

自锚式斜拉-悬索协作体系桥非线性分析

王会利^{*1}, 秦泗凤², 张哲¹, 许福友¹

(1. 大连理工大学 桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116024;

2. 大连大学 材料破坏力学数值试验研究中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 阐述自锚式斜拉-悬索协作体系桥几何非线性特征, 分析混凝土收缩徐变、主缆矢跨比和主梁拱度对协作体系的影响. 应用线性理论、线性二阶理论和非线性理论对一座主跨 800 m 的自锚式斜拉-悬索协作体系桥进行分析, 得到主梁、主塔在活载作用下不同矢跨比和主梁拱度下的弯矩和位移. 分析表明: 主跨 800 m 的自锚式斜拉-悬索协作体系桥可以采用较简单的线性二阶理论进行近似活载计算, 其误差不超过 6%; 混凝土收缩徐变对结构受力影响较大; 整体刚度优于悬索桥; 主缆、主梁轴力和刚度随着矢跨比的增大而减小; 主梁设置拱度可以提高体系整体刚度.

关键词: 自锚式; 斜拉-悬索; 线性二阶; 非线性

中图分类号: U441.2 **文献标志码:** A

0 引言

斜拉-悬索协作体系桥^[1~7]诞生于 19 世纪初期, 当时在法国已经出现斜拉桥和悬索桥混合使用的桥梁. 后经 Roebling 和 Dichinger 为代表的无数桥梁工作者的探索和努力, 先后形成了罗勃林体系、狄辛格体系和改进的狄辛格体系. 斜拉-悬索协作体系的悬吊部分比同跨径的悬索桥大大减小, 可以降低主缆索力, 减少主缆和锚碇的造价. 施工时斜拉部分的悬臂长度又可以大大减短, 有利于提高结构施工和成桥状态的抗风稳定性. 国内外多座大桥的设计方案中均提出了这种体系, 如直布罗陀海峡大桥方案、伶仃洋跨海大桥方案等.

斜拉-悬索协作体系桥的设想虽然出现得比较早, 但是迄今为止, 世界上还没有一座真正意义的大跨度斜拉-悬索协作体系桥建成. 目前斜拉-悬索协作桥梁主要停留在方案设计阶段, 所提出的方案均为地锚体系. 如果采用自锚体系, 不仅能节省锚碇, 而且能缩短工期, 可见自锚式斜拉-悬索协作体系桥在大跨度桥梁设计中富有竞争力.

国内外关于大跨度斜拉桥、悬索桥和斜拉-悬索协作体系桥已经有所论述, 但是关于自锚式斜拉-悬索协作体系桥的报道很少^[8,9]. 采用自锚式的协作体系, 其力学特征有它自身的特点. 本文以某主跨 800 m 自锚式斜拉-悬索协作体系桥方案为背景, 重点针对该体系在使用阶段活载的非线性展开研究. 为了方便, 下文将自锚式斜拉-悬索协作体系桥简称为协作体系桥.

1 协作体系桥几何非线性特征

协作体系桥几何非线性的影响因素主要有 3 个方面: 缆索自重垂度、结构大位移和初始内力.

1.1 缆索自重垂度效应

主缆和斜拉索在自重的作用下产生一定的垂度, 这一垂度与索力呈非线性关系. 采用等效弹性模量法能够方便有效地考虑垂度效应, 最早由 Ernst 提出的计算弹性模量等效公式为

$$E_{eq} = E / (1 + \omega^2 L^2 AE / 12 T^3) \quad (1)$$

式中: E 为缆索材料的弹性模量, L 为缆索单元的水平投影长度, ω 为单位长度缆索的重量, A 为缆索的面积, T 为缆索单元的拉力. 缆索单元弹性模

量修正后,就可以按直杆单元建立其刚度矩阵.

1.2 初始内力效应和大位移效应

协作体系桥的主梁、主塔均承受巨大的压力.一方面,轴力的存在引起附加弯矩,从而影响构件的弯曲刚度;另一方面,弯矩的存在改变构件的轴向长度,从而影响其轴向刚度.结构初始内力引起的非线性和大位移非线性可以分别通过引入初始应力刚度矩阵 K_g 和大位移矩阵 K_l 来加以解决,并由此得到综合考虑初始内力和大位移的切线刚度矩阵^[10]:

$$K = K_0 + K_g + K_l \tag{2}$$

式中: K_0 为线性刚度矩阵.

1.3 线性二阶分析理论

几何非线性使得叠加原理失效,不能用影响线加载法进行结构在车辆荷载下的内力、位移包络图计算.采用前面的非线性分析方法,可以精确地得到协作体系在各种荷载作用下的响应.但是,实现这些非线性计算工作量大,计算时间长,尤其是计算汽车荷载作用时,需要反复迭代,其计算量更是惊人.这里介绍一种简化的近似计算方法——线性二阶加载方法.

协作体系的梁、塔都可以看成是压弯梁,简单的压弯梁平面微分方程可以写成^[11]

$$EIv^{(4)} + N(x)v^{(2)} = q(x) \tag{3}$$

协作体系在活载 $q(x)$ 的作用下,构件轴力 $N(x)$ 包含两项:一项是由恒载引起的,记为

$N_g(x)$;另一项是活载引起的,记为 $N_q(x)$. $N_q(x)$ 是活载 $q(x)$ 的函数,因此,方程属于非线性微分方程.

李国豪曾用线性化的方法解决了悬索桥二阶理论的非线性分析问题^[12,13],借鉴这一思想,也可以简化协作体系的非线性分析.在大跨桥梁结构中,活载与恒载的比例通常都在 10% ~ 20%^[14,15],即几何刚度初应力刚度效应以恒载为主,因此,可以忽略 $N_q(x)$ 的影响.于是方程(3)就简化为

$$EIv^{(4)} + N_g(x)v^{(2)} = q(x) \tag{4}$$

方程(4)是线性微分方程,满足线性叠加条件,整个计算可以借用影响线的概念.这种简化的方法可以称之为线性二阶分析方法^[16].

2 实桥分析与研究

本文以某自锚式斜拉-悬索协作体系桥方案为算例.该桥为 263 m+800 m+263 m 协作体系桥,全桥采用全漂浮体系,边跨设置辅助墩.双向 6 车道,汽车荷载等级为公路-I 级.主梁为扁平流线形箱梁,梁高 3.5 m,梁宽 34 m,全桥主梁分为钢梁和预应力混凝土梁两种.跨中悬吊部分采用钢箱梁,斜拉桥部分采用混凝土箱梁.主塔采用 H 形双独柱索塔,桥面以上塔高 127 m,索塔横向中心距 31.2 m.图 1 为该桥立面布置图.

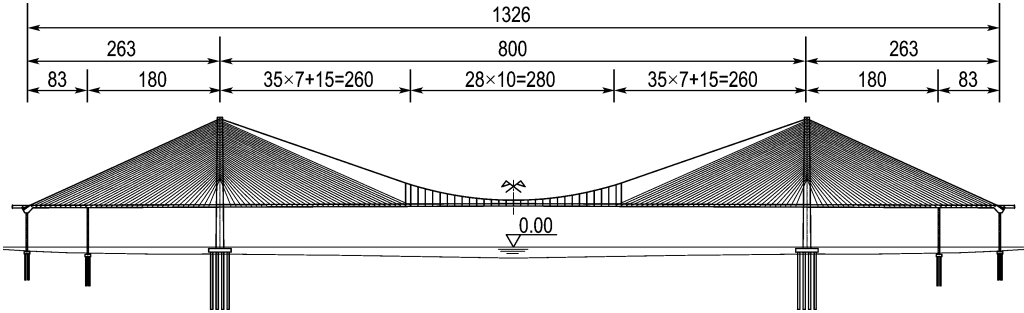


图 1 桥立面布置图(单位:m)

Fig.1 Elevation of bridge (unit: m)

2.1 汽车荷载非线性研究

分别用非线性、线性二阶和线性理论分析,其中非线性、线性二阶分析是通过在 ANSYS 软件基础上进行二次开发进行的.由于在非线性计算中,线性叠加原理失效,不能采用影响线加载方

法,应采用影响区加载方法^[15].在公路-I 级荷载作用下,主梁及主塔的弯矩及位移包络图如图 2~5 所示.车辆荷载引起主要构件弯矩及位移的最值见表 1,表中相对差值以非线性计算值作为参照.

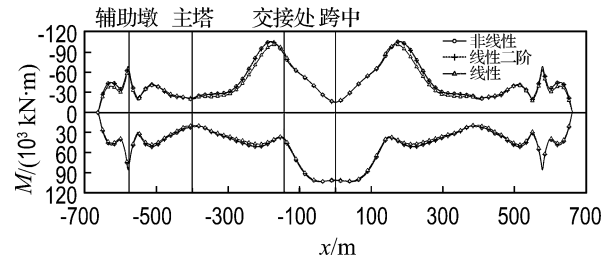


图 2 主梁弯矩包络图

Fig. 2 Envelope of main girder moment

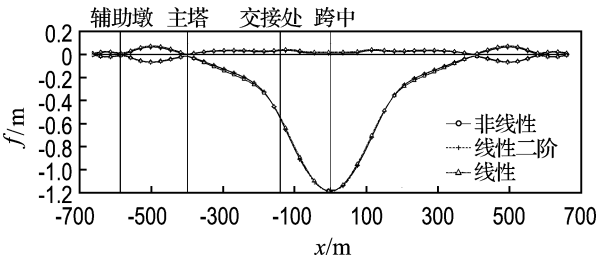


图 3 主梁位移包络图

Fig. 3 Envelope of main girder displacement

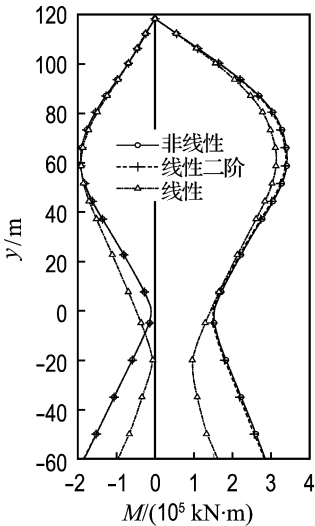


图 4 主塔弯矩包络图

Fig. 4 Envelope of main pylon moment

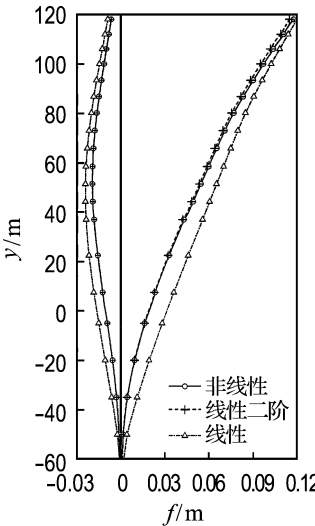


图 5 主塔位移包络图

Fig. 5 Envelope of main pylon displacement

表 1 活载非线性影响
Tab. 1 Nonlinear effect of live load

		非线性	线性二阶	相对差值/%	线性	相对差值/%
主梁跨中弯矩/(10 ³ kN·m)	最大值	101.24	101.19	−0.05	101.70	0.45
	最小值	−15.00	−14.96	−0.27	−15.04	0.27
主塔根部弯矩/(10 ³ kN·m)	最大值	285.61	283.20	−0.84	162.80	−47.79
	最小值	−184.12	−185.48	0.74	−96.65	−47.51
主梁跨中挠度/mm	最大值	13.30	13.40	0.75	21.20	59.40
	最小值	−1 180	−1 186	0.51	−1 189	0.76
主梁梁端水平位移/mm	最大值	23.40	22.00	−5.98	21.50	−8.12
	最小值	−0.84	−0.86	2.38	−0.36	−57.14
主塔塔顶水平位移/mm	最大值	118.00	115.00	−2.54	120.00	1.69
	最小值	−6.60	−6.60	0	−9.10	37.88

由上述图表可以得到如下结论：

(1)线性计算结果和非线性计算结果差值较大,而线性二阶计算结果和非线性计算结果非常接近,相对差值最大值不超过 6%,对于实际工程是可以接受的.线性二阶计算过程比非线性计算过程简单,计算量小,计算时间短,所以协作体系桥在 800 m 跨径范围内,可以采用线性二阶理论

进行活载计算.

(2)主梁最大正弯矩发生在跨中,负弯矩发生在交接处附近.交接处刚度变化大,负弯矩也很大,所以要对该处做特殊加强处理.

(3)主梁跨中最大挠度为 1.18 m,约为计算跨径的 1/650,可见协作体系的刚度较大,整体刚度性能优于同等跨度的悬索桥,这是因为斜拉索

提高了结构的整体刚度。

2.2 混凝土收缩徐变影响分析

混凝土主梁和主塔会发生收缩徐变,导致主梁产生较大的弯矩和变形. 根据桥梁规范对混凝土收缩徐变有关参数的规定,对该桥竣工至运营 15 a 内混凝土收缩徐变的影响进行了分析,计算过程考虑了结构几何非线性,结果见表 2.

表 2 混凝土收缩徐变影响

Tab. 2 Effect of shrinkage and creep of concrete

	位置	M/(kN·m)	f/mm
主梁	跨中	−358	−36.6
	桥塔支点	−11 700	−1.0
主塔		36 150	27.2

注:主塔弯矩指塔根处弯矩;主塔位移指塔顶位移,以指向跨中为正;主梁位移以向上为正

计算结果表明,混凝土收缩徐变对主梁内力影响较大,特别是对塔根弯矩影响最大,达到了 36 150 kN·m. 另外,混凝土收缩徐变产生的主梁挠度为−36.6 mm,主梁线形发生变化,同时又会产生附加弯矩. 因此,混凝土收缩徐变对协作体系桥的内力和线形会产生一定影响,在设计时要给予足够重视.

2.3 矢跨比影响分析

主缆矢跨比是协作体系桥的重要参数之一,它不仅影响结构的刚度,而且对于自锚体系还影响到结构的内力. 图 6 给出在汽车荷载作用下,矢跨比 u 对结构体系的影响. 为了便于比较,将各数值量纲一化,以矢跨比为 1/10 的计算值为参照,其他情况的计算值与之作比.

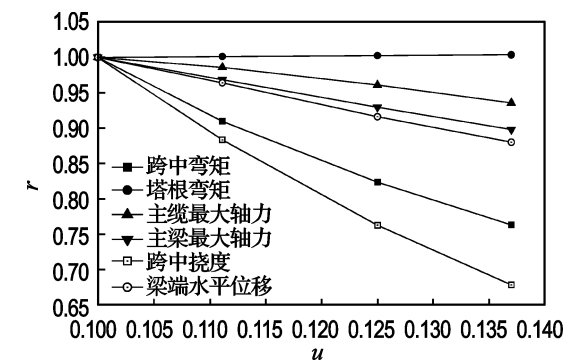


图 6 主缆矢跨比影响

Fig. 6 Effect of rise span ratio of main cable

由图 6 可以看出,对于协作体系桥,主缆矢跨比越大,结构的整体刚度就越大,这一特点与自锚

式悬索桥相同,而与地锚式悬索桥恰好相反^[17]. 另外,主缆和主梁的轴力均随着矢跨比的增大而减小,主梁压力对矢跨比的变化更加敏感. 协作体系中主缆和主梁轴力都非常大,特别是采用自锚体系后,又加大了主梁的压力. 主缆和主梁的轴力大小直接关系到主缆和主梁的截面大小,进而影响工程造价. 综上所述,协作体系桥不宜选择较小的矢跨比.

由图 6 还可以看出,梁端水平位移也随矢跨比的增大而减小,这是由于主梁的压力随矢跨比的增大而减小的缘故. 此外,随着矢跨比的增大塔根弯矩略有增加,但是变化很小.

2.4 主梁拱度影响分析

对于自锚体系,主梁两端受到主缆水平分力作用,主梁的预拱度会引起主梁的附加弯矩,对于恒载状态,可以通过张拉吊索或斜拉索来调整主梁的内力. 因此本文只研究拱度对汽车荷载的影响. 表 3 给出了主梁水平和跨中拱度为 2.9 m 两种情况,在汽车荷载作用下主梁跨中的弯矩和挠度. 结果表明,设置主梁拱度可以降低主梁跨中弯矩,提高了结构的刚度.

表 3 主梁拱度的影响

Tab. 3 Effect of camber of main girder

	0 拱度	2.9 m 拱度	相对差值/%
主梁跨中弯矩/ (10 ³ kN·m)	101.19	99.18	−1.99
主梁跨中挠度/mm	1 186	1 151	−2.95

3 结 论

- (1)协作体系桥在 800 m 跨径范围内,可以采用线性二阶理论进行活载计算,其误差在 6% 以内;
- (2)主梁在斜拉段和悬索段交接处刚度变化大,在活载作用下,产生较大的内力,设计时需要作局部加强;
- (3)混凝土收缩徐变对协作体系桥的内力和线形会产生一定的影响,设计时要给予足够的重视;
- (4)协作体系桥的整体刚度随着矢跨比的增大而增大,主缆拉力和主梁的压力随着矢跨比的增大而减小,因此,协作体系的矢跨比不宜过小;
- (5)主梁预拱度能够提高体系的整体刚度.

参考文献：

[1] GIMSING N J. **Cable Supported Bridges** [M]. Chichester: John Wiley, 1997

[2] 王伯惠. 斜拉-悬索协作体系桥[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2000, **2**(3):1-6

[3] 包龙生,杨炳成,于 玲. 吊拉组合索桥的模型建立与初始索力确定[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2004, **20**(4):265-268

[4] BUCKLAND P G. Increasing the load capacity of suspension bridges [J]. **Journal of Bridge Engineering**, 2003, **8**(5):288-296

[5] 肖汝诚,贾丽君,薛二乐. 斜拉-悬索协作体系的设计探索[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(5):46-51

[6] 肖汝诚,项海帆. 斜拉-悬吊协作体系桥力学特性及其经济性能研究[J]. 中国公路学报, 1999, **12**(3):43-48,116

[7] 蒙 云,刘 东,孙淑红. 大跨度 P. F. C 吊拉组合桥设计研究[J]. 重庆交通学院学报, 1999(4):8-12,39

[8] 王会利. 自锚式斜拉-悬索协作体系桥结构性能分析与试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007

[9] 张 哲,王会利,黄才良,等. 自锚式斜拉-悬索协作体系桥梁设计与分析[J]. 公路, 2006(7):44-48

[10] 李传习,夏桂云. 大跨度桥梁结构计算理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002

[11] 孙训方,方孝淑,关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994

[12] 李国豪. 桥梁与结构理论研究[M]. 上海: 上海科技出版社, 1983

[13] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动 [M]. 修订版. 北京: 中国铁道出版社, 2003

[14] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002

[15] 张雪松,梁 鹏,贾丽君,等. 非线性因素对大跨度斜拉桥活载内力的影响[J]. 重庆交通学院学报, 2005, **24**(1):5-8, 24

[16] 潘永仁. 悬索桥结构非线性分析理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004

[17] 邱文亮,张 哲,黄才良. 自锚式混凝土吊桥的力学性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, **35**(11):1388-1391

Nonlinear analysis of self-anchored cable-stayed suspension bridge

WANG Hui-li^{*1}, QIN Si-feng², ZHANG Zhe¹, XU Fu-you¹

(1.The Institute of Bridge Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024,China;
2.Research Center for Numerical Tests on Material Failure, Dalian University, Dalian 116622.China)

Abstract: Geometrical nonlinearity of self-anchored cable-stayed suspension bridge was studied. The influences of shrinkage and creep of concrete, rise span ratio and girder camber on system were discussed. A self-anchored cable-stayed suspension bridge with main span of 800 m was analyzed with linear theory, two-order linear theory and nonlinear theory. The moment and displacement of girder, pylon under different rise span ratio and girder camber stages with live load were gotten. According to the results of analyses, the live load of a self-anchored cable-stayed suspension bridge with main span of 800 m can be analyzed with two-order linear theory and the error is less than 6%. The shrinkage and creep of concrete greatly affect the structure. And the system stiffness is superior to that of suspension bridge. As the rise span ratio becomes larger, the axial force and stiffness of main cable and girder are smaller. The system stiffness increases if main girder camber is set.

Key words: self-anchored; cable-stayed suspension; two-order linearity; nonlinearities