

城际铁路下钢箱梁人行天桥分节段吊装及交通疏解方案研究

李夫杰 冯辉 裴昊

中电建铁路建设投资集团有限公司，北京，100070；

摘要：本文以某道路改造工程钢箱梁人行天桥施工为例，基于 Midas/Civil 有限元软件，首先从主梁结构受力的角度，对钢箱梁吊装时的节段进行划分，并确定临时支撑的位置；其次，对临时支撑的搭设进行设计并给出立柱验算结果；最后通过设计不同节段的吊装方案，给出不同的交通疏解方案，综合道路通行能力和整个吊装过程中主梁、桥墩关键截面受力这两种因素，确定出本工程人行天桥的较优吊装施工方案。

关键词：钢箱梁；Midas/Civil；吊装；临时支撑；交通疏解

DOI：10.69979/3029-2727.25.02.008

1 工程概况

1.1 工程概况

民族大道（三环线-江夏大桥）道路提升改造工程，项目位于湖北省武汉市东湖高新区内，南起江夏大桥，北至三环线，道路全长约 3.21 公里。为解决路口周边行人过街问题，本工程共新建两处人行天桥，本文仅以 K3+140.855m 人行天桥展开研究，该桥为跨径 22+34.4+25.5m 的连续钢箱梁，主桥采用 Q355C 钢结构材料，桥宽 4.3m，梁高 1.2m。梯道采用边纵梁作为主要受力结构，横隔板和踏步作为横向联系板，与主桥刚接，梯道梁宽 2.7m，梁高 0.6m。桥墩为圆柱墩，其中 P1-3 墩采用钢墩（固结墩），其余桥墩均采用钢筋混凝土墩，布置两支座，间距 2.5m。

人行天桥下穿武咸城际铁路，在铁路两桥墩中间穿过，铁路下净空高度 14.53m，天桥桥面距离武咸城际铁路梁底仅 7.4m。

1.2 施工难点分析

（1）天桥桥面距离城际铁路梁底净空高度较低（仅 7.4m），根据铁路安全管理规定，桥梁吊装施工时需与铁路桥梁保证安全距离（>5m）且做好有效的防护措施。

因此，确定本天桥钢箱梁的分段吊装方案是本工程的难点；

（2）本人行天桥同时横跨民族大道和大学园路两条主干线，现状车流量大，大学园路-江夏大桥段该段双向流量达 4323pcu/h。在搭设临时支撑和钢箱梁的吊装过程中，对交通影响较大。如何确定本工程施工时的交通疏解方案，最大限度减小对既有道路的通行能力的影响是本工程的难点。

2 钢箱梁分段吊装及临时支撑搭设

2.1 钢箱梁分段吊装

人行天桥采用工厂分节段制造钢箱梁、现场吊装连接成桥的方式进行施工。由于钢箱梁结构焊缝较多，所产生的焊接变形和残余应力较大，因此在钢箱梁节段拼装焊接过程中，焊接位置应选择在全桥结构受力较小位置处。通过采用 Midas/Civil 建立全桥有限元模型（图 1），对主梁结构进行分析计算，容易发现在自重作用下弯矩零点也即应力零点处分别出现在距离 P1-2 墩左右约各 5m 处和距离 P1-3 墩左右约各 7m 处（图 2）。将钢箱梁焊接位置布设至弯矩（应力）零点处附近能够保证结构整体的稳定性和安全性，同时也能够有效地控制结构施工过程中及成桥后的挠度变形。

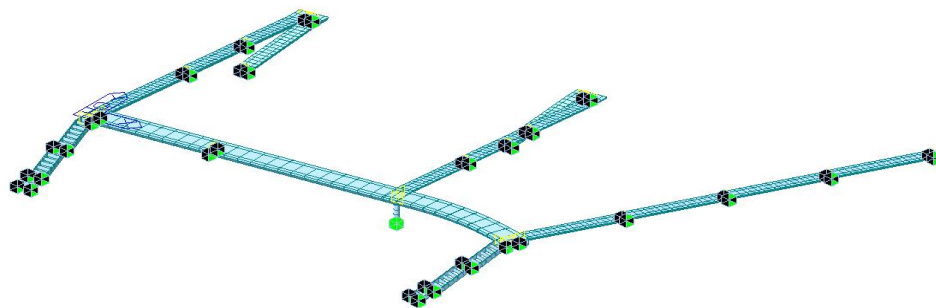


图 1 有限元模型

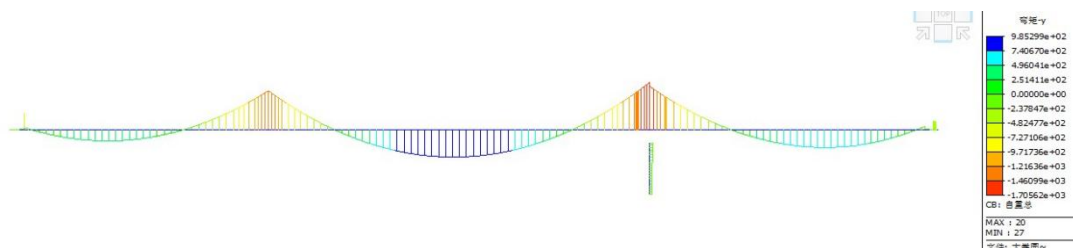


图 2 自重作用下主梁弯矩图 (kNm)

此外, 由于两节段焊接位置下临时支撑的搭设需要占用现有车道, 而民族大道作为连接东湖高新区与江夏区的重要南北通道之一, 路段车流量大, 早晚上下班高峰期交通繁忙。因此, 钢箱梁分节段的首要原则是尽量减少所搭设临时支撑对现状交通通行能力的影响。同时, 充分考虑施工现场作业面以及设计建议, 拟定钢箱梁主梁分为 A~E 五段 (19.35m+8m+20m+17.25m+20m) 进行吊装, 节段重量分别为 32.74t+13.54t+33.84t+29.19t+33.84t。

2.2 临时支撑设计

对于 K3+140.855 人行天桥, 在设计 P1-2 和 P1-3 两个墩两侧各设 2 个框架式支撑。每个框架式支撑由 6 根立柱、若干横撑和斜撑组成; 6 根立柱分为 2 排, 每排 3 根, 间距 2m, 高 6.4m, 采用 $\Phi 273 \times 8$ mm 钢管, 钢材选用 Q235b。横、斜撑采用角钢 L75 $\times$ 6 或 10#槽钢连接成整体组成 2 $\times$ 4 米井字型栓接或焊接支架, 以增加框架整体横向刚度。每排 3 根立柱上设支撑横梁, 横梁由 2 根热轧 H 型钢 HM440 $\times$ 300 $\times$ 11 $\times$ 18 并排拼装组成, 长 6m。采用新建路面结构的 C20 混凝土作为立柱支座的基础, 需预埋 $\Phi 24$ 螺栓与立柱法兰连接, 在底座板及分配横梁上设置 12mm 的加劲板。

2.3 临时支撑立柱验算

根据本文吊装及临时支撑方案, 箱梁吊装时悬臂长度均仅为 1.25m, 相比节段长度可忽略不及。因此, 各临时支撑受力情况相同, 均仅为钢箱梁节段自重及其上部所承受荷载总和的一半, 因此可仅验算吊装时自重最大节段下的临时支撑的受力情况, 若其满足验算要求, 则其余各临时支撑均满足要求^[9]。对于静载安全系数均取 1.2, 动载安全系数均取 1.4。

K3+140.855 人行天桥 C/D 节段 (20m) 自重最大, 为 338.4kN。行人荷载按 5kN/m² 进行考虑, 风雪等其他荷载按 0.3kN/m² 进行考虑, 则总荷载 $G=1.2 \times 338.4 + 1.$

$4 \times [(5+0.3) \times 21 \times 4.3] = 1076.1$ kN, 单根立柱所受轴力为 $N=G/(2 \times 3) = 179.4$ kN。

2.3.1 外径与构件比

根据《钢结构设计规范》(GB50017-2017) 规定, 圆管截面的受压构件, 其外径与构件壁厚之比不应超过 100。该结构外径与构件壁厚之比为: $273/8 = 34.1 < 100$, 满足规范要求。

2.3.2 轴心受压立柱强度

单根立柱截面面积 $A_n = \pi \times [273^2 - (273-16)^2] / 4 = 6656.8$ mm²

立柱轴心受压正应力 $\delta = N/A_n = 179.4 \times 1000 / 6656.8 = 26.95$ MPa < 205 MPa。

Q235 钢材的抗拉、抗压、抗弯强度为 205MPa, 满足构件受力要求。

2.3.3 立柱长细比

立柱惯性矩 $I = \pi (D^4 - d^4) / 4 = \pi \times [273^4 - (273-16)^4] / 64 = 5.849 \times 107$ mm⁴

回转半径 $i = (I/A_n)^{0.5} = (5.849 \times 107 / 6656.8)^{0.5} = 93.73$ mm

长细比 $\lambda_{\max} = L/i = 6400 / 93.73 = 68.28$

根据《钢结构设计规范》(GB50017-2017) 表 7.4.6 规定, 轴心受压柱的容许长细比 $[\lambda] = 150$, 满足规范要求。

2.3.4 压杆稳定性

轴心受压构件的稳定性计算应符合下式要求:

$$\frac{N}{\phi A_n} \leq f$$

式中: ϕ 为轴心受压构件的稳定系数, 根据构件长细比, 按《钢结构设计规范》(GB50017-2017) 附录 D 取用。本构件取 $\phi = 0.791$ 。

$$\frac{N}{\phi A_n} = \frac{179.4 \times 10^3}{0.791 \times 6656.8} = 34.01 \text{ MPa} \leq f = 205 \text{ MPa}$$

满足构件受力要求。

2.3.5 柱对基础局部混凝土压应力验算

本支撑体系采用新建路面结构的 C20 混凝土作为立柱支座的基础, C20 混凝土的轴心抗压强度设计值 $f_a=9.6\text{MPa}$ 。

钢材为 Q235b 的 $\phi 273\times 6\text{mm}$ 钢管每延米理论重量为 40.1kg, H 型钢 HM440 $\times 300\times 11\times 18$ 每延米理论重量为 120.8kg。其余横、斜撑等构件总重量按 1000kg 进行考虑, 静载安全系数仍取 1.2, 则单根立柱基地总压力为:

$$N_c=179.4+1.2\times (0.401\times 6.4+1.208\times 6/3+10/6)=187.4\text{kN}$$

$$\text{柱对基础局部混凝土压应力 } \sigma = N_c / (\pi D^2/4) = 187.4 \times 1000 / (\pi \times 273^2/4) = 3.2\text{MPa} \leq f_a = 9.6\text{MPa}$$

基地受力满足要求。

3 交通疏解方案研究对比

城市钢箱梁人行天桥施工的建设不可避免地要在现状道路上进行, 占道施工必然会降低现状道路的通行能力, 干扰正常的交通秩序, 给已经拥堵不堪的城市交通带来更加严峻的挑战。因此, 道路的交通组织、疏解问题是施工的一大难题。

对于 K3+140.855m 人行天桥, 初步拟设计两种搭设方案如下。其中, 由于大学园路和民族大道岔路口往北

约 300m 出有连通支路, 因此在封闭大学园路时, 可利用此支路将车辆引入民族大道。同理, 在封闭民族大道时同样可利用此支路将车辆引入大学园路。

方案一: 搭设 D 段两侧临时支撑→吊装 D 段钢箱梁及梯道→吊装 E 段钢箱梁及梯道→拆除 D 段右侧临时支撑→吊装 B 段两侧临时支撑→吊装 B 段钢箱梁→吊装 C 段钢箱梁→拆除 C 段两侧临时支撑→吊装 A 段钢箱梁及梯道。

方案二: 搭设 B、D 段两侧临时支撑→吊装 B、D 段钢箱梁及梯道→吊装 C 段钢箱梁→拆除 C 段两侧临时支撑→吊装 A 段钢箱梁及梯道→拆除 B 段左侧临时支撑→吊装 E 段钢箱梁及梯道。

3.1 通行能力对比研究

通过对两种交通疏解方案的民族大道和大学园路两条主干道路的通行能力对比, 容易发现, 交通疏解方案二相比方案一, 由于 B、D 段钢箱梁可以同时吊装, 充分的调动人工机械等资源, 能够达到节约工期的目的, 但与之俱来的是道路的通行能力略有下降。对于民族大道, 初此吊装时通行能力由原来的 3 车道和 4 车道均减少为 2 车道, 之后施工阶段两种方案道路通行能力几乎相近。而对于大学园路, 除初次吊装以及吊装 E 段钢箱梁需要完全封闭车道外, 其余施工阶段的道路通行能力均显著下降, 均由方案一的双向 3 车道减少为双向 2 车道, 这也会对交通造成较大的压力。

表 1 交通疏解方案一道路通行车道数

交通疏解方案一		吊装施工阶段				
		D 段钢箱梁及梯道	E 段钢箱梁及梯道	B 段钢箱梁	C 段钢箱梁	A 段钢箱梁及梯道
民族大道	北→南	3	3	2	1	2
	南→北	4	4	2	1	2
大学园路	北→南	2	0	3	3	3
	南→北	2	0	3	3	3

表 2 交通疏解方案二道路通行车道数

交通疏解方案二		吊装施工阶段			
		B、D 段钢箱梁及梯道	C 段钢箱梁	A 段钢箱梁及梯道	E 段钢箱梁及梯道
民族大道	北→南	2	1	2	3
	南→北	2	1	2	4
大学园路	北→南	2	2	2	0
	南→北	2	2	2	0

3.2 主梁和桥墩关键截面受力

通过 Midas/Civil 建立两种吊装方案全施工过程的

有限元模型, 并对吊装过程中固定墩 P1-3 墩顶主梁截面弯矩情况进行分析。同时, 由于圆形截面抵抗矩 W 与

其直径 d 的三次方成正比（式 1），截面所受应力 σ 与抵抗矩 W 呈反比，对于本桥直径较小的固定墩而言，其墩底截面容易产生较大的应力，因此，同样需要关注在整个施工过程中桥墩墩底所受应力情况。

$$W = \pi d^3 / 32 \quad \text{式 1}$$

$$\sigma = M / W \quad \text{式 2}$$

表 3 和表 4 分别给出了两种吊装方案固定墩墩顶主梁截面弯矩和墩底截面应力，对于主梁截面弯矩，容易

发现方案二相比方案一，虽然其主梁截面弯矩峰值有所减小，但相邻两个吊装施工节段弯矩相差较大，从节段 C 到节段 A 吊装时墩顶截面负弯矩增加 1151.3kNm，而方案一在整体吊装过程中墩顶截面负弯矩的增长比较平滑，最多两个相邻施工节段（E/B→C）仅增加 744.2 kNm，更有利于主梁截面的受力控制。对于固定墩墩底截面应力，两种吊装方案墩底应力值相差很小，但方案一在整个吊装过程中所产生的应力更小。

表 3 固定墩墩顶主梁截面弯矩（kNm）

方案一					
吊装施工节段	D	E/B	C	A	成桥
截面弯矩	-130.4	-86.7	-830.9	-1340.9	-1243.2
方案二					
吊装施工节段	D/B	C	A	E	成桥
截面弯矩	-130.4	-50.8	-1202.1	-1199.7	-1243.2

表 4 固定墩墩底截面应力（MPa）

方案一					
吊装施工节段	D	E/B	C	A	成桥
墩底截面应力	-10.7	-7	-7.5	-7.9	-7.9
方案二					
吊装施工节段	D/B	C	A	E	成桥
墩底截面应力	-10.7	-8.3	-9.3	-8	-7.9

因此，虽然方案二的施工工期更容易控制，但综合道路通行能力和主梁、桥墩等关键截面的受力情况，方案一相比方案二更有优势。因此，可以考虑采用方案一作为本钢箱梁人行天桥的施工吊装方案及交通疏解方案。

4 结论

通过对钢箱梁人行天桥分段吊装及交通疏解方案进行讨论研究，并结合有限元分析软件，从理论角度确定了钢箱梁的节段划分和临时支撑的位置。在实际吊装施工前，综合道路通行能力和结构受力，给出了施工吊

装方案及交通疏解方案的最优解，对其他类似桥梁项目的施工具有一定的指导及借鉴意义。

参考文献

[1] 廖清. 城市快速路施工交通组织优化研究[D]. 华南理工大学, 2023.
[2] 陈其健. 浅谈现状城市道路改造交通疏解[J]. 城市道桥与防洪, 2021(05): 45-48+11.
[3] 万骏, 丁鸿宇, 马晨曦. 老城区道路改造工程的交通疏解设计分析[J]. 门窗, 2019(11): 188.