

# 三塔斜拉桥钢箱梁应力分布规律研究

李周<sup>1</sup>, 郑荧光<sup>1</sup>, 危媛丞<sup>2</sup>, 余超<sup>3</sup>

(1. 中建钢构有限公司, 广东 深圳 518048; 2. 深圳市龙华新区大浪办事处 建设工程事务中心, 广东 深圳 518109;

3. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 以某航道桥为工程依托, 对主桥三塔斜拉桥跨中钢箱梁应力进行有限元模拟和现场实测, 分析其应力分布特点。结果表明, 现场实测与有限元计算所得分布趋势基本吻合且均在容许范围内, 结构安全性较高; 底板横桥向正应力和纵桥向正应力均比顶板大, 腹板竖桥向正应力较大, 横隔板各项应力均比顶板、底板和腹板大, 横隔板适当加厚至 30 mm 更符合结构受力情况; 钢箱梁在多种工况下的最大应力不超过 157 MPa, 结构设计经济、合理。

**关键词:** 桥梁; 三塔斜拉桥; 钢箱梁; 应力

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)03-0129-04

随着交通量的剧增, 桥面宽度及跨径均呈增大趋势, 传统的砼主梁斜拉桥已难以满足使用要求, 钢箱梁斜拉桥应运而生。但该类桥的施工控制与以往砼主梁斜拉桥存在较大差异。该文以某航道桥为工程依托, 对主桥三塔斜拉桥跨中钢箱梁应力进行有限元模拟, 分析斜拉桥跨中钢箱梁应力分布特点。

## 1 工程概况

某江海直达船航道桥采用中央单索面三塔钢箱

梁斜拉桥, 斜拉索呈竖琴形单索面布置, 跨径组合为  $(110+129+258+258+129+110)$  m = 994 m。钢箱梁全宽 38.8 m, 中心线处高度为 4.58 m。采用高强低松弛平行钢丝外包双层 PE 保护层的扭绞型成品拉索, 呈扇形布置, 全桥共  $7 \times 2 \times 3 = 42$  根斜拉索, 最长约 135 m, 单根最大重量约 (不计锚具) 为 20 t, 规格均为 GPES7-511, 采用钢箱梁端张拉。该桥总体布置立面见图 1, 钢箱梁跨中标准横断面形式见图 2、图 3。

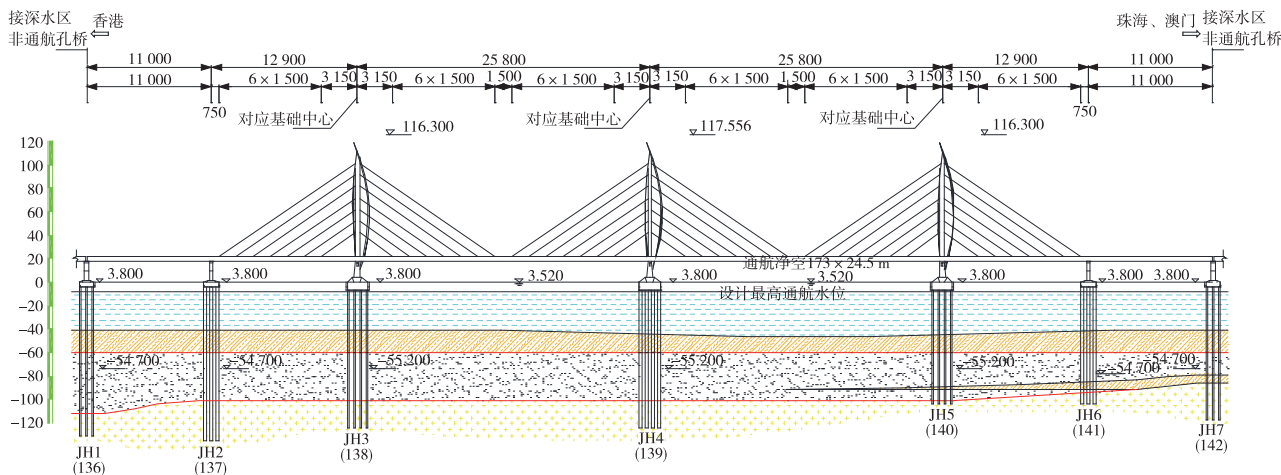


图 1 某通航孔桥总体布置立面图 (单位: 标高为 m, 其他为 cm)

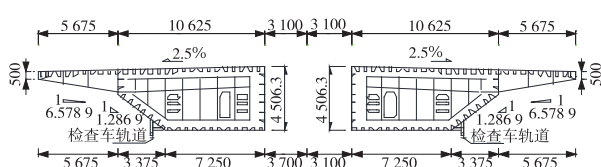


图 2 某通航孔桥钢箱梁横隔板截面 (单位: cm)

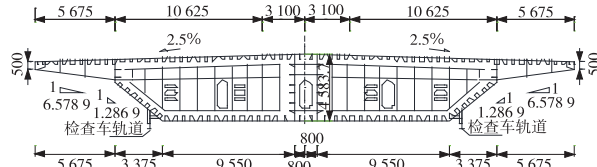


图 3 某通航孔桥钢箱梁横肋截面 (单位: cm)

布设斜拉索的钢箱梁主跨和次边跨区段索塔处的 A 梁段外均采用整箱形式。整箱断面为两侧带长悬臂的单箱三室,箱梁顶板宽为 38.8 m、底板宽为 20.7 m,梁高 4.5 m,悬臂长 5.675 m。斜拉索锚固于两道中腹板形成的中央腔室内。

钢箱梁跨中标准段顶板厚 18 mm,加劲肋采用 U 肋形式,U 肋厚 8 mm、高 300 mm、上口宽 300 mm、下口宽 180 mm、横桥向标准间距 600 mm。底板及斜底板厚 14 mm,加劲肋采用 U 肋形式,厚 6 mm、高 260 mm、上口宽 250 mm、下口宽 400 mm、横桥向标准间距 800 mm。底板的中腹板两侧设置 4 道扁钢加劲肋,扁钢厚 22 mm、高 220 mm。边腹板厚 20 mm,加劲肋采用扁钢形式,扁钢厚 20 mm、高 200 mm。钢箱梁全断面设置 2 道中腹板,厚 30 mm,加劲肋均采用扁钢形式,扁钢厚 24 mm、高 240 mm。横隔板顺桥向标准间距为 5 m,厚 30 mm,其间设置 1 道横肋板,厚 16 mm。

该桥钢箱梁桥面较宽,达 38.8 m,需承受双向六车道公路活载。

## 2 钢箱梁分析模型

### 2.1 有限元模型

选取主跨跨中标准节段整体钢箱梁断面为分析对象,采用通用有限元软件 ANSYS 建立局部板单元模型,运用四节点 Shell63 弹性壳单元进行模拟。模型中横隔板、横肋板、加劲肋等的尺寸和位置与设计一致。由于横隔板处的过人孔和管线孔尺寸很小,对横隔板削弱较小,模型中不考虑过人孔。横桥向长度为整个桥宽范围,纵桥向长度为 5 m,包括 1 个横隔板、2 个横肋板节段。模型共划分为 10 324 个单元、9 901 个节点(见图 4)。

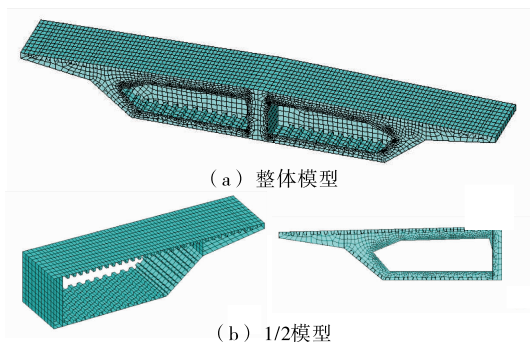


图 4 某通航孔桥钢箱梁有限元分析模型

### 2.2 材料参数

模型中钢箱梁顶板、底板、腹板、横隔板及加劲

肋均采用 Q345qD 钢,其技术参数见表 1。

表 1 钢板的技术参数

项目	参数值
弹性模量/MPa	206 000
泊松比	0.3
材料密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	7 850
热膨胀系数/℃ <sup>-1</sup>	0.000 012

### 2.3 边界条件

选取一段标准钢箱梁节段进行分析,将该节段钢箱梁考虑为支撑在每块横隔板上的结构。每个横隔板的两侧约束竖向自由度;为保证结构体系静定且计算收敛,约束个别节点的纵向和横向自由度。

### 2.4 荷载及荷载组合

(1) 恒载、活载。按照规范及设计取值,二期恒载换算为压强荷载施加至钢箱梁顶板上。

(2) 温度荷载。整体升、降温按照模型整体升温、降温 30 ℃考虑,温度梯度模式按照欧洲规范 BSEN 1991-1-5:2003 计算。

(3) 荷载组合(见表 2)。

表 2 荷载组合

工况名	工况编号	工况说明
恒载	工况 1	梁体自重+二期恒载
活载	工况 2	公路活载
整体升、降温	工况 3	整体升温
	工况 4	整体降温
温度梯度	工况 5	正温差
	工况 6	负温差
恒载+活载	工况 7	工况 1+工况 2
恒载+活载+整体升温+正温差	工况 8	工况 7+工况 3+工况 5
恒载+活载+整体升温+负温差	工况 9	工况 7+工况 3+工况 6
恒载+活载+整体降温+正温差	工况 10	工况 7+工况 4+工况 5
恒载+活载+整体降温+负温差	工况 11	工况 7+工况 4+工况 6
最大包络	工况 12	工况 1~11 最大值包络

限于篇幅,仅选取最具代表性的工况 7(恒载+活载)和工况 12(工况 1~11 最大值包络)两种工况

的计算结果进行分析。

3 计算结果分析

3.1 计算结果

钢箱梁整体应力、顶板应力、底板应力、腹板应

力、横隔板应力计算结果见表 3~7,其中压应力为负,拉应力为正。

从表 3~7 可看出:在工况 7 和工况 12 作用下,钢箱梁各项应力指标均在容许范围(210 MPa)内;底板横桥向正应力和纵桥向正应力比顶板大,腹板

表 3 全桥各项应力分布 MPa

工况	横桥向正应力 $\sigma_x$	竖桥向正应力 $\sigma_y$	纵桥向正应力 $\sigma_z$	第一主应力 $\sigma_1$	第三主应力 $\sigma_3$	Von-Mises 应力 $\sigma_v$
工况 7	-39.6~27.5	-83.8~8.8	-19.2~11.7	-5.0~31.4	-84.3~2.4	0.1~91.9
工况 12	-72.0~64.8	-121.8~37.7	-23.0~33.8	-8.8~73.4	-124.7~7.0	0.2~134.0

表 4 顶板各项应力分布 MPa

工况	横桥向正应力 $\sigma_x$	竖桥向正应力 $\sigma_y$	纵桥向正应力 $\sigma_z$	第一主应力 $\sigma_1$	第三主应力 $\sigma_3$	Von-Mises 应力 $\sigma_v$
工况 7	-2.3~11.5	-1.7~3.3	-19.2~6.2	-0.7~11.6	-19.2~1.9	0.2~20.7
工况 12	-33.4~14.2	-3.3~5.1	-24.0~17.3	-2.8~17.3	-34.3~2.9	0.6~30.3

表 5 底板各项应力分布 MPa

工况	横桥向正应力 $\sigma_x$	竖桥向正应力 $\sigma_y$	纵桥向正应力 $\sigma_z$	第一主应力 $\sigma_1$	第三主应力 $\sigma_3$	Von-Mises 应力 $\sigma_v$
工况 7	-31.6~16.5	-2.5~2.9	-10.2~11.8	0~17.1	-31.7~0	0.6~28.1
工况 12	-53.9~26.1	-4.8~2.2	-17.9~18.9	0~28.0	-54.2~0	0.8~47.8

表 6 腹板各项应力分布 MPa

工况	横桥向正应力 $\sigma_x$	竖桥向正应力 $\sigma_y$	纵桥向正应力 $\sigma_z$	第一主应力 $\sigma_1$	第三主应力 $\sigma_3$	Von-Mises 应力 $\sigma_v$
工况 7	-27.8~10.2	-18.3~6.7	-18.1~11.6	-0.9~17.6	-46.2~0	0.1~42.4
工况 12	-45.1~15.9	-29.8~17.5	-20.9~50.4	-1.2~54.5	-74.9~0	2.4~68.5

表 7 横隔板各项应力分布 MPa

工况	横桥向正应力 $\sigma_x$	竖桥向正应力 $\sigma_y$	第一主应力 $\sigma_1$	第三主应力 $\sigma_3$	Von-Mises 应力 $\sigma_v$
工况 7	-41.9~27.5	-97.1~13.2	0~31.4	-98.0~0	0.4~91.9
工况 12	-72.0~64.8	-152.7~50.2	0~73.4	-156.3~0	0.5~142.5

竖桥向正应力较大,横隔板各项应力均比顶板、底板和腹板大,说明横隔板受力较大,将横隔板受力较大位置加厚到 30 mm 较符合结构受力情况;钢箱梁在多种工况下的最大应力不超过 157 MPa,结构设计经济、合理。

3.2 实测结果对比分析

在主跨跨中钢箱梁截面的顶板和底板共布置 10 个纵向应变计,其中 1# 测点位于顶板近边腹板 0.1 m 处,2# 测点位于边腹板与中腹板间顶板的中间,3# 测点位于桥中线顶板处,4# 测点位于桥中线底板处,5# 测点位于近斜底板 0.1 m 的底板处,6# 测点位于边腹板的中间。左、右侧测点对称布置,均

为纵向埋设(见图 5)。

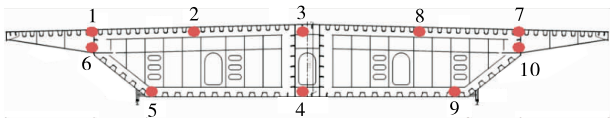


图 5 整体式钢箱梁应力测试截面测点布置示意图

取工况 12 最大包络作用下的应力计算结果与成桥后跨中截面的应力实测结果最大值进行对比分析(见表 8)。从表 8 可看出:应力实测结果均在容许值范围内,顶板应力总体比底板应力略大;实测应力变化趋势与计算值基本一致,偏差可接受,验证了有限元计算手段的可靠性。

表8 应力监控结果

测点编号	应力/MPa		测点编号	应力/MPa	
	实测值	计算值		实测值	计算值
1	-31.2	-29.5	6	-76.2	-77.0
2	22.3	18.7	7	10.0	5.7
3	-84.8	-98.0	8	-76.2	-69.9
4	-8.6	-12.3	9	10.1	7.8
5	-29.7	-35.6	10	-99.8	-89.5

#### 4 结论

(1) 钢箱梁局部应力实测值、计算结果均在容许范围内,多种工况下最大应力不超过 157 MPa,钢箱梁结构设计经济、合理。

(2) 钢箱梁底板横桥向正应力和纵桥向正应力均比顶板大,腹板竖桥向正应力较大,横隔板各项应力均比顶板、底板和腹板大,横隔板应适当加厚。

(3) 应力测试是检验钢箱梁工作性能的重要手段,与有限元模拟计算结合考虑,能反映钢箱梁真实受力状态。

#### 参考文献:

[1] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版

社,2007.

- [2] 陈光华.斜拉桥的发展现状与发展趋势[J].山西建筑,2008,34(19).
- [3] 巩春领.大跨度斜拉桥施工风险分析与对策研究[D].上海:同济大学,2006.
- [4] 陈德伟,郑信光,项海帆.混凝土斜拉桥的施工控制[J].土木工程学报,1993,26(1).
- [5] 何畏,唐亮,强士中,等.大跨度焊接钢箱梁斜拉桥施工控制技术研究及应用[J].桥梁建设,2002(5).
- [6] 孔祥福,周绪红,狄谨,等.钢箱梁斜拉桥正交异性桥面板的受力性能[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(3).
- [7] 杨帅.三塔钢箱梁斜拉桥施工控制关键技术及其参数敏感性研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [8] 李亚陵,刘灿,李瑞祥.钢箱梁斜拉桥悬臂拼装流程优化分析[J].公路与汽运,2018(1).
- [9] 张勇.斜拉桥钢箱梁横隔板 U 肋槽口整改方案研究[J].公路与汽运,2017(4).
- [10] 李忠三.基于静动力特性的多塔长跨斜拉桥结构体系刚度研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [11] 刘清平,王静峰.斜拉桥钢箱梁在车辆荷载作用下的局部应力分析[J].长江大学学报:自然科学版,2004,1(增刊1).

收稿日期:2017-12-13

(上接第 126 页)

结果与实际偏差较大,力矩平衡法只能用于索力估算和扣索型号选取,弹性-刚性支承法的计算结果更合理、更贴近实际施工情况。

(2) 针对传统索力计算方法局部阶段拉应力超限的问题,采用基于 MIDAS/Civil 平台中未知荷载系数的影响矩阵法进行索力优化计算,对比优化分析法与传统方法计算的索力对拱肋应力和线形的影响,结果表明优化分析法能更好地控制线形及各施工阶段的拉、压应力。

(3) 采用不同方法计算的扣索索力各不相同,合理的仿真计算方法对施工分析具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 周水兴,江礼忠,曾忠,等.拱桥节段施工斜拉扣挂索力仿真计算研究[J].重庆交通学院学报,2000,19(3).
- [2] 梅盖伟.基于裸拱变形为控制目标的索力计算方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.

- [3] 田仲初.大跨度钢箱拱桥的施工控制关键技术与动力特性研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [4] 田仲初,陈得良,颜东煌,等.大跨度拱桥拱圈拼装过程中扣索索力和标高预抬量的确定[J].铁道学报,2004,26(3).
- [5] 龚子松.钢管混凝土拱桥拱肋吊装分析与扣索索力优化[J].公路工程,2015,40(5).
- [6] 陈妍如.大宁河特大桥拱肋安装斜拉扣索索力与预抬量计算分析[D].重庆:重庆交通大学,2008.
- [7] 秦斌.拱桥斜拉扣挂施工中的扣索索力优化研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [8] 肖伟.超大跨度钢管混凝土拱桥施工过程中扣索索力计算方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [9] 张明中.大跨度钢管混凝土拱桥施工过程仿真计算分析[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [10] 刘邵平.大跨度多肋拱桥施工控制索力优化分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.

收稿日期:2017-11-06