

空间主缆悬索桥结构行为影响因素分析

朱宁宁

(山东省水利工程局有限公司, 山东 济南 250013)

【摘要】针对空间主缆悬索桥的主要结构构件,建立了55个不同主缆横向张开量和竖向垂跨比悬索桥的数值模型。利用数值计算方法,考虑几何非线性,分析了空间主缆悬索桥主缆内力、竖向刚度、横向刚度和扭转刚度对横向张开量和竖向垂跨比的结构行为影响因素。结果表明:存在一个虚拟的横向跨度数值,利用这个数值和基准状态可以精度很高的估算任意横向张开量下的主缆内力;存在一个等竖向刚度张开量使得不同竖向垂度的空间主缆悬索桥的竖向刚度相等;存在一个等扭住的横向张开量使得不同竖向垂度的空间主缆悬索桥扭转刚度相同。

【关键词】桥梁工程;空间主缆;竖向刚度;横向刚度;扭转刚度

【中图分类号】U448.25

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-09-0046-04

Analysis of Influencing Factors on Structural Behavior of Suspension Bridges with Spatial Main Cables

ZHU Ningning

(Water Resources Engineering Bureau Co., LTD., of Shandong Province, Jinan, Shandong 250013, China)

Abstract: Based on the primary structural components of suspension bridges with spatial main cables, 55 numerical models of suspension bridges with different lateral spread values of main cables and different vertical sag-span ratios are established in this paper. Adopting numerical calculation methods and considering geometric nonlinearity, the influencing factors of structural behavior, including main cable internal force, vertical stiffness, lateral stiffness and torsional stiffness, are analyzed with respect to the lateral spread and vertical sag-span ratio of suspension bridges with spatial main cables. The results indicate: there exists a virtual lateral span value, which can be used to estimate the main cable internal force under arbitrary lateral spread with high precision together with the reference state; second, there is a lateral spread for equal vertical stiffness, at which suspension bridges with spatial main cables of different vertical sags share identical vertical stiffness; third, there exists a lateral spread for equal torsional stiffness, at which suspension bridges with spatial main cables of different vertical sags have the same torsional stiffness.

Key words: Bridge engineering; Spatial main cable; Vertical stiffness; Lateral stiffness; Torsional stiffness

随着景观桥、人行桥追求结构新颖别致,营造更新奇景观效果的需求,有些人行悬索桥把主缆横向张开而做成空间主缆悬索桥,如张家界大峡谷人行桥^[1]等。以主缆和吊杆位于同一竖平面的悬索桥为基准,通常称主缆索鞍相互靠近,吊杆相向倾斜的空间主缆为内收敛式;相反主缆索鞍相互远离,吊杆相背倾斜的空间主缆称为外展式。

目前已经有多种算法解决空间主缆的找形问题^[2-3]。这些方法虽然在速度上和精度上各有优劣,基本上能找到一个平衡态来满足工程上的需

要。针对空间主缆特性的分析多集中在抗风缆和动力特性分析上^[4],通过建立55个空间主缆悬索桥的数值模型,探讨横向垂度对主缆内力、横向刚度、竖向刚度和扭转刚度的影响,旨在找到一些定性的规律。

1 针对结构构件的研究和分析方法

构建一座人行悬索桥模型作为研究对象,其

收稿日期:2026-04-15

作者简介:朱宁宁(1980—),男,高级工程师

基本结构参数见表 1。

表 1 悬索桥关键结构数据

参数	取值	参数	取值
跨径/m	300	垂跨比	1/9~1/13
加劲梁延米重/ (kN·m ⁻¹)	25.414	吊杆总数	29(间距 10 m)
主缆面积/m ²	0.011 16	主缆换算密度/ (kN·m ⁻³)	128.9
主缆弹性模量/kPa	2.1×10 ¹¹	吊杆面积/m ²	0.000 676

主要分为 5 种常见的竖向垂跨比 1/9、1/10、1/11、1/12 和 1/13,假定主缆跨中与桥面的垂直距离为 1.66 m。普通主缆、吊杆全部位于竖平面的悬索桥可以看作是空间主缆悬索桥的特例,即横向垂跨比为零,作为基准状态,在此基础上横向移动 4 个桥塔位置,以模拟索鞍的横向张开量。文章共考虑了 10 种不同的横向张开量(H_f),如图 1 所示。两桥塔相对基准状态的横向张开量分别为:90 m、75 m、60 m、45 m、30 m、15 m、7.5 m、0 m(基准状态)、-7.5 m、-15 m、-30 m。正值表示外展,负值表示内敛。实际中会出现主缆交叉引起的碰撞,这一问题可以通过微调竖向垂跨比解决,这里不予考虑,仅作理论分析。

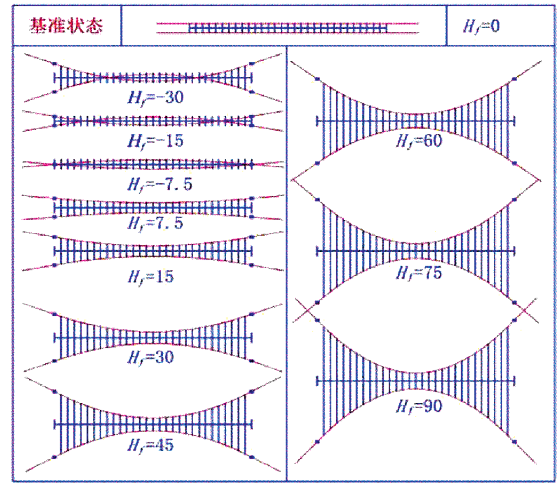


图 1 不同横向张开量对应的模型(主塔位置)

2 横向张开量对主缆内力的影响

不同横向张开量下主缆内力和主缆内力差值变化如图 2、图 3 所示。

从图 2 中可以看出:1)横向张开量为零时主缆内力最小。2)内敛和外展都会导致主缆内力增加,且增加速度相当。内敛和外展量越大,主缆内

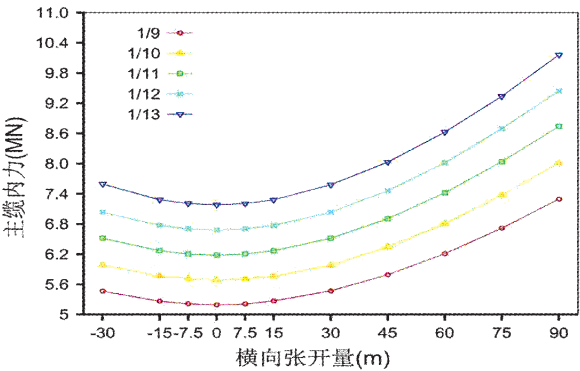


图 2 主缆内力随横向张开量的变化

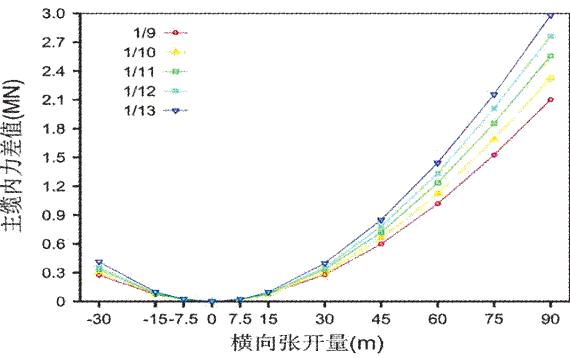


图 3 主缆内力差值随横向张开量的变化

力越敏感。3)由于不同竖向垂跨比对应的曲线间距相等可知,主缆内力随竖向垂度成线性变化。

从图 3 中可以看出:1) 竖向垂跨比越小,随着张开量的增加主缆内力增长越快。2) 张开和内敛引起的主缆的内力变化关于零张开量对称。

通过观察不难发现,主缆力的变化有点类似二次抛物线的形状,可以从三分力的角度进行拟合。虽然恒载作用下主缆线形是介于抛物线和悬链线之间的线形,但是吊杆把主缆分割成很多段,在塔顶索鞍附近可以近似为一条直线,直线的投影延长线会和加劲梁相交于一点。根据图 3 的变化规律猜测对应不同的外展式主缆,这个交点的位置变化不大。但内敛式主缆不会存在这个交点,可以统一假定存在一个横向跨度 H_l ,用来作为拟合主缆力变化的二次抛物线的一个常量。即存在一个 H_l 使得对于任意的竖向垂度和张开量下式恒成立。

$$T_{Hf}=T_0\sqrt{H_f^2+H_l^2}/H_l$$

其中: T_{Hf} 为横向张开量 H_f 对应主缆内力, T_0 为横向张开量 0 对应的主缆内力, H_l 为横向跨度, H_f 为横向张开量。

经过多次试算,发现此桥当取横向跨度 H_l

为 90 m 时,以零张开量的主缆内力计算任意张开量的主缆内力都基本吻合,如图 4 所示。

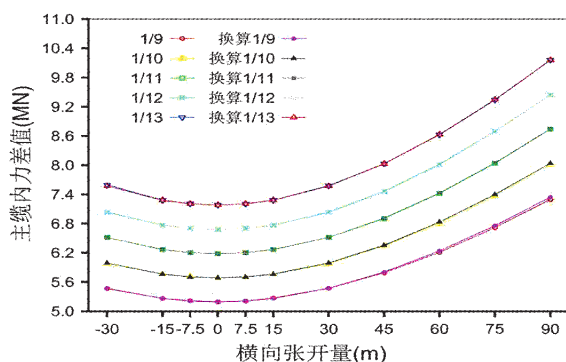


图 4 利用横向跨度换算主缆力

3 竖向刚度的影响因素分析

在找形完成的恒载平衡态上,分别在跨中和 1/4 跨作用 500 kN 竖向荷载,以竖向挠度作为竖向刚度指标进行对比,如图 5、图 6 所示。

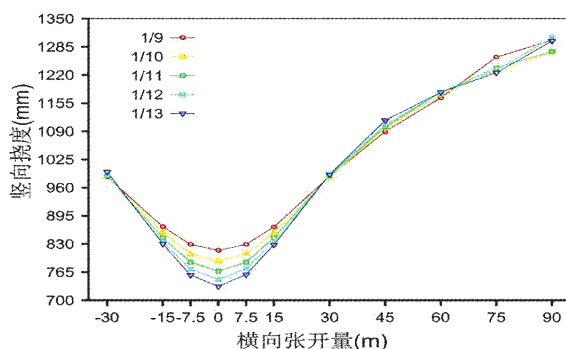


图 5 1/4 跨竖向挠度和横向垂度的关系

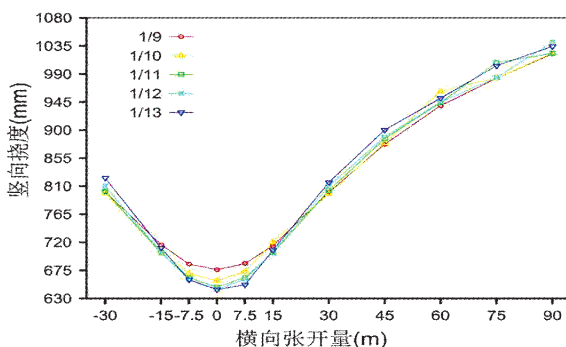


图 6 跨中竖向挠度和横向垂度的关系

从图 5、图 6 中可以看出:1)横向张开量为零时,竖向刚度最大。2)主缆的内敛和外展都会引起竖向刚度的损失。3)主缆的内敛和外展都存在一个点,使得不同竖向垂跨比的竖向刚度相同,可称为等竖向刚度张开量。4)等竖向刚度张开

量以内,竖向垂跨比越小,竖向刚度越大。5)等竖向刚度张开量以外,竖向垂跨比约小,竖向刚度越小。6)刚度变化规律关于横向张开量为零对称。

4 横向刚度的影响因素分析

在找形完成的恒载平衡态上,分别在跨中和 1/4 跨作用 100 kN 横向荷载。计算其引起的横向变形,如图 7、图 8 所示。

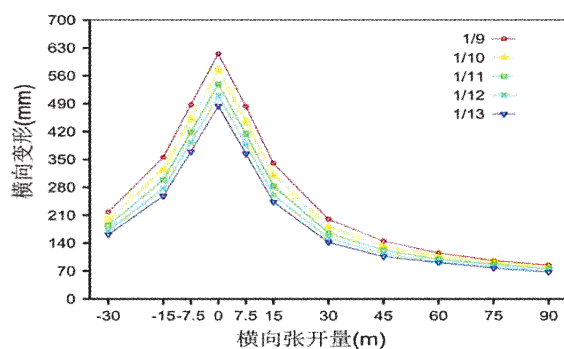


图 7 1/4 跨横向变形随横向张开量的变化

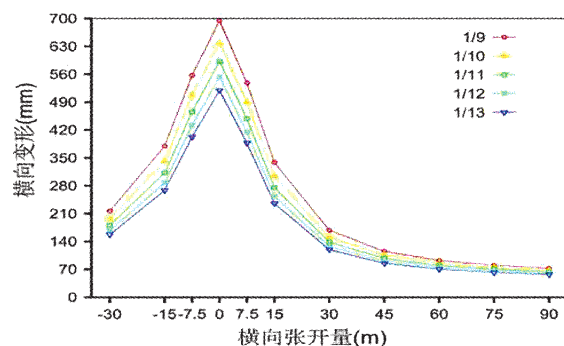


图 8 跨中横向变形随横向张开量的变化

从图 7、图 8 中可以看出:1) 竖向垂跨比越小,横向刚度越小。2)随着横向张开量的增加,横向刚度差变小。3)当横向张开量达到跨度 1/10 (30 m)时,横向变形是原来的 1/9。在此范围内横向张开量可以显著提高横向刚度,但是在此范围之外变得不明显。4)横向刚度的变化规律关于横向张开量为零对称。

5 扭转刚度的影响因素分析

在找形完成的恒载平衡态上,跨中的单侧吊杆下节点增加一个 100 kN 竖向力,计算其引起的竖向变形差值作为扭转刚度的指标进行评价,如图 9 所示。

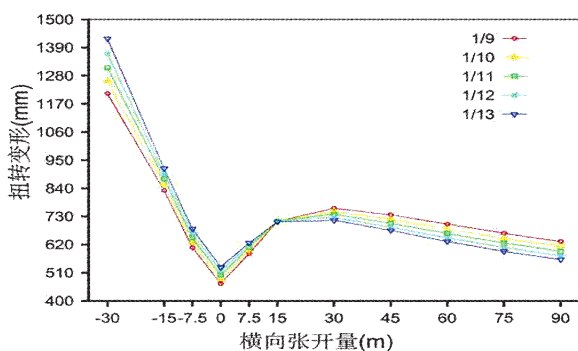


图9 扭转变形随横向张开量的变化

从图9中可以看出:1)没有横向张开量的时候,扭转变形是最小的。且竖向垂跨比约大扭转刚度越大。2)主缆的内敛和外展都会引起竖向刚度的损失。外展到一定数值后,扭转刚度会增加。3)存在一个横向张开量,不论竖向垂度如何,抗扭刚度相同,不妨称等扭转刚度张开量。

6 结 语

此文通过对不同竖向垂跨比和横向张开量的55个空间主缆悬索桥的分析,总结了主缆张

力、竖向刚度、横向刚度、扭转刚度对横向张开量的影响规律。1)存在一个虚拟的横向跨度,可以用来结合基准状态,推断任意横向张开量的主缆内力;2)存在一个等竖向刚度的横向张开量,在这一横向张开量下结构的竖向刚度和竖向垂度无关;3)存在一个等扭转刚度横向张开量,在这一横向张开量下,结构的扭转刚度和竖向垂跨比无关;4)扭转刚度是随着横向张开量先变大,后减小,后增加的,张开量为零时最大。

参考文献

- [1] 王忠彬.张家界大峡谷玻璃桥缆索系统设计[J].桥梁建设, 2017,47(3):83-87.
- [2] 敬超,郑久建,丁松.空间索面悬索桥主缆线形计算理论探讨[J].中外公路,2017 37(4):135-138.
- [3] 郑久建,丁松,周洪彬,等.空间索面悬索桥成桥线形的Marquardt修正最小二乘法计算[J].北京交通大学学报, 2016,40(1):26-30.
- [4] 刘玉辉,沈子烨,冯康平.空间缆索体系悬索桥动力特性分析[J].北方交通,2018(3):12-15.

(责任编辑 崔春梅)

(上接第45页)C9(项目解决缺水问题)、C10(项目改善暴雨对校区的影响)、C2(施工过程按图施工)和C12(促进社区双碳目标实现)是综合影响程度最大的5个影响因素。这5个影响因素分别属于技术方面、经济方面和社会效益方面,结果表明这三方面因素的影响程度相对于风险因素更高。从技术方面的5个影响指标来看,设计方案图纸质量是影响项目可行性的关键,选择设计实力雄厚、海绵城市项目建设经验丰富的设计单位是项目成功实施的重要保障。在经济方面,能否解决缺水问题比海绵设施的建设成本、运维成本更为重要。在社会效益方面,改善暴雨对环境的影响在群众拥有的获得感中最为重要。

3 结 语

构建海绵城市建设可行性研究评价指标体系并合理确定各项指标权重,可为建设单位单一项目可行性研究提供科学依据,为海绵项目顺利实施提供有力保障。在4个准则层中,技术因素

对海绵城市项目建设可行性评价影响最大,对于海绵城市项目成功与否起主要作用;经济效益次之,社会效益与可能发生的风险对项目影响偏小。从评价指标总排序可以看出,设计方案图纸是否详实合规是对项目综合评价的最重要因素,海绵城市项目设施改善城市缺水程度和改善暴雨对环境的影响程度是评价建设成功与否的关键。通过项目实证,此文建立的可行性研究指标体系具有通用性,可为海绵城市建设项目可行性研究提供参考。

参考文献

- [1] 李美.基于生态网联盟的海绵城市项目全过程工程咨询方案研究[D].天津:天津理工大学,2021.
- [2] 楼诚,孙烨,黄屹,等.城市道路海绵城市设计的建设效果评价及设计优化[J].中国给水排水,2021,37(2):49-55.
- [3] 李萌萌,郭祺忠,练继建,等.一种海绵城市社会效益计算方法:以天津大学北洋园校区为例[J].地学前缘,2020,27(3):281-289.

(责任编辑 崔春梅)