

空间组合刚架结构受力特性研究

王红飞

(中交天津港湾工程研究院有限公司)

摘要:为研究机电安装工程中常见空间组合刚架结构受力特性,以黑龙江省哈尔滨某机电工程项目为依托,通过理论分析得出影响空间组合刚架结构的主要影响参数,建立了在不同参数下空间组合刚架结构有限元模型,分析在不同参数下内力分布特点。结果表明,影响空间组合刚架结构受力特性的主要参数为牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度及牛腿与横梁相对长度,随着两参数变化结构内力分布形式也发生改变,且牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度起主导作用,只有牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度较小时,牛腿与横梁相对长度才对结构内力分布产生影响。

关键词:机电安装工程;结构设计;受力特性;参数分析;空间组合刚架结构

0 引言

空间组合刚架结构主要可分为梁柱式空间组合刚架结构和梁梁式空间组合刚架结构。目前,国内外学者对空间组合刚架结构的研究对象多为梁柱式空间组合刚架结构。刘西拉等^[1]将广义逆力法应用于空间刚架结构,并表明广义逆力法有着较好的计算效率和计算精度。肖林等^[2]对空间刚架结构钢-混结合段疲劳性能展开试验研究,表明空间刚架结构钢-混结合段具有良好的疲劳性能,并从疲劳性能的角度对钢-混结合段的合理构造设计进行了讨论。鄂林仲阳等^[3]以空间刚架结构为研究对象,应用谱元法研究其动力学特性,依次推导出杆、轴和铁木辛柯梁的动力学刚度阵,进而得到空间刚架的动力学刚度阵和频域响应的理论方程。李银启等^[4]针对三维空间刚架布局优化问题,以七自由度节点梁柱单元二阶弹性理论推导考虑构件几何非线性和截面翘曲变形的非线性刚度矩阵,通过整合梁柱单元非线性刚度矩阵对刚架结构进行整体的二阶弹性分析,建立满足刚架结构强度、刚度和稳定性要求的布局优化数值模型。沈雯^[5]针对刚架结构这一特定载体,以“结构关系”作为切入点并将其与空间构成联结,研究一种关于空间与结构的设计方法——结构法。

综上所述,国内外学者虽从理论、疲劳、动力学、抗震、非线性及结构设计各方面对空间组合刚架进行研究,而研究对象却主要为梁柱式结构,关于梁梁形式空间组合刚架结构研究却很少。基于此,通过理论计算和有限元分析手段,对该

形式空间组合刚架结构受力特性进行研究,以便为类似结构的设计研究提供参考。

1 工程概况

哈尔滨某库区机电安装工程结构设计项目库区结构形式为混凝土框架结构,由 33 纵轴, 19 横轴组成,其中最大柱间距 12 m,最小柱间距 2 m,柱间距共 33 种,平面尺寸 145.9 m×254.1 m,建筑面积约为 44 449.71 m²,基础由旋挖钻孔桩与承台地梁组成。

为布置各种水暖管线,需在相邻承压柱设置梁梁形式牛腿横梁空间组合刚架结构,管线布置方式共 10 种,横梁计算长度取相邻柱间中心距,牛腿计算长度由于吊架宽度影响取值 0.6 m。横梁通过焊接方式与两侧牛腿连接,牛腿通过倒锥形化学锚栓连接于承压柱上,横梁上布置吊架,吊架上布置各种水暖管线。

2 空间组合刚架结构受力分析

2.1 理论计算

当结构小变形时,做出以下假设:1)位移方面,假设横截面形心在轴线平面内的位移(轴线的面内变形)忽略不计;2)内力方面,假设轴线平面内的内力分量(轴力 F_N 、面内剪力 F_Q 与面内弯矩 M_x)忽略不计;3)反力方面,假设作用在轴线平面内的支反力与支反力偶矩忽略不计。

在此假设下,横梁上任意位置集中荷载作用可等效为跨中集中荷载与弯矩共同作用。为方便分析,分别计算跨中集中荷载与弯矩作用下的力学特性,两者简化力学计算图见图 1。

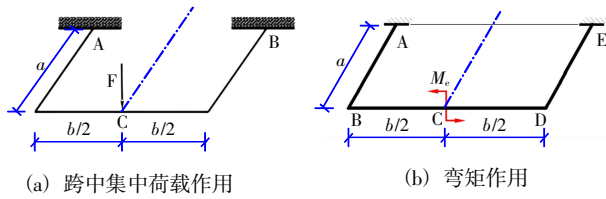


图1 简化力学计算图

由结构力学方法^[6]可知,对称结构正反对称荷载作用下力法公式为:

$$\frac{1}{EI_y} \int_0^{b/2} M(x_1) \bar{M}(x_1) dx_1 + \frac{1}{GI_p} \int_0^a T(x_2) \bar{T}(x_2) dx_2 = 0 \quad (1)$$

式中: $\bar{M}(x_1)$ 为单位多余未知力 $M_1=1(x_1=1)$ 单独作用时横梁产生的弯矩; $M(x_1)$ 为已知荷载作用时横梁产生的弯矩; $\bar{T}(x_2)$ 为单位多余未知力 $M_1=1(x_1=1)$ 单独作用时牛腿产生的扭矩; $T(x_2)$ 为已知荷载作用时牛腿产生的扭矩; E 为横梁弹性模量; G 为牛腿剪切模量; I_y 为横梁截面抗弯惯性矩; I_p 为牛腿截面扭转惯性矩; a 为牛腿长度; b 为横梁长度。

如图 1(a) 所示,对称结构正对称荷载下其多余未知力为弯矩 M_c ,求解式(1)可得:

$$M_c = \frac{Fb^2}{4EI_y} + \frac{Fab}{2GI_p} \quad (2)$$

设 $\frac{GI_p}{EI_y} = k_1$,代入式(2)得:

$$M_c = \frac{Fb^2}{4} + \frac{Fab}{2k_1} \quad (3)$$

设 $\frac{a}{b} = k_2$,代入式(3)得:

$$M_c = \frac{Fb^2}{4} \left(1 + \frac{2k_2}{k_1} \right) \quad (4)$$

同理,如图 1(b) 所示,对称结构反对称荷载下其多余未知力为集中力 F ,求解式(1)可得:

$$F = \frac{3EI_y M_c a - 3GI_p M_c b}{3EI_y ab - 2GI_p b^2} \quad (5)$$

设 $\frac{GI_p}{EI_y} = k_1$,代入式(5)得:

$$F = -3M_c \frac{a - k_1 b}{3ab - 2k_1 b^2} \quad (6)$$

设 $\frac{a}{b} = k_2$,代入式(6)得:

$$F = -\frac{3M_c}{b} \frac{k_2 - k_1}{3k_2 - 2k_1} \quad (7)$$

由式(4)可知,跨中集中荷载作用下其多余未知力弯矩 M_c ,主要与牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚

度 k_1 及牛腿与横梁相对长度 k_2 两参数有关。同理,由式(7)可知,弯矩作用下其多余未知集中力 F 也主要与以上两参数有关。因横梁上任意位置集中荷载作用可等效为跨中集中荷载与弯矩共同作用,可知横梁任意位置集中荷载作用下其内力分布主要与牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 及牛腿与横梁相对长度 k_2 有关。

2.2 有限元分析

通过上述理论分析,发现影响空间组合刚架结构的主要因素有 2 个: 1) 牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 ; 2) 牛腿与横梁相对长度 k_2 。为进一步分析两者对结构受力特性的影响,对其展开参数有限元分析。展开参数分析前需对比分析二维杆系单元与三维实体单元计算误差大小,以便更好地选取单元类型。

采用 Midas 有限元分析软件,对结构进行二维建模。组合结构横梁长 10 m,牛腿长 1.2 m,其 0.6 m 位置与横梁固结,两者均采用 HN300×150 型号 H 型钢,建模时牛腿与横梁采用梁单元进行模拟,边界形式为牛腿底部固定约束。

采用 Abaqus 有限元分析软件, C3D8I 三维实体单元,等比例对结构进行实体建模,该结构共计单元 82 744 个、节点 168 486 个。为保证约束与加载方式和二维杆系模型相同,牛腿端采用固定约束,同时采用节点耦合方式,将跨中截面全部节点与截面质心耦合,通过质心施加荷载的方式进行加载。

横梁跨中作用 1 kN 集中荷载,同等受力条件下三维有限元模型与二维有限元模型内力对比结果见表 1。

表1 横梁内力计算结果

距离/m	横梁弯矩/(N·m)		误差/%	牛腿扭矩/(N·m)		误差/%
	三维模型	二维模型		三维模型	二维模型	
0.00	-4.76	-5.71	16.64	-4.76	-5.71	16.64
1.25	554.08	619.00	10.49	-4.76	-5.71	16.64
2.50	1 178.33	1 244.00	5.28	-4.76	-5.71	16.64
5.00	2 425.00	2 494.00	2.77	-4.76	-5.71	16.64
7.50	1 178.33	1 244.00	5.28	-4.76	-5.71	16.64
8.75	554.08	619.00	10.49	-4.76	-5.71	16.64
10.00	-4.76	-5.71	16.64	-4.76	-5.71	16.64

由表 1 可知,三维模型下正负弯矩、扭矩计算值相对二维杆系单元模型均偏小。此外,除横梁两端、牛腿外,两者计算相对误差基本在 10%

以内,且越接近跨中内力值越大而两者误差逐步减小,横梁跨中处最小误差仅为2.77%。横梁两端即横梁牛腿连接处弯矩为负弯矩,其值较小,且全部转化为牛腿扭矩,此处位置两者模型计算误差最大为16.64%。但由于此处内力计算结果值较小,绝对误差相应也较小,故可知三维实体单元模型与二维杆系单元模型计算结果整体差异性仍较小。

3 参数分析

影响结构内力分布的主要因素是牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度、牛腿与横梁相对长度之比,二维杆系单元下内力分布情况与三维实体单元差异较小,但二维模型计算结果较大偏于不安全,因此基于二维杆系有限元模型对牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 、牛腿与横梁相对长度之比 k_2 展开参数分析。

3.1 抗扭抗弯相对刚度对结构内力分布影响

以工程常见钢材为例,钢材弹性模量 E 为 2.05×10^5 MPa,剪切模量 G 为 4.5×10^4 MPa,则 $G/E=1/4.67$ 。为更好调节牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 大小,采用圆形作为横梁与牛腿截面形式,横梁恒采用直径0.1 m型号,通过调节牛腿截面直径控制牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度,截面参数信息如表2所示。

表2 截面参数信息

横梁截面直径/m	牛腿直径/m	G/E	I_p/I_y	牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1
0.100	0.059	1/4.67	0.250	0.054
	0.084	1/4.67	1.000	0.214
	0.119	1/4.67	4.000	0.857
	0.168	1/4.67	16.000	3.426

由于 k_1 为 G/E 和 I_p/I_y 乘积,且 G/E 为定值,则 k_1 仅与 I_p/I_y 有关。为了更好地研究 k_1 对结构内力分布影响,将 I_p/I_y 取为0.25~16之间,呈4倍关系增长,相应 k_1 值位于0.054(1/18左右)~3.426之间,且呈4倍关系增长,又因抗扭惯性矩与抗弯惯性矩值都与直径呈4次方关系^[6],最终通过保持横梁截面直径0.100 m不变,改变牛腿直径(0.059 m、0.084 m、0.119 m、0.168 m)即可调节 k_1 大小。

横梁计算长度取值10 m,牛腿计算长度0.6 m,在1/4跨径处施加1 kN集中荷载,通过不断调整牛腿截面直径大小,得出不同牛腿抗扭与横

梁抗弯相对刚度 k_1 下,横梁弯矩沿跨径分布情况如图2所示。

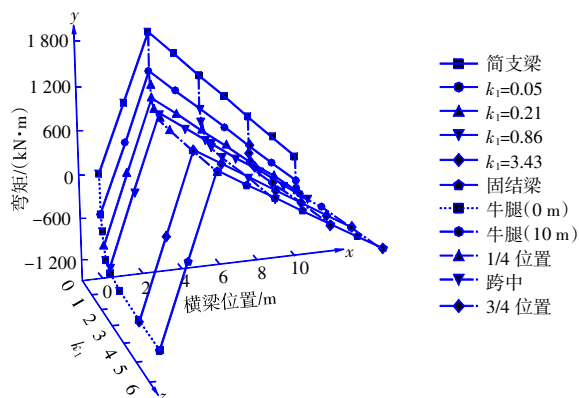


图2 不同 k_1 下弯矩分布

由图2可知,在牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 较小时,横梁弯矩与牛腿扭矩分布特征接近于简支梁,随着抗扭抗弯相对刚度 k_1 的不断增大,横梁弯矩与牛腿扭矩分布特征逐渐向两端固结梁特征靠拢。且在 k_1 较小时,随着 k_1 增大,截面弯矩与扭矩变化剧烈,在 k_1 基本为1.86后,随着 k_1 增大,弯矩与扭矩变化已基本趋于水平。

3.2 牛腿与横梁相对长度对结构内力分布影响

保持横梁长度10 m不变,通过调节牛腿长度,分析 $k_1=0.054$ 、0.428、3.426三种情况下不同牛腿与横梁相对长度 k_2 (1/40、1/10、1/2.5)对结构内力分布影响见图3。

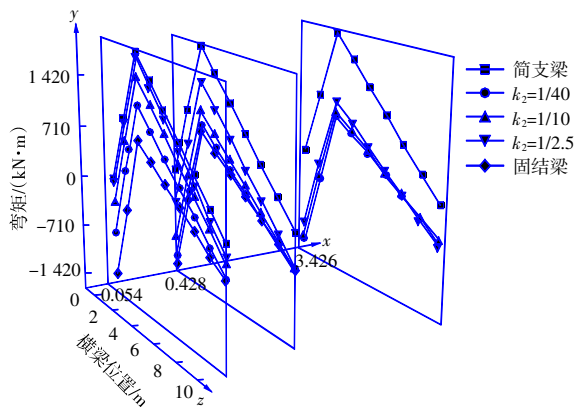


图3 不同 k_2 下横梁弯矩分布

由图3可知,无论 $k_1=0.054$ 、0.428、3.426,牛腿与横梁相对长度 k_2 越大,内力分布特征越接近于简支梁,牛腿与横梁相对长度 k_2 越小,内力分布特征越向两端固结梁靠拢。此外,当牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 较小时,内力分布特征随 k_2 变化而变化,但当牛腿抗扭与横梁抗弯相对

刚度 k_1 较大时, 其内力分布特征基本趋于两端固结梁, 牛腿与横梁相对长度 k_2 对其影响很小。

为进一步研究特征截面处弯矩随牛腿与横梁相对长度 k_2 变化规律, 分别在 $k_1=0.054$ 、 0.428 、 3.426 三种情况下, 以 $1/4$ 位置、跨中及 $3/4$ 位置作为特征截面, 分析其随牛腿与横梁相对长度 k_2 变化情况, 结果见图 4。

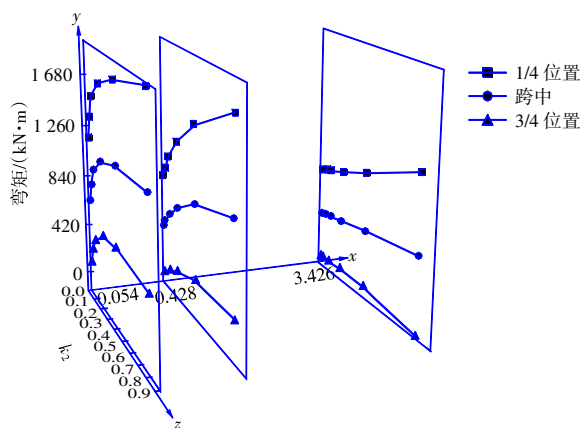


图 4 特征截面弯矩随 k_2 变化

如图 4 所示, 从左至右分别表示 $k_1=0.054$ 、 0.428 、 3.426 三种情况下, 牛腿与横梁相对长度 k_2 与横梁特征截面弯矩之间的相互关系。可知随着 k_1 的增加, 特征截面弯矩随牛腿与横梁相对长度 k_2 对结构弯矩影响越来越小, 进一步表明牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 对结构受力起着主导作用, 只有牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 较小时牛腿与横梁相对长度 k_2 才能产生影响。

4 工程常用 H 型钢截面空间组合刚架结构受力特点分析

工程上为方便施工, 牛腿横梁一般采用相同型号, 截面多为 H 型, 根据规范 GB/T 11263—2017《热轧 H 型钢和部分 T 型钢》^[7]可知常用 H 型钢牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 介于 $0.028\sim 0.039$ 之间, 而目前工程常见横梁长度 $2\sim 12$ m, 牛腿长度 $0.5\sim 1$ m, 牛腿与横梁相对长度 k_2 介于 $1/24\sim 1/2$ 之间, 由上述分析可知, 此时横梁受力可近似视为简支梁, 牛腿扭矩较小可近似为悬臂梁计算。

项目结构设计时, 综合考虑现场施工、经济性及材料供应问题, 牛腿横梁选用相同型号, 材料选用钢材, 截面选取窄型 H 型截面, 根据上述分析结果, 横梁按照简支梁受力设计, 牛腿按照

悬臂梁受力计算, 根据管线设计荷载、吊架布设方式及柱间距, 最终构件最小型号选取为 HN125×60, 最大型号选取为 HN350×175, 可为类似工程设计提供参考。

5 结语

本文以哈尔滨地铁某机电工程项目为依托, 对机电工程常用空间组合刚架结构进行研究分析, 首先通过理论计算表明影响该结构的受力参数, 其次分别建立二维与三维有限元模型, 相互验证, 且表明二维受力模型与三维受力模型计算结果差别较小, 最后通过二维有限元模型展开参数分析, 结论如下:

1) 影响空间组合刚架结构受力的主要因素有 2 个, 即牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 及牛腿与横梁相对长度 k_2 。

2) 牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 越小, 横梁受力越接近于简支梁, 牛腿扭矩也越小; 反之, 牛腿抗扭与横梁抗弯相对刚度 k_1 越大, 横梁受力越接近于固结梁, 牛腿扭矩也越大。

3) 无论 $k_1=0.054$ 、 0.428 、 3.426 , 牛腿与横梁相对长度 k_2 越大, 横梁受力越接近于简支梁, k_2 越小横梁受力越接近于固结梁, 但当 k_1 较大时, 横梁受力偏于固结梁, 参数 k_2 对结构受力形式影响不大。

4) 对于机电工程常见 H 型钢截面空间组合刚架结构, 横梁受力可简化为简支梁计算, 牛腿可简化为悬臂结构计算。

此外, 本文对空间组合刚架结构受力特性研究虽取得一些成果, 但仍存在很多不足, 牛腿与横梁连接部位传力情况及空间连续组合刚架结构的受力特性仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘西拉, 王开健, 张春俊. 空间刚架结构的广义逆力法[J]. 力学季刊, 2004(1):38-45.
- [2] 肖林, 李小珍, 卫星, 等. 空间刚架结构钢-混结合段疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5):83-89.
- [3] 鄂林仲阳, 杜强, 李上明. 基于谱元法的空间刚架动力学特性分析[J]. 计算力学学报, 2016, 33(5):802-806.
- [4] 李银启, 程文明, 刘华森. 考虑二阶效应的空间刚架结构布局优化[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5):971-979.
- [5] 沈雯. 关于空间与结构的设计方法-结构法初探——以框架结构为例[D]. 南京:东南大学, 2014.
- [6] 杜正国. 结构力学教程[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2004.
- [7] GB/T 11263—2017, 热轧 H 型钢和部分 T 型钢[S].