

DOI: 10.7672/sgjs2026020067

# 大跨柔性双塔双索面混合组合梁斜拉桥 力学性能分析

安鹏

(中铁建城建交通发展有限公司,江苏 苏州 215151)

[摘要] 以橘颂特大桥为依托,针对其大跨柔性双塔双索面混合组合梁斜拉桥结构特征,采用 ABAQUS 软件建立空间有限元模型,开展静力非线性分析与模态分析,研究恒载与公路-I 级汽车荷载作用下的桥面板、斜拉索及桥塔受力与变形规律。研究表明,中跨斜拉索索力明显高于边跨,索力分配需兼顾跨中挠度控制与塔顶水平位移平衡;桥塔主要受压并附加弯矩,表现出受压弯构件特征;桥面板在与引桥连接段出现应力集中现象,最大拉应力约 41MPa,建议在受拉区加强配筋或设置缓坡连接层以改善应力梯度;桥梁结构首阶自振频率为 0.205Hz,第 10 阶自振频率为 0.668Hz,整体频率分布密集、振型耦合明显,具有典型的大跨柔性结构动力特征。

[关键词] 斜拉桥;索塔;力学性能;模态;有限元分析

[中图分类号] U448.27

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0067-06

## Mechanical Performance Analysis of a Long-span Flexible Double-pylon Cable-stayed Bridge with Composite Girders

AN Peng

(China Railway Construction Urban Construction & Transportation Development Co., Ltd.,  
Suzhou, Jiangsu 215151, China)

**Abstract:** Based on the Jusong Specially Long-span Bridge, considering the structural characteristics of a long-span flexible double-tower double-cable-plane hybrid composite girder cable-stayed bridge, a three-dimensional finite element model was established using ABAQUS, and nonlinear static analysis and modal analysis were conducted to investigate the stress and deformation characteristics of the bridge deck, stay cables, and bridge towers under dead load and highway-class I vehicular load. The results show that the stay cable forces in the main span are significantly higher than those in the side spans, and the cable force distribution should consider both mid-span deflection control and the balance of horizontal displacement at the tower tops. The bridge towers are mainly subjected to axial compression with additional bending moments, exhibiting the characteristics of compression-bending members. Stress concentration occurs in the bridge deck at the connection region with the approach bridge, where the maximum tensile stress is approximately 41MPa, and it is recommended to enhance reinforcement in the tensile zones or to provide a gentle-slope transition layer to improve the stress gradient. The fundamental natural frequency of the bridge structure is 0.205Hz, and the 10th-order natural frequency is 0.668Hz, with a dense overall frequency distribution and pronounced mode coupling, indicating typical dynamic characteristics of long-span flexible structures.

**Keywords:** cable stayed bridges; stay cable and tower; mechanical behavior; modal; finite element analysis

### 0 引言

斜拉桥以其结构受力明确、跨越能力强、造型

优美等优点,已成为现代公路桥梁中的重要桥型之一。然而,斜拉桥结构体系复杂,索力分布、主梁与桥塔相互作用及桥面板局部受力特征等因素,使其具有较强的非线性与空间耦合特性。因此,对斜拉



开展静力非线性分析,研究桥梁主要构件在联合荷载作用下的应力与变形特征。采用 Lanczos 特征值求解算法进行模态分析,获得结构前若干阶自振频率与振型特征,揭示桥梁整体动力特性及振动耦合规律。

## 2.1 模型假定

桥梁属于典型的复杂空间结构体系,如果完全按结构实际状态建立有限元模型,不仅工作量大,且计算效率难以保证。为在兼顾计算精度与效率的前提下获得符合实际受力特性的分析结果,通常需对实际桥梁进行适当的假定与简化。大量理论与试验结果表明,这种简化能够满足工程设计精度要求。

为将斜拉桥复杂的空间结构合理简化为可分析的力学模型,本文在利用 ABAQUS 软件进行有限元分析时作出以下假定与近似处理。

1) 主梁与桥塔通过共用节点实现力的传递,主梁与桥面板之间采用绑定的方式实现面接触协同受力。

2) 忽略混凝土桥面横坡对结构受力的影响。

3) 所有斜拉索一端铰接于桥塔,另一端耦合至桥面板锚固节点。

4) 在边界条件方面,塔底支座设置为固定支座,桥面板两端施加铰支约束。

基于上述假定,斜拉索采用 C3D2 桁架单元模拟,桥塔与主梁采用 C3D8R 实体单元模拟,桥面板采用 S4R 壳单元模拟,以保证计算的稳定性与合理性。

有限元网格划分如图 3 所示,结合斜拉索仅承受轴向拉力的受力特征,并综合考虑计算精度与数值收敛性,将每根斜拉索全段划分为单个单元进行模拟。其余构件中,壳单元与实体单元网格尺寸控制为 0.5~3m,以兼顾计算效率与结果精度。

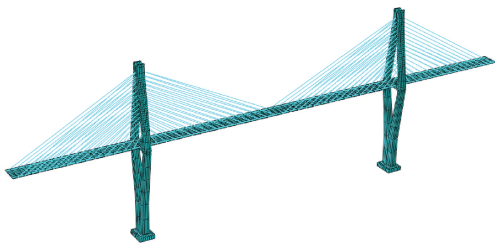


图 3 有限元网格划分

Fig. 3 Finite element mesh dividing

## 2.2 材料参数

材料物理力学参数如表 1 所示。

## 2.3 荷载与工况

橘颂特大桥设计荷载等级按 JTG D60—2015

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of materials

材料名称	弹性模量/Pa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
混凝土	$3.26 \times 10^{10}$	0.2	2 549
斜拉索钢绞线	$1.95 \times 10^{11}$	0.3	7 810
钢	$2.06 \times 10^{11}$	0.3	7 850

《公路桥涵设计通用规范》采用公路-I级汽车荷载标准。考虑到本桥为高速公路桥梁,桥面上不设人行道,因此不考虑人群荷载的作用。

### 1) 恒载

恒载主要包括主梁、桥塔、斜拉索及桥面板等结构构件自重,计算时按构件材料体积密度自动施加重力荷载,以反映结构自重效应。

### 2) 活载

桥面活载按公路-I级汽车荷载取值,考虑车道荷载作用,车道荷载标准值为 10.5kN/m。

### 3) 预应力

斜拉索预应力采用初始应力法施加,考虑到不同索段对主梁内力与线形的影响,预应力施加采用分级加载策略,即将斜拉索按空间位置分为若干组,从内侧向外侧依次施加预应力,并逐级提高预应力水平,使最外侧斜拉索获得较大的初始拉力。

根据斜拉桥受力特点及主要荷载来源,本文考虑桥面荷载与结构自重的组合工况进行分析,以评估桥面板、斜拉索及桥塔在恒载与车辆荷载共同作用下的内力分布、变形特征与动力特性,为结构受力性能评估与优化设计提供依据。

## 3 静力非线性分析

利用 ABAQUS 软件对橘颂特大桥进行静力非线性分析,包括建立模型、施加荷载、非线性求解、提取结果与对比分析等步骤,得到的斜拉索 Mises 应力云图如图 4 所示。由图 4 可知,中跨斜拉索应力明显大于边跨斜拉索。由于中跨跨度较大,跨中挠度控制难度较高,因此通常需通过提高中跨斜拉索索力减小跨中位移。然而,如果继续同步提高边跨斜拉索索力,则边跨桥面板将出现较大的竖向上抬位移;如果不提高边跨斜拉索索力,则桥塔顶部将承受较大的水平位移。这种索力分布的不协调不仅影响结构整体受力平衡,也可能导致混凝土桥塔产生不利变形,影响结构安全性与耐久性。因此,在中跨位移控制与桥塔受力安全之间实现合理平衡,是此类大跨径斜拉桥设计与优化的关键。

桥塔应力云图如图 5 所示。由图 5 可知,桥塔 y 向应力较大,这与其作为主要竖向受力构件的受力特征相符。由于斜拉桥中跨桥面板竖向位移较难控制,中跨斜拉索需施加较大的预应力以减小跨

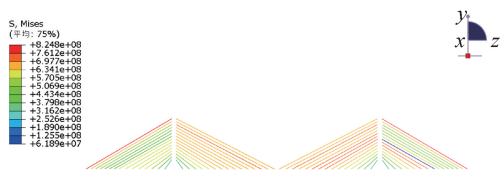


图 4 斜拉索 Mises 应力云图(单位:Pa)

Fig. 4 Mises stress of stay cables (unit:Pa)

中挠度。该预应力的增大使桥塔顶部向中跨方向产生一定位移,从而使桥塔由单纯受压构件转变为受压弯构件。

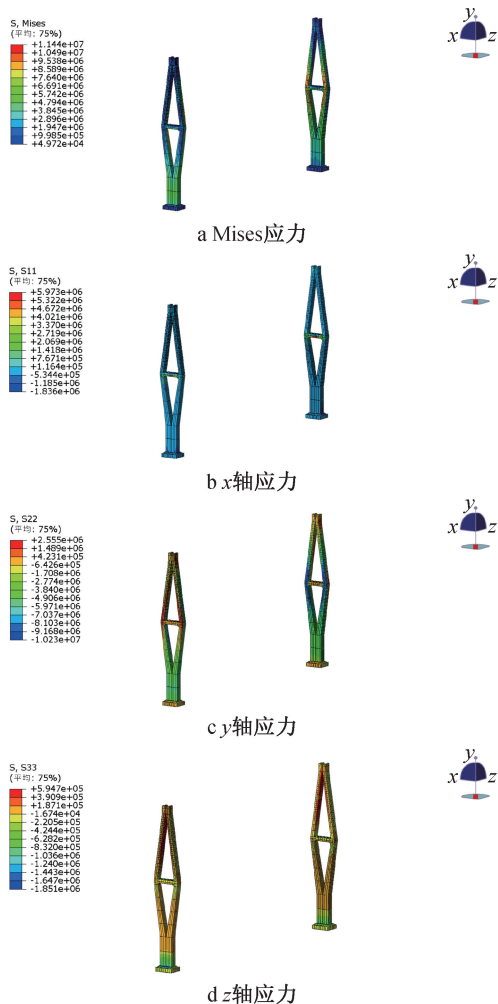


图 5 桥塔应力云图(单位:Pa)

Fig. 5 Stress of the bridge tower (unit:Pa)

除中跨侧承受较大压力外,边跨侧拉力效应不容忽视。为保证桥塔受力安全,边跨侧应配置足够的受拉钢筋,以抵抗拉力。建议拉区纵筋伸入长度(锚固)应满足黏结与延性要求,分段搭接并略加长搭接长度,并在关键处采用机械连接器提高可靠性。受压侧应根据受力情况采取相应的构造措施,防止混凝土产生早期压碎破坏,如在受压区采用加密箍筋/水平约束筋以增强局部约束,提高混凝土

抗压承载力和延性。

此外,桥塔在  $x$  向的应力具有一定幅值,表明其承受了显著的侧向作用力。但该方向为桥塔主要抗侧受力方向,结构具有较高的侧向刚度,能够有效保证整体稳定性。

桥面板 Mises 应力云图如图 6 所示。由图 6 可知,桥面板在与高速公路连接的过渡段出现了明显的应力集中现象,该区域最大拉应力峰值约 41MPa,应力集中主要出现在桥面板与路面连接部位,这是由于该处结构刚度突变、受力传递路径复杂及边界约束条件变化引起的。在结构受力体系中,桥面板承担车辆荷载并将其通过主梁、斜拉索传递至桥塔与基础。当桥面板与引桥路面相接时,刚度和约束条件的差异导致应力分布不均,局部拉应力显著增大。如果不加控制,该部位可能成为裂缝萌生的薄弱环节,进而影响桥面板与路面整体协同工作性能。针对以上问题,建议桥面板与高速公路连接段应适当增加钢筋配筋率,尤其在受拉区应配置足够的纵向钢筋,以提高抗拉强度和延性,且通过设置过渡段或加设缓坡连接层,改善桥面与路面之间的刚度过渡,减缓应力梯度变化。

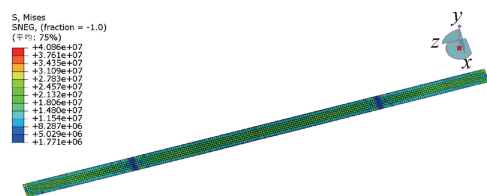


图 6 桥面板 Mises 应力云图(单位:Pa)

Fig. 6 Mises stress of the bridge deck (unit:Pa)

桥面板  $x$  轴弯矩云图如图 7 所示。由图 7 可知,桥面板主要承受沿  $x$  轴方向的弯矩作用。整体来看,桥面板弯矩分布规律明显,在桥塔支座附近产生较大的负弯矩区,而正弯矩最大值出现在跨中位置,符合连续梁在竖向荷载作用下的典型受力特征。桥塔支座附近的负弯矩峰值约为  $4.6 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,跨中正弯矩峰值约为  $1.2 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,这表明桥面板在支座处受拉、跨中受压,为典型的受弯构件受力状态。支座处较大的负弯矩反映了桥面板在该区域受拉应力显著,设计中应适当加强桥塔附近桥面板上缘钢筋配筋率,以提高抗拉承载力。同时,在跨中区域应合理布置下缘钢筋,以抵抗正弯矩引起的拉应力,确保结构整体受力的安全与均衡。

#### 4 模态分析

在桥梁抗震设计、健康监测中,自振特性是重要参数。本文基于 ABAQUS 软件的 Lanczos 特征值

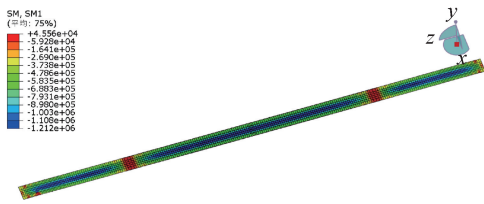


图7 桥面板  $x$  轴弯矩云图(单位: $\text{N} \cdot \text{m}$ )

Fig. 7 The  $x$ -axis bending moment of the bridge deck (unit: $\text{N} \cdot \text{m}$ )

求解器对橘颂特大桥进行模态分析,其前 10 阶自振频率如表 2 所示,前 6 阶振型如图 8 所示。

表 2 橘颂特大桥自振特性

Table 2 The self-vibration characteristics of the Jusong Specially Long-span Bridge

振型阶数	自振频率/Hz	自振周期/s	自振圆频率/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.205	4.878	1.288
2	0.237	4.219	1.489
3	0.243	4.115	1.527
4	0.288	3.472	1.810
5	0.495	2.020	3.110
6	0.538	1.859	3.380
7	0.565	1.770	3.550
8	0.594	1.684	3.732
9	0.607	1.647	3.814
10	0.668	1.497	4.197

由表 2 可知,首阶自振频率为 0.205Hz,第 10 阶自振频率为 0.668Hz,整体频率分布较密集,呈逐阶平缓上升趋势。桥梁自振频率为 0.2~0.7Hz,说明该桥属于典型的大跨柔性结构体系,整体刚度相对较低,尤其是主跨区域的柔度较大。由图 8 可知,各阶振型之间存在明显的耦合现象,这主要是由于相邻频率间距较小,导致结构在低阶模态下即表现出主梁、斜拉索及桥塔协同振动特征。随着振型阶数的增加,结构局部扭转效应逐渐增强,反映出主梁和斜拉索之间的动力耦合关系更复杂。综上所述,橘颂特大桥整体表现出竖向柔度大、固有频率低、振型耦合显著等动力特征。对于此类柔性结构,在设计阶段须重点关注其动力稳定性与抗风性能,以确保结构在复杂荷载作用下的安全与可靠性。

## 5 结语

1) 中跨斜拉索轴力显著高于边跨,需在控制跨中位移的同时兼顾桥塔位移与边跨抬升效应,实现索力分配的平衡。桥塔主要承受竖向压力并附加一定弯矩,塔顶向中跨偏移明显,应在边跨侧配置足够受拉钢筋,且建议采取分段搭接并略加长搭接长度,在关键处采用机械连接器提高可靠性的措施。受压侧采用加密箍筋/水平约束筋等方式防止

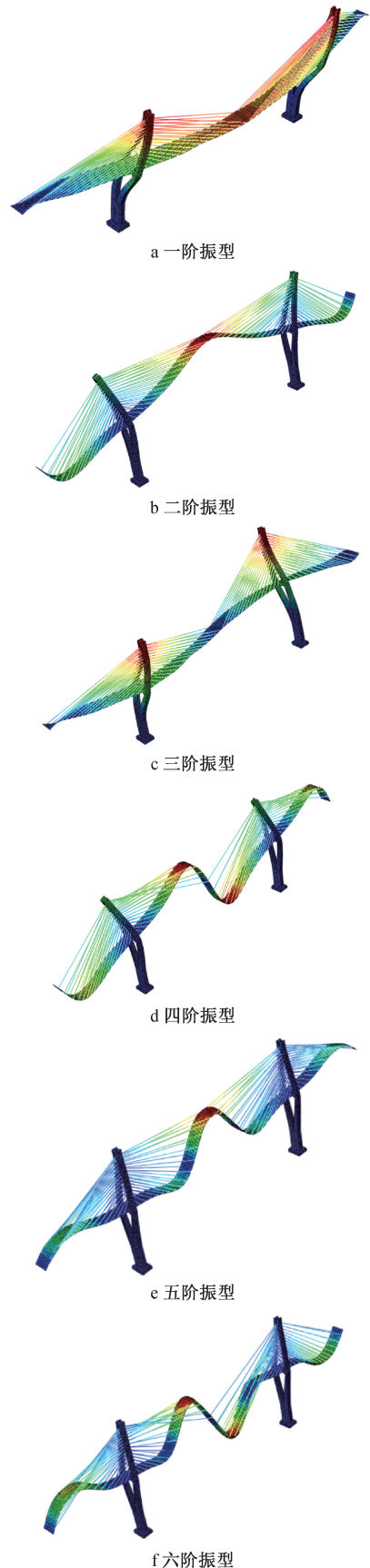


图 8 橘颂特大桥前 6 阶振型

Fig. 8 First six vibration modes of the Jusong Specially Long-span Bridge

混凝土被压碎。

2) 桥面板与高速公路连接段存在应力集中现象,最大拉应力约41MPa,可通过增加受拉区配筋或设置缓坡连接层减缓应力梯度。桥面板弯矩分布规律清晰,支座处为负弯矩区,跨中为正弯矩区,符合连续梁受力特征。设计中应加强桥塔附近桥面板上缘钢筋和跨中区域下缘钢筋配筋率,以抵抗支座负弯矩和跨中正弯矩。

3) 模态分析结果表明,首阶自振频率为0.205Hz,第10阶自振频率为0.668Hz,结构竖向柔度大、振型耦合明显,具有典型的大跨柔性结构特征。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 郑宏利. 不确定干扰下基于代理模型的斜拉桥施工辅助决策方法[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(18): 18-24.  
ZHENG H L. Auxiliary decision-making method for cable-stayed bridge construction based on surrogate model under uncertain disturbance[J]. Construction technology, 2024, 53(18): 18-24.
- [ 2 ] 卢皓, 黄文泰, 王鑫烽, 等. 大跨度钢桁加劲PC箱梁斜拉桥风-车-线-桥耦合振动分析[J]. 世界桥梁, 2025, 53(4): 95-102.  
LU H, HUANG W T, WANG C F, et al. Research on wind-train-track-bridge coupling in long-span steel-truss-stiffened PC box girder cable-stayed bridge [J]. World bridges, 2025, 53(4): 95-102.
- [ 3 ] 李卫东, 戴灿磊. 大吨位混合梁转体斜拉桥主梁受力特性分析[J]. 世界桥梁, 2022, 50(5): 101-108.  
LI W D, DAI C L. Research on load bearing behavior of large-tonnage hybrid girder of cable-stayed bridge during rotation construction[J]. World bridges, 2022, 50(5): 101-108.
- [ 4 ] ZENG Y, WANG Y X, SHI Z W, et al. Experimental study on

stability of long-span PC cable-stayed bridge during the construction periods [J]. Advances in civil engineering, 2022(1): 8578684.

- [ 5 ] 孙华怀, 徐俊, 陈惟珍. 基于自适应模型的在役斜拉桥时变力学性能追踪[J]. 振动与冲击, 2023, 42(5): 190-199.  
SUN H H, XU J, CHEN W Z. Time-varying mechanical properties tracking of in-service cable-stayed bridge based on adaptive model [J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(5): 190-199.
- [ 6 ] 罗浩, 徐楚懿, 杨彤麟, 等. 基于P-M谱的波浪荷载数值模拟及其对跨海斜拉桥的冲击响应规律研究[J]. 计算力学学报, 2023, 40(4): 552-558.  
LUO H, XU C Y, YANG T L, et al. Based on P-M spectrum numerical simulation of wave load and dynamic responses of a cross-sea cable-stayed bridge [J]. Chinese journal of computational mechanics, 2023, 40(4): 552-558.
- [ 7 ] 王小华, 庞立, 袁朝华, 等. 斜腿刚构天桥机械破拆现场实测与模拟仿真分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(15): 52-57, 75.  
WANG X H, PANG L, YUAN Z H, et al. Field measurement and simulation analysis of mechanical demolition of slant-legged rigid frame platform bridge [J]. Construction technology, 2024, 53(15): 52-57, 75.
- [ 8 ] 戴公连, 李建德. 桥梁结构空间分析设计方法与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
DAI G L, LI J D. Spatial analysis, design and application of bridge structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [ 9 ] CETINDEMIR O, ZULFIKAR A C, APAYDIN N M. Dynamic modal identification of a long-span suspension bridge using measured acceleration data during a storm [J]. Journal of structural engineering, 2023, 149(12): 05023004.