



大型钢桁架悬索桥节点刚度对成桥受力影响探讨

魏 群¹, 姜 华¹, 彭运动², 彭成山¹

(1. 华北水利水电学院钢结构与工程研究所 郑州市 450011; 2. 中交公路规划设计院有限公司 北京市 100088)

摘 要: 以大型钢桁架悬索桥为实例, 研究钢桁架加劲梁悬索桥节点处以不同的刚度连接, 对桥梁的受力性能影响, 对 2 组具有不同节点刚度的模型, 进行了空间有限元计算。分析结果表明: 节点连接刚度大小对桥面线形、主缆、吊索拉力分布以及杆件轴力影响很不明显, 但对杆件应力分布影响显著, 设计时应加以考虑。并根据计算结果提出了同类结构的设计和施工建议。

关键词: 悬索桥; 钢桁架; 有限元计算; 节点刚度

1 坝陵河大桥概况

近年来, 悬索桥以其优美的线型、新颖的外观以及选址灵活等特点而越来越受到青睐, 一大批大跨径悬索桥应运而生。为了确保悬索桥施工和成桥运营期间的安全, 使悬索桥结构的设计更加经济合理, 本文以坝陵河钢桁加劲梁悬索桥为工程背景, 开展了大跨径悬索桥结构体系静力性能方面的研究。坝陵河大桥是沪瑞国道主干线(GZ65)镇宁~胜境关高速公路的关键工程, 在关岭县境内, 大桥横跨坝陵河峡谷, 峡谷宽约 2 000 m, 深达 600 m。经多方案桥型方案论证, 坝陵河大桥最终选用主跨为 1 088 m 的钢桁加劲梁悬索桥桥型。主缆在中跨成桥状态下的垂跨比为 1:10.3, 两根主缆中心距为 28 m, 吊索水平间距为 10.8 m。主桁架由 100 节段组成, 桥梁立面布置见图 1 所示。

2 计算模型的建立

利用有限元分析软件 ANSYS10.0, 首先通过算例对比, 表明本文采用的分析方法具有很高的精度。对坝陵河大桥进行了非线性有限元计算, 重点分析了在节点处不同刚度连接下, 钢桁架加劲梁悬索桥的受力性能。因为在实际工况中, 构件在节点处的连接既不是理想的铰接也不是完全的刚接, 节点处刚度的确定十分困难, 但刚度一定介于两者之间。由此, 依据坝陵河大桥的工程设计, 建立两组空间模型, 分析了两种理想连接状态时, 各杆件的受力性能, 得出一些重要的结论和建议, 可为今后同类工程的设计提供参考。

2.1 模型的几何尺寸

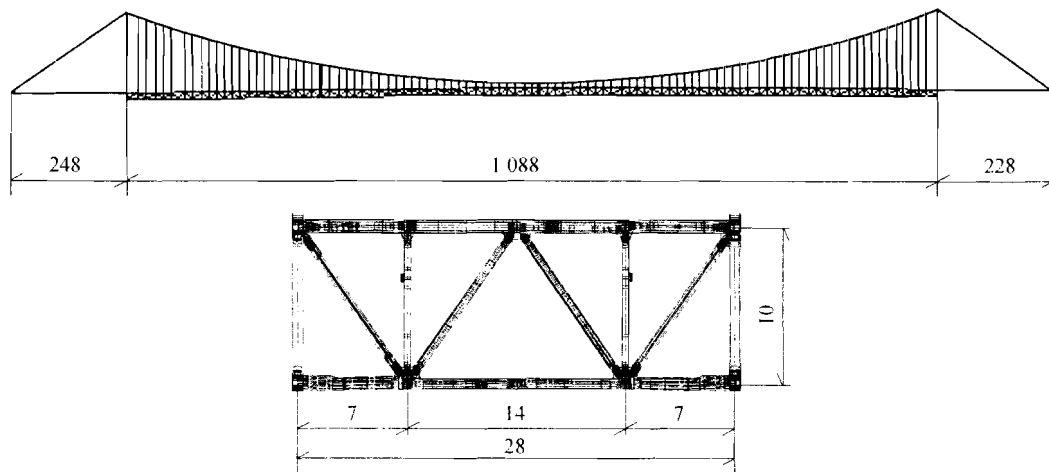
坝陵河钢桁架悬索桥平面布置及主横桁架平面布置见图 1, 计算模型取桥的中跨部分, 其中 J 组模

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目, 项目编号 200531800019

收稿日期: 2008-07-18

aggregate concrete. Ultimate bearing capacity of this kind of beam got by plastical theory analysis is 73.1% higher than elastical value, and the ultimate bearing capacity got by experiment is about 20% higher than plastical result. Shear sliding between steel and concrete occurs, which proves that analysis style of this kind of beam must be partial shear joint. The beam is in elastic stage until total load reached 250 kN or more, so elastical bearing capacity is 36.4% more than computational value at least.

Key words: external prestressing; light weight aggregate; combination beam; carrying capacity; experiment and research.



单位: m

图 1 坝陵河大桥立面布置及主横桁架几何尺寸

型节点处杆件采用理想铰接, G 组在节点处采用完全刚接。根据工程设计截面面积和尺寸, J 组模型整体采用 BEAM189 单元 7 组, LINK 单元 20 组; G 组模型 BEAM189 单元 25 组, LINK 单元 2 组。BEAM189 单元适用于从细长到中等粗短的梁构件, LINK 单元分为 LINK8 和 LINK10, LINK8 适用于桁架、连杆、弹簧等构件的模拟, LINK10 单元具有独一无二的双线性刚度矩阵特性, 适合轴向仅受拉或仅受压的构件模拟。

2.2 单元选取和模型建立

采用三维实体单元进行有限元计算, 主缆和吊杆在 ANSYS 程序中采用了 LINK10 索单元(单向受拉), 钢桁架选用 LINK8 杆单元和 BEAM189 梁单元。在 J 组模型的主横桁架部位, 因力的作用有弯矩存在, 因此, 主横桁架的上、下横梁及外侧竖腹杆选用了 BEAM189 梁单元, 其他部位的杆件全部采用 LINK8 杆单元。 G 组模型的桁架部分则完全采用 BEAM189 梁单元。模型的网格划分见图 2 所示。

2.3 材料属性

主缆为高强度镀锌钢丝, 弹性模量为 $E=2.0 \times 10^5$ MPa, 吊索为镀锌钢丝绳, 弹性模量 $E=1.1 \times 10^5$ MPa, 加劲梁采用钢材为 Q235C、Q345C 和 Q345D, 钢材的弹性模量取为 $E=2.06 \times 10^5$ MPa。由于是弹性设计, 故钢材采用 VonMises 单线性等向强化的本构关系模型, 材料参数见表 1。

2.4 边界条件、荷载施加及应力刚化的考虑

为了尽可能地模拟悬索钢桁架桥在实际结构中

的受力状态, 模型中约束了主缆两端与钢桁架桥面东底端的 x, y, z 三个方向自由度, 即假定主缆在索塔顶端为理想铰接, 同时在桥面一端底部采用理想铰接, 另一端约束其 y, z 方向自由度, x 方向(纵桥向)自由, 其他部位完全处于漂浮状态。保证边界条件的设置和实际工程受力基本一致。计算中静力荷载分两期施加, 一期荷载为钢桁架桥自重; 二期荷载为桥面板荷载, 由于桥面板通过盆式橡胶支座支承在横梁上, 桥面板不参与结构整体受力, 因此在模型中把桥面板恒载作为集中力作用在支座对应的横梁位置。计算中打开应力刚化开关(SSTIF, ON), 考虑到桁架的几何大变形效应对结构的受力性能具有显著影响, 因此在计算中通过打开大变形效应开关(NLGEOM, ON), 以计入其影响。

3 算例分析

为了验证本文索单元的正确性, 选择了一算例加以说明。分别对悬索的跨径、垂度和水平力进行了计算与比较。承受均布荷载的小垂度索($f_n/L=0.02$), 已知: $E=1.7 \times 10^5$ MPa, $A=67.4$ mm², 初始水平张力 $H_0=10$ kN, $L=8$ m, 索单元自重 $q_0=0.2$ kN/m, 另承受外加荷载为 0.3 kN/m, 即终态荷载 $=0.5$ kN/m。求该悬索在初态、终态时的跨中垂度及终态时的水平张力 H_0 。

将整根索用 LINK10 等分了 80 个单元进行计算, 计算结果见表 2。通过计算结果比较分析可知, 有限元计算结构与抛物线理论结果之间误差很小, 因此本文的计算结果是可信的。

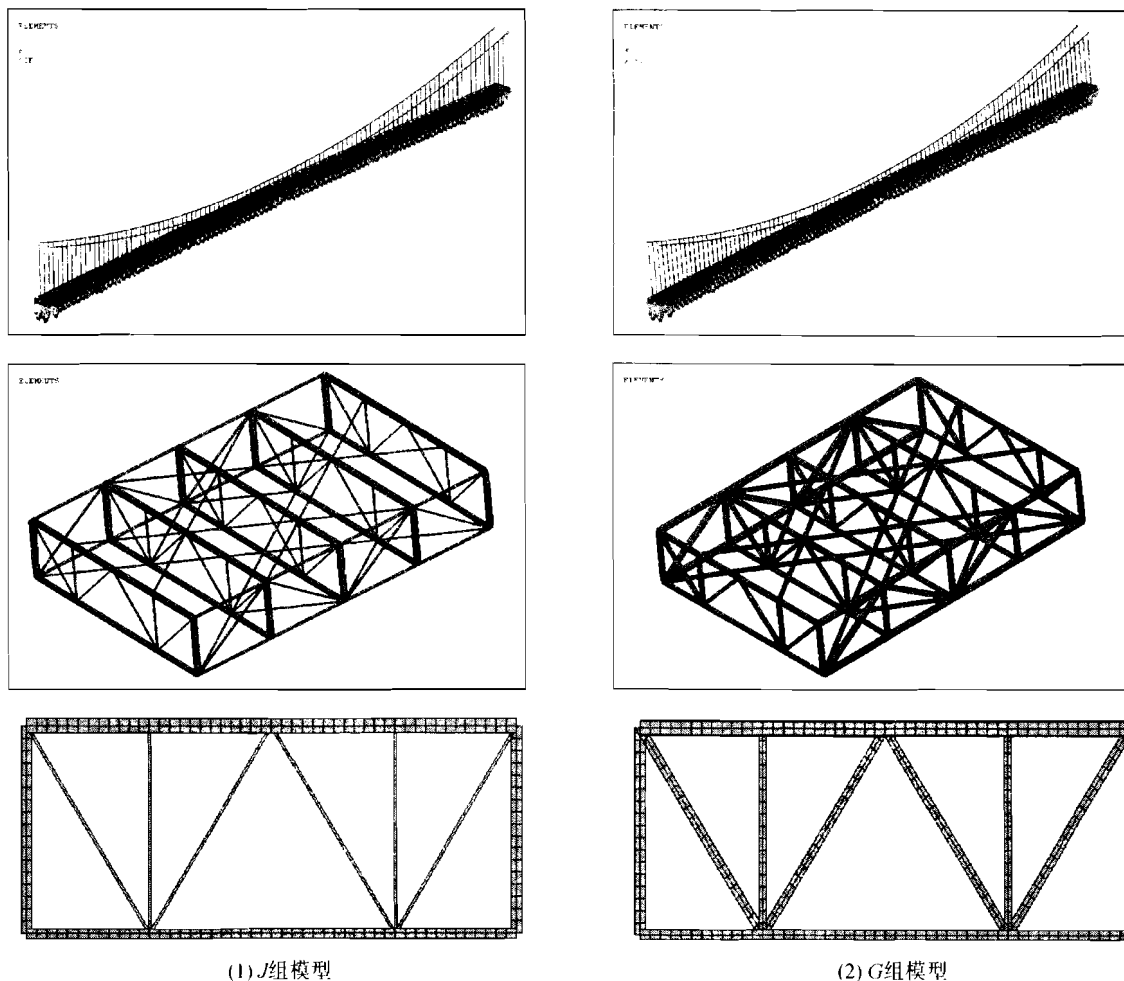


图 2 模型网格划分

表 1 材料特性

名称	泊松比	弹性模量/MPa	密度/(kg/m ³)
主缆	0.3	2.00×10^5	7 850
吊索	0.3	1.10×10^5	7 850
加劲梁	0.3	2.06×10^5	7 850

表 2 算例结果比较

项目	有限元结果	文献[4]抛物线理论结果	相对误差/%
索中点初态垂度/mm	159.886	160.0	0.07
索中点终态垂度/mm	210.714	210.748	0.016
终态水平张力/kN	18.962	18.898	0.34

4 钢桁架悬索桥的有限元计算结果及分析

根据 ANSYS 空间有限元计算结果,从以下几个方面,对两组钢桁架加劲梁悬索桥结构的受力性能,进行了分析比较。

4.1 控制点位移

从图 3 钢桁架桥面竖向位移图可知,两组模型竖向最大位移都出现在跨中位置,其中 J 组最大竖向位移为 3.19 m, G 组最大竖向位移为 3.187 m,从两组模型的竖向位移比较可知, J 模型较 G 模型竖向位移下降多 0.003 m,为下降位移的 0.09%,因此,在节点部位采用铰接或刚接对桥面跨中挠度影响很小。通过比较两组桥面竖向位移,其变化也都在 0.07% 以内,因此,钢桁架节点部位刚度大小对桥面竖向位移影响很小。

4.2 主缆、吊索的拉力分布

主缆拉力分布见图 4,从图中可明显看出,主缆拉力呈抛物线分布,两边靠近索塔处拉力最大,依次向跨中逐渐变小,在跨中时主缆拉力最小。比较两组模型的主缆拉力可知,节点处连接刚度大小对钢桁架悬索桥主缆的受力几乎没有什么影响。吊索拉力分布见图 5,由于受到桥两端支座的影响,吊索拉

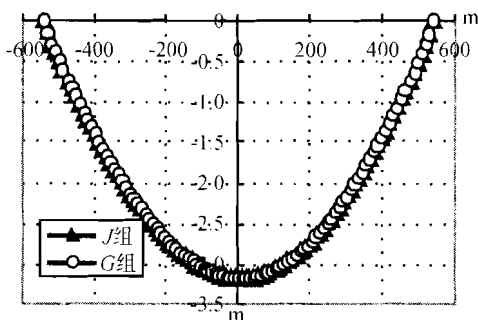


图 3 桥面竖向位移

力的大小分布是靠近索塔部位拉力很小,在距索塔约 1/10 跨径位置拉力达到最大,从该位置吊索拉力向跨中逐渐减小,但变化的幅度较小,特别是在中间的跨径 3/5 范围内,吊索拉力分布更趋平稳。同时,两组模型吊索拉力也都十分接近。

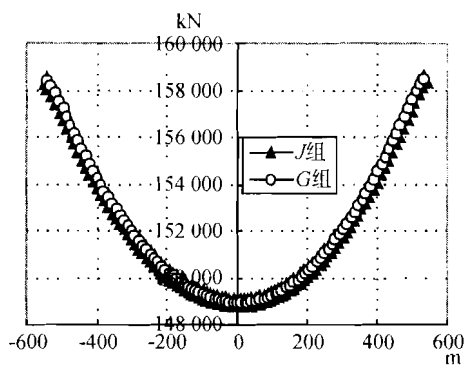


图 4 主缆拉力分布

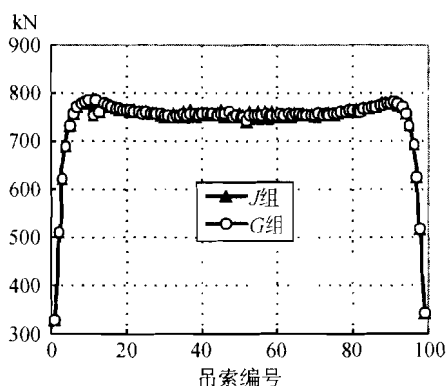


图 5 吊索拉力分布

4.3 杆件的内力状态

从桁架上、下弦轴力分布图可知,下弦主要受压力,上弦受拉力,轴力分布呈正弦线,见图 6 所示,在跨中部位由于几何对称的影响,轴力值较相邻杆件轴力下降约 20%,靠近索塔位置轴力逐渐增大,在桥两端处上弦杆轴力突然变得很小,下弦杆轴力也

下降了 50%。从图 7 可以明显看出,主桁架斜腹杆轴力很小,除去两端由于受支座处反力的影响斜腹杆轴力达 1 650 kN 外,其余基本在 100 kN 范围内波动。比较两组模型上、下弦轴力值和主桁架斜腹杆轴力可知,节点刚度对其影响相对于杆件轴力大小,可忽略不计。

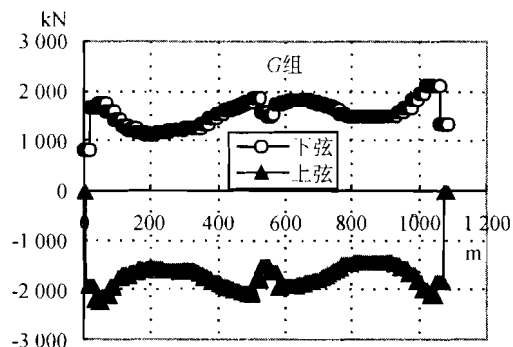
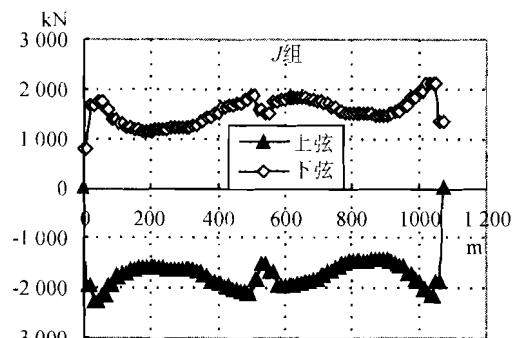


图 6 主桁架上、下弦轴力

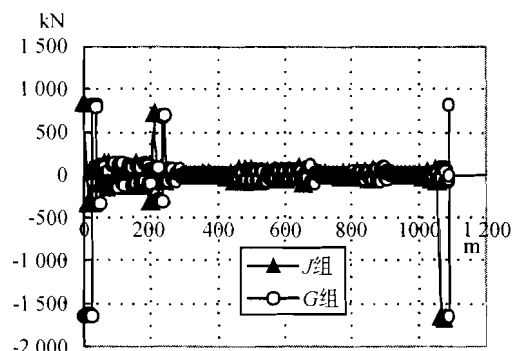


图 7 主桁架斜腹杆轴力

4.4 主横桁架的应力分布

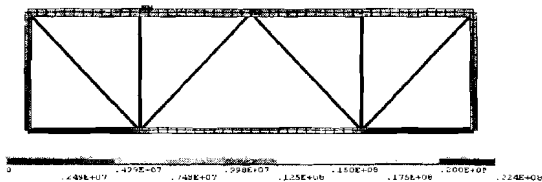
通过对桥 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 位置主横桁架的等效应力图比较可知,铰接桁架在该位置所对应主横桁架的最大应力分别为 22.4 MPa、42.9 MPa 和 22.0 MPa,刚接桁架则分别为 30.2 MPa、33.1 MPa 和 29.8 MPa,从应力的分布情况可以明显看出,铰接桁架应力变化幅度很大,跨中较 $3L/4$ 位置应力



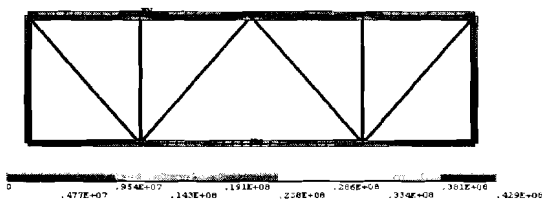
高出近 53.4%，而刚接桁架应力分布十分均匀，应力变化在 10% 以内。较刚接桁架应力高出 22.8%。

因此，连接刚度的存在大大优化了桁架各杆件的应力分布，使各杆件的应力更趋于均匀。

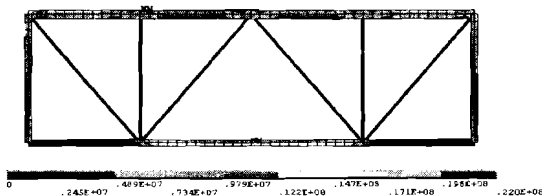
MODAL SOLUTION
STEP=2
SUB=10
TIME=2
SEGV (AVG)
ENX=2.323
ENB=-1.824E+08



MODAL SOLUTION
STEP=2
SUB=10
TIME=2
SEGV (AVG)
ENX=3.192
ENB=-1.429E+08

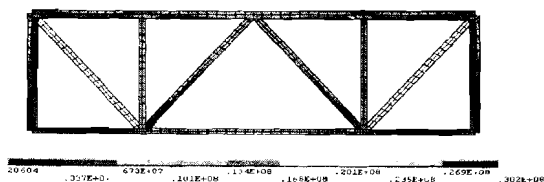


MODAL SOLUTION
STEP=2
SUB=10
TIME=2
SEGV (AVG)
ENX=2.194
ENB=-1.210E+08

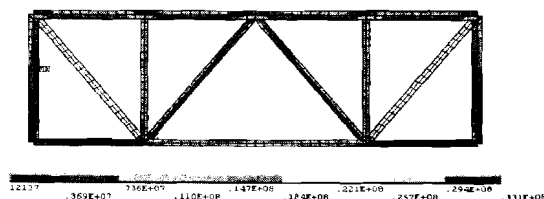


(1) J组模型

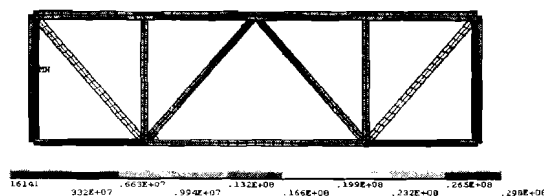
MODAL SOLUTION
STEP=2
SUB=10
TIME=2
SEGV (AVG)
ENX=2.323
ENB=-1.824E+08
ENX=2.323
ENB=-1.824E+08



MODAL SOLUTION
STEP=2
SUB=10
TIME=2
SEGV (AVG)
ENX=3.109
ENB=-1.511E+08
ENX=3.109
ENB=-1.511E+08



MODAL SOLUTION
STEP=2
SUB=10
TIME=2
SEGV (AVG)
ENX=2.379
ENB=-1.614E+08
ENX=2.379
ENB=-1.614E+08



(2) G组模型

图 8 主横桁架等效应力

5 结论

通过对坝陵河钢桁架加劲梁悬索桥采用不同节点刚度的有限元对比计算及算例分析，得出以下结论。

(1)通过有限元计算结果同抛物线理论结果的对比可知，本文采用的有限元计算是可行的，具有很高的精度。

(2)节点刚度的大小对钢桁架加劲梁悬索桥的桥面线形、主缆吊索拉力以及各杆件的轴力影响十分有限。

(3)从应力的分布图可知，节点刚度的存在，可以较明显起到改善杆件应力分布的作用。

考虑节点刚接对连接质量和施工工艺的高要求上，建议在钢桁架加劲梁悬索桥进行设计时，在满足

受力要求的情况下，节点最好按铰接设计，这样既简化了结构的受力传递，也为各杆件的生产加工带来了极大方便，同时施工质量也更容易得到保证。

参考文献：

- [1] 魏群,彭成山,姜华,严斌,等. 钢桁梁架设过程仿真技术报告[R]. 华北水利水电学院钢结构与工程研究所, 2007.
- [2] 陈仁福. 大跨悬索桥理论 [M]. 成都:西南交通大学出版社,1994.
- [3] 姜华,魏群,焦涛,严斌. 梁腹板开圆孔钢框架的抗震性能分析[J]. 河南理工大学学报,2008,27.
- [4] 沈世钊,徐崇宝,赵臣. 悬索结构设计 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.