

文章编号: 1002-0268 (2005) 07-0075-03

# 重庆马桑溪大桥施工过程中稳定性分析

卜一之

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 主要研究重庆马桑溪大桥在施工过程中的稳定性。考虑混凝土斜拉桥结构的非线性和构件的极限承载能力, 计入施工过程的变形和应力的叠加效应, 完成该桥线弹性稳定性和非线性稳定性分析, 并对桥梁的非线性稳定性的评判进行了讨论。

**关键词:** 混凝土; 斜拉桥; 稳定性; 非线性; 安全系数

**中图分类号:** U448.27

**文献标识码:** A

## Stability Analysis of Long-Span Reinforced Concrete Cable-Stayed Bridge

BU Yi-zhi

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

**Abstract:** This paper studied the stability of Masangxi Bridge in Chongqing city at construction stage. In the analysis, the structural nonlinearity and ultimate bearing capacity of members for reinforced concrete cable-stayed bridge were considered, and the deformations during construction and the superposition effect of stresses were also taken into account. The linear elastic stability and nonlinear stability of this bridge, and some problems on nonlinear stability of bridge were also discussed.

**Key words:** Concrete; Cable-stayed bridge; Stability; Nonlinear; Safety factor

重庆马桑溪长江大桥是上(桥)界(石)高速公路上一座横跨长江的特大型公路专用桥梁, 主桥结构型式为漂浮体系双塔对称双索面预应力混凝土斜拉桥, 该桥采用世界上较先进的平行钢绞线斜拉索体系, 其塔高跨大, 体系轻柔, 对荷载的作用效应比较敏感, 施工建造过程中的混凝土结构整体稳定性及部分构件的局部稳定性直接影响工程安全, 是关系到大桥能否顺利建成的关键, 为了评估该桥在施工阶段的结构稳定性, 对该桥进行了施工全过程的结构承载能力与稳定性研究。

### 1 研究方法

由于混凝土斜拉桥结构的混凝土主梁、索塔以及斜拉索等在施工过程中不可避免地具有初弯曲、初偏心、残余应力等初始缺陷<sup>[1]</sup>, 其稳定问题是第二类稳

定问题(即极值点失稳)。第二类稳定问题的分析过程中计及自混凝土索塔施工完成后在挂篮悬浇主梁加载过程中的位移和应力的叠加效应。在混凝土斜拉桥的非线性稳定分析中, 考虑单根构件极限承载能力对整体稳定性的影响; 混凝土斜拉桥非线性稳定分析中考虑的主要因素有:

#### (1) 几何非线性

结构变形的影响用通常采用的 UL 列式法; 斜拉索垂度的影响按《桥规》用 Ernst 公式修正; 构件轴向力的影响则用几何刚度矩阵考虑。

#### (2) 材料非线性

马桑溪长江大桥索塔所用的 C50 混凝土和主梁所用的 C55 混凝土材料的本构关系采用简化的分段线性化折线模式, 系在我国混凝土规范采用的混凝土材料本构关系曲线的基础上简化而成, 即将其上升段的二

收稿日期: 2004-04-21

作者简介: 卜一之(1961-), 男, 北京人, 教授, 主要研究方向为大跨度桥梁结构行为。

次抛物线简化为两条直线,如图1所示。其主要材料参数为:

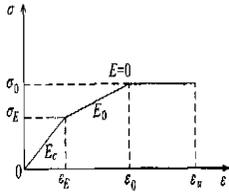


图1 混凝土材料的本构关系

C50 混凝土:  $\sigma_0 = 35\text{MPa}$ ,  $\sigma_E = 0.4\sigma_0 = 14\text{MPa}$ ;  $\epsilon_U = 0.0033$ ,  $\epsilon_0 = 0.002$ ,  $\epsilon_E = 0.0004$ ;  $E_C = 3.5 \times 10^4\text{MPa}$ ,  $E_0 = (\sigma_0 - \sigma_E) / (\epsilon_0 - \epsilon_E) = 13\,125\text{MPa}$ 。

C55 混凝土:  $\sigma_0 = 38.5\text{MPa}$ ,  $\sigma_E = 0.4\sigma_0 = 15.4\text{MPa}$ ;  $\epsilon_U = 0.0033$ ,  $\epsilon_0 = 0.002$ ,  $\epsilon_E = 0.0004$ ;  $E_C = 3.575 \times 10^4\text{MPa}$ ,  $E_0 = (\sigma_0 - \sigma_E) / (\epsilon_0 - \epsilon_E) = 14\,437.5\text{MPa}$ 。

斜拉桥在结构稳定性分析的加载过程中达到极限承载力而最终丧失结构稳定性的判据为:考虑上述因素后结构刚度逐渐降低,最终达到承载能力的极限状态,在结构的  $P-\Delta$  曲线上表现为曲线斜率逐渐减小,直到趋近于零;在  $P-\Delta$  曲线斜率发生明显变化(有趋近于零的倾向)时,结合结构整体刚度矩阵  $[K_T]$  的正定性,由

$$\det | [K_T] | \leq 0 \quad (1)$$

式中算子  $\det | \cdot |$  表示矩阵  $[K_T]$  对应的行列式之值,即可获得结构承载能力的极限状态。

结构稳定安全系数  $K$  定义为

$$K = P_\sigma / P_T \quad (2)$$

式中,  $P_T$  为施工阶段的结构自重;  $P_\sigma$  为结构的极限承载力,即荷载增量加载过程中达到式(1)时所对应的结构承载力;加载的荷载基数为  $P_T$ 。实际上,  $K$  为结构达到极限承载力时关于  $P_T$  的加载倍数。结构稳定计算的荷载加载方式为:除斜拉索的张拉力加载到设计张拉力(即  $K=1.0$ )外,作用于斜拉桥上的其它荷载(结构自重、施工荷载及各种静风荷载等),均按同一比例在原作用位置进行荷载增量加载,直到结构达到其极限承载力为止,按此加载方式得到的结构稳定安全系数对工程结构的评估来说是偏于安全的。

斜拉桥空间稳定性分析的失稳模式一般是空间失稳,即面内失稳、面外失稳和沿桥梁纵向的失稳模式的组合。但沿桥梁纵向的失稳通常并不显著(斜拉桥索塔的裸塔阶段有可能出现沿桥梁纵向的失稳),故将桥梁的空间失稳模式分为3种,即面内失稳、面外

失稳和组合失稳(面内失稳和面外失稳的组合模式),分别按照稳定性分析的加载过程中,结构达到承载能力的极限状态时,沿面内和面外的位移变化倍数的大小判别。

## 2 稳定性分析模型

### 2.1 工程概况

马桑溪长江大桥设计行车速度  $80\text{km/h}$ ,设计荷载:汽车-超20级,挂车-120;通航标准:按内河I-(2)级标准,净高18m;设计洪水频率:1/300;地震作用基本烈度6度,按7度设防;主桥结构型式为漂浮体系双塔对称双索面预应力混凝土斜拉桥,跨径布置  $179\text{m}+360\text{m}+179\text{m}$ 。桥面纵坡为平坡,桥面行车道设1.5%双向横坡。桥面全宽为30.6m,其中行车道  $2 \times 11.25\text{m}$ ,中央分隔带1.5m,外侧防撞栏  $2 \times 0.5\text{m}$ ,索面  $2 \times 1.0\text{m}$ ,两侧设检修道及栏杆  $2 \times 1.8\text{m}$ 。主梁采用预应力钢筋混凝土分离式三角箱形断面,梁中心高度3.0m,顶板厚25cm,桥面设1.5%的双向横坡,三角箱形的底部宽度150cm,侧腹板厚20~22cm,竖腹板厚35cm,梁顶全宽28m,主梁截面宽高比为  $B/h=9.467$ ,高跨比  $h/L=1/120$ ,跨宽比  $L/B=12.676$ 。索塔为倒Y型,箱形断面,整个索塔墩高:1号索塔墩(马桑溪岸)164.04m,2号索塔墩(巴南区岸)162.54m;斜拉索体系采用VSL公司的VSL SSI 2000平行钢绞线斜拉索系统,全桥共236根斜拉索,索距6.0m。

### 2.2 计算模型

该桥的稳定性分析计算模型采用由空间梁单元和空间索单元构成的空间组合结构,包括主梁、索塔、塔墩、斜拉索、交界墩等构件。考虑到该桥的主梁采用预应力钢筋混凝土分离式三角箱形断面结构形式,横向抗扭刚度较大,因此将该桥主梁离散为单主梁带刚性短悬臂的“鱼骨式模型”,其“鱼刺”单元为大刚度杆件,“鱼脊”单元体现三角箱梁的横截面刚度<sup>[3]</sup>。

按结构设计图纸在该桥构件连接处、主要施工荷载(如挂篮等)作用处设置空间结点,共有999个结点(含墩、塔、主梁以及主从结点)。全桥划分各类单元1245个,其中空间梁单元1009个,空间索单元236个;按照各构件的几何特性及工作状态区分为26类单元,其中空间梁单元20类,空间索单元6类。该桥的整桥计算模型简图如图2所示。

该桥的稳定性分析计算工况自混凝土索塔施工完成(工况1)开始,直至桥面二期恒载施工完成(工

况36), 共划分为36个计算工况。

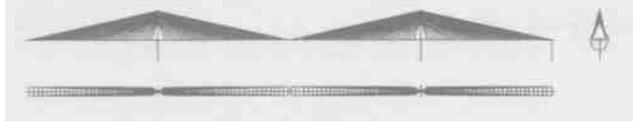


图2 马桑溪长江大桥稳定性计算模型简图

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 结构稳定性计算结果

马桑溪长江大桥上述计算工况相应的结构非线性稳定安全系数  $K_N$  及结构线性稳定安全系数  $K_L$  (即在该桥施工过程中, 考虑施工过程的应力与位移的叠加效应, 但不考虑结构的非线性因素和单根构件极限承载力的影响) 随施工过程(工况1~工况36)变化的图线如图3所示。

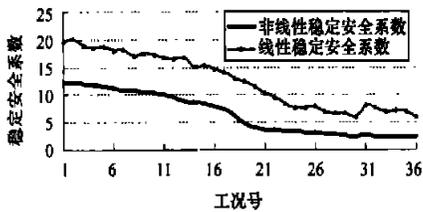


图3 马桑溪长江大桥结构稳定安全系数  
随施工过程变化曲线

#### 3.2 主要计算工况的结构稳定性

##### (1) 最大双悬臂施工阶段

该工况结构的非线性稳定安全系数  $K_N=2.5$ , 当加载至  $K=2.4$  时部分斜拉索的受力已达到其承载能力极限状态, 该工况结构失稳以主梁的面内失稳占优, 相应的空间失稳变形图如图4所示; 该工况的结构线性稳定安全系数  $K_L=6.1$ 。

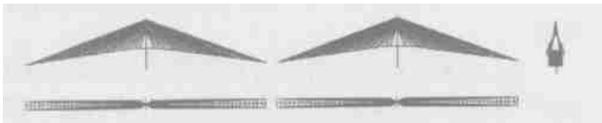


图4 马桑溪长江大桥最大双悬臂施工阶段的结构失稳图

##### (2) 最大单悬臂施工阶段

该工况结构的非线性稳定安全系数  $K_N=2.4$ , 此时部分斜拉索的受力已达到其承载能力极限状态, 该工况结构失稳以索塔的纵桥向失稳和主梁的面内失稳占优, 相应的空间失稳变形图如图5所示; 该工况的结构线性稳定安全系数  $K_L=7.2$ 。

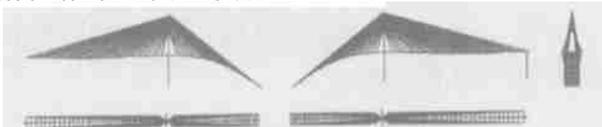


图5 马桑溪长江大桥最大单悬臂施工阶段的结构失稳图

##### (3) 桥面二期恒载施工阶段

该工况结构的非线性稳定安全系数  $K_N=2.3$ , 结构达到整体失稳的极限状态时没有达到局部极限承载能力的单根构件, 该工况结构失稳以索塔的纵桥向失稳和主梁的面内失稳占优, 相应的空间失稳变形图如图6所示; 该工况的结构线性稳定安全系数  $K_L=5.9$ 。



图6 马桑溪长江大桥桥面二期恒载施工阶段的结构失稳图

#### 3.3 结构稳定性评价

##### (1) 主桥结构的线弹性稳定性

目前试行的《公路斜拉桥设计规范(试行) JTJ027-96》要求斜拉桥的“结构稳定安全系数应大于4”, 其“条文说明”中指出: 斜拉桥的“结构稳定安全系数取值是参照拱桥的稳定安全系数取值”。在公路桥梁中, “传统”的对拱桥整体稳定安全系数  $K$  要求大于4~5的概念来源于第一类稳定问题, 本质上是针对简化的平面计算模型所给出的线弹性稳定安全系数。

计算结果表明, 采用《桥规 JTJ021-89》建议的风荷载, 该桥施工全过程中, 按第二类稳定问题所得的各计算工况的线弹性稳定安全系数的变化范围为  $K_L=4.0\sim 11.5$ , 已满足《公路斜拉桥设计规范(试行) JTJ027-96》中斜拉桥的“结构稳定安全系数应大于4”的要求; 可见, 从“桥规”的角度而言, 在施工过程中, 马桑溪长江大桥满足稳定性要求。

##### (2) 主桥结构的非线性稳定性

考虑到斜拉桥的几何非线性, 尤其是斜拉索垂度对结构的非线性影响较为显著, 稳定性分析中必须计入; 同时, 在稳定分析的增量加载过程中, 每根杆件的几何特性、受力状态等各不相同, 个别构件将因工作条件的恶化使其在结构达整体的极限承载力之前而提前达到单根杆件的极限承载力, 即个别构件的局部失稳先于结构的整体失稳, 因此大跨度桥梁的结构稳定性分析应当考虑这种影响; 同时, 材料非线性也对结构稳定性有较大影响。计入上述因素的影响后, 按第二类稳定问题所得的该桥在施工阶段的结构非线性稳定安全系数为  $K_N=2.3\sim 12.3$ 。

按第二类稳定即丧失承载能力的概念, 用极限状态法设计桥梁时, 稳定与最终的极限承载能力是统一的。因此, 桥梁的结构稳定安全系数(下转第81页)

如果将混凝土构件的承载能力极限状态的控制应力  $\sigma_{KH}$  取为标准强度,并且仍将斜拉索的承载能力极限状态的控制应力取为  $0.75R_f^b$ ,即混凝土构件的极限承载力提高  $35.0/28.5 \approx 1.2$  倍,斜拉索的极限承载力提高 2.0 倍,对  $K_N \leq 2.4$  的部分计算工况(即工况 55~工况 72 的部分工况)作补充加算,其结果如图 4 中的  $K_{N2}$  所示。可见,  $K_{N2}$  相对  $K_N$  最少提高了 38%,最多提高了 65%,平均提高 52%;而  $K_{N2}$  相对  $K_{N1}$  最少提高了 17%,最多提高了 22%,平均提高 21%。由于中塔柱根部混凝土构件达到极限承载力是结构整体失稳的主要原因,因此即使提高混凝土构件的极限承载力较少(仅 1.2 倍),而结构的非线性稳定安全系数也会提高很多,比增加斜拉索极限承载力对稳定安全系数提高的比例大得多。

由此可见,图 2 中本桥在施工全过程中的非线性稳定安全系数  $K_N = 2.0 \sim 5.3$  是偏于安全的结果,该桥在施工全过程中达到承载能力极限状态时的实际的非线性稳定安全系数明显大于此数值。

(上接第 77 页)

与强度安全系数也是一致的<sup>[3]</sup>。按照现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 JTJ023-85》作最终的承载能力极限状态计算时,取荷载系数为 1.2,设计强度对应的混凝土安全系数为 1.25(预应力钢筋和非预应力钢筋安全系数亦为此值),采用标准强度时,C55 混凝土(按该桥的最高标号混凝土考虑)的材料安全系数则为  $1.25\beta$ (系数  $\beta$  为标准强度与设计强度的比值,对 C55 混凝土,  $\beta = 38.5/30.5 = 1.26$ );结构工作条件系数为 0.95,则要求钢筋混凝土结构的整体安全系数为<sup>[4]</sup>

$$K \geq \frac{1.20 \times 1.25}{0.95} \times 1.26 = 1.99 \quad (3)$$

参照已建重庆市万县长江大桥(净跨度 420m 的钢筋混凝土拱桥)及以往类似桥梁施工阶段结构稳定性的评估标准<sup>[5]</sup>,只要在结构的有限元分析模型中,考虑结构几何非线性及单根构件极限承载力的影响后,当非线性稳定安全系数在 2.0 以上时,结构的稳定性均可以认为是有保证的。按照《桥规 JTJ021-89》建议的风荷载作用,该桥主桥在施工阶段的结构非线性稳定安全系数为  $K_N = 2.3 \sim 12.3$ ,满足按已建桥梁结构稳定性评价的“经验性标准”<sup>[6]</sup>,其结构满足稳定性要求。

## 4 结论

计算分析结果表明,大跨度斜拉桥的非线性稳定安全系数比弹性稳定安全系数降低很多,评价结构稳定性时必须区别对待,可以认为结构的非线性稳定安全系数大于 2.0 时结构的稳定性是有保证的。而且,大跨度斜拉桥的构件极限承载力对结构的非线性稳定安全系数的影响很大,计算时须确定合理的构件极限承载力,既要避免浪费材料、造成设计不合理,又要保证结构安全。南京二桥南汊斜拉桥的顺利建成与投入运营,充分证明了本文计算结果及分析结论的正确性和合理性。

### 参考文献:

- [1] 赵雷,张金平.大跨度拱桥施工阶段非线性稳定性分析若干问题的探讨[J].铁道学报,1995,17(1):76-84.
- [2] 陈幼平,周宏业.斜拉桥的动力分析模型[J].中国铁道科学,1995,16(1):78-89.
- [3] JTJ 027-96.公路斜拉桥设计规范(试行)[S].
- [4] 谢幼藩,赵雷,等.万县长江大桥 420m 钢筋混凝土箱型拱的施工稳定性分析[J].桥梁建设,1995(1):77-81.

## 4 结语

对主桥施工全过程计算结果的分析研究表明,其结构整体稳定性是满足的。但在该桥施工全过程的计算工况中,随着主梁悬臂伸出长度的逐步加长,结构稳定安全系数也逐渐降低;其中结构稳定性相对较差的是最大单悬臂施工状态下以及二期恒载施工阶段,其结构非线性稳定安全系数相对较低。施工过程中应对这些工况予以重视,采取一些有利于提高结构稳定性的必要措施。本文的研究方法和所得结论对于同类桥梁的结构设计和施工设计具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 王伯惠.斜拉桥结构发展和中国经验(上册)[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 陈幼平,周宏业.斜拉桥的动力分析模型[J].中国铁道科学,1995,16(1):78-89.
- [3] 谢幼藩,赵雷.用劲性骨架法建造特大跨度钢筋混凝土拱的施工安全度分析[A].四川省公路学会桥梁学术研讨会论文集[C].成都:西南交通大学出版社,1996.
- [4] 赵雷,贺立新.万县长江大桥主拱圈混凝土浇筑路径变化的稳定性分析[J].公路交通科技,2002,19(1):45-50.
- [5] 四川省交通厅,等.万县长江公路大桥技术总结[R].成都:电子科技大学出版社,2001.
- [6] 西南交通大学桥梁及结构工程系.南京长江第二大桥南汊桥斜拉桥结构稳定性研究报告[R].1999.