

文章编号:1671-8879(2011)04-0045-05

三塔悬索桥汽车效应几何非线性

梁 鹏¹, 吴向男¹, 李万恒², 徐 岳¹

(1. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064;

(2. 交通运输部公路科学研究院 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 北京 100088)

摘 要:以主跨为 $2 \times 1\,080\text{ m}$ 的泰州长江大桥为研究对象, 分别采用线性挠度理论、非线性-UL 增量理论和非线性-CR 全量理论, 计算三塔悬索桥的主梁挠跨比、中塔受力、中塔主缆抗滑安全系数等控制指标, 研究其汽车效应几何非线性影响。研究表明: 非线性-CR 全量理论精度和效率最高, 但需要独立开发软件; 采用非线性-UL 增量理论计算 3 个指标的最大误差仅为 0.3% ; 广泛采用的线性挠度理论计算 3 个指标的误差分别为 6.6% 、 4.5% 、 -2.64% , 误差较大, 不能满足三塔悬索桥精细化分析的要求。

关键词:桥梁工程; 三塔悬索桥; 汽车效应; 几何非线性; 线性挠度理论; CR 全量; UL 增量; 关键效应

中图分类号: U441.2

文献标志码: A

Geometrical nonlinearity under live load for three-tower suspension bridges

LIANG Peng¹, WU Xiang-nan¹, LI Wan-heng², XU Yue¹

(1. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Old Bridge Detection and Reinforcement Technique,

Highway Research Institute of Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: Taizhou Yangtze River Bridge with $2 \times 1\,080\text{ m}$ span was taken as the study object, and 3 methods, such as linear deflection theory, incremental UL formulation and total CR formulation were employed to compute three main factors such as deflection-to-span ratio of main girder, force in the mid-tower and anti-slipping safety factor between the main cable and saddle, and the geometrical nonlinearity under live load was studied. It is concluded that: the accuracy and efficiency of computation of total CR formulation is highest, but developing special software independently is needed; the maximum error of incremental UL formulation is no more than 0.3% ; the errors of the three main factors calculated by linear deflection theory are 6.6% , 4.5% and -2.64% respectively. The errors are somewhat greater, so the linear deflection theory can not meet the requirements of refined analysis. 3 tabs, 3 figs, 8 refs.

Key words: bridge engineering; three-tower suspension bridge; response under live load; geometrical nonlinearity; linear deflection theory; total CR formulation; incremental UL formulation;

收稿日期: 2010-05-20

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(50808019); 国家科技支撑计划项目(2009BAG15B01); 中央高校基本科研业务费专项资金项目和长安大学基础研究支持计划专项资金项目(CHD2009JC024)

作者简介: 梁 鹏(1977-), 男, 江西高安人, 副教授, 工学博士, E-mail: BridgeDoctor@126.com.

key response

0 引言

国际方案竞赛中多次提出大跨三塔或多塔悬索桥方案,但至今没有建成的实例,说明对这种桥梁的静动力行为把握还不够。中国在建的泰州长江大桥和马鞍山长江大桥(主跨径都是 $2 \times 1\,080\text{ m}$)迈出可喜的一步,即将实现超千米级三塔悬索桥连续跨越。由于缺乏边缆的有效约束,中塔刚度很低,三塔悬索桥结构静动力行为与两塔悬索桥有显著不同^[1]。主梁挠跨比、中塔受力、中塔主缆抗滑等在常规两塔悬索桥中不会引起很多关注的因素,但在三塔悬索桥中却成为控制性指标,且都受汽车作用控制。因此,研究三塔悬索桥汽车效应几何非线性具有重要价值。

相对于解析方法,有限元法可以建立求解的通用格式,且考虑因素全面,是最常用的分析方法^[2]。汽车效应有限元分析理论包括线性理论、线性挠度理论、非线性-UL(Updated Lagrangian)增量理论、非线性-CR(Co-rotate Lagrangian)全量理论 4 种理论^[3-8]。本文研究这 4 种理论的算法实现及其精度对比。

1 汽车效应有限元分析理论

1.1 线性理论及线性挠度理论

对于线性结构,求汽车效应可以基于影响线进行线性叠加。找出加载位置后,集中荷载乘以影响线数值以及均布荷载乘以影响线面积,即可得到汽车效应。计算影响线时,如果结构总刚度仅计入弹性刚度,则称之为线性理论;如果结构总刚度计入了恒载状态时的几何刚度,则称之为线性挠度理论。线性挠度理论忽略了汽车引起的几何、内力状态的变化,所以叠加原理仍然适用。

由于结构的空问效应,不同车道的影响线会有所不同。所以,本文在计算汽车效应时,考虑了横向 8 车道不同布置方式的影响线及纵横向折减,取不利效应。

1.2 非线性-UL 增量理论

进行汽车几何非线性分析时,会遇到两方面的问题:①基于线性叠加原理的影响线方法失效;②汽车作用引起结构几何、内力状态发生变化,从而改变影响线的峰值大小、峰值位置和零点位置,而计算汽车效应又必须事先已知影响线。

对于小跨度桥梁,结构几何非线性影响很小,故汽车效应非线性影响也很小;对于大跨度桥梁,恒载占的比重较大,汽车不足以引起较大的几何、内力改变。通过改变不同恒载与汽车共同作用下的几何、内力状态,计算大跨度桥梁影响线,可以发现有以下特点:①影响线形状十分接近;②影响线峰值大小发生变化,但峰值位置变化很小,零点位置几乎不变。

由于以下 2 个原因,采用汽车作用非线性分析理论时,可以不考虑影响线变化对计算结果的影响:①非线性理论采用直接加载计算,故与影响线数值大小无关,仅与峰值位置(决定集中力作用位置)和零点位置(决定均布荷载加载区间)有关;②由于峰值附近影响线数值变化缓慢,峰值位置的少许移动对集中力效应影响很小,况且大跨度桥梁中集中力所占比重很小;零点附近影响线数值很小,加载区间的很小变化对结果影响微小。

基于影响线的以上特点,对几何非线性结构虽不能直接利用影响线叠加原理计算汽车效应,但却可以根据恒载状态下的影响线(考虑恒载几何刚度)确定汽车加载位置,然后将汽车作为外荷载,调用几何非线性-UL 增量分析模块,即可计算出汽车的非线性效应,本文称之为汽车效应的非线性-UL 增量理论。

求汽车效应包络时,由于需要对各个单元的左右截面的 6 个位移、6 个内力及应力(沿截面高度的各个应力点的正应力、剪应力和主应力)求最大、最小效应,对各支承节点的 6 个支承反力求最大、最小效应,由于非线性-UL 增量理论求解精度与荷载步大小和刚度矩阵的精度有关,故需要多次分解结构总刚度,计算量非常巨大。

对现有软件稍作改进,就可采用汽车效应的非线性-UL 增量理论分析方法。

1.3 非线性-CR 全量理论

文献[6-7]提出汽车效应非线性-CR 全量理论,通过以下 3 点,可以取消增量步内为小转动的限制和避免误差累积:①在 CR 坐标系下精确扣除单元刚体运动;②基于整体平衡条件而不是增量平衡条件计算单元抗力;③在每个迭代步都根据当前构形重新计算全部单元荷载的等效节点力。该算法计算单元抗力和等效节点力都基于整体平衡,且求解精度与荷载步个数无关,极大提高了计算精度和效率。对大跨度桥梁汽车几何非线性分析,采用 MNR 法

求解,只需一个荷载步即可收敛。所以,可以事先将恒载状态的结构总刚度分解,以后只需执行回代运算即可,极大地节约了计算时间。本文采用非线性-CR 全量理论时,考虑了恒载状态的几何、内力和外荷载信息,即恒载参与汽车作用的平衡迭代。

非线性-CR 全量理论计算精度和效率最高,但需要独立开发软件。

2 工程背景及分析模型

2.1 工程背景

在建的泰州长江大桥为三塔两主跨悬索桥,桥跨布置为 $(390+1\,080+1\,080+390)\text{m}$,设计成桥状态矢跨比为 $1/9$ 。每根主缆由 169 根预制平行钢丝索股组成。加劲梁采用封闭式流线型扁平钢箱梁,中心线处梁高 3.5 m 。桥塔采用门式框架结构,两边塔为混凝土塔,中间塔为钢塔,2 个边塔在顺桥向为单柱形结构,中间桥塔在顺桥向则采用“人”字形结构,以增强结构纵向刚度。

中塔与主梁间设置纵向弹性索共 8 根,每根为 $265\phi 7\text{ mm}$ 钢丝,初始张力 $1\,500\text{ kN}$ 。

2.2 分析模型

采用“脊骨梁”模式建立悬索桥空间有限元分析模型;主梁、主塔用梁单元模拟,主缆及吊索采用悬链线索单元模拟;数值积分法计算截面抗弯刚度、抗扭刚度;主梁质量计入旋转质量惯性矩;采用悬索的柔性迭代法确定成桥几何和受力状态,作为使用阶段分析的初始状态。三塔悬索桥有限元模型如图 1 所示。



图 1 三塔悬索桥有限元模型

3 汽车作用引起的影响线改变

如果需计入汽车作用对影响线改变的影响,理论上还可以根据第 1 次求出的恒载与汽车的几何、内力状态,更新影响线,更新加载区间,重新调用非线性分析模块,如此循环,但其计算量太大。文献[5]研究了计算特征影响线时,集中荷载取 1 和 $10\,000$ 时引起的影响线零点漂移,结果表明,是否进行零点修正对结果影响非常小。文献[5]采用不同大小的集中荷载来替代汽车作用对影响线的改变,不能直接说明问题。

图 2、图 3 给出泰州大桥中塔中底弯矩、中塔梁

连接纵向弹性索力的 2 次计算得到的影响线:①第 1 次影响线基于恒载作用下的几何、内力状态计算;②由第 1 次影响线加载区间确定汽车作用位置,调用非线性分析模块计算得到恒载与汽车作用下的几何、内力状态,重新计算影响线,为第 2 次影响线。

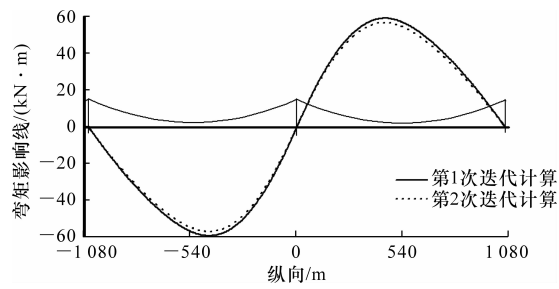


图 2 2 次计算得到的中塔中底弯矩影响线

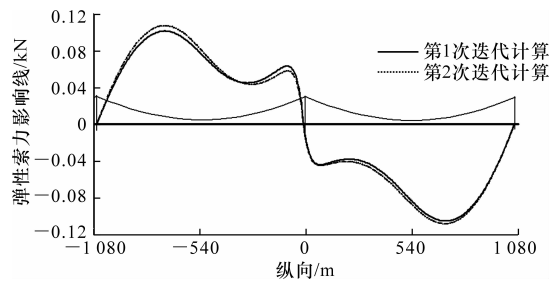


图 3 2 次计算得到的纵向弹性索力影响线

三塔悬索桥的中塔立面为“人”字形,中塔中底弯矩指分叉点以上、中上塔柱底部的弯矩,控制中上塔柱截面设计;中塔下底弯矩指下塔柱顺桥向双肢的合成弯矩,控制中塔基础设计。

从图 2 可以得到:①2 次计算得到的中塔中底弯矩影响线峰值由 $60.30\text{ kN}\cdot\text{m}$ 减小为 $57.92\text{ kN}\cdot\text{m}$,减小 3.95% ;②影响线零点位置不变;③影响线峰值位置移动了 4.0 m 。

从图 3 可得到:2 次计算得到的纵向弹性索力影响线峰值由 $0.101\,1\text{ kN}$ 增加到 $0.107\,2\text{ kN}$,增加了 6.04% ;影响线零点位置和峰值位置没有移动。

由于影响线零点位置不变,峰值位置移动很小,故汽车作用改变影响线而对非线性计算结果的影响十分微小。以下根据有限元的 3 种理论计算汽车效应,仅根据恒载状态求解影响线,不再更新影响线。

4 汽车位移几何非线性

下页表 1 是采用 3 种理论计算汽车位移效应的比较,从表 1 可以得出以下结论。

(1)采用线性挠度理论计算梁端最大、最小水平位移的相对误差分别为 -22.6% 、 47.5% ,误差主要来源于线性挠度理论没有计入两跨加劲梁反对称竖

表 1 汽车作用位移的包络比较

位移类型	位置	方向	非线性-CR 全量	非线性-UL 增量		线性挠度理论	
			绝对数值	绝对数值	相对误差/%	绝对数值	相对误差/%
水平位移/m	梁端	江侧	0.131 3	0.131 0	−0.2	0.101 7	−22.6
		岸侧	−0.076 7	−0.076 5	−0.3	−0.113 2	47.5
	边塔顶	江侧	0.184 5	0.184 5	0.0	0.189 3	2.6
		岸侧	−0.001 1	−0.001 1	0.6	−0.001 2	9.1
	中塔顶	江侧	1.846 2	1.844 6	−0.1	1.922 4	4.1
		岸侧	−1.846 2	−1.844 6	−0.1	−1.922 4	4.1
竖向位移/m	主梁	向上	2.357 1	2.354 6	−0.1	2.426 4	2.9
		向下	−3.281 2	−3.279 4	−0.1	−3.564 7	8.6
	1/4 跨处	向上	3.161 1	3.158 6	−0.1	3.229 5	2.2
		向下	−4.251 8	−4.249 5	−0.1	−4.531 9	6.6
转角位移/rad	梁端 (左侧)	顺时针	0.017 7	0.017 7	−0.1	0.018 8	6.3
		逆时针	−0.011 8	−0.011 8	−0.1	−0.012 7	7.8

向变形引起的梁端水平位移;绝对误差分别为 −0.029 6 m、−0.036 5 m,但与温度引起的梁端位移0.400 m 相比,误差绝对值不大。

(2)采用线性挠度理论计算得到的主跨跨中最大、最小竖向位移相对误差分别为 2.2%、6.6%,绝对误差分别为 0.068 4 m、−0.280 1 m,绝对数值都偏大,过于保守。由于主梁挠跨比是三塔悬索桥设计的控制指标之一,采用线性挠度理论将过大估计主梁向下挠度,达到 0.280 1 m,过于保守,所以应引起足够的重视。

(3)采用线性挠度理论计算梁端最大、最小转角位移的相对误差分别为 6.3%、7.8%,绝对值都偏大,过于保守。由于梁端转角也是重点关注的指标之一,故也应引起重视。

(4)非线性-UL 增量理论的计算精度很高,对应以上 3 项位移的相对误差最大仅为 −0.3%。

5 汽车内力几何非线性

采用 3 种理论计算汽车内力效应的比较见下页表 2。从表 2 可以得出以下结论。

(1)采用线性挠度理论计算塔梁间纵向弹性索最大索力、最小索力的相对误差分别为 −27.6%、118.6%。纵向弹性索初始张拉力为 1 500 kN,在汽车与初始张拉力共同作用下,采用非线性-CR 全量理论计算得到的索力分别为 5 692.8 kN、57.5 kN,最大、最小索力相差悬殊造成其刚度变化很大,而线性挠度理论不能计入该局部强烈非线性。

(2)采用线性挠度理论计算得到的吊索最大、最小索力相对误差分别为 −2.0%、9.6%。

(3)采用线性挠度理论计算得到的中塔顶水平最大剪力、最小剪力相对误差分别为 −22.6%、−22.6%,绝对值都偏小。

(4)采用线性挠度理论、非线性-UL 增量理论和非线性-CR 全量理论计算得到的主缆抗滑安全系数分别为 2.58、2.65、2.65,可看出,线性挠度理论偏于保守。

(5)采用线性挠度理论计算得到的边塔底最大、最小弯矩误差分别为 3.0%、4.8%,中塔中底最大、最小弯矩误差分别为 4.2%、4.2%,中塔下底最大、最小弯矩误差分别为 2.8%、2.7%,绝对值都偏大,偏于保守。

(6)非线性-UL 增量理论的计算精度很高,对应纵向弹性索最大、最小索力相对误差为 −1.0%、3.2%,对应以上结论(2)、(3)、(4)的相对误差最大仅为 0.4%。

6 汽车正应力几何非线性

采用 3 种理论计算汽车正应力效应的比较见下页表 3。从表 3 可以得出以下结论。

(1)采用线性挠度理论计算得到的边塔底应力最大相对误差为 7.9%,最大绝对误差仅为 0.1 MPa。相对误差较大是因为其绝对数值很小的缘故,且边塔受力是受地震影响而不是由汽车作用控制;中塔中底应力最大相对误差为 4.5%,最大绝对误差为 7.3 MPa,偏于保守。

(2)非线性-UL 增量理论的计算精度很高,中塔中底应力最大相对误差为 0.3%,最大绝对误差为 0.5 MPa。

表 2 汽车作用内力的包络比较

内力	位置	方向	非线性-CR 全量	非线性-UL 增量		线性挠度理论	
			绝对数值	绝对数值	相对误差/%	绝对数值	相对误差/%
纵向弹性 索力/kN	左侧	受拉	4 239.0	4 197.6	−1.0	3 069.3	−27.6
		受压	−1 396.3	−1 441.6	3.2	−3 052.9	118.6
	右侧	受拉	4 240.5	4 199.0	−1.0	3 069.3	−27.6
		受压	−1 396.1	−1 441.5	3.2	−3 052.9	118.7
吊索力/ kN	长吊索 (边塔侧)	受拉	331.5	331.5	0.0	341.2	2.9
		受压	−12.6	−12.7	0.4	−13.4	6.1
	中吊索 (边塔侧)	受拉	510.1	510.1	0.0	501.4	−1.7
		受压	−56.6	−56.6	0.0	−61.2	8.0
	短吊索	受拉	520.1	520.1	0.0	509.6	−2.0
		受压	−50.6	−50.6	0.0	−54.9	8.4
	中吊索 (中塔侧)	受拉	511.0	511.0	0.0	501.4	−1.9
		受压	−57.5	−57.5	0.0	−61.8	7.5
	长吊索 (中塔侧)	受拉	1 557.0	1 554.5	−0.2	1 659.2	6.6
		受压	−673.9	−672.5	−0.2	−738.3	9.6
纵向剪力/ kN	边塔顶	最大	93.5	94.1	0.6	163.3	74.6
		最小	−1 499.8	−1 498.6	−0.1	−1 319.3	−12.0
	中塔顶	最大	13 321.8	13 309.2	−0.1	10 312.0	−22.6
		最小	−13 321.8	−13 309.0	−0.1	−10 312.0	−22.6
弯矩/ (kN·m)	边塔底	最大	225 806.5	225 837.5	0.0	232 548.2	3.0
		最小	−9 408.5	−9 474.2	0.7	−9 862.2	4.8
	中塔中底	最大	1 685 075.4	1 683 683.7	−0.1	1 755 128.1	4.2
		最小	−1 685 074.2	−1 683 705.3	−0.1	−1 755 127.8	4.2
	中塔下底	最大	2 827 320.0	2 826 490.0	0.0	2 905 080.0	2.8
		最小	−2 827 350.0	−2 826 490.0	0.0	−2 905 080.0	2.7

表 3 汽车作用正应力的包络比较

桥塔	位置	方向	非线性-CR 全量	非线性-UL 增量		线性挠度理论	
			绝对数值	绝对数值	相对误差/%	绝对数值	相对误差/%
边塔底/ MPa	江侧	受拉	0.1	0.1	3.7	0.1	7.9
		受压	−2.6	−2.6	0.6	−2.7	2.4
	岸侧	受拉	2.0	2.0	0.0	2.0	2.7
		受压	−0.1	−0.1	0.5	−0.1	5.0
中塔中底/ MPa	右侧	受拉	156.6	156.8	0.1	163.5	4.4
		受压	−163.4	−163.4	0.0	−170.7	4.5
	左侧	受拉	157.6	157.1	−0.3	163.8	3.9
		受压	−163.4	−163.7	0.2	−170.6	4.4

7 结 语

(1)广泛采用的线性挠度理论计算主梁挠跨比、中塔受力、中塔主缆抗滑安全系数这 3 个关键指标的误差分别为 6.6%、4.5%、−2.64%，偏于保守，误差较大，不能满足三塔悬索桥精细化分析的要求，这与相同跨径的双塔悬索桥和双塔斜拉桥得出的结论不同。

(2)非线性-UL 增量分析理论计算相应 3 个指标的最大误差仅为 0.3%，完全可以满足要求；而对

现有软件稍作改进，就可实现汽车效应的非线性-UL 增量分析方法,但计算量巨大。

(3)本文给出的汽车效应非线性-CR 全量分析理论具有很高的精度和效率,但是需要独立开发的软件。

参考文献：
References：
[1] Gimsing N J. Cable supported bridges[M]. 2nd Ed. Chichester:John Wiley,1997.

(下转第 57 页)