

张洪涛,方三陵,郭佳佳,等.超长悬挑钢支架锚固螺栓变参数力学分析及优化[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):83-92.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20230503
ZHANG Hongtao,FANG Sanling,GUO Jiajia,et al.Mechanical analysis and optimization for super-long steel cantilevered-frame with various design parameters and fixed by bolts[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(1):83-92.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20230503

超长悬挑钢支架锚固螺栓变参数力学分析及优化

张洪涛^{1,2}, 方三陵², 郭佳佳², 刘明周², 谢向东^{1*}, 张衡¹, 杜国锋¹

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434000; 2. 中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081)

摘要:为分析和优化超长悬挑钢支架锚固螺栓的设计方案,建立变参数条件下各锚固螺栓横截面应力计算模型,模拟两种超长悬挑钢支架所有锚固螺栓横截面应力的连续变化过程,分析参数变化对螺栓横截面应力的影响机理。以各个螺栓横截面应力最小为原则,优化悬挑钢支架设计方案,并将其用于实际工程。比较各锚固装置螺栓计算应力与COMSOL模拟应力,得出应力分布云图。数值计算结果表明:超长悬挑钢支架固定在柱上或梁上,当斜撑梁固定于外伸梁3/4长度位置时,所有锚固螺栓横截面所受最大正应力组合和平均切应力组合均最小,水平梁固定段螺栓横截面的平均切应力最大,斜撑梁螺栓横截面的最大正应力最大。研究成果可为超长悬挑钢支架及其锚固装置的设计提供指导。

关键词:悬挑钢支架; 锚固装置; 最大正应力; 平均切应力; 螺栓

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)01-0083-10

Mechanical analysis and optimization for super-long steel cantilevered-frame with various design parameters and fixed by bolts

ZHANG Hongtao^{1,2}, FANG Sanling², GUO Jiajia², LIU Mingzhou², XIE Xiangdong^{1*}, ZHANG Heng¹, DU Guofeng¹

(1. College of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434000, China;

2. China First Metallurgical Group Company Limited, Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to analyze and optimize the design scheme of anchoring bolts for super-long cantilever steel supports, a calculation model for the cross-sectional stress of each anchoring bolt under variable parameter conditions was established. The continuous change process of the cross-sectional stress of all anchoring bolts of two kinds of super-long cantilever steel supports was simulated, and the influence mechanism of parameter changes on the cross-sectional stress of bolts was analyzed. Based on the principle of minimum stress of each bolt cross section, the design scheme of cantilever steel support is optimized and applied to practical engineering. The calculated stress of the bolts of each anchoring device was compared with the simulated stress of COMSOL, and the stress distribution cloud map was obtained. The numerical calculation results show that no matter the super-long cantilever steel support is fixed on the column or the beam, when the diagonal bracing beam is fixed at the 3/4 length position of the extended beam, the maximum normal stress combination and the average shear stress combination of all the anchorage bolt cross sections are the smallest. The average shear stress of the bolt cross section of the fixed section of the horizontal beam is the largest, and the maximum normal stress of the bolt cross section of the diagonal bracing beam is the largest. The research results can provide guidance for the design of super-long cantilever steel support and its anchorage device.

Key words: steel cantilevered-frame; anchoring device; maximum normal stress; average shear stress; bolt

收稿日期: 2023-11-24 修回日期: 2024-01-22 接受日期: 2024-01-29 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078052)

作者简介: 张洪涛(1985-),男,湖北武汉人,硕士,高级工程师,主要从事建筑技术方面的研究。E-mail: zhanghongtao0520@163.com

通信作者: 谢向东(1975-),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事动力学方面的研究。E-mail: xdxie@yangtzeu.edu.cn

0 引言

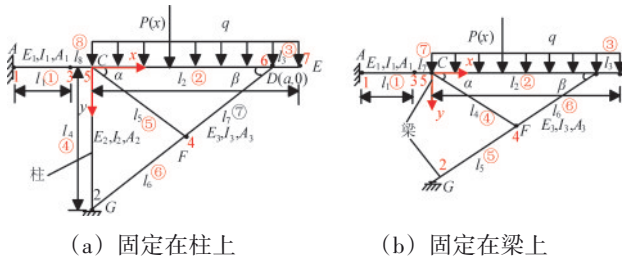
随着建筑施工技术的快速发展,外形优美的挑檐建筑逐渐增多,施工中大量采用悬挑钢平台/脚手架,主要包括斜拉式、悬臂梁式和下撑式^[1-2]。斜拉式采用高强螺栓将外挑钢梁固定,再用长度可调的刚拉杆将悬挑钢梁端部与建筑物主体相连接。悬臂梁式是采用U型螺栓将型钢梁固定于楼面板上,另外在悬挑钢梁端头设置与上部结构拉环连接的钢丝绳作为安全储备。下撑式悬臂支架通常用于剪力墙结构,底部斜撑与水平钢梁分别与主体结构(梁、柱)螺栓连接或焊接,通常还需要斜拉辅助固定。目前三种形式的悬挑钢平台/脚手架在工程上都有应用和研究。赵金昭等^[3]结合昆明紫云景辰高层住宅项目,基于现行规范^[4-6],从安全施工角度,对花篮螺栓斜拉式悬挑工字钢关键技术的管控措施进行分析和总结。邓云天等^[7]结合某民用住宅设计了一种斜拉式悬挑钢梁安全搭设方案,对4种模型的多种加载方案进行有限元模拟,对悬挑体系的应力分布进行对比,为悬挑支撑体系在现代高层建筑施工中的应用提供了参考。伍广锋^[8]以斜拉式悬挑型钢梁的工程实例为研究对象,依据规范算法^[5-6],对钢梁的锚固长度进行优化设计,使型钢梁尺寸满足各项安全指标。方从兵等^[9]对在叠合板中预埋悬挑工字钢压环的情况提出2种锚固加固的方法,并对多种锚固方式进行了详细论述和简单计算分析。何淳健等^[10]提出在斜拉式悬挑工字钢梁侧锚固螺栓来克服阳角/楼梯处的施工难题,利用规范方法验算了悬挑主梁及其各种锚固螺栓的承载能力和可靠性。陆耀波等^[11]采用ADINA有限元软件对高层悬挑结构的“悬挑型钢-钢丝绳”支模体系受力情况进行了施工过程模拟,得出随钢丝绳的预应力增加,型钢的最大弯矩减少。OBAIDAT等^[12]提出一种利用U型碳纤维增强聚合物薄片和圆角/倒角钢平板来提高梁柱系统斜拉梁的锚固性能,通过实验研究发现这种方法具有很好的增强锚固作用。MA等^[13]提出一种柔性锚固的直线型和扇形悬臂结构,以悬臂梁系统质量最小为优化准则,研究了有、无锚固长度限制情况下悬臂结构的复杂因数和惩罚因数对其节约质量的影响。ZHANG等^[14]设计了一系列带有底部锚固螺栓和碳纤维增强聚合物层的悬挑梁实验样品,研究了底部螺栓的位置、长度和数

量对悬挑梁的外层混凝土剥落的影响。ZHANG等^[15]提出利用高强玻璃纤维钉状锚固装置和玻璃纤维增强板来增加钢筋混凝土悬臂板的锚固强度,实验表明该方案可以有效地增加锚固不足钢筋混凝土悬臂板的延性。殷粉芳等^[16]设计了下撑式悬挑平台,解决了深圳某工程部分楼层转角处悬挑长度达7m的梁的施工问题,并结合实际工程对悬挑平台及锚固装置进行了力学分析和验算。SAJEDI等^[17]提出支架悬臂梁的设计方案并建立了相应的计算模型,计算结果显示支架悬臂梁体系相对于传统悬臂梁结构可以减少40%的质量。于光卫等^[18]采用横杆、斜杆、竖向、腹杆组成三角桁架,通过螺栓与外墙预留孔连接,形成三角桁架悬挑架,克服了传统型钢悬挑外防护架与墙体连接时的灌浆困难和漏水隐患。

以上3种悬挑结构都需要在上层进行斜拉固定,但需要超长悬挑且不能在上层进行固定的施工工况越来越多。针对此情况,结合悬臂梁式和下支撑式提出2种由螺栓固定的超长悬挑钢支架设计方案(悬挑6~9m),建立该悬挑钢支架及其锚固螺栓的力学计算模型,分析变参数情况下各锚固螺栓横截面应力变化规律及影响机理,并给出在保证施工安全前提下的优化设计方案。

1 力学计算

针对超长高空悬挑钢平台,给出如图1所示的一榀钢支架的两种设计和固定方案的力学简图及单元划分方案。图1(a)所示方案中,钢支架被划分为8个平面梁单元,设单元①~单元⑦的长度分别为 $l_1 \sim l_7$,单元⑧的长度为 l_8 ,取 l_8 为0.5m;图1(b)所示方案中,钢支架被划分为7个平面梁单元,设单元①~单元⑥的长度分别为 $l_1 \sim l_6$,单元⑦的长度为 l_7 ,取 l_7 为0.5m。假定点A和点G均为固定约束,即约束平面内x和y方向的线位移以及平面内的角位移,节点C、节点D和结点F为刚性连接。为方便计算,建立如图1所示的以节点C为坐标原点的整体坐标系,假定斜拉梁CF和水平梁CE的夹角 α 和斜撑梁GD与水平梁CE交点D的横坐标 a (单位为m)是可变的,通过Matlab计算 a 和 α 连续变化条件下各锚固装置的螺栓的应力,以此为依据优化图1所示两种固定方式的钢支架的设计方案,使其在同样尺寸和同样荷载条件下各个锚固装置的螺栓受力最合理。

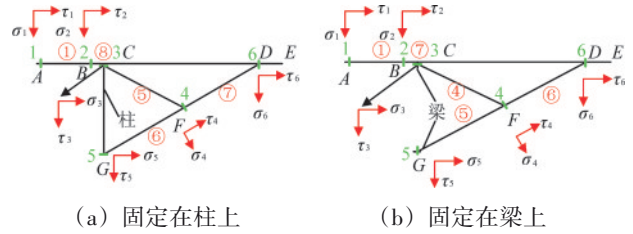


(a) 固定在柱上 (b) 固定在梁上

图1 超长悬挑钢支架示意

Fig.1 super-long steel cantilevered-frame

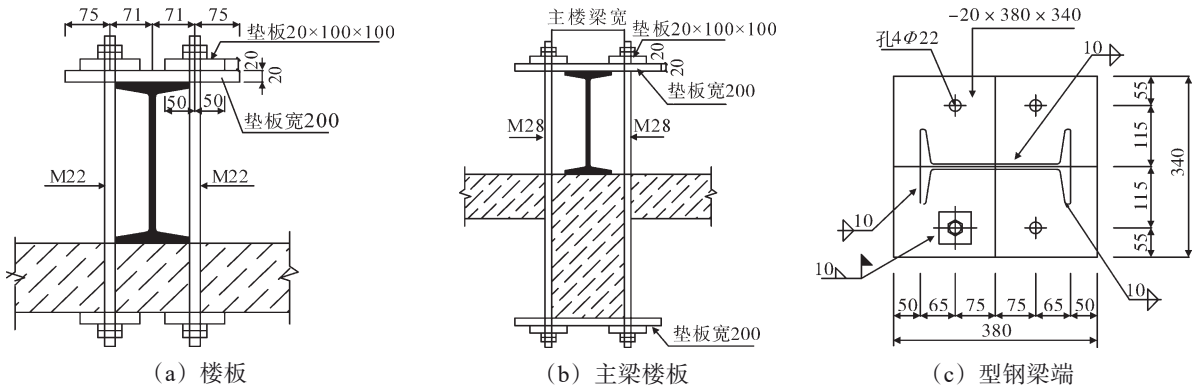
针对图1所示超长悬挑钢支架, 给出如图2所示的锚固装置分布, 结点1、2处分别采用如图3(a)或图3(b)的锚固装置, 将水平梁AE的固定



(a) 固定在柱上 (b) 固定在梁上

图2 悬挑钢支架锚固装置布置

段AC固定在楼面上, 结点3、4、5、6处采用如图3(c)所示的锚固装置将悬挑钢支架固定于柱上或者梁上。



(a) 楼板

(b) 主梁楼板

(c) 型钢梁端

图3 悬挑型钢框架固定图(单位:mm)

Fig.3 engineering drawings of anchoring devices for super-long steel cantilevered-frame(unit: mm)

首先将由单元结点力向量 \bar{F}^e 、单元刚度矩阵 \bar{k}^e 和单元结点位移向量 \bar{d}^e 组成的单元刚度方程式 (1) 转换为整体坐标系下的单元刚度方程, 并集成得到由整体结点力向量 F 、整体刚度矩阵 K 和整体结点位移向量 d 组成的整体刚度方程式 (4), 然后由式 (5) 求得整体坐标系下单元节点力^[19-20]向量 F^e 。利用式 (6) ~ 式 (11) 计算作用在图2锚固装置 1~6 上每个螺栓横截面的最大正应力 $\sigma_{i\max}$ ($i=1,2, \dots, 6$) 和平均切应力 $\tau_{i\text{ave}}$ ($i=1,2, \dots, 6$)。以下计算中, 锚固装置 1、2 均有 2 个螺栓, 锚固装置 3~6 均有 4 个螺栓, 尺寸和布局见图3。

$$\bar{F}^e = \bar{k}^e \bar{d}^e, \quad (1)$$

$$\bar{F}^e = (\bar{N}_i, \bar{V}_i, \bar{M}_i, \bar{N}_j, \bar{V}_j, \bar{M}_j)^{eT}, \quad (2)$$

$$\bar{d}^e = (\bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{\theta}_i, \bar{u}_j, \bar{v}_j, \bar{\theta}_j)^{eT}, \quad (3)$$

$$F = \begin{pmatrix} N_1 & V_1 & M_1 \\ N_2 & V_2 & M_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_7 & V_7 & M_7 \end{pmatrix} = Kd, \quad (4)$$

$$F^e = (N_i, V_i, M_i, N_j, V_j, M_j)^{eT}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_{1\max} = |V_i^{e1}/2a_1| \\ \tau_{1\text{ave}} = |N_i^{e1}/2a_1| \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sigma_{2\max} = |V_i^{e8.7}/2a_1| \\ \tau_{2\text{ave}} = |N_i^{e8.7}/2a_1| \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sigma_{3\max} = |N_j^{e5.4}/4a_2 \pm M_j^{e5.4}/2da_2| \\ \tau_{3\text{ave}} = |V_j^{e5.4}/4a_2| \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sigma_{4\max} = |(N_i^{e5.4} \sin \beta + V_i^{e5.4} \cos \beta)/4a_2 \pm M_i^{e5.4}/2da_2| \\ \tau_{4\text{ave}} = |(-N_i^{e5.4} \cos \beta + V_i^{e5.4} \sin \beta)/4a_2| \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sigma_{5\max} = |N_i^{e6.5}/4a_2 \pm M_i^{e6.5}/2da_2| \\ \tau_{5\text{ave}} = |V_i^{e6.5}/4a_2| \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sigma_{6\max} = |V_j^{e7.6}/4a_2 \pm M_j^{e7.6}/2da_2| \\ \tau_{6\text{ave}} = |N_j^{e7.6}/4a_2| \end{cases}. \quad (11)$$

式 (6) ~ 式 (11) 中: 上角标 e 为单元编号, 下角标 i, j 为单元 e 的结点编号, T 为取转置; $\bar{N}_i, \bar{V}_i, \bar{M}_i, \bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{\theta}_i, \bar{N}_j, \bar{V}_j, \bar{M}_j, \bar{u}_j, \bar{v}_j, \bar{\theta}_j$ 分别为局

部坐标系下单元 e 结点 i 、 j 的轴力、剪力、弯矩、轴向位移、横向位移和转角; N_i 、 V_i 、 M_i 、 N_j 、 V_j 、 M_j 分别为整体坐标系下的轴力、剪力和弯矩; a_1 为图 3 (a) 和图 3 (b) 中螺栓的横截面积; a_2 为图 3 (c) 中螺栓横截面积; d 为图 3 (c) 中节点弯矩方向的螺栓间距。式 (7) ~ 式 (11) 中, 上标第一个数字表示图 2 (a) 中的单元编号, 第二个数字表示图 2 (b) 的单元编号。式 (6) ~ 式 (11) 中, 假定各螺栓横截面应力均匀分布。

1.1 固定柱上悬挑钢支架锚固螺栓受力分析

由式 (1) ~ 式 (11), 利用 Matlab 计算图 2

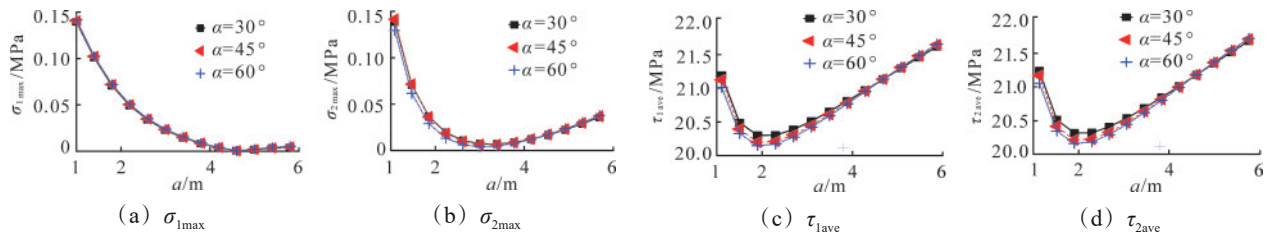


图 4 α 和 a 对锚固装置 1、2 的螺栓横截面应力影响(固定柱上)

Fig.4 effect of angle α and a on the cross-sectional stress of the bolts of anchoring devices 1 and 2 (on the fixed column)

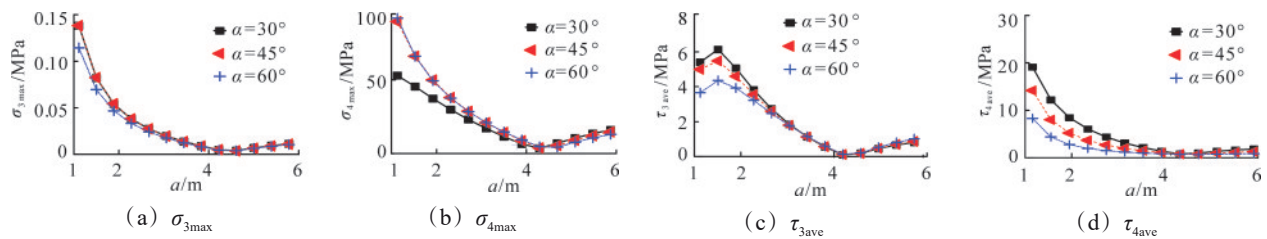


图 5 α 和 a 对锚固装置 3、4 螺栓横截面应力影响(固定柱上)

Fig.5 effect of angle α and a on the cross-sectional stress of the bolts of anchoring devices 3 and 4 (on the fixed column)

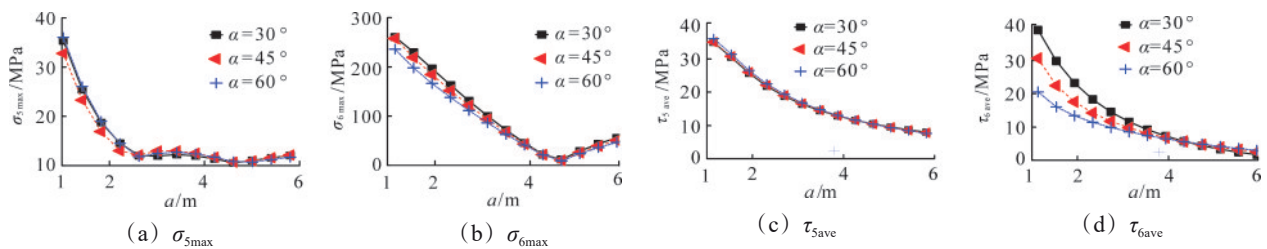


图 6 α 和 a 对锚固装置 5、6 的螺栓横截面应力影响(固定柱上)

Fig.6 effect of angle α and a on the cross-sectional stress of the bolts of anchoring devices 5 and 6 (on the fixed column)

由图 4 可知, σ_{1max} 、 σ_{2max} 和 τ_{1ave} 、 τ_{2ave} 随着 a 增大均先减小后增大; α 增大 (变化范围为 $30^\circ \sim 60^\circ$) 对 σ_{1max} 和 σ_{2max} 基本无影响, 而对平均切应力小的位置影响很大。 $a=3l_{CE}/4$ 时, σ_{1max} 最小, 为 0.6 MPa; $a=l_{CE}/2$ 时, σ_{2max} 最小, 为 6.1 MPa; $a=l_{CE}/3$ 时, τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 最小, 为 20.3 MPa, 且随 α 减小而增大, 但 α 和 a 变化对其影响很小。 σ_{2max} 远大于 σ_{1max} , 这是因

(a) 中悬挑钢支架各锚固螺栓应力。设分布载荷 q 为 10 kN/m, 集中载荷 P 位于点 E , 取 2 kN, 外伸梁 CE 总长 l_{CE} 为 6.2 m, AC 段表示长度为 5 m 的 32a 型钢和楼板的组合梁, 其等效抗弯刚度为 E_1I_1 , 等效横截面面积为 A_1 , CG 段表示高度为 4 m, 抗弯刚度为 E_2I_2 , 横截面面积为 A_2 的柱, 其他各单元均采用 32a 型钢。设 AC 段抗弯刚度为 $E_1I_1=2E_3I_3$, CG 段的抗弯刚度为 $E_2I_2=3E_3I_3$, $A_1=1.5A_3$, $A_2=0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$, $E_3=2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $I_3=1.11 \times 10^{-4} \text{ m}^4$, $A_3=67.12 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。计算不同 a 和不同 α 角时各锚固装置的螺栓横截面的最大正应力和平均切应力, 见图 4 ~ 图 7。

为水平梁 AE 在点 C 发生了刚度突变, 造成在 CD 段分布力作用下点 C 右侧呈显著的向下变形和点 B 显著的上翘趋势, 因此锚固装置 2 螺栓受到了更大的轴向力和正应力。由图 5 可知, σ_{3max} 、 σ_{4max} 和 τ_{3ave} 、 τ_{4ave} 随 a 增大先急剧减小后缓慢增大, a 的影响随应力增大而增大。 a 在 $2l_{CE}/3 \sim 4l_{CE}/5$ 位置时, σ_{3max} 、 σ_{4max} 和 τ_{3ave} 、 τ_{4ave} 都很小, 此时 α 的变化对螺

栓横截面应力几乎无影响。由图 6 可知, 当 $a > l_{CE}/2$ 时, σ_{5max} 、 σ_{6max} 都较小, α 对 σ_{5max} 、 σ_{6max} 几乎无影响, τ_{5ave} 、 τ_{6ave} 随 a 增大非线性减小, α 对 τ_{6ave} 影响较

大 ($a < l_{CE}/2$ 时)。 $a = 3l_{CE}/4$ 时, σ_{5max} 、 σ_{6max} 均最小, 此时 α 变化对其无影响; 当 $a > 2l_{CE}/3$ 时, a 越大, τ_{5ave} 、 τ_{6ave} 越小, α 变化对其几乎无影响。

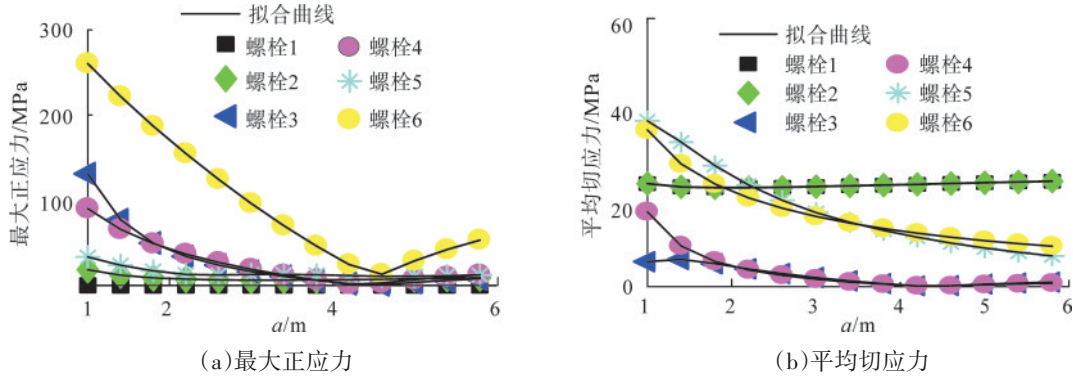


图 7 螺栓横截面应力与 a 的关系(固定柱上)

Fig.7 relationship between the bolt cross-section stress and a (on the fixed column)

由图 7 可见 α 为 45° 时各锚固装置螺栓横截面所受应力随 a 的变化趋势, 其拟合函数见式 (12) ~ 式 (22) (其中 x 为 a), 分别对应图 7 中的实线。当 a 在外伸梁 CE 中后段时, 各装置螺栓横截面最大正应力和平均切应力均较小, τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 最大且基本不受 a 的影响。当 $a = 3l_{CE}/4$ 时, 各装置螺栓横截面应力最合理, τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 最大, 均为 20.9 MPa; τ_{5ave} 、 τ_{6ave} 、 σ_{5max} 、 σ_{6max} 均较大, 其中, $\tau_{5ave} = 8.9$ MPa, $\tau_{6ave} = 10.2$ MPa, $\sigma_{5max} = 10.6$ MPa, $\sigma_{6max} = 13.1$ MPa。这是因为水平梁 AE 外伸段 CE 的竖向分布力和集中力由点 C 的柱/梁和斜撑梁 GD (由锚固装置 5、6 螺栓固定) 的竖向分量平衡, GD 梁水平分量使 AC 梁承受轴向拉力, 该轴向拉力使锚固装置 1、2 螺栓承受了很大的剪力。

这是所有螺栓中应力变化区间最大的。基于此, 选择对锚固装置 6 的螺栓最有利的区间 $2l_{CE}/3 \sim 4l_{CE}/5$ 来综合评价各装置螺栓的应力分布。该区间也是锚固装置 3、4 的螺栓横截面最大正应力和平均切应力的最小区间, 且在此区间中, 装置 1、2、5 螺栓横截面应力也不大。

1.2 固定梁上悬挑钢支架锚固螺栓受力分析

由式 (1) ~ 式 (11), 利用 Matlab 计算图 2 (b) 超长高空悬挑钢平台一榀框架各锚固装置螺栓的应力, CG 段高与图 1 (a) 中相同。在 CG 之间取 0.9 倍的柱轴向刚度来模拟梁的作用, 分布载荷 q 取 10 kN/m, 集中载荷 P 位于点 E , 取 2 kN, 外伸梁 CE 总长为 6.2 m。设 AC 段的抗弯刚度为 $E_1I_1 = 2E_3I_3$, 其他参数同 1.1 节。计算不同 a 和 α 时各锚固装置螺栓横截面的最大正应力和平均切应力, 见图 8 ~ 图 11。

$$\sigma_{1max} = -0.001842x^3 + 0.0289x^2 - 0.1502x + 0.262, \quad (12)$$

$$\sigma_{2max} = 0.154x^4 - 2.539x^3 + 15.61x^2 - 41.6x + 46.6, \quad (13)$$

$$\sigma_{3max} = 1.29x^4 - 20.37x^3 + 121x^2 - 327.7x + 354.2, \quad (14)$$

$$\sigma_{4max} = 6.928x^2 - 61.94x + 141.2, \quad (15)$$

$$\sigma_{5max} = 0.4043x^4 - 6.287x^3 + 35.6x^2 - 87.49x + 91.5, \quad (16)$$

$$\sigma_{6max} = 3.204x^4 - 16.86x^3 - 56.64x + 327.9, \quad (17)$$

$$\tau_{1,2ave} = 0.002359x^4 - 0.3802x^3 + 2.226x^2 - 5.2x + 24.49, \quad (18)$$

$$\tau_{3ave} = -0.08173x^4 + 1.244x^3 - 6.194x^2 + 10.15x + 0.1436, \quad (19)$$

$$\tau_{4ave} = 0.1703x^4 - 2.713x^3 + 16.08x^2 - 42.71x + 44.15, \quad (20)$$

$$\tau_{5ave} = 1.245x^2 - 13.99x + 46.4, \quad (21)$$

$$\tau_{6ave} = -0.373x^3 + 5.017x^2 - 23.93x + 50.72. \quad (22)$$

由图 4 ~ 图 7 可以看出, 当超长悬挑钢支架固定在柱上时, 随 a 的变化, σ_{6max} 在 250 MPa 到 10 MPa 之间变化, τ_{6ave} 在 40 MPa 到 7 MPa 之间变化,

由图 8 可见 α 和 a 变化对锚固装置 1、2 螺栓横截面应力的影响。由图 8 (a) 可见, 当 a 在外伸梁 CE 前段时, σ_{1max} 随 a 增大线性减小; 当 a 在外伸梁的中后段时, σ_{1max} 随 a 增大线性增大; α 对 σ_{1max} 的影响较小。由图 8 (b) 可见, 当 $a < l_{CE}/2$ 时, σ_{2max} 随 a 增大近似线性减小; 当 $a > l_{CE}/2$ 时, σ_{2max} 随 a 增大近似线性增大; α 对 σ_{2max} 的影响不大。由图 8 (c)、图 8 (d) 可见, 随 a 和 α 的变化, τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 变化相同, 当 $a < l_{CE}/2$ 时, τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 随 a 增大非线性增加, 当 $a > l_{CE}/2$ 时, τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 随 a 增大缓慢减小, α 越大 τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 越小。 a 在 $l_{CE}/2$ 附近时, τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 最小, α 的变化对 τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 基本无影响; a 在 $2l_{CE}/3 \sim l_{CE}$ 内, a 和 α 越大 τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 越小。

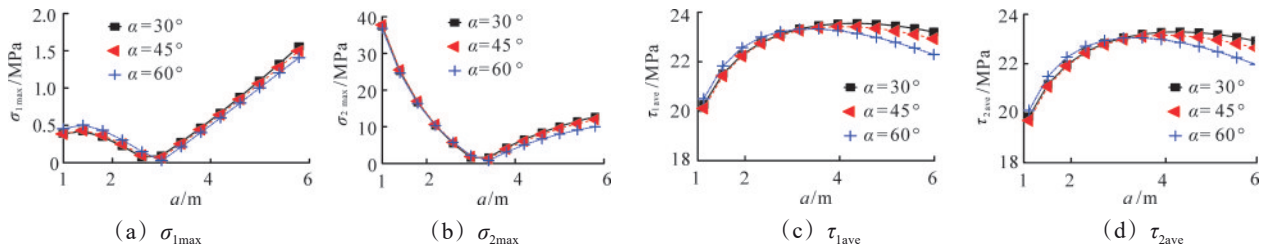


图 8 α 和 a 对锚固装置 1、2 的螺栓横截面应力影响(固定梁上)

Fig.8 effect of angle α and a on the cross-sectional stress of the bolts of anchoring devices 1 and 2 (on the fixed beam)

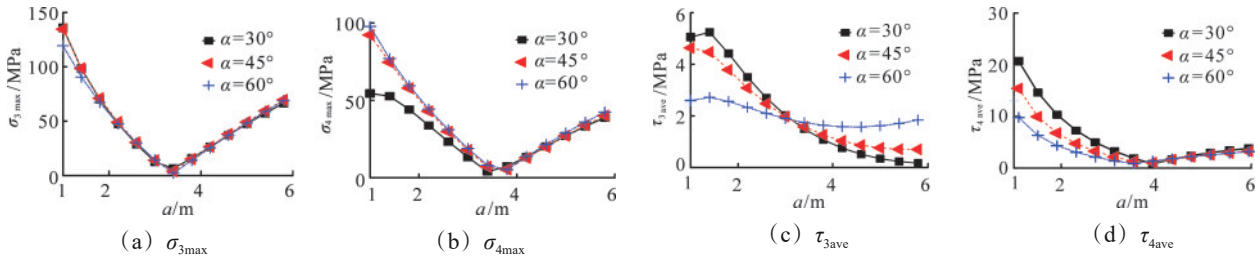


图 9 α 和 a 对锚固装置 3、4 的螺栓横截面应力影响(固定梁上)

Fig.9 effect of angle α and a on the cross-sectional stress of the bolts of anchoring devices 3 and 4 (on the fixed beam)

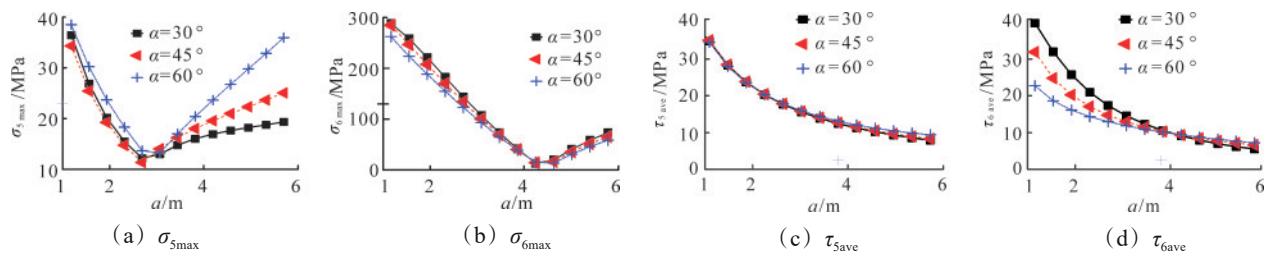


图 10 α 和 a 对锚固装置 5、6 的螺栓横截面应力影响(固定梁上)

Fig.10 effect of angle α and a on the cross-sectional stress of the bolts of anchoring devices 5 and 6 (on the fixed beam)

由图 9 可见 α 和 a 变化对锚固装置 3、4 螺栓横截面应力的影响。由图 9 (a) 可见, 当 $a < 0.54l_{CE}$ 时, σ_{3max} 随 a 增大线性减小; 除以上情况外, σ_{3max} 随 a 增大线性增大; α 的变化对 σ_{3max} 基本无影响。由图 9 (b) 可见, 当 $a < 0.55l_{CE}$ 时, σ_{4max} 随 a 增大迅速减小; 除以上情况外, σ_{4max} 随 a 增大线性增大; α 的变化对 σ_{4max} 基本无影响。由图 9 (c) 可见, 当 $a < 0.48l_{CE}$ 时, τ_{3ave} 随 a 增大非线性减小, 随 α 角增大而减小; 除以上情况外, τ_{3ave} 随 α 角增大而增大。由图 9 (d) 可见, 当 $a < 0.56l_{CE}$ 时, τ_{4ave} 随 a 增大非线性减小, 随 α 增大而减小; 除以上情况外, τ_{4ave} 随 a 增大缓慢增加, α 的增大对其几乎无影响。

显然, 就锚固装置 3、4 螺栓横截面应力而言, $a = (0.48 \sim 0.65)l_{CE}$ 是合适取值, 在此区间, σ_{3max} 和 σ_{4max} 均不大于 20 MPa, τ_{3ave} 、 τ_{4ave} 均不大于 3 MPa, α 的变化对螺栓横截面应力的影响不大。

由图 10 可见 α 和 a 变化对锚固装置 5、6 的螺栓横截面应力的影响。由图 10 (a) 可见, 当 $a <$

$2l_{CE}/5$ 时, σ_{5max} 随 a 增大近似线性减小; 除以上情况外, σ_{5max} 随 a 增大迅速增大, 且随 α 增大而增大。由图 10 (b) 可见, 当 $a < 2l_{CE}/3$ 时, σ_{6max} 随 a 增大线性减小, 随 α 增大而减小; 除以上情况外, σ_{6max} 随 a 增大缓慢线性增加, 随 α 增大而减小。由图 10 (c) 可见, τ_{5ave} 随 a 增大非线性减小, α 的变化对其基本无影响。由图 10 (d) 可见, 当 $a < 2l_{CE}/3$ 时, τ_{6ave} 随 a 增大非线性减小, 随 α 增大而减小; 除以上情况外, τ_{6ave} 随 α 增大而增大。

显然, $a = 2l_{CE}/5$ 时, σ_{5max} 最小, a 越大, τ_{5ave} 越小; $a = (2/3 \sim 4/5)l_{CE}$ 时, σ_{6max} 较小, a 越大, τ_{6ave} 越小。综合考虑锚固装置 5、6 螺栓应力, $a = 3l_{CE}/4$, $\alpha = 45^\circ$ 最合理。

$\alpha = 45^\circ$ 时, 各锚固装置螺栓横截面所受应力随 a 的变化见图 11, 应力与 a 的拟合函数见式 (23) ~ 式 (33), 分别对应图 11 中的实线。由图 11 (a) 可见, 当 a 在外伸梁 CE 中后段时, 各装置螺栓横截面的正应力相对较小, 比较而言, 锚固装置 3、

6 螺栓横截面的最大正应力是控制应力。由图 11 (b) 可见, τ_{1max} 和 τ_{2max} 最大, τ_{3ave} 和 τ_{4ave} 最小, 且基本不随 a 的变化而变化。当 $a=2l_{CE}/3$ 时, 各装置螺栓横截面所受应力最合理, 其中 τ_{1ave} 和 τ_{2ave} 最大, 均为 22.9 MPa, σ_{3max} 和 σ_{6max} 最大, 分别为 26.4 MPa

和 21.0 MPa。这是因为外伸梁 CE 上的竖向分布力和集中力首先传递给点 C (锚固装置 3 螺栓) 和点 D (锚固装置 6 螺栓), 而斜撑梁 GD 的水平分量使 AC 梁产生轴向拉力, 该轴向拉力使得装置 1 和 2 的螺栓产生了很大的剪力。

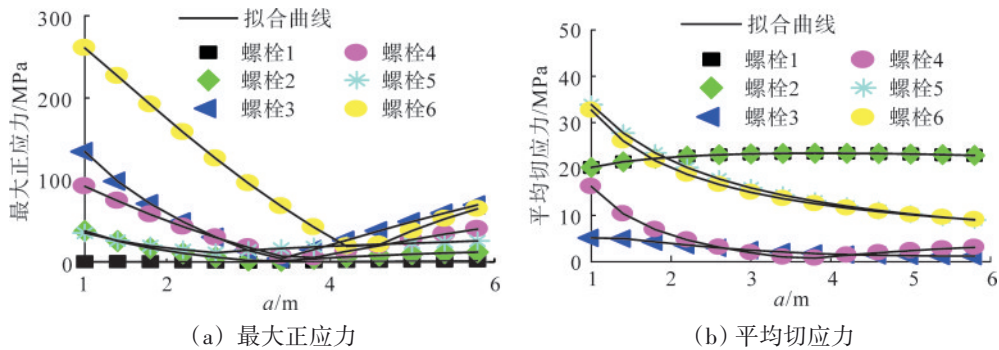


图 11 锚固装置螺栓应力与 a 的关系(固定梁上)

Fig.11 relationship between cross-sectional stress of bolts and a

$$\begin{aligned} \sigma_{1max} &= -0.001\ 136x^5 - 0.213\ 5x^4 + 1.5x^3 + \\ &\quad 4.713\ x^2 + 6.396x - 2.606, \quad (23) \\ \sigma_{2max} &= 1.038x^3 + 14.47x^2 - 61.86x + 86.69, \quad (24) \\ \sigma_{3max} &= -1.218x^4 + 14.41x^3 - 39.93x^2 - 37.92x + 197.9, \quad (25) \\ \sigma_{4max} &= -1.025x^4 + 13.78x^3 - 53.88x^2 + 39.96x + 92.25, \quad (26) \\ \sigma_{5max} &= -0.075\ 0x^6 + 1.687x^5 - 14.85x^4 + 63.62x^3 - \\ &\quad 131.4x^2 + 105x + 11.31, \quad (27) \\ \sigma_{6max} &= 3.768x^3 - 20.95x^2 - 49.23x + 327.3, \quad (28) \\ \tau_{1,2ave} &= 0.071\ 64x^3 - 1.025x^2 + 4.604x + 16.29, \quad (29) \\ \tau_{3ave} &= 0.201\ 1^2 - 2.257x + 7.002, \quad (30) \\ \tau_{4ave} &= -0.355\ 6x^3 + 5.063x^2 - 22.7x + 33.26, \quad (31) \\ \tau_{5ave} &= -0.308\ 1x^3 + 4.356x^2 - 22.31x + 51.19, \quad (32) \\ \tau_{6ave} &= -0.036\ 38x^3 + 4.946x^2 - 23.79x + 50.74. \quad (33) \end{aligned}$$

由图 8~ 图 11 可以看出, 当超长悬挑钢支架固定在梁上时, 随 a 的变化, σ_{6max} 在 260 MPa 到 10 MPa 之间变化, τ_{6ave} 在 40 MPa 到 7 MPa 之间变化, 这是所有螺栓中应力变化区间最大的。基于此, 选择对装置 6 螺栓最有利区间, 即 $a=(2/3\sim 4/5)l_{CE}$ 来综合评价各装置螺栓的应力分布。在此区间, 除 σ_{3max} 偏大以外 (仍然小于 σ_{6max}), 其他螺栓横截面应力都较小。对层高 (CG) 从 3.5 m 到 5 m, 悬挑梁 CE 从 6 m 到 9 m 条件下的两种悬挑钢支架各螺栓受力进行计算, 结果表明两个变参数对各螺栓横截面应力的影响规律相同。

2 工程应用

基于悬挑钢支架锚固装置的螺栓的受力分析,

对 σ_{6max} 最敏感的参数 a 和 α 进行优化, 得到 $a=3l_{CE}/4$ (4.65 m) 和 $\alpha=45^\circ$ 。采用以上优化参数的两种悬挑钢支架的设计方案见图 12。将其应用于如图 13 所示的荆州市中医医院中医特色大楼的超长挑檐施工中。工程设计概况如下: 沿建筑外圈 (56.5 m) 闭合设置钢平台, 钢平台沿最外侧周长为 298 m, 长为 100 m, 宽为 49 m, 悬挑长度为 6.2 m。根据实际工况, 钢支架所用的工字钢型号为 32a、18[#], 钢平台面层铺设 3 mm 厚花纹钢板, 各锚固装置布置和螺栓尺寸见图 3。

结合工程实际, 计算钢平台上满布脚手架时悬挑钢支架 CE 梁上 (32a 工字钢) 的分布载荷为 4.95 kN/m, 点 E 处集中载荷为 1.09 kN, 利用 COMSOL 对图 12 所示两种悬挑钢支架进行精细化建模。依据图 3 中锚固装置的螺栓选型和布局, 对悬挑钢支架以及各锚固装置的螺栓的受力进行分析计算, 分别得到钢支架和各螺栓水平方向 (x 向) 和竖直方向 (y 向) 的应力, 见图 14, 计算结果见表 1 和表 2。基于悬挑钢支架的受力和约束, 锚固螺栓 1、2、6 的切应力以及锚固螺栓 3、5 的正应力可以由其 x 向看出, 锚固螺栓 3、5 的切应力以及锚固螺栓 1、2、6 的正应力可以由其 y 向看出, 锚固螺栓 4 的正应力和切应力需要根据其 x 向应力和 y 向应力计算得到。

由图 14、表 1 和表 2 可以看出, COMSOL 模拟的结果和 Matlab 计算的结果比较接近, 而且关于各锚固螺栓的应力分布规律相同。不管悬挑钢支架固定在柱上还是梁上, 锚固装置 1、2 的螺栓横

截面平均切应力基本相等, 锚固装置2的螺栓横截面最大正应力远大于锚固装置1的螺栓横截面最大正应力。与钢支架固定在梁上相比, 钢支架固定在柱上时, 锚固装置3~6的螺栓横截面应力稍小。这是因为钢支架固定在梁上时, 没有柱的支撑作用, 锚固装置3~5的螺栓间接承担了柱的支撑作

用。这说明本文关于钢支架的计算模型和计算结果可准确反应各种工况下悬挑钢支架锚固装置的力学变化和分布, 同时也说明将该设计方案应用到荆州市中医医院中医特色大楼的挑檐施工中较安全, 因为螺栓材料Q235钢的许用应力远大于各个螺栓的最大正应力。

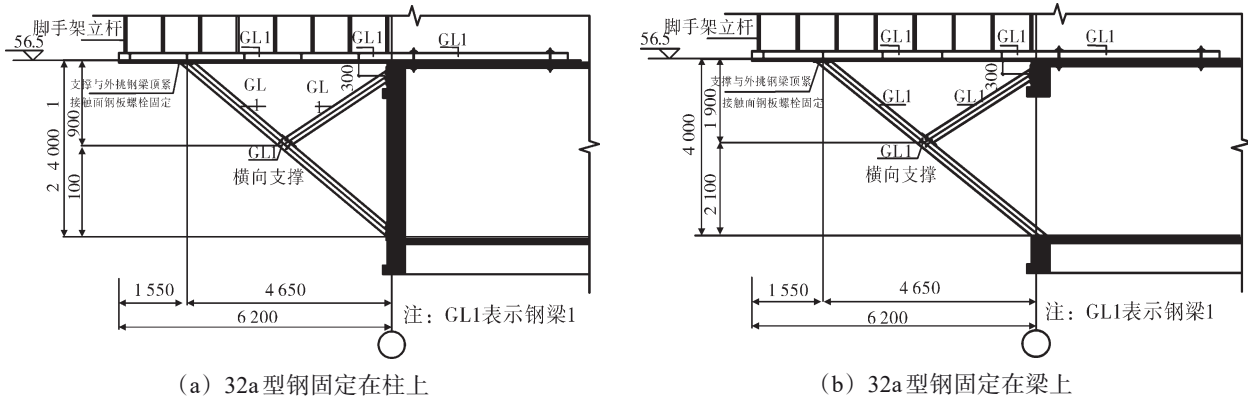


图 12 钢平台一榀框架安装示意(单位:mm)

Fig.12 one truss steel frame used for super-long steel platform(unit: mm)



图 13 13层钢平台安装实景

Fig.13 installation of 13-story steel platform

表 1 固定在柱上超长悬挑钢支架锚固装置的螺栓横截面应力

Tab.1 bolt cross-section stress of anchoring device for super-long cantilevered steel support fixed on column

类型	螺栓横截面最大正应力/MPa						螺栓横截面平均切应力/MPa					
	锚固装置1	锚固装置2	锚固装置3	锚固装置4	锚固装置5	锚固装置6	锚固装置1	锚固装置2	锚固装置3	锚固装置4	锚固装置5	锚固装置6
计算值	0.000 2	3.65	0.64	5.28	1.69	7.29	10.57	10.57	0.12	0.06	4.40	5.03
模拟值	0.000 3	3.60	0.60	5.30	1.70	7.30	11.00	11.00	0.10	0.05	4.50	5.00

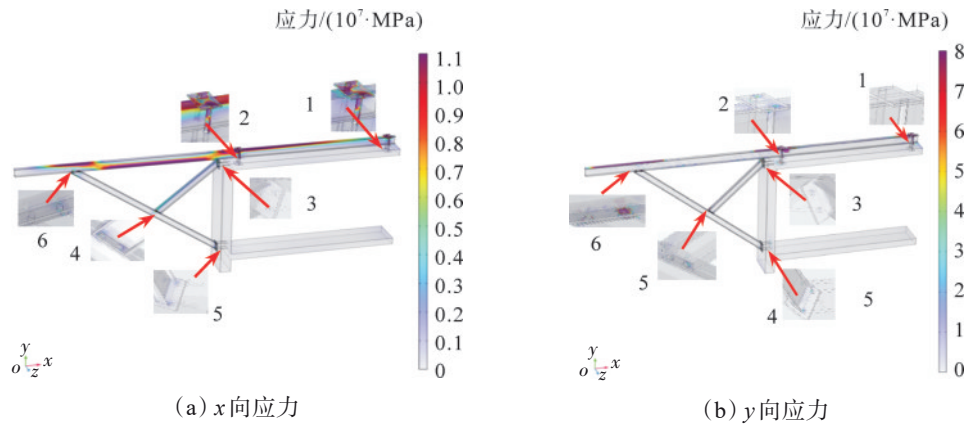


图 14 固定在柱上超长悬挑钢支架及锚固螺栓应力

Fig.14 stresses of the super-long steel cantilevered-frame and its anchoring bolts anchored on column

表 2 固定在梁上超长悬挑钢支架锚固装置的螺栓横截面应力

Tab.2 bolt cross-section stress of anchorage device for super-long cantilevered steel support fixed on beam

类型	螺栓横截面最大正应力/MPa						螺栓横截面平均切应力/MPa					
	锚固装置 1	锚固装置 2	锚固装置 3	锚固装置 4	锚固装置 5	锚固装置 6	锚固装置 1	锚固装置 2	锚固装置 3	锚固装置 4	锚固装置 5	锚固装置 6
计算值	0.43	4.00	19.46	10.23	10.73	11.28	11.36	11.36	0.43	0.72	5.19	5.09
模拟值	0.40	4.00	20.00	10.00	11.00	11.00	11.50	11.50	0.40	0.70	5.00	5.00

3 结论

提出 2 种由螺栓锚固的下支撑和悬挑梁结合的超长悬挑钢支架模型, 对模型中的参数进行优化。根据优化结果将两种悬挑钢支架设计方案应用于实际工程, 并比较锚固装置螺栓计算应力与模拟应力, 由计算结果得出如下结论。

(1) 当斜撑梁固定在外伸梁 3/4 长度位置且斜拉梁与外伸梁夹角为 45° 时, 2 种悬挑钢支架所有锚固装置螺栓横截面最大正应力组合值和平均切应力组合值均最小。

(2) 悬挑钢支架水平固定段的锚固螺栓横截面平均切应力远大于其最大正应力。当斜撑梁固定于外伸梁中后段, 钢支架固定在柱上时, 平均切应力随斜撑梁与外伸梁夹角减小而微弱增大, 钢支架固定在梁上时, 平均切应力随斜撑梁与外伸梁夹角减小, 随斜拉梁与外伸梁夹角增大而缓慢减小。

(3) 悬挑钢支架斜拉梁两端的锚固螺栓横截面最大正应力远大于其平均切应力。若钢支架固定在柱上且斜撑梁固定于外伸梁中后段, 最大正应力处于最小区段, 若固定在梁上且斜撑梁固定于外伸梁中间段时, 最大正应力处于最小区段。

(4) 悬挑钢支架斜撑梁与柱/梁的锚固装置螺

栓横截面的最大正应力和平均切应力较大。当斜撑梁固定于外伸梁中后段, 钢支架固定在柱上, 最大正应力较小, 钢支架固定在梁上, 最大正应力随斜撑梁与外伸梁的夹角减小而增大, 随斜拉梁与外伸梁的夹角增大而增大。

(5) 2 种悬挑钢支架斜撑梁与外伸梁的锚固装置螺栓横截面最大正应力最大, 当斜撑梁固定于外伸梁的中后段时, 其锚固装置的螺栓横截面最大正应力处于较小区段。

本文研究结论仅适用于所提出的 2 种超长悬挑钢支架, 数值计算结果随着实际工程中锚固螺栓横截面应力的监测技术进步而进一步得到验证。

参考文献(References):

[1] 刘树宝. 下撑式悬挑型钢施工平台设计方案研究与应用[D]. 济南: 山东大学, 2020: 4-5.
 [2] 陈凯荟. 风荷载作用下超高层悬挑脚手架力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020: 3-4.
 [3] 赵金昭, 张晓禹, 黄海霞, 等. 花篮螺栓斜拉式悬挑工字钢在高层住宅施工中的应用[J]. 建筑技术, 2021, 52(12): 1467-1470. ZHAO Jinzhao, ZHANG Xiaoyu, HUANG Haixia, et al. Application of turnbuckle cable-stayed cantilever H-type steel in high-rise residential building construction[J]. Architecture Technology, 2021, 52(12): 1467-1470.
 [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 94-144.
 [5] 中国建筑科学研究院. 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规

- 范:JGJ 130—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011:87-92.
- [6] 姚谨英. 建筑施工手册[M].6版.北京:中国建筑工业出版社,2021:3-10.
- [7] 邓云天,范俊,黄达.悬挑支撑体系构造搭设及数值模拟分析[J].建筑技术开发,2021,48(17):76-77.
DENG Yuntian, FAN Jun, HUANG Da. Analysis on structural erection and numerical simulation of cantilever support system[J]. Building Technology Development,2021,48(17):76-77.
- [8] 伍广锋.对悬挑脚手架悬挑高度与型钢锚固长度的研究探讨[J].福建建设科技,2021(6):100-101.
WU Guangfeng. Study on cantilever height and steel anchorage length of cantilever scaffold[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2021(6):100-101.
- [9] 方从兵,金阳,陶海冰,等.叠合楼板中悬挑工字钢预埋压环设置分析研究[J].建筑施工,2021,43(3):391-393.
FANG Congbing, JIN Yang, TAO Haibing, et al. Analytical research on setting of embedded pressure ring of cantilever I-beam in laminated floor slab[J]. Building Construction,2021,43(3):391-393.
- [10] 何淳健,方华建.梁侧锚固螺栓悬挑脚手架施工技术[J].建筑施工,2020,42(11):2083-2085.
HE Chunjian, FANG Huajian. Construction technology of cantilever scaffold with anchor bolt on beam side[J]. Building Construction,2020, 42(11):2083-2085.
- [11] 陆耀波,王东英,温喜廉,等.高层大跨悬挑结构施工过程有限元模拟分析[J].广东土木与建筑,2023,30(9):87-89.
LU Yaobo, WANG Dongying, WEN Xilian, et al. Finite element simulation analysis of construction process of long-span cantilever structure[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2023, 30(9):87-89.
- [12] OBAIDAT Y T, HADDAD R H, ABDULWAHAB M A. Innovative strengthening schemes of concrete cantilever beams using CFRP sheets: end anchorage effect [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 1215-1225.
- [13] MA S, CHEN M H, SKELTON R E. Design of a new tensegrity cantilever structure[J]. Composite Structures, 2020, 243: 112188.
- [14] ZHANG D W, SHI H F, ZHU J H, et al. Cover separation of CFRP strengthened beam-type cantilevers with steel bolt anchorage[J]. Engineering Structures, 2018, 156: 224-234.
- [15] ZHANG S S, YU T. Fibre-reinforced polymer strengthening and fibre Bragg grating-based monitoring of reinforced concrete cantilever slabs with insufficient anchorage length of steel bars[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(11): 1684-1698.
- [16] 殷粉芳,陈年和,郭牡丹,等.高层建筑结构悬挑平台设计与施工技术研究[J].江苏建筑,2016(1):78-81.
YIN Fenfang, CHEN Nianhe, GUO Mudan, et al. Design and construction technology research of cantilever platform in high-rise building structure[J]. Jiangsu Construction, 2016(1): 78-81.
- [17] SAJEDI S O, MIRGHADERI S R, KESHAVARZI F. Frame-type load bearing system for long-span cantilevers[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2018, 27(9): e1469.
- [18] 于光卫,李丽丽.三角桁架悬挑架在装配剪力墙结构工程中的应用[J].工程质量,2024,42(8):38-41.
YU Guangwei, LI Lili. Selection and analysis of external protective scaffold of prefabricated concrete structure[J]. Construction Quality, 2024, 42(8): 38-41.
- [19] HU X B, LI Y, XIE X D. A study on a U-shaped piezoelectric coupled beam and its corresponding ingenious harvester[J]. Energy, 2019, 185: 938-950.
- [20] HU X B, LU C, ZHU X Q, et al. A theoretical study of estimating the elastic responses of framed self-centering wall structures under lateral loading[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(12): 3714-3725.