

DOI:10.11918/202004014

特大跨径地锚式悬索桥静力稳定性分析

黄 侨¹,单或诗¹,宋晓东¹,李 林²,李维珍¹

(1.东南大学 交通学院,南京 211189; 2.中铁大桥勘测设计院集团有限公司,武汉 430050)

摘 要: 为了解悬索桥在不同简化模型下的静力稳定性,全面分析其整体失稳过程及最终失稳模态,基于地锚式悬索桥主塔失稳导致全桥失稳的受力特点,以在建的南京仙新路长江大桥为工程背景,采用大型有限元分析软件 ABAQUS 建立了全桥多尺度模型和独塔实体模型,分析对比了线性稳定系数、双重非线性荷载系数、线性失稳模态以及最终破坏形态. 分析结果表明:双重非线性稳定安全系数相比于线性有较大降低,非线性稳定计算对于特大跨径地锚式悬索桥应成为必需;全桥多尺度模型的线性稳定系数略大于独塔模型,而全桥多尺度模型的非线性荷载系数则反之,简化的独塔模型仅能在一定程度上代表全桥结构计算结果;主塔发生非线性失稳时塔底附近的混凝土主压应力和钢筋应力均达到抗压强度标准值,材料发生屈服导致结构发生失稳;背风侧主塔下塔柱失稳破坏时呈现出典型的压弯破坏形态,迎风侧塔柱失稳破坏时呈现出混凝土压碎区交叉的压弯扭复合受力破坏形态,随着结构薄壁化趋势的发展,工程设计在满足强度要求的同时应更关注稳定性要求. 研究结果可为未来特大跨径地锚式悬索桥的设计计算以及简化模型的选取提供参考.

关键词: 悬索桥;静力稳定性;多尺度模型;稳定系数;破坏形态

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)06-0140-09

Static stability analysis of long-span earth-anchored suspension bridge

HUANG Qiao¹, SHAN Yushi¹, SONG Xiaodong¹, LI Lin², LI Weizhen¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: To study the static stability of suspension bridges under different simplified models and comprehensively analyze the entire instability process and failure modes, based on the mechanical characteristic that the instability of main tower results in the instability of the entire bridge, a full-bridge multiscale model and a single-tower solid model were established by ABAQUS, taking Nanjing Xianxin Road Yangtze River Bridge under construction as the project background. Linear stability coefficients, double nonlinear load coefficients, linear buckling modes, and failure modes were analyzed and compared. Results show that the double nonlinear stability safety coefficients were greatly reduced compared with the linear stability coefficients, and nonlinear stability calculation should be necessary for long-span earth-anchored suspension bridges. The linear stability coefficients of the full-bridge multiscale model were slightly larger than those of the single-tower solid model, while it was opposite for the nonlinear load coefficients. The stability results of the simplified single-tower model could not fully represent the real situation. The concrete principal compressive stress and reinforcement stress near the bottom of the tower both reached standard strength values when the main tower experienced nonlinear instability, indicating that the material yield led to the structural instability. The tower leg on the leeward side failed in the typical compression-flexural failure mode, while that on the windward side failed in the compressive-flexural-torsional failure mode. With the development of the thin-walled structure, more attention should be paid to stability when the strength requirements are met. The research can provide reference for the design and model simplification of long-span earth-anchored suspension bridges.

Keywords: suspension bridge; static stability; multiscale model; stability coefficient; failure mode

21 世纪以来,伴随着国民经济的迅速发展,交通需求日益增长,高新材料不断出现,设计理论不断完善,施工技术不断进步,特大跨径缆索承重桥梁也

得到了兴起和发展,其中悬索桥以简明的传力路径和高效的材料利用具有巨大的跨径增长潜力. 目前世界主跨排名前十的已建成的悬索桥中国占 6 座,包括主跨 1 700 m 的杨泗港长江大桥和主跨 1 688 m 的虎门二桥. 通常悬索桥的合理矢跨比为 1/9 ~ 1/11,因此跨径的不断增大将导致桥塔的高度不断增加;同时跨径越大,恒载所占的比重将越大,因此主塔即

收稿日期: 2020-04-02
基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20181278)
作者简介: 黄 侨(1958—),男,教授,博士生导师
通信作者: 黄 侨, qhuanghit@126.com

使在空载状态下也承担着巨大的轴向压力;为减小桥塔自重而带来的桥塔截面薄壁化趋势也进一步降低了桥塔刚度. 在上述情况下,大跨径悬索桥桥塔的静力稳定问题变得日益突出.

针对悬索桥稳定性的研究已有较多,主要集中在两个方面. 一方面为主缆对塔顶的约束刚度研究,如文献[1]研究了主缆对塔顶的约束刚度确定问题,文献[2]推导了多塔悬索桥的纵向刚度计算公式,文献[3]通过虚功原理推导了主缆对多塔悬索桥中的中塔纵向弹簧约束刚度表达式,文献[4]研究了双缆相比于单缆对多塔悬索桥刚度的影响. 另一方面为悬索桥稳定性全过程研究,如文献[5]基于梁单元模型计算分析了施工阶段和成桥阶段的两类稳定性,文献[6]则对悬索桥索塔的稳定性的全过程进行了分析,文献[7]分析计算了自锚式悬索桥的整体稳定和局部稳定问题,文献[8]对多塔悬索桥进行了中间钢桥塔结构静动力稳定性研究. 然而,目前对悬索桥稳定性的研究主要为基于杆系单元的有限元模型计算分析,其仅能得出稳定系数,不能模拟非线性失稳时最终混凝土压碎的破坏形态^[9]. 随着悬索桥跨度的增大,桥塔增高,恒载增加,结构静力稳定性下降,结构稳定系数将逐渐减小并接近规范的安全系数或工程经验限值. 此时除计算结构的稳定系数之外,还应全面地分析整个失稳过程、最终失稳模态及破坏形态以提供更详尽的结构失稳信息. 因此,有必要采用实体单元模型对桥塔结构失稳或破坏的过程进行更深入的研究.

由于实体单元的计算代价较高,尤其大跨径桥梁结构实体模型的计算非常耗时. 考虑到悬索桥主

塔通常是受压为主的构件,桥塔失稳是悬索桥失稳的控制性条件,可建立全桥多尺度模型(其中仅主塔采用实体单元)和独塔实体模型两种模型进行分析. 对于这两种计算模型,显然前者对于桥塔的边界条件模拟更为精确,而后的计算代价明显减小,然而在稳定计算中两种模型计算结果的具体差异尚未明确. 因此,本文以在建南京仙新路长江大桥为工程背景,建立全桥多尺度模型及独塔实体模型,以实体单元模拟主要受压构件,即主塔,以杆单元或梁单元模拟其余构件,考虑恒载、活载和静风荷载,分析比较两种有限元模型所得到的稳定安全系数和失稳破坏模态,研究结果可为未来特大跨径地锚式悬索桥的设计计算以及简化模型的选取提供参考.

1 工程背景

在建南京仙新路长江大桥是一座跨径 580 m + 1 760 m + 580 m 的门形塔钢箱梁地锚式悬索桥,为目前国内已建和在建中最大跨径的悬索桥,矢跨比 1/9,主塔高 263.8 m,其立面布置见图 1;加劲梁宽 31.5 m,桥面双向 6 车道,其标准横断面见图 2;桥塔结构设计图见图 3.

南京仙新路长江大桥的加劲梁为钢箱梁,采用 Q345qD 钢材,主缆采用 2 100 MPa 高强钢丝,吊索采用 1 700 MPa 高强钢丝. 塔柱为普通钢筋混凝土结构,采用 C60 混凝土和 HRB400 普通钢筋,塔柱横桥向尺寸为 7.5 ~ 10.5 m,纵桥向尺寸为 11.0 ~ 14.0 m. 上、中、下塔柱壁厚的变化范围均为 1.2 ~ 1.6 m. 上下横梁均为预应力混凝土结构,预应力筋采用 1 860 MPa 钢绞线.

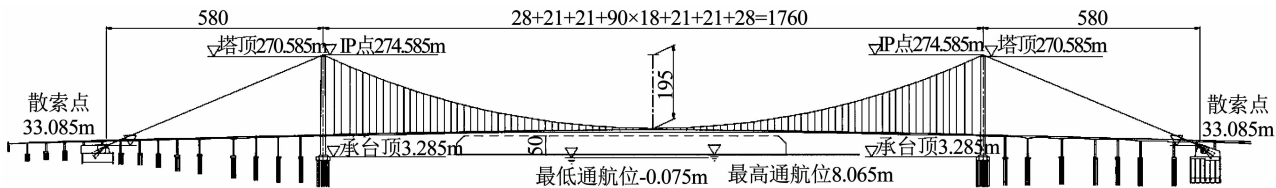


图 1 悬索桥立面布置 (m)
Fig. 1 Elevation of suspension bridge (m)

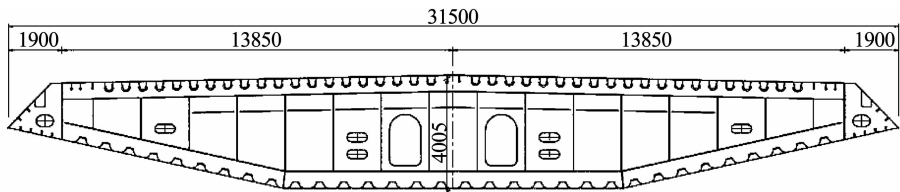


图 2 加劲梁横断面 (mm)
Fig. 2 Cross section of stiffening girder (mm)

对于计算荷载,考虑恒载、活载和风荷载. 恒载包括自重和二期恒载;汽车荷载等级为城市 - A 级^[12],经过对比分析,轴力最大的工况比弯矩最大的工况对主塔的稳定性更为不利,因此活载采用满载布载工况;风荷载考虑 W1 和 W2 风作用水平^[13],方向同坐标轴方向. 成桥阶段的独塔实体模型中主缆和加劲梁传递到主塔上的作用力均采用全桥多尺度模型计算所得的内力结果.

有限元分析中考虑了两个计算阶段,即主塔裸塔阶段和成桥阶段,相应的荷载组合见表 1. 荷载组合中的计算荷载均作为稳定分析中的荷载变量,全桥多尺度模型所计算的荷载组合为组合 3 ~ 7,独塔实体模型所计算的荷载组合为组合 1 ~ 7.

表 1 荷载组合		
Tab. 1 Load combinations		
序号	计算阶段	计算荷载
1	裸塔阶段	恒载 + 横向施工风
2	裸塔阶段	恒载 + 纵向施工风
3	成桥阶段	恒载 + 活载
4	成桥阶段	恒载 + 横向 W2 风
5	成桥阶段	恒载 + 纵向 W2 风
6	成桥阶段	恒载 + 活载 + 横向 W1 风
7	成桥阶段	恒载 + 活载 + 纵向 W1 风

本文首先进行线性稳定分析,采用了软件中的屈曲分析 (Buckle),得到特征值和屈曲模态,即线性稳定系数和线性失稳模态;然后进行非线性稳定分析,采用了软件中的静态隐式分析 (Static, General),考虑包括材料非线性和几何非线性的双重非线性,以一阶线性失稳模态作为初始缺陷形状,在线性稳定系数的基础上估计荷载施加倍数,同步逐级施加相应荷载组合下的计算荷载进行非线性计算,得到荷载位移曲线和破坏形态,并进一步得出极限承载力及相应的荷载系数^[14]. 线性稳定系数及非线性荷载系数均可视为结构稳定的安全系数.

3 稳定性分析

3.1 稳定性分析理论

稳定问题可以分为两类,第一类稳定问题和第二类稳定问题^[15],或称为分支点失稳问题和极值点失稳问题.

分支点失稳问题将结构简化为理想状态,不考虑结构的初始缺陷,假定材料为线弹性,且不考虑变形的二阶效应. 结构平衡方程为

$$(K_0 + K_{\sigma})U = P.$$

式中: K_0 、 K_{σ} 分别为结构弹性刚度矩阵和初应力刚

度矩阵, U 、 P 分别为节点位移矩阵和等效节点荷载矩阵.

分支点失稳问题实质为特征值 λ 的求解问题,其特征方程为

$$|K_0 + \lambda K_{\sigma}| = 0.$$

极值点失稳问题则承认结构可能存在的初始缺陷,并考虑几何非线性和材料非线性,材料采用弹塑性本构关系,变形过程中的二次效应也纳入计算. 结构平衡方程为

$$(K_0 + K_L + K_{\sigma})U = P.$$

式中 K_0 、 K_L 分别为结构弹塑性刚度矩阵和大位移刚度矩阵.

由于第二类稳定问题中位移逐步增加的每一步都对应不同的结构刚度矩阵,因此采用荷载增量法逐级增加荷载,所得荷载位移曲线的荷载上限即为失稳极限荷载. 对于以受压为主的桥塔结构,第二类稳定问题的实质就是极限承载力问题,即桥塔失效前承受外荷载的最大能力,失稳破坏反映的是桥塔结构刚度与强度耦合失效的现象^[15].

3.2 稳定性计算结果及分析

在本文所涉及的非线性计算过程中,主缆、吊索和加劲梁的应力水平均未进入塑性阶段,因此不考虑主缆、吊索和加劲梁的局部失效问题. 计算得到全桥多尺度模型和独塔实体模型在 7 种荷载组合下的线性稳定系数和双重非线性荷载系数以及失稳模态结果见表 2. 表中加粗数字为各模型在对应阶段的最小稳定系数或荷载系数,其所对应的荷载组合为最不利荷载组合.

表 2 给出了基于不同模型得到的桥塔稳定性计算结果. 本文从 5 个方面分别对表中的计算结果进行分析和对比.

3.2.1 失稳模态

对比表 2 中裸塔阶段和成桥阶段的失稳模态可见,裸塔阶段的主塔纵向相当于悬臂受力模式,主塔横向相当于框架受力模式,相比于横向刚度,主塔的纵向刚度偏小,因此失稳模态为纵向挠曲失稳;成桥阶段的由于索鞍固定在塔顶且主缆与索鞍间具有足够大的摩阻力,主塔在纵向受到主缆较强的约束作用,此时相比于横向刚度,结构的纵向刚度更大,因此失稳模态为横向挠曲失稳.

3.2.2 稳定系数

由表 2 中线性稳定计算结果可知,独塔模型的线性稳定系数为 12 左右,多尺度模型的线性稳定系数为 14 左右,均超过了规范限值 4.0,满足规范^[16]要求. 由表 2 中非线性稳定计算结果可知,独塔模型在各荷载组合下的非线性荷载系数均大于 2.0,其

表 2 线性稳定系数、双重非线性荷载系数及失稳模态结果

Tab.2 Linear stability coefficients, double nonlinear load coefficients, and buckling modes

序号	计算阶段	线性稳定系数		双重非线性荷载系数		失稳模态
		多尺度模型	独塔模型	多尺度模型	独塔模型	
1	裸塔阶段		12.83		4.19	主塔纵向挠曲
2	裸塔阶段		12.82		3.58	主塔纵向挠曲
3	成桥阶段	13.28	11.33	1.65	2.41	主塔横向挠曲
4	成桥阶段	14.03	11.99	1.69	2.19	主塔横向挠曲
5	成桥阶段	14.04	12.04	1.69	2.50	主塔横向挠曲
6	成桥阶段	13.28	11.32	1.64	2.18	主塔横向挠曲
7	成桥阶段	13.28	11.33	1.65	2.40	主塔横向挠曲

最小值为 2.18,而多尺度模型计算出来的非线性荷载系数在 1.7 左右,低于 2.0,最小值为 1.64.

非线性(含材料非线性和几何非线性)稳定的安全系数限值在现行《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05—2015)^[16]中无明确规定. 根据已有的文献^[17-18],基于部分实桥计算得到的双重非线性荷载系数也有低于 2.0 的情况. 考虑到非线性稳定计算时所有荷载组合中的恒载均为变量,特大跨径地锚式悬索桥主缆拉力中恒载所占的比重已超过 90%^[19],本文计算的仙新桥塔底竖向反力中恒载所占的比重约为 96%,而实际恒载变化的可能性很小,因此荷载系数达到 1.64 的可能性也非常有限. 而且非线性稳定分析的实质是构件及其控制截面的承载力问题,采用 MIDAS Civil 对桥塔结构轴力最大和弯矩最大两种设计工况进行轴向承载力验算结果均可满足要求.

3.2.3 不同荷载组合下的稳定系数的对比

对比表 2 中各种荷载组合下的稳定安全系数可知,无论是多尺度模型还是独塔模型,无论是线性稳定还是非线性稳定,其稳定安全系数的计算结果都存在相同的趋势. 对于裸塔阶段,结构发生纵向挠曲失稳,因此包含纵风的荷载组合稳定安全系数小于包含横风的,最不利荷载组合为组合 2,即“恒载 + 纵向施工风”;对于成桥阶段,结构发生横向挠曲失稳,因此包含横风的荷载组合稳定安全系数小于包含纵风的,最不利荷载组合为组合 6,即“恒载 + 活载 + 横向 W1 风”,且稳定系数由小到大的荷载组合为“恒载 + 活载 + W1 风”,“恒载 + 活载”,“恒载 + W2 风”.

3.2.4 线性稳定系数与非线性荷载系数对比

对比线性和非线性稳定安全系数计算结果可知,对于裸塔阶段,考虑双重非线性的稳定安全系数相比于线性降低了 2/3 ~ 3/4 左右;对于成桥阶段,考虑双重非线性的稳定安全系数相比于线性降低了

5/6 ~ 6/7 左右. 由非线性稳定安全系数相比于线性大幅降低可知,仅计算线性稳定对于大跨度悬索桥已不能满足需求,未来随着悬索桥的跨径逐渐增大,进行基于全桥模型的非线性稳定分析将变得愈加必要.

3.2.5 全桥多尺度模型和独塔实体模型的稳定系数对比

对比全桥多尺度模型和独塔实体模型的成桥阶段稳定计算结果可知,全桥多尺度模型的线性稳定系数略大于独塔模型,而全桥多尺度模型的非线性荷载系数略小于独塔模型.

可以认为,全桥多尺度模型相比之下更精细,边界条件更接近于真实情况,而且非线性分析结果能够反映出整体结构进入非线性阶段后的内力重分布特点,因此更接近真实结果. 但全桥多尺度模型非常庞大,节点和单元数均为独塔实体模型的两倍左右,这对于常规的 32 G 内存的台式机,全桥多尺度模型的计算耗时约为 72 h,而独塔实体模型计算耗时约为 24 h,显然前者求解的时间代价更高. 独塔实体模型则以牺牲边界条件的精确性为代价简化了模型并明显减小了计算耗时,其将塔顶的主缆约束以纵向弹簧约束代替,将非线性计算过程中塔顶主缆及加劲梁支座传递的内力不断增加,并以各种荷载组合下多尺度模型的相应内力作为荷载进行线性增加.

对于线性稳定系数,由于成桥阶段的结构失稳模态为横向挠曲失稳,而独塔模型仅将塔顶的主缆约束以纵向弹簧约束代替,忽略了主缆对塔顶的横向约束刚度,故全桥多尺度模型的线性稳定系数略大于独塔模型.

对于非线性荷载系数,为更深入地剖析独塔模型对于塔顶的力边界条件的简化,以最不利荷载组合(组合 6)为例,提取非线性计算过程中主塔柱的塔顶截面所有节点力的竖向合力,即该塔柱所承担的竖向力. 并将塔顶竖向力系数定义为非线性计算

过程中该竖向力的增长系数,塔顶竖向力系数的基数为外荷载系数等于 1 时的塔顶竖向力;外荷载系数为结构所施加外荷载的增长系数,外荷载系数的基数为相应荷载组合的一倍荷载值。绘制塔顶竖向力系数及外荷载系数随塔顶横向位移的变化曲线见图 5。

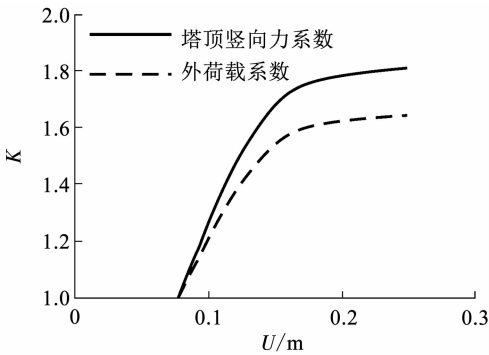


图 5 塔顶竖向力系数及外荷载系数随塔顶横向位移的变化曲线

Fig. 5 Variation of overhead vertical force coefficient and load coefficient with overhead transverse displacement

由图 5 可知,随着位移的增加,塔顶竖向力系数越来越大大于外荷载系数,当外荷载系数增长到 1.6 ~ 1.7 时,塔顶作用的竖向力系数可达到 1.8 ~ 1.9。这意味着在双重非线性稳定计算的过程中,结构刚度不断变化所造成的结构内力重分布使得主塔所承担的荷载比重逐渐增加,而独塔模型假定塔顶传递的竖向力系数等于外荷载系数则忽略了这种不利效应,故全桥多尺度模型的非线性荷载系数会小于独塔模型。

因此,简化的独塔模型能够在减小计算代价的同时在一定程度上代表全桥结构计算结果,但随着悬索桥跨度逐渐增大,采用全桥模型所得到的静力稳定性结果更具参考价值。

3.3 失稳模态和破坏形态分析

对于线性稳定,计算得到独塔实体模型在裸塔阶段和全桥多尺度模型在成桥阶段的最不利荷载组合下(组合 2 和组合 6)的线性失稳模态图见图 6、7。

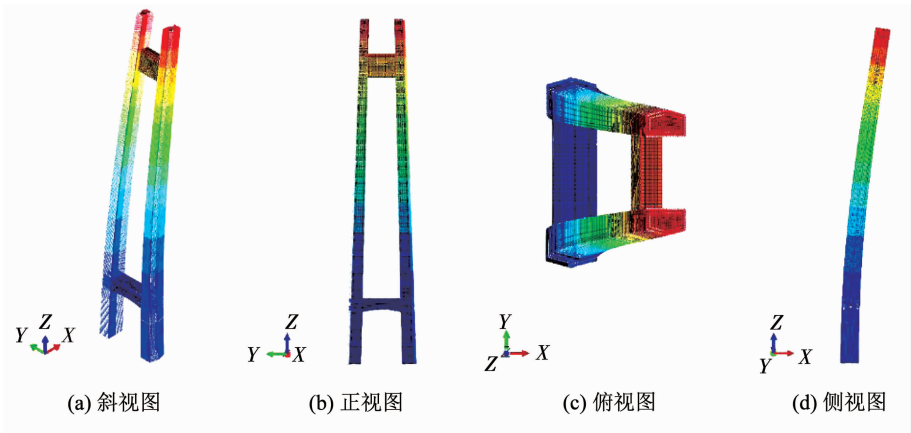


图 6 裸塔阶段线性失稳模态

Fig. 6 Linear buckling modes at construction stage

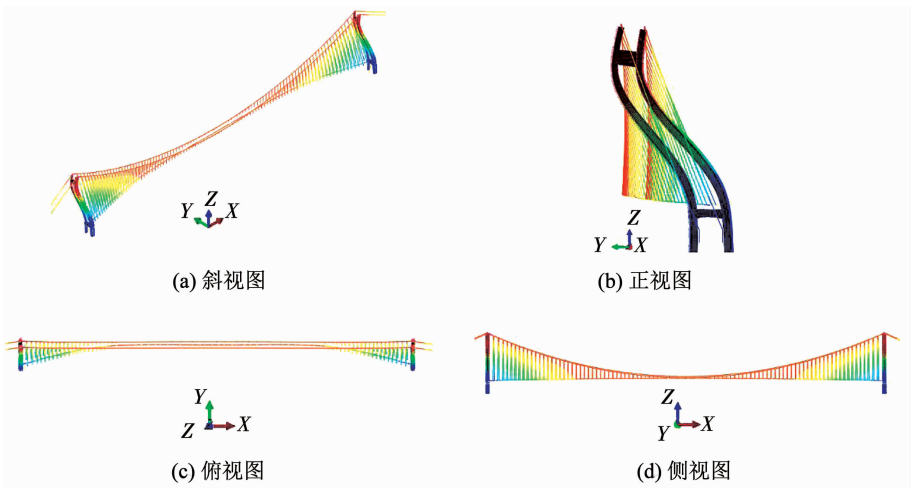


图 7 成桥阶段线性失稳模态

Fig. 7 Linear buckling modes at service stage

由图 6 和图 7 可见,裸塔阶段和成桥阶段的失稳模态分别为纵向挠曲失稳和横向挠曲失稳。

对于非线性稳定,由于悬索桥全桥结构压力最大的部分为主塔下塔柱部分,提取多尺度模型中主塔下塔柱在最不利荷载组合(组合 6)下混凝土达到材料标准值的混凝土峰值应力荷载步以及结构达到极限承载力的极限承载力荷载步的混凝土主压应力和钢筋应力见图 8。图中 X 方向指向跨中, Y 方向为横向 $W1$ 风作用方向。

由图 8 可见,从混凝土峰值应力荷载步到极限承载力荷载步,下塔柱部分的混凝土最大主压应力

已达到 C60 混凝土抗压强度标准值 38.5 MPa,钢筋应力已达到 HRB400 钢筋抗压强度标准值 400 MPa,且材料屈服区域逐渐扩大。另外在极限承载力荷载步,混凝土应变已超过极限压应变 0.003,说明材料逐渐屈服直至最终混凝土被压碎是导致结构发生非线性失稳的原因。由于塔底固结约束的存在,主塔在发生横向挠曲失稳时最先发生屈服的部位为下塔柱部分,而非塔底处。另外,由跨中侧塔柱表面压力高于岸侧塔柱表面压力以及背风侧塔柱压力略高于迎风侧塔柱压力可知,塔柱结构的主要变形模式为纵向挠曲,并伴随着横向挠曲。

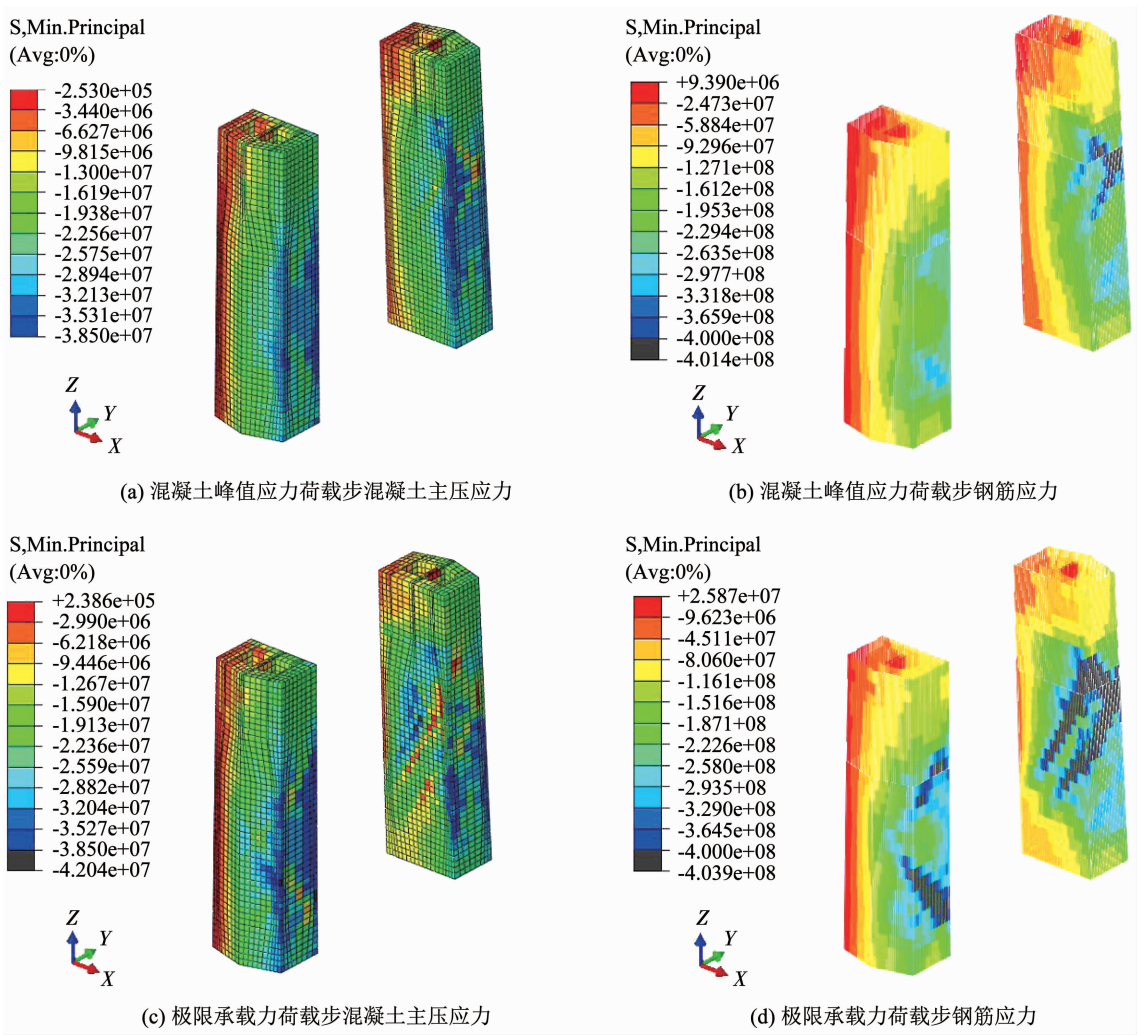


图 8 组合 6 混凝土主压应力和钢筋应力 (Pa)

Fig. 8 Concrete principal compressive stress and reinforcement stress under load combination 6 (Pa)

为更清晰地展示非线性计算中的破坏形态,提取多尺度模型中主塔下塔柱在最不利荷载组合(组合 6)下的极限承载力荷载步至放宽收敛条件所得的最终荷载步的混凝土受压损伤因子 DAMAGEC (compressive damage) 演变图见图 9。

结合图 8 和图 9 可见,在横向风荷载的作用下,

塔柱结构的变形伴随着横向挠曲,因此图 8 中主塔塔柱背风侧混凝土和钢筋达到相应抗压强度标准值的部分比迎风侧更大,这也导致图 9 中塔柱背风侧混凝土受压损伤所带来的刚度折减较为严重,且损伤发展更为迅速。且由图 9 可见,主塔塔柱背风侧主要承受竖向压力和指向跨中侧的剪力,其所受横风

荷载相对较小,因此最终发生塔底混凝土压碎破坏时呈现出典型的压弯破坏形态;而塔柱迎风侧由于所受的横风荷载较大,在竖向压力、横向剪力和纵向剪力的共同作用下有扭转的趋势,因此呈现出混凝土

土压碎区交叉的压弯扭复合受力破坏形态. 在工程建设中,随着材料强度的提高,结构呈现出薄壁化趋势,高强度等级的材料能够满足薄壁化趋势的强度要求,而与此同时应更关注结构的稳定性要求.

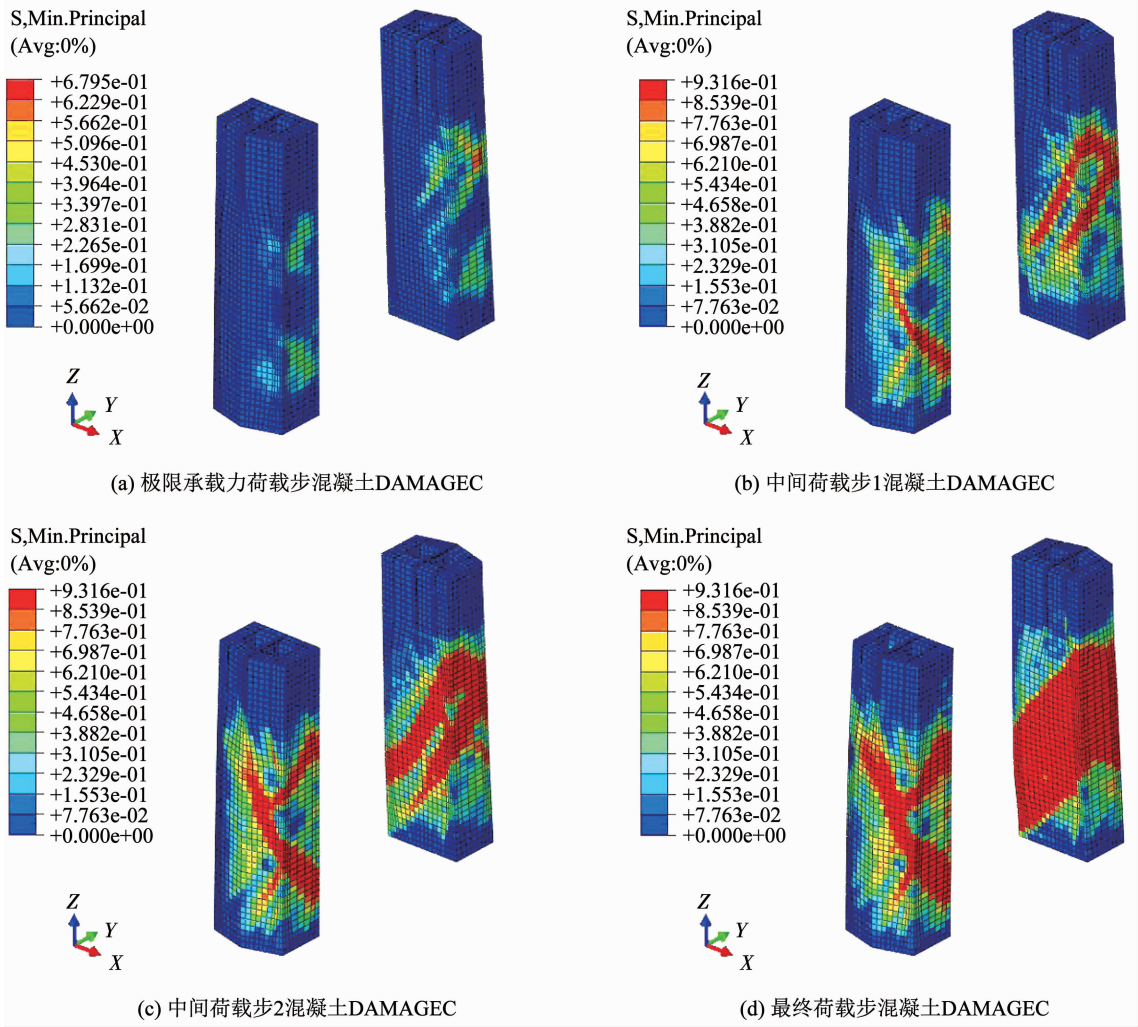


图 9 组合 6 混凝土受压损伤因子演变图

Fig. 9 Development of concrete compressive damage factors under load combination 6

4 结 论

1) 对特大跨径地锚式悬索桥桥塔稳定性的进行计算分析,结果表明,裸塔阶段考虑双重非线性的稳定安全系数相比于线性降低了约 2/3 ~ 3/4;成桥阶段考虑双重非线性的稳定安全系数相比于线性降低了约 5/6 ~ 6/7. 对于特大跨径地锚式悬索桥,仅计算线性稳定性已难以满足安全判断的需求,对该类结构的非线性稳定分析应予以足够的重视,并可以作为极限状态下承载力复核的辅助手段.

2) 全桥多尺度模型的线性稳定系数略大于独塔模型,而全桥多尺度模型的非线性荷载系数略小于独塔模型. 简化的独塔实体模型能够在减小计算代价的同时在一定程度上代表全桥结构计算结果,但随着悬索桥跨度逐渐增大,全桥多尺度模型所得

到的结果更具参考价值.

3) 主塔达到极限承载力,发生非线性失稳破坏时,混凝土及钢筋应力均已达到其抗压强度标准值,材料的屈服导致了结构发生非线性失稳.

4) 主塔塔柱失稳破坏时,背风侧呈现出典型压弯破坏,迎风侧呈现出混凝土压碎区交叉的压弯扭复合受力破坏形态. 随着结构薄壁化趋势的发展,在满足承载力要求的同时亦应关注桥塔结构的非线性稳定问题.

参考文献

[1] 刘恩吉. 悬索桥桥塔纵向稳定性分析[J]. 世界桥梁, 2009(2): 45
LIU Enji. Longitudinal stability analysis of suspension bridge tower [J]. World Bridges, 2009(2): 45
[2] MA X, NIE J, FAN J. Longitudinal stiffness of multispan suspension bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(5):

- 06015010
- [3] 柴生波, 肖汝诚, 张学义, 等. 多跨悬索桥中塔纵向刚度研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 67
CHAI Shengbo, XIAO Rucheng, ZHANG Xueyi, et al. Study of longitudinal stiffness of middle pylon in multi-span suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 67
- [4] 张清华, 张莹, 程震宇, 等. 双缆悬索桥的静力特性及其关键影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2): 238
ZHANG Qinghua, ZHANG Ying, CHENG Zhenyu, et al. Static behavior and key influencing factors of double-cable suspension bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(2): 238
- [5] 王春江, 戴建国, 臧瑜, 等. 自锚式钢箱梁悬索桥静力稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 47
WANG Chunjiang, DAI Jianguo, ZANG Yu, et al. Analysis on static stability of self-anchored suspension bridge with steel box girder[J]. Bridge Construction, 2019, 49(2): 47
- [6] 段瑞芳, 钱登潮, 赵宝俊. 悬索桥索塔稳定性全过程分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(2): 224
DUAN Ruifang, QIAN Dengchao, ZHAO Baojun. Research on stability of pylon of suspension tower[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(2): 224
- [7] 王浩. 悬索桥索塔的稳定性全过程分析[D]. 西安: 长安大学, 2015
WANG Hao. Research on stability of pylon of suspension bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015
- [8] 张兴标. 多塔悬索桥中间钢桥塔结构静动力稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017
ZHANG Xingbiao. Study on static and dynamic stability of central steel pylon of multi-pylon suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017
- [9] 洪健. 基于 ANSYS 的钢筋混凝土框架非线性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2009
HONG Jian. Nonlinear analysis of reinforced concrete frame based on ANSYS[D]. Changsha: Central South University, 2009
- [10] 李立峰, 范昕, 石雄伟, 等. 大比例预应力 UHPC-T 形梁抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(5): 84
LI Lifeng, FAN Xin, SHI Xiongwei, et al. Experimental study on flexural behavior of large-scale prestressed UHPC T-shaped beam[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(5): 84
- [11] 赵东. 大跨度多塔叠合梁斜拉桥稳定分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018
ZHAO Dong. Stability analysis of long-span multi-pylon composite girder cable-stayed bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018
- [12] 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Code for design of the municipal bridge: CJJ 11—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011
- [13] 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018
Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018
- [14] 南京仙新路过江通道工程跨江主桥主塔受力性能研究报告[R]. 南京: 东南大学交通学院, 2019
Research report on the mechanical performance of the main tower of Nanjing Xianxin Road Yangtze River Bridge[R]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2019
- [15] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2013
XIANG Haifan. Advanced theory of bridge structure[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2013
- [16] 公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015
Specification for design of highway suspension bridge: JTG/T D65-05—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015
- [17] 何波, 郭小川, 朱宏平, 等. 大跨度薄壁墩连续刚构桥稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2006(12): 62
HE Bo, GUO Xiaochuan, ZHU Hongping, et al. Stability analysis of large span continuous rigid frame bridge with thin-wall pier[J]. Journal of Highway and Transportation on Research and Development, 2006(12): 62
- [18] 王星海. 独塔斜拉桥的整体稳定性分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007
WANG Xinghai. The whole stability analysis of the cable-stayed bridge with single tower[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007
- [19] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 悬索桥施工过程精细化分析研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 80
LUO Xiheng, XIAO Rucheng, XIANG Haifan. Detailed analysis of construction process of suspension bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10): 80. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2005.10.014

(编辑 魏希柱)