

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.08.018

多塔悬索桥的两个主要控制指标及其计算工况

张劲泉, 曲兆乐, 宋建永, 杨 昀

(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 以千米级3塔连跨悬索桥——泰州大桥为工程背景, 比较了国内规范对加劲梁竖向挠跨比的相关规定, 指出了该规定的实质目的是使行车平稳、安全。通过ANSYS有限元程序对比分析了泰州大桥4种汽车荷载典型工况下的整体位移, 结果表明: 加劲梁梁端竖向转角与加劲梁竖向挠跨比无本质联系(对于大跨度悬索桥); 加劲梁梁端竖向转角与中塔纵向抗弯刚度的相关程度不高, 从而明确了多塔悬索桥的2个主要控制指标为加劲梁竖向挠跨比和中塔鞍座抗滑系数。同时, 对这两者的限值进行了探讨, 并将它们统一到“单跨满布、跨中加力”的工况中计算。

关键词: 悬索桥; 多塔; 挠跨比; 梁端转角; 抗滑系数

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2011)08-0095-05

Two Principal Control Indexes of Multi-pylon Suspension Bridge and Related Calculation Cases

ZHANG Jinquan, QU Zhaole, SONG Jianyong, YANG Yun

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

Abstract: Based on the thousand-meter scale three-pylon continuous suspension bridge, Taizhou Bridge, the relevant regulations on vertical deflection-span ratio of stiffening girder stipulated in domestic codes and specifications were compared, which indicates that the essential objective of these regulations is to make vehicles travel stably and safely. By ANSYS finite element program, the ensemble displacements of Taizhou Bridge under four typical cases were comparatively analysed. The results show that (1) there is no essential connection between girder end vertical rotation angle and vertical deflection-span ratio of stiffening girder (for long-span suspension bridge); (2) the degree of correlation between girder end vertical rotation angle of stiffening girder and the longitudinal flexural stiffness of mid-pylon is low. Thus, it is clarified that the main control parameters for multi-pylon suspension bridges are vertical deflection-span ratio of stiffening girder and anti-sliding coefficient of mid-pylon saddle. Meanwhile, the limit values of these control parameters were discussed, which were used in the calculation for the case of “full live load applied on single span, concentrated force applied at mid-span”.

Key words: bridge engineering; suspension bridge; multi-pylon; deflection-span ratio; beam end rotation angle; anti-sliding coefficient

0 引言

大跨度多塔连跨悬索桥是桥梁兼顾超大和超长的最佳途径, 是传统的2塔悬索桥由量变到质变的

创新形式, 也是国际桥梁界讨论多年但尚未实现的理想方案。近年来, 在一些跨越宽广水域的大型桥梁工程的建设过程中, 多塔连跨悬索桥屡次作为设计比选方案而提出, 直到2007年12月26日, 世界

上首座千米级3塔连跨悬索桥泰州大桥正式开工建设。

与传统的2塔悬索桥不同,虽然仍是以悬索为主要承重构件的桥梁,但由于3塔悬索桥多了1个中塔、1个主跨,其总体结构行为、满足行车等使用要求以及安全要求的控制指标均有所不同。比如活载作用下加劲梁竖向挠跨比与满足行车要求的关系问题,主缆与中塔鞍座间的抗滑稳定问题,这样的使用问题和安全问题在传统的2塔悬索桥中往往不会引起很多关注,但却是泰州大桥的主要控制指标。

3塔悬索桥的中塔由于在纵桥向缺乏有效约束,若纵向抗弯刚度太小,当两侧主缆出现不平衡力时,塔顶可能产生很大的纵向位移,导致加劲梁产生更大的竖向挠度,从而不满足行车要求;若纵向抗弯刚度太大,加劲梁竖向挠跨比虽然满足了要求,但是中塔却分担了过多的由两侧主跨产生的不平衡重,主缆与鞍座间的摩阻力可能抵抗不了这么大的力,导致主缆与鞍座滑移,整个结构破坏。

因此,3塔甚至多塔悬索桥的中塔纵向抗弯刚度不仅存在下限值,还存在上限值。下限值由使用要求决定,即刚度不能太柔以至于加劲梁过度下挠而影响行车;上限值由安全要求决定,即刚度不能太刚以至于主缆与中塔鞍座滑移而结构破坏。这就决定了3塔乃至多塔悬索桥的2个主要控制指标——加劲梁竖向挠跨比、中塔鞍座抗滑系数。

本文将重点比较国内规范对加劲梁竖向挠跨比的相关规定(国内规范已参考了国外规范),揭示此项规定的实质目的。试图通过ANSYS有限元程序计算泰州大桥4种汽车荷载典型工况下的整体位移(详见第4节),对比分析工况2、工况1和工况4(工况2始终是比较的对象)的结果,论证将加劲梁竖向挠跨比和中塔鞍座抗滑系数统一到工况2中计算的可行性,为下一步的研究打下基础;再对比分析工况2和工况3的结果,讨论是否该用梁端竖向转角取代竖向挠跨比(对于大跨度悬索桥和斜拉桥)的争议^[1]。此外,本文还对这两者的限值进行探讨。

1 工程概况

泰州长江公路大桥位于江苏省长江中段,西距润扬长江公路大桥66 km,东距江阴长江公路大桥57 km,北接泰州市,南连镇江市和常州市。

主桥采用3塔2跨连续钢箱梁悬索桥,由桥墩来支承2个边跨,桥跨布置为(390+2×1 080+390)m,如图1所示。

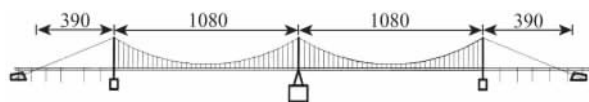


图1 泰州大桥立面示意(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of elevation of Taizhou Bridge (unit: m)

加劲梁梁高3.5 m,标准节段长16 m。横断面为单箱3室构造,两侧边室为风嘴兼检修道,全宽39.1 m,梁顶面宽36.7 m。

主缆采用预制平行丝股法(PPWS),垂跨比1/9。2根主缆的横向中心距34.8 m,每根主缆由169股组成,每股由91束直径5.2 mm的镀锌高强钢丝组成。

边塔为门式混凝土结构,塔柱顶中心高程180 m,塔柱底中心高程8.3 m。中塔为门式钢结构,纵向呈人字形,塔柱顶中心高程200 m,塔柱底中心高程8.5 m。

边塔处加劲梁设竖向支座(同时约束扭转)和横向支座;中塔处加劲梁设竖向限位挡块(限制加劲梁扭转)、横向抗风支座和纵向弹性索。

2 计算模型

本文不考虑施工过程影响,采用ANSYS通用有限元程序,建立单梁式模型即鱼骨梁。其中脊梁模拟加劲梁,使用刚臂将吊索和加劲梁连接,如图2所示。模型全部采用忽略剪切变形的经典梁单元Beam4和只受拉的杆单元Link10。

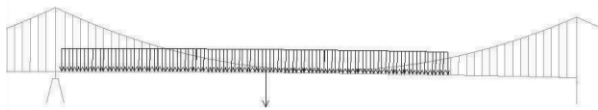


图2 泰州大桥模型示意

Fig.2 Schematic diagram of model of Taizhou Bridge

对于悬索桥来说,成桥构形尤为重要。主缆的节点坐标需要经过找形后才能最终确定。为了尽量消除各塔的弹性压缩和吊索的弹性伸长,对应的所有单元都设有初应变。

3 荷载组合及计算工况

计算只考虑恒载和汽车荷载的作用组合,且分项系数均取1.0。

恒载包括一、二期恒载,其中一期按实际重量计,二期取50 kN/m。

汽车荷载采用公路—I级车道荷载,其主要技术

指标、折减均按照《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2004)^[2]的规定, 横向按 8 车道对称布置 (不考虑偏载), 横向折减系数 0.50, 纵向折减系数 0.97。

本文选取 4 种汽车荷载典型工况进行有限元计算。工况 1 (加劲梁最大竖向挠度) 和工况 4 (中塔塔顶最大纵向位移) 是与 2 个控制指标相对应的工况; 工况 2 (单跨满布、跨中加力) 是为了将 2 个控制指标统一而提出的简化计算工况; 工况 3 (加劲梁梁端最大竖向转角) 是存在争议的工况。

3.1 工况 1: 加劲梁最大竖向挠度

汽车荷载按最不利加载布置, 如图 3 所示。整体位移情况如图 4 所示, 其中 (a) 为竖向位移 u_y , (b) 为纵向位移 u_x , 下同。

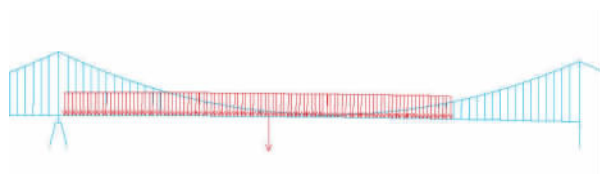


图 3 工况 1 的汽车荷载布置

Fig. 3 Layout of vehicle loads under case 1

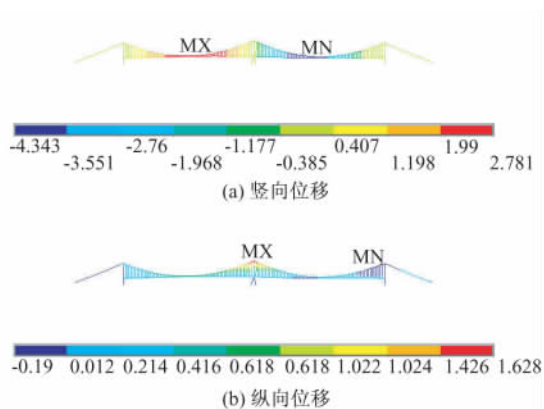


图 4 工况 1 的整体位移 (单位: m)

Fig. 4 Ensemble displacement under case 1 (unit: m)

加劲梁最大竖向挠度为 -4.343 m (向下), 即挠跨比为 $4.0‰$ 。

工况 1 需要特别强调 2 个值, 一个是加劲梁的最大水平倾角为 $3.0‰$ (在原有纵坡基础上, 本文角度均以坡度形式计), 另一个是加劲梁梁端竖向转角为 $0.4‰$ (顺时针)。

3.2 工况 2: 单跨满布、跨中加力

“单跨满布、跨中加力”是指一侧主跨满布活载, 集中力作用在跨中加劲梁位置, 如图 5 所示。整体位移情况如图 6 所示。

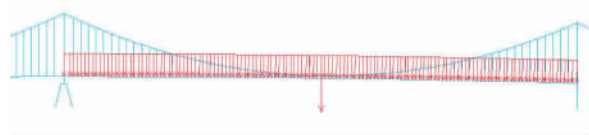


图 5 工况 2 的汽车荷载布置

Fig. 5 Layout of vehicle loads under case 2

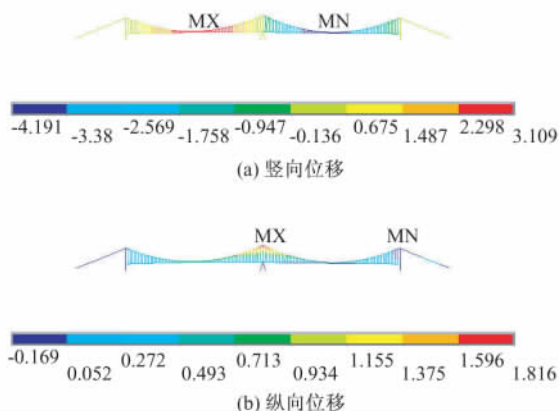


图 6 工况 2 的整体位移 (单位: m)

Fig. 6 Ensemble displacement under case 2 (unit: m)

加劲梁竖向挠跨比 $3.9‰$ 。

3.3 工况 3: 加劲梁梁端最大竖向转角

汽车荷载按最不利加载布置, 如图 7 所示。整体位移情况如图 8 所示。

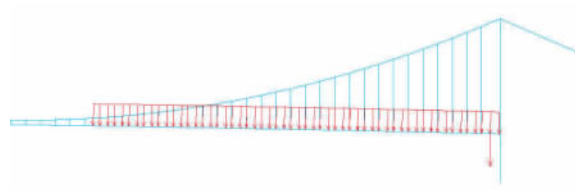


图 7 工况 3 的汽车荷载布置

Fig. 7 Layout of vehicle loads under case 3

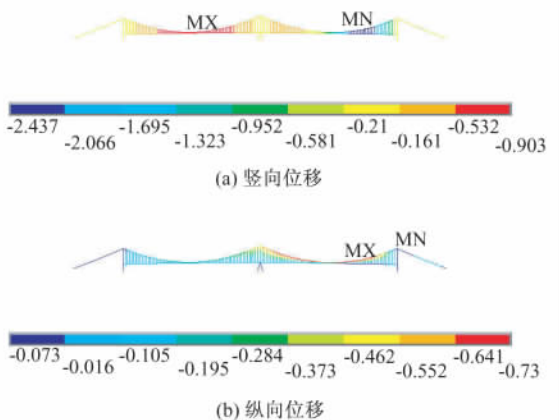


图 8 工况 3 的整体位移 (单位: m)

Fig. 8 Ensemble displacement under case 3 (unit: m)

加劲梁梁端最大竖向转角为 -1.8% (逆时针)。

3.4 工况4: 中塔塔顶最大纵向位移

汽车荷载按最不利加载布置,如图9所示。整体位移情况如图10所示。

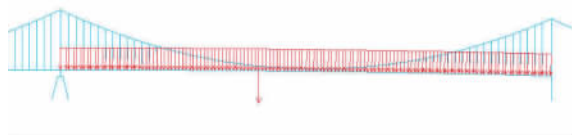


图9 工况4的汽车荷载布置

Fig. 9 Layout of vehicle loads under case 4

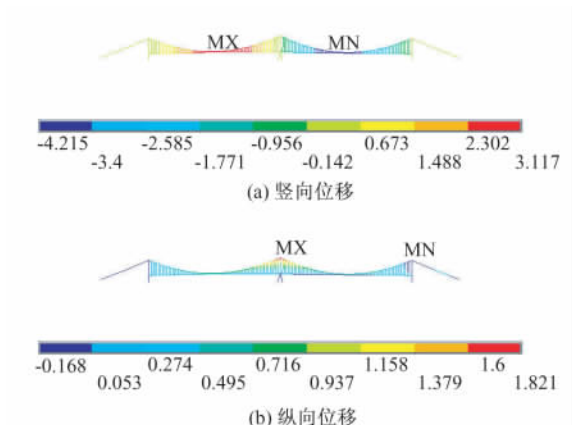


图10 工况4的整体位移(单位: m)

Fig. 10 Ensemble displacement under case 4 (unit: m)

中塔塔顶最大纵向位移为 1.758 m 。

4 关于加劲梁竖向挠跨比

目前,国内的《铁路桥涵设计基本规范》(TB10002.1—2005)(简称《普铁规》)^[3]、《高速铁路设计规范(试行)》(TB10621—2009 J971—2009)(简称《高铁规》)^[4]、《公路悬索桥设计规范(报批)》(JTJ xxx—2002)(简称《公悬规》)^[5]都对加劲梁竖向容许挠度做了相关规定。为了方便讨论,现摘录如下:

《普铁规》条文说明 5.1.2: 对梁式桥跨结构容许挠度的规定,主要是为了适应列车高速安全平稳运行的要求,并考虑挠度对结构的影响。当挠度较大时,支座转角亦大,线路形成突变,不能维持连续平顺的曲线,致使此处受到冲击力,不利于养护。

《高铁规》条文说明 7.3.2: 梁式桥跨结构刚度限值的规定,主要是为了满足高速行车条件下的行车安全和乘坐舒适的要求;通过计算高速列车以各种速度通过不同跨度简支梁时的车桥耦合振动响应;研究梁体不同竖向刚度条件下时车桥的振动状态。

《公悬规》条文 5.2.1: 悬索桥加劲梁由汽车荷

载(不计冲击力)引起的最大竖向挠度值不宜大于跨度的 $1/250 \sim 1/300$ 。

《公悬规》条文说明 5.2.1—5.2.2: 悬索桥为柔性结构,对加劲梁竖向挠度及横向位移的限值主要是保证行车的平顺舒适和安全感。

3种规范对加劲梁竖向容许挠度的限制有一个共同的出发点,就是为了行车平稳、安全,所以这是一个与行车速度、道路类别密切相关的使用规定。车速越快,限制就越严格;铁路桥梁比公路桥梁限制严格。对于公路悬索桥来说,相同的车速,容许挠度应该相同,不会因为是小跨度还是大跨度、是2塔还是3塔而改变。而且,对容许挠度或容许挠跨比的规定,应该基于车桥耦合振动试验,如《高铁规》条文说明 7.3.2 所述。在缺乏试验的情况下,只能根据数值计算并参考国外规范。那么,加劲梁竖向挠跨比的计算值到底应该在何种工况下求得呢?

由工况1可知,泰州大桥的加劲梁竖向最大挠跨比为 4.0% (即 $1/250$),对应的加劲梁最大水平倾角为 3.0% ,刚好达到了《公路线路设计规范》(JTJ 011—94)^[6]对高速公路(平原微丘)的最大纵坡限值,不利于车辆爬坡。但是,这是在交通管理失效、塞车严重的极端情况下取得的,车速很小甚至停车,所以该限值应适当放大。据此,本文建议采用“单跨满布、跨中加力”的工况2来计算加劲梁竖向挠跨比。这样相当于放大了对加劲梁竖向容许挠跨比的限制,且有这样2个优点:①汽车荷载布置简单,不再需要每次都去试算最不利加载布置;②与中塔纵向抗弯刚度密切相关。

比较工况2与工况1的计算结果可知,“单跨满布、跨中加力”虽然减小了加劲梁竖向挠度的计算值,但相差不大,仍具有一定代表性,且有优点①。至于优点②,则是针对是否可用梁端竖向转角取代竖向挠跨比的争议(对于大跨度悬索桥和斜拉桥)而强调的。比较工况3与工况2的计算结果可知,两者差别很大。最明显的是,工况3的中塔纵向位移较小,说明加劲梁梁端竖向转角与中塔纵向抗弯刚度的相关程度不高,更像是局部行为。又由工况1可知,加劲梁产生最大竖向挠度时,梁端竖向转角很小,仅为 0.4% 且上挠,并非如《普铁规》条文说明 5.1.2 所述:当挠度较大时,支座转角亦大。这是由于大跨度悬索桥的几何非线性效应所造成的。所以,对于大跨度悬索桥来说,加劲梁梁端竖向转角与竖向挠跨比并没有什么本质关系。

综上所述,建议采用“单跨满布、跨中加力”

的工况计算加劲梁竖向挠跨比,容许挠跨比沿用《公悬规》中的1/250。

再来讨论加劲梁梁端竖向容许转角。目前,国内只有《高铁规》中有明确的规定,即对于采用有砟轨道的桥梁,梁端转角过大会导致位于梁端伸缩缝部位的道床不稳定;即对于采用无砟轨道的桥梁,由于梁端竖向转角使得梁缝两侧的钢轨支点分别产生钢轨的上拔和下压现象。

可见,对梁端竖向转角的限制也是出于对行车平稳、安全的考虑。公路桥梁不存在铁路桥梁的问题,但是如果转角过大,则会带来跳车问题。所以对梁端竖向容许转角的规定,应该基于跳车试验。还有可能对伸缩缝产生不利影响,这也需要试验。

然而,大跨度悬索桥的加劲梁梁端竖向容许转角同竖向容许挠度一样,世界各国至今也没有被公认的标准量值。究其原因,主要是缺乏试验验证。泰州大桥在总结了国内外几座大跨度悬索桥的工程经验后,规定其加劲梁梁端竖向容许转角的限值为2%^[7]。

5 关于中塔鞍座抗滑系数

《公悬规》中有对主缆与鞍座间抗滑系数的明确规定,验算简图如图11所示。

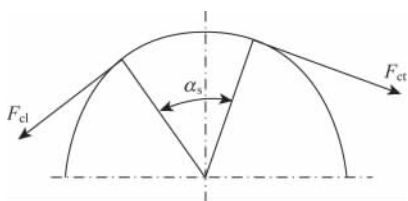


图11 鞍座抗滑验算简图

Fig. 11 Checking computation diagram of anti-sliding coefficient of saddle

$$\text{抗滑系数 } K = \frac{\mu \alpha_s}{\ln(F_{ct}/F_{cl})} \geq 2,$$

式中: μ 为主缆与鞍座间的摩擦系数; α_s 为主缆在鞍座上的包角(弧度); F_{ct} 为主缆紧边拉力; F_{cl} 为主缆松边拉力。

泰州大桥包角 α_s 取0.836 5,摩擦系数 μ 的取值曾在设计过程中做过专项试验^[8],进行适当折减后最终取0.20。

对于 F_{ct} 和 F_{cl} 的取值,本应由中塔塔顶最大纵向位移的工况计算求得,比较工况2与工况4可以发现,仅集中力的加载位置不同,鞍座顶点(CP点)

的位移值分别为1.816 m和1.821 m,两者非常接近,所以也改用“单跨满布、跨中加力”的工况来求。

这样,加劲梁竖向挠跨比和中塔鞍座抗滑系数就被统一到工况2中求得。

6 结语

作为世界首座千米级3塔连跨悬索桥,泰州大桥具有开创性的历史意义。本文对用梁端竖向转角取代竖向挠跨比的争议作了澄清,指明了竖向挠跨比和中塔鞍座抗滑系数是2个控制设计的主要技术指标,并统一了它们的计算工况,为多塔悬索桥中塔刚度适宜性研究奠定了基础。

参考文献:

References:

- [1] 严国敏. 现代悬索桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 41.
YAN Guomin. Modern Suspension Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2002: 41.
- [2] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范 [S].
JTG D60—2004, General Code for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [3] TB10002.1—2005, 铁路桥涵设计基本规范 [S].
TB10002.1—2005, Fundamental Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S].
- [4] TB10621—2009 J971—2009, 高速铁路设计规范(试行) [S].
TB10621—2009 J971—2009, Code for Design of High Speed Railway (for Trial Implementation) [S].
- [5] 公路悬索桥设计规范(报批) [S].
Design Specification for Highway Suspension Bridge (Submit for Approval) [S].
- [6] JTJ 011—1994, 公路路线设计规范 [S].
JTJ 011—1994, Design Specification for Highway Alignment [S].
- [7] 韩大章, 华新. 泰州长江大桥的关键技术问题 [J]. 公路, 2008 (6): 54—58.
HAN Dazhang, HUA Xin. Key Technical Issues of Taizhou Yangtze River Bridge [J]. Highway, 2008 (6): 54—58.
- [8] 吉林, 陈策, 冯兆祥. 三塔悬索桥中塔主缆与鞍座间抗滑移试验研究 [J]. 公路, 2007 (6): 1—6.
JI Lin, CHEN Ce, FENG Zhaoxiang. A Study on Slip Resistance between Main Cable and Saddle on Middle Pylon of Three-tower Suspension Bridge [J]. Highway, 2007 (6): 1—6.