

# 长跨变坡连续钢箱梁顶推受力特性分析

马义云<sup>1</sup>,王皓平<sup>2</sup>,周贤军<sup>3</sup>,邓鹏飞<sup>4</sup>

(1.芜湖市公路管理服务中心规划建设科,安徽 芜湖 241000; 2.中铁二十一局集团第三工程有限公司,陕西 咸阳 712000;

3. 芜湖天达重工有限公司, 安徽 芜湖 241100; 4. 东南大学, 江苏 南京 211189)

**摘 要:** 依托荆山河特大桥工程, 针对钢梁顶推施工中的结构受力及变形展开研究。应用数值模拟的手段, 模拟顶推施工过程, 分析该过程中各个节段模型的受力状态, 重点分析钢箱梁在垫块、横向偏移、局部支撑等多参数影响下的局部受力性能, 建立多尺度三维有限元模型, 参数化分析钢箱梁结构的力学状态以及稳定性能, 确定合理参数范围, 明确横向纠偏阈值, 控制纠偏频率, 确保结构在成桥前后的安全可靠。

**关键词：**步履式；顶推施工；数值模拟；受力分析

中图分类号: U495;U441

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)08-0104-04

## 0 引言

顶推施工是在沿桥纵向的台后设置预制场地,分节段预制梁体,待将预制节段与施工完成的梁体连成整体后,通过水平千斤顶施力,将梁体向前顶推出预制场地;之后继续在预制场地进行下一节段梁的预制,如此循环操作直至施工完成<sup>[1]</sup>。顶推法以高度工业化、使用局限小、施工速度快等优势在桥梁施工中得到广泛应用<sup>[2]</sup>,经历 30 多年的发展,已逐渐趋于成熟。但对于大跨度桥梁,顶推过程中存在变形及应力分布不均的现象,容易造成局部应力集中。所以对大跨度桥梁进行结构安全性、整体性的施工仿真分析以确保其安全施工及正常运营,已成为施工及其控制中不可或缺的重要手段之一<sup>[3]</sup>。

本文依托荆山河特大桥工程,对顶推施工过程中每个节段的钢箱梁整体受力情况进行分析,针对出现应力集中或者局部屈曲失稳的区域,建立局部细化模型进行精细化分析,以指导顶推施工过程。

## 1 工程概况

荆山河特大桥起点桩号 K4+371.998, 终点桩号 K5+437.078, 桥梁全长 1 065.08 m。主桥采用钢混组合梁, 跨径布置为 40 m+7×63 m+40 m=521 m, 主桥立面布置图见图 1。

引桥采用简支变连续小箱梁,东、西引桥的跨径布置均为  $3 \times (3 \times 30 \text{ m}) = 270 \text{ m}$ 。主桥上部结构采用

收稿日期：2022-09-03

基金项目：芜湖市科技计划项目(2021GC1-1)

作者简介: 马义云(1994—), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事道路桥梁建设与管理工。

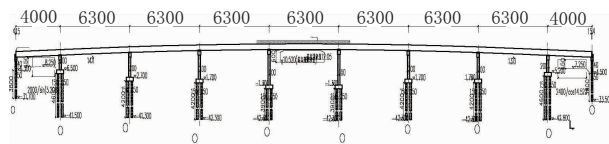


图 1 主桥立面布置图(单位:cm)

钢混组合梁,梁高 2.8 m;单幅桥横断面上布置 3 片钢梁,梁距 6.25 m。钢梁采用槽形断面,与混凝土桥面板组合成箱形截面,钢梁腹板采用斜腹板形式,与引桥简支变连续小箱梁外立面保持一致。中支点附近钢梁顶板宽 900 mm,厚 50 mm;跨中顶板宽 700 mm,厚 25 mm。钢梁底板宽度均为 2.3 m,中支点附近底板厚 30~40 mm,其余部位底板厚 16 mm。钢梁腹板在支点附近的厚度为 16 mm,其余部位的腹板厚度为 12 mm。钢梁支点处设置实腹式横隔板,横隔板顶面与横梁同高。跨间设置桁架式横隔板,标准间距为 5 m。箱间横梁采用实腹式,与箱内桁架式隔板一一对应布置。组合梁桥面板标准厚度 240 mm,在钢梁腹板附近加厚至 320 mm,桥面板悬臂端部厚 320 mm。钢结构通过焊钉与混凝土连接。组合梁标准断面见图 2。

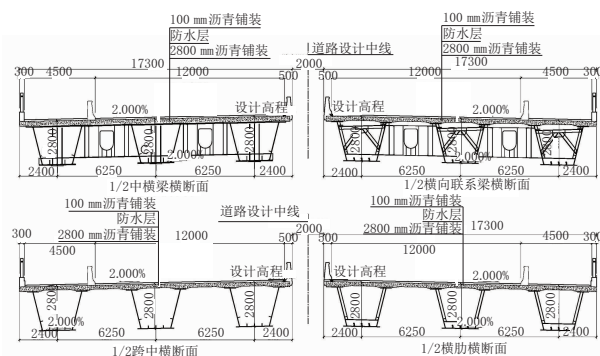


图 2 组合梁标准断面图(单位:mm)

2 整体受力分析

2.1 模型构造

利用 Midas/Civil 2021 有限元软件,对荆山河特大桥钢箱梁建立全桥三维空间有限元模型,对顶推全过程结构的受力进行分析<sup>[4]</sup>。用梁单元模拟单侧幅 3 箱型截面钢主梁,3 主梁间每隔一定纵向距离设置横隔板。在顶推过程中,钢梁会出现悬臂情况,为了减少钢梁悬臂长度,满足钢梁的受力要求,必须设置钢导梁。钢导梁设计长度为 40.5 m,高 350~2 466 mm;导梁单幅设计为 3 片,与主桥钢箱梁对应,各片导梁之间采用钢管连接系连接成整体。主梁与导梁钢材均为 Q345 钢。

图 3 为部分主梁与钢导梁模型;图 4 为 40 m+7×63 m+40 m 全节段主梁加导梁模型,按照施工顺序将主梁分为 A~I 共 9 段。主梁截面为开口式钢箱,在顶推施工完成后,浇筑混凝土桥面板,形成闭口型钢混组合箱梁。本文是针对顶推施工过程中的钢箱梁进行研究,因此不考虑混凝土桥面板。另外,为提高开口式钢箱的抗扭刚度,在沿桥纵向的给定间距布置了横向加劲肋。但由于 Midas 中梁单元无法模拟该横向加劲肋,考虑到整体受力研究时可忽略扭转影响,因而横向加劲肋并不会影响整体受力,最终通过提高自重系数来考虑这部分加劲肋的恒载。

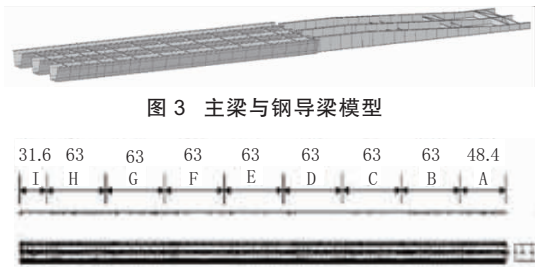


图 3 主梁与钢导梁模型

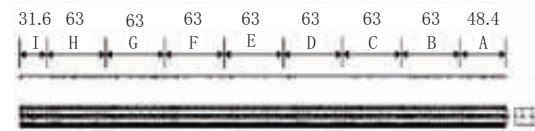


图 4 全节段主梁加导梁模型(单位:m)

2.2 计算结果分析

根据顶推施工技术方案,在 Midas 计算模型中按照结构受力最不利状态共划分为 17 个施工步骤,施工过程中结构的变形、千斤顶反力以及结构弯矩和剪力最大值见表 1。由表 1 可知,结构在顶推施工步骤 3 时截面会出现最大负弯矩和剪力,同时在步骤 7 中截面存在最大正弯矩值。因此下文会根据这 2 个步骤的内力情况进行局部受力分析。

3 局部受力分析

3.1 模型建立

结构在特定施工步骤下存在较大内力,如果内

表 1 结构变形、反力和内力表

| 施工步骤 | 最大变形 / mm | 千斤顶最大反力 / kN | 最大负正弯矩 / (kN·m)  | 最大剪力 / kN |
|------|-----------|--------------|------------------|-----------|
| 1    | 190       | 1 313        | 5 490.6/28.3     | 485.8     |
| 2    | 430       | 1 512        | 8 197.6/326.3    | 595.3     |
| 3    | 1 042     | 2 603        | 18 795.6/3 342.5 | 966.5     |
| 4    | 361       | 1 659        | 8 192.9/3 401.9  | 692.5     |
| 5    | 1 095     | 1 512        | 18 792.5/2 000.8 | 908.8     |
| 6    | 384       | 1 853        | 8 191.8/3 978.2  | 667.2     |
| 7    | 1 142     | 2 462        | 18 792.5/4 968.5 | 871.8     |
| 8    | 378       | 1 908        | 8 191.3/3 899.9  | 673.9     |
| 9    | 1 134     | 2 472        | 18 792.5/4 488.1 | 878.0     |
| 10   | 379       | 1 901        | 8 190.9/3 915.0  | 672.0     |
| 11   | 1 137     | 2 469        | 18 792.4/4638.2  | 876.0     |
| 12   | 379       | 1 903        | 8 190.7/3 911.4  | 672.5     |
| 13   | 1 136     | 2 470        | 18 792.4/4 599.5 | 876.5     |
| 14   | 379       | 1 903        | 8190.6/3911.2    | 672.3     |
| 15   | 1 136     | 2 470        | 18 792.4/4 610.0 | 876.4     |
| 16   | 1 188     | 1 979        | 7 643.8/4 235.2  | 711.8     |
| 17   |           | 1 920        | 6 892.3/3 940.4  | 665.4     |

力集中在一小部分区域可能导致结构局部出现应力集中或者局部屈曲现象。因此需要建立局部细化模型,对受到较大内力的局部构造进行内力深度分析,以指导顶推施工过程。基于此,首先提取整体模型内力,确定内力作用位置,然后利用 Abaqus 商业有限元分析软件建立局部精细化有限元模型。通过对模型施加所提取的荷载,计算结构内力,分析结构在不同荷载作用下的力学性能;同时改变结构参数,对比分析结构受力响应,进而确定顶推施工下的结构性能。

利用 Abaqus 建立基于壳单元的钢箱梁三维有限元模型<sup>[5]</sup>。由于 3 联主梁受力对称、约束对称,因此为了节省计算时间只考虑建立中间主梁模型。模型包括了所有构造细节,包括纵横加劲、横隔板、端横板、板件变宽变厚部分等。

所有钢结构采用 Q345 钢,壳单元厚度根据实际构造设置,在主梁模型两侧分别设置参考点,用以施加边界条件(包括弯矩、剪力等),同时考虑结构自重。主梁模型的约束情况根据各个施工步骤下的受力形式来确定。每种工况下首先对结构进行模态分析,以便找出容易发生屈曲的模态以及位置,然后进行静力分析,获得结构的应力状态,以此判定结构性能。

3.2 顶推施工步骤 3 分析

3.2.1 模态分析

在步骤 3 下,截面受到最大负弯矩和剪力的位

置位于与导梁连接的40 m主梁内,且该位置为顶推施工中垫块位置。

首先通过屈曲模态分析获得主梁结构的失稳模态,见图5。由图5可知,结构在自重作用下前3阶模态均为靠近最大弯矩剪力位置的腹板屈曲,表明该位置为最易失稳的部位。但是由于模态系数均超过9,即外界荷载达到9倍以上结构自重才能产生局部屈曲,因此可以判定结构在当前施工状态下不会出现局部屈曲。

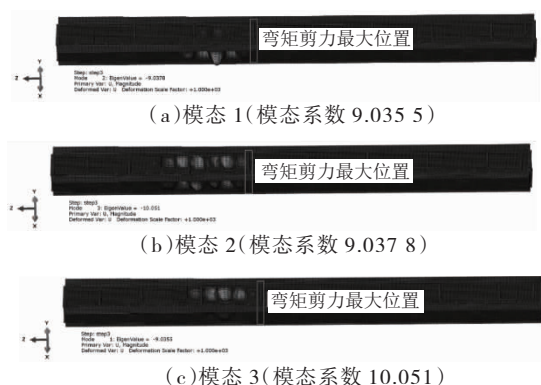


图5 顶推施工步骤3的主梁模型屈曲模态

### 3.2.2 静力分析

通过静力分析获得主梁结构的受力状态(见图6)。主梁应力最大区域处于垫块作用位置,受到较大的负弯矩和剪力,该位置底板处的横向加劲肋 Mises 应力达到了286.2 MPa。此外,同样受力较大的位置包括垫块附近的底板以及底板的纵向加劲肋,其应力达到218.6 MPa左右。可以看出,在此受力状态下,底板部分构件受力较大,在顶推过程中应当注意垫块的大小和位置,以防部分区域出现过大大压应力而导致局部屈曲。因此有必要进行后续的参数化分析,以确定垫块的大小和合适位置来指导顶推施工。

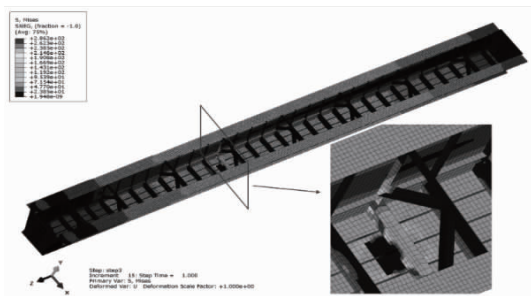


图6 顶推施工步骤3的主梁应力分布(单位:MPa)

### 3.2.3 参数化分析

通过改变垫块的大小和位置来对比结构构件的应力分布情况。初始垫块为900 mm×760 mm的矩形,作用在较强横向加劲肋与纵向加劲肋交叉位置。将垫块大小分别调整为:500 mm×500 mm、900 mm×1 430 mm、900 mm×2 300 mm,计算结构应力;另外

调整垫块位置到较弱横向加劲肋处以及横向加劲肋之间位置处,分别计算结构应力情况。

调整垫块大小到500 mm×500 mm,计算主梁结构应力(见图7)。由图7可知,减小垫块大小后横向加劲肋应力显著增加,数值达到321.3 MPa。尽管主梁底板及纵向加劲肋应力水平基本不变,考虑到垫块尺寸过小会对底板局部构件造成过大应力,因此不建议使用较小的垫板。

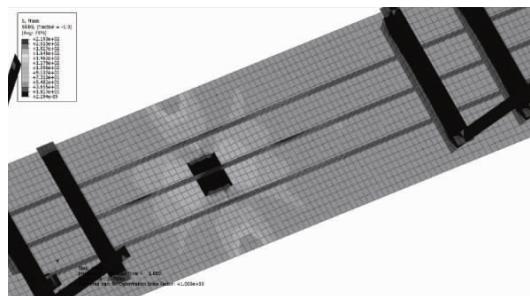


图7 垫块大小为500 mm×500 mm时的主梁应力分布(单位:MPa)

将垫块大小调整到900 mm×1 430 mm时,虽然增加垫块尺寸会使底板3片纵向加劲肋均参与受力,从而改善了部分板件的受力分布,但是局部最大应力依然达到318.1 MPa,造成局部应力集中;将垫块大小调整到900 mm×2 300 mm,此时垫块可托住主梁整个宽度范围的底板,则主梁构件应力下降显著,最大应力降到189.3 MPa,位于底板与腹板交接外侧,加劲肋区域的应力水平得到明显改善。因此为了保证整个顶推过程主梁结构的受力状态,建议采用较大垫块将主梁整个宽度范围的底板托住。

将垫块位置调整至2个横向加劲肋中间位置,此时结构板件局部最大应力达到340.8 MPa(见图8),基本上接近钢材的屈服强度,位于与横向加劲肋交接的纵向加劲肋上,同时底板局部应力也达到了267.3 MPa。因此为了确保板件局部受力性能,不建议在顶推过程中将垫块布置在没有横向加劲的位置。

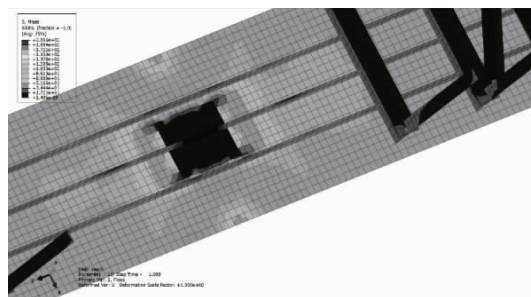


图8 垫块位于2个横向加劲肋中间的主梁应力分布(单位:MPa)

将垫块位置调整至较弱横向加劲肋处,计算主梁应力(见图9),得到的结果与原始对照模型计算结

果类似。因此结合图8的计算结果,建议在顶推过程中垫块位置布置在设有横向加劲的区域,并据此调整每次的顶推进程。

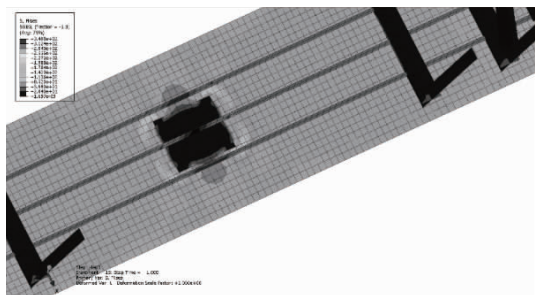


图9 垫块位于较弱横向加劲肋处的主梁应力分布(单位:MPa)

### 3.3 顶推施工步骤7分析

#### 3.3.1 模态分析

在步骤7下,截面受到最大正弯矩的位置位于主梁中部,且两端按照简支设置。首先通过屈曲模态分析获得当前边界条件下主梁结构的失稳模态,见图10。由图10可知,结构在自重作用下前2阶模态均为靠近最大正弯矩位置的上翼缘板和腹板屈曲,表明该位置为最易失稳的部位。但是由于模态系数均超过29,即外界荷载达到29倍以上结构自重才能产生局部屈曲,因此可以判定结构在当前施工状态下不会出现局部屈曲。

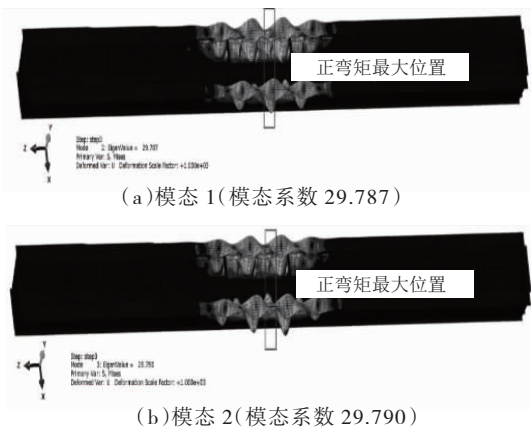


图10 顶推施工步骤7的主梁模型屈曲模态

#### 3.3.2 静力分析

通过静力分析获得主梁结构的应力状态(见图11)。由图11可知,该工况下即使主梁受到较大的正弯矩作用,主梁构件的应力水平依然处于弹性状态,最大Mises应力仅为38.9 MPa,较大应力主要集中在上翼缘和底板处。因此对于顶推过程全程,主梁结

构在正弯矩作用下应力水平偏低,不会对构件产生影响,同时也不会出现受压失稳的现象。

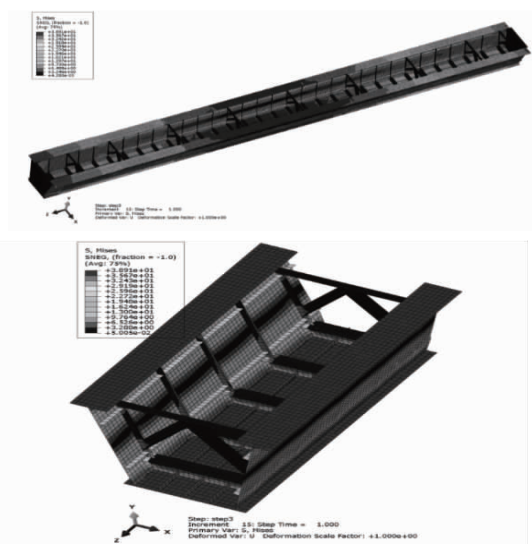


图11 顶推施工步骤7的主梁应力分布(单位:MPa)

## 4 结 语

(1)荆山河特大桥主梁结构的屈曲模态系数较高,在顶推施工过程中不易出现结构屈曲。

(2)垫块尺寸不能过小,以防底板区域以及加劲肋出现过大的应力水平。建议垫块布满主梁整个宽度,能够改善主梁受力状态。

(3)垫块位置建议设置在横向加劲肋处,避免设置在加劲肋之间,以改善主梁结构受力;顶推进程也需要根据横向加劲肋间距设置。

(4)顶推过程中正弯矩对主梁的影响可以忽略,主梁构件不会因此产生受压失稳现象。

#### 参考文献:

- [1] 张世娟,周远智,胡靖,等.红水河特大斜拉桥叠合梁顶推施工过程仿真分析[J].中外公路,2015,35(6):156-159.
- [2] 匡勇江,熊永光,韩晗,等.九堡大桥连续组合梁桥顶推施工中的受力性能研究[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集(下册).北京:人民交通出版社,2010:392-398.
- [3] 周先雁,王解军.桥梁工程[M].北京:北京大学出版社,2008.
- [4] 韩玉霞.跨铁路钢主梁顶推施工技术及其全过程受力分析[J].山西交通科技,2019(4):60-64.
- [5] 梁潇.变曲率竖曲线连续钢梁桥短导梁顶推施工受力研究[J].中外公路,2015,35(4):192-195.