



偏心荷载作用下龙门吊轨道梁受力特性分析

胡晓东，季 想

(中交西南城市开发有限公司，四川 成都 610041)

摘要：针对龙门吊轨道梁在偏心荷载作用下的受力问题，进行轨道梁受力和地基沉降研究，采用弹性地基梁法和数值分析方法，得出偏心荷载作用下轨道梁的受力与地基沉降位移，与轴心受力相比，偏心荷载作用下轨道梁的上部纵筋需配面积增幅为 17.08%；下部纵筋需配面积增幅为 56.83%；箍筋需配增幅为 16.5%。结构承载能力极限状态下，极限设计轮压为 1 197.2 kN/m，是设计轮压 250 kN/m 的 2.55 倍。但设计轮压下地基变形已达到 39.67 mm，逼近规范要求值，充分体现出变形控制是地基设计的主要因素。

关键词：门吊基础；弹性地基梁；数值分析；地基设计

中图分类号：U 655.4

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)S2-0143-04

Mechanical properties of track beam of gantry crane under eccentric loading

HU Xiao-dong, JI Xiang

(CCCC Southwest Urban Development Co. Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Regarding the loads on the track beam of a gantry crane under eccentric loading, this paper investigates the loads on a track beam and foundation settlement and obtains the loads on the track beam and the settlement displacement of the foundation under eccentric loading by the elastic foundation beam method and a numerical analysis method. The conclusion is that the required areas for upper longitudinal reinforcement, lower longitudinal reinforcement, and stirrup when the track beam is under eccentric loading increase by 17.08%, 56.83%, and 16.5%, respectively, compared with those in the case of axial loading. The ultimate design wheel load under the ultimate load-carrying capacity of the structure is 1 197.2 kN/m, which is 2.55 times the design wheel load of 250 kN/m. However, the deformation of the foundation under the design wheel load reaches 39.67 mm and is close to the value required by the specification, indicating that deformation control is a major factor in foundation design.

Keywords: gantry crane foundation; elastic foundation beam; numerical analysis; foundation design

由于龙门吊具有适用性强、设备检修方便、维护成本低等特点，通常采用龙门吊进行港口货物装卸与搬运。在吊运过程中，龙门吊可有效地把荷载通过轨道传递到条形基础及地基上。由于轨道安装偏差、轨道变形等原因，可能导致轨道梁偏心受力。王磊^[1]、杨辉等^[2]、吕涛等^[3]在基础设计过程中，按规范计算了地基承载力与配筋，满足工程基础设计需求。王倩^[4]在龙门吊轨道基础设计中分析了刚性基础、文克尔地基模型和弹性半无限体理论，并进行设计对比，得出了文克尔地基模型未考

虑截面拉应力，龙门吊基础易开裂的结论。结合广元港张家坝作业区(一区)一期 B 标段项目的轨道梁施工，对偏心荷载下轨道梁沉降进行探讨。

1 工程概况

广元港张家坝作业区(一区)一期 B 标段位于广元市苍溪县下游约 7 km 的嘉陵江右岸，下距沙溪枢纽坝址约 15 km。为扩充广元港运输需求，完善港口集装箱堆载服务功能，本工程主要包括陆域内堆场铺砌、堆场道路、生产生活辅助用房以

及相关配套设施。本工程 6 根轨道梁位于集装箱堆场区，轨道之间互相平行，单根轨道全长 288 m，由 16 m 梁段连接而成。梁截面为倒 T 形，混凝土

等级为 C30，轨道梁置于 1 m 厚级配碎石基床上，基床下为强夯回填砂卵石基础，强夯处理地基容许承载力不低于 300 kPa，结构断面见图 1。

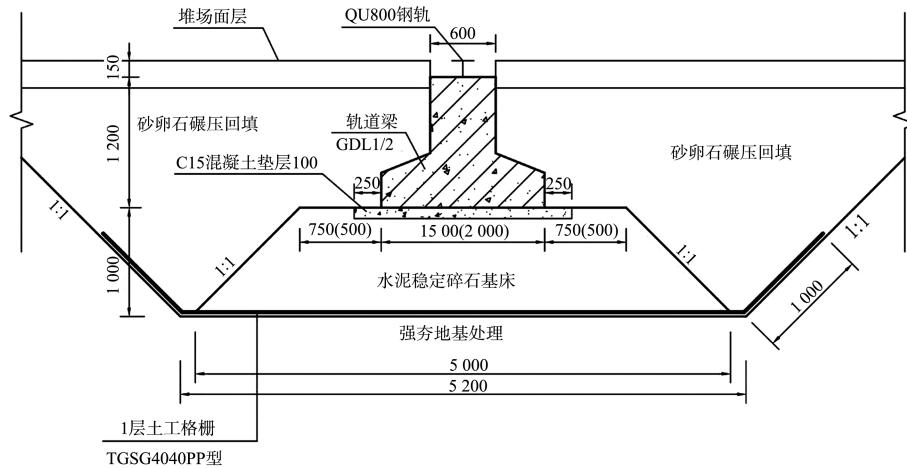


图 1 轨道梁断面 (单位: mm)

2 设计条件

2.1 龙门吊设计参数

轨道式集装箱龙门起重机外伸距 8 m，起吊质量(吊具下)40.5 t，轨距 40 m，轨道型号 QU80，基距 16.5 m，轮数 24 个，轮距 0.8 m，最大轮压 250 kN。集装箱堆场上设置防风拉索装置和锚定装置，单个锚定块与车档所受水平力(顺轨道方向)为 400 kN。由于轨道安装误差、轨道变形等原因，正

常使用的轨道梁均承受不同程度的偏心荷载，适当考虑偏心荷载对轨道梁的影响，可以提高轨道梁的抗倾覆性，提高轨道梁基础的安全性。综合考虑偏心荷载影响，取偏心距为 50 mm 进行计算。

2.2 土层参数

根据工程详细勘察报告，对轨道梁施工区地基土层、桩体材料属性赋值。土体物理力学性质指标见表 2。

表 2 土体物理力学参数指标

层号	土层名称	厚度/m	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	固结快剪		压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/MPa$
				黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(^\circ)$	
①	砂卵石回填层	1.85	2.20	0.00	34.00	40.0
②	粉质黏土	2.00	1.90	24.20	20.68	5.4
③	稍密砂土	2.30	1.97	0.00	32.00	6.0
④	稍密卵石	6.20	2.10	0.00	34.00	24.0

3 弹性地基梁分析

3.1 计算原理

考虑轨道梁与地基之间的相互作用，采用弹性地基梁计算。基于文克尔弹性地基梁假定，地基每单元面积上所承受的压力与地基沉降成正比^[5]，即：

$$p = ky \quad (1)$$

式中：y 为沉降 (m)；k 为基床系数，与土壤弹性特征有关；p 为地基反力 (kPa)。

3.2 梁的计算

道梁惯性矩惯性矩 I 为：

$$I = \mu \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

梁的弹性特征长度 S 为：

$$S = \sqrt{\frac{4E_h I}{bk}} \quad (3)$$

式中：I 为轨道梁截面惯性矩 (m^4)；μ 为有效系数；b 为轨道梁底宽 (m)；h 为轨道梁高度 (m)； E_h 为轨道梁弹性模量，取 30 GPa；k 为基床系数，取 10 MN/m^3 。计算得 $I = 0.1296 \text{ m}^4$ ， $S = 5.67 \text{ m}$ 。

梁的折算长度：

根据《弹性地基计算图表及公式》 $\mu = 0.6$ ，轨

$$\lambda_1 = \frac{L}{S} \quad (4)$$

式中: L 为梁的长度(m); S 为梁的弹性特征长度(m); 由于 $1 < \lambda_1 < 4.5$, 属于有限长梁, 计算得 $\lambda_1 = 2.82$ 。

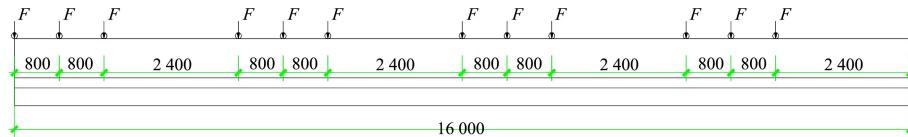


图 2 梁段计算 (单位: mm)

梁段剪力和弯矩见图 3、4, 剪力最大值为 315.48 kN, 弯矩最大值为 413.95 kN·m。在偏心作用下, 扭矩考虑为 150 kN·m, 增加截面抗倾覆性验算。地基反力见图 5, 最大值计算结果为 286.43 kPa, 小于地基容许承载力 300 kPa, 满足要求。

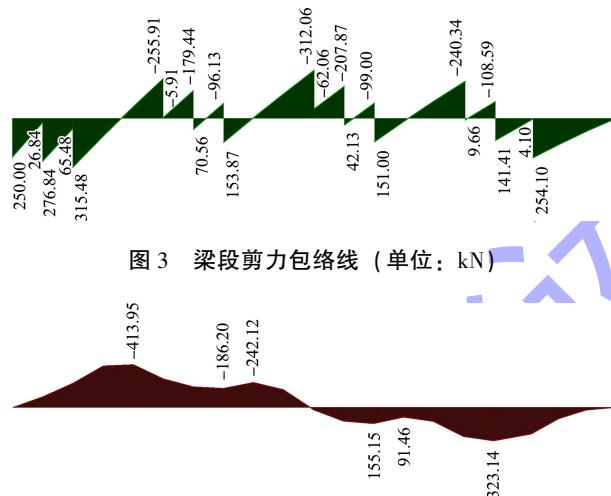


图 3 梁段剪力包络线 (单位: kN)



图 4 梁段弯矩包络线 (单位: kN·m)

3.4 配筋率复核

上部纵筋应配钢筋面积 $1\ 405\text{ mm}^2$, 实配 $10\varnothing 25$ ($A_s = 4\ 909\text{ mm}^2$); 下部纵筋应配钢筋面积 $1\ 882\text{ mm}^2$, 实配钢筋 $11\varnothing 25$ ($A_s = 5\ 400\text{ mm}^2$); 箍筋应配 741 mm^2 , 实配 $4\Phi 10@200$, 实配箍筋面积 $1\ 571\text{ mm}^2$, 均满足要求。与轴线受力情况(无偏心作用)相比, 上部纵筋应配面积由 $1\ 200\text{ mm}^2$ 增加了 205 mm^2 , 增幅为 17.08% ; 下部纵筋应配面积由 $1\ 200\text{ mm}^2$ 增加了 682 mm^2 , 增幅为 56.83% ;

3.3 轨道梁内力及地基反力计算

以 GDL1 梁段为例, 梁长 16 m, 单侧梁段上龙门吊轮数为 12 个, 最不利荷载布置位置计算见图 2。按最大轮压 $F = 250\text{ kN}$ 计算。

箍筋应配面积由 636 mm^2 增加了 105 mm^2 , 增幅为 16.5% 。

4 数值分析

4.1 模型建立

假设不考虑地下水影响, 在 $8\text{ m} \times 20\text{ m}$ 范围内, 采用总应力法进行分析。岩土材料本构模型选择修正 Mohr-Coulomb 模型, 轨道梁采用刚性材料模拟, 其密度为 2.4 g/cm^3 。设置上极限分析、下极限分析、初始应力平衡和弹塑性分析 4 个工况^[6]。荷载作用点偏离轨道梁中心 50 mm, 见图 6。

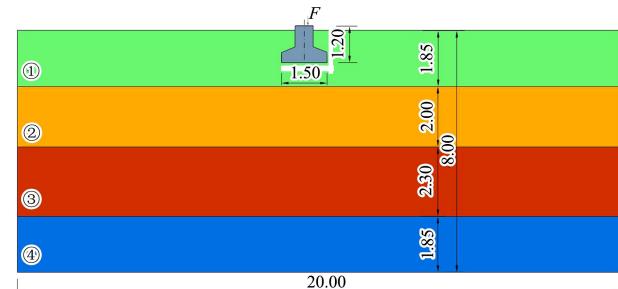


图 6 有限元模型 (单位: m)

4.2 极限分析

考虑偏心受力时, 在荷载作用点施加乘数荷载(非固定值, 初始值为 1 kN/m , 极限分析时, 乘数荷载逐渐放大, 直到极限值)。极限分析时, 采用 Optum G2 分析软件, 初始网格数取 5 000, 模型网格自适应, 迭代次数 3 次。得到上限解 $1\ 159.8\text{ kN/m}$ 和下极限解 $1\ 234.6\text{ kN/m}$, 上限与下限平均值为 $1\ 197.2\text{ kN/m}$, 平均值相对于上限解与下限解的误差为 $\pm 3.12\%$, 满足工程计算分析需要。轨道梁在最大轮压作用下, 等效均布荷载按最不利截面等效为 468.75 kN/m , 安全系数为 $2.554 \geq 2$, 满

足规范要求^[7]。

极限荷载作用下，轨道梁下地基破坏滑移面见图 7。滑动面与圆弧滑动法假定的滑动面相似，但并不是理想的圆弧，更贴合实际情况。

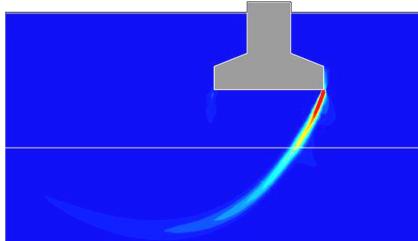


图 7 极限荷载作用下轨道梁滑移破坏面

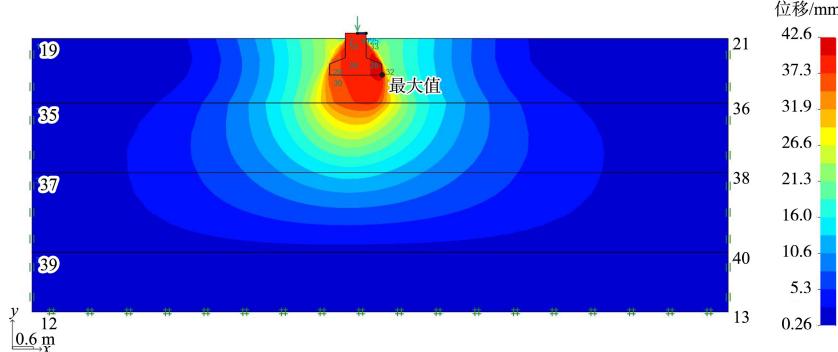


图 8 集中荷载作用下轨道梁沉降

5 结论

1) 基于常规轨道梁的设计方法(即弹性地基梁法)，复核偏心荷载作用下轨道梁的受力情况和配筋信息，得出了偏心荷载作用下，轨道梁的上部纵筋、下部纵筋、腰筋、箍筋均有不同程度的增加。适度考虑偏心荷载既符合实际工况需要，也提高了安全储备。

2) 数值分析过程中，进行极限分析和弹塑性分析，极限分析的上限解与下限解的误差为±3.12%，集中荷载下承载能力极限值取上限和下限平均值 1 197.2 kN，是设计轮压 250 kN/m 的 2.55 倍，安全储备满足要求。极限荷载下，地基破坏形态呈圆弧状，与圆弧滑动法假定破坏形态相近。

3) 弹塑性分析过程中，以设计最大轮压值作为荷载，轨道梁荷载沉降位移为 39.67 mm，与规范要求值 40 mm 十分接近，由此可见，地基设计中变形控制占主导地位。弹塑性与弹性地基梁沉降位移计算结果相差较大，这是由于弹性地基梁对有限长梁在密实地基上沉降计算存在较大误差，

4.3 沉降分析

采用弹塑性法分析，当作用荷载为 250 kN 时基础的沉降最大位移为 39.67 mm，见图 8。沉降位移已逼近规范要求 40 mm。由此可见，轨道梁地基设计是基于沉降变形控制的，变形控制在地基设计中占主导地位。与弹性地基梁计算的沉降位移(11.7 mm)相比，弹塑性变形分析的位移值存在较大差距，是两种计算方法的假定造成的，弹性地基梁法考虑了土体的刚度，增加了轨道梁的刚度，同时降低了轨道梁的内力。而弹塑性法，是基于土体变形与结构变形共同协调的，计算结果更准确。

因此弹塑性计算更适用。

参考文献：

- [1] 王磊. 基于古老运河软弱河床上大型龙门吊轨道基础承载安全性的计算分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(4): 160-162.
- [2] 杨辉, 龙秋亮. 软基区预制场 200t 跨墩门吊轨道基础设计与计算[J]. 交通科技与经济, 2008, 10(6): 13, 17.
- [3] 吕涛, 龙彪, 王文, 等. 跨径式龙门吊轨道基础设计与施工[J]. 工程技术研究, 2019, 4(11): 152-154.
- [4] 王倩. 龙门吊轨道基础的设计[J]. 中华建设, 2012(5): 138-139.
- [5] 孙炳书, 刘明文. 关于弹性地基梁模型与计算方法[J]. 工业建筑, 2014, 44(S1): 818-820.
- [6] 杜佐龙, 毕生, 曹震, 等. 基于弹塑性有限单元法的地基极限承载力形状效应修正分析[J]. 勘察科学技术, 2010(3): 3-6, 61.
- [7] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.