

既有钢结构框架加层分析与节点设计

毕铁键

北京燕山玉龙石化工程股份有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i12.7459

[摘要] 本文探讨了高层钢结构复式公寓加层改造的设计与分析，重点在于既有钢筋混凝土框架结构的钢结构加层的分析。首先，研究了国内外的研究现状和既有建筑轻钢整层结构的特点，随后分析了钢筋混凝土框架结构钢结构加层中的问题，并提出了具体的解决方案。通过计算荷载的传递、近似计算反弯点法、改进反弯点法以及建立有限元模型和反应谱分析，验证了加层改造方案的可行性和安全性。结果表明，采用钢框架+支撑+内藏钢板剪力墙体系在抗震性能和结构稳定性方面表现出色，为未来类似工程提供了参考。

[关键词] 高层钢结构；加层改造；有限元模型；抗震分析；结构稳定性

Application and layer analysis and node design of the existing steel structure frame

Bi Tiejian

Beijing Yanshan Yulong Petrochemical Engineering Co., LTD

[Abstract] This paper discusses the design and analysis of the transformation of high-rise steel structure duplex apartment, focusing on the analysis of the existing reinforced concrete frame structure. Firstly, the research situation at home and abroad and the characteristics of the existing building light steel whole layer structure are studied, and then the problems in the steel structure of reinforced concrete frame structure are analyzed, and put forward specific solutions. The feasibility and safety of the adding modification method are verified through the finite element model and reaction spectrum analysis. The results show that the steel frame + support + inner reservoir steel plate shear wall system performs excellent in seismic performance and structural stability, which provides a reference for similar projects in the future.

[Key words] high-rise steel structure; laminate reconstruction; finite element model; seismic analysis; structural stability

引言

随着城市化进程的不断推进，既有建筑的改造和加层成为了一项重要的研究课题。国内外在这一领域的研究和实践表明，通过合理的技术手段和科学的管理模式，可以有效提升既有建筑的功能性和安全性。本研究以高层钢结构复式公寓为例，探讨了既有钢筋混凝土框架结构的钢结构加层改造设计与分析，旨在为未来类似工程提供参考和借鉴。

1 国内外的研究现状

近年来，国内外在既有建筑改造和加层方面的研究取得了显著进展。国外方面，欧美发达国家在建筑改造领域积累了丰富的经验。以美国和德国为代表的国家，采用先进的技术手段和科学的管理模式，对既有建筑的改造进行了大量的研究和实践。例如，美国在建筑加层技术方面，采用了轻钢结构和预制构件相结合的方法，有效地提升了建筑的承载能力和抗震性能。德国则在既有建筑的节能改造方面，采用了新型材料和技术手段，提高了建筑的能源利用效率。

国内方面，随着城市化进程的加快，既有建筑改造和加层

成为了一项重要的研究课题。我国在既有建筑轻钢结构加层和钢筋混凝土框架结构加层方面，开展了大量的理论研究和工程实践。近年来，国内的研究主要集中在结构加固技术、施工工艺优化以及结构性能评估等方面。例如，清华大学、同济大学等高校在轻钢结构加层技术方面取得了重要进展，通过数值模拟和试验研究，提出了一系列适用于我国既有建筑的加层方案。此外，国内的建筑设计和施工企业也在实践中不断探索，积累了丰富的工程经验。

2 既有建筑轻钢整层结构的特点

轻钢结构作为一种新型的建筑结构形式，具有重量轻、强度高、施工快捷等优点，广泛应用于既有建筑的加层改造中。既有建筑轻钢整层结构具有以下几个主要特点：

首先，轻钢结构的自重较轻，相较于传统的钢筋混凝土结构，其自重仅为后者的1/3到1/5。这一特点使得轻钢结构在既有建筑加层改造中具有显著的优势，能够有效减少对原有结构的荷载，提高建筑的安全性。其次，轻钢结构具有良好的抗震性能。轻钢结构的柔性较好，能够在地震作用下通过变形来

吸收和分散能量，从而减小结构的破坏。这一特点使得轻钢结构在震害多发地区的建筑加固改造中具有广泛的应用前景。

第三，轻钢结构的施工周期短。由于轻钢构件大多在工厂预制，现场仅需进行装配和连接，施工速度较快。相比传统的钢筋混凝土结构，轻钢结构的施工周期可以缩短 30%到 50%，有效减少了施工对既有建筑的影响。此外，轻钢结构具有较好的环保性能。轻钢构件在制作过程中，采用高效、低耗的生产工艺，减少了能源和资源的消耗。同时，轻钢结构在使用过程中，能够实现材料的循环利用和再生，符合绿色建筑的理念。

3 既有钢筋混凝土框架结构钢结构加固中的问题

既有钢筋混凝土框架结构的钢结构加固改造，尽管具有重量轻、施工快捷等优点，但也面临荷载评估、节点连接、施工组织、抗震性能和防火性能等多方面的问题和挑战。在实际操作中，需要结合具体情况，综合考虑各种因素，采取科学合理的措施，确保改造工程的顺利进行和建筑的安全性。

首先是荷载问题。既有建筑在设计时，通常没有考虑未来的加固需求，因此在进行加固改造时，需要对原有结构的承载能力进行详细的评估。如果原有结构不能满足加固后的荷载要求，可能需要进行结构加固或采取其他措施，以保证建筑的安全性。

其次是节点连接问题。钢结构加固需要与原有的钢筋混凝土框架结构进行可靠的连接，这就涉及到节点的设计和施工。由于钢结构和钢筋混凝土结构的力学性能和连接方式不同，如何实现两者之间的有效连接，是一个技术难题。如果连接设计不当，可能导致节点处的应力集中，影响结构的整体稳定性和安全性。

第三是施工问题。既有建筑加固施工通常是在建筑正常使用的情况下进行，这对施工组织和管理提出了较高的要求。施工过程中需要确保既有建筑的正常使用和安全，避免施工对建筑结构和功能的影响。此外，施工场地的限制和施工设备的选择也是需要考量的重要因素。此外，加固改造还可能涉及到建筑的抗震性能问题。加固后的建筑高度增加，重心上升，结构的抗震性能可能受到影响。因此，在进行钢结构加固改造时，需要对建筑的整体抗震性能进行重新评估和设计，确保其在地震作用下的安全性。

最后，钢结构加固改造还需要考虑建筑的防火性能。钢结构在高温下的力学性能会显著降低，因此在设计和施工过程中，需要采取有效的防火措施，如增加防火涂料或采取其他防火隔离措施，以提高钢结构的防火性能。

4 既有钢筋混凝土框架结构钢结构加固的分析

4.1 计算荷载的传递

在既有钢筋混凝土框架结构进行钢结构加固时，荷载的传递是关键问题之一。加固后的建筑荷载包括恒载和活载，需要通过钢结构有效传递到原有框架结构，再由框架结构传递至基础和地基。为了确保结构的安全性和稳定性，需要对各类荷载进行详细的计算和分析。

恒载主要包括钢结构自重、楼面荷载以及其他固定设备的荷载，这些荷载通过钢梁、钢柱等构件传递到钢筋混凝土框架的柱和墙体。活载则包括使用过程中产生的荷载，如人员活动、家具摆放等，这些荷载具有随机性和不确定性。在进行荷载计算时，需要根据建筑的使用功能和相关规范，合理确定各类荷载的标准值和组合。

传递路径的选择对于荷载计算的准确性至关重要。在钢结构加固设计中，应尽量选择合理的传力路径，使荷载均匀分布，避免局部过载。在设计过程中，需要对钢梁与混凝土梁的连接、钢柱与混凝土柱的连接等关键节点进行详细的计算和分析，确保节点的承载能力和稳定性。

4.2 近似计算——反弯点法

反弯点法是一种常用于框架结构分析的近似计算方法，特别适用于钢筋混凝土框架结构进行钢结构加固时的分析。该方法基于反弯点假定，即假设框架结构在某些特定点处弯矩为零，这些点即为反弯点。通过确定反弯点的位置，可以简化结构的计算过程，提高计算效率。

在反弯点法中，首先需要确定框架结构的反弯点位置。对于钢筋混凝土框架结构，反弯点通常位于梁跨度的三分之一处和柱高度的三分之一处。在此基础上，可以将框架结构简化为多个独立的子结构，通过求解每个子结构的内力和变形，得到整个框架结构的内力分布和变形情况。

反弯点法的优点在于计算简便，适用于初步设计和快速估算。但该方法也存在一定的局限性，主要在于反弯点位置的假定可能与实际情况存在差异，影响计算结果的准确性。因此，在实际工程中，反弯点法通常与其他精细化计算方法结合使用，以提高计算结果的可靠性。

4.3 改进反弯点法——D值法

D值法是一种对反弯点法的改进方法，旨在提高框架结构分析的准确性。D值法通过引入D值参数，对反弯点位置进行修正，使计算结果更接近实际情况。D值表示框架结构中梁或柱的刚度比，通过调整D值，可以更准确地确定反弯点的位置。

在D值法中，首先需要确定框架结构的初始反弯点位置，然后通过计算各构件的刚度比，修正反弯点的位置。具体计算过程中，需要考虑钢结构与混凝土结构的不同刚度特性，合理确定各构件的D值。修正后的反弯点位置，使得计算结果更为精确，提高了结构分析的可靠性。

D值法的优点在于能够更准确地反映结构的实际受力情况，特别适用于钢结构与混凝土结构结合的复杂框架。该方法在实际工程中应用广泛，尤其在既有建筑的钢结构加固设计中，能够有效提高设计的精度和安全性。

4.4 建立有限元模型

有限元模型是一种精细化的结构分析方法，通过将结构离散为有限数量的单元，对每个单元进行力学分析，得到整个结构的受力和变形情况。对于既有钢筋混凝土框架结构的钢结构加固，建立有限元模型可以全面分析结构的受力状态和变形特

性。

建立有限元模型的过程中，首先需要对结构进行几何建模，包括钢结构加层部分和原有混凝土框架部分。然后，根据材料特性和构件连接情况，定义单元类型和单元属性。对于钢结构部分，通常采用梁单元和柱单元，对于混凝土框架部分，采用壳单元或实体单元。

在模型建立完成后，通过施加荷载和边界条件，对结构进行静力分析和动力分析。静力分析主要包括恒载和活载的作用，动力分析则包括地震荷载和风荷载的作用。通过分析结果，可以得到结构的内力分布、变形情况和关键节点的应力应变状态，为结构设计和优化提供依据。

4.5 反应谱分析

在反应谱分析中，首先需要确定结构的动力特性，包括自振周期和阻尼比。然后，根据地震动特性，确定反应谱曲线，即不同振动周期下的地震加速度值。通过将反应谱曲线与结构的动力特性结合，得到结构在地震作用下的最大内力和变形。反应谱分析的优点在于能够快速评估结构的抗震性能，适用于各种复杂结构的地震响应分析。在既有建筑的钢结构加层设计中，通过反应谱分析，可以识别结构的薄弱环节，提出针对性的加固措施，提高结构的抗震能力和安全性。

5 实际案例应用

5.1 工程概况

本案例涉及一个占地面积2,757.80平方米的钢结构复式公寓项目，地下一层，地上十四层。地上1至4层为商业建筑，

4层以上为复式公寓。其平面尺寸为41.9米×27.2米，长宽比约1.5，高宽比约3.5。

5.2 结构体系

该项目的结构体系包括安全等级为二级，耐火等级一级，设防分类为丙类，设防烈度为8度，地震加速度为0.20，地震分组为第一组，场地类别为III类，特征周期为0.45秒。基本风压为0.40 kN/m²，基本雪压为0.35 kN/m²，地面粗糙度为B类，屋面荷载为0.5 kN/m²，商场楼面荷载为3.5 kN/m²，普通楼梯荷载为2.0 kN/m²，普通阳台荷载为2.5 kN/m²。

5.3 结构整体分析

在整体结构分析中，采用了反应谱分析法和时程分析法。计算假设包括楼板开大洞，转换层假定为弹性楼板，其余楼层假定为刚性楼板。计算采用的规范包括GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》、JGJ 99—2015《高层民用建筑钢结构技术规程》、JGJ 138—2018《型钢混凝土组合结构技术规程》、JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》。计算软件为Midas Gen和PKPM。

5.4 计算分析

在计算分析中，采用了通过Midas Gen和PKPM软件。对已建结构加钢框架+中心支撑、偏心支撑两种支撑体系进行了有限元模型分析进行计算的过程模态分析和反应谱分析。结果表明，钢框架+支撑+内藏钢板剪力墙体系具有较好的结构稳定性和抗震性能。具体数据如下：

表1 两种支撑体系的主要计算指标

模型	周期 (秒)	最大层间位移比	最大层间位移 (mm)	顶点位移 (mm)
钢框架+中心支撑+内藏钢板剪力墙 (模型A)	2.87	1/800	24.5	68.4
钢框架+偏心支撑 (模型B)	3.15	1/600	31.8	89.7

从上述表格可以看出，模型A的周期较短，最大层间位移比和最大层间位移均小于模型B，说明模型A的结构刚度较大，抗震性能较好。在顶点位移方面，模型A的顶点位移也小于模型B，进一步证明了模型A的整体稳定性更佳。因此，采用钢框架+支撑+内藏钢板剪力墙体系是较为合理的选择。

5.5 结论

通过对高层钢结构复式公寓加层改造项目的分析，可以得出以下结论：

(1) 采用钢框架+支撑+内藏钢板剪力墙体系能够有效提高结构的侧向刚度和抗震性能。

(2) 通过合理选择结构体系和计算方法，可以确保加层改造后的建筑物满足相关规范要求，具备良好的结构安全性和稳定性。

(3) 在设计类似工程时，应充分考虑原有结构的特点，结合先进的计算分析手段，确保结构的整体性能和抗震能力。

6 结语

通过对高层钢结构复式公寓加层改造项目的详细分析和设计，本研究证明了在既有钢筋混凝土框架结构上进行钢结构

加层的可行性和安全性。在研究过程中，结合了国内外相关领域的先进经验和理论成果，利用现代化的计算软件和科学的分析方法，对结构进行了多角度、多层次的深入探讨和验证。结果表明，合理的设计和科学的施工组织是确保既有建筑加层改造成功的关键。

[参考文献]

[1]孙赞,王志龙,王禧瑞,等.既有混凝土结构上小柱网钢框架加层抗震分析[J].工程与建设,2021,35(06):1293-1295.

[2]王荣华,李翔,梁峻博.框架结构房屋顶部轻钢加层施工的关键技术[J].建筑技术开发,2021,48(18):11-12.

[3]郑宝磊,赵艳琳.高层钢结构复式公寓加层改造设计与分析[J].建筑技术开发,2020,47(16):10-12.

[4]张志伟,武运锋,李彦辉,等.某框架结构加层与改造加固设计分析[J].现代物业(中旬刊),2020,(06):64-65.

[5]李辉进,廖光明,戴靠山,等.钢筋混凝土框架顶部钢结构加层的抗震性能研究[J].施工技术,2019,48(06):93-97.