

# 水平支撑 Y 形节点在转接机房上的应用

谷守奎

(中交一航局安装工程有限公司)

**摘要:** 为保证实际结构接近结构计算模型、连接节点设计更加经济合理,结合黄骅港一、二期提能改造项目,采用 Y 形连接板将水平支撑与框架梁连接的方法,有效解决了连接板与框架梁腹板螺栓碰撞问题,也保证了水平支撑的中心线通过框架梁中心,使实际结构与计算模型保持一致,同时节约了用钢量,对今后开展散货港口煤炭码头装卸系统钢结构精细化设计具有一定的指导和借鉴意义。

**关键词:** 煤炭码头; 框架支撑结构; 水平支撑; Y 形节点; 有限元

## 0 引言

煤炭码头装卸系统的转接机房结构型式大多为框架支撑结构,在框架梁与水平支撑的连接节点位置,当框架梁腹板采用螺栓连接形式时,水平支撑的连接板很难布置。钢结构节点起到杆件之间力的传递作用,如果节点出现破坏,会使整个结构的传力路径中断或改变,可能导致结构整体承力体系的局部破坏甚至发生整体破坏<sup>[1]</sup>。为保证水平支撑中心线通过框架梁中心线,使实际结构更加接近结构计算模型,设计采用 Y 形连接板将水平支撑与框架梁进行连接。通常做法中,连接板是以整块板的形式与主结构进行连接,Y 形连接板相当于在螺栓连接的位置进行局部开口以保证螺栓的安装空间,但这种做法并非常规做法。

本文以黄骅港一、二期提能改造项目 T2T-1 转接机房为例,分析港口散货码头项目钢结构转接机房 Y 形水平支撑的强度、变形,验证 Y 形水平支撑在散货码头项目转接机房项目应用的可行性,分析实际使用效果和经济效益,为散货港口煤炭码头装卸系统钢结构精细化设计提供参考和借鉴。

## 1 工程概况

黄骅港一、二期提能改造项目以绿色智能化港口建设为要求、以 4 000 万 t/a 的能力提升为目标,既包括原有建筑、设备的拆除和改造,又包括在原场地上的新建项目。其中新建部分包括了 3 条皮带机钢结构栈桥和 4 座转接机房结构。转接机房框架柱和框架梁截面均为国标 H 型钢截面,主要规格为 HM588 × 300 × 12 × 20、HM488 ×

300 × 11 × 18、HM390 × 300 × 10 × 16、HM294 × 200 × 8 × 12,主梁与框架柱的连接为栓焊组合的刚接节点,主次梁连接为腹板螺栓连接的铰接节点。其中,T2T-1 机房水平支撑与框架梁的连接节点共计 96 处,每处节点均涉及因梁腹板采用螺栓连接而导致水平支撑连接板难以布置的情况。

## 2 水平支撑常规设计

### 2.1 转接机房结构型式

散货码头转接机房钢结构一般为框架支撑结构,楼面板一般为 6 mm 厚加肋花纹钢板,在花纹钢板下部设置 6 mm 厚、80 mm 高的竖向加劲肋加强钢板的面外刚度,保证楼板的平整度。转接机房主要承受由工艺设备引起的水平和竖向荷载,而且水平力一般比较大,而花纹钢板型式的楼面板为柔性结构,无法提供足够的平面内刚度,故需要在主次梁之间设置较多的水平支撑,形成可靠的水平支撑体系,以保证楼层平面内的刚度,进而有效地传递水平力,从而保证楼层间的侧向刚度比、位移比和周期比等满足 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[2]</sup>的要求。

### 2.2 水平支撑布置的困境

为避免因次梁弯矩造成主梁(或次梁)受扭的情况,主梁与次梁、次梁与次梁的连接一般采用铰接的型式。铰接节点的一般做法是在主(次)梁上焊接加劲肋,然后通过连接板和螺栓将次梁腹板与主(次)梁加劲肋连接起来,水平支撑的连接端板受螺栓位置的影响难以放置,造成水平支撑布置的困境。

典型梁梁铰接节点见图 1。

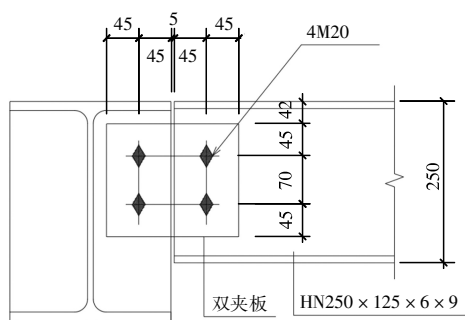
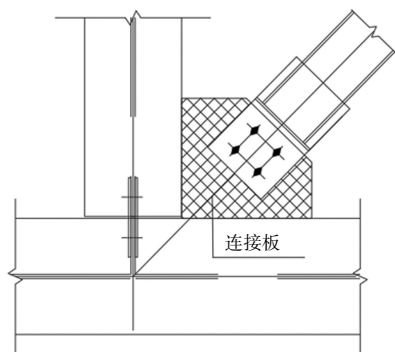


图1 典型梁梁铰接节点

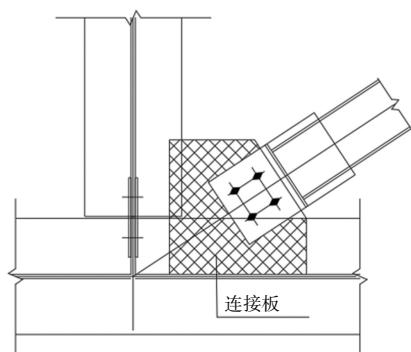
### 2.3 常规做法

为避免梁腹板处螺栓连接位置，连接支撑的连接板通常有 2 种设置方式：1) 做 1 块偏置的连

接板，连接板根据构件之间的相对位置关系进行设计，一般尺寸较小，仅设置在主梁腹板上，并与主梁腹板焊接，不与次梁发生连接关系，从而避开螺栓连接的位置。此时水平支撑传递过来的轴力全部由此连接板传递到主梁腹板，再通过主梁腹板进行力的继续传递，如图 2(a)所示。2) 做 1 块与主次梁均发生连接关系的连接板，此时连接板一般设置在与次梁下翼缘平齐的位置，连接板一侧与主梁腹板焊接，另一侧与次梁下翼缘焊接，然后再将水平支撑构件连接到该连接板上，此时水平支撑的轴力通过连接板传递到主梁和次梁上，再通过主次梁汇聚到梁柱节点，如图 2(b)所示。



(a) 常规做法 1



(b) 常规做法 2

图2 连接板常规做法示意图

2 种做法虽然能避开主次梁连接的螺栓和夹板，但均存在偏心的问题，即水平支撑的轴线不能通过主次梁轴线的交点，前者是在水平方向存在偏心，后者是在竖直方向存在偏心，因为偏心的存在势必会产生附加弯矩，对梁的受力产生不利影响。

## 3 Y 形支撑节点的设计

### 3.1 节点形式

Y 形支撑节点的主要目的是避开钢梁腹板处的连接螺栓，保证水平支撑中心线与钢梁轴线尽量平齐，保证实际结构更加符合计算模型。Y 形节点的设计主要是水平支撑连接端板的设计，需要将常规整块连接板改造成带开口连接板。水平支撑通过端板与连接板进行螺栓连接，连接板通过设置垂直于板面的端板与钢梁腹板进行螺栓连接。连接板形状及尺寸调整见图 3。

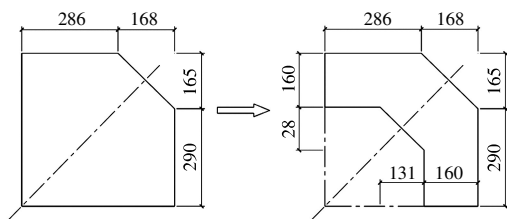


图3 连接板形状及尺寸调整

### 3.2 计算分析

选取黄骅港一、二期提能改造项目 T2T-1 机房进行计算分析，验证 Y 形支撑节点连接板的强度和变形满足规范要求。具体技术路线为：整体结构建模→整体结构有限元分析→提取连接节点处构件最大受力状态→构件局部节点建模→局部节点有限元分析→计算结果分析与评价。

### 3.2.1 整体模型搭建

本项目结构计算分析采用 Midas-gen 软件, T2T-1 机房为典型的钢框架结构, 柱脚螺栓节点做法、柱与框架梁连接节点做法均为刚接, 主次梁的连接节点做法为铰接, 水平支撑和柱间支撑均为两端铰接构件, 根据实际的 H 型钢截面搭建各构件模型, 按照节点做法定义连接处的边界条件。底层柱脚位置均定义为刚接, 即约束所有自由度。

荷载设置方面, 基本风压按照 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》<sup>[3]</sup>中规定的黄骅港地区基本风压进行取值, 同时据此规范确定场地类别为 A 类。对于地震荷载, 按照《建筑抗震设计规范》中黄骅港地区规定地震烈度和地震分组设置, 地震烈度为 7 度( $0.1g$ ), 设计地震分组为第三组。对于楼面荷载, 根据工艺专业提出的设计要求, 楼面活载为  $5 \text{ kN/m}^2$ , 楼面恒载为  $6 \text{ mm}$  花纹钢板自重。对于滚筒架处的皮带机反力, 通过受力平衡关系, 反算出滚筒架支座处的集中力, 按梁单元荷载输入到结构梁上, 漏斗及皮带机支腿处的荷载均按设备实际提资条件进行输入, 滚筒架支座、漏斗支座及皮带机支腿处的荷载均按活荷载进行输入。对于屋面荷载, 屋面恒载为  $0.5 \text{ kN/m}^2$ , 活载为  $0.5 \text{ kN/m}^2$ 。

主体结构的整体变形控制指标按《建筑抗震设计规范》和 GB 50017—2017《钢结构设计标准》<sup>[4]</sup>中要求控制。对于构件变形的控制, 因主梁是承载设备的主要构件, 工艺设备对承载梁的变形要求挠度指标设置严于《钢结构设计标准》中  $L/400$  的要求, 指标设定为  $L/700$  ( $L$  为梁计算跨度)。其余构件的设计指标按规范要求进行设定。

模型搭建完成后进行有限元计算, 计算结果

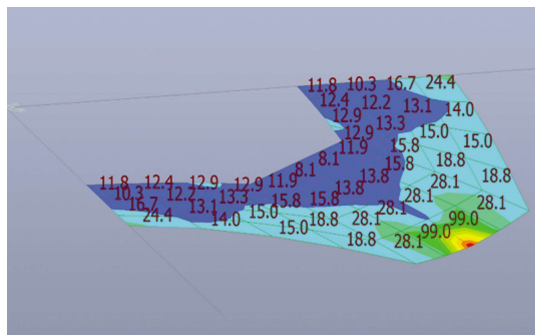
显示机房结构的整体性指标和构件指标均符合规范要求。对构件计算结果进行分析和筛选, 选取受力最大的节点进行下一步连接板强度和变形的计算。根据计算结果, 可查询到受力最大的水平支撑构件信息为: 长度为  $3\,200 \text{ mm}$ , 自重为  $0.45 \text{ kN}$ , 最大轴力为  $37.1 \text{ kN}$ , 连接板厚度为  $20 \text{ mm}$ 。

### 3.2.2 连接板模型创建及有限元分析

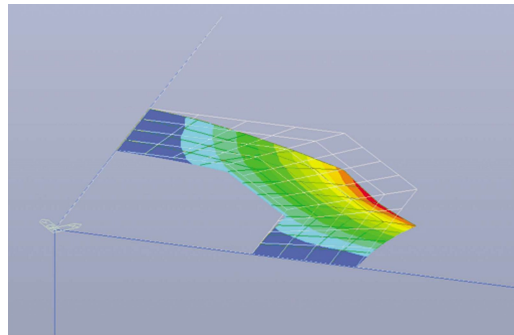
连接板计算分析采用 Midas-gen, 为了便于参数输入和结果查看, 应使单元坐标系与整体坐标系保持一致建立模型。通过建立基准节点的方式精准描绘连接板的形状, 按实际情况定义材料信息(Q235B, 板厚  $20 \text{ mm}$ ), 通过软件节点扩展的功能, 按逆时针方向将基准点依次连接形成板单元。利用模型单元分割功能将连接板划分成相应的网格, 网格划分应注意细度。网格划分完成后, 将板与梁连接处的边界条件定义为刚接。然后在连接板与支撑构件连接处输入相应节点荷载值为:  $F_x = -37.1 \text{ kN}$ ,  $F_y = -0.45 \text{ kN}$ ,  $M_y = 0.45 \times 1.6 = 0.72 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。输入完成后运行计算命令对节点进行计算, 完成节点板的有限元分析。

### 3.2.3 有限元计算结果

经计算, 连接板的最大拉应力为  $99.0 \text{ MPa}$ , 依据《钢结构设计标准》表 4.4.1 中规定, 材料为 Q235B、 $20 \text{ mm}$  厚钢板的抗拉、抗压、抗弯强度设计值为  $205 \text{ MPa}$ , 故连接板强度满足规范要求; 连接板的竖直和水平方向位移的最大值发生在支撑与连接板相接的位置,  $DZ_{\max}$  (竖向) 最大位移值为  $0.864 \text{ mm}$ ,  $DXY_{\max}$  (水平向) 最大位移值为  $0.041 \text{ mm}$ , 从位移值可以看出, 连接板几乎未发生变形。因此, 连接板的强度和变形均能满足使用要求。连接板应力及位移计算结果见图 4。



(a) 连接板应力图



(b) 连接板位移图

图 4 连接板应力及位移图

### 3.3 节点设计要点

为便于施工,连接板的设计均选用紧固件连接方式。紧固件主要包括:普通螺栓、高强度螺栓、圆柱头焊钉、锚栓和铆钉等<sup>[9]</sup>,因空间位置有限,需尽量减少螺栓配置的数量,选用高强螺栓进行连接,螺栓级别根据实际计算结果进行选用,螺栓布置间距除满足《钢结构设计标准》对螺栓中心距、距离连接板件边距等构造要求外,还需充分考虑现场实际施工中把合螺栓的安装空间。

连接板规格的确定是设计的关键。连接水平支撑构件和主次梁的连接板是传递内力的“纽带”,需要充分、合理地传递内力才能保证结构整体受力协调合理。应保证连接板自身的强度和稳定,板件厚度的选用根据计算结果确定,同时建议不低于15 mm,以保证板件的平面外稳定。另外,为了保证内力传递均匀、平顺,连接板需要与水平支撑构件保持合理的连接角度。连接板与水平支撑直接接触的部位,连接板外形边缘折角位置起点应与水平支撑外边缘保持一定距离,一般不小于20 mm。同时连接板边缘线与水平支撑轴线斜交的角度一般为15°~20°,以保证应力有效扩散,避免应力集中。水平支撑杆件的端部,应与连接板的边缘保持一定的距离,建议不小于40 mm。

## 4 应用效果

### 4.1 节约钢材

Y形支撑节点的连接板考虑避让梁腹板螺栓,连接板形状由整块板型式优化为根部开口的近似弧形条状型式,减小了钢板的面积,每块连接板节约40%的用钢量,具体对比结果见表1。

表1 连接板钢材优化对比表

序号	对比项目	普通连接板	Y形节点连接板
1	钢板面积/mm <sup>2</sup>	192 688	114 364
2	板厚/mm	20	20
3	钢材重量/kg	30.25	17.95

注:钢板平面尺寸见图3。

黄骅港一、二期提能改造项目包括约2 000 m新建皮带机钢结构栈桥和4座新建转接机房,共涉及Y形支撑节点约1 720块,每块节约钢材12.3 kg,共计节约钢材21.156 t。

### 4.2 应用项目

Y形支撑节点设计已获实用新型专利授权(专利号:202022959719),并应用在多个港口散货码头项目上,包括黄骅港三、四期工程、黄骅港提能改造项目、唐山港曹妃甸港区煤炭码头三期项目、锦州港煤炭码头一期工程先期工程、神华粤电珠海港铁路快速装车系统总承包项目、盐城港滨海港区中电投煤炭码头一期工程。项目中钢结构机房整体稳定可靠,水平支撑及连接板未出现变形情况,现场使用情况良好,能够保证结构安全和工艺设备平稳运行。

## 5 结语

本文从常规设计、节点设计、计算分析及实际应用情况4个方面分析了港口散货码头项目钢结构转接机房Y形水平支撑节点的设计,通过改变传统水平支撑节点的形式,有效避开了钢梁铰接节点螺栓,提高了项目实体与结构计算模型的吻合度。同时,Y形支撑的连接板也能节约一定的钢材用量,可提高项目的经济性。通过节点的有限元分析亦可以看出,其强度和变形均能满足使用要求。在多个港口散货码头项目上的应用也验证了Y形水平支撑节点在散货码头项目转接机房项目应用的可行性和稳定性,Y形水平支撑节点的成功应用可为类似工程施工提供参考。

### 参考文献:

- [1] 沈国辉,孙炳楠,楼文娟,等.大型钢结构节点承载力的有限元分析[J].土建建筑工程信息技术,2013,5(3):32-36.
- [2] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
- [3] GB 50009—2012,建筑结构荷载规范[S].
- [4] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].
- [5] 但泽义.钢结构设计手册[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2019.