

文章编号:1673-2049(2018)04-0011-08

大跨度叠合梁斜拉桥非线性稳定研究

赵人达, 邹建波, 吕 梁, 许智强, 贾 毅

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为研究大跨度叠合梁斜拉桥非线性稳定的变化规律和失稳过程,以主跨 360 m 的西固黄河大桥主桥为研究对象,通过有限元数值模拟计算结构在典型施工阶段、成桥及运营阶段的非线性稳定安全系数及其失稳模态;重点分析结构在成桥状态下从初始加载直至达到其极限承载力这一过程中斜拉索应力、索塔等效应力变化和结构关键部位的荷载-位移曲线。结果表明:主桥施工典型阶段、成桥及运营阶段的非线性稳定安全系数均满足设计要求,结构失稳均以索塔纵桥向失稳和主梁面内失稳为主;主桥从初始加载直至达到其极限承载力这一过程中,部分斜拉索发生断裂,主梁和索塔连接部位出现塑性区,失稳破坏过程合理;索塔和主梁的荷载-横向位移曲线表现出较为明显的非线性效应。

关键词:桥梁工程;斜拉桥;非线性稳定安全系数;施工过程;成桥运营;失稳模态

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A

Research on Nonlinear Stability of Long-span Composite Girder Cable-stayed Bridge

ZHAO Ren-da, ZOU Jian-bo, LU Liang, XU Zhi-qiang, JIA Yi

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: In order to research the variation law and the instability process of the nonlinear stability of long-span composite girder cable-stayed bridge, the Xigu Yellow River Bridge with 360 m main span was selected as the study object. The nonlinear stability safety factor of the typical construction stage and operation stage of the bridge was calculated by finite element simulation and the structural instability mode was obtained. At the same time, the stress changes of the stay cable and pylon and the load displacement curves of the key control point during the bridge from the beginning to the ultimate load-carrying capacity were analyzed. The results show that the nonlinear stability safety factor of the typical construction stage and the operation stage of the main bridge meet the design requirements, and the structural instability is reflected in longitudinal instability of pylon and in-plane instability of main beam. Part of the stay cable are broken and the connection location of main beam and pylon appears plastic area during the bridge from the beginning to the ultimate load-carrying capacity. The damage process is reasonable. The load-lateral displacement curves of tower and girder show obvious nonlinear effects.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge; nonlinear stability safety factor; construction process; finishing and using stage; instability mode

收稿日期:2017-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51308471);国家重点研发计划项目(2016YFB1200401,2017YFB1201204)

作者简介:赵人达(1961-),男,贵州毕节人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:rendazhao@163.com。

通信作者:贾 毅(1988-),男,四川巴中人,工学博士研究生,E-mail:jiayi0715vip@sina.com。

0 引言

随着桥梁结构理论及设计水平的不断提高,斜拉桥逐步向大跨、高塔、长拉索及主梁结构形式多样化的方向发展,而随之带来的是斜拉桥整体刚度降低的问题^[1]。对于大跨度桥梁结构,在外荷载作用下结构构件的内力除了轴向压力外,弯矩、扭矩所占的比重也较大,结构变形呈高度非线性特征^[2]。因此,为了确保结构安全,研究大跨度斜拉桥在施工及成桥运营过程中的非线性稳定十分必要^[3-4]。

近年来,国内外学者对非线性稳定即极限承载力做了大量的研究与计算^[5-13]。赵雷等^[14]以鄂东长江大桥为研究对象,探讨了混合梁斜拉桥工程参数与大桥施工过程非线性稳定性的关系。卜一之等^[15]以苏通长江大桥为研究对象,分析了临时墩位置、破断斜拉索拆除时机等因素与非线性稳定性之间的关系。张敏等^[16]以一座跨度超过千米的公铁两用钢桁梁斜拉桥为研究对象进行成桥状态下的活载非线性计算分析。杨兴旺^[17]分析了大跨度斜拉桥施工全过程的几何非线性行为。上述研究对大跨度斜拉桥非线性稳定性的研究具有重要意义,但对大跨度叠合梁斜拉桥这种桥型及其失稳破坏过程与规律的研究分析还较少。

本文以西固黄河大桥主桥 177 m+360 m+177 m 组合梁斜拉桥为研究对象,主梁截面形式为双工字型叠合梁。在考虑几何非线性、材料非线性、施工过程结构体系转换、变形和内力累加效应的影响下,分析西固黄河大桥主桥在典型施工阶段和成桥运营阶段的非线性稳定性,为今后同类桥型的结构稳定性评估提供参考。

1 非线性稳定计算理论

1.1 计算方法

桥梁结构非线性稳定的实质即为结构极限承载力问题,其失稳破坏通常表现出大位移、小应变以及塑性屈服等特征,因此在有限元分析过程中应考虑结构几何与材料非线性的影响,即按双重非线性理论分析大跨度桥梁结构从初始加载直至达到其极限承载力这一过程的失稳破坏^[18]。双重非线性分析通常采用增量法,即将荷载划分成若干增量,由程序控制加载步长,在各增量荷载上进行迭代。一般双重非线性稳定理论采用 U. L 列式法建立增量形式的平衡方程。

双重非线性稳定分析的基本方程为

$$(\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_\sigma + \mathbf{K}_L)\boldsymbol{\delta} = \mathbf{P} \quad (1)$$

式中: \mathbf{K}_0 为小位移弹塑性刚度矩阵; \mathbf{K}_σ 为单元的初应力刚度矩阵,即几何刚度矩阵; \mathbf{K}_L 为大位移弹塑性刚度矩阵; \mathbf{P} 为荷载; $\boldsymbol{\delta}$ 为位移。

在 U. L 列式法的增量形式下,加载时把结构的临界荷载 \mathbf{P}_{cr} 分成荷载增量 $\Delta\mathbf{P}_i (i=1, 2, \dots, n)$, 即

$$\mathbf{P}_{cr} = \sum_{i=1}^n \Delta\mathbf{P}_i \quad (2)$$

对于任何一级荷载增量而言,荷载-位移曲线中的相应部分可以近似地认为是直线。于是有理由把一个总体表现为非线性的过程按若干个小的线性过程迭加进行处理。只要在每个增量步对应的线性过程中计入该过程开始时的全部轴向力影响和应力-应变关系,这种等效线性化处理的结果也能相当好地逼近原来的非线性过程。因此,增量形式的平衡方程为

$$\mathbf{K}_{i-1} \Delta\boldsymbol{\delta}_i = \Delta\mathbf{P}_i \quad (3)$$

式中: \mathbf{K}_{i-1} 为第 $i-1$ 次加载 $\Delta\mathbf{P}_{i-1}$ 结束时的结构刚度矩阵。

\mathbf{K}_{i-1} 可在第 i 次加载前事先求出,其计算式为

$$\mathbf{K}_{i-1} = \mathbf{K}_{0(i-1)} + \mathbf{K}_{\sigma(i-1)} \quad (4)$$

第 i 级荷载增量作用结束时,结构承受的总荷载 \mathbf{P}_j 和总位移 $\boldsymbol{\delta}_j$ 为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P}_j &= \mathbf{P}_0 + \sum_{i=1}^j \Delta\mathbf{P}_i \\ \boldsymbol{\delta}_j &= \boldsymbol{\delta}_0 + \sum_{i=1}^j \Delta\boldsymbol{\delta}_i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: \mathbf{P}_0 、 $\boldsymbol{\delta}_0$ 为结构的初始荷载列阵和初始位移列阵。

可见,这种方法可以监测结构加载达到临界荷载 \mathbf{P}_{cr} 过程中的荷载-位移 ($P-\Delta$) 变化以及结构内力行为。

失稳的临界荷载一旦确定,则相应的总变形 $\boldsymbol{\delta}_{cr}$ 所描述的变形曲线即为相应的失稳模态。

1.2 失稳判断依据

在非线性稳定问题中,斜拉桥结构达到极限承载力的判据为:考虑上述因素后结构承载能力逐渐降低,最终达到承载能力的极限状态,当荷载达到临界值 \mathbf{P}_{cr} 时,在结构的 $P-\Delta$ 曲线上表现为曲线斜率逐渐减小,直到趋近于 0;越过极值点后,曲线斜率小于 0。在 $P-\Delta$ 曲线斜率发生明显变化(有趋近于 0 的倾向)时,结合结构整体刚度矩阵 \mathbf{K}_T 的正定性,可得到结构失稳的判别条件为:当包含几何刚度矩阵在内的结构整体刚度矩阵 \mathbf{K}_T 非正定时

$$K_T \leq 0 \quad (6)$$

如果在第 i 次增量 ΔP_i 作用结束后,结构的总刚度矩阵使式(6)满足,那么前 i 次荷载增量过程中施加的总荷载即为结构的临界荷载。

结构稳定安全系数 K 定义为

$$K = P_{cr} / P_T \quad (7)$$

式中: P_{cr} 为结构的极限承载力; P_T 为加载的荷载基数,即某种工况下结构的设计荷载。

实际上, K 为结构达到极限承载力时关于 P_T 的加载倍数。

2 计算模型

2.1 工程概况

西固黄河大桥位于甘肃省兰州市西固区,属于连霍国道主干线兰州南绕城高速公路重点工程,跨越黄河、兰新铁路和西新路,为双塔双索面工字钢-混凝土结合梁高速公路特大桥,车辆荷载等级为公路-I级,设计车速 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,设计基准期 100 年。主桥采用双塔三跨半漂浮体系,跨径 $177 \text{ m} +$

$360 \text{ m} + 177 \text{ m}$,左右边跨各设置一个辅助墩和一个过渡墩,索塔高均为 151 m ,是西北地区在黄河上跨度最大、塔身最高的斜拉桥。全桥共布置 56 对(双索面共 112 根)斜拉索,沿结构纵桥向及横桥向均对称布置,索塔采用 C50 混凝土,主梁采用 Q370qD 工字钢叠合 C55 混凝土板构成,斜拉索采用镀锌低松弛平行钢丝束,其标准抗拉强度 $\sigma_b = 1\,860 \text{ MPa}$ 。图 1 给出了西固黄河大桥总体布置图。

2.2 有限元数值模拟

采用 ANSYS 建立全桥空间有限元模型,如图 2 所示。索塔、桥墩及主梁采用 Beam188 空间梁单元进行模拟,斜拉索采用 Link10 杆单元进行模拟,其单元实常数为公称截面面积与拉索初应变。主梁采用工字钢-混凝土叠合梁。在利用 ANSYS 建模时按照组合截面考虑,截面对应组成部分赋予相应的材料属性及其本构关系,组合截面建立完成后生成截面文件并将其赋予相应的梁单元轴线。主梁采用单主梁鱼骨式模型模拟,全桥划分各类单元 463 个,其中空间梁单元 351 个,空间杆单元 112 个。

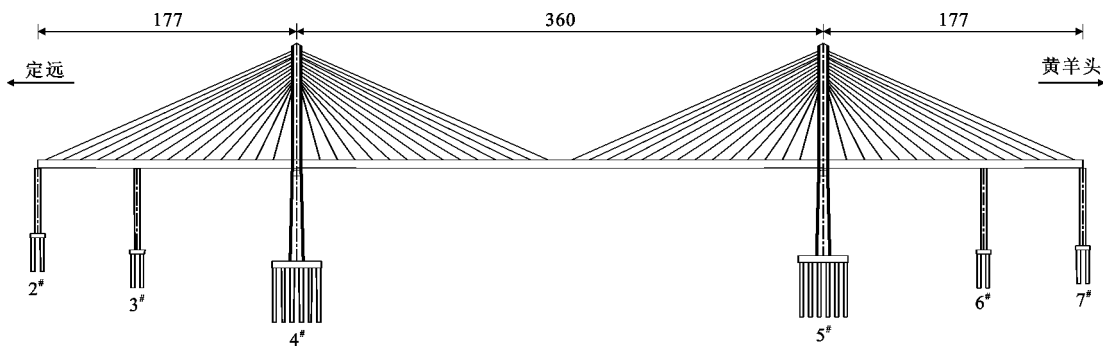


图 1 西固黄河大桥立面布置(单位:m)

Fig. 1 Elevation Layout of Xigu Yellow River Bridge (Unit: m)

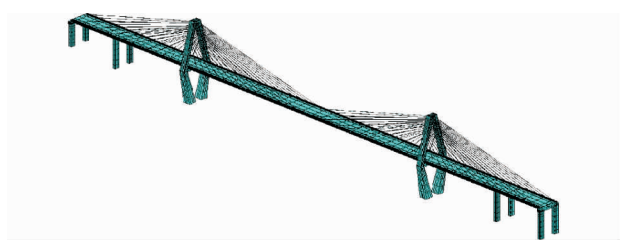


图 2 西固黄河大桥主桥 ANSYS 计算模型

Fig. 2 ANSYS Calculation Model of Xigu Yellow River Bridge

关于计算过程中的双重非线性效应的几何非线性考虑了结构大变形效应、斜拉索垂度效应、弯矩轴向力耦合效应以及斜拉索破断应力的影响^[19]。结构大变形效应可在 ANSYS 非线性求解设置中开启,斜拉索垂度效应通过 Ernst 公式^[4]对其弹性模

量进行修正,即

$$E_{eq} = E / (1 + \frac{\gamma^2 L^2 E}{12 \sigma^3}) \quad (8)$$

式中: E 为高强钢绞线的初始弹性模量; γ 为斜拉索的材料重度; L 为每根斜拉索的水平投影长度; σ 为每根斜拉索的应力, $\sigma = T/A$,其中 T 为斜拉索的设计索力, A 为其公称截面面积。

斜拉索破断应力的影响主要是指对于设计合理的斜拉桥,当个别斜拉索被拉断后,结构整体仍可继续承担少量荷载,在 ANSYS 中利用生死单元功能和多点重启功能实现。在实际工程中由于每根斜拉索各束钢绞线不可能完全均匀地承受钢索拉力,因此拉索的实际破断应力总是稍低于标准抗拉强度,即破断应力取标准抗拉强度乘以效率系数 0.95,

$\sigma_u=0.95\times1\,860\text{ MPa}=1\,767\text{ MPa}.$

材料非线性采用 Mises 屈服准则^[20],即

$\sigma_e-\sigma_s=0$ (9)

$$\sigma_e=\left[\frac{1}{2}((\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_x-\sigma_z)^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{xz}^2+\tau_{yz}^2))\right]^{\frac{1}{2}}$$
 (10)

式中: σ_e 为等效应力; σ_s 为屈服应力; $\sigma_x,\sigma_y,\sigma_z,\tau_{xy},\tau_{xz},\tau_{yz}$ 为对应的正应力与切应力分量。

将钢材料和混凝土材料分别按理想弹塑性和分段线性化折线本构模型处理^[21]。主梁工字钢采用 Q370qD 钢材,弹性模量 $E_s=210\text{ GPa}$,屈服应力 $\sigma_s=370\text{ MPa}$,应力-应变($\sigma\epsilon$)关系为理想弹塑性模式,如图 3 所示,其中 ϵ_s 为屈服应变。

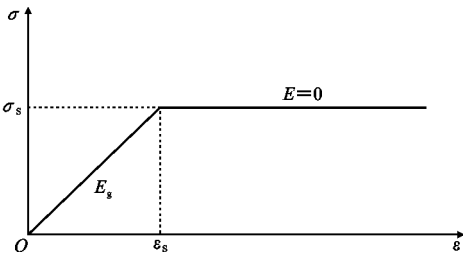


图 3 钢梁材料 $\sigma\epsilon$ 曲线

Fig. 3 $\sigma\epsilon$ Curve of Steel Beam Material

索塔和桥面板本构关系为分段线性化折线模式,如图 4 所示。索塔采用 C50 混凝土,轴心抗压强度 $\sigma_0=32.4\text{ MPa}$;屈服应力 σ_c 取 40% 轴心抗压强度,即 $\sigma_c=0.4\sigma_0=12.96\text{ MPa}$;弹性模量 $E_c=34.5\text{ GPa}$; $\epsilon_c=\sigma_c/E_c=0.000\,38$; ϵ_0 为应力刚达到 σ_0 对应的应变值,即 $\epsilon_0=0.002$; $E_0=(\sigma_0-\sigma_c)/(\epsilon_0-\epsilon_c)=12.0\text{ GPa}$;极限压应变 $\epsilon_u=0.003\,3$ 。桥面板采用 C55 混凝土, $\sigma_0=35.5\text{ MPa}$, $\sigma_c=14.2\text{ MPa}$, $E_c=35.5\text{ GPa}$; $\epsilon_c=0.000\,4$, $\epsilon_0=0.002\,025$, $E_0=13.1\text{ GPa}$, $\epsilon_u=0.003\,275$ 。

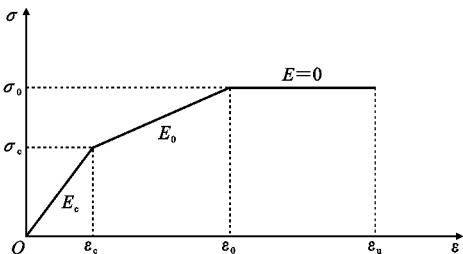


图 4 混凝土材料 $\sigma\epsilon$ 曲线

Fig. 4 $\sigma\epsilon$ Curve of Concrete Material

2.3 计算工况

针对西固黄河大桥施工过程中的典型阶段和成桥运营阶段的非线性稳定进行计算,共分为 7 个计算工况,如表 1 所示。荷载包括自重、二期恒载、活

表 1 计算工况

Tab. 1 Calculation Cases

工况编号	工况描述
1	最大双悬臂阶段(施工)
2	最大单悬臂阶段(施工)
3	桥面二期恒载(成桥)
4	全桥双线满布活载(运营)
5	全桥单线满布活载(运营)
6	主跨双线满布活载(运营)
7	主跨单线满布活载(运营)

载及横桥向静风荷载。除斜拉桥索力加载到设计张拉力外,其余荷载均按同一比例增量进行加载,直至结构达到其极限承载力为止。

3 计算结果及分析

3.1 结构稳定性评价及其失稳模态

《公路斜拉桥设计细则》(JTG/T D65-01—2007)^[22]要求考虑斜拉桥结构体系的非线性稳定,即计入材料非线性影响的弹塑性强度稳定安全系数,混凝土主梁应不小于 2.5,钢主梁应不小于 1.75^[6]。然而对于组合结构斜拉桥以及斜拉桥中的索塔,设计细则并未给出明确的数值规定。因此,参考以往中国已建成的大跨度桥梁结构稳定性评估经验,考虑结构几何与材料非线性及单根斜拉索构件的极限承载力影响后,将结构整体的非线性稳定安全系数(加载系数)定为不小于 2.0。

该桥各计算工况的非线性稳定安全系数列于表 2。由表 2 可见,所有计算工况的结构非线性稳定安全系数均大于 2.0,满足要求。该桥施工最大双悬臂、最大单悬臂及成桥状态对应的失稳模态如图 5~7 所示。

表 2 各计算工况非线性稳定安全系数

Tab. 2 Nonlinear Stability Safety Factors of Calculation Cases

工况编号	1	2	3	4	5	6	7
K	3.7	2.4	3.3	3.1	3.1	3.2	3.1

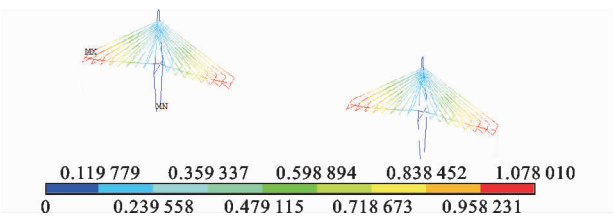


图 5 最大双悬臂状态失稳模态

Fig. 5 Instability Mode in Longest Double Cantilever Status

从图 5~7 可以看出,3 种工况下结构失稳模态

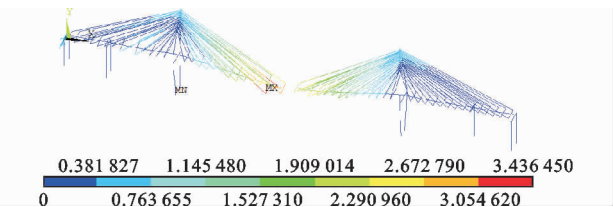


图 6 最大单悬臂状态失稳模式

Fig. 6 Instability Mode in Longest Single Cantilever Status

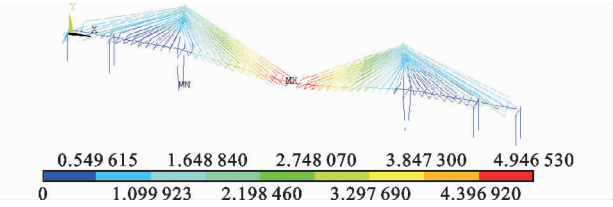


图 7 成桥状态失稳模式

Fig. 7 Instability Mode in Completed Status of Bridge

均以索塔纵桥向失稳和主梁面内失稳为主。最大单悬臂状态下安全系数较低,该施工阶段应给予重视,在施工过程中注意荷载的均匀性,避免突然超载。

3.2 成桥工况结构失稳破坏过程分析

3.2.1 失稳模式变化过程

考虑几何、材料双重非线性影响,利用 ANSYS 有限元软件研究西固黄河大桥成桥状态下的非线性稳定,计算求得结构整体的非线性稳定安全系数 $K=3.3$ 。为了对结构从加载直至达到其极限承载力这一过程有更深入的理解,特从 $K=1, K=2$ 和 $K=3.3$ 这 3 个关键的加载倍数进行分析讨论。这 3 个加载倍数对应的结构整体失稳模式如图 8 所示。

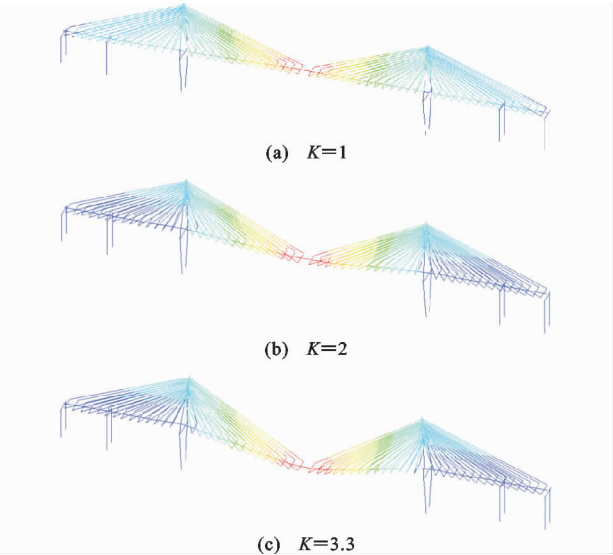


图 8 结构整体失稳模式

Fig. 8 Instability Modes of Whole Structure

从图 8 可以看出,当 $K=1$ 时,索塔已表现为明显的横向弯曲,由于斜拉索的成桥索力和结构承受的竖向荷载在此时并不大,边塔的纵向弯曲以及主梁的竖向弯曲表现均不明显。由于没有施加车道荷载,导致主梁跨中在成桥索力下甚至还有轻微的上挠。随着加载倍数的不断增大,结构的最终失稳模式为索塔的纵向和横向弯曲相结合,以及主梁的横向和竖向弯曲相结合。

3.2.2 斜拉索应力变化

在结构加载过程中,斜拉索内的轴向拉应力不断增加并逼近破断应力。为了对斜拉索从加载到部分斜拉索被拉断这一过程有更深入的理解,仍然从 $K=1, K=2$ 和 $K=3.3$ 进行分析讨论。由于结构和荷载的对称性,仅选取单塔单索面共 28 根斜拉索,从定远岸至主桥跨中对应编号为 1~28,其 3 个加载倍数的斜拉索应力如图 9 所示。

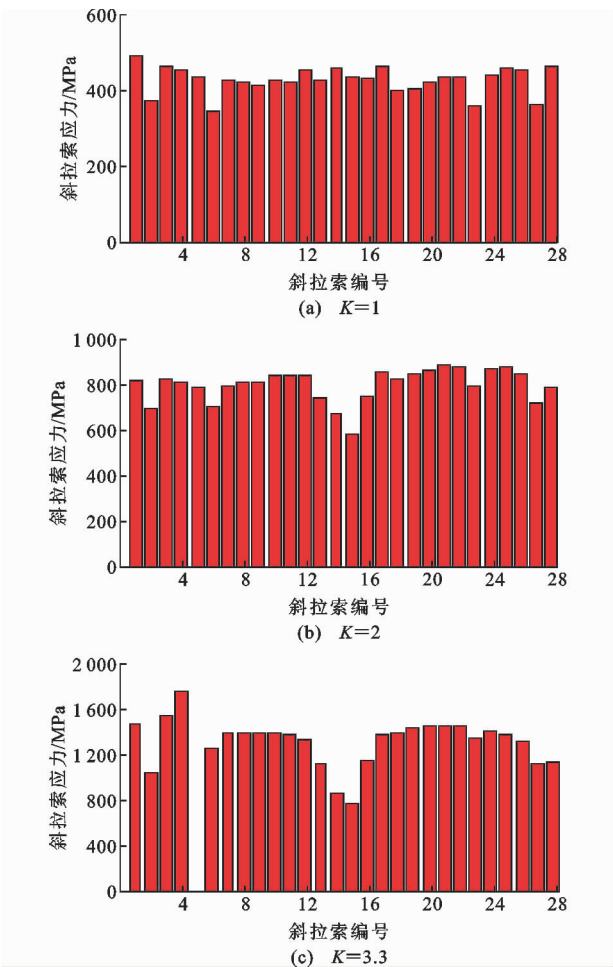


图 9 斜拉索应力

Fig. 9 Stress of Stay Cable

从图 9 可以看出:当 $K=1$ 时,整桥的斜拉索应力值均不大,最大拉索应力仅为 491 MPa;当 $K=2$

时,拉索整体应力大幅提高,最大拉索应力已达到 883 MPa;当 $K=3.3$,即结构整体达到极限承载力时,5 号索的应力值为 0,这是因为在结构整体达到极限承载力的前一个荷载子步,该斜拉索已经达到了极限破断应力而被拉断(根据对称性此时整个桥梁已有 4 根拉索被拉断),利用生死单元功能将对应单元从结构中去除。个别拉索先于结构整体破坏表明结构设计合理,在发生整体破坏前有明显的征兆。

3.2.3 索塔和主梁 Mises 等效应力

运用 Mises 屈服准则与材料的屈服强度进行比较。为了对结构从加载到索塔与主梁上的局部区域达到屈服状态这一过程有更深入的理解,仍然从 $K=1, K=2$ 和 $K=3.3$ 进行分析讨论,索塔主要关注索塔与主梁连接处的等效应力。这 3 个加载倍数对应的索塔局部等效应力如图 10 所示。

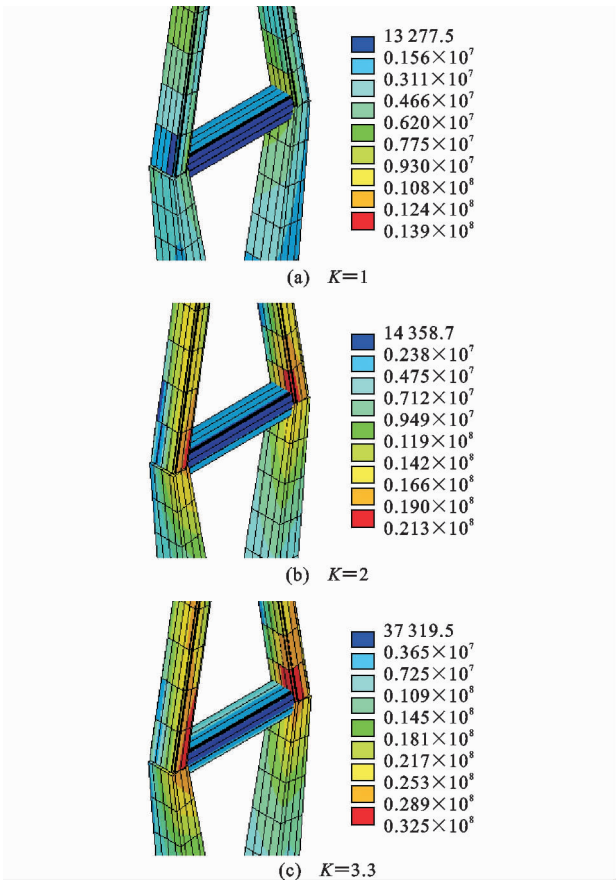


图 10 索塔 Mises 等效应力(单位:MPa)

Fig. 10 Mises Stress of Bridge Tower (Unit:MPa)

从图 10 可以看出:当 $K=1$ 及 $K=2$ 时,索塔整体的等效应力均小于索塔混凝土材料 C55 抗压强度 32.5 MPa,未达到屈服状态;当 $K=3.3$ 时,索塔上塔柱与中塔柱交界段(索塔与主梁的连接处)出现了明显的塑性区。为提高交界段处的性能,可采取

局部加劲、高强度材料等措施。

3.2.4 荷载-位移曲线

对于非线性稳定问题,分析结构关键部位的荷载-位移曲线是十分必要的。对该类桥梁而言,主塔塔顶和主梁跨中位移最大。在该荷载工况下,索塔应重点关注塔顶节点的纵向位移和横向位移,主梁应重点关注主跨跨中节点的竖向位移和横向位移。相关的荷载-位移曲线如图 11,12 所示。

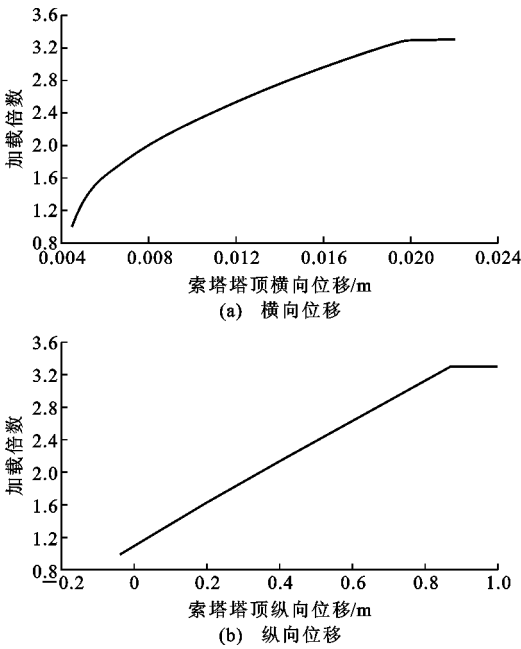


图 11 索塔塔顶节点荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-deflection Curves of Bridge Tower Top Joint

从图 11,12 可以看出,荷载倍数与索塔塔顶和主跨跨中的横向位移表现出明显的非线性效应,当荷载倍数接近 3.3 时,荷载-横向位移曲线均有近似水平段。由于仅考虑横桥向风荷载的初始扰动,索塔塔顶的纵向位移和主跨跨中竖向位移未表现出明显的非线性效应,其荷载-位移曲线近似呈线性关系。

3.3 考虑活载作用下的非线性稳定分析

活载布载方式从横桥向可分为双线布载和单线布载,从纵桥向可分为满跨布载和部分布载,不同的布载方式对桥梁稳定有着影响^[23]。本文计算了 4 种不同活载布载方式下结构的非线性稳定系数,结果如表 2 所示,其中工况 4,5,7 的稳定系数为 3.1,工况 6 的稳定系数为 3.2。

由计算结果可见:工况 4 和工况 5 的非线性稳定安全系数相同,说明单线偏心布载带来的不利影响与活载总值减半带来的有利影响基本相互抵消;工况 6 和工况 7 在主跨布置活载,单线偏心布载带

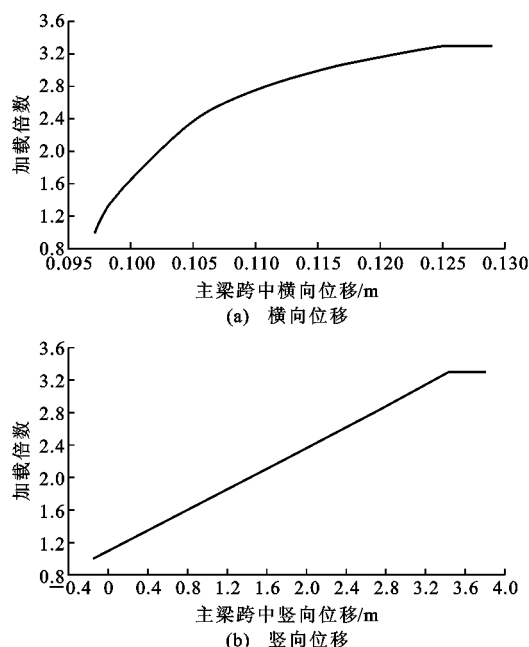


图12 主梁跨中节点荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-deflection Curves of Main Beam Midspan Joint

来的不利影响较大。因此,在活载的布置方式中,仅主跨布载相对于全桥满跨布载时,偏心效应对结构的非线性稳定影响更大。

4 结 语

(1)西固黄河大桥主桥施工典型阶段、成桥及运营阶段的非线性稳定安全系数均满足规范设计要求,结构失稳均以索塔纵桥向失稳和主梁面内失稳为主。

(2)在成桥状态下,从初始加载直至达到其极限承载力这一过程中,斜拉索和索塔的应力逐渐增大,当达到桥梁结构极限承载力时,斜拉索发生部分断裂,索塔混凝土材料达到屈服强度,索塔和主梁连接部位出现塑性区,失稳破坏过程合理。

(3)活载布载方式对结构非线性稳定性能影响不大,但当活载非全跨满布时,应注意单侧车道布载对结构的偏心受荷影响。

参考文献:

References:

[1] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.
LI Guo-hao. Stability and Vibration of Bridge Structures[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992.

[2] 雷宇,赵雷,黎曦. 大跨度组合梁斜拉桥极限承

载力影响因素[J]. 西南交通大学学报,2009,44(6): 812-816.

LEI Yu,ZHAO Lei,LI Xi. Influencing Factors of Ultimate Load-bearing Capacity of Long-span Composite Girder Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2009,44(6):812-816.

- [3] 范立础. 桥梁工程[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,1996.
FAN Li-chu. Bridge Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press,1996.
- [4] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2015.
XIANG Hai-fan. Advanced Theory of Bridge Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [5] 杨鸥,李惠,欧进萍. 钢筋混凝土斜拉桥寿命期内整体极限承载力分析[J]. 土木工程学报,2012,45(3):116-126.
YANG Ou,LI Hui,OU Jin-ping. Life-cycle Evolution of the Ultimate Load Carrying Capacity of RC Cable-stayed Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(3):116-126.
- [6] 邓晓光,卢志芳,李倩. 三塔斜拉桥主梁节段施工非线性稳定性分析[J]. 桥梁建设,2015,45(2):116-121.
DENG Xiao-guang,LU Zhi-fang,LI Qian. Nonlinearity Stability Analysis of Main Girder Segments of Three-pylon Cable-stayed Bridge at Construction Stage[J]. Bridge Construction,2015,45(2):116-121.
- [7] KIM H J,WON D H,KANG Y J,et al. Structural Stability of Cable-stayed Bridges During Construction [J]. International Journal of Steel Structures,2017,17(2):443-469.
- [8] LEE K,KIM S,CHOI J H,et al. Ultimate Behavior of Cable Stayed Bridges Under Construction: Experimental and Analytical Study[J]. International Journal of Steel Structures,2015,15(2):311-318.
- [9] ADELI H,ZHANG J. Fully Nonlinear Analysis of Composite Girder Cable-stayed Bridges[J]. Computers & Structures,1995,54(2):267-277.
- [10] XU M,GUO W W,XIA H,et al. Nonlinear Aerostatic Stability Analysis of Hutong Cable-stayed Railcum-road Bridge[J]. Wind and Structures,2016,23(6):485-503.
- [11] KIM S,KANG Y J. Structural Behavior of Cable-stayed Bridges After Cable Failure[J]. Structural Engineering and Mechanics,2016,59(6):1095-1120.
- [12] 雷宇,黎曦. 大跨度组合梁斜拉桥全过程稳定性

- 研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 71-75.
- LEI Yu, LI Xi. Study of Stability of Long-span Composite Deck Cable-stayed Bridge During Construction Process[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 71-75.
- [13] 李传习, 张 磊. 九江长江大桥混合梁斜拉桥稳定分析[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(4): 17-23.
- LI Chuan-xi, ZHANG Lei. Stability Analysis of Long-span Hybrid Girder Cable-stayed Bridge of Jiujiang Yangtze River Bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(4): 17-23.
- [14] 赵 雷, 孙才志, 杨兴旺. 鄂东长江大桥施工过程非线性稳定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(5): 741-747.
- ZHAO Lei, SUN Cai-zhi, YANG Xing-wang. Stability Analysis of Edong Yangtze River Bridge During Construction[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(5): 741-747.
- [15] 卜一之, 赵 雷, 李 乔. 苏通长江大桥结构非线性稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 84-91.
- BU Yi-zhi, ZHAO Lei, LI Qiao. Structural Nonlinear Stability Analysis of Sutong Yangtze River Bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1): 84-91.
- [16] 张 敏, 高宗余, 陈 佳, 等. 千米跨度公铁两用钢桁梁斜拉桥几何非线性研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(5): 15-20.
- ZHANG Min, GAO Zong-yu, CHEN Jia, et al. Study of Geometric Nonlinearity of Rail-cum-road Steel Truss Girder Cable-stayed Bridge with Span Length over 1 000 m[J]. Bridge Construction, 2014, 44(5): 15-20.
- [17] 杨兴旺. 大跨度斜拉桥施工全过程非线性行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- YANG Xing-wang. Research on the Nonlinear Behavior of Long-span Cable-stayed Bridges Considering Overall Construction Process[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [18] 徐金勇, 颜全胜. 大跨度混合梁斜拉桥弹塑性极限承载力分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(5): 44-50.
- XU Jin-yong, YAN Quan-sheng. Analysis of Elastoplastic Ultimate Load Bearing Capacity of Long Span Hybrid Girder Cable-stayed Bridge[J]. Bridge Construction, 2012, 42(5): 44-50.
- [19] 吴安杰, 赵 雷. 超长桩基大跨预应力混凝土斜拉桥施工过程稳定性研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(2): 36-41.
- WU An-jie, ZHAO Lei. Study of Stability of Long Span PC Cable-stayed Bridge with Super Long Piles in Process of Construction[J]. Bridge Construction, 2016, 46(2): 36-41.
- [20] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG Xin-min. Numerical Analysis of Engineering Structure with ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [21] 赵 雷, 武芳文. 南京长江三桥初步设计方案施工阶段稳定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(4): 467-472.
- ZHAO Lei, WU Fang-wen. Stability Analysis of Preliminary Schemes of Nanjing No. 3 Bridge in Construction Stage[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(4): 467-472.
- [22] JTG/T D65-01—2007, 公路斜拉桥设计细则[S].
- JTG/T D65-01—2007, Guidelines for Design of Highway Cable-stayed Bridge[S].
- [23] 杨兴旺, 赵 雷. 高速铁路大跨度斜拉桥稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2005(6): 16-19.
- YANG Xing-wang, ZHAO Lei. Stability Analysis of Long Span Cable-stayed Bridge in High-speed Railway[J]. Railway Engineering, 2005(6): 16-19.