 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i6.10624

Design and Engineering Application of Composite Structures with Above-ground Steel Structure and Underground Concrete: A Case Study of an Industrial Park Project in Changping District, Beijing

Hongyu Liang

Huahe (Beijing) International Engineering Design Co., Ltd., Beijing, 102200, China

Abstract

Against the background of advancing industrialization of construction and high-quality construction of industrial parks, modern industrial buildings put forward higher requirements for the spatial adaptability, seismic performance, etc., of structural systems. The composite structure of above-ground steel structure and underground concrete structure can realize the complementarity of material properties and has become the mainstream form for industrial buildings in high-intensity areas with large storey heights and heavy loads. Taking an industrial park project in Changping, Beijing as the carrier, this paper conducts design research on the composite structure of above-ground steel frame-center brace and underground reinforced concrete frame-shear wall. Combined with the service characteristics of the building, it analyzes core technologies such as structural layout, seismic detailing, and anti-floating design. Practice shows that the structure has reasonable stiffness matching, excellent seismic performance and convenient construction, which can solve design problems under complex working conditions and has important reference significance for the application of composite structures in similar industrial buildings.

Keywords

composite structure; steel frame-concentrically braced frame; reinforced concrete frame-shear wall; anti-floating anchor; seismic design; industrial plant; large storey height structure

地上钢结构地下混凝土组合结构设计与工程应用——以北京市昌平区某工业园区项目为例

梁红玉

华合（北京）国际工程设计有限公司，中国·北京 102200

摘　要

在建筑工业化推进及工业园区高品质建设背景下，现代工业建筑对结构体系的空间适配性、抗震性能等提出更高要求。地上钢结构与地下混凝土组合结构可实现材料性能互补，已成为高烈度区、大层高、重荷载工业建筑主流形式。本文以北京昌平某工业园区工程为载体，针对地上钢框架–中心支撑与地下混凝土框架–剪力墙组合结构设计研究，结合建筑使用特性，分析结构布局、抗震构造、抗浮设计等核心技术。实践表明，该结构刚度匹配合理、抗震优良、施工便捷，能破解复杂工况设计难题，对同类工业建筑组合结构应用具重要参考意义。

关键词

组合结构；钢框架–中心支撑；混凝土框架—剪力墙；抗浮锚杆；抗震设计；工业厂房；大层高结构

1 工程概况

1.1 项目基本信息

本项目坐落于北京市昌平区某工业园区内，用地面积约 7000 ㎡，总建筑面积约 17000 ㎡，是一座集生产制造、食堂、设备机房、消防水池、仓储库房、地下车库及配套办公功能的综合性工业建筑。建筑主体为地上 4 层、地下 2 层；地上 1 ~ 3 层层高 7.9m，主要用于重型设备生产、加工与装配，对楼面承载力、结构空间、层高均有较高要求；地上 4 层层高 5.4m，为轻型生产车间及配套办公区域，使用荷载相对较低；地下 1 层层高 6.0m，兼具停车、设备机房、食堂及辅助用房功能，空间布局复杂、管线排布密集；地下 2 层层高 3.9m，以仓储、消防水池及地源热泵房为主，结构埋深较大，水浮力对结构影响显著。

【作者简介】梁红玉（1985–），女，中国四川内江人，硕士，一级注册结构工程师，从事抗震研究。

1.2 结构设计基本参数

依据规范及地质勘察报告，本项目核心结构设计参数如下：设计使用年限：50 年；结构安全等级：二级；基本风压：0.45kN/ ㎡，地面粗糙度类别：B 类；抗震设防烈度：8 度（0.2g）；设计地震分组：第二组；建筑场地类别：Ⅱ类；场地特征周期：Tg=0.40s；抗震设防类别：丙类；地上钢结构抗震等级：三级；地下一层混凝土框架抗震等级：二级；耐火等级：地上二级，地下一级；厂房楼面活荷载标准值：10.0kN/ ㎡；地下车库、办公、机房、仓储等区域活荷载按规范对应取值。

1.3 工程地质与水文条件

项目场地地层分布稳定，力学性能优良，基底以下约 3.5m 范围内为密实卵石地层，该地层承载力特征值高、压缩性低，满足天然地基设计要求。场地地下水水位偏高，抗浮水位埋深 3.0m，地下结构整体埋深较大，结构自重与上部覆土重量无法满足抗浮稳定性要求。

2 结构体系选型与布置

2.1 结构体系选型原则

工业建筑普遍具备大空间、大柱网、使用荷载大、功能复合、改造灵活性要求高等特点，本项目地处 8 度抗震设防区，同时面临地上大层高、地下大埋深、高地下水位、地质条件特殊等多重约束，结构体系选型需综合满足以下要求：1. 抗震性能达标，满足高烈度区抗震设防标准，结构延性、耗能能力及整体稳定性符合规范；2. 适配大层高、大柱网、重荷载的使用场景，空间布局灵活，满足生产工艺及多功能使用需求；3. 地下结构刚度充足、整体性强、防水性能优异，可有效抵御土压力、水压力及地震作用；4. 施工便捷、工期可控，契合工业园区快速建设、尽早投产的需求；5. 经济性优良，充分利用地质条件，减少冗余地基处理与复杂构造措施； 6. 实现钢与混凝土材料性能优势互补，达成受力合理、安全可靠、经济高效的综合目标。

2.2 上部钢结构体系：钢框架 - 中心支撑

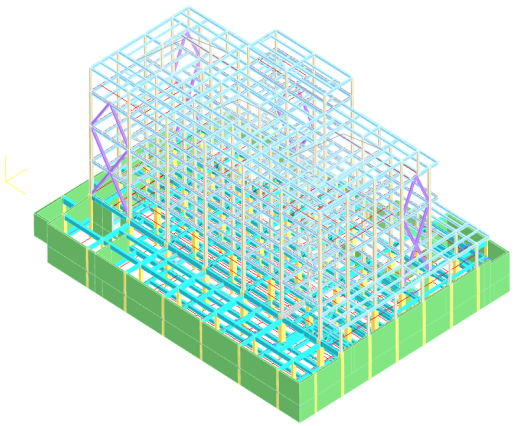
地上部分采用钢框架–中心支撑结构体系，主体框架梁、框架柱及支撑构件均选用 Q355B 低合金高强度结构钢，该钢材强度高、塑性韧性佳、焊接性能优良、抗震性能突出，适用于 8 度区抗震结构。标准柱网采用 7.9m × 11.1m，柱网布局规整、受力清晰、空间利用率高，可满足重型生产设备摆放、工艺流程规划及后期使用改造的需求。

针对地上 1 ~ 3 层 7.9m 大层高的特点，若仅采用纯钢框架体系，结构抗侧刚度偏小，层间位移难以控制，无法满足 8 度区抗震变形要求。因此沿结构主轴方向合理布设中心支撑（选择不妨碍建筑交通的楼梯间侧墙、建筑外墙等地方进行布设），构建钢框架 – 中心支撑双重抗侧力体系：框架承担竖向荷载并提供部分抗侧刚度，中心支撑承受大部分水平地震作用与风荷载作用，大幅提升结构整体抗侧刚度，有效控制层间位移角，避免大层高结构出现侧移过大、刚度不足及整体失稳等问题，保障结构在多遇地震及设防地震作用下具备良好的受力性能与变形能力。

2.3 地下混凝土结构体系：框架 - 剪力墙

框架 - 支撑结构中竖向连续布设的支撑需延伸至基础，本工程支撑在地下室一层对应位置采用钢支撑外包混凝土形式，地下二层则转换为剪力墙形式。竖向构件连续贯通是组合结构设计的核心环节，直接关系到结构整体安全与抗震性能。

本工程地上钢框架柱向下延伸至地下一层并设置钢骨混凝土结构层，与地下混凝土结构实现稳固连接与刚性传力，可使内力传递平稳，保障柱脚嵌固性，增强建筑底部刚性、整体性和抗倾覆稳定性。钢柱在地下一层采用合理的柱脚构造，确保轴力、弯矩、剪力有效传递，让上部结构与地下结构形成协同工作的整体，规避因结构形式突变引发的刚度骤变、内力集中及抗震不利状况。



图（一）结构整体模型

3 主要结构设计与关键技术措施

3.1 抗震设计

本项目地处 8 度抗震设防区，且地上存在 7.9m 大层高、地下埋深大、结构体系为钢 – 混凝土组合形式，抗震设计是结构设计的核心内容。设计严格遵循“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标，通过设置多重抗震防线、优化刚度分布、强化关键部位构造等措施，提升结构整体抗震性能。

地上钢框架 – 中心支撑按抗震等级三级设计，中心支撑沿竖向连续布设，避免出现刚度突变与薄弱层；框架梁柱采用刚性连接，节点承载力高于构件承载力，满足“强节点弱构件”的抗震设计要求；Q355B 钢材延性与耗能性能良好，地震作用下可通过塑性变形耗散能量，防止结构突发破坏。层间位移角严格控制在规范限值内，保障大层高结构在地震作用下变形可控、安全稳定。

地下混凝土框架 – 剪力墙结构其地下一层按抗震等级二级设计，全面强化构造措施：剪力墙设置构造边缘构件，提升端部抗压、抗弯及延性性能；框架柱箍筋全高加密，框架梁端设置水平加腋，确保梁顶纵筋轻松穿越梁柱节点；剪

力墙双向布设、均匀分布。

3.2 大层高与重荷载结构设计

地上 1 ~ 3 层 7.9m 大层高及 10.0kN/ ㎡楼面活荷载是结构设计的重点与难点。大层高会增大构件计算长度，对构件稳定性、结构侧移及整体刚度提出更高要求；重荷载作用下梁、板、柱内力显著增加，需合理确定构件截面与材料强度，保障承载力与变形符合要求。

钢框架柱采用箱型柱的截面形式，兼顾强度、刚度与稳定性需求；钢次梁按组合梁设计，与钢筋桁架楼承板协同受力，提升抗弯承载力与刚度，减小变形；中心支撑的合理布设有效弥补大层高带来的刚度缺陷，大幅减小层间位移。楼盖体系采用钢筋桁架楼承板，楼板厚度与配筋满足受弯、裂缝及挠度控制要求，保障重荷载作用下楼盖安全稳定、使用性能良好。

3.3 基础设计

项目场地基底以下为密实卵石地层，地基承载力高、变形量小，具备应用天然地基的优质条件。综合受力、造价、施工及工期因素，本项目采用天然地基 + 平板式筏板基础方案，筏板厚度 600mm，基底标高 –10.55m。

筏板基础整体性强、刚度大、受力均匀，能有效抵御水浮力、土压力及上部结构传递的弯矩与剪力；下柱墩增强柱底抗冲切与抗剪切能力，让柱底荷载均匀扩散，避免局部应力集中。

3.4 抗浮设计

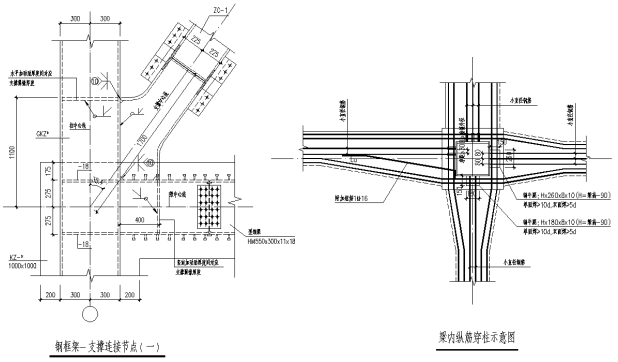
场地抗浮水位为 –3.3m，地下结构埋深大，水浮力作用显著，结构自重无法满足抗浮稳定要求。卵石地层中抗拔桩施工难度大、成孔质量难以保障，因此本项目采用全长粘结拉力型抗浮锚杆开展抗浮设计。

全长粘结拉力型抗浮锚杆依靠杆体、注浆体与地层之间的粘结力抵御水浮力，受力清晰、锚固稳固、施工便捷，尤其适用于卵石地层等复杂地质条件。设计过程中对锚杆孔径、杆体直径、锚固长度、注浆强度、锚杆间距及布局方式进行精准计算，确保单根锚杆抗拔承载力与整体抗浮安全系数满足规范要求。抗浮锚杆均匀布设于筏板基础底部，与筏板稳固连接，使水浮力通过锚杆有效传递至深部稳定地层，保障地下结构在使用阶段不出现上浮、开裂及渗漏等问题，为地下结构长期安全使用提供支撑。

3.5 节点设计

节点是结构受力传递的关键部位，直接影响结构整体安全与抗震性能。本项目钢 – 混凝土组合节点主要包括：钢框架梁柱节点、中心支撑与框架连接节点、钢柱柱脚与地下混凝土结构连接节点、混凝土梁柱节点等。

钢结构节点采用刚性连接，焊缝质量等级符合规范要求，节点承载力高于相连构件，保障地震作用下构件先于节点屈服，形成合理耗能机制；钢柱柱脚采用外包式构造，确保钢柱与混凝土基础连接稳固、传力直接；混凝土节点强化箍筋配置，保障核心区抗剪承载力。节点设计兼顾受力安全、构造合理、施工可行，确保结构在各类作用下节点不提前破坏，维持结构整体受力体系完整。



钢框架—支撑连接节点（一）　　型内纵筋穿柱示意图

4 组合结构应用优势与工程意义

4.1 材料性能优势互补

地上钢结构自重轻、强度高、延性好、施工速度快、空间适配性强，尤其适合大层高、大柱网、重荷载工业厂房；地下混凝土结构刚度大、耐久性好、防水性能优异、抗侧力能力强，可有效抵御土压力、水压力及地震作用。二者结合实现“刚柔并济、优势互补”，弥补单一结构体系的不足，让整体结构在受力、变形、耐久性、施工及经济性等方面达到最优状态。

4.2 施工高效、经济性突出

钢结构采用工厂预制、现场拼装的模式，楼盖选用钢筋桁架楼承板，现场施工速度快、整体性好、受季节影响小，可大幅缩短工期；地下混凝土结构采用现浇施工，工艺成熟、质量易控。项目整体造价合理、经济效益显著，契合绿色建造、节能低碳、工业化发展方向，具备良好推广价值。

5 结论

本文以北京市昌平区某工业园区项目为实例，系统研究地上钢结构与地下混凝土结构组合体系在现代工业建筑中的设计方法、关键技术、计算分析及工程应用。研究与工程实践表明： 地上钢地下混凝土组合结构可充分发挥两种材料优势，受力合理、性能优异、适配性强； 钢框架 – 中心支撑与混凝土框架 – 剪力墙双重抗侧力体系可有效满足 8 度区抗震设防要求，大层高、重荷载工况下结构安全可控；天然地基 + 平板式筏板 + 抗浮锚杆方案适配卵石地层与高抗浮水位条件，安全可靠、经济高效、施工便捷； 本项目设计方法、关键技术与构造措施可为同类工程提供直接参考，具备显著工程应用价值与推广意义。

参考文献

[1] 聂建国,樊健生. 钢与混凝土组合结构设计指导与实例精选[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[2] 王静峰,刘阳,李贝贝. 大层高钢框架-支撑结构抗震性能设计与工程应用[J]. 建筑结构,2021,51(12):45-50.

[3] 张季超,许勇,王可怡. 卵石地层基坑抗浮锚杆设计与施工关键技术[J]. 岩土工程学报,2020,42(S1):189-192.