

超高墩小曲率半径连续钢箱梁少支架顶推的关键技术研究

蒋忠良

中铁科工集团有限公司 湖北 武汉 430066

【摘要】：目前常规的步履式顶推技术结合支架法普遍使用于钢箱梁工程中，但常规的顶推技术结合传统支架法应用于超高墩小曲率半径钢箱梁架设时，支架措施用量大，成本高。以贵州省赫章东互通 A 匝道钢箱梁的架设为研究背景，为解决场地狭窄情况下，在高墩上架设小曲率半径钢箱梁的难题，且降低成本，创新提出采用钢牛腿替代传统临时支架顶推的方案，采用 Midas civil 软件对钢箱梁顶推过程中的临时支架、钢导梁和钢牛腿的受力情况进行分析计算，优化结构，降低成本，形成超高墩小曲率半径连续钢箱梁少支架顶推技术，为今后类似工程施工提供可靠的参考实例。

【关键词】：超高墩；小曲率半径连续钢箱梁；少支架；Midas；顶推施工技术

1 工程概况

贵州省赫章东互通 A 匝道桥钢箱梁墩高近 70 米，曲率半径 75m，纵坡-3.942%，横坡由 2.23%变化至 5%。第三联跨度 27.7m+30m+26.6m，第四联跨度 27m+26.913m+26.913m，共长 165.226m，钢箱梁为单箱二室结构，材质 Q345qD，梁宽 10.5m，梁高 1.5m，挑臂宽 2m。该桥线形复杂，工期紧，受场地限制，架设难度大。

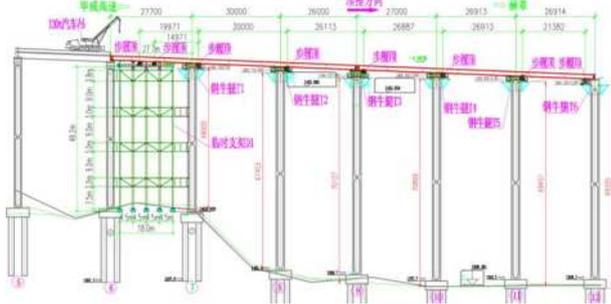


图 1 顶推立面布置图

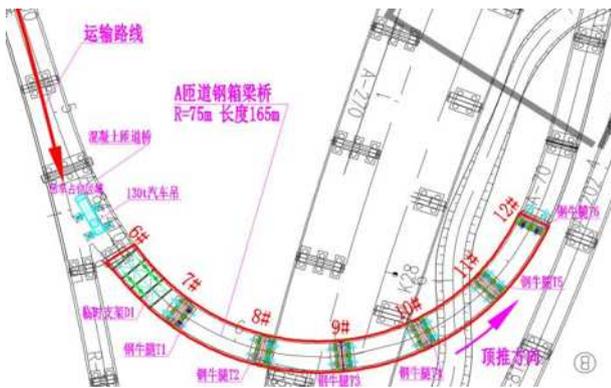


图 2 顶推平面布置图

2 方案设计

钢箱梁在工厂分段制造，共 60 片梁，最长 12 米，宽 3.65 米，最大节段重量 26.6t，运输到现场 6 号墩混凝土桥面上，在 6~7 号墩之间搭设临时支架拼装平台，在 7~12 号墩上设钢牛腿。采用 130t 汽车吊对钢箱梁节段和导梁进行吊装，钢箱梁节段按桥梁线型拼装完成后，用步履式千斤顶进行多点顶推，共顶推 141m，剩余 24m 直接吊装。拼装平台和每个钢牛腿上分别设置 4 组和 2 组步履式千斤顶，共 16 组，由一个控制室进行控制，确保同步动作。施工流程为：拼装焊接导梁和钢箱梁→顶推导梁→拼装钢箱梁→拼装、焊接、顶推，至全部钢箱梁顶推到位→拆除导梁→落梁→拆除支架。

高墩的临时支架立柱为 $\phi 630 \times 8$ mm 钢管，辅助立柱为 $\phi 377 \times 8$

钢管，高度方向每隔 9m 设置一道 3m 高的横联和斜撑，横联和斜撑采用槽钢 20a，分配梁为工钢 40a，材质均为 Q235B。临时支架与混凝土桥墩设钢管桁架连墙件，避免钢箱梁顶推过程因步履顶在支架顶部产生的纵向和横向水平力对支架产生影响。

为适应小曲率半径的桥梁线形，导梁由两片“工”字型结构主梁及两道横撑组成，导梁高度与钢箱梁连接处的高度与钢箱梁腹板高度一致，为减轻重量，悬臂端截面逐步变小。导梁总长约 21m，主梁中心距 6.5m，曲率半径 R75m，主梁顶板厚为 16mm，底板厚 16mm，腹板厚 16mm。横撑为 $\phi 246 \times 7$ mm 和 $\phi 146 \times 5$ mm 钢管桁架。钢箱梁与导梁连接位置采用筋板加强，并进行熔透焊接。钢牛腿为三角形结构，主要为钢板焊接的型钢，与预埋在混凝土桥墩上的预埋件相连，为确保安全，采用拉杆进行对拉。

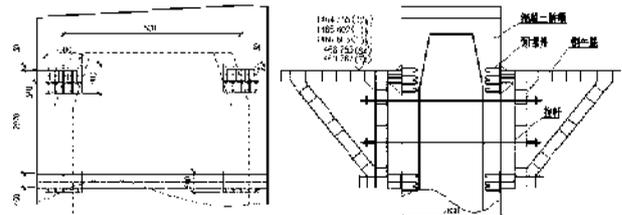
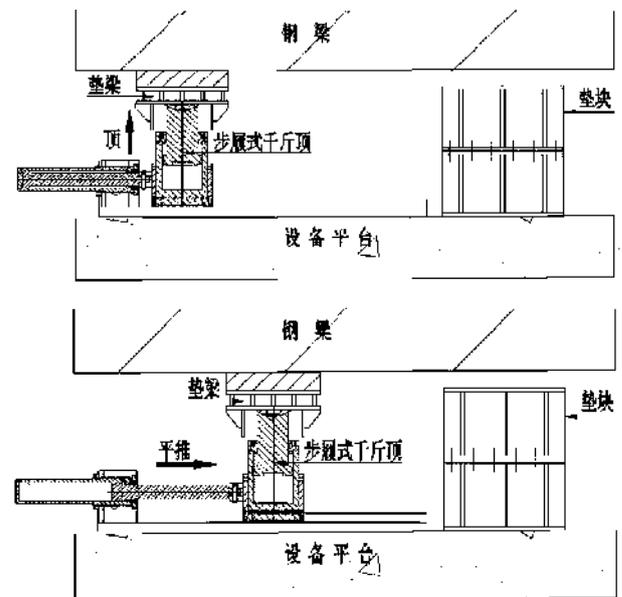


图 3 钢牛腿图

步履式顶推装置主要包括机械结构、液压系统和电控系统，顶推步骤包括：顶推顶升→平推→下降→回缩，往复下一个循环。



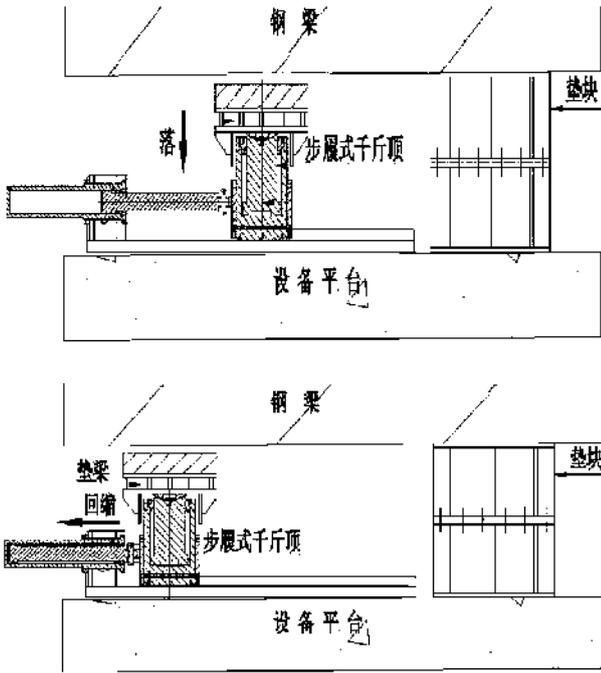


图 4 顶推原理图

超高墩小曲率半径连续钢箱梁少支架多点连续顶推的步骤和主要计算工况如下：

3 计算说明

3.1 计算说明

采用空间有限元分析软件 Midas civil 对该项目施工进行有限元分析计算。永久荷载的分项系数取 1.2，可变荷载取 1.4，临时结构挠度容许值，导梁悬臂状态下按 L/200，临时支架按 L/400，钢箱梁挠度按 L/500 取值。

3.2 荷载情况

高墩情况下，需考虑风荷载的作用，钢箱梁截面单位长度上的静风荷载按公式 $F_H = \frac{1}{2} \rho V_o^2 C_H H$ 进行计算，钢箱梁纵向单位长度的风荷载为 0.25FH。

高墩小曲率半径钢箱梁临时支架的荷载主要为：①自重荷载+钢箱梁及导梁重量产生的竖向支点反力；②步履顶在临时支架顶部产生的纵向水平力，由于步履顶推为内力自平衡顶推，在顶推过程中在临时支架顶产生的水平外力极小，为了保障顶推支架的安全，水平反力可保守的考虑 5%的竖向支点反力。③步履顶横向调整水平力，当箱梁在顶推过程中发生横向偏位之后，需要利用步履顶进行横向调整，横向水平反力可保守的考虑为 5%的竖向支点反力。

3.3 边界条件

为确保仿真模拟与实际工况符合，钢箱梁与步履顶接触点设置为弹性支承，将其中一个弹性支承的 SRy 释放，约束其余 5 个自由度；其余弹性支承的 SDz、SRx、SRy、SRz 设置约束。导梁与钢箱梁为刚性连接。连墙件约束 Dx、Dy、Dz，释放 Rx、Ry、Rz，临时支架柱脚为固结，钢牛腿安装在混凝土桥墩上，边界条件为固结。

步骤	计算工况	说明	顶推 (m)	连续顶推步骤
1	1	第一次拼装	0	
2			12	
3	2	第三次拼装前	0	
4	3	最大前悬	24	
5	4	过墩 1/3	60	
6	5	过墩 2/3	71	
7			83	

8	6	最后一次拼装	137	
9	7	顶推到位	141	
10	8	成桥状态	0	

注：接上页

4 模拟计算及结果

4.1 主要顶推工况的计算分析

通过 Midas civil 对主要最不利工况进行模拟分析计算，应力及挠度汇总如下：

表 1 主要顶推工况计算应力及挠度汇总表

分析的项目	顶推距离 (m)	钢箱梁				导梁			
		应力 (MPa)	挠度 (mm)	弯矩 (KN·m)	剪力 (KN)	应力 (MPa)	挠度 (mm)	弯矩 (KN·m)	剪力 (KN)
工况 1 第一次拼装	0	-8	2	-2264	551	-19	4	-213	51
工况 2 第三次拼装前	12	-21	4	-5924	-699	-66	114	-1625	-167
工况 3 最大前悬	24	-27	8	-7599	-829	-62	128	-1516	-155
工况 4 过墩 1/3	60	-28	13	-7786	-1205	-45	33	-875	174
工况 5 过墩 2/3	71	-18	7	-5000	-975	-57	26	-1109	269
工况 6 最后一次拼装	137	-19	8	-5453	946	-12	7	-220	62
工况 7 顶推到位	141	-18	7	-4836	-961	-63	103	-1542	-158
工况 8 成桥状态	165	-42	12	-6743	912				

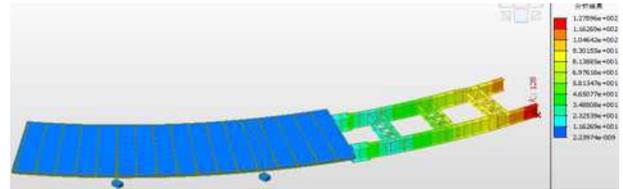


图 6 工况 3 导梁挠度值图

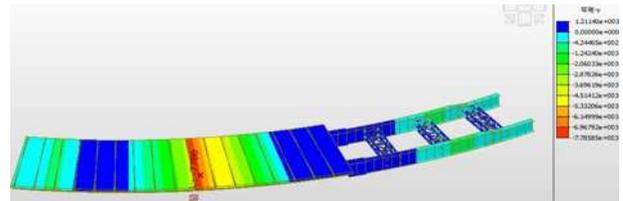


图 7 工况 4 钢箱梁弯矩值图

钢箱梁最大应力 42MPa < 容许应力 275MPa，最大下挠度 13mm < 30000/500=60mm。导梁最大应力 66MPa < 容许应力 190MPa，最大下挠度 128mm < 30000/200=150mm，钢箱梁及导梁计算数值均符合要求。

4.2 抗倾覆的验算

为确保施工的安全，对钢箱梁和导梁在顶推过程中的抗倾覆按力矩平衡公式 $\Sigma M=0$ 进行简化分析，抗倾覆系数需满足 1.3 倍的抗倾覆要求。

钢箱梁进行第三次拼装时为最不利工况，导梁及部分箱梁处于前悬状态，对此工况进行验算，桥体延米重 5.17t/m，导梁延米重 1.43t/m，稳定力矩 $M_1=90.449 \times 17.495 \div 2=791.2\text{KNm}$ ，倾覆力矩 $M_{倾}=25.209 \times 4.876 \div 2+30.03 \times 25.876 \div 2=449.94\text{KNm}$ ，抗倾覆系数为 $1.76 > 1.3$ 。满足要求，但施工过程中需加强监测。

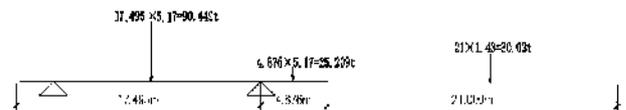


图 8 抗倾覆计算简化图

4.3 导梁的优化计算分析

在 30m 跨度和顶推最大前悬情况下，通过 Midas civil 对不同导梁长度下进行模拟分析，得出导梁长度变化情况下的挠度值和应力值，梁跨度的 0.6~0.7 倍时，组合应力和挠度值较为合理，选择合理的导梁长度可以增加顶推跨度和减少钢箱梁的组合应力，导梁局部组合应力较大时，需对局部结构进行加强。

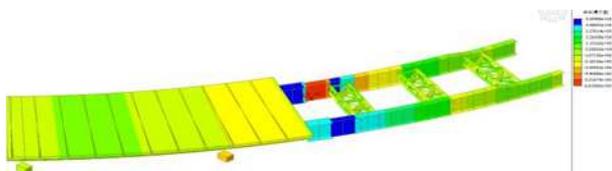


图 5 工况 2 导梁应力图

表2 导梁长度变化情况下的挠度值和应力值

分析的项目	导梁					钢箱梁			
	导梁长度 (m)	实际挠度 (m)	许用挠度 (m)	组合应力 (MPa)	许用应力 (MPa)	实际挠度 (m)	许用挠度 (m)	组合应力 (MPa)	许用应力 (MPa)
0.4 L	12	94.6	150	21.8	190	37.4	60	93.4	275
0.5 L	15	91.8	150	30.3	190	19.3	60	72.1	275
0.6 L	18	145.8	150	52.6	190	11.3	60	58.6	275
0.7 L	21	185.3	150	61.8	190	7.7	60	61.8	275
0.8 L	24	250.6	150	78.2	190	3.6	60	78.2	275
0.9 L	27	450.8	150	124.2	190	1.3	60	124.2	275

注：上接表2

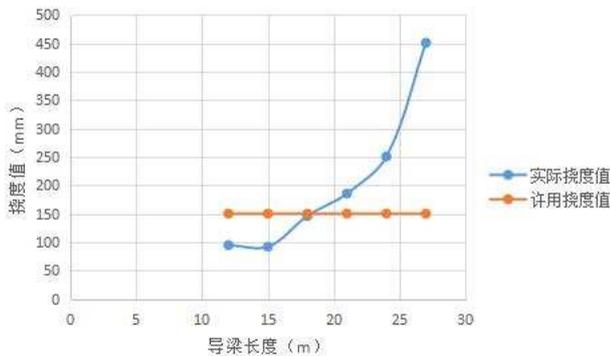


图9 导梁长度与挠度关系图

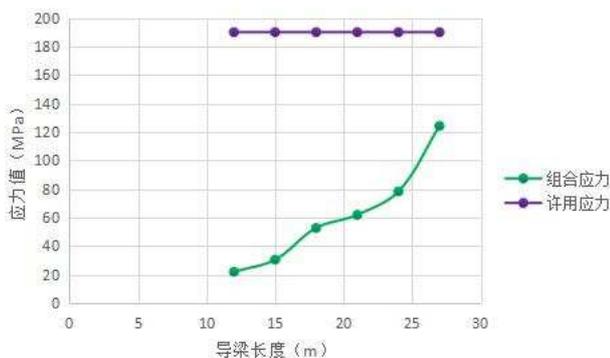


图10 导梁长度与应力关系图

4.4 临时支架的计算分析

通过对主要顶推工况进行分析，得出下部临时支架和钢牛腿不同工况的反力，拼装完成时临时支架的反力最大，顶推过墩 1/3 时钢牛腿的反力最大。

表3 主要顶推工况反力汇总

反力单位：KN

分析的项目	顶推距离 (m)	临时支架 D1		钢牛腿 T1		钢牛腿 T2		钢牛腿 T3		钢牛腿 T4		钢牛腿 T5		钢牛腿 T6	
		内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧
工况1 第一次拼装	0	460	410	140	140										
工况2 第三次拼装前	12	320	230	830	600										
工况3 最大前悬	24	470	630	910	600										
工况4 过墩 1/3	60	450	390	1120	990	280	260								
工况5 过墩 2/3	71	470	520	800	810	390	390								
工况6 最后一次拼装	137	940	470	640	840	1000	880	880	870	910	900	690	800	150	150
工况7 顶推到位	141			920	900	1010	890	890	890	920	910	760	870	760	500
工况8 成桥状态	165	880	650	550	820	950	870	850	840	870	860	750	840	440	440

注：上接表3

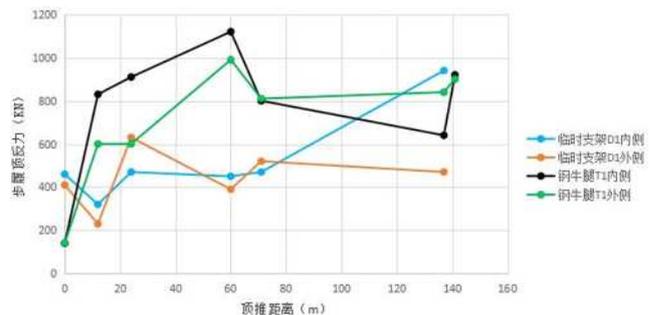


图11 顶推距离与反力关系图

表4 临时支架 D1 各主要受力构件应力、反力和挠度数值

项目	分配梁		立柱			柱间支撑		
	组合应力 (MPa)	挠度 (mm)	组合应力 (MPa)	轴力 (KN)	挠度 (mm)	组合应力 (MPa)	轴力 (KN)	挠度 (mm)
荷载1: 自重+竖向力	-81.7	8	-118	-485.7	5.4	-54.5	-127.6	5
荷载2: 自重+竖向力+纵向水平力	-81.6	8	-120.7	-484.3	5.3	-56.7	-133.8	5
荷载3: 自重+竖向力+横向水平力	-81.3	8	-118.3	-480.8	5.2	-52.6	-122.8	5
荷载4: 成桥状	-10.6	3	-25.1	-175.4	2.5	-15.2	-29.6	2

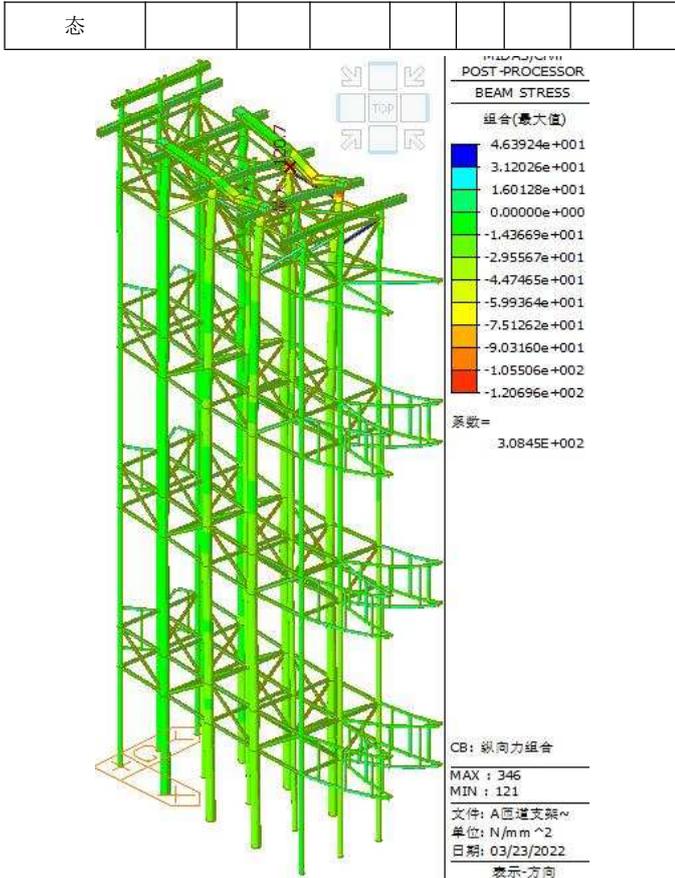


图 12 临时支架组合应力

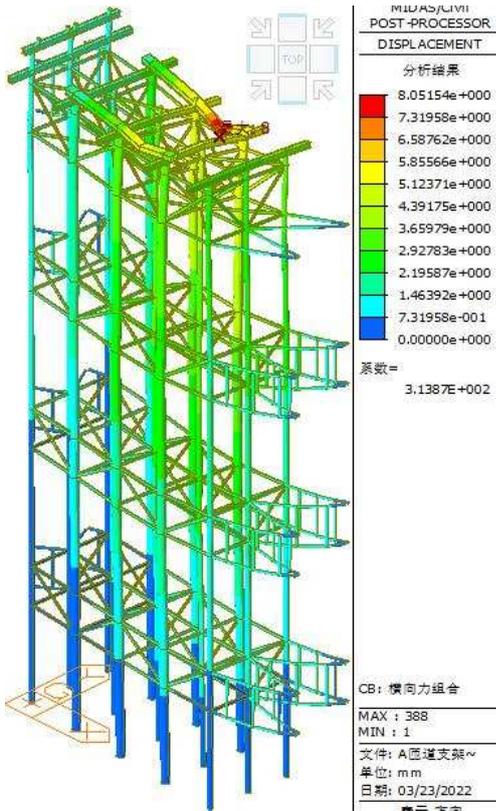


图 13 临时支架挠度

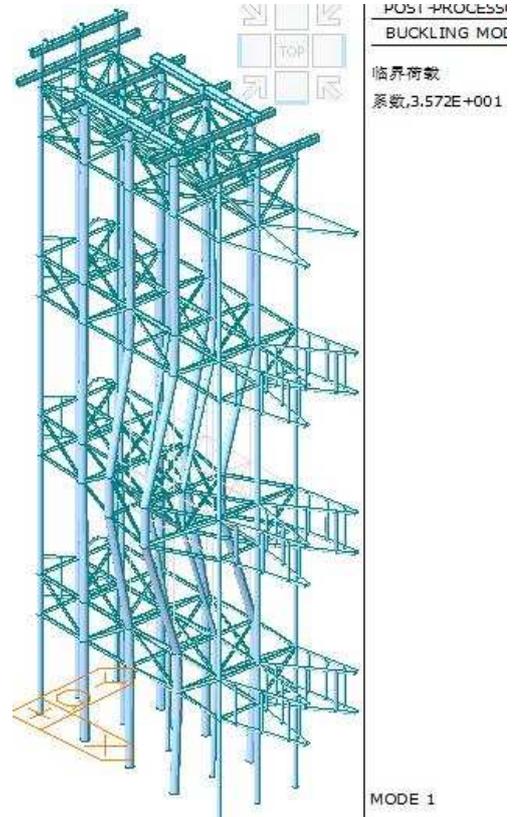


图 14 临时支架屈曲模态 1

4.5 钢牛腿的计算分析

荷载 1 作用下分配梁最大组合应力 $81.7\text{MPa} < \text{容许应力 } 190\text{MPa}$, 最大挠度 $8\text{mm} < 4300/400=10.75\text{mm}$ 。荷载 2 作用下立柱最大组合应力 $120.7\text{MPa} < \text{容许应力 } 190\text{MPa}$, 最大挠度 $5.4\text{mm} < 47980/400=119\text{mm}$ 。荷载 2 作用下柱间支撑最大组合应力 $56.7\text{MPa} < \text{容许应力 } 190\text{MPa}$, 最大挠度 $5\text{mm} < 4526/400=11.3\text{mm}$ 。对临时支架 D1 屈曲分析, 五种模态特征值数据分别为 35.716886、36.958409、38.238039、42.063732、52.075401。支架临界荷载系数 35~52, 即临时支架会在受力 $35 \times (\text{自重} + \text{竖向力} + \text{纵向水平力} + \text{横向水力})$ 时发生屈曲变形。

表 5 钢牛腿应力、反力和挠度数值

项目	最大反力 (kN)		组合应力	剪应力	挠度
	Z 轴向	X 轴向	(MPa)	(MPa)	(mm)
荷载组合 1: 自重+竖向力	560	400	126	89	4
荷载组合 2: 自重+竖向力+纵向顶推水平力	560	350	124	89	4
荷载组合 3: 自重+竖向力+横向调整水平力	560	380	138	89	4

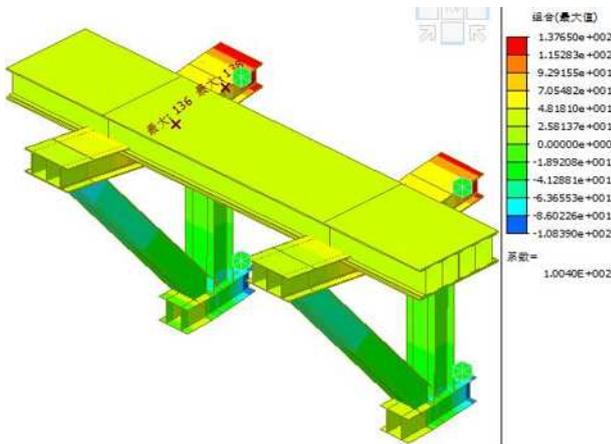


图 15 钢牛腿组合应力图

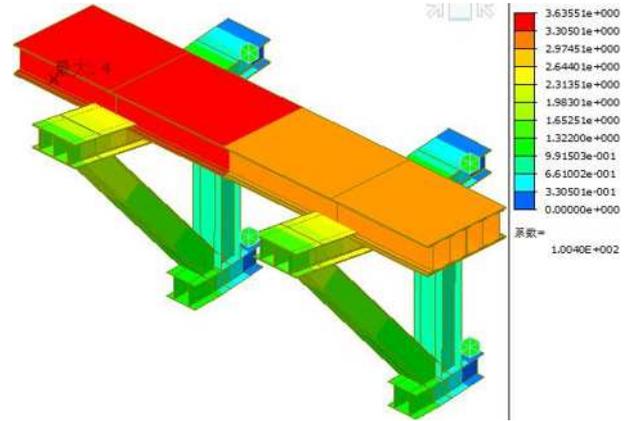


图 16 钢牛腿挠度图

钢牛腿最大反力 560KN, 最大组合应力 135MPa < 容许应力 190Mpa, 最大剪切应力 89MPa < 容许剪切力 110MPa, 最大挠度 4mm < 3000/400=7.5mm, 结构满足使用要求。

5 结语

超高墩小曲率半径连续钢箱梁架设关键技术在于采用钢牛腿代替传统支架, 并进行多点顶推, 其施工核心点在于拼装平台支架、导梁、钢牛腿的优化设计和计算。拼装平台支架选择合适的柱距和支撑高度可以减少支架的用量, 减小支架的安装、拆除难度, 增加施工的安全性, 同时降低成本; 导梁设计为梁跨度的 0.6~0.7 倍时较为合理。贵州省赫章东互通 A 匝道桥钢箱梁应用超高墩小曲率半径连续钢箱梁少支架顶推技术, 节省了成本且安全可靠的完成架设任务。

参考文献:

- [1] 中铁九桥工程有限公司主编.公路桥梁施工系列手册.桥梁钢结构[M].北京:人民交通出版社,2014:4.
- [2] 中交一公局集团有限公司主编.公路桥涵施工技术规范[M].北京:人民交通出版社,2020:7.
- [3] 张晓东.桥梁顶推施工技术[J].公路,2003,000(009):45-51.
- [4] 冯明生.顶推技术在公路桥梁中的应用探讨[J].科技创新导报.2013(01).