

DOI: 10.15886/j.cnki.hdxzbk.2024030101

CSTR: 32403.14.hndk.2024030101

热带海岛工程



引用格式:卓杰,曾加东,张志田.大跨度悬索桥钢桁架加劲梁等效刚度[J].海南大学学报(自然科学版中英文),2025,43(1):59-66.

Citation:ZHUO Jie, ZENG Jiadong, ZHANG Zhitian. Equivalent stiffness of the steel truss stiffening girder of the longspan suspension bridge[J]. Natural Science of Hainan University, 2025, 43(1): 59-66.

大跨度悬索桥钢桁架加劲梁等效刚度

卓杰,曾加东,张志田*

(海南大学土木建筑工程学院,海南海口 570228)

摘要:针对钢桁架加劲梁等效惯性矩计算问题,以某大跨度悬索桥为工程背景,建立不同桁架构件参数的空间有限元模型,利用悬臂静力有限元法将主梁位移进行反算得到桁架等效截面惯性矩,总结其变化规律。根据计算结果,针对主要影响参数引入了无量纲拟合公式进行拟合。结果表明:主弦杆构件不同参数对等效抗弯惯性矩的影响可归结为主弦杆截面面积参数的影响,表现为线性增加规律;但主弦杆构件不同参数改变对等效抗扭惯性矩的影响各不相同,并不能归结为截面积的影响。通过与不同参数下等效惯性矩的计算值的对比表明,无量纲拟合公式具有较好的精度,最大相对误差低于 5%,可用于钢桁架主梁惯性矩的快速计算。

关键词:悬索桥;钢桁梁;有限元分析;等效惯性矩;拟合公式

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

文章编号:1004-1729(2025)01-0059-08

Equivalent stiffness of the steel truss stiffening girder of the longspan suspension bridge

ZHUO Jie, ZENG Jiadong, ZHANG Zhitian*

(School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In the report, aimed at the equivalent stiffness calculation of the steel truss girders, based on a longspan suspension bridge, the spatial finite element models of the different truss parameters were established. The static finite-element analysis of the cantilever models was performed to calculate the displacement of main beam, the equivalent section moment of inertia of truss was obtained, and the variation trends were analyzed. Based on the calculation data, aimed at the major parameters, the dimensionless formula was performed for fitting. The results indicated that the effects of the different parameters of the major chord member on the equivalent bending resistance moments of inertia can be summed up as the effects of the section area parameters of the main chord, and which increased linearly. However, the effects of the changes of the different parameters of the major chord on the equivalent torsion resistance moments of inertia were different, which could not be summed up as the effects of the section area parameters. Under the different parameters, the values of the equivalent moments of inertia were compared. The results showed that the precision of the fitted dimensionless formula was satisfied, the largest error was less than 5%, which can be used for the calculation of the moments of inertia of truss.

收稿日期:2024-03-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938012);国家自然科学基金地区科学基金项目(52268073, 52068020)

作者简介:卓杰(1998—),男,海南万宁人,海南大学土木工程专业 2021 级硕士研究生,研究方向:桥梁抗风, E-mail: 21210814000037@hainanu.edu.cn

通信作者:张志田(1974—),男,湖南娄底人,博士,教授,研究方向:桥梁与结构风工程, E-mail: zhangzhitian@hainanu.edu.cn

Keywords: suspension bridge; steel truss girder; finite-element analysis; equivalent moment of inertia; fitting formula

0 引言

悬索桥指的是以通过索塔悬挂并锚固于两岸的缆索作为上部结构主要承重构件的桥梁。作为承受风载和其他横向水平力的主要构件,悬索桥加劲梁的常用形式主要有钢桁架梁以及钢箱梁两种形式。由于钢桁架加劲梁整体刚度大、抗风性能好,易布置双层交通,且架设方法多元化,因此在悬索桥设计中钢桁架加劲梁的形式被广泛采纳。例如主跨为 636 m 的贵州北盘江大桥^[1],主跨为 856 m 的湖南澧水大桥^[2],主跨为 1 176 m 的湖南矮寨大桥^[3],均为采用钢桁架加劲梁形式的悬索桥。

目前对钢桁架加劲梁悬索桥进行计算分析的主流方法为有限元方法,即根据钢桁架加劲梁悬索桥的设计建立三维空间有限元模型,对桥梁进行静动力分析,从而获得对应的结果。然而,钢桁架加劲梁悬索桥空间结构较为复杂,有限元模型建立工作量大,计算效率不高,因此有必要将桥梁的刚度计算根据一定的原则进行等效处理,对建模过程进行一定的简化,从而得到简单高效的有限元模型,其主要应用于抗风领域中。目前经常采用的简化方法为刚度等效^[4-5],即分别对原结构有限元模型和简化后有限元模型施加相同的荷载作用,若二者产生相同的响应,则认为二者的刚度相同。吴新元等^[6]分别采用“鱼骨式”等代梁以及板桁组合梁两种方式建立全桥有限元模型并对动力分析结果进行比较,验证了刚度等效方法的准确性。李春光等^[7]通过建立空间桁架加劲梁有限元模型,使用悬臂静力法反算桥梁位移从而得到主梁等效刚度,为桁架加劲梁气弹模型设计提供数据基础。张俊光等^[8]通过建立三维空间有限元模型对桥梁参数进行敏感性分析,研究各参数对桥梁内力以及线形的影响,从而为桥梁施工控制提供参考。彭旺虎等^[9]指出在大跨悬索桥中扭转荷载中会有更大比例由钢桁架加劲梁来承受。滕小竹^[10]基于拟腹板思想提出一种空间桁架等效弯曲刚度简化计算公式,并结合实例,证明其公式的准确性。当不考虑平联对全桥弯曲刚度的影响时公式计算值与有限元计算值较为符合;当考虑平联的影响时,二者则存在较大的差异。于永帅^[11]基于有限元动力分析的过程,提出一种通过对比在钢桁梁有限元模型上附加扭转质量惯性矩前后动力特性的变化,从而反算钢桁梁自身的扭转质量惯性矩的方法。在此基础上,华旭刚等^[12]对该方法继续深入研究,给出了该方法的理论说明,并结合实例验证了该方法的有效性。但该方法只适用于长细比较大的桥梁,并要求结构的质量矩沿梁跨均匀分布且沿梁跨方向在各节段施加的附加质量矩大小相同。陈常松等^[13]运用曲线拟合方法,确定平联刚度修正系数、单梁惯性矩修正系数以及剪切刚度修正系数,并拟合成公式,结合实例验证了该方法的精确性,能够提高有限元模型分析计算效率。祝卫亮等^[14]以基频相等为原则,推导出桁架加劲梁对应等截面欧拉梁的等效惯性矩计算公式,并结合实例,验证其方法的准确性。该方法在提高计算效率的同时,提供了等效质量以及质量惯性矩等静力方法无法提供的信息;但由于桁架加劲梁剪切效应明显,与欧拉梁的纯弯特性存在差异,因而需选择较长的梁长来减少剪切效应。Ma 等^[15]提出一种基于铰缝分析的矩形空心截面桁架抗弯刚度计算方法,考虑了节点变形对桁架挠度的影响,并通过桁架试验以及有限元计算验证了该方法的有效性。梁弢等^[16]基于空腹桁架梁内力分布规律,提出一种双竖腹杆空腹桁架梁结构形式,该结构能有效降低竖腹杆的剪力和杆端弯矩,解决了传统空腹桁架的设计困难,并推导了结构等效惯性矩和等效剪切刚度计算公式,通过有限元方法验证了计算方法的准确性。陈顺云等^[17]以虚功原理为基础,推导了空腹桁架等效惯性矩和等效剪切刚度的计算公式,通过等代实腹梁刚度法验证有限元模型精度。

本文以主跨为 1 150 m 的某大跨度悬索桥为工程背景,利用有限元软件 ANSYS 建立空间桁架主梁的有限元模型,利用悬臂静力有限元法将主梁位移进行反算得到桁架主梁的等效截面惯性矩,研究不同结构参数对桁架主梁等效截面惯性矩计算的影响,在此基础上提出悬索桥桁架惯性矩简化计算的拟合公式。

1 材料与方 法

1.1 工程背景 某大跨度悬索桥为单跨钢桁加劲梁悬索桥,全桥总长 1 424 m,加劲梁水平长度为 1 150 m,跨中桥面距谷底高度约为 334 m,主桥桥宽 28.5 m,梁高 9.5 m,加劲梁两端桁架节间距为 13.4 m,其他桁

架节间距为 10.8 m,主缆垂跨比 1:10。桁架加劲梁设计断面如图 1 所示,悬索桥的桥型布置如图 2 所示。

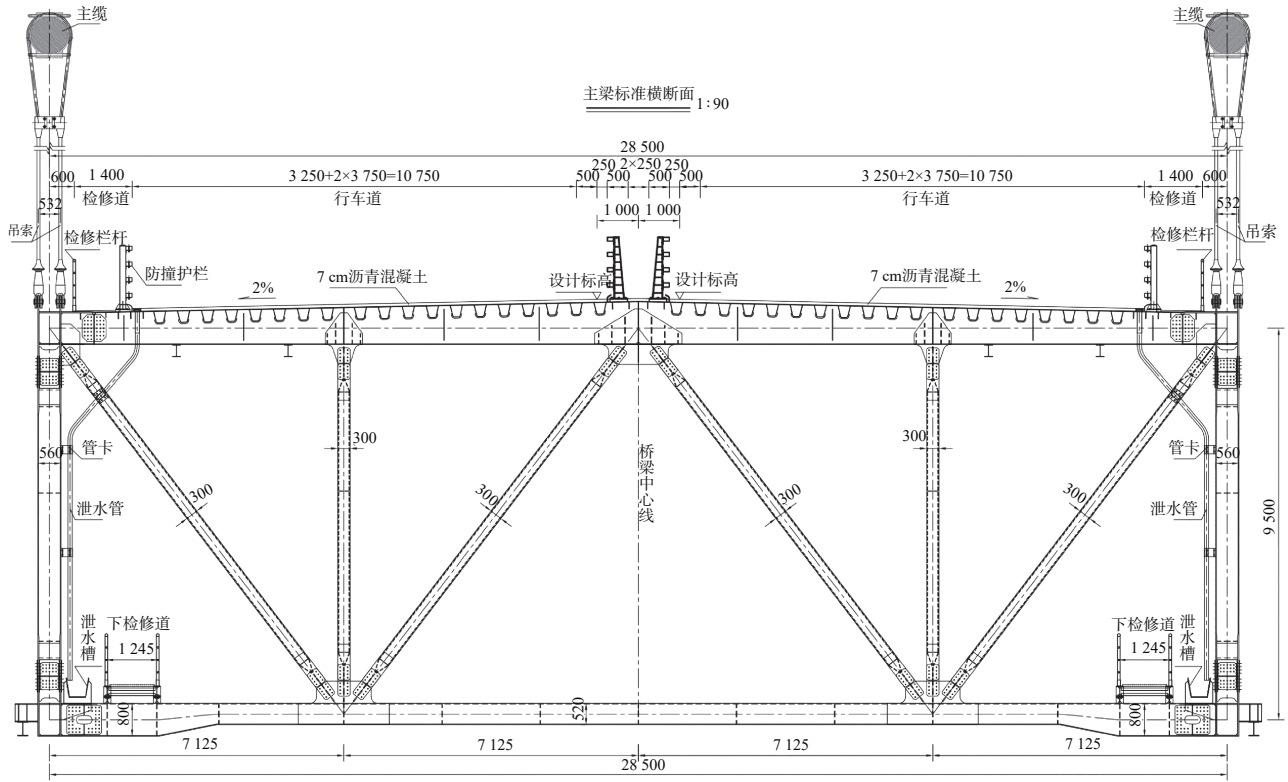


图 1 悬索桥加劲梁设计断面图(单位:mm)

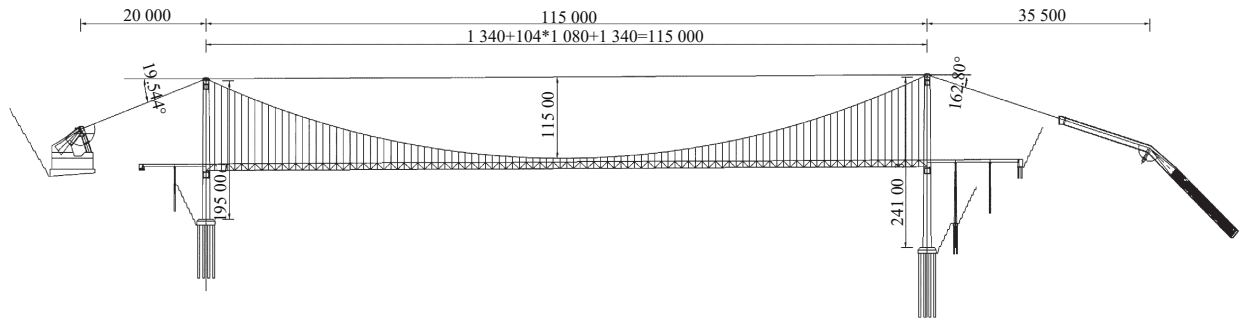


图 2 悬索桥桥型布置图(单位:cm)

1.2 空间桁架主梁有限元模型 采用 Beam188 梁单元建立钢桁架加劲梁主梁的有限元模型,其自由端有限元模型如图 3 所示。将约束端 12 个节点均进行固结,限制其各方向的位移。同时,通过在悬臂端 4 个弦杆节点上施加集中力或弯矩,分析其竖向受弯、横向受弯及受扭情况。

1.3 悬臂静力有限元法 为获得桁架主梁的等效截面惯性矩,可建立一定长度桁架主梁有限元模型,使用悬臂静力有限元法,一端施加固结约束,另一端则施加集中荷载,通过有限元程序计算得到位移响应,与集中荷载作用于自由端的悬臂梁的位移响应计算公式做对比,反算出等效抗弯惯性矩与等效抗扭惯性矩。位移响应计算公式如下:

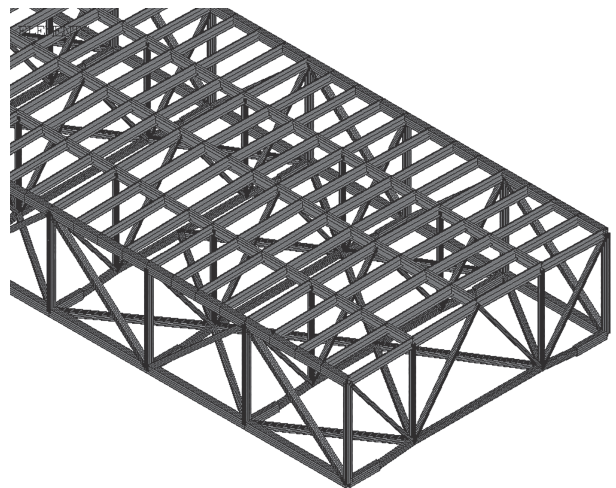


图 3 空间桁架主梁自由端有限元模型

$$I_x = \frac{pl^3}{3E_x} \quad (1)$$

$$I_y = \frac{pl^3}{3E_y} \quad (2)$$

$$I_t = \frac{M_e l}{G\phi} \quad (3)$$

式中 I_x 为等效竖向抗弯惯性矩, I_y 为等效横向抗弯惯性矩, I_t 为等效抗扭惯性矩, E 为弹性模量, G 为切变模量, x 为截面竖向位移, y 为截面横向位移, ϕ 为截面转角, p 为杆端集中力, M_e 为杆端弯矩, l 为桁架主梁长度。

其中要注意的是,在梁端施加弯矩的情况下,主梁的剪切变形会对位移响应造成一定的影响。由于主梁截面左右对称,其扭心一定位于竖对称轴上,因此选择自由端弦杆节点位移的算术平均值来计算等效抗扭惯性矩。

2 结果与分析

2.1 结构参数与等效刚度关系

2.1.1 榑数量 保持桁架各构件的长度及截面参数不变,通过改变榑的数量改变桁架的计算长度,求出等效的截面惯性矩,计算结果如图4所示。可以发现,竖向抗弯惯性矩最初突然增大,变化幅度在榑数达到40个即模型长度为400m左右时趋于平缓;横向抗弯惯性矩逐渐增大,增大速率缓慢降低,变化幅度在榑数达到100个即模型长度为1000m左右时趋于平缓;抗扭惯性矩逐渐减小,减小速率缓慢降低,变化幅度在榑数达到60个即模型长度为600m左右时趋于平缓。其中,横向抗弯惯性矩的整体变化幅度最大,抗扭惯性矩次之,竖向抗弯惯性矩最次。

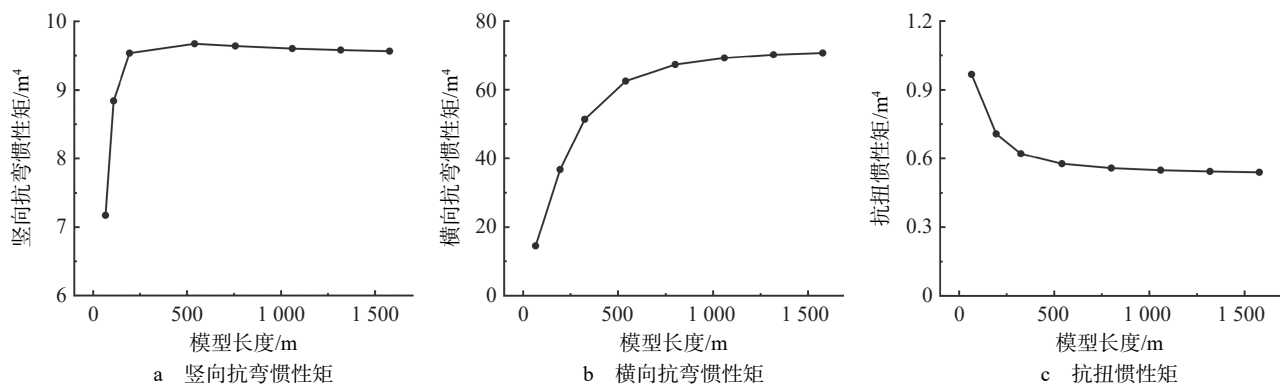


图4 榑数(榑距不变)与等效刚度

2.1.2 榑间距 保持桁架各构件的长度及截面参数不变,通过改变榑的间距改变桁架的计算长度,求出等效的截面惯性矩,计算结果如图5所示。可以发现,抗弯惯性矩皆逐渐增大,增大速率缓慢降低,最后出现收敛趋势;抗扭惯性矩逐渐减小,减小速率缓慢降低,最后无收敛趋势。其中,抗扭惯性矩的整体变化幅度最大,横向抗弯惯性矩次之,竖向抗弯惯性矩最次。

2.1.3 弦杆面积 保持桁架腹杆与横梁的长度及截面参数不变,且保持弦杆长度不变,分别通过仅改变弦杆厚度、仅改变弦杆高度、仅改变弦杆宽度、同时改变弦杆高度与宽度而改变弦杆面积,求出等效的截面惯性矩,计算结果如图6所示。可以发现,通过4种改变方式改变的弦杆面积与抗弯惯性矩基本一致且呈正向线性关系;与抗扭惯性矩的关系则存在一定差异,虽大致趋势皆为随着弦杆面积的增大而增大,但增大速率则存在较大差距,其中最大为同时改变弦杆高宽,其次为改变弦杆宽度,再次为改变弦杆高度,最次为改变弦杆厚度。

2.1.4 侧竖腹杆面积 保持桁架弦杆、侧斜腹杆、下平联杆、横梁的长度及截面参数不变,通过改变侧竖腹杆尺寸而改变侧竖腹杆面积,求出等效的截面惯性矩,计算结果如图7所示。可以发现,抗弯惯性矩的整体变化幅度接近于零;抗扭惯性矩则随着侧竖腹杆面积的增加而呈非线性增长关系。

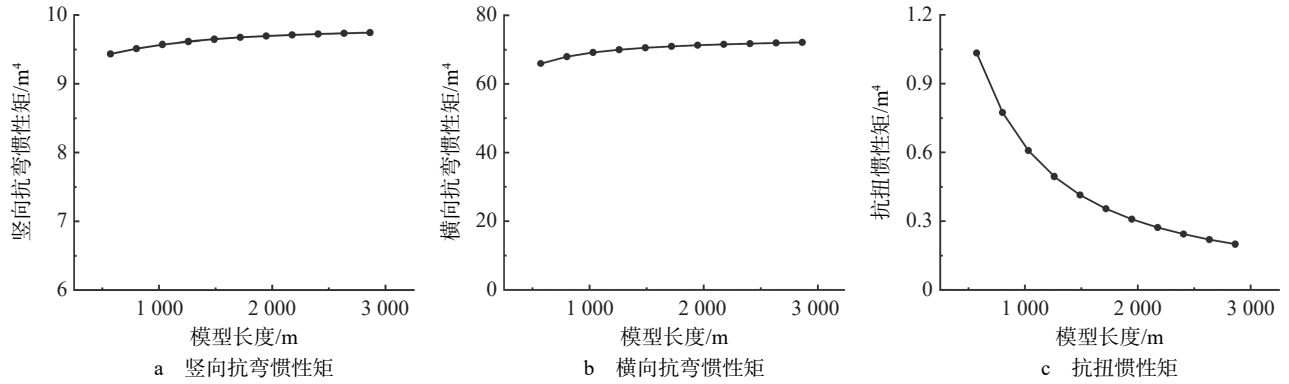


图 5 楣距(楣数不变)与等效刚度

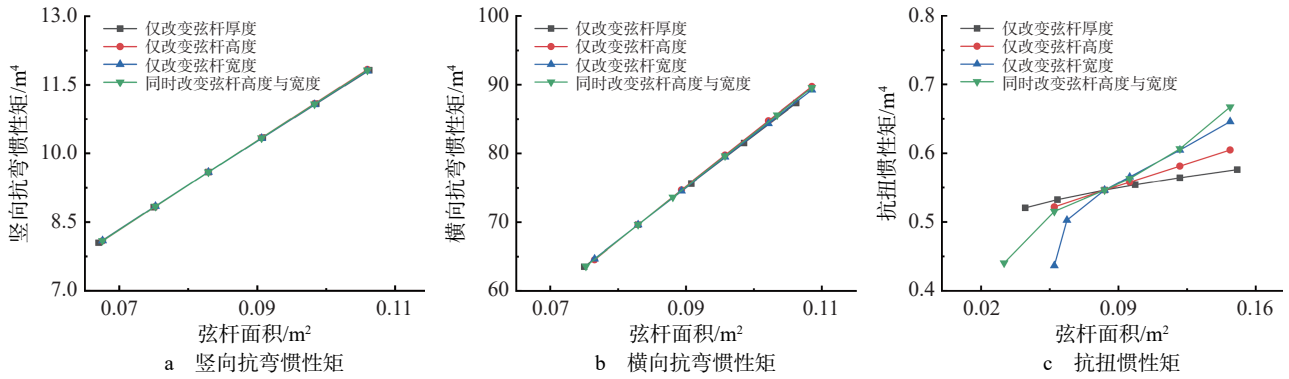


图 6 弦杆面积与等效刚度

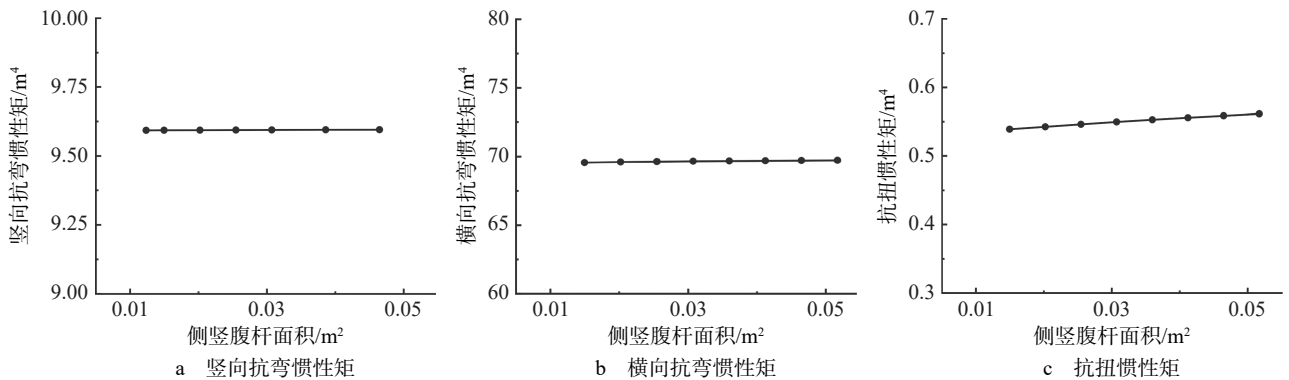


图 7 侧竖腹杆面积与等效刚度

2.1.5 侧斜腹杆面积 保持桁架弦杆、侧竖腹杆、下平联杆、横梁的长度及截面参数不变,通过改变侧斜腹杆尺寸而改变侧斜腹杆面积,求出等效的截面惯性矩,计算结果如图 8 所示。可以发现,竖向抗弯惯性矩的整体变化幅度接近于零;横向抗弯惯性矩与抗扭惯性矩皆随着侧斜腹杆面积的增加而呈非线性增长关系。其中,抗扭惯性矩的整体变化幅度最大,横向抗弯惯性矩次之。

2.1.6 下平联杆面积 保持桁架弦杆、侧竖腹杆、侧斜腹杆、横梁的长度及截面参数不变,通过改变下平联杆尺寸而改变下平联杆面积,求出等效的截面惯性矩,计算结果如图 9 所示。可以发现,抗弯惯性矩与抗扭惯性矩皆随着下平联杆面积的增加而呈非线性增长关系。其中,抗扭惯性矩的整体变化幅度最大,竖向抗弯惯性矩次之,横向抗弯惯性矩最次。

2.1.7 下横梁中段面积 保持桁架弦杆、腹杆与下横梁边段的长度及截面参数不变,通过改变下横梁中段尺寸而改变下横梁中段面积,求出等效的截面惯性矩,计算结果如图 10 所示。可以发现,横向抗弯惯性矩的整体变化幅度接近于零;竖向抗弯惯性矩与抗扭惯性矩皆随着下横梁中段面积的增加而呈非线性增长关系。其中,抗扭惯性矩的整体变化幅度最大,竖向抗弯惯性矩次之。

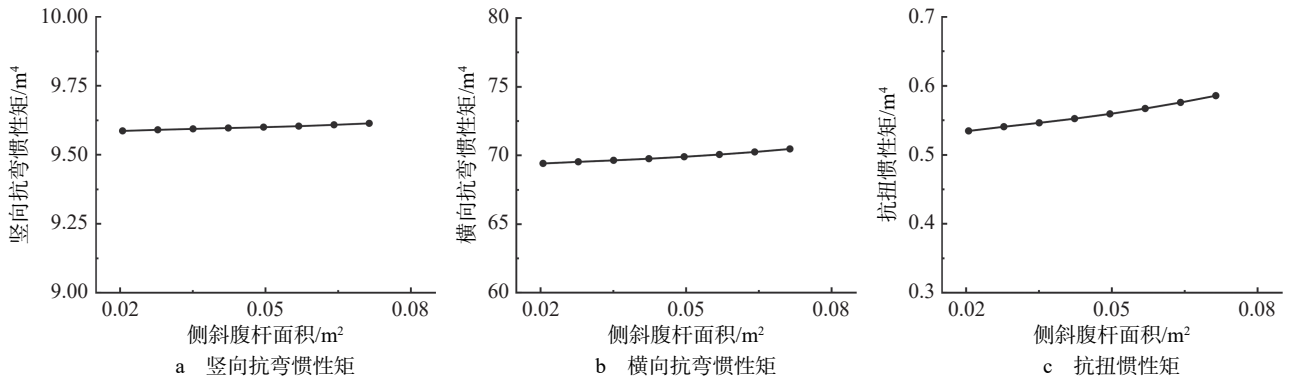


图8 侧斜腹杆面积与等效刚度

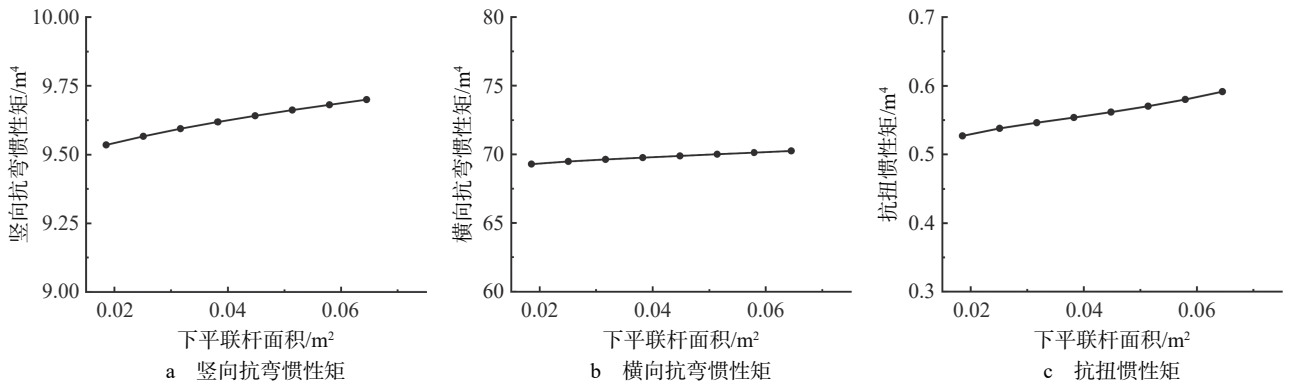


图9 下平联杆面积与等效刚度

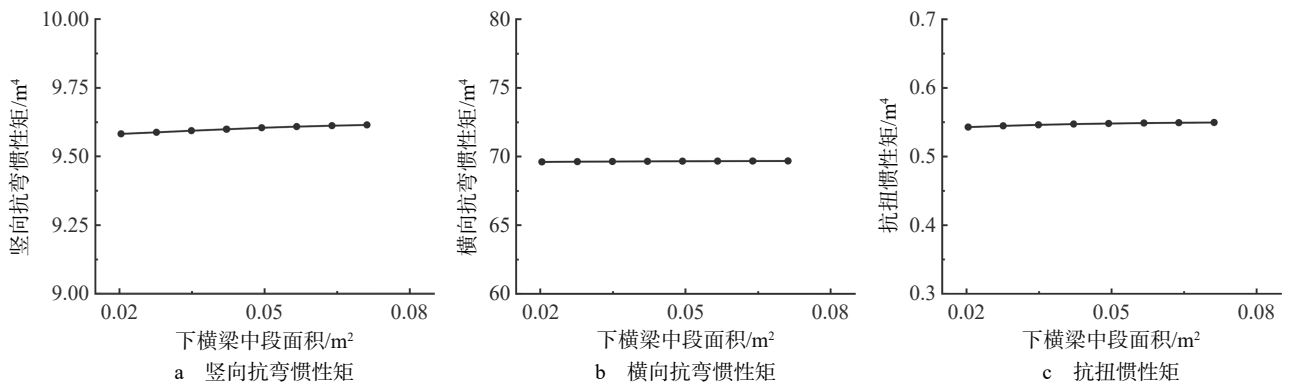


图10 下横梁中段面积与等效刚度

2.1.8 下横梁边段面积 保持桁架弦杆、腹杆与下横梁中段的长度及截面参数不变,通过改变下横梁边段尺寸而改变下横梁边段面积,求出等效的截面惯性矩,计算结果如图11所示。可以发现,横向抗弯惯

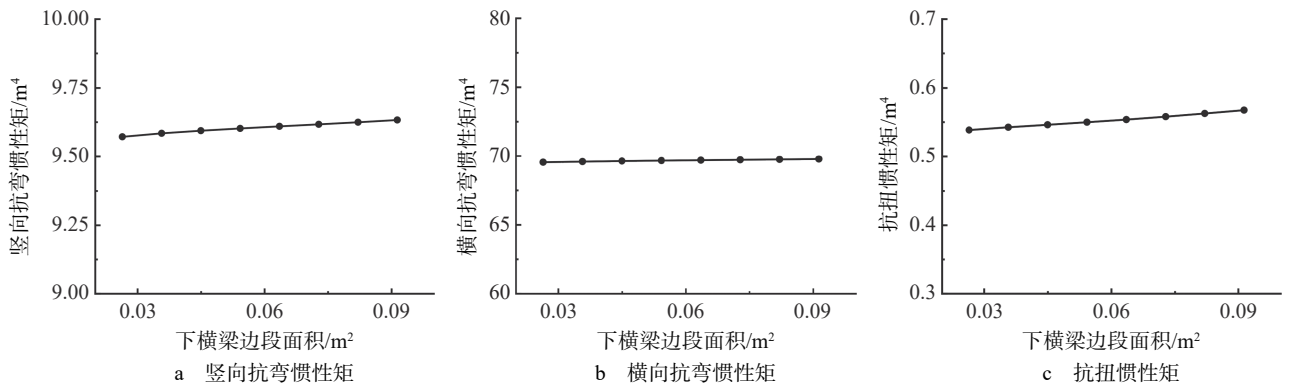


图11 下横梁边段面积与等效刚度

性矩的整体变化幅度接近于零; 竖向抗弯惯性矩与抗扭惯性矩皆随着下横梁边段面积的增加而呈非线性增长关系。其中, 抗扭惯性矩的整体变化幅度最大, 竖向抗弯惯性矩次之。

2.2 桁架等效惯性矩拟合 根据前面分析, 对各影响因素对计算等效惯性矩的影响归纳如下: 1) 榫数不宜少于 40, 否则会得到不稳定的截面惯性矩特性; 2) 榫间距的改变对等效抗弯惯性矩的影响收敛, 对等效抗扭惯性矩的影响不收敛; 3) 各惯性矩与主桁弦杆的总面积基本呈线性关系; 4) 随竖腹杆、斜腹杆、平联杆面积的增加而呈非线性增长关系; 5) 随下横梁截面积的增加而呈非线性增长关系。

综合上述变化特征, 可设桁架的等效竖向抗弯惯性矩为:

$$I_x = A_c h^2 \cdot f_{wx}(\gamma_w) \cdot f_{cx}(\gamma_c) \quad (4)$$

式中 A_c 为弦杆总截面积, h 为桁架上下弦杆形心的垂直间距, f_{wx} 、 f_{cx} 为待拟合的无量纲公式, γ_w 为腹杆综合体积系数, 指单位长度钢桁架中竖腹杆、斜腹杆、平联杆的体积之和与弦杆体积的比值, γ_c 为横梁综合体积系数, 指单位长度钢桁架中横梁体积与弦杆体积的比值。

桁架的等效横向抗弯惯性矩为:

$$I_y = A_c b^2 \cdot f_{wy}(\gamma_w) \cdot f_{cy}(\gamma_c) \quad (5)$$

式中 b 为桁架左右弦杆形心的水平间距, f_{wy} 、 f_{cy} 为待拟合公式, 其他符号同前。

桁架的等效抗扭惯性矩为:

$$I_t = A_c b h \cdot f_{wt}(\gamma_w) \cdot f_{ct}(\gamma_c) \quad (6)$$

式中 f_{wt} 、 f_{ct} 为待拟合公式, 其他符号同前。

拟合公式的基本形式如下:

$$f(\gamma) = b_1 \gamma + b_0 \quad (7)$$

根据以上计算值, 经拟合可得 6 个拟合函数具体数学形式如下:

$$f_{wx}(\gamma_w) = 0.003\gamma_w + 0.564 \quad (8)$$

$$f_{cx}(\gamma_c) = 0.009\gamma_c + 0.564 \quad (9)$$

$$f_{wy}(\gamma_w) = 0.016\gamma_w + 0.498 \quad (10)$$

$$f_{cy}(\gamma_c) = 0.003\gamma_c + 0.508 \quad (11)$$

$$f_{wt}(\gamma_w) = 0.018\gamma_w + 0.066 \quad (12)$$

$$f_{ct}(\gamma_c) = 0.006\gamma_c + 0.076 \quad (13)$$

将拟合函数代入回等效惯性矩公式中进行计算, 将其结果与有限元计算值进行比较, 结果对比如图 12 所示。通过比较 2 种方法计算的数值, 发现竖向抗弯惯性矩以及横向抗弯惯性矩的数值误差都在 2% 以

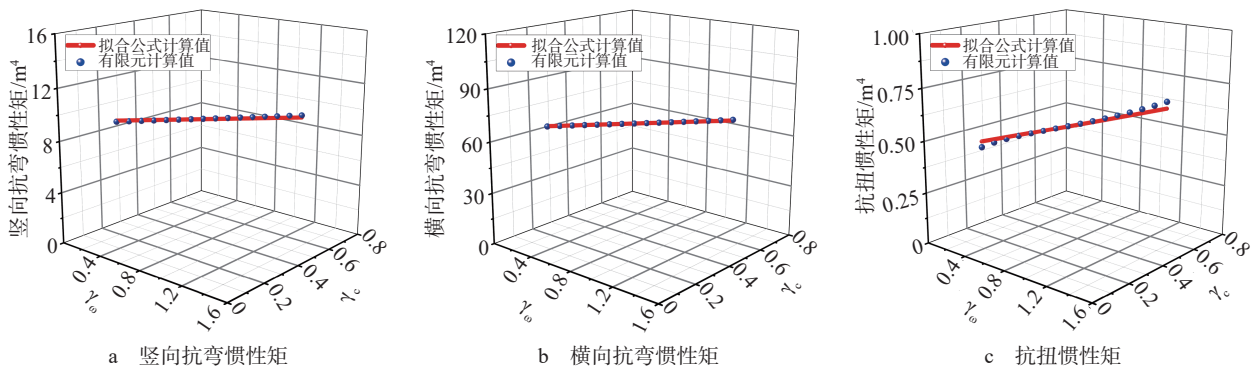


图 12 拟合公式与计算值比较

内;而抗扭惯性矩的数值误差都在5%以内。可知采用拟合公式计算空间桁架的等效惯性矩是可行的,而且具有较好的精度。

3 结 论

本文通过静力有限元法,研究不同结构参数对悬索桥钢桁架主梁等效惯性矩的影响,基于计算结果对主梁等效惯性矩进行公式拟合并对拟合精度进行了验证。基于本文研究结果可得到以下主要结论:

(1)当计算榫数达到一定数量时,计算得到的主梁等效抗弯以及抗扭惯性矩保持一个稳定的水平不再增加,建议计算榫数不宜低于40;而增加榫距对等效抗弯惯性矩计算值的影响不大,但会使得主梁等效抗扭惯性矩的计算值降低。

(2)4种改变弦杆面积的方式对主梁等效抗弯惯性矩计算值的影响基本相同;但4种方式对等效抗扭惯性矩的影响各不相同,其中同时改变弦杆高宽的变化率最为迅速,其次为仅改变弦杆高度,再次为仅改变弦杆宽度,最后为仅改变弦杆厚度。

(3)基于变参数分析结果,采用无量纲拟合公式的方法,通过回归分析得到不同结构参数下等效惯性矩的经验计算公式,与计算结果的对比表明拟合公式的最大误差低于5%,可用于大跨度悬索桥钢桁架加劲梁刚度的快速计算。本文提出的等效惯性矩经验计算公式适用于使用钢桁架作为加劲梁的桥型。

参考文献:

- [1] 余远程,曹洪武,杨鸿波.北盘江大桥总体设计[J].公路,2009,54(7):218-224.
- [2] 程丽娟,李瑜,朱朝银.澧水大跨度悬索桥结构设计及受力分析[J].公路工程,2011,36(2):111-114,119.
- [3] 陈政清,张志田,廖建宏.矮寨大桥悬索桥抗风设计研究[C]//第十八届全国桥梁学术会议论文集(下册).天津:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会,2008:734-742.
- [4] 贺拥军,周绪红,董石麟.交叉立体桁架系巨型网格结构的简化计算法[J].湖南大学学报(自然科学版),2006,33(2):14-17.
- [5] 胡峰强.山区风特性参数及钢桁架悬索桥颤振稳定性研究[D].上海:同济大学,2006.
- [6] 吴新元,马如进,陈艾荣,等.加劲桁架悬索桥的主梁挠曲扭转刚度分析[J].上海公路,2005(4):27-30.
- [7] 李春光,陈政清,张志田.大跨度桁式加劲梁悬索桥气弹模型等效设计[J].振动与冲击,2009,28(9):171-174,187.
- [8] 张俊光,刘永健,姚晓荣,等.刚性悬索加劲钢桁梁桥结构参数敏感性分析[J].郑州大学学报(工学版),2010,31(5):55-59.
- [9] 彭旺虎,邵旭东,胡建华,等.大跨度悬索桥钢桁加劲梁的选型研究[C]//2006钢桥科技论坛全国学术会议论文集.北京:《北京交通大学学报》编辑部,2006:106-110.
- [10] 滕小竹.大跨度钢桁梁悬索桥关键问题研究[D].上海:同济大学,2008.
- [11] 于永帅.钢桁架悬索桥抖振响应及其影响参数分析[D].长沙:湖南大学,2011.
- [12] 华旭刚,杨坤,温青,等.悬索桥钢桁梁断面质量惯性矩简化计算方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(3):1-7.
- [13] 陈常松,刘灿,董道福.钢桁梁公路斜拉桥主梁刚度等效研究[J].中外公路,2015,35(5):163-166.
- [14] 祝卫亮,葛耀君.悬索桥桁架加劲梁动力等效成等截面欧拉梁方法[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):17-24.
- [15] MA Y P, LIU Y J, MA T Y, et al. Flexural stiffness of rectangular hollow section (RHS) trusses[J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112336.
- [16] 梁玟,沈睿麟,肖建春,等.新型双竖腹杆空腹桁架梁及其等代刚度法研究[J/OL].建筑结构,2023:1-6[2024-05-06]. DOI:10.19701/j.jzjg.LS220332.
- [17] 陈顺云,肖建春,沈睿麟,等.基于响应面法的钢空腹桁架结构优化设计[J].建筑科学与工程学报,2024,41(5):33-41.

(责任编辑:陈俊)