

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.03.008

混合梁斜拉桥主梁钢-混凝土结合段受力性能研究

唐瑜^{1,2}, 吴庆雄^{1,3}, 袁辉辉^{1,2}

(1 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福建 福州 350108;
3. 工程结构福建省高校重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 以某混合梁斜拉桥为工程背景, 分别采用 Midas Civil 和 ANSYS 建立全桥空间杆系有限元模型和钢混凝土结合段的精细实体有限元模型, 进行最不利荷载组合作用下结构受力性能分析。研究表明: 钢-混凝土结合段在最不利荷载组合工况下各组成部分受力均衡、变形连续协调; 钢-混凝土结合段的钢箱梁应力满足要求, 各钢板无屈曲现象发生; 钢-混凝土结合段中混凝土箱梁节段在混凝土顶板与隔板结合部及翼缘倒角位置会出现较大的主拉应力, 最大可达到 4.84 MPa, 超过 C50 混凝土抗拉强度, 建议必要时应增加钢筋用量, 进一步优化局部受力。

关键词: 斜拉桥; 钢-混凝土结合段; 有限元; 变形; 应力

中图分类号: U443.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)03-0247-06

Study on the mechanical performance of the main girder's steel-concrete joint section of a hybrid girder cable-stayed bridge

TANG Yu^{1,2}, WU Qingxiong^{1,3}, YUAN Huihui^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350108, China;
3 Key Laboratory of Civil Engineering of Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350108, China)

Abstract: With a hybrid girder cable-stayed bridge as the engineering background, Midas Civil and ANSYS were used to establish the finite element model of the space bar system of the whole bridge and that of the fine solid model of the steel-concrete joint section, and the mechanical performance under the most unfavorable load combination was analyzed. Results show that under the most unfavorable load combination, the steel-concrete joint section had the stress of all its parts balanced and the deformation continuously coordinated. The stress of its steel box girder met the requirements of the specifications, and none of the steel plates had any buckling. In the joint of the concrete roof and the partition and the flange chamfering position, the main tensile stress of the concrete could reach a maximum of 4.84 MPa, exceeding the tensile strength of concrete C50. It is suggested that more steel bars should be used when necessary to further optimize the local force.

Keywords: cable-stayed bridge; steel-concrete joint; finite element analysis; deformation; stress

在混合梁斜拉桥中, 主跨常采用钢主梁, 边跨采用混凝土主梁, 两种材料的主梁在桥塔附近通过钢-混凝土结合段进行连接转换。合理利用钢

材和混凝土两种不同材料, 使主梁受力性能得到了大幅度的提高, 并且具有跨越能力大的优点^[1-2]。钢-混凝土结合段因其构造复杂, 存在刚

收稿日期: 2019-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678154); 福建省自然基金项目(2018J01772); 福建省本科高校教育教学改革项目(FBJG20180082)

第一作者简介: 唐瑜(1991-), 男, 福建福州人, 助理实验师, 硕士, 研究方向: 桥梁工程。



图 2 MIDAS/Civil 全桥模型

Fig.2 MIDAS/Civil model of the whole bridge

荷载方式施加在锚板上,分别为 $P_1 = 32\,812\text{ kPa}$ 、 $P_2 = 43\,750\text{ kPa}$,斜拉索索力 $S_1 = 1\,251\text{ kN}$,同样以均布荷载方式施加在锚板上。混凝土截面采用固结约束,主梁的中纵面上施加横桥向对称约束,钢箱梁侧施加轴力 $-71\,450\text{ kN}$ 、剪力 $-1\,785\text{ kN}$ 和弯矩 $17\,823\text{ kN}$ 。

2.2 钢-混凝土结合段实体有限元模型

根据钢-混凝土结合段几何尺寸,采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立三维实体局部有限元计算模型,为避免边界条件对研究区域的影响,结合段两端分别取 5.4 m 混凝土梁长以及 3.5 m 长的钢箱梁加强段、 3.75 m 长的钢箱梁段。整个有限元模型共有 $148\,106$ 个节点, $496\,141$ 个单元,如图 3 所示。

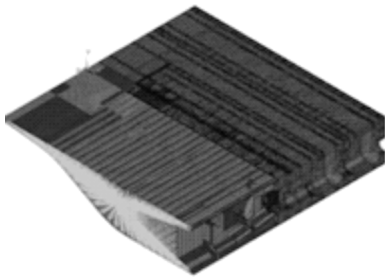


图 3 钢-混凝土结合段局部实体有限元模型

Fig.3 Local solid FEM of the steel-concrete joint section

模型中钢板采用板单元 SHELL63 模拟,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$,钢材密度 $\rho = 7\,850\text{ kg/m}^3$;混凝土采用实体单元 solid45 模拟,C50 混凝土弹性模量 $E = 3.45 \times 10^4\text{ MPa}$,混凝土泊松比 $\nu = 0.17$,混凝土密度 $\rho = 2\,650\text{ kg/m}^3$;刚臂采用 beam188 单元模拟。

按照效应等效的原则,在实体有限元模型中,通过施加不同的均布力和集中力,使得实体有限元计算得到的在钢-混凝土交界面 $L-L$ 处的内力与全桥杆系模型得到的内力相等,进而分析钢-

混凝土结合段整体以及局部构件受力情况。

3 钢-混凝土结合段局部受力性能分析

3.1 结构变形

图 4 为有限元模型分析得到的整体结构变形图。可以看出,在最不利荷载组合下,结构最大变形为 5.26 mm ,出现在钢箱梁加载端,由于钢箱梁加强段采用了 U 肋加 T 肋的构造,从钢箱梁到混凝土箱梁整体变形连续协调。



图 4 整体变形图(单位:mm)

Fig.4 Overall deformation diagram (unit: mm)

3.2 钢箱节段应力分析

图 5 为最不利荷载组合下钢箱梁部分的 Von-mises 等效应力云图。图 6~图 7 为钢箱梁各部分的 Von-mises 等效应力云图。

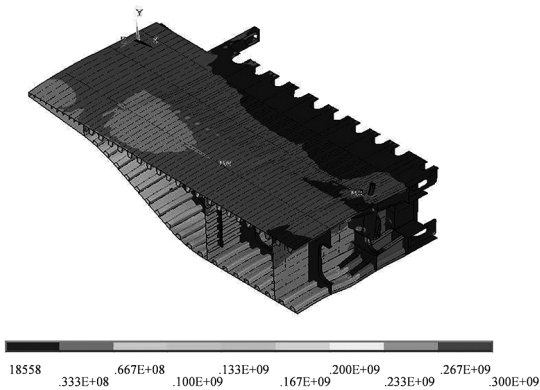


图 5 钢箱梁应力云图(单位:MPa)

Fig.5 Stress nephogram of the steel box girder (unit: MPa)

从图 5 可知,最大等效应力为 300 MPa ,出现在顶板 T 肋翼缘板角点与横隔板的相交部位,应为有限元模型约束造成的局部集中应力,实际结构中横隔板开孔通过 T 肋,不会出现该现象。钢箱梁各截面顶板压应力小于底板压应力,由于钢箱梁加劲肋的作用,钢箱梁截面应力竖向分布不均,钢梁标准段应力水平较高,而在钢梁过渡段的应力水平有一定程度的降低,到达结合段后应力

水平显著下降,各钢板无屈曲现象发生。

图 6 为钢箱梁上下顶板应力云图,可以看出,最不利荷载组合下,钢箱梁顶板最大等效应力为 144 MPa,出现在角点,其余大部分区域应力小于 65 MPa,底板最大等效应力为 196 MPa,出现在底板与箱梁竖腹板相交位置,其余大部分区域应力小于 116 MPa;钢箱梁顶板、底板的 U 肋和 T 肋端部相交部位存在应力集中现象,顶板 U 肋最大等效应力为 159 MPa,T 肋为 68 MPa,底板 U 肋为 270 MPa,T 肋为 84 MPa。

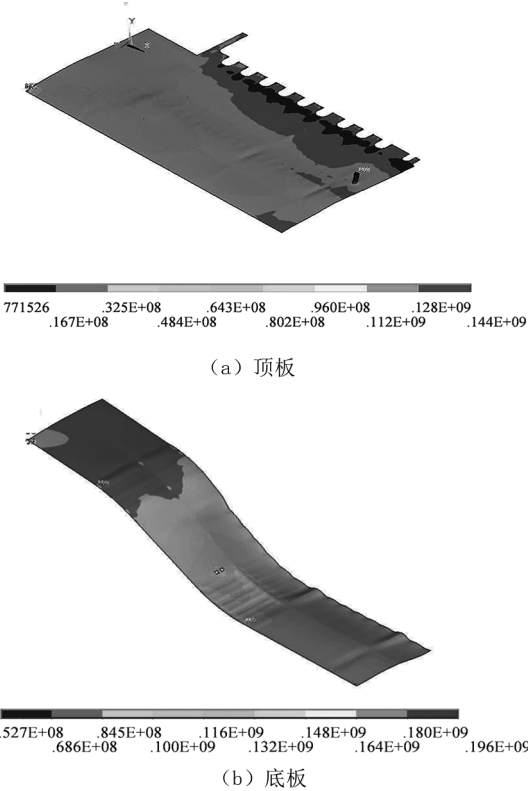


图 6 钢箱梁顶、底板应力云图(单位:MPa)
Fig.6 Stress nephogram of the steel box girder roof and the floor(unit: MPa)

从图 7 可以看出,钢格室与底板相连的腹板下端存在较为明显的局部应力集中,最大等效应力为 237 MPa,其余部位应力均比较小;承压钢板应力较高的区域为上下端与钢箱梁顶底板连接的部位,最大应力为 92 MPa;钢箱梁角点局部最大剪应力为 143 MPa,除此区域以外的大部分剪应力水平均低于 36 MPa。

图 8 为钢箱梁底板竖向剪应力云图。从图中可知,钢箱梁最大剪应力为 143 MPa,属于有限元

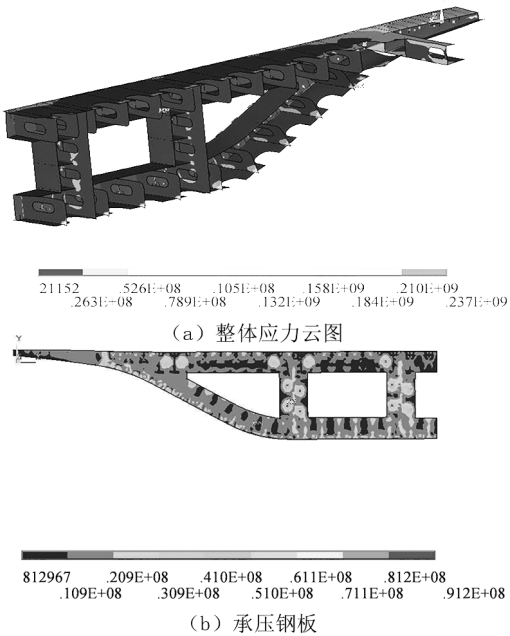


图 7 钢格室应力云图(单位:MPa)
Fig.7 Stress nephogram of the steel lattice (unit: MPa)

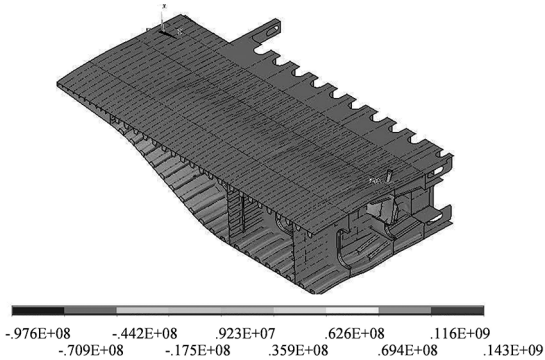


图 8 钢箱梁底板竖向剪应力云图(单位:MPa)
Fig.8 Stress nephogram of the vertical shear stress of the steel box girder's bottom plate (unit: MPa)

模型约束造成的局部集中应力,实际结构不会出现,除此以外的大部分区域剪应力水平均低于 36 MPa。

3.3 混凝土节段应力分析

图 9 和图 10 为混凝土箱梁的最大主拉应力及主压应力云图,从图可以看出,混凝土最大主拉应力达到 4.84 MPa,超过 C50 混凝土抗拉强度,较大的主拉应力大都出现在混凝土顶板与隔板结合部及翼缘倒角位置,建议通过局部构造加强处理;最大主压应力除预应力筋束锚固位置为 27.1 MPa,其余部位主压应力在 10 MPa 以下。

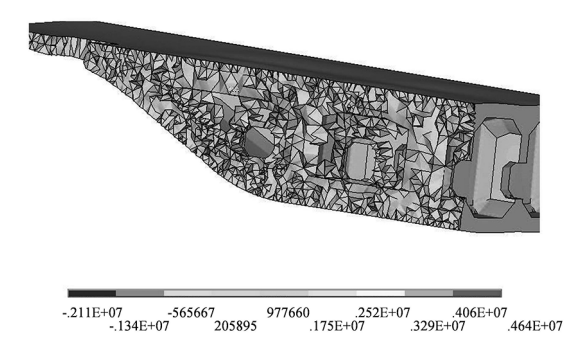


图 9 混凝土主拉应力云图(单位:MPa)

Fig.9 Nephogram of the concrete's main tensile stress
(unit: MPa)

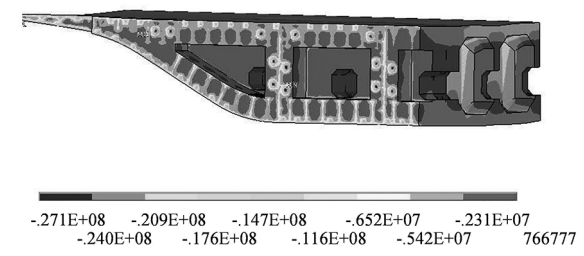


图 10 混凝土主压应力云图(单位:MPa)

Fig.10 Stress nephogram of the concrete's main
compressive stress (unit: MPa)

3.4 剪力滞效应分析

在对称荷载作用下,箱形截面由于翼缘板剪切变形分布的不均匀性,导致箱梁出现“剪力滞”现象。在计算箱梁承载力时,需考虑“剪力滞”对计算箱梁承载力的影响。因此需要对最不利荷载工况下钢箱梁和混凝土梁进行剪力滞效应分析。

图 11 和图 12 分别为钢箱梁和混凝土箱梁顺桥向应力云图,从图中可知,由于加劲肋的影响,顺桥向应力沿宽度方向存在一定波动,但箱梁总体剪力滞后效应并不明显。

4 结论

- 1) 钢-混凝土结合段在最不利荷载组合工况下,受力较均衡,变形连续协调。
- 2) 对于钢-混凝土结合段中钢箱梁节段的应力,在最不利荷载组合工况下,钢箱梁应力满足要求,各钢板无屈曲现象发生。相交部位存在应力集中现象,建议通过局部加腋进行处理;钢箱梁各截面顶板压应力小于底板压应力,钢梁标准段应力水平较高,而在钢梁过渡段的应力水平有一定

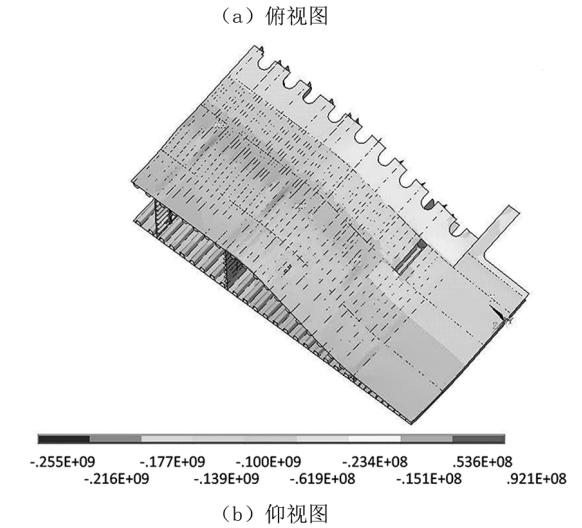
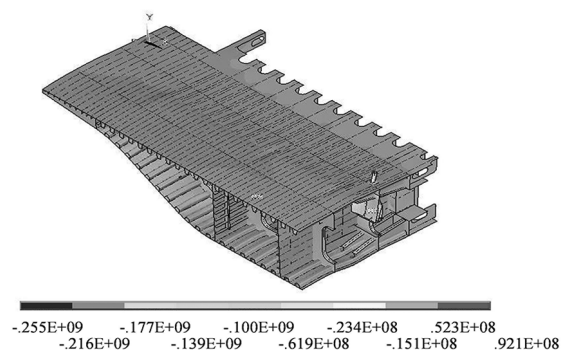


图 11 钢箱梁顺桥向应力云图(单位:MPa)

Fig.11 Stress nephogram in the longitudinal direction
of the steel box girder(unit: MPa)

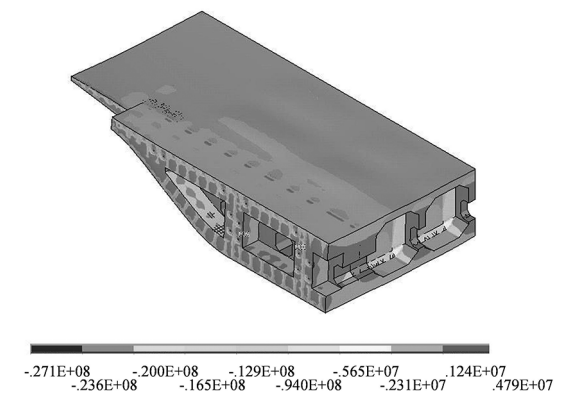


图 12 混凝土箱梁顺桥向应力云图(单位:MPa)

Fig.12 Stress nephogram in the longitudinal direction
of the concrete box girder (unit: MPa)

- 程度的降低,到达钢-混凝土结合段后应力水平显著下降。
- 3) 对于钢-混凝土结合段中混凝土箱梁的应力,在最不利荷载组合工况下,混凝土最大主拉应

力达到 4.84 MPa,超过 C50 混凝土抗拉强度,较大的主拉应力大都出现在混凝土顶板与隔板结合部及翼缘倒角位置,建议必要时应增加钢筋用量,进一步优化局部受力;最大主压应力除预应力筋

束锚固位置为 27.1 MPa,其余部位主压应力 10 MPa 以下,满足要求。

4)箱梁总体剪力滞后效应不明显。

参考文献:

- [1] 李谷. 大跨独塔单索面混合梁斜拉桥力学性能与施工控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [2] 施洲, 胡豪, 周文, 等. 大跨度混合梁斜拉桥施工控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(3): 111-115.
- [3] 张凯, 刘永健, 琚明杰, 等. 无格室钢-混结合段构造形式与受力性能分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(4): 73-79, 95.
- [4] 胡峰强, 万宏龙, 吕黎明. 组合梁斜拉桥钢混结合段钢格室的参数设计及力学性能分析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2014, 36(1): 31-34.
- [5] 伍彦斌, 黄方林. 红水河特大桥主梁钢-混结合段传力机理分析[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 56-61.
- [6] 张仲先, 黄彩萍, 徐海鹰. 混合梁斜拉桥钢混结合段传力机理研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 117-120.
- [7] 谢鸿. 独塔单索面混合梁斜拉桥钢-混结合段模型试验设计与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [8] KIM S, LEE C, AHN J, et al. Experimental study on joint of spliced steel-PSC hybrid girder: Part I: proposed parallel-perfobond-rib-type joint[J]. Engineering Structures, 2011, 33(8): 2382-2397.
- [9] KIM S, LEE C, KIM S, et al. Experimental study on joint of spliced steel-PSC hybrid girder: Part II: full-scale test of spliced hybrid I-girder[J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2668-2682.
- [10] 钟芮. 钢混结合梁斜拉桥结合段局部构造力学行为研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [11] 姜文. 混合梁斜拉桥钢混结合段受力分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [12] 秦凤江, 周绪红, 梁博文, 等. 大跨度自锚式悬索桥主梁钢-混结合段模型试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 52-64.
- [13] 李小珍, 肖林, 黄玲, 等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段静力行为[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 75-82.
- [14] 万杰. 剪力钉集束式与均布式布置下钢-混组合梁桥受力分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [15] 王西安, 张维昕, 王树来. 某大跨斜拉桥钢混结合段仿真分析[J]. 中外公路, 2012, 32(5): 150-153.

(责任编辑: 陈 雯)