

弧形钢箱梁楼梯设计与分析

段嘉琪 尹丽丹

中国中元国际工程有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8832

[摘要] 结合工程实例对一种大跨度弧形箱型截面钢梯梁进行分析与设计,介绍了基本设计参数,根据梯梁两端实际支撑条件选择合适的边界条件,分别对结构周期、变形、承载力、非线性极限承载力进行分析,以确保设计满足规范要求;根据结果,对梯梁端部支座节点的细部构造进行设计,使构造满足设计假定;通过有限元建模分析进一步验证结构的受力性能,结果显示在设计工况及活荷载不利分布等条件下的钢梁强度及稳定承载力满足要求。通过多方面分析验证了弧形钢梯梁结构设计的合理性,可作为类似工程项目的设计参考。

[关键词] 弧形钢梁; 屈曲分析; 支座节点设计; 有限元分析

Design and Analysis of Curved Box-Section Steel Beam of Stairs

Duan Jiaqi Yin Lidan

China IPPR International Engineering Corporation Limited

[Abstract] Based on an engineering project, this paper analyzes and designs a large-span curved box-section steel beam of stairs with introducing the basic design parameters and selecting appropriate boundary conditions according to the actual support conditions. And the structural period, deformation, load-bearing capacity, and nonlinear ultimate load-bearing capacity are examined to ensure compliance with code requirements. Based on the results, detailed design of the support nodes is carried out to meet the design assumptions. Further verification of the structural mechanical performance is conducted through finite element modeling, showing that the strength and stability under design conditions and uneven distribution of live loads also meet the requirements. A comprehensive analysis confirms the rationality of the design of curved steel beam, which can serve as a reference for similar projects.

[Key words] curved steel beam; buckling analysis; support node design; finite element analysis;

1 引言

现代建筑中的楼梯在原有交通功能基础上被设计师赋予了更多创新。由传统梯梁梯柱+梯板的方形规则楼梯演变成造型自由多样的不规则形体。弧形、环形楼梯层出不穷,传统的结构简化计算方法不再适用,楼梯需要按独立结构进行建模分析。常用软件对于这些异型结构是否能准确计算,计算结果如

何评价,都是结构工程师需要仔细思考的问题。

文献[1]~[3]对工程中不同造型、不同截面弧形钢梁的设计、施工安装等不同阶段问题进行探讨。本文结合工程实际案例,针对弧形钢箱梁楼梯设计,结合实际边界条件,选取合理的简化模型进行设计,并通过有限元分析进行验证,确保设计结果的可靠性。

2 工程概况及方案

本项目采用旋转楼梯将室外地坪与二层楼面相连,起步段存在混凝土墙体可作为弧形旋转楼梯的悬挑梁支撑边界,可按普通梁板体系设计;楼梯末尾段根据建筑效果取消混凝土墙体,仅在两端设置框架柱及悬挑梁或框架梁,中间接近14m长度弧形梯梁无支撑条件。主要设计重难点即末段大跨度弧形梯段的计算分析。

此部分弧形楼梯旋转半径7m,旋转高度1.7m,单一梯段旋转角度达115°,两端分别支撑在框架梁柱或悬挑梁上,如图1。由于旋转楼梯弧长近14m,考虑跨度及梯梁受扭的不利影响,采用箱型钢梁方案,钢梁即为楼梯踏步的主体结构,以封闭式箱型截面抵抗扭转效应。钢箱梁高500mm、长1800mm,在中间增加一道竖向隔板,减小钢板跨度以提高承载力。钢梁采用Q355B级钢板焊接制作,钢板厚度统一为30mm。由于梯梁两端支承框架梁柱均为钢筋混凝土结构,因此弧形钢梁端部与混凝土结构的连接节点同样需要重点设计。

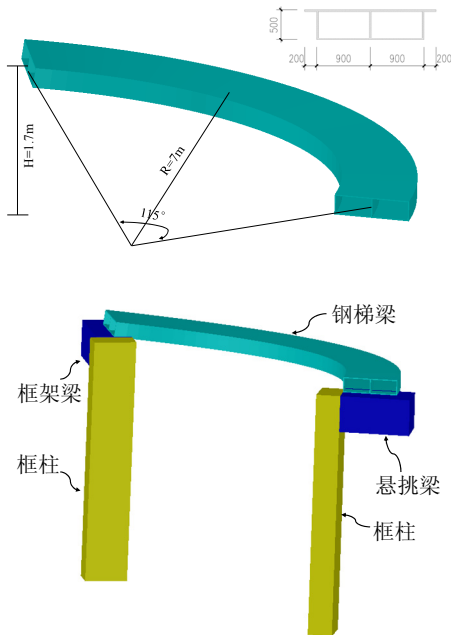


图1 钢楼梯结构概况及边界条件

3 设计参数

本工程设计使用年限50年,建筑结构安全等级为二级。结构抗震设防烈度6度,抗震设防分类为标准设防类,场地类别为II类,设计地震分组第一组,地基土不液化。考虑室外楼梯面层较厚及后期吊挂因素,恒荷载取 3.5kN/m^2 ;楼梯活荷载 3.5kN/m^2 。由于室外钢结构受温度荷载影响大,应谨慎取值。考虑楼梯钢结构部分较少,现场通过合理安排施工周期可避开当地极端高、低温时段,因此升降温荷载取 $\pm 15^\circ\text{C}$ 。

由于钢梁两端以混凝土梁为支座,为避免支座梁的面外受扭破坏,释放钢梯梁对应方向的弯矩后约束其余自由度。

4 建模及计算结果

采用SAP2000设计软件进行分析,建模时考虑适当简化。钢梁下端设悬挑梁及封边梁;上端设两端刚接的混凝土框架;弧形梯段钢梁采用框架单元类型分多段模拟,中间加隔板的钢箱梁采用自定义截面输入;钢梁两端与混凝土构件连接部位释放杆端平面内弯矩。

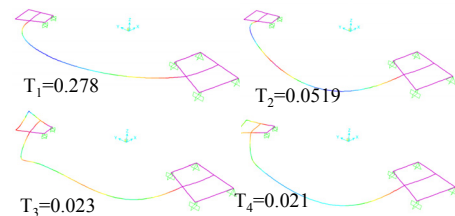


图2 结构前4阶周期振型图

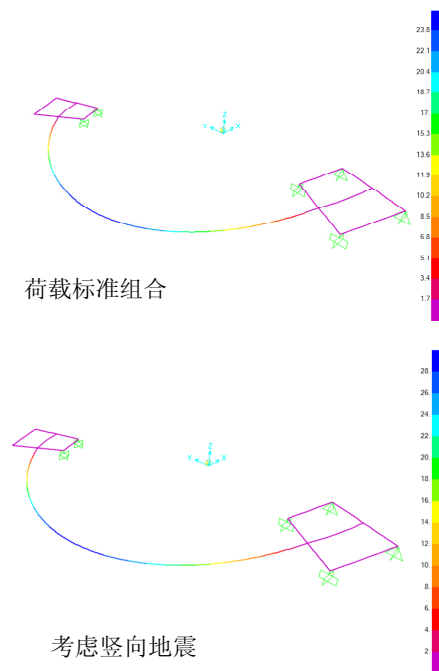


图3 不同工况下结构变形

计算所得结构周期阵型如图2,第一阶周期0.278s表明钢梁整体刚度较大,前两阶阵型均为钢梁自身的振动;第三阶周期开始出现下端混凝土悬挑梁与钢梁的复合振动特征,表明悬挑梁自身并未成为钢梯梁的理想支座,设计时应考虑并加强此处的混凝土构件设计。

由图3弧形钢梯梁在标准组合下的最大竖向位移23.8mm,变形量约为跨度的1/588,满足规范梯梁挠度1/250限值。考虑竖向地震作用工况下的最大竖向位移为28mm,同样满足要求。虽然钢梁高度500mm仅为跨度的1/28,但较大的梁宽及中

间加劲隔板的设置提高了钢梁整体刚度。

为进一步验证结构可靠性,对弧形钢梯梁进行非线性屈曲分析。结构在“恒+活”荷载下按弹性全过程加载计算所得极限承载力与施加荷载的比值 $K=639$, 钢梁整体稳定承载力储备充足。

5 节点设计

经验算,弧形钢梁应力比均小于 0.5, 截面承载力满足设计要求。本项目大跨弧形钢梁两端与混凝土结构相连, 此处节点设计应确保钢梁所受剪力、弯矩及扭矩可顺利传递至混凝土梁柱。如图 4, 设计时混凝土梁顶标高应在钢梯梁下方, 并使钢梁向内延伸与框梁重叠区至少 700mm; 通过混凝土梁上预埋件板与钢梁重合区焊接。由于钢梁跨度近 14m, 端部 700mm 长度范围内的焊接无法满足弯矩的有效传递, 在钢箱梁端部四周按间隔 200mm 设置肋板, 分别将其两端与钢梁四周及混凝土梁预埋板连接。为防止钢梁在混凝土梁支座端部受压局部屈曲, 在钢梁内部增设加劲板, 并在外侧设三角形肋板进行加强。最后, 为平衡弧形钢梁传递的弯矩, 应在混凝土梁连接梯梁的对侧设置混凝土次梁或加厚的混凝土加腋楼板, 以保证梯梁两端支座处混凝土梁的受力平衡。

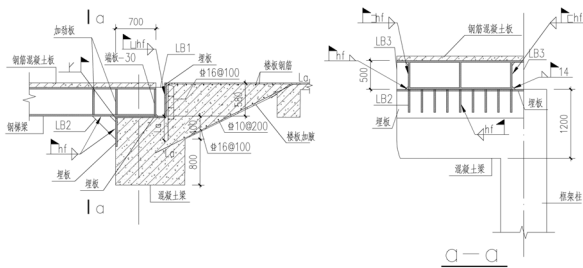


图4 梯梁端部连接节点构造

6 有限元分析

由于钢梁采用非标准截面, 常规软件对其截面属性复核及设计过程存在一定误差, 且现有规范对大跨弧形钢梁在重力荷载下产生的扭矩尚无明确计算方法。因此为详细了解钢梁的受力过程、判断前述设计结果是否准确, 采用有限元分析方法进行补充建模计算。

弧形钢箱梁采用实体单元建模, Q355B 级钢材属性采用双折线模型, 模型边界条件为释放垂直杆件轴向方向弯矩 M_1 , 荷载为沿钢梁上表面施加 (1.3 恒+1.5 活) 组合的均布面荷载, 同时钢梁全截面施加 $\pm 15^\circ\text{C}$ 温度场, 沿截面进行适当剖分后采用四面体网格划分模型以提高计算效率。

计算结果如图 5, 考虑温度及竖向荷载工况下弧形钢梁最大截面应力为 341MPa, 构件整体应力分布较均匀且应力较小、尚未达到屈服强度; 弧形梯梁跨中外侧变形最大, 并向内侧和

支座两端减小, 最大变形量 45.7mm, 约为跨度的 1/306。分析结果说明, 弧形钢梯梁在设计工况下截面尚未屈服、整体变形满足规范要求且未出现局部屈曲, 构件强度、稳定承载力满足要求且具备一定余量。

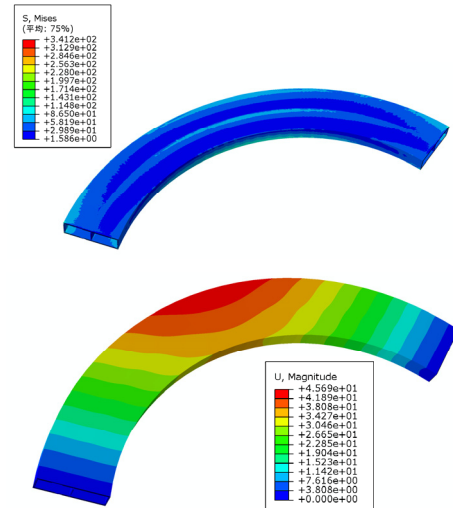


图5 截面应力及变形分布

由于梯梁截面宽度 1.8m, 实际使用中存在不均匀分布荷载情况, 因此需在设计中补充分析。考虑沿梯梁全跨、沿钢梁截面半幅布置活荷载; 沿钢梁全截面、沿梯梁半跨两种工况的活荷载不利布置工况。结果显示, 由于荷载分布面积减小, 梯梁截面的最大应力 232MPa、最大变形 28.2mm, 均比全跨荷载工况时减小。同时, 弧形钢梁未出现由于荷载不均匀分布产生的局部屈曲或整体失稳, 说明梯梁截面刚度较大, 荷载不均匀分布产生的附加扭矩未对截面产生明显影响。

7 结论

本文通过设计软件计算及有限元补充分析, 验证了大跨度弧形钢结构箱型梯梁设计的可行性; 梳理了荷载取值及结构周期、位移、极限承载力等计算结果; 根据项目实际选用合理的边界条件并选择对应的支座节点构造; 采用有限元方法可作为非常规结构体系设计的补充验证手段。多方面计算与分析表明, 文中采用的结构构件及构造等均满足设计要求且具有一定的冗余度, 大跨度弧形钢箱梁的设计可靠性满足要求。

[参考文献]

- [1] 李小龙. 变曲率弧形梁及旋转式楼梯施工技术[J]. 建筑机械化, 2024, 45(4): 97-99.
- [2] 王国梁, 王继争. 某室内大跨旋转钢楼梯结构设计分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(5): 159-161.
- [3] 詹其章. 椭圆形钢结构弧形钢梁分段吊装拼装技术[J]. 建筑工程技术与设计, 2021(28): 133-134.