

吊机荷载作用下简支预应力小箱梁承载能力简易验算

宋 健

上海地江集团有限公司 上海 201114

摘 要: 针对城市桥梁施工中“利用已建桥梁承担施工荷载”的常见需求,解决施工现场缺乏有限元计算条件时的快速验算难题,提出一种基于荷载对比的简支预应力小箱梁承载能力简易验算方法。以25米简支预应力小箱梁引桥为研究对象,以80T汽车吊施工为典型工况,通过计算吊机支腿反力与公路Ⅰ级荷载,采用刚性横梁法(跨中)和杠杆法(支点)求解荷载横向分布系数,结合影响线法计算L/2、L/8等典型截面的弯矩和剪力,通过对比两类荷载的内力效应验证施工安全性。该方法无需复杂建模,计算逻辑清晰、参数取值规范,可为类似工程的施工荷载快速验算提供参考。

关键词: 简支预应力小箱梁; 吊机荷载; 横向分布系数; 影响线法; 承载能力验算

引言

随着城市桥梁工程建设向高密度、集约化方向发展,红线内用地狭小已成为制约施工组织的关键因素^[1]。为节约工期与成本,施工单位常采用在已建成桥梁上布置吊机、架桥机等设备的施工方案^[2]。此类方案的核心风险在于施工荷载可能超出桥梁设计承载能力,引发结构损伤或安全事故,因此需对桥梁承载能力进行精准验算^[3]。

当前工程实践中,桥梁承载能力验算多依赖Midas、Ansys等有限元软件^[4],但施工现场技术人员往往缺乏复杂建模能力,难以快速完成工况复核。因此,开发一种简洁高效、易于操作的施工荷载简易验算方法,对保障施工安全、提高施工效率具有重要工程意义。

1 工程概况

某工程主桥为60米跨高速钢混叠合梁,引桥为25米简支预应力钢筋混凝土小箱梁结构,计算跨径为24.3米,道路等级为一级公路,设计汽车荷载为公路Ⅰ级荷载,人群荷载按《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2015)取用。桥梁为左右分幅设计,左幅引桥横断面布置为4.2米宽人非共板,1.75米宽机非分隔带,12.5米宽机动车道布置三条车道。

主桥采用200T40米跨径架桥机进行架设,选择80T汽车吊在引桥上拼装架桥机。本文主要计算80T汽车吊在小箱梁上工作的工况。引桥断面如图1,吊机平面图如图2:

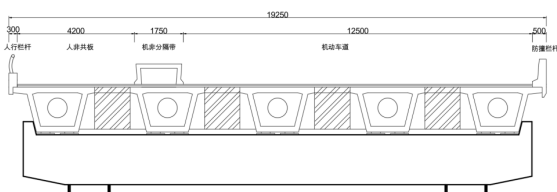


图1: 引桥横断面图

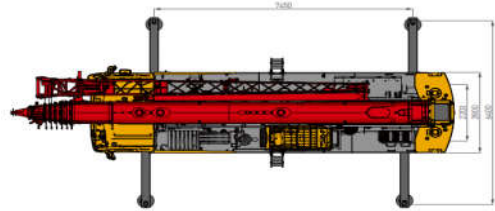


图2: 80T吊机平面尺寸图

2 吊机支腿反力及公路Ⅰ级荷载计算

2.1 吊机支腿反力计算

80T吊机G自重(含配重)为49T,最不利吊装工况为:工作半径 $L_0 = 10$ 米,最大吊重 $P = 10$ T。吊机支腿纵向距离 $2a = 7.45$ 米,横向距离 $2b = 6.4$ 米,简化吊机自重和吊重在四条支腿的矩形中心处,计算模型平面如图3。支腿反力计算采用代向群吊机最大支腿反力的计算原理^[5],计算公式如下:

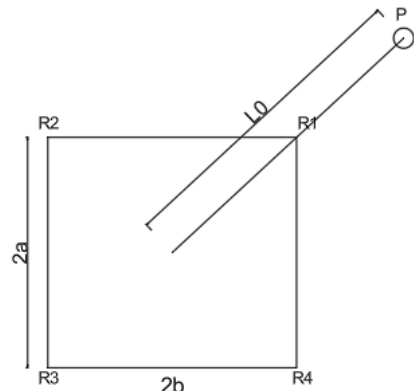


图3: 最大反力计算示意图

$$R_1 = (G+P)/4 + PL_0 (a_2+b_2) 3/2/4 (a_4+b_4)$$

$$R_2 = (G+P)/4 + (a_2+b_2) 1/2 (a_2-b_2) /4 (a_4+b_4)$$

$$R_3 = (G+P)/4 - PL_0 (a_2+b_2) 3/2/4 (a_4+b_4)$$

$$R4 = (G+P)/4 - (a2+b2) / 2 (a2-b2) / 4 (a4+b4)$$

代入上述数据可得: $R1 = 24.7T$, $R2 \approx 14.755T$, $R3 = 4.79T$, $R4 \approx 14.755T$ 。

2.2 公路I级荷载计算

公路I级车道荷载, 有均布荷载 $q_k = 10.5KN/m$ 和集中荷载 $P_k = 2(L_0+130) = 308.6KN$

L_0 ——计算跨径, 取24.3米

3 荷载横向分布系数计算

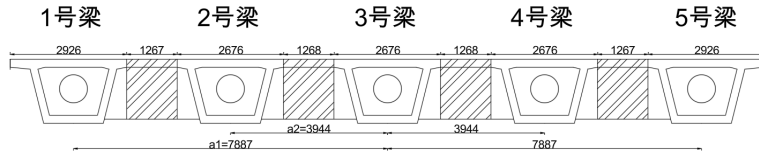


图4: 引桥横断面数据图

η_{ij} ——单位荷载位于横向位置 j 时, 第 i 号梁的横向影响线坐标;

n ——小箱梁横断面片数, 按上图取5;

a_i ——第 i 号梁到横断面中心的距离, 具体数据见图4;

e_j ——单位荷载到横断面中心的距离。

根据公式可得出:

单位荷载位于1号梁的横向影响线坐标:

$$\eta_{11} = 1/5 + 7.887 \times 7.887 / (7.8872 + 3.9442 + 0.2 + 3.9442 + 7.8872) = 0.6$$

$$\eta_{21} = 1/5 + 3.944 \times 7.887 / (7.8872 + 3.9442 + 0.2 + 3.9442 + 7.8872) = 0.4$$

$$\eta_{31} = 1/5 + 0 \times 7.887 / (7.8872 + 3.9442 + 0.2 + 3.9442 + 7.8872) = 0.2$$

$$\eta_{41} = 1/5 - 3.944 \times 7.887 / (7.8872 + 3.9442 + 0.2 + 3.9442 + 7.8872) = 0$$

引桥为简支预应力小箱梁, 跨中横向分布系数采用刚性横梁法进行计算, 支点处采用杠杆法进行计算, 支点处到 $L/4$ 处采用直线连接。

3.1 刚性横梁法计算跨中横向分布系数

根据刚性横梁法原理及公式做出横向影响线, 引桥横断面具体数据如图4, 横向影响线公式为:

$$\eta_{ij} = 1/n + a_i e_j / \sum a_i^2$$

$$\eta_{51} = 1/5 - 7.887 \times 7.887 / (7.8872 + 3.9442 + 0.2 + 3.9442 + 7.8872) = -0.2$$

单位荷载位于2号梁的横向影响线坐标:

$$\eta_{21} = 0.4 \quad \eta_{22} = 0.3 \quad \eta_{23} = 0.2 \quad \eta_{24} = 0.1 \quad \eta_{25} = 0$$

单位荷载位于3号梁的横向影响线坐标:

$$\eta_{31} = 0.2 \quad \eta_{32} = 0.2 \quad \eta_{33} = 0.2 \quad \eta_{34} = 0.2 \quad \eta_{35} = 0.5$$

单位荷载位于4号梁的横向影响线坐标:

$$\eta_{41} = 0 \quad \eta_{42} = 0.1 \quad \eta_{43} = 0.2 \quad \eta_{44} = 0.3 \quad \eta_{45} = 0.4$$

单位荷载位于5号梁的横向影响线坐标:

$$\eta_{51} = -0.2 \quad \eta_{52} = 0 \quad \eta_{53} = 0.2 \quad \eta_{54} = 0.4 \quad \eta_{55} = 0.6$$

根据上述计算的横向影响线坐标, 每片梁的横向影响线, 并布载车道荷载(根据《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2015)布置)和吊机荷载, 防撞栏杆和机非分隔带与荷载最近的距离为0.5米。求出车道荷载横向分布系数和吊机荷载横向分布系数, 如图5、6:

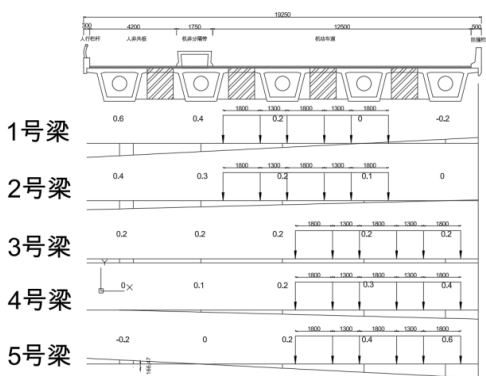


图5: 车道荷载横向影响线

汽车轮重和吊机支腿的荷载横向影响坐标可根据横向影响线等比例求出, 也可在CAD上直接量取, 计算方法不在此赘述。

根据车道荷载影响线, 可知5号梁的汽车荷载横向分布

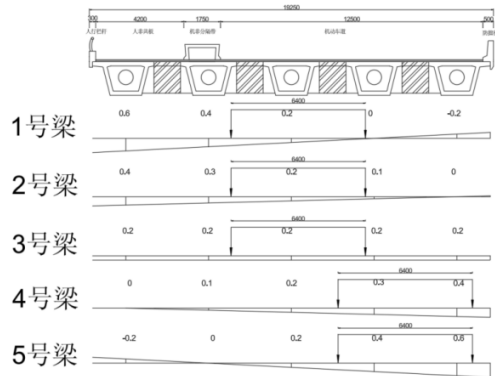


图6: 吊机荷载横向影响线

系数最大, 也就是5号梁为最大承载的梁, 则5号梁的横向分布系数 $m_{cr} = 1/2 (0.232 + 0.323 + 0.389 + 0.48 + 0.546 + 0.637) = 1.305$ 。

考虑多车道折减系数后的值为(根据桥梁通规三条

车道的折减系数为0.78)：

$$0.78 \times 1.305 = 1.0179$$

人群： $m_{cr} = -0.166$ ，影响线为负则不考虑布载

吊机因四条支腿荷载不同，总横向分布系数需按荷载加权求和计算：

$$\eta_{1左} = 0.346\eta_{1右} = 0.021$$

$$\eta_{2左} = 0.273\eta_{2右} = 0.111$$

$$\eta_{3左} = 0.2\eta_{3右} = 0.2$$

$$\eta_{4左} = 0.256\eta_{4右} = 0.418$$

$$\eta_{5左} = 0.312\eta_{5右} = 0.636$$

根据5号梁横向影响线可得 $\eta_{5右} = 0.636$ ， $\eta_{5左} = 0.312$ ，

根据上文可知吊机四条支腿反力总和 $\Sigma F = 59t$

$$\begin{aligned} m_{cq吊} &= (R_1\eta_{5左} + R_2\eta_{5右} + R_3\eta_{5右} + R_4\eta_{5左}) / \Sigma F \\ &= (24.7 \times 0.636 + 14.755 \times 0.312 + 4.79 \times 0.312 + \\ &14.755 \times 0.636) / 59 = 0.53. \end{aligned}$$

3.2 杠杆法计算支点处横向分布系数

利用杠杆法画出横向影响线，根据上述的车道布置位置可知只计算5号梁即可，5号梁的横向影响线如图7：

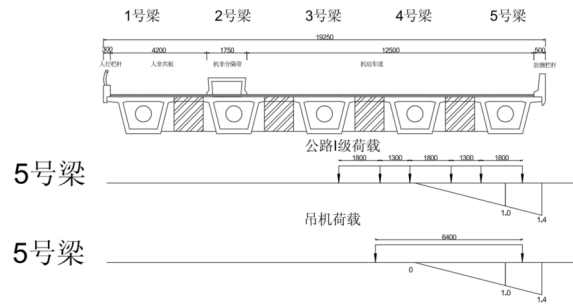


图7：杠杆法横向影响线

车辆荷载的横向分布系数为：

$$5号梁：m_{cq} = 1/2 (0.41 + 0.731 + 1.188) = 1.1645$$

根据吊机支腿站位位置位置可知

$$\begin{aligned} 5号梁：m_{cq} &= R_1\eta_{5左} + R_4\eta_{5左} / \Sigma F \\ &= (24.7 \times 1.188 + 14.755 \times 1.188) / 59 = 0.79 \end{aligned}$$

3.3 支点到L/4处横向分布系数计算

根据上述计算无论是汽车荷载还是吊机荷载，无论在支点处还是跨中处都是5号梁的横向分布系数最大，故支点处的横向荷载分布系数用直线与L/4处（用跨中横向分布系数）连接，如图8：



图8：汽车、吊机荷载纵桥向分布

4 小箱梁各断面弯矩及剪力计算

4.1 简支桥梁基频f采用下列公式计算

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}}$$

$$m_c = \frac{G}{g}$$

l——计算跨径（m），24.3m；

E——弹性模量（N/m²）

I_c——跨中截面的截面惯性矩（m⁴），利用迈达斯截面特性求解器可得；

m_c——跨中处单位长度质量（kg/m）；

G——跨中处延米结构重力（N/m）；

G——重力加速度（m/s²）

冲击系数μ按下式计算：

$$\mu = 0.17671\eta f^{-0.0157}$$

在不方便求解截面特性时，冲击系数取0.25偏安全。

4.2 计算5号梁各截面在公路I级荷载下的弯矩和剪力

利用影响线法计算计算弯矩和剪力

① L/2截面

汽车弯矩

L/2截面处弯矩影响线如图9，跨中截面弯矩影响线面积：

$$\Omega = \frac{1}{8} l^2 = 78.125m^2$$

$$\begin{aligned} M_q &= (1 + \mu) \times (m_{cq} q_k \Omega + m_{cq} P_k y_k) \\ &= 1.25 \times (1.0179 \times 10.5 \times 78.125 + 1.0179 \times 308.6 \times 25/4) \\ &= 3497.84KN \cdot m \end{aligned}$$

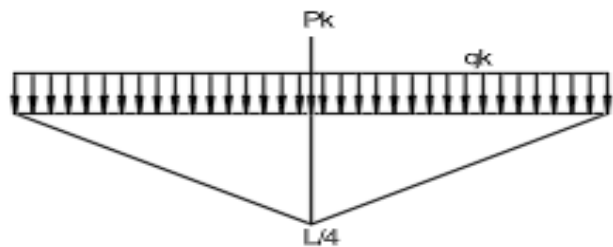


图9：L/2截面处弯矩影响线

汽车剪力

L/2截面处剪力影响线如图10，跨中截面剪力影响线

面积： $\Omega = \frac{1}{2} \times 0.5 \times \frac{l}{2} = 3.125\text{m}^2$

$$Q_q = (1+\mu) \times (m_{cq}q_k\Omega + m_{cq}1.2P_k y_k)$$

$$= 1.25 \times (1.0179 \times 10.5 \times 3.125 + 1.0179 \times 1.2 \times 308.6 \times 0.5)$$

$$= 277.34\text{KN}$$

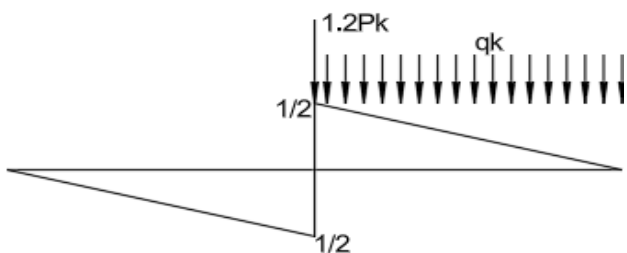


图10：L/2截面处剪力影响线

吊机弯矩

用吊机荷载横向分布系数将R1、R2和R3、R4转化到5号梁上

$$(R1+R4) \times m_{cq吊} = (24.7+14.755) \times 0.53 = 20.91\text{t} = 209.1\text{KN}$$

$$(R2+R3) \times m_{cq吊} = (4.79+14.755) \times 0.53 = 10.36\text{t} = 103.6\text{KN}$$

吊机荷载统一考虑1.4动力系数

$$M_{q吊} = 1.4 \sum m_{cq} P_k y_k = 1.4 \times (209.1 \times 6.25 + 103.6 \times 2.525)$$

$$= 1306.875 + 261.59 = 2195.85\text{KN} \cdot \text{m}$$

吊机剪力

$$Q_{q吊} = 1.4 \sum m_{cq} P_k y_k$$

$$= 1.4 \times (209.1 \times 0.5 + 103.6 \times 0.202) = 175.67\text{KN}$$

② L/8截面

汽车弯矩

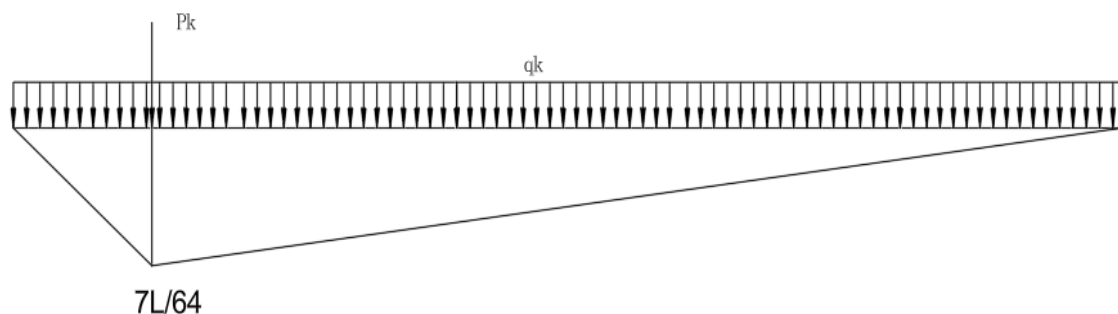
L/8截面处弯矩影响线如图11，跨中截面弯矩影响线

面积： $\Omega = \frac{7}{128} l^2 = 34.18\text{m}^2$

$$M_q = (1+\mu) \times (m_{cq}q_k\Omega + m_{cq}1.2P_k y_k)$$

$$= 1.25 \times (1.091 \times 10.5 \times 34.18 + 1.091 \times 308.6 \times 7 \times 25/64)$$

$$= 1640.21\text{KN} \cdot \text{m}$$



图：11L/8截面处弯矩影响线

汽车剪力

L/2截面处剪力影响线如图12，跨中截面剪力影响线

面积： $\Omega = \frac{49l}{128} = 9.57\text{m}^2$

$$Q_q = (1+\mu) \times (m_{cq}q_k\Omega + m_{cq}1.2P_k y_k)$$

$$= 1.25 \times (1.091 \times 10.5 \times 9.57 + 1.091 \times 308.6 \times 7/8)$$

$$= 505.28\text{KN}$$

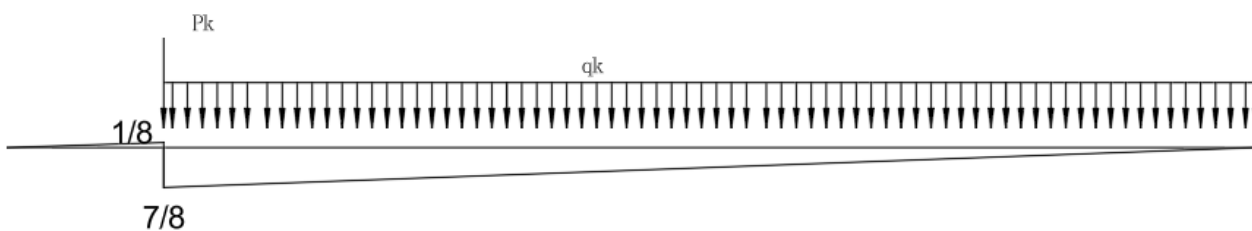


图12：L/8截面处剪力影响线

吊机弯矩

用吊机荷载横向分布系数将R1、R2和R3、R4转化到5号梁上

$$(R1+R4) \times m_{cq吊} = (24.7+14.755) \times 0.687 = 27.11\text{t} = 271.1\text{KN}$$

$$(R2+R3) \times m_{cq吊} = (4.79+14.755) \times 0.687 = 13.44\text{t} = 134.4\text{KN}$$

$$M_{q吊} = 1.4 \sum m_{cq} P_k y_k = 1.4 \times (271.1 \times 7 \times 25/64 + 134.4 \times 1.803) = 1377.05\text{KN} \cdot \text{m}$$

吊机剪力

$$Q_{q吊} = 1.4 \sum m_{cq} P_k y_k$$

$$= 1.4 \times (271.1 \times 7/8 + 134.4 \times 0.528) = 431.33\text{KN}$$

对比结果

根据上文计算结果可知

① L/2截面处

$$M_q = 3497.84\text{KN} \cdot \text{m} M_{q_{\text{吊}}} = 2195.85\text{KN} \cdot \text{m}$$

$$M_q > M_{q_{\text{吊}}}$$

$$Q_q = 238.1\text{KN} Q_{q_{\text{吊}}} = 175.67\text{KN}$$

$$Q_q > Q_{q_{\text{吊}}}$$

② L/8截面处

$$M_q = 1640.21\text{KN} \cdot \text{m} M_{q_{\text{吊}}} = 1377.05\text{KN} \cdot \text{m}$$

$$M_q > M_{q_{\text{吊}}}$$

$$Q_q = 505.28\text{KN} Q_{q_{\text{吊}}} = 431.33\text{KN}$$

$$Q_q > Q_{q_{\text{吊}}}$$

L/2、L/8典型截面处公路I级荷载产生的弯矩和剪力均大于汽车吊荷载产生的弯矩和剪力，证明汽车吊在此简支预应力小箱梁上施工是安全可行的。

5 结语与应用场景

本文以25米简支预应力小箱梁引桥为研究对象，提出了“荷载反力计算—横向分布系数求解—影响线法内力验算”的施工荷载简易验算流程，通过对比公路I级荷载与80T汽车吊荷载在L/2、L/8等典型截面的弯矩和剪力效应，验证了吊机在引桥上施工的安全性。

计算过程中，结合小箱梁结构特性，跨中横向分布系数采用刚性横梁法、支点处采用杠杆法，兼顾了荷载

横向扩散效应与支点局部受力特点；通过荷载加权求和得到吊机荷载的实际横向分布系数，结合影响线法完成内力计算，整个流程无需依赖复杂有限元软件，计算逻辑清晰、参数取值规范，结果偏于安全可靠。

对比结果表明，公路I级荷载作为桥梁运营期的控制荷载，其在各典型截面产生的弯矩和剪力均大于吊机施工荷载效应，说明桥梁结构在施工阶段具备足够的承载冗余，为类似“利用已建桥梁承担施工荷载”的方案提供了直接的验算依据。同时，本文明确了冲击系数、车道折减系数等关键参数的取值方法，解决了施工现场快速复核的核心需求，提升了验算工作的效率与准确性。

参考文献

- [1].康星星,蒋文浩,苟浩.部分预应力混凝土构件计算内容的综述[J].土木工程,2025,14
- [2].李建明,张磊,刘芳.预制预应力小箱梁吊装施工荷载验算方法研究[J].中外公路,2024,44
- [3].陈明,赵伟,杨丽.临时吊机荷载下简支箱梁承载能力复核与优化[J].公路交通技术,2023,39
- [4].吴志强,马丽,周健.基于桥梁博士的预应力小箱梁施工阶段应力验算[J].山西建筑,2022,48
- [5].代向群.汽车起重机支腿反力简化计算方法[J].工程机械,2021.2.10