

DOI: 10.7511/jslx20231110001

超大跨度空间 X 撑结构屈曲强度特性研究

付殿福^{*1}, 陈景杰², 张梦竹¹, 张伟为³

(1. 中海油研究总院, 北京 100027; 2. 大连理工大学 船舶工程学院, 大连 116024;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 为了深入研究深水导管架平台超大跨度空间 X 撑结构的承载机理, 合理地指导工程设计, 本文在已有理论模型的基础上, 研究了空间 X 撑结构(有面外支撑 X 撑结构)在典型的载荷模式、刚度特性、端点约束以及长度因子(交点位置)等参数下屈曲长度系数的变化规律, 结合实际工程深水导管架结构, 辅助有限元计算对超大跨度有面外支撑 X 撑结构进行了屈曲强度分析, 最后得到了可为工程设计提供有效技术支持的多个结论。

关键词: 面外支撑; X 撑结构; 刚度特性; 长度因子; 屈曲长度系数

中图分类号: O317⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-4708(2024)03-0542-09

1 引言

近年来, 随着中国海洋石油开发水平的不断提升, 工作水深不断走向深水。以海基一号为代表的深水导管架平台是中国中深水海洋油气开发的定海神针与降本利器, 对保障国家能源安全和提升深海油气资源开发能力具有重要意义。采用有面外支撑的超大跨度空间 X 撑结构是实现海基一号深水导管架结构承载与减重优化的重要措施之一。如果设计不当, 在应用过程中极可能发生由 X 撑结构屈曲失稳而引发的结构坍塌变形。因此, 需要探究 X 撑结构在极限荷载下屈曲失稳机理, 以便更好地指导工程结构设计。

较早时期(2009 年之前), 有关 X 撑结构屈曲失稳机理研究的代表性文献^[1-10]中, 大多是将 X 撑结构简化为两根对称或非对称交叉的弹性杆, 基于弹性屈曲理论辅以数值计算对面对称交叉的 X 撑杆结构进行分析, 没有考虑具有面外支撑 X 撑结构的屈曲特性问题。近期康元顺等^[11-12]先后提出了有面外支撑 X 撑结构屈曲理论分析模型。该理论模型是以单个 X 撑结构为研究对象, 对于工程中成体系存在的 X 撑结构的适用性还有待商榷, 需要借助有限元软件对整体结构进行特征值屈曲分析^[13-16]。

因此, 本文基于已有理论分析模型^[12], 开展有面外支撑 X 撑结构在多因素作用下的参数敏感性研究, 设计参数包括 X 撑结构受载拉压比、面外支撑平动和转动刚度、端点约束以及长度因子(交点位置)等, 结合深水导管架结构, 辅助有限元模拟计算, 分析超大跨度有面外支撑 X 撑结构的屈曲强度特性。

2 带有面外支撑 X 撑结构模型

文献^[11, 12]给出的有面外支撑 X 撑结构理论模型的研究对象如图 1 所示。其有两个对称的 X 撑结构, $AB = A'B'$ 和 $CE = C'E'$, 面外支撑 DD'

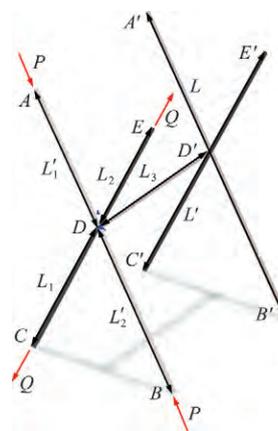


图 1 有面外支撑 X 撑结构模型

Fig. 1 A model of a X-brace structure with out-of-plane support

收稿日期: 2023-11-10; 修改稿收到日期: 2023-11-29.

作者简介: 付殿福^{*} (1984-), 男, 硕士, 高级工程师.

引用本文: 付殿福, 陈景杰, 张梦竹, 等. 超大跨度空间 X 撑结构屈曲强度特性研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(3): 542-549, 598.

FU Dian-fu, CHEN Jing-jie, ZHANG Meng-zhu, et al. Study on buckling strength characteristics of the super-span space X-brace structure[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 542-549, 598.

杆垂直于 $ABCE$ 平面,支撑对角线 AB 杆受压力作用, CE 杆受拉力作用。为计算方便,假设 $A'B'$ 杆与 $C'E'$ 杆未受外力作用。采用不同长度的连续对角线考虑结构的几何不对称性, $L_1 + L_2 \neq L'_1 + L'_2$,并且交点不一定在中点,即 $L_1 \neq L_2, L'_1 \neq L'_2$ 。受力的不对称性通过两支撑对角线的不同受力情况进行考虑,即 $|Q| \neq |P|$ 。

3 有面外支撑 X 撑结构参数敏感性分析

3.1 长度因子和面外支撑刚度敏感性分析

无量纲平动刚度因子 m 和无量纲转动刚度因子 n 定义为

$$m = K_j L^3 / (3EI), n = C_j L / (4EI) \quad (1,2)$$

式中 K_j 和 C_j 分别为 j 位置点的平动刚度和转动刚度($j=A$ 时对应端点 $A, j=D$ 时对应端点 $D, j=B$ 时对应端点 $B, j=D$ 时 K_D 和 C_D 表达式如式(3~6)所示^[12]。

当 AB 杆发生面内($ABCE$ 平面(图 1))屈曲时,点 D 的平动刚度 K_D 由 CE 杆决定,即

$$K_{D_IN} = EA / L \quad (3)$$

当 AB 杆发生面外屈曲时, K_D 由两部分组成

$$K_{D_OUT} = K_{IN} + K_{OUT} \quad (4)$$

式中 K_{IN} 为由面内 CE 杆提供的支撑刚度(式(5)), K_{OUT} 为由面外 DD' 杆和 X 支撑杆 $A'B'C'E'$ 共同提供的支撑刚度,即

$$K_{IN} = P\lambda \sinh(\lambda) / \{L [(1-\alpha)\alpha \lambda \sinh(\lambda) - \sinh(\lambda - \lambda\alpha) \sinh(\lambda\alpha)]\} \quad (5)$$

$$\lambda^2 = PL^2 / (EI)$$

$$K_{OUT} = K_{DD'} K_{A'B'C'E'} / (K_{DD'} + K_{A'B'C'E'}) \quad (6)$$

$$K_{DD'} = E_3 A_3 / L_3$$

$$K_{A'B'C'E'} = \frac{3EI I_1}{L'^3 (1-\alpha')^2} + \frac{3EI}{L^3 (1-\alpha)^2}$$

式中 α 和 α' 为长度因子($\alpha = L_1 / L, \alpha' = L'_1 / L'$),代表交点位置。

对于点 D 转动刚度 C_D 也需要考虑两种屈曲模式。

当 AB 杆发生面内($ABCE$ 平面(图 1))屈曲时, C_{D_IN} 由式(7)计算得

$$C_{D_IN} = \frac{PL_1 \sinh(\lambda)}{\lambda \cosh(\alpha\lambda) \cosh(\alpha\lambda - \lambda) - \sinh(\lambda)} \quad (7)$$

当 AB 杆发生面外屈曲时, C_{D_OUT} 由式(8)计算得

$$C_{D_OUT} = \frac{3EI}{L_1 [3 + (1-\alpha)^3 + \alpha^3]} \quad (8)$$

两端固定时端部约束条件为 $m_A = m_B = \infty,$

$n_A = n_B = \infty$; 两端简支时端部约束条件为 $m_A = m_B = \infty, n_A = n_B = 0$ 。两端任意线弹性约束时,由于 X 撑结构端点与基础采用刚性焊接,极大程度上限制了其平动自由度,可认为端点平动刚度为无限大,即 $m_A = m_B = \infty$ 。端点转动刚度与结构端部构造、面外支撑杆尺寸以及端部荷载特性等因素有关,通常取其有限值,在此取端点转动刚度 $n_A = n_B = 10$ 。图 2~图 4 分析了三种约束下交点 D 在转动刚度因子 $n_D = 0$ 、平动刚度因子 $m_D = 10, 30, 50$ 时长度因子与屈曲长度系数的对应关系。

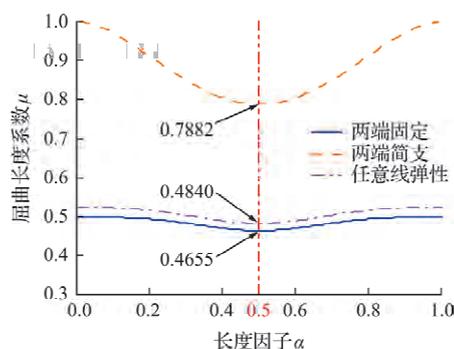


图 2 交点平动刚度因子 $m_D = 10.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 2 Calculation results of buckling length coefficient when translational stiffness factor $m_D = 10.0$ at the intersection point

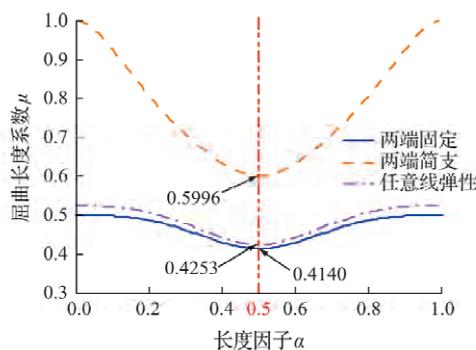


图 3 交点平动刚度因子 $m_D = 30.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 3 Calculation results of buckling length coefficient when translational stiffness factor $m_D = 30.0$ at the intersection point

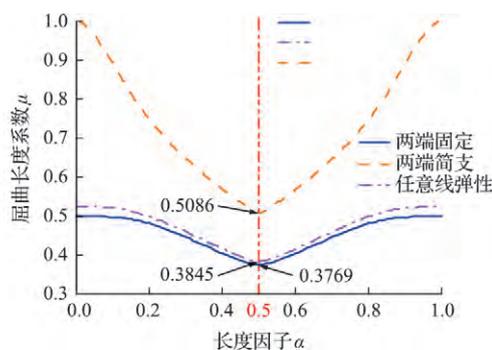


图 4 交点平动刚度因子 $m_D = 50.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 4 Calculation results of buckling length coefficient when translational stiffness factor $m_D = 50.0$ at the intersection point

从图 2~图 4 可以看出,随着长度因子 α 的增

加,三种约束条件下 X 撑的屈曲长度系数 μ 呈现先减小后增加的变化趋势。当仅考虑交点平动刚度时,交点位置越靠近端部 ($\alpha=0$ 或 $\alpha=1.0$),平动刚度的影响越小,而交点位置越靠近跨中 ($\alpha=0.5$),X 撑结构屈曲长度系数越小,此时整体结构趋于稳定。

选取交点位置在跨中开展平动刚度因子的敏感性分析,如图 5 所示,分析了交点在跨中和平动刚度因子 $m_D=10.0,30.0,50.0,100.0$ 和 150.0 时 X 撑结构的屈曲强度特性。

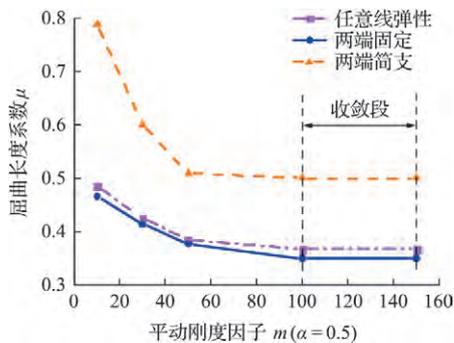


图 5 交点在跨中时 ($\alpha=0.5$) 的屈曲长度系数
Fig. 5 Calculation results of buckling length coefficient when the intersection point is in mid-span ($\alpha=0.5$)

从图 5 可以看出,随着面外支撑平动刚度因子 m_D 的增加,X 撑结构屈曲长度系数逐渐减小,最终在 $m_D=100.0$ 时趋于稳定,可认为 $m_D \geq 100.0$ 时面外支撑对 X 撑结构稳定性具有较好的支撑效果。

实际工程应用中,面外支撑杆的远端点连接在刚度较大的基础结构上,面外支撑杆提供的平动刚度因子 m_D 远大于 100。为便于讨论,假定面外支撑杆与 X 撑结构拥有相同的材料属性和结构长度,当 $m_D > 100.0$ 时,面外支撑杆面积只需满足 $A_c/A > 0.08$ (A_c 为面外支撑杆的横截面积, A 为面内受压杆的横截面积)就可以起到良好的支撑效果。

图 6~图 8 给出了交点处平动刚度因子 $m_D=0$ 时不同转动刚度因子 ($n_D=1.0,4.0$ 和 7.0) 条件下屈曲长度系数 μ 与长度因子 α 的对应关系。可以看出,当仅考虑交点转动刚度时,随着长度因子 α 的增加,三种约束条件下 X 撑结构的屈曲长度系数 μ 呈现先减小后增加再减小的变化趋势。当 $\alpha=0.5$ 时 X 撑结构的屈曲长度系数达到最大值。屈曲长度系数最小值发生在跨中两侧,其位置并不固定,与端部约束和交点转动刚度有关。

如图 9 所示,选取屈曲长度系数最小时所在的交点位置,开展交点转动刚度因子 ($n_D=1.0,4.0,7.0,10.0$ 和 13.0) 的敏感性分析。

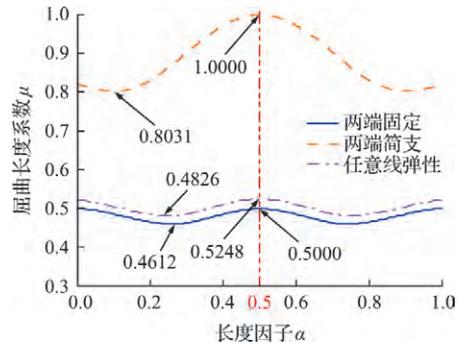


图 6 交点转动刚度因子 $n_D=1.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 6 Calculation results of buckling length coefficient when rotational stiffness factor $n_D=1.0$ at the intersection point

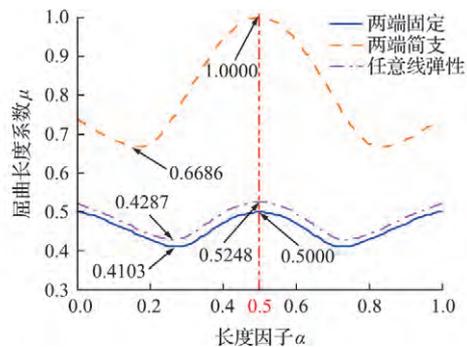


图 7 交点转动刚度因子 $n_D=4.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 7 Calculation results of buckling length coefficient when rotational stiffness factor $n_D=4.0$ at the intersection point

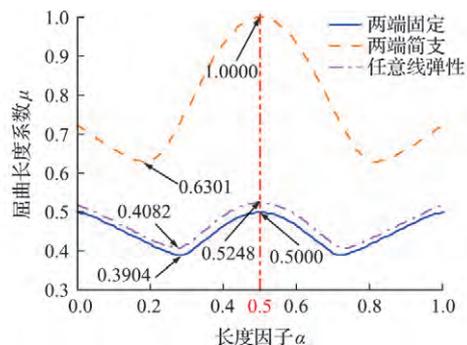


图 8 交点转动刚度因子 $n_D=7.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 8 Calculation results of buckling length coefficient when intersection rotational stiffness factor $n_D=7.0$

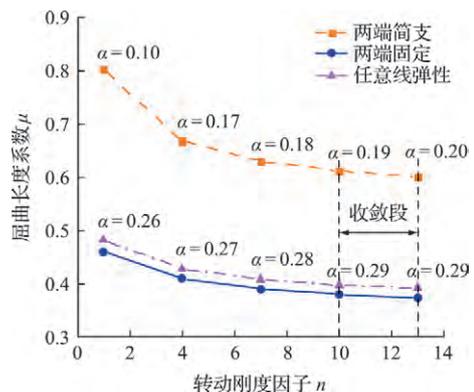


图 9 交点在跨中一侧时的屈曲长度系数
Fig. 9 Calculation results of buckling length coefficient when the intersection point is on one side of mid-span

可以看出,随着转动刚度因子的增加,X 撑结构屈曲长度系数逐渐减小,最终 $n_D = 13.0$ 时趋于稳定,可认为交点转动刚度因子 $n_D = 13.0$ 时对结构稳定具有较好的支撑效果。

实际工程中,X 撑结构的交点一般位于跨中区域,长度因子 α 在 $0.4 \sim 0.6$ 范围内。结合实际结构,综合考虑交点平动刚度和转动刚度的影响可以发现,此时交点平动刚度影响较大,转动刚度影响较小,在 X 撑结构设计中应该主要关注交点平动刚度对稳定性的影响。

3.2 拉压比参数敏感性分析

讨论端部为固支、简支和线弹性约束 ($m_A = m_B = \infty, n_A = n_B = 5$) 时不同拉压比下 X 撑结构屈曲长度系数的变化规律。

模型中 $\alpha = 0.5$,忽略面外支撑杆提供的转动刚度 ($n = 0$),分析交点平动刚度因子 $m = 0, 25, 75$ 和 100 时拉压比与屈曲长度系数的对应关系,如图 10~图 13 所示。图中横坐标 P/Q 代表拉压比, $P/Q =$ 负数表示双杆同时受压, $P/Q =$ 正数表示一杆受压,另一杆受拉。

可以看出,随着拉压比的增加,X 撑结构的屈曲长度系数先快速减小而后趋于某一固定值。这是因为在一杆受压、另一杆受拉情况下,拉杆的存在对 X 撑结构有一定的支撑作用,使屈曲长度系

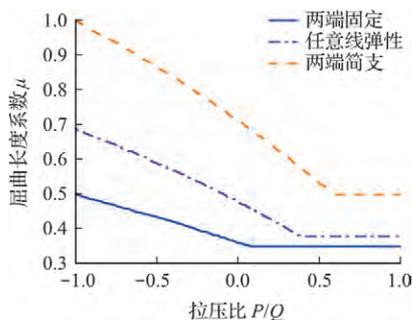


图 10 交点平动刚度因子 $m_D = 0.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 10 Calculation results of buckling length coefficient when intersection translational stiffness factor $m_D = 0.0$

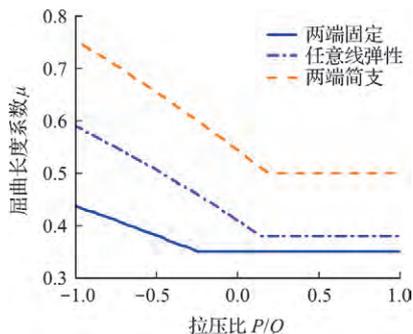


图 11 交点平动刚度因子 $m_D = 25.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 11 Calculation results of buckling length coefficient when intersection translational stiffness factor $m_D = 25.0$

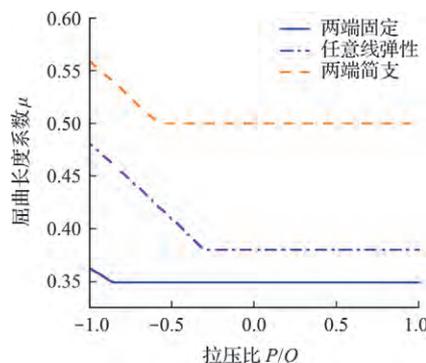


图 12 交点平动刚度因子 $m_D = 75.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 12 Calculation results of buckling length coefficient when intersection translational stiffness factor $m_D = 75.0$

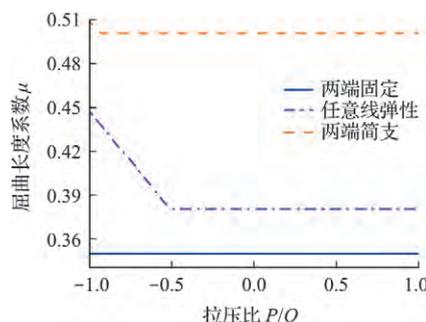


图 13 交点平动刚度因子 $m_D = 100.0$ 时屈曲长度系数
Fig. 13 Calculation results of buckling length coefficient when intersection translational stiffness factor $m_D = 100.0$

数维持在较低水平,从而使 X 撑结构不易发生受压屈曲。无论交点平动刚度如何变化,都不改变屈曲长度系数最小值,这说明当 $P/Q = 1$ 时,X 撑结构稳定性主要取决于端部约束条件,而与面外支撑无关。

3.3 理论解的验证

通过 ANSYS 有限元软件,采用 beam188 单元建立有面外支撑 X 撑结构的有限元模型。模型中长度因子为 0.5 ,面内 X 撑结构夹角为 100° ,杆件总长为 11.08488 m ,壁厚为 0.028 m ,外径为 1.372 m ,面外撑杆长度为 4.3586 m ,壁厚为 0.025 m ,外径为 0.762 m 。钢结构的弹性模型为 210000 MPa ,密度为 785 kg/m^3 ,泊松比为 0.3 ,剪切模量为 76923 MPa ,拉压屈服极限相等为 250 MPa ,采用同向强化理论进行屈曲非线性分析,使用 Newton-Raphson 法跟踪负载。加载及约束有限元模型如图 14 所示,即 X 撑结构面内撑杆两端施加全约束,另外两端施加约束只允许沿杆轴向位移;面外撑杆的端部施加全约束。

不考虑初始几何缺陷的影响,针对拉-压受载情况,有限元模拟的有面外支撑 X 撑结构载荷-位移曲线如图 15 所示,X 撑结构的极限载荷为 35309.4 kN ,其屈曲长度系数为 0.357 。由于有限元模型尺寸与导管架结果相近,其平动刚度系数大

于 100,与图 13 中理论解计算的 $m \geq 100.0$ 时两端固定 X 撑屈曲长度系数为 0.353 十分接近,这不仅验证了理论解计算的可靠性,同时也说明基于有限元软件进行的屈曲非线性分析是正确可靠的。



图 14 有面外支撑 X 撑结构有限元模型

Fig. 14 Finite model of X-brace structures with out-of-plan support

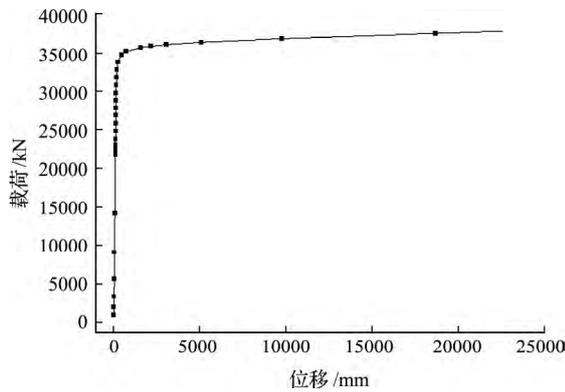


图 15 载荷位移曲线

Fig. 15 Curve of load-displacement

4 深水导管架平台中 X 撑结构屈曲特性分析

4.1 X 撑结构模型简介

深水导管架平台中 X 撑结构屈曲特性分析的局部结构模型如图 16 所示, X 撑结构(黄色)面外支撑杆(黄色)的另一端与下水桁架(红色)连接如图 17 所示,图中结构的几何尺寸列入表 1。

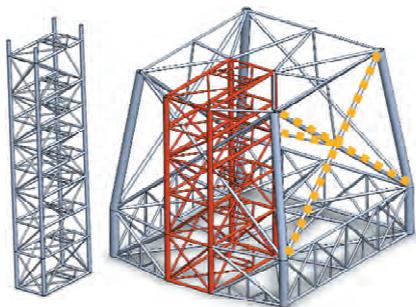
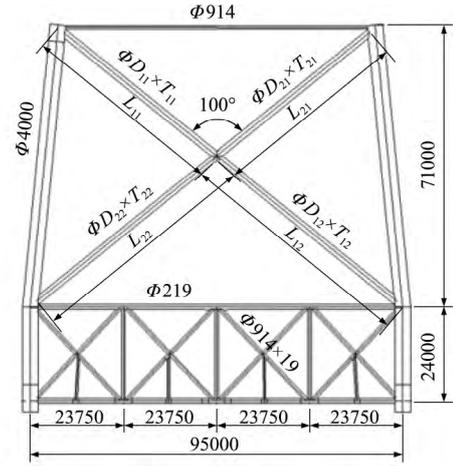
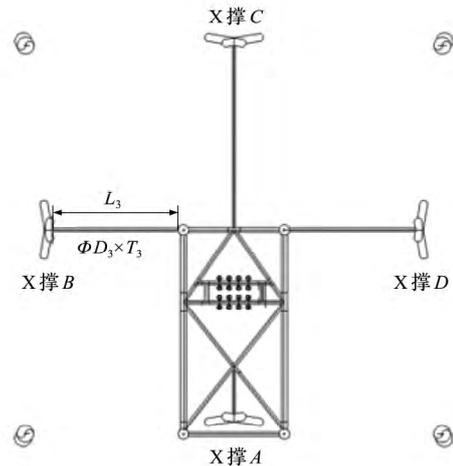


图 16 X 撑结构屈曲特性分析模型

Fig. 16 Model for buckling characteristic analysis of the X-brace structure



(a) 正视图



(b) 截面俯视图

图 17 导管架结构的几何尺寸

Fig. 17 Geometric dimension of the jacket structure

表 1 四个 X 撑结构的几何尺寸

Tab. 1 Geometric dimensions of the four X-brace structures

	ZX 撑 A	X 撑 B	X 撑 C	X 撑 D
D_3	762	762	762	762
T_3	19	13	25	13
L_3	10994	29919	43656	29919
D_{11}	1524	1829	1372	1829
D_{21}	1524	1829	1372	1829
D_{12}	1524	1829	1372	1829
D_{22}	1524	1829	1372	1829
T_{11}	28	38	25	38
T_{21}	28	32	25	32
T_{12}	35	50	35	50
T_{22}	32	32	32	32
L_{11}	48808	52182	48556	52182
L_{21}	48808	52182	48556	52182
L_{12}	61920	61153	61975	61153
L_{22}	61920	61153	61975	61153

在深水导管架平台结构中存在 4 个方向的面外支撑 X 撑结构,根据面外支撑位置的不同,将其定义为 A, B, C 和 D 四个模型,如图 18 所示,具

体几何尺寸列入表 1。X 撑结构承受拉压载荷时, 载荷沿撑杆轴线方向, 加载过程中截面保持不变, 不考虑初始几何缺陷和残余应力的影响。

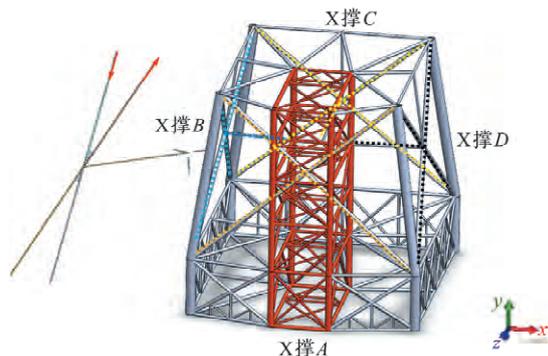


图 18 不同支撑位置的有面外支撑 X 撑结构模型
Fig. 18 Model of X-brace structures with out-of-plan support

4.2 有限元模型

基于 Workbench 软件的 beam188 单元建立深水导管架平台中 X 撑结构屈曲分析相关的局部结构有限元模型, 如图 19 所示, 模型中钢结构材料参数与 3.3 节相同。在非线性屈曲分析时不考虑风浪载荷的影响, 下水桁架和深水导管架平台的底部端点刚固。

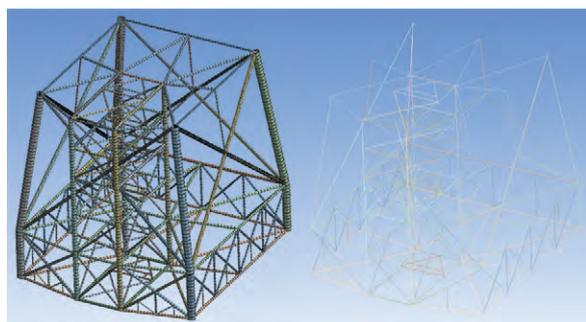


图 19 X 撑结构屈曲分析局部结构梁模型和有限元模型
Fig. 19 Beam and FEM mesh model of the local structure for buckling analysis of the X-brace structure

4.3 面外支撑刚度对 X 撑结构稳定性影响分析

为研究面外支撑刚度变化对 X 撑结构稳定性的影响, 需要将面外支撑处理为等效弹性支撑。分析各位置处的弹性支撑等效刚度时采用局部坐标系为参考坐标系, 局部坐标系的坐标原点为所分析的位置, 轴向方向和全局坐标系保持一致, 全局坐标系方向如图 18 所示。等效轴向刚度 $K_{direction}$ 通过测量端点在恒定载荷 $P_{direction}$ 下的静力学柔性变形 $\delta_{direction}$, 再根据式 (9) 计算得到。等效转动刚度 $C_{direction}$ 和等效轴向刚度的计算方式相同, 模拟时在对对应位置局部坐标系上施加恒定力矩 $M_{direction}$, 通过测量最近单元由力矩导致的弧度变化来近似柔

性旋转角度 $\theta_{direction}$, 再通过式 (10) 便可以得到各方向的等效转动刚度。结合有限元方法, X 撑结构交点处平动刚度和转动刚度列入表 2。

$$K_{direction} = \frac{P_{direction}}{\delta_{direction}}, C_{direction} = \frac{M_{direction}}{\theta_{direction}} \quad (9,10)$$

表 2 X 撑结构交点位置弹性支撑等效刚度
Tab. 2 Equivalent stiffness of elastic support at the connection position of X-brace structure

等效刚度	D_A	D_B	D_C	D_D
$K_X/N \cdot m^{-1}$	8.17E+08	1.57E+08	5.34E+08	1.71E+08
$K_Y/N \cdot m^{-1}$	7.40E+08	8.63E+08	6.35E+08	8.67E+08
$K_Z/N \cdot m^{-1}$	5.01E+08	9.03E+08	1.47E+08	9.04E+08
$C_{RX}/Nm \cdot rad^{-1}$	1.37E+09	4.78E+09	9.69E+08	4.78E+09
$C_{RY}/Nm \cdot rad^{-1}$	1.94E+09	3.24E+09	1.12E+09	3.24E+09
$C_{RZ}/Nm \cdot rad^{-1}$	2.39E+09	2.53E+09	1.66E+09	2.53E+09

实际结构中, A, B, C 和 D 四个空间 X 撑结构交点位置 α 均为 0.54, 根据面外支撑刚度敏感性分析结论, X 撑结构的屈曲长度系数主要取决于面外支撑杆的平动刚度, 其可视为轴向杆件的压缩刚度。因此, 主要考察交点平动刚度的影响, 以实际结构的等效轴向平动刚度为基准, 引入刚度变化系数 k_d , 表征了刚度相对大小

$$k_d = K_h / K_a \quad (11)$$

式中 K_a 为实际结构等效轴向平动刚度 (表 2), K_h 为模拟设计刚度。

根据深水导管架平台承受的环境载荷要求, X 撑结构通常采用双杆受力且载荷绝对值相等的形式进行设计^[17,18]。因此本文研究了 X 撑结构受等比例拉压载荷 ($P/Q=1$) 条件下 (图 18), 不同面外支撑交点平动刚度对整体结构屈曲特性的影响。图 20~图 23 给出了 X 撑结构一阶临界屈曲载荷随面外支撑刚度的变化曲线。

可以看出, 面外支撑可以提升整体结构的稳定性, 当面外支撑杆刚度大于 0 时, X 撑结构的临界屈曲载荷一定大于无面外支撑下结构的临界屈曲载荷 (刚度为 0)。增加面外支撑轴向平动刚度可以提升 X 撑结构的稳定性, 但是存在临界刚度 k_c , 超过临界刚度后, X 撑结构的稳定性会随着面外支撑刚度的增加而变差, 这是因为 X 撑结构最低阶模态出现了转变。

图 24 展示了面外支撑杆临界刚度前后各位置处的一阶模态, 当面外支撑杆平动刚度不足时, 非期望平面 X 撑结构支撑杆可能会优先屈曲; 当面外支撑杆平动刚度足够时, 一阶模态为期望 X 撑结构支撑杆屈曲。因此, 设计时应该使面外支撑杆

的平动刚度大于临界刚度,保证 X 撑结构的面外刚度足够,从而一定程度上约束本 X 撑结构平面

对其他平面的影响,将一阶模态控制在目标 X 撑结构平面内。

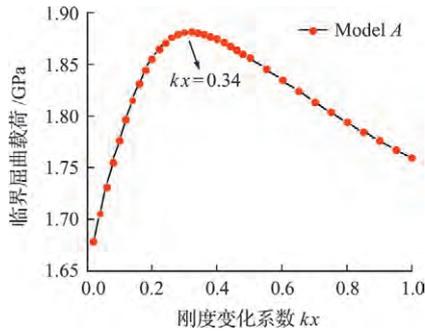


图 20 面外支撑刚度对结构临界屈曲载荷的影响 (Model A)
Fig. 20 Influence of out-of-plane stiffness on critical buckling load of structure (Model A)

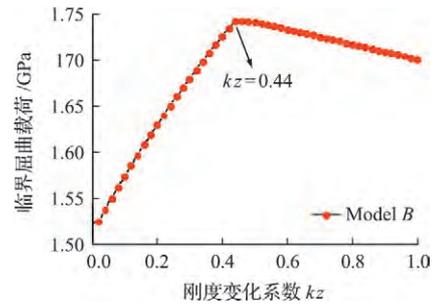


图 21 面外支撑刚度对结构临界屈曲载荷的影响 (Model B)
Fig. 21 Influence of out-of-plane stiffness on critical buckling load of structure (Model B)

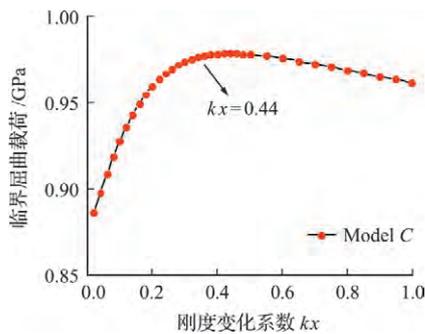


图 22 面外支撑刚度对结构临界屈曲载荷的影响 (Model C)
Fig. 22 Influence of out-of-plane stiffness on critical buckling load of structure (Model C)

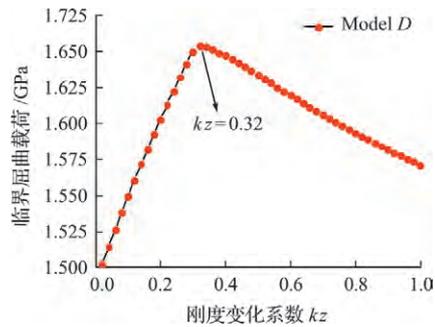


图 23 面外支撑刚度对结构临界屈曲载荷的影响 (Model D)
Fig. 23 Influence of out-of-plane stiffness on critical buckling load of structure (Model D)

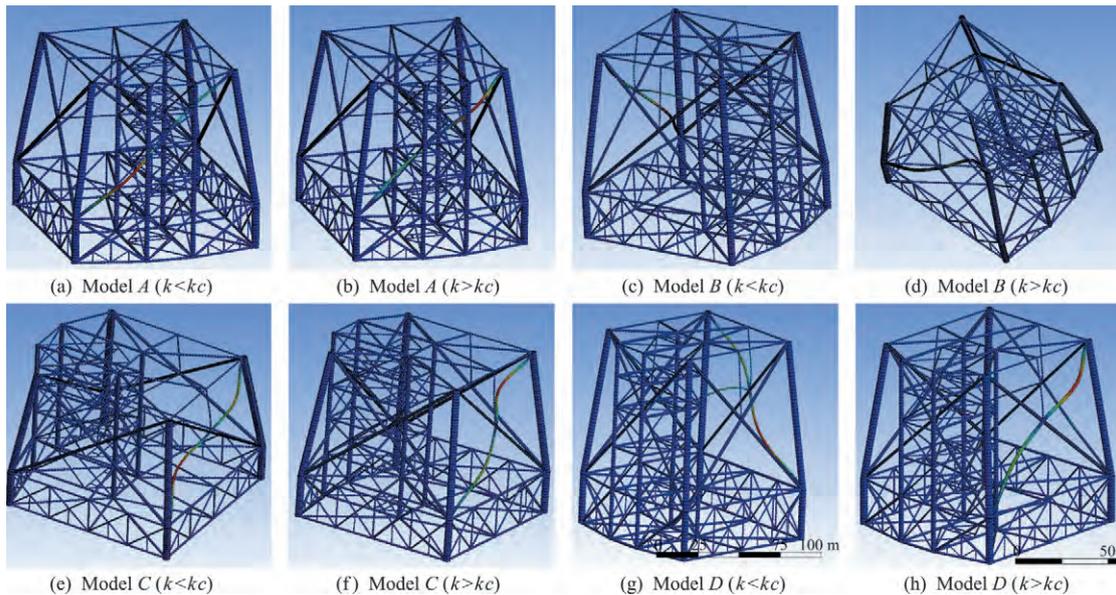


图 24 X 撑结构一阶屈曲模态
Fig. 24 1st buckling mode of the X-brace structure

5 结论

本文研究了有面外支撑超大跨度空间 X 撑结构的屈曲特性,得到了具有一定普适性和可为工程设计提供有效技术支撑的结论。

(1) X 撑结构交点位置位于跨中附近情况下,设计时主要考虑交点的面外平动刚度作用,转动刚度作用可以忽略。

(2) 当面外支撑刚度因子远大于 100.0 时,面外支撑提供的平动刚度对于 X 撑结构具有很强的

支撑作用。如果面外支撑杆与 X 撑结构撑杆的材料属性和长度相同,此时面外支撑杆横截面积只需满足 $A_c/A > 0.08$ (A_c 为面外支撑杆的横截面积, A 为 X 撑结构撑杆的横截面积) 就可以起到良好的支撑效果。

(3) 当 X 撑结构双杆受压且压力相等(拉压比 = -1) 时,结构发生屈曲的危险性最大,此时若增加面外支撑刚度,可有效增强 X 撑结构承载力;当一杆受拉一杆受压且拉压比相等(拉压比 = 1) 时, X 撑结构的抗屈曲能力最强,此时结构的稳定性与面外支撑无关,只取决于端部荷载和约束条件。

(4) 深水导管架平台中有面外支撑 X 撑结构存在临界面外支撑杆平动刚度,即 X 撑结构最低阶模态转变点。当面外支撑杆平动刚度不足时,对应的 X 撑结构平面荷载会影响别的 X 撑结构平面稳定性,从而导致其他杆屈曲。

参考文献(References):

- [1] Knapp A E. The use of X-bracing in fixed offshore platforms[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1973, **13**(2): 75-83.
- [2] Kitipornchai S, Finch D L. Stiffness requirements for cross bracing[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1986, **112**(12): 2702-2707.
- [3] El-Tayem A A, Goel S C. Effective length factor for the design of X-Bracing systems [J]. *Engineering Journal*, 1986, **23**(1): 41-45.
- [4] Stoman S H. Stability criteria for X-bracing systems [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1988, **114**(8): 1426-1434.
- [5] Stoman S H. Effective length spectra for cross bracings[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, **115**(12): 3112-3122.
- [6] Wang D Q, Boresi A P. Theoretical study of stability criteria for X-bracing systems [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, **118**(7): 1357-1364.
- [7] Thevendran V, Wang C M. Stability of nonsymmetric cross bracing systems[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, **119**(1): 169-180.
- [8] Davaran A. Effective length factor for discontinuous X-bracing systems [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2001, **127**(2): 106-112.
- [9] Moon J, Yoon K Y, Han T S, et al. Out-of-plane buckling and design of X-bracing systems with discontinuous diagonals [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, **64**(3): 285-294.
- [10] Timoshenko S, Gere J M. *Theory of Elastic Stability* [M]. New York: Dover Publications, 2009.
- [11] 康元顺, 张伟为, 刘梦娟, 等. 基于牛顿迭代算法的大型有面外支撑杆 X 撑结构的屈曲分析[J]. *工程力学*, 2022, **39**(S1): 286-295. (KANG Yuan-shun, ZHANG Wei-wei, LIU Meng-juan, et al. Buckling analysis of large-scale X-braced structures with out-of-plane support bars based on Newton's iterative algorithm [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, **39**(S1): 286-295. (in Chinese))
- [12] 崔哲华, 康元顺, 张伟为, 等. 带有任意弹性支撑的大型有面外支撑杆 X 撑结构屈曲分析[J]. *工程力学*, 2023, **40**(S1): 147-157. (CUI Zhe-hua, KANG Yuan-shun, ZHANG Wei-wei, et al. Buckling analysis of large-scale X-braced structure with out-of-plane support bar with arbitrary elastic support [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, **40**(S1): 147-157. (in Chinese))
- [13] 王小龙, 张强. 含初始缺陷海底管道非线性屈曲失稳外压判别方法研究[J]. *石油化工设备*, 2021, **50**(5): 32-37. (WANG Xiao-long, ZHANG Qiang. Identification of external pressure of nonlinear buckling instability of subsea pipeline with initial imperfections [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2021, **50**(5): 32-37. (in Chinese))
- [14] 张文元, 曾立静, 齐欣, 等. 节点板式连接对 H 形钢支撑面外稳定性能的影响[J]. *工程力学*, 2021, **38**(12): 172-182. (ZHANG Wen-yuan, ZENG Li-jing, QI Xin, et al. Research on the influence of gusset plate connections on the out-of-plane stability of the H-shaped steel brace [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, **38**(12): 172-182. (in Chinese))
- [15] 范浩, 王新, 董卫国, 等. 基于屈曲模态的弹性压弯构件平面内二阶弯矩计算[J]. *工程力学*, 2022, **39**(2): 37-50. (FAN Hao, WANG Xin, DONG Wei-guo, et al. Calculation of second-order in-plane bending moment of elastic compression-bending members based on buckling modes [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, **39**(2): 37-50. (in Chinese))
- [16] 张伟为, 康元顺, 崔哲华, 等. 基于正交试验方法的大型有面外支撑杆 X 撑结构的屈曲分析和优化设计[J]. *工程力学*, 2022, **39**(S1): 261-271. (ZHANG Wei-wei, KANG Yuan-shun, CUI Zhe-hua, et al. Buckling analysis and optimal design of large-scale X-braced structures with out-of-plane support bars based on orthogonal test method [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, **39**(S1): 261-271. (in Chinese))
- [17] ASCE 10-2015. Design of Latticed Steel Transmission Structures [S]. USA: American Society of Civil Engineers, 2015.
- [18] ANSI/AISC 360-2016. Specification for Structural Steel Buildings [S]. USA: American Institute of Steel Construction, 2019.

(下转第 598 页)

Study of mechanical behavior and constitutive relation of carbon nanotube reinforced fluororubber at high temperature

ZUO Yan-jiang¹, WANG Zhu¹, WANG Jun-pu^{* 1,2}

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Modified fluororubber is widely used in automobile engineering, aerospace engineering, national defense and other fields because of its excellent oil resistance, high temperature resistance and other good physical properties. In this paper, the uniaxial tensile test data of carbon nanotube-reinforced fluororubber at different temperatures (120 °C ~ 220 °C) are analyzed, and the characteristics of the mechanical behavior of modified fluororubber with temperature are obtained. Through constitutive model evaluation and material parameter fitting, a temperature-dependent constitutive equation suitable for modified fluororubber is derived. Finally, the test results of the uniaxial tensile test at a specific temperature are compared with the prediction results of the model, which proves that the improved Yeoh model can describe the mechanical properties of carbon nanotube-reinforced fluororubber during the test temperature range. The conclusions provide the theoretical basis for engineering applications of modified fluororubber at high temperature.

Key words: carbon nanotube reinforced fluororubber; temperature effects; hyperelastic constitutive model; mechanical behavior; uniaxial tensile

(上接第 549 页)

Study on buckling strength characteristics of the super-span space X-brace structure

FU Dian-fu^{*1}, CHEN Jing-jie², ZHANG Meng-zhu¹, ZHANG Wei-wei³

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;

2. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to deeply study the load-bearing mechanism of an X-braced structure and reasonably guide engineering design, based on the existing theoretical models, this paper studies the transformation law of the buckling length coefficient of the X-braced structure with out-of-plane supports under typical load patterns, stiffness characteristics, endpoint constraints, and length factor (intersection position). Applied to an actual deepwater jacket structure, the buckling strength of the super-span space X-braced structure with out-of-plane support is analyzed by using the finite element method, and several conclusions are obtained which would provide effective technical support for engineering design.

Key words: out-of-plane support; X-brace structure; stiffness characteristics; length factor; buckling length coefficient