

苏通长江大桥施工阶段结构稳定性研究

赵雷¹, 李乔¹, 张鸿², 卜一之¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031;

2. 中交第二航务工程局有限公司, 武汉 430014)

[摘要] 按照苏通长江大桥实际的施工过程及其施工荷载分布, 考虑施工过程的影响, 建立全桥空间组合结构计算模型, 用有限元法研究了主桥斜拉桥自索塔施工开始直到全桥合龙的各施工阶段的结构稳定安全系数及其失稳模态, 对主桥钢箱梁架设施工过程中的结构稳定行为给出了综合评价。

[关键词] 苏通大桥斜拉桥; 施工过程; 结构稳定; 安全系数; 有限元法

[中图分类号] U445 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)03-0081-04

1 前言

苏通长江公路大桥全长 8 206 m, 主桥跨径为 1 088 m, 主桥钢箱梁节段标准长度 16 m, 钢箱梁全宽 41 m, 倒 Y 形混凝土索塔高 300.4 m; 斜拉索为 $\phi 7$ mm 平行钢丝体系, 全桥共 272 根斜拉索。该桥塔高跨大, 濒临长江口, 台风影响较频繁, 设计基本风速高 (38.9 m/s), 对结构和施工均有较大影响。施工加载过程中的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, 是关系到大桥顺利建成和确保运营安全的关键, 也是该桥设计与施工的一项非常重要的研究课题。

2 斜拉桥稳定计算理论

由于苏通大桥主桥的钢箱梁、索塔以及斜拉索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, 其稳定问题是第二类稳定问题 (即极限承载能力问题)。

第二类稳定问题与承载能力是统一的。极限承载力是从“极限设计”的思想中引出的概念。桥梁结构的极限承载力是指桥梁承受外荷载的最大能力。分析桥梁结构的极限承载力, 不仅可以用于其

极限设计, 而且可了解其结构破坏形式, 准确地知道结构在给定荷载下的安全储备或超载能力, 为其安全施工和运营管理提供依据和保障^[1]。

全过程分析是用于桥梁结构极限承载力分析的一种计算方法, 它通过逐级增加计算荷载集度来考察结构的变形和受力特征, 一直计算至结构发生破坏。

从力学分析角度看, 分析桥梁结构极限承载力的实质就是不断求解计入各种非线性影响的刚度方程。桥梁结构在不断增加的外荷载作用下, 结构刚度矩阵不断发生变化。当结构切线刚度矩阵趋于奇异时, 结构承载能力就达到了极限, 此时的外荷载即为极限荷载^[2]。因此, 结构承载能力即第二类稳定问题的计算方法与非线性有限元是密不可分的。运用非线性有限元计算第二类稳定的关键是在计算中考虑材料非线性、几何非线性和极限荷载的求解方法。

2.1 计算原则

第二类稳定问题的分析一般采用荷载增量法求解非线性有限元方程, 通过非线性方程的求解得出结构的极限承载力, 从而得出结构的稳定安全系数, 其计算原则为:

[收稿日期] 2008-11-08

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAC04B03)

[作者简介] 赵雷 (1956-), 男, 四川西充县人, 西南交通大学土木工程学院教授, 博士生导师, 主要从事大跨度桥梁结构行为研究工作;
E-mail: zlsjztzl@163.com

1) 考虑梁-柱效应、大位移效应及斜拉索垂度效应;

2) 计入施工过程中位移和应力的叠加效应;

3) 考虑钢箱梁和混凝土桥塔的材料非线性;

4) 考虑单根构件极限承载能力的影响。

2.2 结构失稳判别标准

斜拉桥结构的第二类稳定问题计算,按极限承载力作为失稳判别标准:

1) 斜拉桥结构失稳时,考虑各种因素影响的 \mathbf{K}_T 不正定,即:

$$|\mathbf{K}_T| \leq 0 \quad (1)$$

2) 迭代计算不收敛;

3) 荷载-位移曲线出现明显的极值点。

斜拉桥结构的稳定安全系数 k 定义为

$$k = P_{cr}/P_T \quad (2)$$

式中, P_T 为施工阶段的的荷载基数,包括结构自重、施工临时荷载; P_{cr} 为结构的极限承载力,即荷载增量加载过程中结构达到极限状态(失稳)时对应的承载力, P_{cr} 与 P_T 成线性比例关系;式(2)的荷载 P_{cr} 与 P_T 可取主桥上部结构中荷载比重最大的竖向荷载分量。

2.3 结构稳定性评价方法

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力是统一的。因此,桥梁结构的稳定安全系数与强度安全系数也是一致的^[3]。

极限状态下钢结构的相应整体安全系数,国外许多桥梁方面的设计规范(如欧盟铁路国际联盟规范 UIC1978、英国桥梁规范 BS5400、美国公路桥梁规范 AASHTO1979、美国铁路桥梁规范 AREA1981 等)在列入荷载系数法时,都给出了相应的极限状态。国内公路桥规范虽未作规定,但参考国内铁路桥规范,采用容许应力法时,如果不考虑结构的稳定性折减及疲劳问题,则钢结构的整体安全系数要求:

$$k \geq 1.7 \sim 1.8 \quad (3)$$

根据国内已建桥梁的设计经验,在结构空间分析的模型中,考虑几何非线性及单根构件极限承载力的影响后,只要稳定安全系数在 2.0 以上,结构稳定性就可以得到保证^[4]。应此,钢箱梁斜拉桥第二类稳定性的安全评价标准为其稳定安全系数应大于 2.0。

2.4 结构非线性效应

2.4.1 几何非线性

斜拉索垂度效应:缆索自重垂度引起的缆索拉

力与变形之间的非线性关系。

梁-柱效应:由于缆索力作用,主梁和索塔不仅承受弯矩,还将承受很大的轴向力。在主梁和索塔变形过程中,轴向力和弯矩相互影响而产生所谓的梁-柱效应,使整个斜拉桥结构表现出几何非线性行为^[5]。

大位移效应:大位移产生的结构几何形状变化引起的几何非线性效应。

2.4.2 材料非线性

混凝土材料:混凝土是一种抗拉强度远低于抗压强度的材料,且是多相非均质材料,影响 $\sigma - \varepsilon$ 曲线形状的因数很多,其 $\sigma - \varepsilon$ 曲线的数学模式,国内外众多学者对此进行了广泛研究,但未取得一个公认的统一模式,参考我国混凝土结构规范,把混凝土材料的本构关系简化成分段线性化的折线模式。

钢箱梁:钢箱梁本构关系按钢材考虑为理想弹塑性材料。

斜拉索:缆索钢在破坏时其延伸率比软钢小得多,没有明显的塑性平台,近似地认为斜拉索的破坏为脆性破坏。斜拉索一旦达到其极限状态,则视为拉断,将从结构中拆除,不再作为受力构件。斜拉索的破坏不是稳定性破坏,而是稳定计算加载过程中拉力过大造成的强度破坏。

3 计算模型及结果分析

采用西南交通大学桥梁工程系开发的大跨度桥梁结构稳定计算专用分析软件 LSB 进行苏通大桥主桥空间结构的第二类稳定性分析,其空间分析计算模型如图 1 所示。



图 1 苏通大桥主桥计算模型

Fig.1 Structural mode of Sutong Bridge

作为主桥施工控制结构计算的主要内容之一,结构非线性稳定分析按施工流程自索塔施工开始至成桥共划分 255 个计算阶段,南通侧的施工安排与苏州侧相同。

3.1 结构稳定计算的荷载加载

该桥施工过程中,结构竖向荷载由主塔自重、钢箱梁和斜拉索自重以及主要施工荷载(吊机自重、主梁吊装支反力、压重、施工临时荷载等)、主梁静

风作用的竖向分量等组成;横桥向荷载由静风作用的横桥向分量组成。

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他荷载(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。

3.2 主要计算阶段的结构稳定性

3.2.1 最大单悬臂施工阶段

该工况为主跨合龙段起吊施工阶段,在结构自重、剩余临时施工荷载及沿桥梁横向风荷载的作用下,结构的非线性稳定安全系数 $k = 2.7$,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纵桥向失稳和主梁面内失稳为主,相应的空间失稳变形图如图 2 所示。

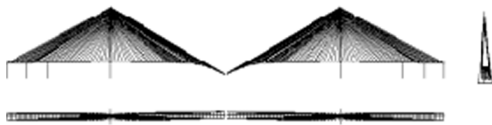


图 2 最大单悬臂施工阶段的失稳变形图

Fig. 2 The collapse mode in the maximum one end cantilever state

3.2.2 中跨合龙施工阶段

该工况为中跨合龙段主梁单元形成、合龙口高程调整、焊接的主跨合龙施工阶段,在结构自重、剩余临时施工荷载及沿桥梁横向风荷载的作用下,结构的非线性稳定安全系数 $k = 3.0$,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纵桥向失稳和主梁面内失稳为主,相应的空间失稳变形图如图 3 所示。



图 3 中跨合龙施工阶段的失稳变形图

Fig. 3 The collapse mode in the finished closure state

3.2.3 二期恒载施工阶段

该工况为拆除桥面施工安全护栏、作用二期恒载(62.5 kN/m)的施工阶段,在结构自重及沿桥梁横向风荷载的作用下,结构的非线性稳定安全系数 $k = 2.6$,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纵桥向失稳和主梁面内失稳为主,相应的空间失稳变形图如图 4 所示。



图 4 二期恒载施工阶段的失稳变形图

Fig. 4 The collapse mode in the finished dead state

3.3 施工全过程的结构稳定性

用 LSB 程序计算所得苏通长江大桥主桥斜拉桥施工过程考虑几何、材料双重非线性的稳定安全系数随施工阶段的变化曲线如图 5 所示。

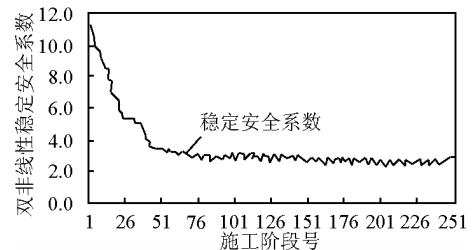


图 5 稳定安全系数随施工阶段的变化曲线

Fig. 5 Structural stability safety factor during construction stage

根据计算结果,可以看出:

1) 施工过程的非线性稳定安全系数为 2.5 ~ 11.2,稳定安全系数的最小值出现在成桥阶段(II 恒施工阶段)、单悬臂施工期间的起吊梁段阶段,数值为 2.5;各施工阶段的稳定安全系数都满足“非线性稳定安全系数应大于 2.0”的安全评价标准;

2) 双悬臂施工阶段稳定安全系数整体呈现下降趋势;

3) 单悬臂施工梁段,稳定安全系数变化曲线整体呈现微小的下降趋势,每个梁段施工过程中,稳定安全系数有明显的波动,其中起吊梁段阶段稳定安全系数最小;

4) 在个别施工阶段,结构达到整体失稳的极限状态前,部分斜拉索的应力已达到控制应力的极限状态,其对应的最小加载系数为 2.3,分别是起吊 27 号梁段和 28 号梁段的施工阶段;

5) 最大双悬臂及最大单悬臂阶段的失稳形态都为主梁面内失稳与主塔纵桥向失稳。

3.4 主要构件承载能力评价

3.4.1 钢箱梁整体承载能力相对较强

在该桥施工全过程的稳定分析加载过程中,结构达到整体失稳的承载能力极限状态时,钢箱梁构件均未达到其相应的单根构件承载能力极限状态,仍具有富余度。

3.4.2 索塔承载能力也相对较强

在该桥施工全过程的稳定分析加载过程中,结构达到整体失稳的承载能力极限状态时,钢筋混凝土索塔的构件均未达到其相应的单根构件承载能力极限状态,仍具有富余度。

3.4.3 斜拉索承载能力相对较弱

在该桥施工全过程的稳定分析加载过程中,较多计算工况下,结构达到整体失稳的承载能力极限状态时,部分斜拉索均率先达到其相应的单根构件承载能力极限状态,表明它们是该桥施工过程中承载能力相对薄弱的构件,但部分斜拉索的承载能力达到极限状态时,对应的结构加载系数的 K 值均不低于 2.0。

非线性稳定分析加载过程中,部分斜拉索的承载能力达到极限状态时对应的加载系数 K 值与《公路斜拉桥设计规范(试行)JTJ027-96》中规定的斜拉索强度安全系数 $k=2.5$ 的概念是不相同的:前者考虑了整个施工过程的非线性影响,在 $K>1.0$ 后的加载考虑的是全桥所有荷载(包括临时施工荷载

等)在原分布形式下的虚拟倍数加载;而后者($k=2.5$)未考虑非线性影响,是一种线性叠加的模式,施加的荷载是结构的实际作用荷载。因此,非线性稳定分析加载过程中所得的斜拉索达到承载能力极限状态时对应的加载系数 K 值所考虑的因素比“桥规”规定的斜拉索强度安全系数 $k=2.5$ 所考虑的因素要不利一些。

4 结语

1)在同一梁段施工的不同阶段,稳定安全系数一般在梁段起吊阶段较小,在斜拉索一张或二张阶段较大;

2)各施工阶段的结构稳定安全系数都满足所阐述的工程上一般采用的稳定安全评价标准,即苏通长江公路大桥主桥的结构稳定性在施工全过程都是满足要求的。

参考文献

- [1] 王序森,唐寰澄. 桥梁工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1995
- [2] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都:西南交通大学出版社,1996
- [3] 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
- [4] 四川省交通厅. 万县长江公路大桥技术总结[M]. 成都:电子科技大学出版社,2001
- [5] 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

Structural stability analysis of Sutong Yangtze River Highway Bridge during construction

Zhao Lei¹, Li Qiao¹, Zhang Hong², BU Yi-zhi¹

(1. School of Civil Engineering, SouthWest JiaoTong University, Chengdu 610031, China;

2. CCCC-Second Harbour Engineering Company Limited, Wuhan 430014, China)

[Abstract] According to construction and load action on SuTong Yangtze River Highway Bridge, an analysis model for structural stability was studied and solved through FEM. Stability safety factor and mode were obtained, and some problems on stability for the installation of steel box girders were also discussed.

[Key words] Sutong cable-stayed bridge; construction; structural stability; safety factor; FEM