

# 下弦开敞桁式波形钢腹板组合箱梁桥施工过程的力学分析

吴丽丽, 邹 悟, 耿大林, 于雅倩

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘 要** 目的 对比 T 构-单悬臂连续施工、逐跨连续悬臂施工和顶推施工 3 种施工方法, 确定适合下弦开敞桁式波形钢腹板组合箱梁桥的施工方法。方法 应用有限元软件分析 3 种施工方法对波形钢腹板组合箱梁桥的影响, 建立组合箱梁桥的局部三维精细模型, 分析顶推法施工过程中体系转化和局部受力的变化规律。结果 在施工过程中, 顶推施工整体的弯矩、剪力以及变形较小。顶推施工中, 导梁的拆除对体系影响较小, 而临时墩拆除对顶推施工有较大影响, 会导致弯矩、剪力和位移均大幅增长, 但增长后数值小于其他两种悬臂施工法。在最大悬臂工序时, 导梁前端挠度变形最大, 满足《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T F50—2011) 要求。导梁腹板在支座处由于受到支反力的集中作用, 部分拉应力较大, 但分布范围较小, 总体上剪力滞影响程度小。结论 利用顶推法对下弦开敞桁式波形钢腹板组合箱梁桥进行施工, 可行性和安全性较高。

**关键词** 波形钢腹板; 组合箱梁桥; 悬臂施工; 顶推施工; 体系转化

中图分类号 TU528.571; U448.216

文献标志码 A

## Mechanical Analysis of Construction Process of Combined Box-girder Bridge with Corrugated Steel Webs and Open Bottom Truss

WU Lili, ZOU Wu, GENG Dalin, YU Yaqian

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing, China 100083)

**Abstract:** By comparing the three construction methods of continuous construction of T-shaped single cantilever, span by span continuous cantilever construction and jacking construction, the construction method suitable for combined box-girder bridge with corrugated steel webs and open bottom truss is determined. Influence of the three construction methods on the structure is

收稿日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178177)

作者简介: 吴丽丽(1977—), 女, 教授, 主要从事钢结构、钢-混凝土组合结构方面研究。

comprehensively analyzed by the finite element software; the local three-dimensional model of the composite box girder bridge is established, and the system transformation and local stress variation law in the process of jacking construction are studied. It is found that in the construction process, the bending moment, shear force and deformation of jacking construction are small. Furthermore. The results show that the demolition of the assistant beam has little influence on the mechanical system, while the demolition of the temporary pier has great effects on the jacking construction, which could increase the bending moment, shear force and displacement, but the increased value is still smaller than the other two cantilever construction methods; In construction process of the maximum cantilever, the front end of assistant beam has the largest deflection, while it still meets the specification (JTG/T F50—2011) requirements. Due to the concentrated action of the reaction force, the tensile stress in the web of the guide beam is larger, but with a limited distribution range, and the influence of shear lag is small. It is feasible and safe to construct combined box-girder bridge with corrugated steel webs and open bottom truss by using the jacking construction.

**Key words:** corrugated steel webs; combined box-girder bridge; cantilever construction; jacking construction; system transformation

波形钢腹板组合箱梁桥由于具有结构形式合理、造型美观、自重轻、经济性好等优点,被广泛用于大型桥梁工程中。波形钢腹板组合箱梁桥采用轻薄的波形钢腹板替代了普通混凝土箱梁中厚重的混凝土腹板<sup>[1]</sup>,显著降低了结构自重,大大减少了现场湿作业量。邓强民等<sup>[2]</sup>运用有限元正交数值模拟来分析大跨钢桥桥面铺装有限元分析简化模型,提出纵边自由,横边简支,横隔板底固结约束的简化模型。冀伟等<sup>[3]</sup>提出了一种结合 Fmincon 算法和响应面法的适用于波形钢腹板组合箱梁桥的有限元模型修正方法。L. M. Tian等<sup>[4]</sup>提出了模拟大跨度刚性钢结构施工过程中结构行为节点修正的单元生死法。叶智武等<sup>[5]</sup>将每个施工阶段分为初始时刻和结束时刻进行分析,提出了结构刚度矩阵修正的新方法以及修正设计位形定位法。关于桥梁施工工艺和过程模拟分析, M. F. Granata 等<sup>[6]</sup>通过在曲线梁桥中采用转换矩阵的方法来对其顶推施工进行数值分析。姚红兵等<sup>[7]</sup>采用有限元软件对波形钢腹板组合连续刚构桥的自承重施工过程进行了模拟。刘旭政等<sup>[8]</sup>通过有限元分析得到荷载类型对波刚腹板组合箱梁桥影响较大。许世展等<sup>[9]</sup>发现波形钢腹板组合梁桥悬臂

施工下悬臂根部顶板应力分布最不均匀。王春江等<sup>[10]</sup>通过有限元建立精细梁杆模型对钢箱梁悬索桥施工阶段的稳定承载力进行了分析。D. WANG 等<sup>[11]</sup>对波形钢腹板组合箱梁桥的新型异步悬臂施工全过程进行了模拟。一种新型的下弦开敞桁式波形钢腹板组合梁桥<sup>[12]</sup>,将传统的混凝土底板置换为方钢管开敞桁式下弦,避免了下部受拉翼缘混凝土裂缝外露等问题。针对下弦开敞桁式波形钢腹板组合梁桥,笔者采用空间梁系模型,对比 T 构-单悬臂连续施工、逐跨连续悬臂施工和顶推施工 3 种施工方法对桥梁施工过程受力性能的影响,并从中选取最优的施工方法进行体系转化状态分析和典型施工阶段的局部三维精细模型分析。

## 1 3 种桥梁施工方法对比

### 1.1 有限元建模

考虑到桥梁较长、施工工序较多,若建立实体模型,单元划分的工作量大,计算耗时长,所以仅采用空间梁系单元进行建模,并将结构视为统一的混凝土材料。

在组合箱梁桥的有限元模型中,主梁和钢导梁选用空间三维有限应变梁单元 BEAM188,异形截面采用 PLANE82 单元模

拟;利用 ANSYS 中单元生死功能,在求解中根据施工方法和施工过程的不同阶段定义载荷步,随着施工的行进,激活相应梁单元,设置对应约束与力,固定支座约束所有自由度,简支支座约束 X 轴和 Y 轴的平动自由度以及 Y 轴的转动自由度。

3 种施工方式采用同一截面和跨径,模型中采用等截面三跨连续组合箱梁桥进行 3 种施工方式的对比模拟,桥梁全长 48 m + 80 m + 48 m = 176 m,桥梁截面如图 1 所示。模型统一采用 C50 混凝土材料进行模拟。

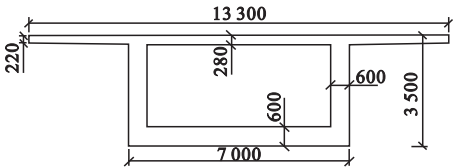


图 1 桥梁截面图

Fig. 1 Bridge section

计算模型每 1 m 划分一个单元,悬臂施工共计划分为 176 个单元,顶推施工为 208 个单元,有限元模型如图 2 所示。

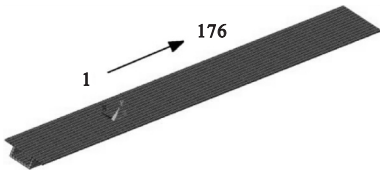


图 2 有限元单元分布图

Fig. 2 Element distribution

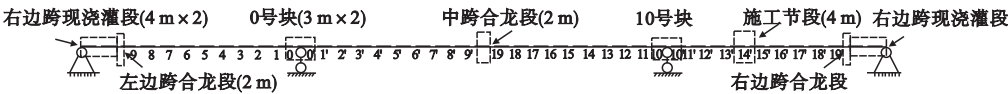


图 4 悬臂施工节块分布

Fig. 4 Block distribution of cantilever construction

1.2.2 逐跨连续悬臂施工

逐跨连续悬臂施工的施工顺序如图 3 所示。从 B 墩开始进行悬臂施工;A 端岸跨边段 2 合龙,释放 B 墩临时固结,形成单悬臂梁;C 墩进行悬臂施工;BC 跨中间段 5 合龙,释放 C 墩临时固结,形成带悬臂的两跨连续梁,最后进行 D 端岸跨边段 4 合拢。

逐跨连续悬臂施工的施工过程模拟同样

1.2 施工段划

1.2.1 T 构 - 单悬臂连续施工

T 构 - 单悬臂连续施工的施工顺序如图 3 所示。从 B 墩开始进行悬臂施工;A 端岸跨边段 2 合龙,释放 B 墩临时固结,形成单悬臂梁;C 墩进行悬臂施工;D 端岸跨边段 4 合龙,释放 C 墩临时固结形成单悬臂梁;BC 跨中段 5 合龙,形成 3 跨连续梁结构。

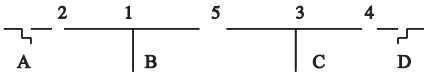


图 3 施工顺序图

Fig. 3 Diagram of construction sequences

T 构 - 单悬臂连续施工的施工过程模拟为 46 个施工阶段(见图 4)。施工阶段 1 ~ 18 分别为 0# ~ 9#块的依次施工;施工阶段 19 ~ 21 为左边跨现浇段施工及合龙(支座转换);施工阶段 22 ~ 39 分别为 10# ~ 19#块的施工;40 ~ 42 为右边跨现浇段施工及合龙(支座转换);施工阶段 43 ~ 45 为中跨合龙(支座转换)阶段;施工阶段 46 为去除所有力仅留自重荷载。每个悬臂梁段的施工过程简化模拟为挂篮前移、浇筑混凝土两个阶段,必要时加入拆除挂篮阶段。施工阶段主要承受施工荷载 3 000 Pa;挂篮荷载为  $4 \times 10^5$  N;节段荷载为  $9 \times 10^5$  N。

为 46 个施工阶段(见图 4)。施工阶段 0 ~ 39 以及 46 与 T 构 - 单悬臂连续施工完全一致;此外的施工阶段 40 ~ 42 为中跨合拢阶段,43 ~ 45 为右边跨现浇段施工及合龙。施工过程简化和施工荷载也与 T 构 - 单悬臂连续施工相同。

1.2.3 顶推施工

顶推施工是在桥台的后方设置施工场

地,分阶段浇筑梁体,并用纵向预应力筋将浇筑阶段与已完成的梁体联成整体,在梁体前安装钢导梁,然后通过水平千斤顶施力,将梁体向前方顶推出施工场地,重复这些工序即可完成全部梁体施工。顶推施工法每节段取16 m,导梁长度取跨径的2/3即32 m,临时墩的布设参考文献[13]、文献[14]、文

献[15],临时墩及节段布置如图5所示。全部施工过程模拟为14个施工阶段,施工阶段1激活导梁和对应1#墩及临1墩;施工阶段2激活主梁1和2#墩;施工阶段3~11依次激活主梁2~10和对应墩;施工阶段12拆除导梁,激活主梁11;施工阶段13拆除临时墩;施工阶段14为支座转换。

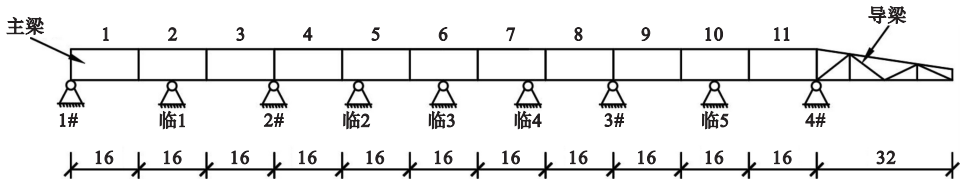


图5 临时墩及节段布置

Fig.5 Layout of temporary piers and sections

1.3 3种施工方法的计算结果对比

1.3.1 竖向变形对比

竖向变形的控制是多跨连续箱梁桥悬臂浇筑施工至关重要的任务之一(见图6)。对比悬臂施工和顶推施工全过程位移可以发现,对于悬臂施工,在T构悬臂施工阶段0~20,随着施工阶段的进行,竖向位移逐渐增大,悬臂施工过程中最大位移皆在50 mm以上,主要出现在T构施工的悬臂端附近;而

顶推施工过程中主梁与导梁向前推进时,最大位移维持在5 mm以内,变化幅值不大。从支座转换来看,顶推施工法挠度值相较悬臂施工变化较大,这是因为去除临时支座,结构由八跨转变为三跨,故最大位移突然增大;支座转换时,中间两支座变为铰接,位移进一步增大,故支座的拆除以及支座的转换对主梁变形会产生较大影响。

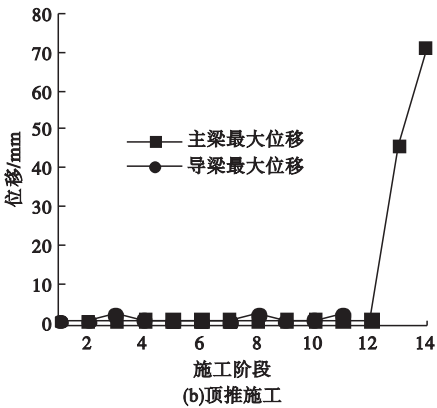
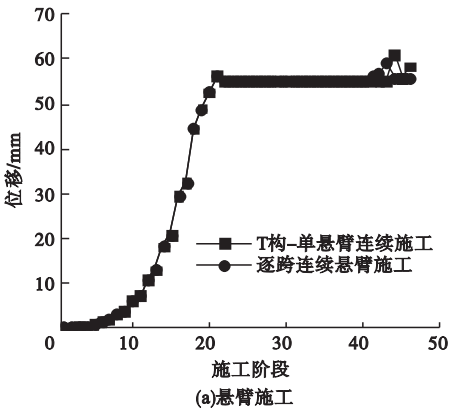


图6 施工位移图

Fig.6 Displacements of construction

1.3.2 弯矩对比

表1为悬臂施工的最不利内力表,表2和表3分别为顶推施工过程中导梁和主梁的最不利内力表。由表1~表3可以看出,从施工过程中内力变化的角度看,悬臂施工最

大弯矩主要出现在2#、3#墩(见图5),最大弯矩值介于197 410~228 200 kN·m;顶推施工过程中,构件的弯矩随梁体前进不断交替变化,最大弯矩出现在导梁上,为100 640 kN·m,主梁弯矩介于6 352~11 239 kN·m,远小于

悬臂施工过程的最大弯矩。从支座转换来看,T 构-单悬臂连续施工支座转换前后的最大弯矩值最大,前后分别为 197 410 kN·m、227 240 kN·m,而顶推施工最小,最大弯矩值由 136 860 kN·m 变为 115 850 kN·m。

表 1 悬臂施工弯矩

Table 1 Bending moment of cantilever construction

| 阶段      | 最大弯矩/(kN·m) |          |
|---------|-------------|----------|
|         | T 构-单悬臂连续施工 | 逐跨连续悬臂施工 |
| 左 T 构施工 | -227 420    | -227 420 |
| 左跨合龙    | -182 040    | -182 040 |
| 右 T 构施工 | -197 410    | -197 410 |
| 中跨合龙    | -228 200    | -212 790 |
| 右跨合龙    | -227 240    | -226 560 |
| 成桥      | -232 390    | -226 910 |

表 2 钢导梁顶推最不利内力

Table 2 Most adverse internal forces of steel assistant beam jacking

| 钢导梁前端离 1#墩距离/m | 最大负弯矩/(kN·m) | 最大正弯矩/(kN·m) |
|----------------|--------------|--------------|
| 48             | -35 290      | 19 947       |
| 64             | -100 640     | 16 515       |
| 144            | -100 640     | 15 289       |
| 176            | -35 290      | 19 947       |

表 3 主梁体系转换内力变化

Table 3 Internal force during system transformation of main beam

| 阶段         | 最大负弯矩/(kN·m) | 最大正弯矩/(kN·m) |
|------------|--------------|--------------|
| 拆除导梁前      | -11 239      | 6 352        |
| 拆除导梁后/临时墩前 | -11 239      | 6 352        |
| 拆除临时墩后     | -136 860     | 71 026       |
| 支座转换       | -115 850     | 93 102       |

1.3.3 剪力对比

表 4 和表 5 为悬臂施工过程和顶推施工过程剪力计算结果。从剪力大小来看,悬臂施工最大剪力主要出现在 2#、3#墩,在 9 862~11 045 kN 变化。顶推施工过程主梁最大剪力为 3 065 kN,约为悬臂施工的四分

之一。从支座转换前后变化来看,悬臂施工和顶推施工的最大剪力变化差距不大,最后均为 10 726 kN。

表 4 悬臂施工剪力

Table 4 Shear of cantilever construction

| 阶段      | 剪力/kN       |         |
|---------|-------------|---------|
|         | T 构-单悬臂连续施工 | 逐跨连续悬臂施 |
| 左 T 构施工 | 11 045      | 11 045  |
| 左 T 构合龙 | 9 862       | 9 862   |
| 右 T 构施工 | 10 262      | 10 262  |
| 右跨合龙    | 10 726      | 10 952  |
| 中跨合龙    | 11 032      | 10 677  |
| 成桥      | 11 164      | 10 997  |

表 5 顶推施工最大剪力

Table 5 Maximum shear of jacking construction

| 阶段     | 剪力/kN  |        |
|--------|--------|--------|
|        | 主梁     | 导梁     |
| 导梁顶推中  | 3 065  | 12 972 |
| 临时墩拆除前 | 3 065  | —      |
| 临时墩拆除后 | 10 528 | —      |
| 支座转换后  | 10 726 | —      |

通过对比 T 构-单悬臂连续施工、逐跨连续悬臂施工和顶推施工过程中的竖向位移和内力变化,表明顶推施工除支座转换时挠度值相较悬臂施工变化较大,在施工过程中,顶推施工整体的弯矩、剪力以及变形较小。故采用顶推施工法对组合箱梁桥做进一步施工模拟。

2 顶推施工过程结构体系转换分析

2.1 施工阶段划分

利用顶推施工法梁系模型进行进一步分析整个施工过程节段划分(见图 5)。笔者设计每顶推 4 m 为一个工序,共计 47 个工序。工序 1 导梁就位悬出,工序 2 到 45 为推进梁段和导梁悬出的过程,工序 46 拆除临时墩,最后的工序 47 成桥。



2.2 支反力分析

支反力在施工过程中是各千斤顶推施力的主要依据,同时影响着钢箱梁局部受力。顶推施工过程中的1#墩、临1墩、2#墩、临2墩、临3墩(见图5)参与顶推施工的工序较多,故取这5个墩的墩顶支反力做顶推全过程反力曲线(见图7)。从图可以看出,各墩顶的支反力变化趋势一致,随着梁体与墩顶支座的接触,支反力逐步增大,直到新的支座开始参与受力,支反力开始减小,并维持在稳定数值。除前期主梁、导梁刚与墩支座接触时变化幅度大,其他支点的支反力大小为3 198.43~6 396.85 kN。拆除临时墩时,1#、2#墩(见图5)支反力大幅增大,但增大后的反力值仍小于最大悬臂状态时的支反力。此外,各项推施工阶段,各钢箱梁支点未出现负反力,这说明施工过程中各支点没有出现脱空的情况。

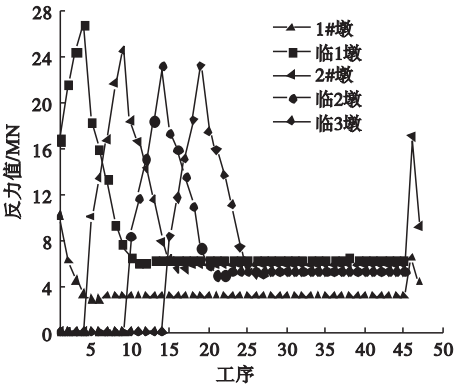


图7 顶推全过程反力曲线

Fig. 7 Reaction curve during process of jacking

2.3 体系转换过程中的受力分析

拆除导梁时主梁前端与导梁连接处的受力将会发生变化,弯矩状态变化如图8所示。导梁的拆除和支座约束转换对桥梁整体受力的影响较小,临时墩的拆除,使桥梁由八跨连续梁变为三跨,对梁体受力影响较大,2#、3#支座负弯矩由1 199.4 kN·m 增大至106 470 kN·m。剪力受体系变化的影响与弯矩类似,导梁的拆除对体系影响较小。临时墩拆

除后1#墩和4#墩剪力值增大,由3065.2 kN 增大至6 263.6 kN,变为原来的两倍,2#墩和3#墩剪力值也增幅较大,由25 321 kN 增大至105 280 kN,为拆除前的4倍。

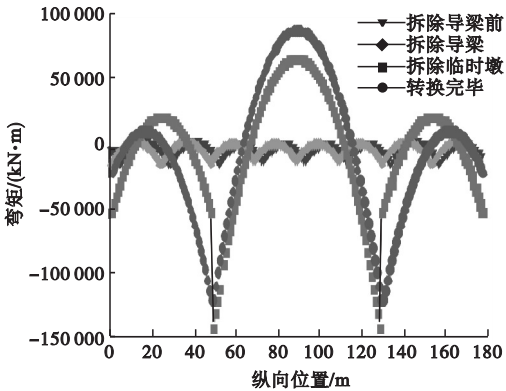


图8 弯矩状态变化图

Fig. 8 Diagram of bending moment state

从图8可知,在体系转换的过程中,导梁的拆除对体系影响较小,临时墩的拆除影响较大,临时墩拆除前后主梁弯矩、剪力成倍增大。

3 下弦开敞桁式波形钢腹板组合箱梁桥施工过程的局部受力

3.1 建立有限元模型

桥梁结构设计为等截面三跨连续梁(见图9)。采用ANSYS建模,其中混凝土板和钢管内混凝土采用SOLID95单元模拟,上翼缘钢板、波形钢腹板和矩形钢管则采用SHELL181单元模拟,桁架和预应力筋分别采用BEAM188单元和LINK8单元模拟。混凝土材料为C50,除桁架选用Q345钢外,其余钢结构构件均选用Q235钢。

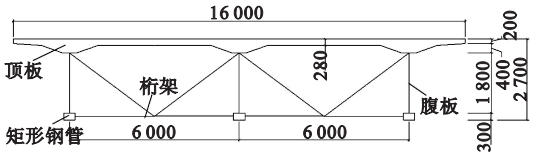


图9 截面尺寸示意图

Fig. 9 Sectional dimension of bridge

钢材本构关系采用理想弹塑性模型,混

混凝土本构关系采用 Hongnestad 提出的混凝土单轴受压应力 - 应变本构关系曲线<sup>[16]</sup>。模型中混凝土顶板与下部矩形钢管内混凝土单元划分尺寸为 0.8 m, 腹板网格划分采用自由网格划分, 为规则的四边形单元, 上翼缘钢板与下翼缘钢管采用映射网格划分为规则四边形单元, 预应力筋采用体分割法划分。

当结构处于最大悬臂状态时为最不利工

序, 由于悬臂 20 m 时的情况较少, 且此时仅主梁顶推 12 m, 长度较短, 所以笔者以工序 9 (顶推至 32 m 时, 悬臂 16 m) 和下一个工序 10 (顶推至 36 m) 的状态为例进行分析 (见图 10)。工序 9 模型一端固结, 一端为释放纵向自由度, 而工序 10 模型两端边界视为固结。钢导梁与钢箱梁连接段有限元模型如图 11 所示。

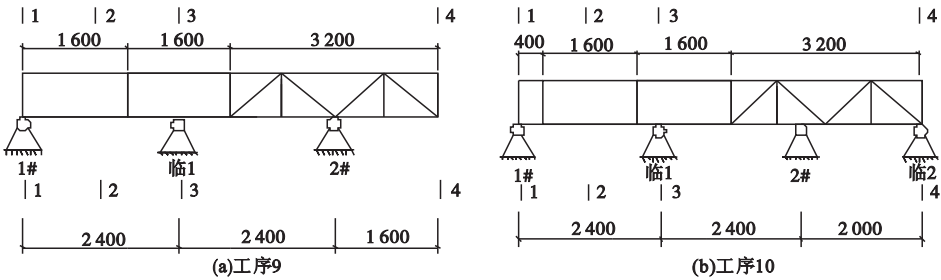


图 10 工序简图

Fig. 10 Diagram of working condition

梁的最大竖向挠度为 3.20 mm, 位于悬臂端。10 工序由于有了临 2 支座, 最大竖向位移小于工序 9, 为 0.42 mm, 位于桁架支撑处。两工序的最大竖向位移都小于《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T F50—2011) 所规定的 5 mm。

图 12 为两种工序下导梁剪应力图。导梁主要受力构件为波形钢腹板, 工序 9 的剪应力最大值为 17.5 MPa; 工序 10 剪应力最大值为 1.41 MPa。两工序最大剪应力均远小于钢材容许剪应力 120 MPa。

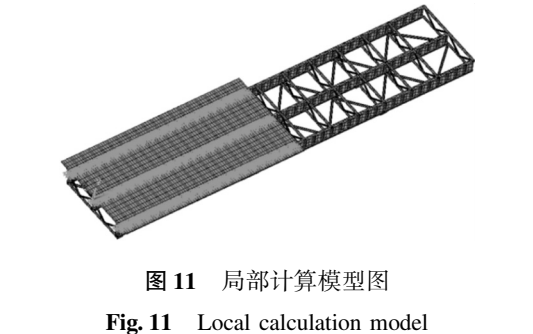


图 11 局部计算模型图

Fig. 11 Local calculation model

3.2 导梁受力分析

在施工过程中由于重力作用, 导梁会随着工序产生挠度, 挠度过大会造成导梁翘起, 使导梁不能很好地与滑道接触。工序 9 下导

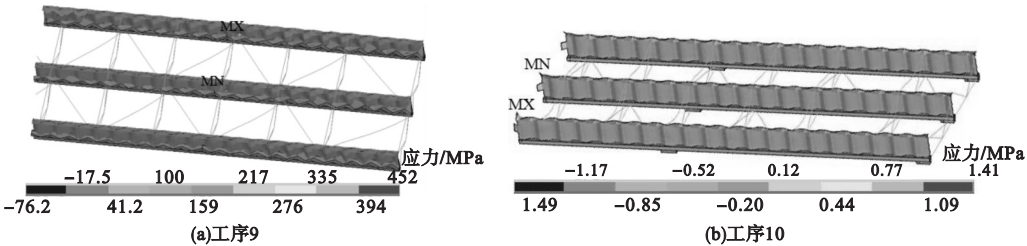


图 12 导梁应力图

Fig. 12 Stress diagram of assistant beam

3.3 顶板应力分析

图 13 为顶板沿纵桥向应力图。从图可知,顶板主要承受压应力,工序 9、工序 10 最大轴向压应力分别为 1.03 MPa、0.81 MPa;最大轴向拉应力为分别 1.48 MPa、0.77 MPa,应力水平平均低于小于规范所规定

的 2.64 MPa。拉应力主要出现在顶板与腹板交界处以及 1#支座处,这是由于 1#支座处支反力的作用使其有向上挠曲的趋势而出现拉应力,腹板给顶板一定支撑,使得接触处出现小范围拉应力。

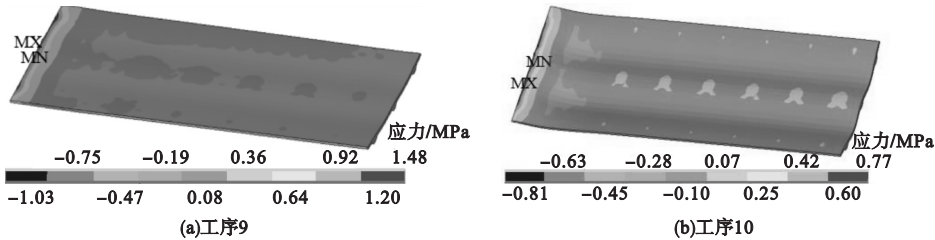


图 13 顶板沿纵桥向应力图

Fig. 13 Longitudinal stress diagram of top plate

3.4 截面应力分析

取工序 9、工序 10 的支座截面、边跨跨中截面(见图 10),分析下弦开敞桁式波形钢腹板组合箱梁桥施工阶段各个工序下的顶板应力的变化规律。图 14 分别为工序 9、工序 10 的应力分布图。由图可知,主梁截面受到根部固结条件影响,应力最大位置在 1#墩处  $z=0\text{ m}$  处,中腹板与顶板交界处的应力值最

大,翼板边缘和两腹板中部相对较小。除临 1 墩处  $z=24\text{ m}$  应力分布不均,其他位置处应力分布均匀,剪力滞影响程度小。这主要是由于临 1 墩处支反力的施加使得此处截面应力分布不均匀,剪力滞影响程度较大。相较于最不利工序 9,工序 10 沿桥纵向应力数值浮动较小,除 1#墩处顶板截面应力外,其他截面应力分布情况较为接近。

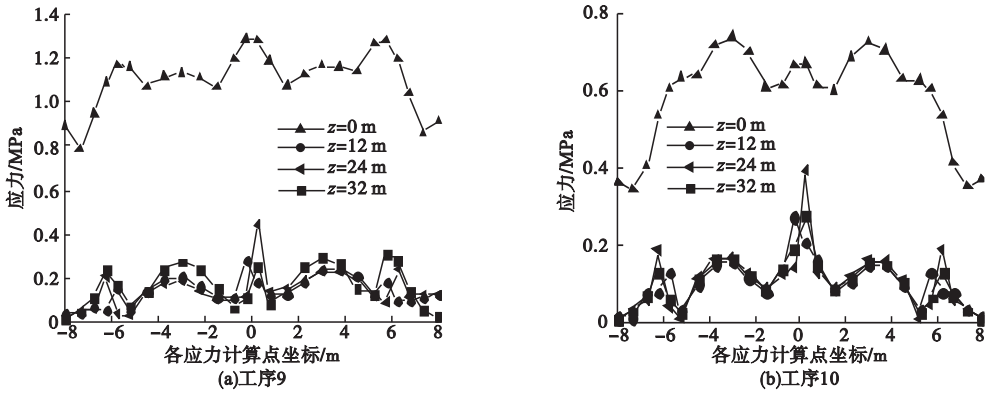


图 14 不同位置顶板应力分布

Fig. 14 Transverse distributions of shear-lag coefficients of top plate at different location

4 结 论

(1)对比顶推施工、T 构 - 单悬臂连续施工和逐跨连续悬臂施工等 3 种施工方法,顶推施工过程的剪力、弯矩远小于两种悬臂施工,并且顶推施工整体变形较小,因此顶推

施工更适用于组合箱梁桥。

(2)在顶推施工过程中,结构处于最大悬臂状态时,墩顶支反力和导梁主梁前端挠度值达到最大;导梁的拆除对体系影响较小,临时墩的拆除对结构受力影响较大。

(3)顶推施工最大悬臂工序下,导梁前



端挠度变形最大 3.20 mm, 应力最大截面位置在主梁根部固结处, 除临 1 墩处由于支反力的施加使得应力分布不均现象明显, 其他位置处应力分布均匀, 剪力滞影响程度小。

## 参考文献

- [1] 徐强, 万水. 波形钢腹板 PC 组合箱梁桥设计与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
(XU Qiang, WAN Shui. Design and application of PC composite box girder bridge with corrugated steel webs [M]. Beijing: People's Communications Press, 2009.)
- [2] 邓强民, 倪富健, 顾兴宇, 等. 大跨钢桥桥面铺装有限元分析合理简化模型[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 53–58.  
(DENG Qiangmin, NI Fujian, GU Xingyu, et al. Rational simplified model of finite element analysis for deck pavement of long-span steel bridge [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2008, 8 (2): 53–58.)
- [3] 冀伟, 邵天彦. 波形腹板钢箱-混凝土箱梁桥的有限元模型修正[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 1–11.  
(JI Wei, SHAO Tianyan. Finite element model updating of box girder bridges with corrugated steel webs [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2021, 56(1): 1–11.)
- [4] TIAN L M, HAO J P. Nonlinear time-varying analysis algorithms for modeling the behavior of complex rigid long-span steel structures during construction processes [J]. Steel and composite structures, 2015, 18 (5): 1197–1214.
- [5] 叶智武, 罗永峰, 陈晓明, 等. 施工模拟中分步建模法的改进实现方法及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 73–80.  
(YE Zhiwu, LUO Yongfeng, CHEN Xiaoming, et al. Improved method of step by step modelling and its application in construction simulation [J]. Journal of tongji university (natural science), 2016, 44(1): 73–80.)
- [6] GRANATA M F, MARGIOTTA P, ARICI M. A parametric study of curved incrementally launched bridges [J]. Engineering structures, 2013, 49: 373–384.
- [7] 姚红兵, 王思豪, 刘玉擎, 等. 组合折腹梁桥钢腹板自承重施工过程分析[J]. 中外公路, 2018(3): 208–212.  
(YAO Hongbing, WANG Sihao, LIU Yuqing, et al. Analysis of self-supporting construction process of composite bridges with corrugated steel web [J]. Journal of China & foreign highway, 2018(3): 208–212.)
- [8] 刘旭政, 程坤, 陈晔, 等. 大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁桥剪力滞效应研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(5): 855–862.  
(LIU Xuzheng, CHENG Kun, CHEN Ye, et al. Shear lag effect of long span composite continuous box-girder bridge with corrugated steel webs and variable cross-section [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (nature science), 2017, 33(5): 855–862.)
- [9] 许世展, 张亚辉, 冯冠杰. 波形钢腹板多室箱梁部分斜拉桥施工期剪力滞效应分析[J]. 湖南交通科技, 2019, 45(4): 78–81.  
(XU Shizhan, ZHANG Yahui, FENG Guan jie. Analysis of shear lag effect of multicell box girder with corrugated steel web of extradosed bridge in construction period [J]. Hunan communication science and technology, 2019, 45(4): 78–81.)
- [10] 王春江, 苏帆, 戴建国, 等. 重庆鹅公岩轨道专用桥施工阶段稳定分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2605–2610.  
(WANG Chunjiang, SU Fan, DAI Jianguo, et al. Stability analysis on the construction stage for Chongqing Er Gong Yan railway bridge [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(6): 2605–2610.)
- [11] WANG D, WANG L, TANG C. Mechanical characteristic analysis of corrugated steel webs using asynchronous construction technology [J]. KSCE journal of civil engineering, 2020, 25(4): 185–196.
- [12] 聂建国, 吴丽丽. 下弦开敞桁式波纹钢腹板组合梁: CN101280546A [P]. 2008–04–11.  
(NIE Jianguo, WU Lili. Bottom chord open truss corrugated steel web composite beam: CN101280546A [P]. 2008–04–11.)
- [13] ROSIGNOLI, MARCO. Prestressing schemes for incrementally launched bridges [J]. Journal of bridge engineering, 1999, 4(2): 107–115.
- [14] 李纪友. 临时墩在桥梁顶推施工中的应用[J]. 林业建设, 2006(1): 31–33.  
(LI Jiyu. Application of the temporary pier in bridge construction with incremental launching method [J]. Forestry construction, 2006(1): 31–33.)
- [15] 任亮, 梁明元, 徐晶, 等. 波形钢腹板 PC 组合小箱梁顶推施工结构性能及参数分析[J]. 世界桥梁, 2017, 45(6): 12–17.  
(REN Liang, LIANG Mingyuan, XU Jing, et al. Structural performance and parametric analysis of incremental launching of small composite PC box beams with corrugated steel webs [J]. World bridges, 2017, 45 (6): 12–17.)
- [16] 程文瀾. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2013.  
(CHENG Wenrang. Design principle of concrete structure [M]. Beijing: Architecture & Building Press, 2013.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)