

# 几何非线性对大跨斜拉桥稳定性的影响

肖光宏<sup>1</sup>, 张秋陵<sup>2</sup>, 黄明海<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:**针对主跨 460 m 的预应力钢筋砼斜拉桥—重庆奉节长江大桥, 运用有限元系统 ANSYS 分析施工及成桥状态下, 线性和非线性因素对整体稳定性的影响, 并根据 ANSYS 计算所得参数对大桥稳定性进行评价。

**关键词:**斜拉桥; 有限元; 几何非线性; 整体稳定性

中图分类号: U448

文献标识码: A

文章编号: 1001-716X(2007)03-0017-03

## Influences of the Geometric Nonlinear on the Stability of Long-span Cable-stayed Bridges

XIAO Guang-hong<sup>1</sup>, ZHANG Qiu-ling<sup>2</sup>, HUANG Ming-hai<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Based on the Chongqing Fengjie Yangtze River Bridge with span of 460m, the influences of Geometry linear and nonlinear on the stability of long-span cable-stayed bridge was analysed in the construction stage and the service stage. The stability of the bridge was evaluated with calculating results from software ANSYS.

**Key words:** cable-stayed bridge; finite element method; the geometric nonlinear; stability analysis

斜拉桥是有塔、梁、索 3 种基本构件组成的高次超静定柔性结构体系。主梁、桥塔受压为主, 成压弯状态。随着斜拉桥跨径的不断增大, 其索塔越来越高, 主梁越来越纤细, 跨度的增加引起梁、塔承受的轴向力剧增, 再加上索的垂度效应, 使其几何非线性效应明显增大, 这些因素的影响大大降低了斜拉桥的稳定性, 使稳定问题变的突出。

笔者主要对重庆奉节长江大桥的稳定性进行分析, 综合考虑斜拉桥几何非线性的各影响因素, 利用大型有限元软件 ANSYS 对该桥的施工过程中及运营状态下的稳定性进行分析, 给出了该桥的稳定性有关参数的分析和比较, 从而为斜拉桥的设计、施工及科研提供参考依据。

### 1 工程概况及建模介绍

奉节长江大桥是一座大跨径的预应力砼斜拉桥, 桥全长 893 m, 主跨 460 m, 跨径布置采用不对称 5 跨布置, 即 30.4m + 202.6m + 460m + 174.7m +

25.3m, 桥宽 20.5 m。

主梁边跨因设置压重采用箱梁, 其余的均为  $\Pi$  型梁。悬臂浇筑施工, 最后在中跨进行合拢段施工。主塔为 A 型塔, 分上塔柱、横梁、中塔柱、盖板、下塔柱五部分, 上、中塔柱及横梁均为单箱单室截面, 下塔柱为单箱 3 室截面。斜拉索为空间双索面, 每塔每索面共 28 对斜拉索, 全桥共 224 根斜拉索。下部结构共有 6 个桥墩, 0 号、5 号为边墩, 1 号、4 号为辅助墩, 2 号、3 号为主塔墩。主梁与塔交叉处设置 8 根 30 m 长的纵向弹性索, 从而形成半漂浮体系。设计荷载: 汽车-超 20, 挂车-120。

采用鱼骨梁模式来模拟全桥进行空间分析。

鉴于边墩、辅助墩受力较小, 其结构自身不会失稳, 主要对主梁起约束作用, 因此, 在建立有限元模型时, 对边墩、辅助墩不进行模拟, 仅考虑其对主梁的支撑约束作用。

收稿日期: 2006-04-30; 修订日期: 2006-05-07

作者简介: 肖光宏(1957-), 男, 重庆人, 副教授, 硕士, 从事桥梁及结构的设计、施工和科研工作。

主塔为钢筋砼矩形空心结构,在有限元分析中采用梁单元(beam188单元)进行模拟。

主梁分为箱形段和Ⅱ型段,Ⅱ型段由两根贯穿全桥的纵肋、分布于纵肋间的横隔板以及置于纵肋和横隔板上的桥面板构成,在主梁箱型段,箱梁底板承受压重。主梁简化为鱼骨模型中的鱼骨,在有限元分析中采用梁单元(beam188单元)模拟。

在有限元模型中,主梁与斜拉索之间的连接即鱼骨模型中的鱼刺,为大刚度杆件,用梁单元(beam4单元)进行模拟。

斜拉索只承受拉力,抗压刚度很低。模型中采用杆单元(link10单元)进行模拟。斜拉索考虑为线性弹性材料,受拉弹性模量为钢的弹性模量。成桥状态下,全桥有限元模型共有1007个节点,840个单元。有限元模型见图1。



图1 全桥有限元模型

考虑的荷载包括一期恒载(自重)、二期恒载(桥面铺装等)、压重、钢束预应力、斜拉索预应力、纵横向撞击力、水流力、侧向风荷载、施工挂篮荷载、活荷载(车辆、人群)等。

## 2 稳定理论及 ANSYS 实现方法

### 2.1 线性稳定理论及 ANSYS 实现方法

对于线弹性稳定问题,不考虑结构的几何非线性和材料非线性影响,基本计算公式为:

$$(K_0 + \lambda K_\sigma) \{\delta\} = 0$$

式中:  $[K_0]$  为结构的整体刚度矩阵;  $[K_\sigma]$  为结构的整体几何刚度矩阵;  $\{\delta\}$  为节点的位移列阵。

由此可见,结构的稳定性分析最终归结为广义特征值问题。  $\{\Delta\delta\} = 0$  是上式的一组解,表示结构未发生失稳变形的情况,这组解并不是我们需要的。为了使上式取得非零解,则要求:  $|[K_0] + \lambda[K_\sigma]| = 0$ 。

这就是计算稳定安全系数的特征方程,若为  $n$  阶,在理论上可得到  $n$  个特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ,相应地可求出  $n$  个特征向量,它们分别表示各阶稳定安全系数的大小及相应的屈曲模式。对于稳定问题,有实际意义的只是最小正特征值所对应的临界荷载  $\lambda_{\min} P$ 。如果特征方程没有正特征值,说明在这种荷载下结构没有失稳问题,例如杆在轴向拉力下就不会发生失稳问题。

$\lambda$  称为特征值,也叫比例因子或载荷因子,作用荷载  $P$  乘以它就等于临界屈曲荷载  $P_{cr}$ 。作用荷载可以是任意的,如果给定荷载  $P$  是单位荷载,特征值即是屈曲荷载,如果给定荷载  $P$  是实际荷载,特征值即为该结构的屈曲安全系数。

ANSYS 可以直接求得各阶的稳定安全系数及对应的屈曲模态,当然,仅第一阶安全系数和对应的屈曲模态对我们的分析有意义。

### 2.2 非线性稳定理论及 ANSYS 实现方法

结构的非线性失稳为无平衡分支的极值点失稳,表现为在荷载达到某一极限时,结构的变形大幅度增长或截面超过极限承载能力,最终导致结构整体失稳。

对于斜拉桥施工过程中各状态以及成桥状态的整体非线性失稳安全系数,现定义为结构在丧失承载能力前所能承受的荷载量与设计荷载量的比值。即:

$$\{P_{cr}\} = \lambda \{P_g\}$$

式中:  $\{P_{cr}\}$  为某工况下结构在失稳时的总荷载(包括恒载、活载);  $\{P_g\}$  为某工况下结构的设计荷载(包括恒载、活载);  $\lambda$  为稳定承载能力安全系数。

由此可知,结构的稳定性与结构的极限承载力是等价的,结构的非线性稳定分析与结构的非线性强度分析是统一的,它们统一于增量加载过程中。

斜拉桥的几何非线性影响因素概括为3个效应,即拉索的垂度效应、弯矩-轴力耦合产生的梁-柱效应及大变形效应。ANSYS 分析中通过在求解时打开大变形效应(NLGEOM, ON)考虑这些非线性因素。

ANSYS 无法直接得出非线性稳定分析的屈曲系数,也即上式中的  $\lambda$  值,而是借助于屈曲。

图2结构非线性荷载-位移曲线分析中对结构的逐步加载得到的荷载-位移曲线,判断结构的失稳点,从而计算出屈曲系数。

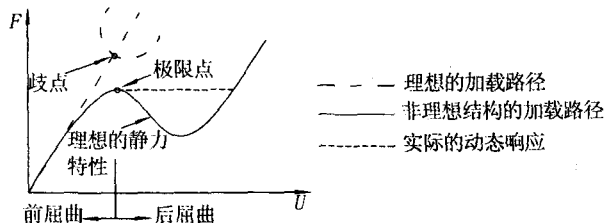


图2 非线性荷载-位移曲线

一般的结构非线性荷载-位移曲线如图2,此图显示了理想的加载路径、非理想结构的加载路径及

结构实际的动态响应理想加载路径对应于特征值屈曲分析,而非理想的加载路径对应于结构的非线性屈曲分析,在 ANSYS 分析中,可以采用载荷控制、位移控制及弧长法得到荷载-位移曲线.笔者采用 Newton-Raphson 方法(N-R 法)进行前屈曲分析,得到极值点前上升段曲线,弧长法进行后屈曲分析,得到极值点后下降段曲线.

### 3 分析结果

分析中共进行了 9 个工况下的线性和几何非线性稳定分析计算,各工况下的稳定安全系数见表 1,以上分析结果可以归为 3 类,即双悬臂状态、单悬臂状态、成桥状态,在这 3 类中各选取一种工况下的失稳模态和非线性的稳定系数-位移曲线列出如下(图 3~图 5).

表 1 各阶段线性和非线性稳定系数

计算状态	线性失稳值	失稳类型	非线性失稳值	失稳类型	施工状态	体系状态
15 节段	9.53	桥塔侧倾	9.63	主梁下挠	15 节段	
19 节段	8.97	桥塔侧倾	9.18	同上	南边跨最大双悬臂	
19 h 节段	15.64	主梁波动	11.81	同上	南中跨最小单悬臂	
22 节段	8.54	桥塔侧倾	9.11	同上	北边跨最大双悬臂	塔梁临时固结
22 h 节段	13.76	主梁波动	10.12	同上	北中跨最小单悬臂	
28 S 节段	9.07	主梁波动	7.56	同上	南中跨最大单悬臂	
28 N 节段	9.04	主梁波动	7.32	同上	北中跨最大单悬臂	
满桥布置车道荷载	9.75	主梁波动	7.83	同上	成桥状态	塔梁临时固接
中跨布置车道荷载	7.62	主梁波动	9.98	同上		弹性索作用

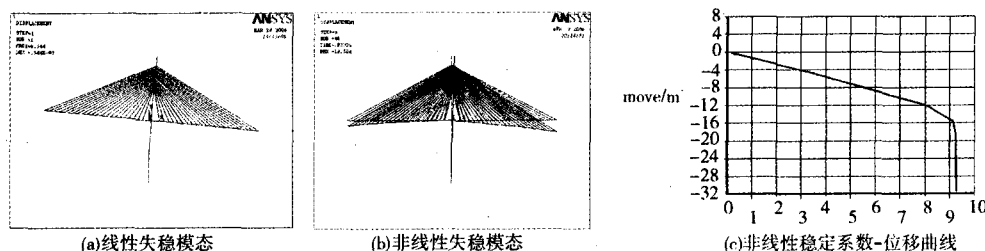


图 3 双悬臂状态稳定分析结果(22 节段)

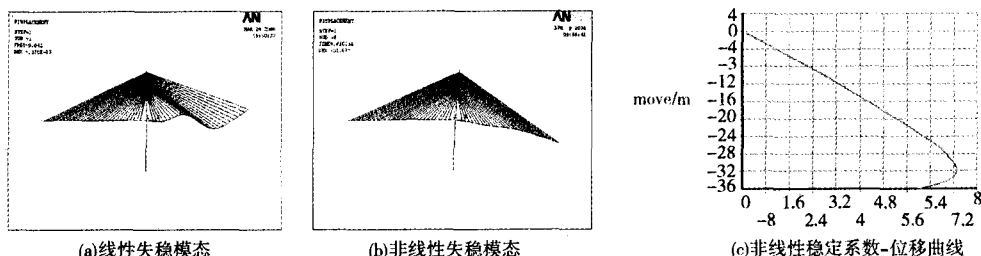


图 4 单悬臂状态稳定分析结果(28 N 节段)

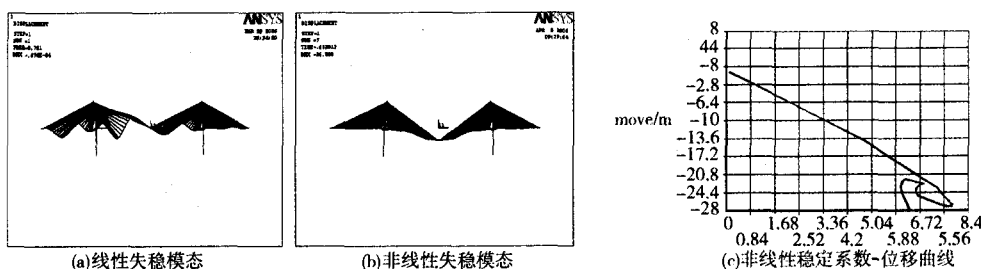


图 5 成桥状态稳定分析结果(全桥活载满跨布置)

### 4 结论

1)从以上各个分析可知,各个状态的失稳均为面内失稳(失稳模态的俯视图未列出).在施工阶段

中,双悬臂状态在失稳时,由于横向荷载的作用,失稳模态出现整体沿桥塔偏转,但失稳类型仍为面内  
(下转第 32 页)

合拢后的数据来看,钢管合拢的线型符合设计要求。这表明在施工过程中的结构分析及监控工作是成功的,达到了预想的目的。

合阳嘉陵江大桥钢管拱肋的吊装合拢的实例我们不难看到施工如果采用施工控制技术,就能达到了运用科学技术指导施工的目的,这可以缩短工期,提高工程精度,使施工技术更加科学和先进。通过施工过程进行计算机模拟和结构受力分析,使施工技术人员预先了解到在施工过程中可能会出现的问题,并通过施工方法的优化分析,选择在技术上最可行,经济上最合理,操作上最安全的施工方法和施工

顺序。通过施工监控,使科学和生产相结合,使大跨径桥梁建设过程中的风险降到最低,质量做到最好。

#### 参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 刘小渝,周水兴,敖建辉,等. 重庆合川市合阳嘉陵江大桥施工监控总报告[R]. 重庆:重庆交通学院,2002.
- [3] 敖建辉. 钢管砼拱桥在施工中的受力分析及施工监察[D]. 重庆:重庆交通学院,2002.

(上接第19页)

失稳. 这种失稳类型与该桥的结构体系有关系,由于拉索的拉力在横桥向有水平分力,这个分力遏止了主梁的面外失稳,而桥塔的横桥向抗弯刚度及整体的抗扭刚度大,也防止了整体的面外失稳。

2)从表1可知,施工前几阶段,非线性分析失稳安全系数较线性的差别不大,随着施工的进展,悬臂的增大,非线性影响也相应加大,稳定系数相差最大达24%;成桥状态下,非线性的失稳系数较线性的分别少20%和24%。这说明施工前期阶段,悬臂较小,几何非线性对结构的稳定性影响不大,而随着施工进展,悬臂的增加,几何非线性的影响逐步变大,对于成桥状态下的斜拉桥,随着跨度的增大,几何非线性问题突出,几何非线性对结构的稳定性影响必然会越来越大。

3)从表1中可发现在施工阶段有3种工况即15号、19号、22号工况下的非线性失稳系数稍大于线性失稳系数,这与我们传统认为考虑非线性因素后,其失稳系数将小于线性失稳系数的观点相悖,但比较两种情况下的失稳形式可发现,虽同属面内失稳,失稳形式却并不相同,线性失稳为塔倾覆失稳,非线性失稳为悬臂梁的下挠失稳。线性分析是基于

小变形理论,失稳系数及失稳模态跟结构的整体刚度和初始荷载下的几何刚度有关系;而非线性分析的失稳系数及失稳模态则跟结构的极限承载能力相关,通过在结构上逐步的施加荷载得到结构的失稳模态,结构的平衡方程是加载的过程逐级建立的,即在前一平衡状态基础上建立新的平衡。在加载过程中,拉索、桥塔、主梁的刚度不断变化,在非线性失稳状态下,各构件的刚度跟线性分析的初始荷载下的刚度有了一定的不同,这种构件刚度的变化势必造成结构内力分配的变化,结构的失稳形式也发生了变化,而且各构件的抗失稳能力不同,不同的失稳形式造成了失稳系数的大小差别。

#### 参考文献:

- [1] Walther R. Cable-stayed Bridge[M]. London: Thomas Telford Ltd,1988.
- [2] 林培元. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,1994.
- [3] Adell H. Full nonlinear analysis of composite girder cable-stayed bridge[J]. comput. Struct,1995,554:267-277
- [4] 华孝良,徐光辉. 桥梁结构非线性分析[M]. 北京:人民交通出版社,1997.