

文章编号: 1002-0268 (2006) 02-0064-04

苏通大桥主航道桥总体静力分析

苗家武¹, 裴岷山², 肖汝诚¹, 张喜刚²

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 中交公路规划设计院, 北京 100010)

摘要: 苏通长江公路大桥主航道桥桥跨布置为 100 + 100 + 300 + 1088 + 300 + 100 + 100m, 为目前世界上最大跨径的斜拉桥。结合主桥施工图设计, 着重就结构分析中所考虑的几个关键问题进行了简要概括, 包括成桥合理状态及索力优化; 施工过程计算; 结构体系研究及参数分析; 非线性影响研究等等。以上分析结果和丹麦 COWI 公司等咨询审查单位取得了较好的一致。

关键词: 斜拉桥; 索力优化; 结构体系; 几何非线性; 结构分析

中图分类号: U441.5

文献标识码: A

Global Static Analysis of the SuTong Cable-Stayed Bridge

MIAO Jia-wu¹, PEI Min-shan², XIAO Ru-cheng¹, ZHANG Xi-gang²

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, Inc., Beijing 100010, China)

Abstract: The SuTong cable-stayed bridge is the largest cable-stayed bridge in the world at present with a continuous span arrangement of (100 + 100 + 300 + 1088 + 300 + 100 + 100) m. Based on detailed design, some key issues on structural design and static analysis are introduced in this paper, including definition of the bridge final state and cable optimization, stage analysis, structural system and parametric studies, nonlinearity effects, etc. The results are identical with COWI Consultants' reports.

Key words: Cable-stayed bridge; Cable optimization; Structural system; Nonlinearity; Structural analysis

1 工程概述

苏通大桥主航道桥是整个苏通大桥建设项目中的重点工程, 经过设计与咨询单位的充分论证, 最终方案确定为主跨 1 088m 的双塔双索面斜拉桥, 边跨每侧共设置 3 个桥墩, 其跨径布置为 100 + 100 + 300 + 1 088 + 300 + 100 + 100 = 2 088m (见图 1)。其中主梁采用扁平流线型钢箱梁, 含风嘴全宽 41.0m, 梁高 4.0m (见图 2)。箱梁外壳及其纵向加劲肋的板厚根据纵横向受力需要而变化, 其目的是保持各断面主梁纵向应力水平基本一致, 并在顶板靠近边缘约 2.55m 范围内适当加厚以利于斜拉索处局部应力的扩散。主梁横隔板采用实体式, 非吊点处横隔板一般为 10mm

厚, 拉索吊点处一般为 16 + 12mm 厚; 支座、临时墩及阻尼器安装处等特殊部位根据局部受力分析结果, 采用了不同板厚。主塔采用 50 号混凝土, 塔高约 300m, 呈倒 Y 型。索塔锚固方案采用与昂船洲大桥类似的钢锚箱方案。斜拉索采用 1 770MPa 平行钢丝斜拉索, 全桥共 $4 \times 34 \times 2 = 272$ 根斜拉索, 最长拉索为 577m, 最大规格为 PES7-313, 单根斜拉索最大重量为 59t, 主要组合下最大索力达 800 余 t。主梁节段标准长度 16m、边跨尾索区节段长度为 12m。主桥基础 (P1 ~ P8) 均采用变直径钻孔灌注桩, 桩身顶部区域一定范围内直径 2.8m, 余下部分直径 2.5m。主塔基础 (P4 ~ P5) 各 131 根桩, 近塔辅助墩基础 (P3、P6) 桩数 36 根, 过渡墩、远塔辅助墩 (P1 ~ P2、P7

收稿日期: 2004-11-26

作者简介: 苗家武 (1974-), 男, 河南光山人, 博士生, 主要从事大跨度桥梁结构理论分析及抗震研究。(miaojiawu@vip.sina.com)

~P8) 桩数各 19 根。桩长均在 108~116m 之间。边跨每侧布置压重共计约 4 327t, 以抵抗活载所引起的负反力效应。塔梁之间纵向约束装置采用具有动力耗能和静力限位功能的粘滞阻尼器, 以适应温度变化、活载以及正常风荷载引起的主梁纵向位移要求, 并减

缓极限风荷载、地震荷载和冲击荷载所引起的索塔弯矩响应。经比较分析, 单个索塔两侧共设置 4 个阻尼器, 全桥共 8 个。塔梁之间允许相对位移 $\pm 750\text{mm}$, 一旦相对位移超过 $\pm 750\text{mm}$, 阻尼器将发挥限位功能, 单个阻尼器的弹性刚度为 100MN/m。

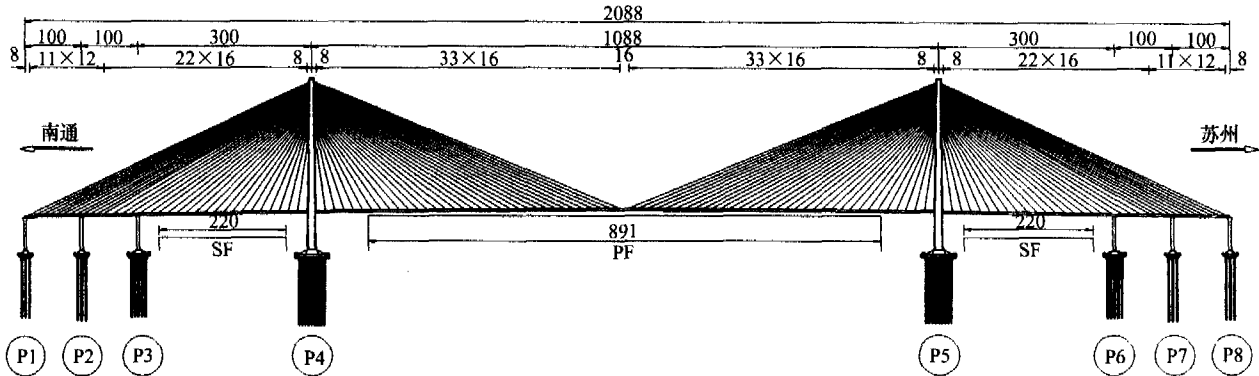


图1 桥跨布置/m

Fig.1 Span arrangement

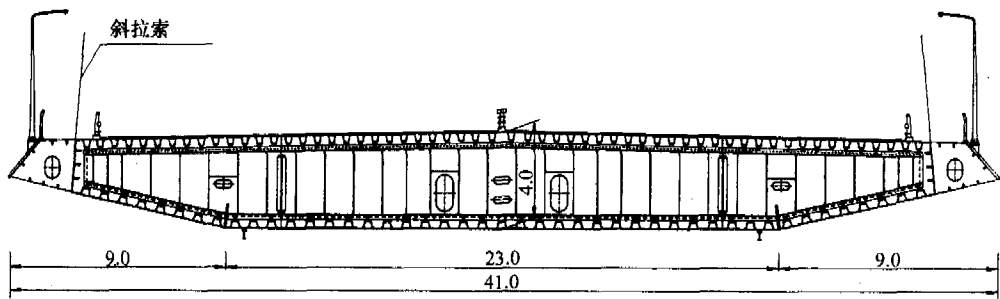


图2 主梁标准横断面/m

Fig.2 Deck cross section

苏通大桥主桥作为目前世界上主跨最长的超大跨径斜拉桥, 有关成桥合理状态的确定及索力优化问题, 施工过程分析以及成桥活载效应计算问题, 等效风荷载效应分析, 结构体系研究及具体参数分析, 超大跨结构的非线性问题, 尤其是几何非线性因素对该方案的成桥状态结构安全度和施工控制以及具体施工过程的影响等, 这几个关键问题, 均是设计单位在设计过程中比较重视的、同时也是国内外专家所提咨询意见比较集中的几个问题。下面分别就这几个关键问题展开论述。

2 计算模型

鉴于苏通大桥的超大跨度、超长斜拉索等结构特点, 为精确分析各种几何非线性因素的影响, 设计单位专门引进了一套国际著名的桥梁专用软件——RM2000 空间非线性分析程序。主桥整体静力分析主要采用该程序进行, 整体计算模型见图 3。另外还采用 QJX、BAP 这两个平面分析程序开展必要的辅助校

核。关于斜拉索的模拟, 与国内已完成的有关斜拉桥的平面或空间计算实例所不同的是, 本次计算中每根斜拉索均被分割成 8 个微段, 而不是采用单根具有等效弹性模量的直杆单元, 以便较精确考虑斜拉索的垂度效应。除此之外, 计算中还考虑了 P-delta 效应、大位移效应, 以及主梁剪切变形的高阶项等各种几何非线性因素的影响, 混凝土收缩徐变计算参照国际通用规范 CEB/FIP 90 有关模式进行。塔梁之间连接装置的静力行为处理成非线性弹簧单元, 初始间隙值为 750mm, 线性弹性刚度为 100MN/m。单个阻尼器在静荷载下的力-位移关系如下图 4。



图3 主桥整体计算模型

Fig.3 Global fe model of main girder

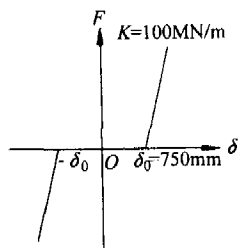


图4 单个阻尼器力-位移关系

Fig.4 Force-displacement curve of single damper

3 成桥合理状态确定及索力优化

斜拉桥区别于其它桥型的一个显著特征是通过索力调整的手段来达到理想的成桥受力状态。所谓成桥合理状态,一般是指在恒载等永久荷载状态下,斜拉桥的塔、梁、索基本满足以下条件:

- (1) 主塔上弯矩尽可能小。
- (2) 主梁上(中跨、边跨)的弯矩接近于0且分布均匀,或弯曲能量总和尽可能小。
- (3) 斜拉索的索力在临近范围内宜分布相对均匀,避免较大的索力差异。

由于苏通大桥主跨跨度大,活载的贡献对主梁上下缘应力包络控制值以及边跨主梁的压重布置影响非常明显。因此,在确定成桥合理状态时,兼顾有活载、无活载两种状态,得到的成桥恒载状态以及组合1(恒+活)下的主梁弯矩分配如图5,边、中跨恒载索力分布如图6,塔身最大弯矩(塔根截面)为27981kNm。因此,所取得的成桥状态是非常理想的。

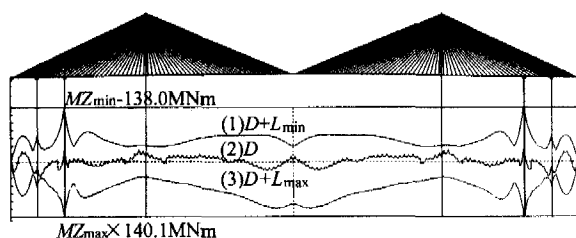


图5 主梁弯矩包络图

Fig.5 Bending moment envelope in deck

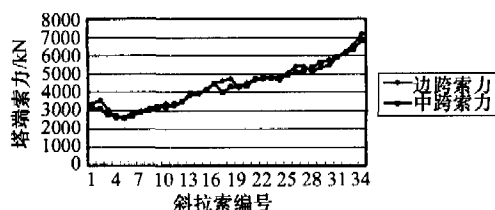


图6 恒载索力分布图

Fig.6 Distribution of cable forces of final state

4 施工过程计算

施工过程计算采用前进分析法。结合以往工程实践和设计单位制定的施工计划安排,在该桥整个施工过程中计算分析当中,规定仅对当前斜拉索分别在吊机移位前后各张拉一次。也即:当前梁段拼接施焊结束、斜拉索安装完成后,进行初次张拉(给定索力初始值);然后吊机移位至当前梁段前端,对当前斜拉索结合上述成桥合理状态目标进行优化调索(自动调值)。为了达到上述所确定的成桥理想状态,施工分析中根据程序所提供的 ADDCON 索力优化方法确定每根斜拉索的第2次张拉力控制值。施工过程的模拟依据既定的施工计划安排进行,包括了各种临时支撑、临时约束、施工吊机的移位、临时荷载,以及永久荷载(含收缩徐变)等各种施工及永久荷载,并针对几种最不利施工阶段(最大双悬臂、最大单悬臂、中跨合龙前),分析了不同风速、不同来流方向下等效静风荷载的作用。计算结果表明,施工分析得到的最终状态与成桥合理状态目标基本吻合,利用调值计算得到的各个索力张拉控制值是比较理想的。

5 结构体系研究及参数分析

如前所述,经过初步设计、技术设计阶段的比较研究,苏通大桥塔梁之间纵向约束装置采用具有动力耗能和静力限位功能的粘滞阻尼器。单个索塔两侧共设置4个阻尼器,全桥共8个。塔、梁之间允许由于温度变化、正常风荷载以及活载引起的相对位移。但可将极限阵风、地震等其它冲击性荷载所引起的主梁运动传递给索塔横梁,同时具有动力耗能作用,从而可有效地减少塔根弯矩,并限制了主梁在梁端产生过大的位移。因此,选择恰当的基本参数(阻尼器所能提供的间隙值、弹性刚度,以及有关的动力参数 C 、 α , 等等),是确保阻尼器达到上述性能要求的关键。

关于塔、梁之间纵向连接阻尼器在地震荷载下的动力特征参数的选择,施工图阶段专门委托同济大学防灾国家重点实验室进行了深入研究。粘滞阻尼器的阻尼力与相对速度的关系可表达为: $F = CV^\alpha$ 。其中, F 为阻尼力, C 是阻尼系数, V 是速度, α 是指数(对于桥梁抗震,最常用的参数为0.4~0.5)。阻尼器的基本参数是阻尼系数 C , 速度指数 α 。根据阻尼器参数敏感性分析结果,综合考虑阻尼器位移及阻尼力、梁端位移、塔顶位移、主塔剪力和弯矩随阻尼器参数的变化情况,最后选用单个阻尼器的阻尼系数 C 为3750kN/m, 指数 α 为0.4。地震荷载下主梁的纵

向位移,以及梁、塔的相对位移反应均控制在 30 cm 以内。

对于静力荷载(温度、正常风、极限风、活载等),如前所述,阻尼器既要能够释放常规运营荷载(诸如温度、正常风、交通荷载)下塔、梁之间产生的相对位移,又要能够约束极限风荷载以及某些冲击荷载下主梁的运动,减少索塔弯矩和梁端位移。因此,选择一个合适的阻尼器间隙值是个首要的设计参

数。经过分析,±750mm 的间隙值可满足常规运营荷载下塔、梁相对位移的要求,是比较合适的。以此为前提,进一步就阻尼器构件弹性刚度的取值进行了一些必要的参数分析。塔根弯矩、塔顶位移以及单个索塔处 4 个阻尼器锁定力总和随弹性刚度变化曲线分别见图 7~图 9。这些曲线表明,综合索塔受力、梁端伸缩缝规格、阻尼器制造等方面的考虑,100MN/m 的弹性刚度对单个阻尼器是比较合适的。

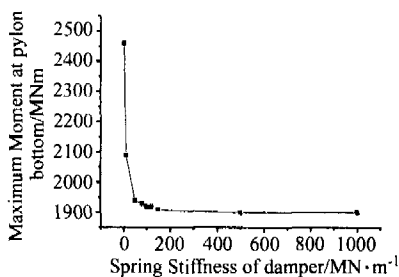


图7 塔根弯矩

Fig.7 Maximum moment at pylon bottom

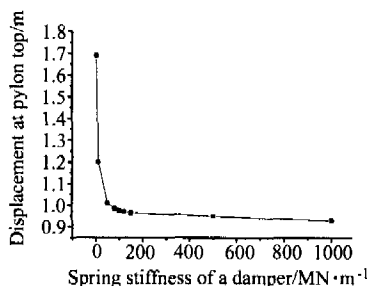


图8 塔顶位移

Fig.8 Displacement at pylon top

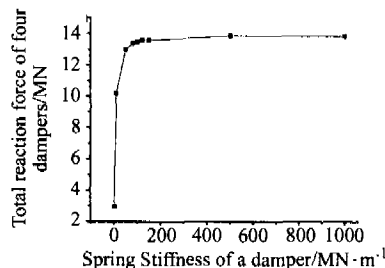


图9 阻尼器锁定力总和

Fig.9 Total reaction force of four dampers

对苏通大桥而言,塔、梁连接装置对确保索塔在 seismic 和极限风荷载下的安全性是至关重要的。因此,基于上述参数分析的结果,并考虑到同一索塔处 4 个阻尼器之间的安装误差以及运营阶段各个阻尼器之间反应的非同步性,暂定单个阻尼器的设计抗力为 10 MN (ULS 工况),作为阻尼器设计招标的一个基本参数。值得注意的是,对比设计单位与 COWI 公司的计算结果可以发现,ULS 工况下,不同的考虑材料非线性(索塔混凝土构件)的方法对计算结果(尤其是阻尼器的反力)有一定的影响。

6 几何非线性影响

(1) 对本桥乃至其它千米级斜拉桥而言,在成桥运营阶段,几何非线性对主梁、索塔断面控制应力的影响程度大约 10%~20%,对活载挠度的影响程度大约为 30%。

(2) 非线性因素除对结构的控制应力的产生影响外,还会导致超静定结构体系内部内力(斜拉索的索力、主梁与主塔的内力)的重分配,从而可能使得主梁和主塔控制断面的位置发生改变。

(3) 施工过程中的非线性影响将导致施工过程中按线性或一阶非线性计算方法给定的拉索初张力和结构成桥线型与实际情况不符。因此,必须基于非线性理论确定合理的成桥状态和施工过程的非线性仿真分析。

(4) 不同的斜拉索垂度效应的考虑方法(折减模量法、多单元法、悬链线单元法)对施工线形计算的

影响不可忽视。与悬链线单元法相比,在给定斜拉索施工张控制力情况下,折减模量法将导致苏通大桥成桥线形偏离理论设计值 0.538 m,多单元法与悬链线法比较吻合。这主要是由于折减模量法采用单根直杆单元,对长索而言,斜拉索在两端的索力矢量与弦向存在明显的误差所致。因此,对千米级斜拉桥,不宜采用传统的折减模量法模拟斜拉索进行非线性施工仿真分析和施工控制计算。

7 结语

苏通大桥主航道桥作为目前世界上最大的千米级斜拉桥,受到了国内外同行的关注。本文结合施工图设计,着重就结构整体分析中所考虑的几个关键问题进行了简要概括,以上分析结果和丹麦 COWI 公司等咨询审查单位取得了较好的一致。

参考文献:

- [1] TDV, 2003, RM-Spaceframe Users Manual, rev 8.58-02.
- [2] 苗家武,裴岷山,徐利平.苏通大桥主航道桥几何非线性影响比较研究[C].中国公路学会桥梁与结构工程学会桥梁学术会议论文集,中国成都:人民交通出版社,2003.
- [3] 梁鹏.超大跨度斜拉桥几何非线性及随机模拟分析[D].同济大学桥梁工程系,2004.
- [4] Janjic D, Pircher M, Pircher H. Optimisation of Cable Tensioning in Cable-Stayed Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2003, 8 (3): 131-137.
- [5] 同济大学桥梁系.苏通长江公路大桥主桥斜拉桥结构非线性影响分析研究报告[R].上海:同济大学,2004.