

单箱多室钢箱梁复杂拼装施工的结构分析

彭 玮

(上海城投航道建设有限公司, 上海市 200441)

摘 要: 由于钢构件陆地运输能力与现场施工条件的限制, 钢箱梁采用纵横向结构分块并直接在少支架上拼装的施工方案。整个拼装施工过程比较复杂, 需采用精细的结构分析对施工进行指导。为此, 以某桥梁工程的单箱多室钢箱梁为例, 利用结构分析软件SAP2000的三维板壳单元建立钢箱梁分块结构的三维空间模型, 分析了分块结构拼装过程的变形与应力, 并利用梁单元简化分析了钢箱梁节段整个拼装过程的整体应力与变形。结构分析得到的计算结果有效地指导了钢箱梁的拼装施工, 其分析方法可为类似工程提供参考。

关键词: 单箱多室钢箱梁; 结构分块; 拼装施工; 有限元分析; 施工指导

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0229-04

Structural Analysis on Complex Assembly Construction of Single-box Multi-cell Steel Box Girder

PENG Wei

(Shanghai Chengtou Waterway Construction Co., Ltd., Shanghai 200441, China)

Abstract: Due to the limitations of steel member land transportation capacity and on-site construction conditions, the construction scheme of directly assembling longitudinal and transverse structural partitioning blocks on few supports is adopted for the steel box girder. The entire assembly construction process is relatively complex, and the precise structural analysis is needed to guide the construction. Therefore, taking a single-box multi-cell steel box girder of a bridge engineering as an example, a three-dimensional models for partitioning block structures of steel box girder are established using structural analysis software SAP2000 to analyze the deformation and stress during the assembly process of block structures. And the overall stress and deformation in the entire assembly process of steel box girder segment are simplified and analyzed by using beam elements. The calculation results obtained from structural analysis have effectively guided the assembly construction of steel box girder, and the analysis method can provide reference for other similar projects.

Keywords: single-box multi-cell steel box girder; structural partitioning; assembly construction; finite element analysis; construction guidance

0 引 言

近十几年来, 钢结构在桥梁工程中的应用越来越广。在某些钢构件运输以及现场拼装条件受到限制的桥址, 由于桥梁建筑造型的需要而采用了钢结构的设计方案, 此时就需对钢结构纵向进行分段处理, 若桥梁宽度超过运输限宽, 还需在其横向上作分块处理; 如果因现场场地或吊装能力所限而无法预拼成大节段吊装, 则需要少在少支架上直接进行拼装。这样的工程实例近年来越来越多。

某异形钢拱桥, 主梁采用钢箱梁。受钢构件陆

地运输的尺寸、现场拼装场地以及吊装设备能力等条件的限制, 钢结构加工及安装单位经过优化, 采用以下施工方案: 钢主梁纵向分为3个节段, 每个节段在横向分为8块, 其纵向在支架上先拼装两侧短节段, 然后拼装跨度最大的中间节段; 每个纵向节段在横向的拼装顺序为: 安装5#→2#与3#拼接、6#与7#拼接→5#与6#、7#已拼接的结构拼装→安装4#嵌补段→安装1#与8#挑臂段。

钢主梁的纵向分段、横向分块、分块平面示意图见图1至图3。

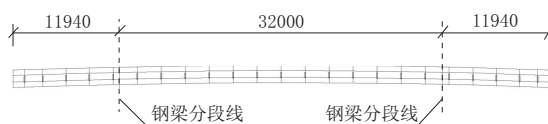


图1 钢主梁纵向分段示意图(单位:mm)

收稿日期: 2024-07-10

作者简介: 彭玮(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 从事工程项目施工及技术管理工作。

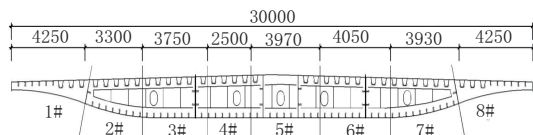


图2 钢主梁横向分块示意图(单位:mm)

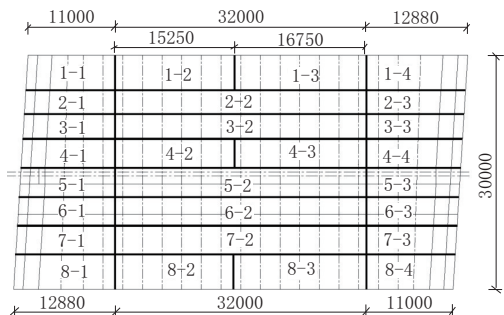


图3 钢主梁分块平面示意图(单位:mm)

由图1至图3可知:2#、3#、6#、7#分块纵向包含1道腹板,5#包含2道腹板,而1#、4#、8#纵向没有腹板;2#、3#、6#、7#为开口截面,纵向节段的最大跨度为32 m,且截面为不对称截面,在吊装过程中容易发生扭转变形,必须在截面开口端沿纵向进行临时加固;1#、4#、8#纵向没有腹板,分段长度最大约16.75 m,在吊装过程中要关注梁段的变形。

钢主梁横向各个梁段的梁高和竖向刚度都不同,吊装过程中发生的变形也可能不同,相邻分块之间会存在一定的高差。如果采用码板强行拼接,钢结构横向会产生一定的附加应力;而且,主梁的纵向受力也可能难以符合整体截面受力的设计意图。所以,钢主梁梁段拼装线形的控制也即拼装过程中各个梁段的变形控制是该项目施工的重点和难点。

对于以上这些可能存在的问题,必须进行详细的定量和定性结构分析,并提出解决这些问题的措施。

1 建立有限元模型

根据施工方案,整个钢主梁截面横向分为8块,其中2#、3#、5#、6#、7#梁段在拼装时为纵向受力构件,4#梁段为嵌补段,1#、8#梁段为挑臂后安装段。从分段的尺寸和截面形式可知,2#与7#相似,3#与6#相似,所以选择2#、5#、6#作为分析对象,计算跨度采用纵向中间节段的最大跨度32 m。

结构分析采用大型结构分析软件SAP2000^[1]并参考文献[2],计算模型采用三维板壳单元建立,模型按实际施工图考虑了横坡、纵向受力板件、加劲肋、横隔板以及开洞等。各个梁段的有限元模型见图4至图6。

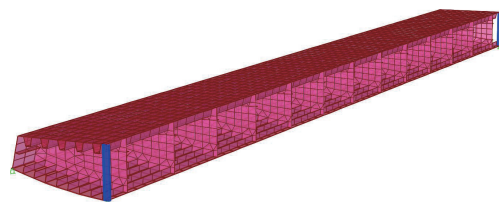


图4 2#梁段有限元模型

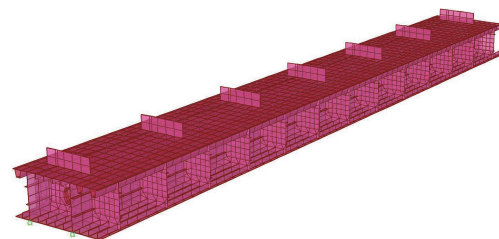


图5 5#梁段有限元模型

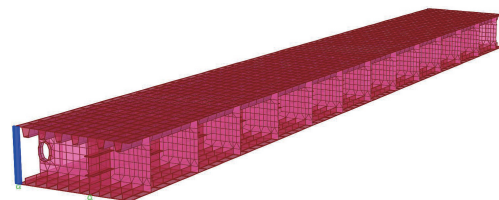


图6 6#梁段有限元模型

计算模型约束采用一端2个点3个方向线位移约束,另外一端2个点竖向与横向线位移约束、纵向线位移自由;其中,2#与6#每端的一个支点在腹板的位置,另外一个支点在端部区域的竖向临时加强杆件位置,5#的所有支点均在腹板位置。

2 三维板壳单元分析结果

根据三维板壳单元的有限元模型分析结果,梁段2#、5#、6#没有采取加强措施前的变形图见图7至图9。

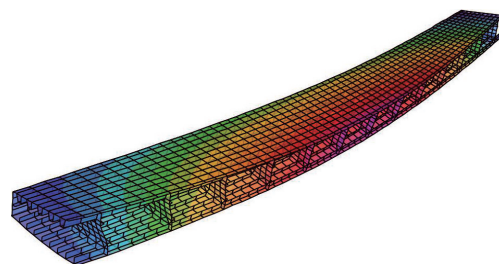


图7 2#梁段变形图

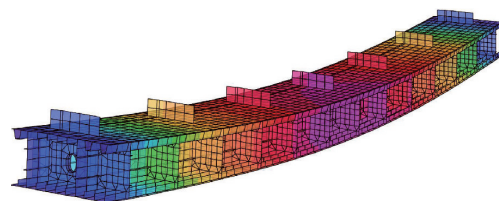


图8 5#梁段变形图

由图7至图9可知:2#梁段的扭转变形最明显,6#次之;5#为闭口截面,扭转刚度大,扭转变形不明

显。各个梁段变形最大的跨中截面竖向变形值见表 1。

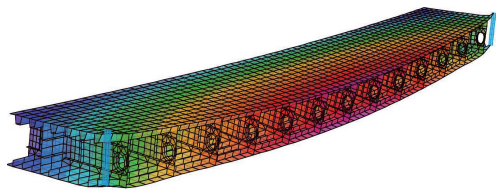


图 9 6#梁段变形图

表 1 各个梁段跨中截面竖向变形 单位:mm			
梁段	截面左侧	截面右侧	横向变形差
2#	65.8	194.3	128.5
5#	11.0	11.7	0.7
6#	38.4	3.6	34.8

由表 1 可知,2#、6#梁段如果不采取加强措施,在拼装过程中其截面将发生明显扭转,不能满足拼装精度控制的要求;5#为闭口截面,安装过程中发生的扭转变形较小,可不采取加强措施。

在 2#、6#梁段截面的开口端沿纵向采用 20a 型槽钢进行桁架式加强,槽钢的强轴方向以竖向受力为主。加强后的结构有限元模型图见图 10、图 11;变形图见图 12、图 13;跨中截面的竖向变形值见表 2。

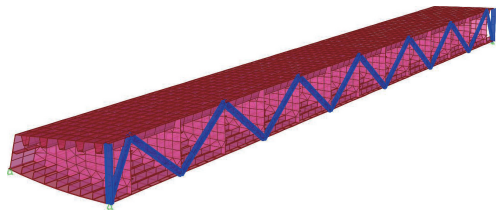


图 10 2#梁段加强后的结构有限元模型

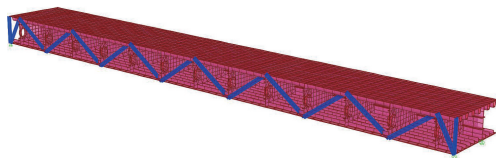


图 11 6#梁段加强后的结构有限元模型

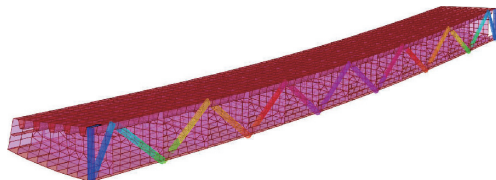


图 12 2#梁段加强后的变形图

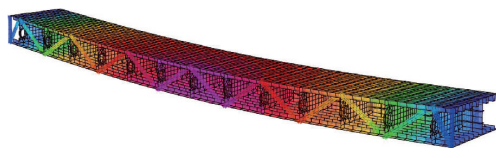


图 13 6#梁段加强后的变形图

由表 2 可知,加强后,2#与 6#梁段的抗扭特性得到了明显改善,特别是 2#梁段的跨中截面最大变形

表 2 加强后各个梁段跨中截面竖向变形 单位:mm			
梁段	截面左侧	截面右侧	横向变形差
2#	18.4	23.4	5.0
6#	13.6	11.7	1.9

差由加强前的 128.5 mm 减小到 5.0 mm,一般能够满足拼装精度的控制要求。2#截面与 7#相似,3#与 6#相似;2#梁段的跨中平均竖向变形为 21 mm,比 6#的 13 mm 大 8 mm,宜适当调整 2#(7#)的预拱度,以确保 2#(7#)与 3#(6#)的拼接。

经计算得到,2#梁段加强构件槽钢最小/最大轴力为-190 kN(受压)/224 kN(受拉),最小/最大应力为-74 MPa(压应力)/91 MPa(拉应力);6#梁段加强构件槽钢最小/最大轴力为-92 kN(受压)/110 kN(受拉),最小/最大应力为-38 MPa(压应力)/43 MPa(拉应力);根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)验算,槽钢能够满足其强度要求。

各个梁段跨中截面的应力见表 3,表中应力以压应力为负、拉应力为正。

表 3 各个梁段跨中截面的正应力 单位:MPa		
梁段	顶板应力	底板应力
2#	-24	20
5#	-20	18
6#	-20	18

由表 3 可知,各个梁段安装时的正应力比较小。

根据施工流程,在 3#梁段(3#截面与 6#相似、近似用 6#梁段模型来分析)与 5#梁段等纵向受力构件安装完毕后,要进行 4#嵌补段的安装。假如在安装过程中,嵌补段的各 50% 重量沿纵向分别施加在 3#、5#梁段上,且假设作用于梁段拼接侧的顶板边缘。计算得到的跨中截面变形与应力见表 4、表 5。

表 4 安装 4#嵌补段,各个梁段跨中截面竖向变形 单位:mm			
梁段	截面左侧	截面右侧	横向变形差
5#	3.7	2.6	1.1
3#(6#)	2.6	4.8	2.2

表 5 安装 4#嵌补段,各个梁段跨中截面的正应力 单位:MPa		
梁段	顶板应力	底板应力
5#	-5.6	5.3
3#(6#)	-6.4	6.2

由表 4、表 5 可知,安装 4#嵌补段所引起的 3#(6#)、5#梁段的附加变形和应力均很小,在拼装中可以先采用码板进行固定,然后进行纵向焊缝的焊接。

3 梁单元分析结果

利用三维板壳单元建立每个分块结构的计算模

型比较费时,以下利用梁单元来计算 32 m 跨节段横向拼装过程中各个受力梁段的整体应力和变形,得到的计算结果也可以验证三维有限元模型的分析结果。

假定 2#、3#、6#、7#梁段的开口截面进行了有效的加强,由截面扭转产生的变形和应力在采用梁单元分析时不予考虑。利用 SAP2000 结构分析软件的截面设计模块计算各个梁段截面和主梁整体截面 0# 的几何特性。各个纵向梁段及整体截面在自重作用下的应力和变形见表 6。表 6 中: A 为面积; I 为竖向抗弯惯性矩; q 为梁段自重的等效线荷载(等于相应截面面积 $\times$ 等效容重,其中等效容重可由设计图纸中钢梁段重量、长度、整体截面面积计算得到); S_{top} 、 S_{bot} 分别为跨中截面顶缘、底缘处的正应力; d 为跨中竖向位移。

表 6 各梁段及整体截面在自重作用下的应力和变形						
梁段	A/m^2	I/m^4	$q/(kN\cdot m^{-1})$	S_{top}/MPa	S_{bot}/MPa	d/mm
0#	1.485 2	0.761 2	154.7	-22.5	24.3	13.5
2#	0.185 8	0.072 9	19.4	-26.2	29.2	17.6
3#	0.226 5	0.128 2	23.6	-21.5	19.3	12.2
5#	0.254 7	0.154 2	26.5	-21.0	18.6	11.4
6#	0.239 9	0.139 8	25.0	-21.4	18.5	11.9
7#	0.219 8	0.093 0	22.9	-25.2	27.1	16.3

由表 6 可得,2#、5#、6#的梁单元计算结果与相应的有限元三维模型(2#、6#经过有效加强)计算结果非常吻合,进一步验证了三维模型的有效性。根据表 6 数据可知,3#、5#、6#的应力和变形略小于整体截面 0# 的应力和变形,而 2#、7#的应力和变形要大于整体截面。因此,在钢箱梁制作时,宜适当调整 2#、7#梁段的制作预拱度,以便其与相邻梁段的拼接。

根据施工顺序,纵向受力梁段拼接后进行 4#嵌补段的拼接。为进行对比分析,假设 2 种工况:(1) 4#梁段自重的 50% 作用在 2#、3#梁段的已拼接截面上,另外 50% 作用在 5#梁段上;(2) 作用在 2#、3#拼接梁段上的 50% 自重单独作用在 3#梁段上。在 2#~7#拼接成一个箱形截面后,进行 1#与 8#挑臂段的安装。以上述 2 种工况下,梁段变形和应力的计算结果列于表 7。表 7 中, Δq 表示作用在梁段或已拼接梁段上的线荷载增量。

根据表 7 可知,在进行 4#嵌补段的安装时,不同工况下的梁段应力和变形均较小,这些计算结果与表 4、表 5 中对应工况的结果也基本一致;在 2#~7#拼接形成整体截面后进行 2 个挑臂段的安装,此工况引起的应力和变形也较小。

表 7 各个典型拼接阶段梁段的附加应力及变形						
梁段	A/m^2	I/m^4	$\Delta q/(kN\cdot m^{-1})$	S_{top}/MPa	S_{bot}/MPa	d/mm
2#、3#	0.412 3	0.201 6	7.1	-4.0	3.8	2.3
3#	0.226 5	0.128 2	7.1	-6.4	5.8	3.6
5#	0.254 7	0.154 2	7.1	-5.6	5.0	3.0
2#~7#	1.261 2	0.679 7	23.3	-4.2	3.7	2.3

由梁单元的分析结果可知,若不考虑各个梁段拼接过程中由于调整相对高差所引起的附加应力(通常采用码板码平)以及局部受力引起的局部应力,综合表 6、表 7 的计算数据可知,在各个梁段的拼接过程中,截面的应力要比整体截面的应力大 12.4 MPa,出现在 2#跨中下缘,而竖向变形比整体截面大 8.7 mm,出现在 2#跨中。在实际的施工监控中,综合参考了三维有限元板壳模型和梁单元分析的计算结果,对 32 m 节段的 2#、7#梁段跨中多设了 8 mm 的恒载预抛高(预抛高从梁段的支点到跨中以 2 次抛物线变化),从而解决了梁段之间拼缝的平顺问题。此外,在承载力基本组合下,考虑以上增加部分的应力,钢主梁组合应力的最大值小于《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)Q345 钢材的应力限值 270 MPa(板厚 16~40 mm),说明结构的受力安全。

4 结 语

- (1)利用三维板壳单元模型,分析了各受力梁段在拼装过程中的变形情况。根据分析结果,建议施工单位对 2#、3#、6#、7#梁段的开口端沿纵向采用 20a 型槽钢进行桁架式加强。加强后的梁段大大增强了截面的抗扭特性,确保了梁段的顺利拼接。
- (2)利用简单的梁单元分析了梁段拼接过程中总体应力和变形的变化情况,把握了这些变化值对钢主梁预拱度设置以及结构受力的影响。
- (3)根据施工监控的实测结果,各个梁段之间梁底、梁顶拼缝平顺,钢主梁拼装线形较好,成桥线形理论标高与实测标高相差在 ± 2 cm 以内,能够满足《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)和《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2017)(第 1 册 土建工程)的要求。目前,该桥已经建成通车。

参考文献:
[1] 北京金土木软件技术有限公司.SAP2000 CSI 分析参考手册[R].北京:北京金土木软件技术有限公司,2007.
[2] 韩大建,梁立农,徐郁峰,等.珠江大桥有限元仿真分析[J].桥梁建设,2004(3):34-37.