

支座位置整体节点设计优化研究

王晟¹, 宁平华¹, 王荣辉², 乐小刚¹, 胡会勇¹, 周昱¹

(1. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510030; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 支座位置整体节点受力大, 往往存在应力集中、局部应力过大现象, 为研究支座位置整体节点的受力特性, 给设计优化提供依据, 该文以广州明珠湾大桥 MG22 节点为研究背景, 建立考虑支座效应的 Ansys 有限元模型, 对该节点的应力分布规律及结构优化方法进行研究。结果表明: 支座竖向加劲肋的焊接端部通常是应力集中区域, 支座范围内的结构局部刚度及刚度变化平缓性将直接影响整体节点应力峰值, 优化该区域的加劲肋分布及其覆盖范围可使板件传力更加合理, 从而改善整体节点应力状况; 优化后板件最大等效应力及疲劳应力幅分别降至 328.7、38.2 MPa, 节点板与底板的应力分布变得更加均匀, 其中节点板的等效应力峰值与最大疲劳应力幅分别由 416.6 MPa 下降至 307.2、59.1 降至 33.5 MPa, 底板的等效应力峰值与最大疲劳应力幅分别由 396.8 MPa 下降至 257.5、38.3 降至 25.2 MPa, 各板件的应力水平都有了很大程度的降低, 验证了节点构造的合理性及传力有效性。

关键词: 桥梁工程; 钢桁架; 整体节点; 设计优化; 支座区域

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

由于焊接技术的逐步成熟及构件合理传力的需要, 近些年整体节点在中国钢桁架桥梁上的应用得到了快速发展, 1995 年建成的京九线孙口黄河大桥是中国第一座采用焊接整体节点的桥梁^[1], 2000 年建成的芜湖长江大桥是首座将下平联接板、横梁接板与整体节点焊接的钢桁架桥梁^[2]。进入 21 世纪后, 中国建造的众多大跨度钢桁架桥均采用了整体节点, 与此同时, 整体节点的复杂程度也进一步提高, 且往往存在传力复杂、局部应力集中, 需要进行有效的计算分析确保安全性^[3]。

整体节点安全性是结构安全的基本条件, 通常采用直接建模法^[4]进行计算分析, 对于自由整体节点, 可基于惯性释放法^[5]或圣维南原理^[6]对局部模型施加边界条件; 支座位置整体节点受力大, 往往存在应力集中、局部应力过大现象, 且由于底面钢板直接与支座接触, 若直接约束支座区域底面钢板节点将会造成该区域应力分布与实际受力不符, 因此需要对边界条件进行特别处理。该文基于直接建模法, 考虑支座效应, 以广州南沙明珠湾大桥 MG22 节点为工程背景对支座位置整体节点的分析要点及受力特性进行研究, 并在计算结果的基础上以改善局部刚度及传力路径为原则进行结构优化, 以验证该节点构造的合理性及传力有效性。

1 工程背景

1.1 明珠湾大桥 MG22 节点构造

明珠湾大桥位于广州市南沙区, 其主桥为主跨 436 m 三主桁钢桁拱, 采用 Q420 钢材, 跨径布置为 (96+164+436+164+96+60) m, 主桁中心间距为 18.1 m, 上层桥面为双向八车道布置, 且两侧设有人行道, 下层预留轨道通行空间。MG22 节点位于中桁拱脚, 支承于 120 MN 固定支座上, 节点下方设有直径 2.26 m 圆形垫座, 连接有拱肋、竖腹杆、斜腹杆、横梁、横联、平联共 11 根杆件, 构件传力复杂(图 1)。

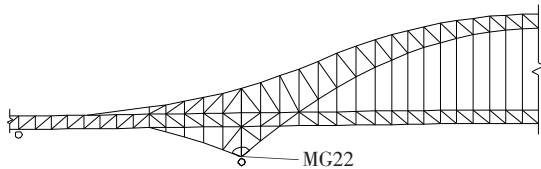


图 1 MG22 节点位置示意图

MG22 节点总长 8.66 m, 高 4.6 m, 整体重 7.9 t, 其中节点板厚 56 mm, 底板厚 56 mm, 在支座位置及两侧起顶位置设置 40 mm 垫板并在该区域整体节点内部设置 40 mm 加劲肋, 连接拱肋的加劲弦水平板及内部加劲肋厚 52 mm, 内部通过厚度为 40 mm 的隔

收稿日期: 2021-03-21(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51408228, 51378220); 广州市政总院研究课题(编号: KY-2017-023)

作者简介: 王晟, 男, 博士, 高级工程师. E-mail: wshleon@163.com

节点各连接杆件的轴力大小为依据判断荷载工况的形式,主要方法为:选取轴力组合值较大的若干杆件,在整体模型中分别计算这些杆件达到轴力最大组合值时其他杆件的内力,进而得到此时整体节点的受力状态,并以此为依据施加整体节点外荷载,计算荷载包含恒载、活载、风荷载及温度荷载。此外,为得到整体节点

疲劳应力幅,需分别计算上述基本组合下轴力组合值较大杆件处于轴力最大、最小值时的整体节点受力状况。MG22 节点连接杆件轴力极值见表 1,表中组合最小、最大轴力表示经荷载组合后杆件的轴力极值,负值表示受压,正值表示受拉。

表 1 主要杆件轴力极值表 kN

杆件	组合最小轴力	组合最大轴力	活载最小轴力	活载最大轴力	活载轴力差
边跨拱肋	-41 009.6	-34 653.6	-5 732.3	-556.6	5 175.7
中跨拱肋	-49 466.4	-41 387.0	-6 975.1	-628.3	6 346.8
竖杆	-34 857.4	-30 107.7	-3 975.3	-214.8	3 760.5
左幅横联	-7 228.2	-4 657.2	-795.3	-18.9	776.4
右幅横联	-8 856.2	-6 267.0	-792.5	-17.9	774.6
左幅边跨平联	-1 624.3	849.2	-616.5	396.6	1 013.1
右幅边跨平联	-3 036.3	-570.1	-612.8	399.8	1 012.6
左幅中跨平联	-2 889.1	-243.1	-771.8	341.5	1 113.3
右幅中跨平联	-4 222.3	-1 571.7	-793.3	320.9	1 114.2
左幅横梁	6 185.9	10 878.1	35.7	1 068.3	1 032.6
右幅横梁	2 718.9	7 398.6	58.1	1 090.8	1 032.7

由表 1 可知:MG22 节点中拱肋及竖杆轴力明显大于其他杆件,其中边跨拱肋、中跨拱肋及竖杆的最大轴压力分别为 41 009.6、49 466.4、34 857.4 kN,因此选取拱肋及竖杆分别处于最大轴力时整体节点的受力状态进行承载能力极限状态验算工况^[11];同时,拱肋及竖杆在活载作用下轴力差较大,故选取拱肋及竖杆在恒、活载作用下轴力处于极值时整体节点受力状态为疲劳应力验算工况^[12]。计算工况见表 2。

表 2 计算工况一览表

工况号	工况内容	荷载组合
1	边跨拱肋最小轴力	恒+活+风+温
2	中跨拱肋最小轴力	恒+活+风+温
3	竖杆最大轴力	恒+活+风+温
4	边跨拱肋最大轴力	恒+活
5	边跨拱肋最小轴力	恒+活
6	中跨拱肋最大轴力	恒+活
7	中跨拱肋最小轴力	恒+活
8	竖杆最大轴力	恒+活
9	竖杆最小轴力	恒+活

2.3 荷载施加

为实现杆件反力的施加,于 MG22 节点连接杆件轴线端部建立 Mass21 单元,并将该单元所在节点与

MG22 节点中该杆件所在摩擦面范围内的节点耦合,随后于该 Mass21 单元所在节点施加外力即可(图 3)。

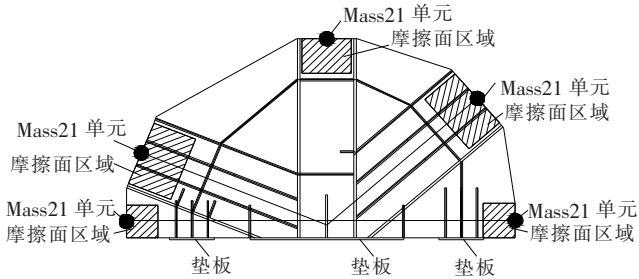


图 3 荷载施加耦合区域示意图

3 计算结果

3.1 等效应力

基于 Ansys 计算结果,取工况 1~3 中的应力包络得到 MG22 节点各位置的最大等效应力见图 4。

由图 4 可知:最大应力位于支座加劲肋下方板端位置(位置 1),该位置的最大等效应力峰值达到了 816.6 MPa,板件应力峰值经 130 mm 圆形扩散后减小至 362.9 MPa,存在显著的应力集中现象;节点板最大等效应力为 416.6 MPa,出现在支座加劲板顶部与节点板焊接位置(位置 2);底板最大等效应力为 396.8

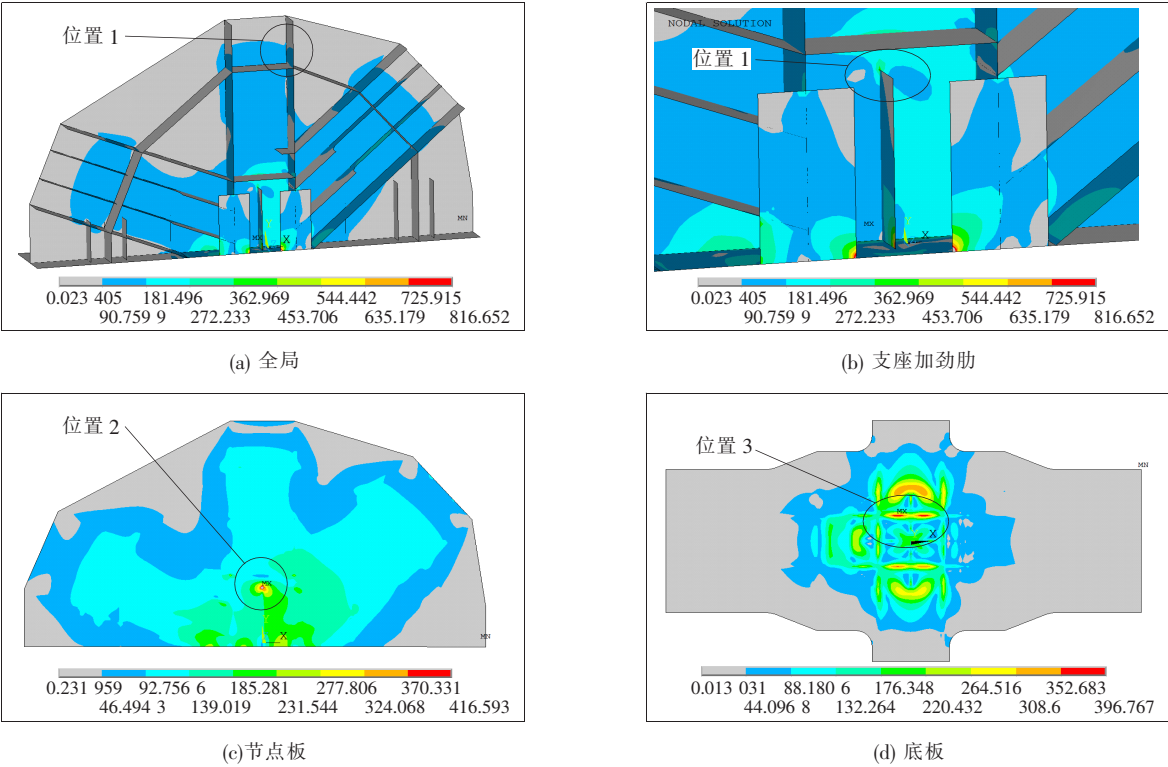


图4 板件最大等效应力(单位:MPa)

MPa,出现在支座范围内底板与节点板焊接区域(位置3)。整体节点等效应力峰值已超过材料屈服强度,且高应力区域范围较大,需要进行优化设计。

3.2 疲劳应力幅

工况4~9经包络运算后可得节点各位置最大疲劳应力幅如图5所示。

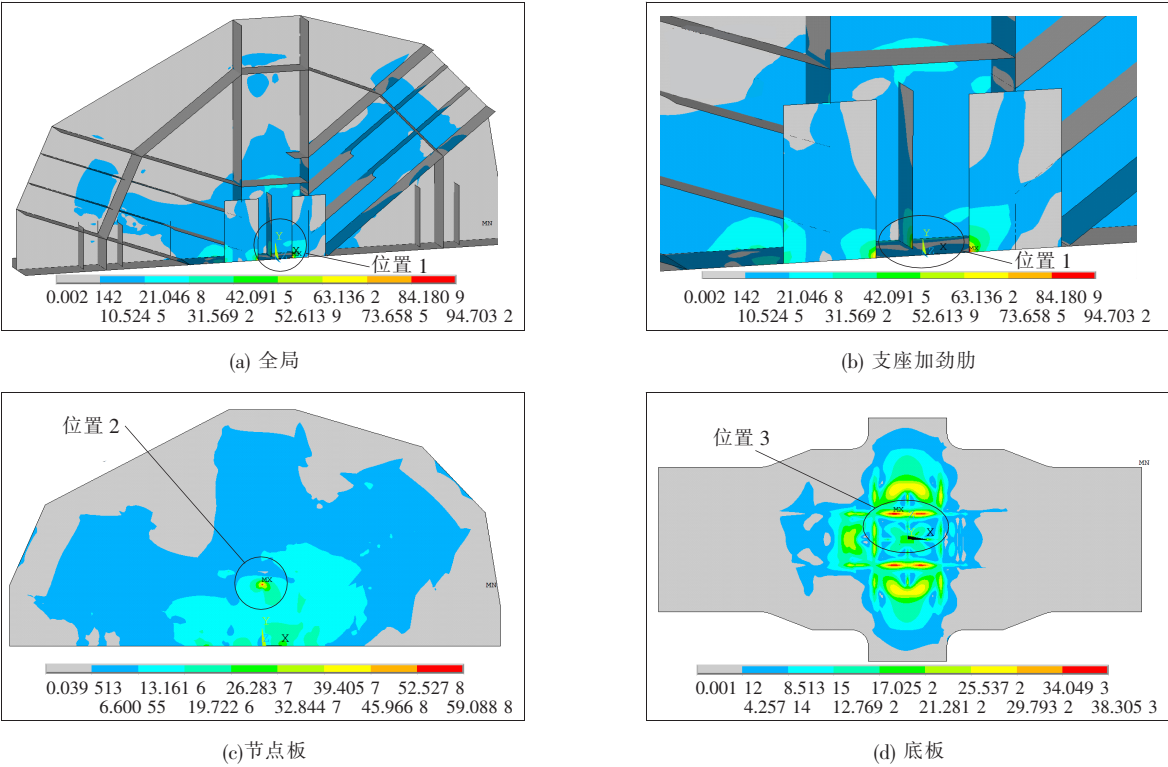


图5 板件最大疲劳应力幅(单位:MPa)

由图 5 可知:整体节点最大疲劳应力幅为 94.7 MPa,出现在位置 1,位置 2、位置 3 的最大疲劳应力幅分别为 59.1、38.3 MPa,其中位置 1 的疲劳应力已超过文献[12]规定的Ⅱ类构件疲劳允许应力幅 71.9 MPa,存在较大优化空间。

4 优化设计

4.1 优化方法

由图 4(b)与图 5(b)可知:最大等效应力及疲劳应力幅均出现在支座加劲肋下方端部位置,该位置刚度突变较大,因此局部应力集中现象明显,这也影响了节点板及底板的应力峰值,因此采用改善局部刚度及传力路径的思路进行优化设计。具体方式为:取消纵向支座加劲肋,将横向支座加劲肋下底面布满支座范围,并

将其数量增加到两道。优化后的节点构造图见图 6。

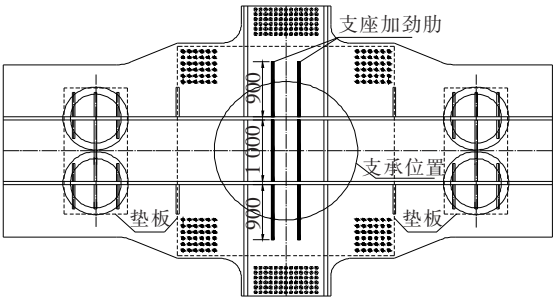


图 6 优化后节点构造图(单位:mm)

4.2 优化后计算结果

优化后的最大等效应力及疲劳应力幅见图 7,限于篇幅,该论文仅给出最大等效应力图,板件疲劳应力幅出现位置与最大等效应力出现位置相同,优化前后的最大应力对比见表 3。

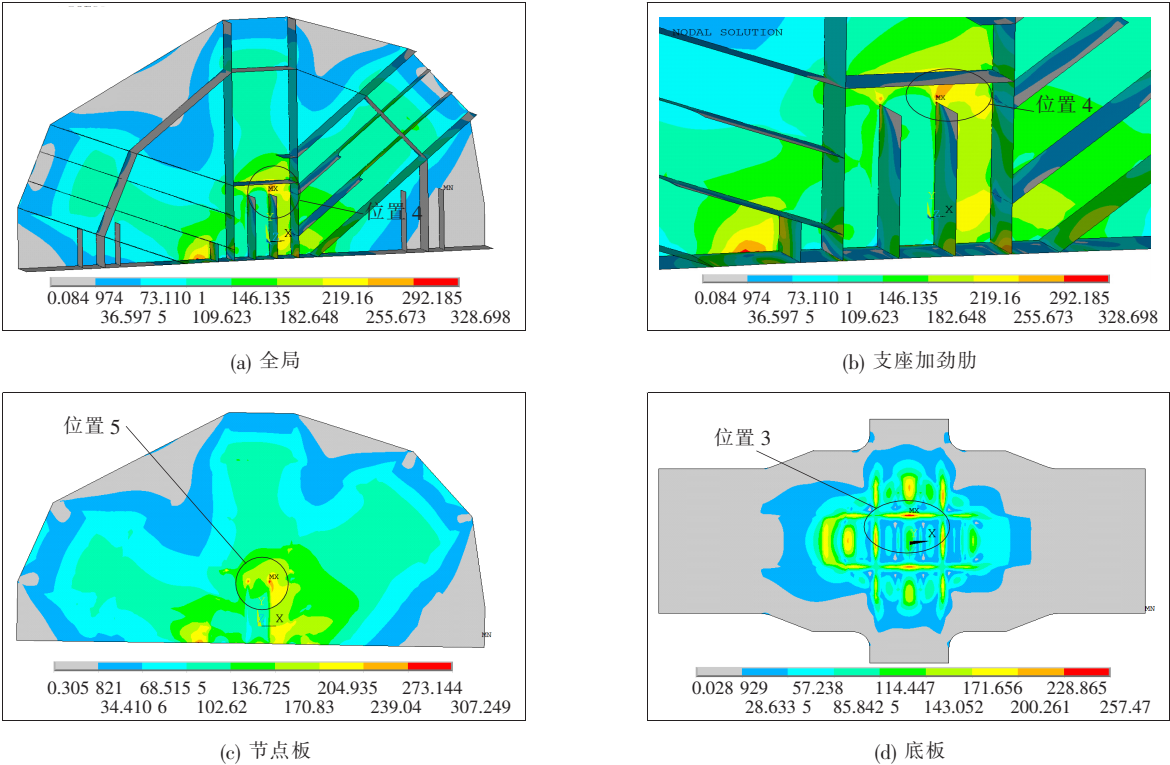


图 7 优化后最大等效应力(单位:MPa)

由图 7 及表 3 可知:经优化后支座范围内的结构刚度较为平均,支座区域传力变得更加合理,板件最大应力仍出现在支座加劲肋与节点板焊接端部,其最大等效应力及疲劳应力幅分别降至 328.7、38.2 MPa,且高应力区域范围很小,应力集中现象明显改善;同时,节点板与支座位置的底板的应力分布变得更为平均,

其中节点板的等效应力峰值与最大疲劳应力幅分别由 416.6 MPa 下降至 307.2 MPa、59.1 MPa 降至 33.5 MPa,底板的等效应力峰值与最大疲劳应力幅分别由 396.8 MPa 下降至 257.5 MPa、38.3 MPa 降至 25.2 MPa,各板件的应力峰值均有了很大程度的降低,整体节点受力有了显著改善。

表3 优化前后板件最大应力对比

板件	等效应力/MPa		疲劳应力幅/MPa	
	优化前	优化后	优化前	优化后
支座加劲肋	816.6	328.7	94.7	38.2
节点板	416.6	307.2	59.1	33.5
底板	396.8	257.5	38.3	25.2

5 结论

(1) 支座位置整体节点受力大, 支座区域内的板件往往存在应力集中、局部应力过大现象, 需进行有效计算及优化分析, 确保其安全性。

(2) 采用定义接触对的方式进行支座位置整体节点分析可避免直接约束支座区域垫板节点而导致的应力集中, 计算结果较为理想。

(3) 支座竖向加劲肋与底板、节点板的焊接端部通常是应力集中区域, 且支座范围内的结构局部刚度大小及刚度变化平缓性将直接影响整体节点应力峰值, 优化该区域的加劲肋分布及其覆盖范围, 可在结构变更尽可能小的前提下, 使支座区域传力更为合理, 从而改善整体节点受力状况。

(4) 经优化后, MG22 节点最大等效应力与最大疲劳应力幅明显降低, 应力集中现象有了显著改善, 验证了该节点构造的合理性及传力有效性。

(5) 该文基于静力分析对 MG22 节点的受力特点及优化进行了研究, 地震作用对节点的受力影响有待进一步研究。

参考文献:

[1] 谭明鹤, 王荣辉, 黄永辉. 整体节点刚度对钢桁梁桥结构受力的影响分析[J]. 公路, 2007, 52(10): 27—30.

[2] 王天亮, 王邦楣, 潘东发. 芜湖长江大桥钢梁整体节点疲劳试验研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(5): 96—100.

[3] 王会利, 秦泗凤, 张哲. 双层钢桁架悬索桥整体节点疲劳

试验研究[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 81—84.

[4] 崔阳. 大跨双线客专铁路连续钢桁梁桥静动力性能和节点详细应力计算分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

[5] 孙辉, 沈保山, 王新超, 等. 基于惯性释放原理的新能源车车架结构分析[J]. 汽车技术, 2018(12): 55—58.

[6] 陈亮. 大跨度铁路连续钢桁梁桥整体和局部受力性能分析[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

[7] 王宏谋. 桥梁盆式橡胶支座的研究与应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[8] 刘岳兵, 王少华, 王宏谋, 等. 基于 ANSYS 分析的盆式橡胶支座结构及性能研究[J]. 铁道建筑, 2009(10): 1—3.

[9] 谭洪涛. 松花江公铁两用桥钢箱梁力学位性能分析[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 122—126.

[10] 王新敏. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[11] 马磊. 大跨度钢桁拱桥关键节点受力特性及优化研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018(2): 83—87, 12—13.

[12] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 铁路桥梁钢结构设计规范: TB 10091—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

[13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[14] 黄国兴. 斜独塔斜拉桥关键节点空间有限元受力分析[J]. 中外公路, 2011, 31(3): 153—158.

[15] 李小刚, 姚永丁, 韦华, 等. 悬索桥钢桁加劲梁栓焊节点疲劳试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2015(4): 37—41, 53, 9.

[16] AMSTUTZ S, NOVOTNY A A. Topological Optimization of Structures Subject to Equivalent Stress Constraints[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2009, 41(3): 407—420.

[17] LIU G, WU W M, TANG L, et al. Fatigue Test on Integral Joint of the Main Truss of the Baling River Bridge[J]. Key Engineering Materials, 2010, 417—418(12): 481.

[18] 张凡. 双层钢桁梁桥整体节点受力性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.