构的力学响应, 以及不同支座条件对楼梯结构响应的影响。结果表明, 直接分析法得到的最大构件应力比一阶线性分析结果高, 应力比达到0.993, 相应的竖向位移更为显著, 最大为0.348 m, 印证了二阶效应的重要性。在设计钢螺旋楼梯结构时, 应特别考虑活荷载的不利分布, 左半侧满载条件下的设计更为不利。对于活荷载的扇形分布, 位于楼梯中跨的扇形区域3和4的影响最大。此外, 顶部支座刚度的增加有助于降低应力比, 但同时会导致二阶弯矩因二阶效应而增大。研究结果对于指导钢螺旋楼梯结构的分析和设计具有重要意义。

关键词: 钢螺旋楼梯结构; 直接分析法; 非线性分析; 荷载分布; 二阶效应

中图分类号: TU391, TU229

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0109-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20231019001

Direct Analysis Method Research of Steel Spiral Staircase Structures

HUANG Dehong¹, LIU Yaopeng^{2*}, LI Mingyang¹, ZHANG Zhijian³,
YU Zhixiang¹, BAI Rui³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

*Corresponding author: yaopengliu@scut.edu.cn

Abstract: The complex structural behaviors in steel spiral staircases, due to their unique and irregular structures, render traditional linear analysis methods inadequate for accurate prediction of structural responses and stability design, particularly in determining effective lengths. This study employs the direct analysis method (DAM) to overcome these limitations, taking into account the overall structural and member initial imperfections, thus providing an efficient and safe approach for the analysis and design of such structures. A specific engineering project is presented as a case study, utilizing NIDA software to perform a stability investigation via DAM, with results compared against those obtained through linear analysis. The research examines the mechanical responses under full-span loading, left

收稿日期: 2023-10-19

作者简介:

黄德泓(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢及组合结构稳定性方面的研究。E-mail: redofyellowhdh@outlook.com。

通信作者:

刘耀鹏(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢及组合结构稳定性方面的研究。E-mail: yaopengliu@scut.edu.cn。

and right half-span loading, and various live load distributions across different sectors, as well as the impact of varying support conditions on the staircase structure. The findings indicate that the maximum component stress determined by DAM exceeds that of first-order linear analysis, with a maximum utilization factor reaching 0.993, and a corresponding vertical displacement that is even more significant, peaking at 0.348 m, confirming the importance of second-order effects. In the design of steel spiral staircases, adverse distributions of live loads, especially under left half-span loading conditions, should be given special consideration. For live load distributions, the impact is greatest in sectors 3 and 4, located at the mid-span of the staircase. Moreover, increasing the stiffness of the top support contributes to a reduced stress ratio while also leading to an increase in bending moments due to second-order effects. This research plays a significant role in guiding the analysis and design of steel spiral staircases.

Keywords: steel spiral staircase structure; direct analysis method; nonlinear analysis; load pattern; second-order effect

螺旋楼梯具有新颖的造型和优美的空间效果,而钢结构与混凝土相比,具有强度高、自重轻、刚度大、韧性强等特点,能很好地满足各种建筑造型要求^[1],因此越来越多的钢螺旋楼梯结构被应用于实际工程中。但是钢螺旋楼梯结构的受力复杂,需要同时抵抗剪力、扭矩、轴力和弯曲变形等多种作用^[2]。为了保证其设计满足强度和变形的要求,通常采用有限元方法进行结构计算分析。

目前国内外已有部分学者对钢螺旋楼梯结构的响应进行了研究。孙修礼^[3]利用 ANSYS 软件对某螺旋钢梯进行了计算,并对比分析了支座刚接和铰接对钢梯位移、应力和周期等因素的影响,验证了结构的可靠性;CHEN 等^[4]对带有多个支撑的螺旋钢梯进行了有限元线弹性分析,并研究了楼梯的变形、弯矩分布以及舒适度。钟建敏^[5]的研究指出,在考虑踏步板对螺旋楼梯内外侧梁的协调作用时,螺旋楼梯两端的支座型式对钢结构应力有显著影响;金蕾等^[6]基于 midas Gen 有限元分析软件,对 3 种螺旋楼梯结构方案进行了详尽的计算分析,并得出增加树权柱或为螺旋楼梯梯段板增设加劲肋均能有效提高螺旋楼梯整体刚度的结论;钱籽祺等^[7]利用 ABAQUS 软件对钢螺旋楼梯结构的踏步体积进行了优化,并对优化后的楼梯的力学性能开展了研究,为实际施工和整体结构的轻量化提供了重要的理论参考依据和方法;王志彬等^[8]将 DYNAMO 与 SAP2000 软件组合使用,对钢螺旋楼梯结构进行了壳单元建模,并完成了结构计算和参数化分析。但钢螺旋楼梯作为异形钢结构,当采用传统的计算长度系数法进行设计时,无法套用现行设计规范来确定构件的计算长度系数,会给该类型结构的计算带来挑战。

随着钢结构基础理论研究不断深入、非线性分析理论框架不断完善以及计算机技术不断发展,以整体结构体系为对象,以直接分析法为新的分析方法,可以考虑影响结构响应的各种因素,并在结构分析设计中的应用前景广阔^[9]。刘耀鹏等^[10]推导了基于力法的可直接考虑构件几何初始缺陷和残余应力的高性能梁柱单元,并探讨了直接分析法在抗震设计中的应用,提出了基本分析框架,指出了分析中需要注意的问题;丁智霞等^[11]采用基

于非线性静力分析的直接分析法,以整个结构体系为对象进行抗连续性倒塌分析,并与传统的线性静力分析结果进行了分析比较,结果表明,线性分析结果较为保守,非线性分析结果更加合理;汪明等^[12]以典型单层网壳结构为工程案例,阐述了直接分析法在空间结构设计中的应用,总结了直接分析法与传统计算长度系数法的区别,证明了利用直接分析法计算空间结构的可行性;高鸣等^[13]以某实际工程案例为基础,介绍了采用直接分析法进行异形钢结构设计的具体步骤和方法。研究表明,直接分析法解决了传统稳定性设计方法中确定构件计算长度的难题,并且适用于各类异形钢结构设计。该方法基于非线性理论,不仅考虑了结构变形对内力平衡和位移协调的影响,还充分考虑了结构整体及其构件的初始缺陷,这些实际中不可忽视的因素^[14]。因此,直接分析法能更真实地反映结构的实际响应,可为螺旋楼梯等异形钢结构的安全与经济设计提供科学依据。

本文利用直接分析法软件 NIDA,对中国香港某具体工程项目中的钢螺旋楼梯结构进行了详细的计算分析。通过对比分析,本文深入探讨了不同活荷载分布模式及顶部支座条件变化对该结构性能的影响。研究结果不仅为该工程提供了设计依据,也为未来类似螺旋楼梯结构的设计提供了宝贵的参考资料。

1 工程概况

本文所研究对象为中国香港某高层住宅项目的室内钢螺旋楼梯结构。该楼梯的正视图如图 1 所示,结构分析模型和在建实体照片如图 2 所示。楼梯从 3 层(3F)地面向上旋转 540°至 5 层(5F),5 层为休息平台,再从 5 层继续旋转至 6 层(6F)的转换层底部,其中 3F~5F 为上人区间,5F~6F 一般不上人。楼梯总高度为 11.5 m,其中 3F~5F 高度为 4.5 m,中对中宽度为 1.40~1.64 m,5F~6F 高度为 7.0 m,中对中宽度为 0.7~1.3 m。楼梯栏杆高度为 1.1 m。钢材型号均为 S355,截面形式有箱形和 H 形两种。内外侧箱梁截面为 $\square 575 \text{ mm} \times 220 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,3F~5F 区间横梁选用 $\square 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,5F 休息平台横梁选用

□ 250 mm×450 mm×20 mm×20 mm, 5F~6F 区间横梁选用□ 150 mm×150 mm×10 mm×10 mm, 3F 支座截面为 H700 mm×300 mm×35 mm×25 mm, 顶部支座选用□ 350 mm×350 mm×25 mm×25 mm。

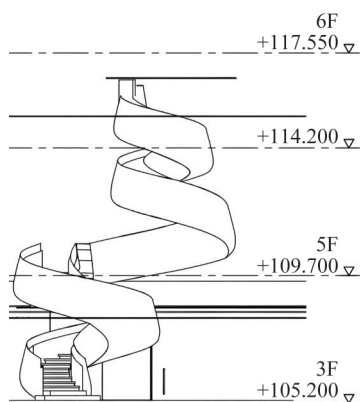


图1 钢螺旋楼梯结构正视图(单位:m)

Fig. 1 Front view of steel spiral staircase (unit:m)

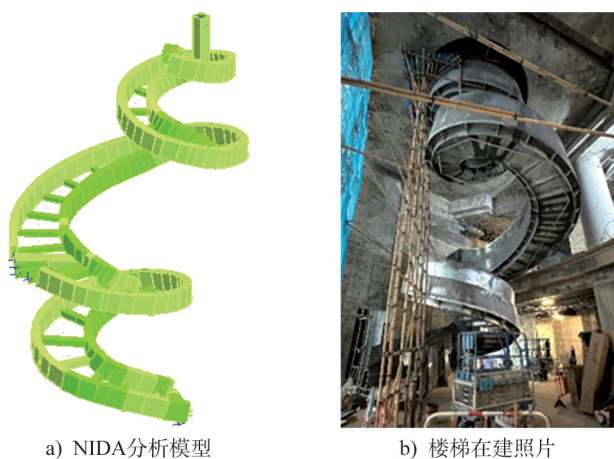


图2 钢螺旋楼梯结构分析模型和实体照片

Fig. 2 Analytical model and physical photograph of steel spiral staircase structure

2 结构分析与设计

该结构的设计荷载按中国香港的荷载规范 *Code of Practice for Dead and Imposed Loads*^[15](以下简称“荷载规范”)进行取值。钢结构自重由 NIDA 程序自动计算,楼梯主梁恒荷载取为 $8.21 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 3F~5F 区间楼梯次梁恒荷载取为 $5.15 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 5F~6F 区间楼梯次梁恒荷载取为 $3.6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。栏杆扶手顶部水平活荷载取为 $0.75 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$; 3F~5F 区间楼梯活荷载取为 $7 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 5F~6F 区间楼梯活荷载取为 $2.7 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

荷载组合工况则依据中国香港的钢结构设计规范 *Code of Practice for the Structural Use of Steel*^[16](以下简称“香港钢规”)进行选取。本文选取极限状态的主要控制组合“ $1.4\times$ 恒荷载+ $1.6\times$ 活荷载”和正常使用状态的标准组

合“ $1.0\times$ 恒荷载+ $1.0\times$ 活荷载”,分别完成一阶线性分析和直接分析并进行比较,以阐明这两种分析方法的差异。

2.1 一阶线性分析

进行一阶线性分析时,不考虑结构和构件的缺陷,通过求解一次刚度方程,即可获得位移响应,进而得到构件内力,然后按构件所预设的计算长度继续进行稳定性验算,最终得到极限荷载组合工况下构件应力比 ϕ 的散点热度图如图 3 所示,应力比云图如图 4a)所示。由图 3 可知, ϕ 最大值为 0.652,平均值为 0.264,计算得到的 $\phi > 0.6$ 的构件占总构件数量的 5.5%,其分布位置如图 4b)所示。楼梯梁最大应力比满足设计要求。通过对比图 4a)、b)中外侧梯梁与内侧梯梁,可知外侧梯梁的应力比更大, $\phi > 0.6$ 的构件更多分布在外侧梯梁上,内侧梯梁的应力比更小、更平均。图 4c)为钢螺旋楼梯结构在标准荷载组合工况下的竖向位移。由图可知,钢螺旋楼梯结构的最大竖向位移为 0.336 m,位移最大区域位于 3F~5F 区间(近似跨中区域)。与内侧梯梁相比,外侧梯梁在标准组合下计算所得的竖向位移更大。根据香港钢规^[16]可知,受弯构件的挠度容许值为 $l/200$ (l 为计算跨度),故楼梯最大竖向位移 $0.336 \text{ m} < 11.5 \text{ m}/200 = 0.575 \text{ m}$,满足结构挠度设计要求。

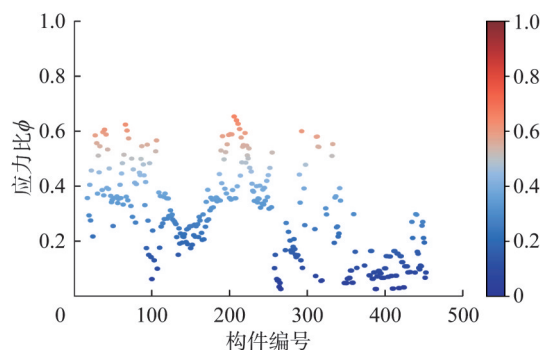


图3 构件应力比散点热度图(一阶线性分析)

Fig. 3 Scatter plot heatmap of the stress ratio of components (first-order linear analysis)

2.2 直接分析法

与一阶线性分析法不同,直接分析法(二阶 $P-\Delta-\delta$ 弹性分析)不允许进行荷载效应的组合,而应将荷载工况进行组合,再将该荷载组合作为整体输入,进行非线性的增量迭代分析,从而获得结构在该组合工况下的响应。直接分析法中采用的数值求解方法为 Newton-Raphson 法,设置总荷载步为 10 步,目标荷载系数为 1,故荷载增量系数为 0.1。进行应力比分析时,采用极限荷载组合“ $1.4\times$ 恒荷载+ $1.6\times$ 活荷载”工况最低阶的整体屈曲模态来确定结构整体和构件的局部初始缺陷,而在进行位移变形

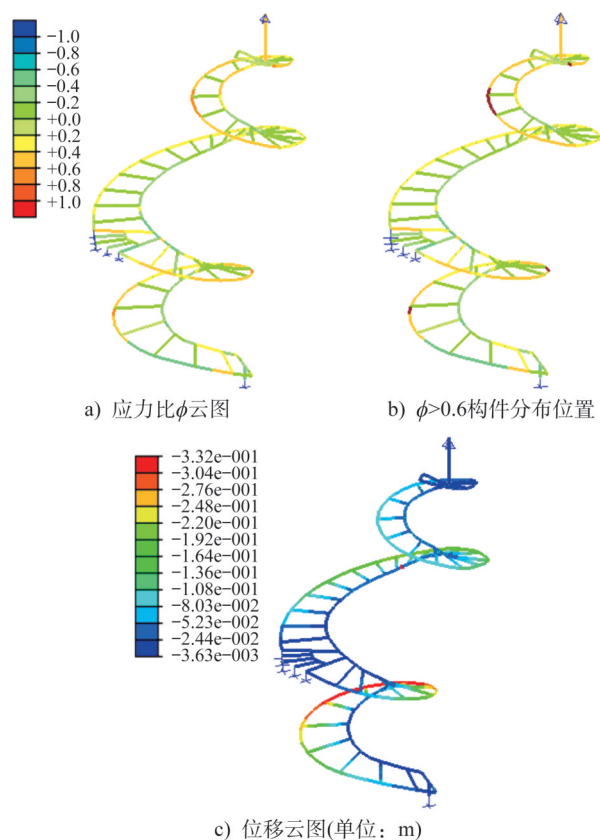


图4 应力比及位移云图(一阶线性分析)

Fig. 4 Stress ratio and displacement contours (first-order linear analysis)

分析时采用标准荷载组合“1.0×恒荷载+1.0×活荷载”工况最低阶的整体屈曲模态来确定结构整体和构件的局部初始缺陷。该结构在两种工况下最低阶的整体屈曲模态如图5所示(缩放系数为2),屈曲主要发生在3F~5F区域,表现为靠近5F的楼梯向上鼓曲,而靠近3F的楼梯向下鼓曲。

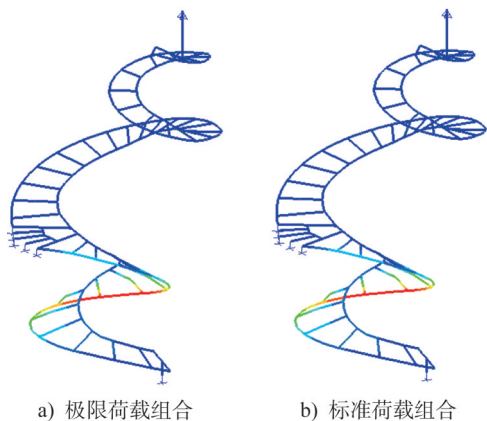


图5 最低阶整体屈曲模态

Fig. 5 Lowest-order global buckling modes

整体初始缺陷 Δ 的最大值取为 $H/200$ (H 为钢螺旋楼梯结构的高度)^[16],各构件初始缺陷 δ_0 的最大值^[16]

如表1所示。

表1 各构件初始缺陷 δ_0 最大值

Table 1 Maximum values of δ_0 for the initial defect of various components

构件截面形式	构件综合初始缺陷代表值 e_0/L	
	沿弱轴 y 方向的缺陷	沿强轴 z 方向的缺陷
箱形	1/400	1/400
H形	1/400	1/300

注: e_0 为跨中缺陷最大幅值; L 为构件长度。

分析表明,该楼梯不发生跳跃屈曲或跳回屈曲,故本文后续结果均可采用Newton-Raphson方法进行非线性方程求解,以获得稳定的数值解。

通过直接分析法获得结构内力后,NIDA程序自动进行了截面分类检查和截面承载力计算,得到极限荷载组合工况下的应力比 ϕ 散点热度图如图6所示,应力比云图如图7a)所示。由图6可知, ϕ 最大值为0.993,平均值为0.309;计算得到 $\phi > 0.6$ 的构件占总构件数量的12.4%,其分布位置如图7b)所示。标准荷载组合工况下计算所得的变形如图7c)所示,楼梯最大竖向位移0.348 m $< 11.5\text{ m}/200 = 0.575\text{ m}$,满足结构挠度设计要求。由图4与图7可知,采用直接分析法计算时,外侧箱梁的最大应力比与最大竖向位移依然比内侧箱梁的相应值更大。

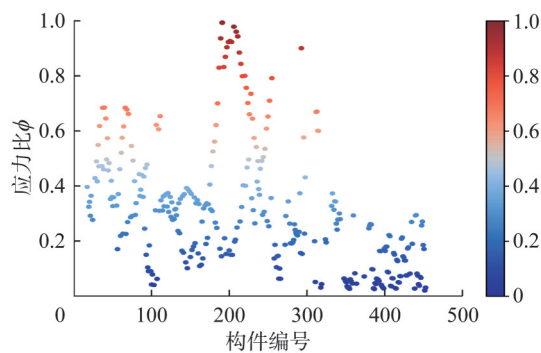


图6 构件应力比散点热度图(直接分析法)

Fig. 6 Scatter plot heatmap of the stress ratio of components (direct analysis method)

2.3 两种分析方法的对比

在两种分析方法下,钢螺旋楼梯结构的应力比与最大竖向位移值存在一定差异,如表2所示。可以看出,采用直接分析法(二阶 $P-\Delta-\delta$ 弹性分析)计算得到的构件应力比平均值、最大值,以及 $\phi > 0.6$ 的构件比例分别比一阶线性分析结果高33.4%、14.5%和55.6%。而直接分析法下的最大位移比一阶线性分析法下的最大位移高5%。对比图4b)与图7b)中 $\phi > 0.6$ 构件的分布位置可知,直接分析法与

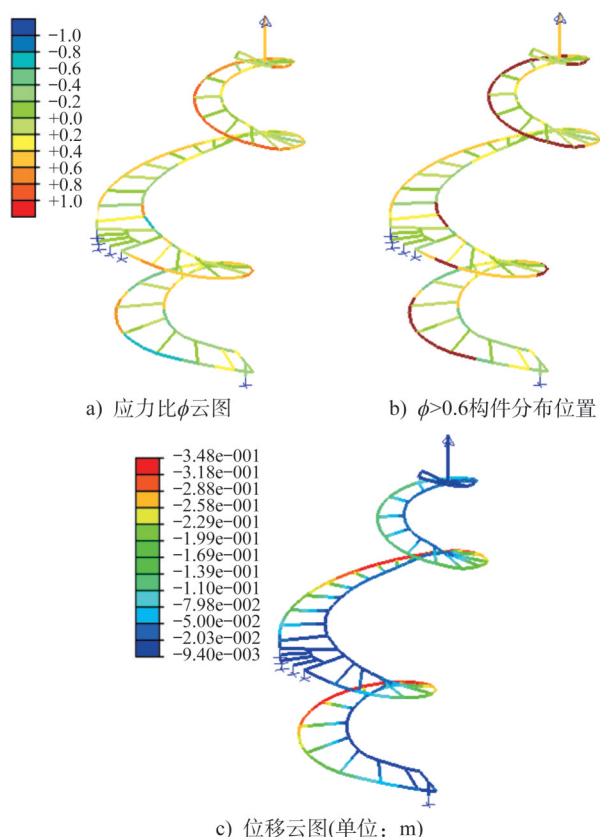


图7 应力比及位移云图(直接分析法)

Fig. 7 Stress ratio and displacement contours (direct analysis method)

一阶线性分析所得结果相似,多数构件分布在外侧箱梁上,但直接分析法的构件分布范围更大,且数量更多。

表2 一阶线性分析与直接分析法结果对比

Table 2 Comparison of the results between first-order linear analysis and direct analysis method

分析方法	ϕ 最大值	ϕ 平均值	$\phi > 0.6$ 的构件比例/%	最大竖向位移/m
一阶线性分析	0.652	0.264	5.5	0.336
直接分析法	0.993	0.309	12.4	0.348

由以上分析可知:(1)无论是一阶线性分析还是直接分析法,最大应力比与最大竖向位移均发生在外侧箱梁跨中处,应力比大于0.6的构件也同样更多分布在外侧箱梁上,说明外侧梯梁较内侧梯梁受力更加明显,竖向变形也明显大于内侧梯梁。这是由于构件受力状态下,外侧箱梁的偏心效应比内侧箱梁的偏心效应更大,结构响应更为明显;(2)考虑结构整体与构件初始缺陷的直接分析法计算所得结构内力与变形更大,说明采用直接分析法可对钢螺旋楼梯结构进行更为保守的受力分析,同时不可忽略初始缺陷对结构的影响。

3 不同活荷载分布模式的影响

在本项目中,活荷载主要来源于人流,其设计值应依据相关规范确定。鉴于人流分布的随机性和不确定性,必须考虑到结构特性,并充分预设各种可能的最不利荷载分布情况,以确保整体结构的安全性。因此,在设计阶段假设了多种不同的、对结构可能产生不利影响的活荷载分布情况,并采用直接分析法对楼梯的内力和稳定性进行了综合评估。

3.1 工况设置与荷载组合

给出了10种基本荷载工况,如表3所示。其中活荷载扇形分布俯视图如图8所示,各活荷载分布如图9所示。

表3 钢螺旋楼梯结构基本荷载工况

Table 3 Basic load cases of steel spiral staircase

荷载简称	荷载说明
DL	结构自重、其他恒荷载
LL0	满布竖向活荷载
LL1	分布在踏板1.1 m高度以上的水平活荷载
LL1L	分布在楼梯左侧的竖向与水平活荷载(图9a))
LL1R	分布在楼梯右侧的竖向与水平活荷载(图9b))
LLP1	分布在扇形区域1的竖向活荷载(3F~5F,图9c))
LLP2	分布在扇形区域2的竖向活荷载(3F~5F,图9d))
LLP3	分布在扇形区域3的竖向活荷载(3F~5F,图9e))
LLP4	分布在扇形区域4的竖向活荷载(3F~5F,图9f))

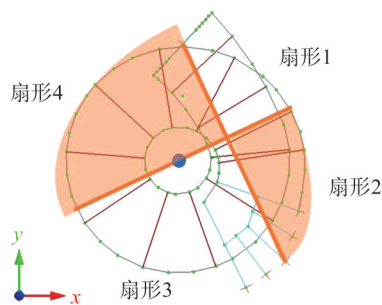


图8 活荷载扇形分布俯视图

Fig. 8 Top view of the live load sector distribution

3.2 不同活荷载分布模式下的内力与稳定性分析

本项目按荷载规范^[15]相关规定对表3的荷载工况进行荷载组合,并采用NIDA软件对钢螺旋楼梯结构进行基于直接分析法的分析与设计,其中采用“1.4×恒荷载+1.6×活荷载”荷载组合进行承载力和稳定性验算,采用“1.0×恒荷载+1.0×活荷载”荷载组合进行变形验算。荷载组合如表4所示,分为4组。第1组为考虑了半侧分布的荷载组合,第2组为单扇形活荷载分布模式,第3组

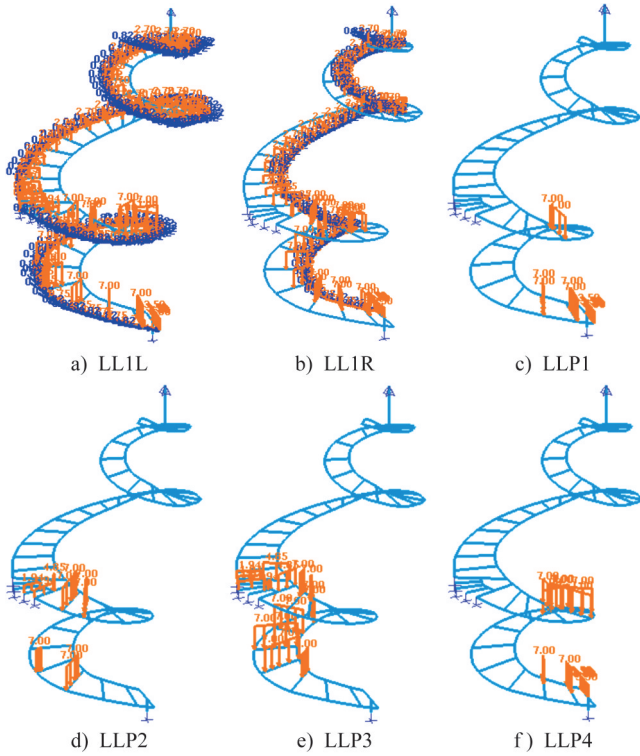


图9 活荷载可能分布图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)

Fig. 9 Possible distribution of live loads (unit: $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)

为2种扇形活荷载相互组合的分布模式,第4组为3种扇形活荷载相互组合的分布模式;当进行承载力和稳定性验算时,表4中系数 c_1 和 c_2 分别取为 1.4 和 1.6;当进行变形验算时, c_1 和 c_2 均取为 1.0。

4组活荷载分布模式下结构的最大应力比与应力比大于0.6的构件比例如表5所示,产生的最大竖向位移如图10所示,采用式(1)计算。

$$D_{\max} = \max(D_{i1} - D_{i2}) \quad (3)$$

式中: D_{\max} 为最大竖向位移; D_{i1} 为第 i 个节点的最终竖向位移; D_{i2} 为第 i 个节点在自重与恒荷载作用下的位移。

表5中第1组对比的是楼梯在全跨、左半侧、右半侧3种活荷载分布模式下的计算结果,可以看出,活荷载全跨分布模式下得到的 ϕ 最大值与 $\phi > 0.6$ 的构件比例最大;同为半侧活荷载分布模式,左半侧活荷载分布模式下得到的 ϕ 最大值与 $\phi > 0.6$ 的构件比例分别为右半侧活荷载分布模式下相应值的 1.06 倍与 1.47 倍。同时,由图10可知,活荷载全跨分布模式下的位移为 43.60 mm,是左半侧活荷载分布模式下相应值的 1.34 倍,右半侧活荷载分布模式下相应值的 3.70 倍;左半侧活荷载分布模式下的最大竖向位移为 32.35 mm,是右半侧活荷载分布模式下相应值的 2.75 倍。由分析可知,活荷载全跨分布模式对结构最不利,而与右半侧活荷载分布模式相比,楼梯对左半侧活荷载分布更敏感。

表5中第2~4组对比的是楼梯各扇形组合活荷载分

表4 考虑各活荷载布置的荷载组合

Table 4 Load combinations considering various live load layouts

分组	组合编号	荷载组合
第1组	1	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{L0} + L_{L1})$
	2	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot L_{L1L}$
	3	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot L_{L1R}$
第2组	4	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP1} + L_{L1})$
	5	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP2} + L_{L1})$
	6	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP3} + L_{L1})$
	7	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP4} + L_{L1})$
第3组	8	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP12} + L_{L1})$
	9	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP13} + L_{L1})$
	10	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP14} + L_{L1})$
	11	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP23} + L_{L1})$
	12	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP24} + L_{L1})$
	13	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP34} + L_{L1})$
第4组	14	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP123} + L_{L1})$
	15	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP134} + L_{L1})$
	16	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP124} + L_{L1})$
	17	$c_1 \cdot L_D + c_2 \cdot (L_{LP234} + L_{L1})$

注: L_D 为恒荷载; L_{L0} 为满布竖向活荷载; L_{L1} 为踏板 1.1 m 高度以上水平活荷载; L_{L1L} 、 L_{L1R} 分别为楼梯左、右侧竖向与水平活荷载; $L_{LP1} \sim L_{LP4}$ 分别为扇形区域 1~4 的竖向活荷载,其余参数含义类似。

布下的计算结果。由图10可知,第6、7号荷载组合的最大竖向位移比第4、5号荷载组合的相应值大,说明在单扇形荷载分布模式下,活荷载分布在扇形区域3和4更危险。而从图10中第3组的对比可知,第13号荷载组合产生了最大的竖向位移,为 39.48 mm,第8号荷载组合产生了最小的竖向位移,而第9~13号荷载组合的最大竖向位移均比第8号荷载组合的相应值大2倍以上,说明在扇形荷载分布两两组合的情况下,荷载同时分布在扇形3和4时对结构最不利,而当荷载组合中包含扇形区域3和4的荷载时,结构均能产生较大的变形。从图10中第4组的荷载组合分析可知,第16、17号荷载组合产生的最大竖向位移相似,分别为 41.35 mm 和 40.63 mm,且均比第14和15号荷载组合的相应值大,说明在3种扇形区域荷载分布组合下,荷载同时分布在扇形区域1、2、4与扇形区域1、3、4时对结构更不利。由以上分析可知,当进行扇形荷载分布模式分析时,活荷载落在扇形区域3和4时结构更容易出现较大竖向位移,这是因为扇形区域3和4位于钢螺旋楼梯结构 3F~5F 区间的跨中区域,结构会产生更大的最大竖向位移。

而由表5第2~4组数据对比可知,各组间不同荷载

表5 不同活荷载分布模式下的应力比对比

Table 5 Comparison of stress ratios under different live load distribution modes

分组	组合编号	ϕ 最大值	$\phi > 0.6$ 的构件比例/%
第1组	1	0.993	13.150
	2	0.935	10.398
	3	0.878	7.034
第2组	4	0.823	6.728
	5	0.823	6.728
	6	0.826	6.728
	7	0.826	6.728
第3组	8	0.834	6.728
	9	0.837	7.951
	10	0.837	7.339
	11	0.838	8.257
	12	0.837	7.951
	13	0.834	6.728
第4组	14	0.826	9.174
	15	0.829	9.174
	16	0.829	8.869
	17	0.828	8.869

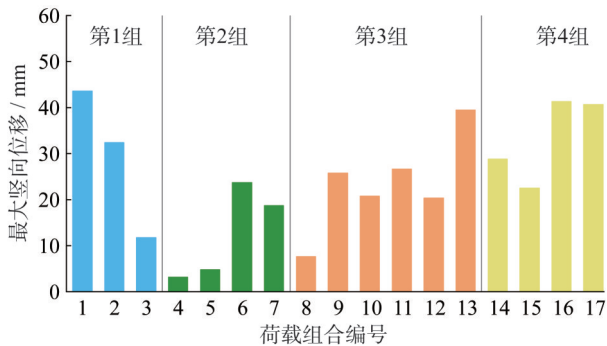


图10 各组工况下最大竖向位移

Fig. 10 Maximum vertical displacements under various load combinations

组合的 ϕ 最大值与 $\phi > 0.6$ 的构件比例差异不大,说明各组中不同的扇形活荷载组合对该工程中楼梯的承载力影响相似。

4 不同顶部支座条件的影响

文献[5,17]表明,钢螺旋楼梯结构不同的支座情况对结构影响较大,故对该项目的楼梯支座条件采取两种形式进行对比分析:楼梯顶部支座为铰接,如图11a)所示;楼梯顶部支座为固接,如图11b)所示。荷载组合下两

种支座的竖向位移与基本荷载组合下二者的 ϕ 值对比如表6所示,顶部支座反力对比如表7所示。

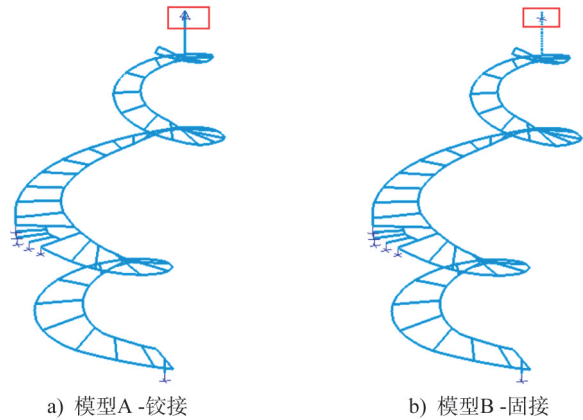


图11 楼梯顶部不同支座条件下的模型

Fig. 11 Models of staircases with different support conditions at the top

由表6可知,当结构顶部支座条件由铰接转变为固接时,结构的 ϕ 最大值、 ϕ 平均值以及 $\phi > 0.6$ 的构件比例都减小了,但最大竖向位移差距不大。可见,该项目中钢螺旋楼梯结构的顶部支座刚度对结构承载力有显著影响,但由于该楼梯纵向刚度较大,不同支座条件对最大竖向位移的影响较小。

表6 不同支座条件对应力比和竖向位移的影响

Table 6 Influences of different support conditions on the stress ratio and vertical displacement

模型编号	ϕ 最大值	ϕ 平均值	$\phi > 0.6$ 的构件比例/%	最大竖向位移/m
A	0.993	0.309	12.4	0.348
B	0.800	0.267	8.6	0.344

而由表7对比可知,顶部支座固接与铰接相比,支座处产生的反力较小,但会产生较大的弯矩,尤其是二阶效应下,顶部支座处的 M_x 与 M_y 会更大,容易导致顶部支座处混凝土开裂。因主体混凝土结构已经设计和施工完毕,本楼梯为附属结构,且考虑到顶部支座铰接产生的最大应力比与最大竖向位移均满足规范要求,故实际工程中最终采用该支座形式,构造上锚固螺栓尽量居中。

5 结论

(1) 直接分析法在整体受力分析中同时考虑了结构和构件初始缺陷以及结构变形的影响,比传统线性分析更能真实反映钢螺旋楼梯结构在实际荷载作用下的响应。本项目中直接分析法预测得到的最大应力比、平均应力比以及最大竖向位移值均有所增加,表明在设计此

表7 不同支座条件对顶部反力的影响

Table 7 Influences of different support conditions on top reaction forces

分析方法	模型编号	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$
一阶线性分析	A	124.50	74.24	443.81	0	0	0
	B	98.54	52.96	460.36	-177.16	137.36	-54.64
直接分析法	A	127.71	73.62	456.65	0	0	0
	B	89.88	48.38	477.79	-221.02	212.63	49.15

类结构时,二阶效应不应被忽视。

(2) 当考虑钢螺旋楼梯结构活荷载半侧分布时,活荷载左半侧分布为更不利工况,而当考虑活荷载扇形分布时,特别是活荷载分布在楼梯的扇形3、4区域(即跨中区域)时,会产生更大的竖向位移,在计算时需要重点关注这3种分布模式。

(3) 钢螺旋楼梯结构顶部支座的刚度越大,结构产生的应力比越小,而二阶效应会导致支座的二阶弯矩增大。在设计钢结构时,建议实际支座设计应考虑支承结构的承载能力。

(4) 通过对钢螺旋楼梯结构进行一阶线性分析和直接分析法计算,发现结构的外侧箱梁较内侧箱梁具有更大的应力比与竖向位移,故在进行钢螺旋楼梯结构设计时可适当增大外侧箱梁刚度。

本文主要研究了钢螺旋楼梯结构的受力性能和整体稳定性,人致舒适度问题将在后续工作中详述。

参考文献:

- [1] 陈浩恩,柳锋,彭浩.空间钢结构螺旋楼梯设计与分析[J].钢结构,2017,32(12):52-56.DOI:10.13206/j.gjg201712010. CHEN Haoen, LIU Feng, PENG Hao. Design and analysis of spiral staircase in space steel structure[J]. Steel Construction, 2017, 32(12): 52-56. DOI: 10.13206/j. gjg201712010. (in Chinese)
- [2] 彭航,朱亮.螺旋钢结构楼梯设计及舒适度分析[J].钢结构,2016,31(4):43-46.DOI:10.13206/j.gjg201604012. PENG Hang, ZHU Liang. Design and comfort analysis of steel spiral stairs[J]. Steel Construction, 2016, 31(4): 43-46. DOI:10.13206/j.gjg201604012. (in Chinese)
- [3] 孙修礼.螺旋钢梯的结构分析[J].钢结构,2008,23(4):37-39.DOI:10.3969/j.issn.1007-9963.2008.04.009. SUN Xiuli. Structural analysis of steel helical staircase by ansys [J]. Steel Construction, 2008, 23(4): 37-39. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9963.2008.04.009. (in Chinese)
- [4] CHEN T, HE H D. Finite element analysis of a steel spiral staircase with multiple supports [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255/256/257/258/259/260:1964-1967. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.255-260.1964.
- [5] 钟建敏.钢结构螺旋楼梯结构计算分析与设计[J].建筑结构,2017,47(增刊1):819-823.DOI:10.19701/j.jzjg.2017.s1.179. ZHONG Jianmin. Structural analysis and design of steel spiral staircase [J]. Building Structure, 2017, 47(Suppl.1): 819-823. DOI:10.19701/j.jzjg.2017.s1.179. (in Chinese)
- [6] 金蕾,李晓森.钢结构螺旋楼梯的设计与分析研究[J].建筑结构,2022,52(增刊2):1212-1218. DOI:10.19701/j.jzjg.22S2047. JIN Lei, LI Xiaosen. Design and analysis of the steel spiral staircase [J]. Building Structure, 2022, 52(Suppl. 2): 1212-1218. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S2047. (in Chinese)
- [7] 钱籽祺,沙丽荣,王秀丽.钢结构螺旋楼梯的有限元分析与优化设计[J].吉林建筑大学学报,2022,39(5):1-8. DOI:10.3969/j.issn.1009-0185.2022.05.001. QIAN Ziqi, SHA Lirong, WANG Xiuli. Finite element analysis and optimal design of steel spiral stair [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2022, 39(5): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0185.2022.05.001. (in Chinese)
- [8] 王志彬,罗毅,吴琴锋,等.基于Dynamo+SAP2000螺旋楼梯壳元计算模型参数化建模[J].建筑结构,2023,53(增刊1):1453-1458. DOI:10.19701/j.jzjg.23S1541. WEN Zhibin, LUO Yi, WU Qinfeng, et al. Parametric modeling of spiral steel stairs shell element calculation model based on Dynamo+SAP2000 [J]. Building Structure, 2023, 53(Suppl. 1): 1453-1458. DOI: 10.19701/j. jzjg. 23S1541. (in Chinese)
- [9] 李星乾,张锡治,章少华,等.树状柱支撑曲面单层网壳结构受力性能的直接分析法研究[J].建筑结构学报,2022,43(增刊1):20-30. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0003. LI Xingqian, ZHANG Xizhi, ZHANG Shaohua, et al. Research on direct analysis method for structural behavior of dendritic column-supported single-layer curved surface reticulated shells [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(Suppl.1): 20-30. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0003. (in Chinese)
- [10] 刘耀鹏,杜左雷,陈绍礼.直接分析法在抗震设计中的运用[J].土木工程学报,2018,51(11):70-76. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2018.11.005. LIU Yaopeng, DU Zuolei, Chan Siulai. Application of direct analysis method in performance-based seismic design [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(11): 70-76. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2018.11.005. (in Chinese)

- [11] 丁智霞,刘耀鹏,杜左雷,等.直接分析法在连续倒塌中的应用[J].钢结构(中英文),2020,35(2):13-28.DOI:10.13206/j.gjgSE20010801.
DING Zhixia, LIU Yaopeng, DU Zuolei, et al. The application of direct analysis method in progressive collapse [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2020, 35(2): 13-28. DOI: 10.13206/j.gjgSE20010801. (in Chinese)
- [12] 汪明,王立军,余海群,等.直接分析法在空间结构设计中的应用[J].施工技术,2016,45(增刊1):373-378.
WANG Ming, WANG Lijun, YU Haiqun, et al. Application of the direct analysis method for spatial structures [J]. Construction Technology, 2016, 45 (Suppl. 1) : 373-378. (in Chinese)
- [13] 高鸣,田金.直接分析法在异形钢结构设计中的应用及其与计算长度系数法的对比[J].建筑结构,2021,51(19):121-125.DOI:10.19701/j.jzjg.2021.19.022.
GAO Ming, TIAN Jin. Application of direct analysis method in designing irregular shaped steel structures and its comparison to effective length factor method [J]. Building Structure, 2021, 51(19): 121-125. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.19.022. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [15] Buildings Department. Code of Practice for Dead and Imposed Loads [S]. HKSAR: Buildings Department, 2011.
- [16] Buildings Department. Code of Practice for the Structural Use of Steel [S]. HKSAR: Buildings Department, 2011.
- [17] 陈德银,赖克,郑腾虎.某工程钢螺旋楼梯结构重难点分析与设计[J].建筑结构,2023,53(7):78-84,124. DOI: 10.19701/j.jzjg.SADI2316.
CHEN Deyin, LAI Ke, ZHENG Tenghu. Design and analysis on key and difficult points of spiral stair in a project [J]. Building Structure, 2023, 53(7): 78-84, 124. DOI: 10.19701/j.jzjg.SADI2316. (in Chinese)

.....

(上接第108页)

- [11] BOGGS P C, GASPARINI D A. Lateral stiffness of core and outrigger systems [J]. Engineering Journal, 1983, 20(4) : 172-180. DOI: 10.62913/engj.v20i4.400.
- [12] 彭磊.框架-核心筒伸臂结构伸臂位置的对比分析[D].邯郸:河北工程大学,2017.
PENG Lei. Comparative analysis of frame core tube structure with outrigger outrigger position [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)