

# 深基坑栈桥上的重型钢构件吊装技术分析

吴荣辉

上海建工四建集团有限公司

**摘要：**某超高层项目塔楼结构设计有重型钢构件，单件最大起吊重量约为40t。为确保构件安全吊装就位，根据现场环境条件，采用大型汽车吊在深基坑栈桥上进行吊装作业，栈桥支撑设计方案根据钢构件安装要求提前进行优化调整。结合汽车吊行驶和吊装的工况，对栈桥结构安全性进行计算复核，并采取必要的加固措施。实际吊装过程可控，吊装作业未对栈桥结构等造成破坏。

**关键词：**重型钢构件；大型汽车吊；安全复核；栈桥加固

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.19.019

## 一、引言

采用中型、重型汽车吊在栈桥上进行各类施工材料吊装是比较常见的做法，但在栈桥上使用起重能力300t及以上的超重型汽车吊的工况就少见。查询相关文献可知一般是在汽车吊支腿下铺设适量面积的钢板或路基箱转化为面荷载<sup>[1]</sup>，确保此面荷载小于栈桥的设计面荷载。而当汽车吊支腿集中力较大时，根据以往做法计算，需要数十平方米的路基箱来扩散荷载，另外路基箱的截面也要加厚来抵抗变形以确保均匀传递荷载，此做法场地占用面积大、所需材料多，不适用于在栈桥上使用支腿荷载较大的汽车吊的情况。本文根据实际项目案例，分析300t汽车吊在栈桥上行驶和吊装工况，对栈桥结构体系的承载力进行计算复核，并采取在部分支腿下直接增设竖向钢管支撑等措施来确保吊装作业的安全。

## 二、项目概况

项目塔楼高度150m，地下3层，基坑内设有3道混凝土水平支撑，塔楼核心筒从底板开始设有80mm厚钢板剪力墙，外框结构从底板开始设有4根厚度80mm、直径2800mm的钢管巨柱，这些钢构件需要从结构大底板上开始安装。

## 三、施工技术准备

### （一）钢构件分段优化设计与起重设备选择

在钢构件加工制作前，根据设计要求和相关规范的前提下，结合钢构件加工要求，对钢构件进行合理分段。剪力钢板最大分段重量为23t，钢管柱最大分段为首段柱，分段高度约7m，最大分段重量约为40t，对应的最大吊装半径为18m，均分布在基坑中心区域。选择徐工QAY300型全地面汽车吊在栈桥上就位进行吊装，对

应幅度的最大起重量47t。

### （二）栈桥支撑布置优化

由于本工程基坑形状不规则，仅在场北侧设有车辆出入口。栈桥无法完全避开基坑中间塔楼区域。具体优化如下：

（1）支撑梁根据钢构件吊装要求调整位置，确保每道支撑梁和钢构件位置水平投影面间距200mm以上，便于钢构件吊装就位。

（2）巨柱位置投影面范围上的栈桥结构的梁需避开巨柱。巨柱吊装时，预先在对应区域的栈桥板上进行开孔<sup>[1]</sup>，巨柱直接从栈桥板开孔处下放安装，洞口周边需做好安全防护措施。

（3）对栈桥支撑下的钢立柱定位与地下室结构图进行复核，落在结构后浇带中的钢立柱要调整错开，避免钢立柱缺失水平约束。

（4）原基坑支护设计在栈桥下局部钢立柱位置设有28号槽钢柱间剪刀撑，对汽车吊行驶路线和吊装点位处的柱间剪刀撑进行增加补充，以提高钢立柱的侧向稳定性。

## 四、吊装施工布置

根据吊装设备、吊装构件、优化后的栈桥等参数进行详细的吊装施工布置模拟，明确汽车吊吊装时精确的支腿点位，对点位下的结构进行安全复核。

## 五、结构安全复核

通过梳理汽车吊整个吊装过程，选取最不利的工况进行对应栈桥承载结构的安全复核，本项目吊装主要复核的工况有：汽车吊在栈桥上行驶时的工况、在栈桥上吊装时的工况。

### （一）栈桥及支撑体系的主要设计参数

栈桥板厚250mm，跨度6.5m，横向2跨，栈桥宽13m，配置C18@150mm双层双向钢筋；栈桥梁截面800mm×1100mm、1000mm×1100mm，梁顶和梁底各配10C28纵筋，通长配置C10@100mm四肢箍。混凝土强度为C35，保护层厚度支撑梁底部为50mm、其余部位均为30mm。栈桥板、梁跨度均按最大6500mm计。

栈桥下的钢立柱为四肢格构柱，截面尺寸480mm×480mm，单肢截面为L180mm×16mm，缀板尺寸440mm×200mm×16mm、间距500mm，材质为Q345B。

支撑梁与钢立柱交叉节点处，在梁下方的钢立柱四周焊接L180角钢托板，确保节点传力。

钢立柱底部插入钻孔灌注桩中不小于3m，灌注桩上部6m区域直径850mm，下部直径650mm，桩总长度36m，桩身混凝土为水下C30。

根据《建筑结构荷载规范》GB50009的3.2条荷载组合条款要求<sup>[2]</sup>，恒载分项系数取1.35，可变荷载的分项系数取1.4，汽车吊动力系数取1.2。按1.35恒载+1.4可变荷载+1.2动力荷载的组合进行安全验算。

(二) 汽车吊在栈桥上行驶时的工况复核

汽车吊通过栈桥驶入吊装点位，整车空车重79.6t，共7根车轴，轴距为1650+2600+1650+1650+1650+1650mm，第一轴轴重10.0t，第二和第三轴轴重为11.0t，其余各轴轴重为12.0t。栈桥原设计最大允许通行单车重量为50t，小于汽车吊空车重量，故需对汽车吊行驶状态时栈桥体系的结构承载力进行复核。采用有限元软件建模，按照单辆汽车吊在栈桥上行驶建立移动荷载工况，另考虑施工荷载按2kN/m<sup>2</sup>计，计算栈桥体系的受力，内力包络计算结果如图1、图2所示：栈桥板最大弯矩为48.6kN·m/m，剪力为75.5kN/m；支撑梁最大弯矩为607.7kN·m，剪力为444.1kN；汽车吊行驶传至钢立柱的最大竖向力为553.1kN。

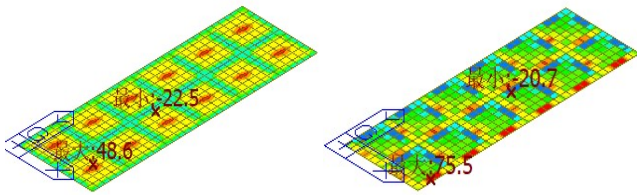


图1 栈桥板弯矩及剪力包络图

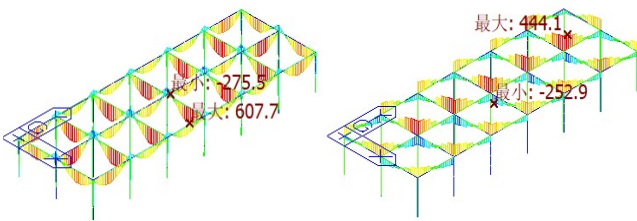


图2 支撑梁弯矩及剪力包络图

(1) 栈桥板复核

根据《混凝土结构设计规范》GB50010的6.2.10、6.3.3条<sup>[3]</sup>，计算栈桥板的正截面承载力： $x = f_y A_s / (\alpha_1 f_c b) = 360 \times 1696 / (1.0 \times 16.7 \times 1000) = 36.6 \text{mm} < 2a' = 78 \text{mm}$ ，取 $x = 78 \text{mm}$ ，故栈桥板抗弯承载力为 $M_u = f_y A_s (h_0 - x/2) = 360 \times 1696 \times (250 - 39 - 78/2) = 105 \text{kN} \cdot \text{m/m}$ ，斜截面承载力： $V_u = 0.7 \beta_h f_t b h_0 = 0.7 \times 1.0 \times 1.57 \times 100 \times 220 = 241.78 \text{kN/m}$ ，均大于栈桥板的最大内力值。

(2) 栈桥梁复核

取800mm×1100mm的支撑梁进行复核，根据《混

土结构设计规范》GB50010的6.2.10、6.3.4条<sup>[3]</sup>，计算支撑梁抗弯承载力： $x = f_y A_s / (\alpha_1 f_c b) = 360 \times 6158 / (1.0 \times 16.7 \times 800) = 166 \text{mm} > 2a' = 148 \text{mm}$ ，取 $x = 166 \text{mm}$ ，可得支撑梁抗弯承载力 $M_u = f_y A_s (h_0 - x/2) = 360 \times 6158 \times (1100 - 74 - 166/2) = 2090 \text{kN} \cdot \text{m}$ ，抗剪承载力： $V_u = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} A_{sv} h_0 / s = 0.7 \times 1.57 \times 800 \times 1026 + 360 \times 314 \times 1026 / 100 = 2061.85 \text{kN}$ ，均大于支撑梁的内力最大值。

(3) 钢立柱复核

第三道支撑拆除后，汽车吊在栈桥上行驶，此时的钢立柱处于受力的最不利状态，需复核此时钢立柱的安全性。

钢立柱最大计算高度从第二道支撑中心至大底板为7.9m。根据设计资料，钢立柱承受栈桥自重标准值619kN，第二道支撑自重标准值400kN，钢立柱自重标准值35kN，单根钢立柱承受最大的施工活载标准值84.5kN，汽车吊行驶传至钢立柱的竖向力设计值为553.1kN，即钢立柱最大竖向荷载设计值为 $N = 1.35 \times (619 + 400.4 + 35.33) + 553.1 + 1.4 \times 84.5 = 2095.27 \text{kN}$ ，钢立柱因施工偏差造成的柱顶侧向偏差量值按高度的1/200来考虑，偏心距为 $e = 7900 / 200 = 39.5 \text{mm}$ 。根据《钢结构设计标准》GB50017中式(8.1.1-1)计算<sup>[4]</sup>，钢立柱截面强度计算： $N/A_n + M_x / (\gamma_x W_{nx}) + M_y / (\gamma_y W_{ny}) = 2095.27 \times 10^3 / 22188 + 2095.27 \times 10^3 \times 39.5 / (1.0 \times 3603401) + 2095.27 \times 10^6 \times 39.5 / (1.0 \times 3603401) = 140.4 \text{N/mm}^2 \leq [f] = 305 \text{N/mm}^2$ 。

故通过上述验算可知，汽车吊行驶时的栈桥板、支撑梁、钢立柱的承载力满足要求。

(三) 汽车吊在栈桥上吊装时的工况复核

300吨汽车吊在栈桥上进行吊装作业时，钢构件重量40t，整车重量79.6t，配重重量98.2t。汽车吊支腿纵向间距9.2m，横向间距8.7m，最大吊装半径18m，臂长30.8m。结合类似工程案例，分别计算汽车吊侧方、后方、侧后方吊装时各支腿反力<sup>[5][6]</sup>，见表1。支腿反力标准值最大1137.2kN。

表1 汽车吊支腿反力标准值计算汇总表

| 汽车吊<br>吊装工况 | 支腿反力 (kN) |       |        |       |
|-------------|-----------|-------|--------|-------|
|             | N1        | N2    | N3     | N4    |
| 侧方          | 130.7     | 958.3 | 958.3  | 130.7 |
| 后方          | 153.2     | 153.2 | 935.8  | 935.8 |
| 侧后方         | 0         | 544.5 | 1137.2 | 544.5 |

由于汽车吊支腿的间距与钢立柱间距不一致，使得汽车吊支腿无法全部直接支承在钢立柱上部，部分支腿需要支承在栈桥板或支撑梁上，如图3所示。故支腿支

承的可能位置有：钢立柱上方、栈桥板上、支撑梁上。按最大支腿反力对上述支腿处的结构进行计算复核。

(1) 支腿支承在钢立柱上的复核

支腿最大反力标准值为1137.2kN，单根钢立柱竖向最大受力为 $N=1.35 \times (619+400.4+35.33) + 1.2 \times 1137.2 + 1.4 \times 84.5 = 2906.8\text{kN}$ ，钢立柱偏心距39.5mm。根据《钢结构设计标准》GB50017式(8.1.1-1)、(8.2.2)<sup>[4]</sup>计算，钢立柱截面强度为 $194.7\text{N}/\text{mm}^2 < 305\text{N}/\text{mm}^2$ ，钢立柱的整体稳定性为 $0.6 < 1.0$ 。

设计提供的钢立柱下的灌注桩最大竖向承载力设计值为3038.3kN，大于钢立柱传递来的荷载2906.8kN。故钢立柱及下方桩承载力可以满足吊装要求。

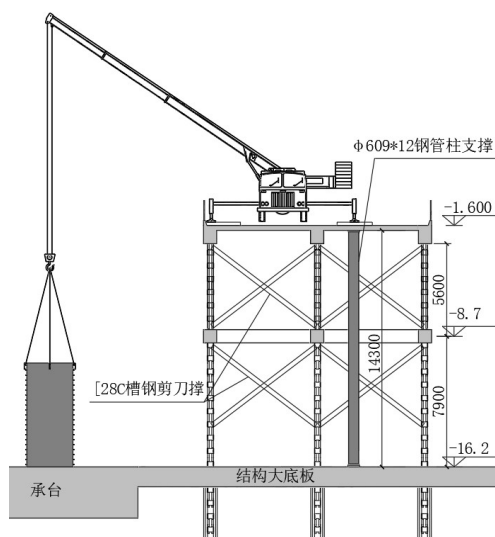


图3 汽车吊吊装竖向工况图

(2) 支腿撑在栈桥板上的复核

本项目在栈桥上所使用300t汽车吊的支腿反力较大，栈桥板跨度大无法直接承受支腿的荷载，需对栈桥板上支腿支承点进行加固处理。

采用传力路径更直接的加固措施，即在支腿下方的栈桥板下竖向安装直径609mm×12mm钢管柱进行加固，可以将支腿集中荷载通过钢管柱直接传递至已施工完成的结构大底板上。通过在栈桥板上开设直径100mm的引孔进行钢管柱吊装，确保钢管柱与汽车吊支腿中心重合。钢管柱顶部顶紧在栈桥板底，底部通过连接活络端支承在大底板上，活络端长度可调，确保钢管柱上下两端能顶紧传力，如图3所示。

钢管柱最大高度为14.3m，材质为Q235B。支腿最大反力设计值为 $1.2 \times 1137.2 = 1364.6\text{kN}$ ，安装垂直度偏差按高度的1/100来考虑，偏心距为143mm。根据《钢结构设计标准》GB50017式(8.1.1-2)、(8.2.4)<sup>[4]</sup>计算，钢管柱截面强度为 $133.5\text{N}/\text{mm}^2 < 215\text{N}/\text{mm}^2$ ，钢管柱的整体稳定性为 $0.75 < 1.0$ 。

根据《混凝土结构设计规范》GB 50010的6.6.1条<sup>[3]</sup>，钢管柱顶部与支腿中间的栈桥板混凝土局部抗压强度近似计算 $1.35 \beta_c \beta_1 f_c A_{1n} = 1.35 \times 1 \times 1 \times 16.7 \times 3.14 \times 609^2 / 4 = 6563.8\text{kN}$ ，远大于支腿集中力。

故采用钢管柱竖向加固是安全的。

(3) 支腿撑在混凝土支撑梁上的复核

当汽车吊支腿集中荷载作用在支撑梁跨中时，跨中出现最大弯矩设计值： $M_1 = 1522.7\text{kN} \cdot \text{m}$ ；支座处最大负弯矩设计值 $968.9\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

当汽车吊支腿集中荷载作用支撑梁跨端时，出现最大剪力设计值 $1458.9\text{kN}$ 。

根据本文5.2条计算结果， $800 \times 1100$ 支撑梁的最大抗弯承载力为 $2090\text{kN} \cdot \text{m} > \text{最大弯矩设计值} 1522.7\text{kN} \cdot \text{m}$ ，抗剪承载力为 $2061.85\text{kN} > \text{最大剪力设计值} 1458.9\text{kN}$ 。

故吊装时支撑梁的承载力能满足要求。

结语

通过对本工程重钢结构件吊装技术的分析，选取汽车吊行驶和吊装的工况进行计算复核，总结了大型汽车吊在栈桥上进行吊装作业时栈桥结构承载力的复核要点。在汽车吊支腿处栈桥板下采用钢管柱进行竖向加固，有效传递了吊装时的支腿荷载，栈桥结构未发生破坏，保证了吊装过程的安全。经过本工程的施工实践证明，在栈桥上采用300t级的超重型汽车吊作业，在经过必要的验算和加固处理后是可行的，解决了基坑施工期间进行重钢结构吊装的困难，有效保障了主体结构的施工进度，可以给在栈桥上进行同级别或更大起重量的吊装作业提供参考。

参考文献

[1] 张朝，卢俊麟，宋兆宾. 混凝土栈桥上钢结构吊装的综合施工技术[C]//天津大学. 第十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 工业建筑杂志社，2013: 6.  
 [2] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范[S].  
 [3] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范(2015版)[S].  
 [4] GB 50017-2017, 钢结构设计标准(附条文说明)[S].  
 [5] 邓德员，黄敏，吴有明. 220t汽车吊上混凝土桥面施工作业计算分析[J]. 城市道桥与防洪，2017(10): 94-96+101+13.  
 [6] 郑齐征，郑士金. 汽车吊支腿反力及楼面等效均布活荷载的计算方法[J]. 中国标准化，2019(16): 21-22.

作者简介：吴荣辉(1990.3—)，男，汉族，江苏镇江人，工程师，本科，单位：上海建工四建集团有限公司，研究方向：建筑施工技术。