



轨道基础弹性地基梁设计

陈方舟

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 弹性地基梁是轨道基础中广泛应用的一种基础形式, 其突出特点是梁体刚度大、变形小、整体性好。这种结构形式能够有效地分散和传递上部结构的荷载, 为轨道系统提供稳定可靠的支撑。弹性地基梁的设计重点是基础的受力计算、分析, 以合理控制梁体弯矩、基底应力。采用有限元计算方法, 通过实际工程应用设计, 对不同梁段长度、梁段之间是否铰接的计算结果进行对比分析, 提出合理选用梁体分段长度、合理设置梁体分段间连接方式的设计理念, 可供类似工程参考。

关键词: 轨道基础; 弹性地基梁; 合理分段; 改善受力

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0128-05

Design of elastic foundation beam for rail foundation

CHEN Fangzhou

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Elastic foundation beam is a widely used foundation form in rail foundations, characterized by high beam stiffness, small deformation, and good overall integrity. This structural form can effectively disperse and transmit the load of the upper structure, providing stable and reliable support. The design focus of elastic foundation beams is on the calculation and analysis of the foundation's stress in order to reasonably control the bending moment and foundation stress of the beam body. The finite element calculation method is used to compare and analyze calculation results of different beam segment lengths and whether they are hinged between beam segments through practical engineering application design. The design concept of selecting reasonable beam segment lengths and setting reasonable connection methods between beam segments is proposed, which can be used as a reference for similar projects.

Keywords: rail foundation; elastic foundation beam; reasonable segmentation; improving stress

现代轨道交通对基础结构的高要求, 特别是在交通和重载运输等领域, 近年来受到越来越多学者的关注。而弹性地基梁是轨道基础设计中的重要组成部分, 其结构形式在工程中表现出显著优势, 作为一种连续性基础, 具备施工速度快、工艺简单、造价低等优点^[1], 通过合理设计梁段长度和连接方式, 可以有效减少弯矩及基底应力, 从而提升整体受力性能。

针对目前关于梁段分段长度与连接方式优化研究较少的情况, 本文提出一种基于有限元法的设计理念, 系统分析不同梁段长度及连接形式对弹性地基梁受力特性的影响。为了更好地理解弹性地基梁的应用效果, 本文以某轨道工程为例, 分析其设计和应用效果, 进一步优化梁段长度、提高整体的受力性能, 以期类似工程提供参考。

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 陈方舟 (1996—), 男, 工程师, 从事港工结构和岩土设计。

1 弹性地基梁计算的基本原理及方法

弹性地基梁条形基础是轨道基础常用的一种基础形式,是一种搁置在具有一定刚度地基上的钢筋混凝土结构,可连续浇筑^[2],而梁与地基相接触,整个体系为超静定体系。通过基层、底基层刚度的逐渐过渡,将压力传递到地基^[3],从而降低地基应力、减少地基变形。由于该梁有一定的刚度、梁体变形小,其基础整体性使用效果较好。弹性地基梁的计算一般有解析法和有限元法。

1.1 解析法

解析法基于文克尔地基模型,常用于计算弹性地基梁受力与变形的情况,即地基上任意一点所受的压力与该点的地基沉降成正比^[4-5]。轨道基础条形梁一般为弹性地基上的有限长梁,结构受力分析可采用弹性地基无限长梁的解、叠加有限长梁端部条件力求解得到。无限长梁受集中力 P_0 作用时,各参数的计算公式如下:

$$y = \frac{P_0 \lambda e^{-\lambda x} [\cos(\lambda x) + \sin(\lambda x)]}{2kb} = \frac{P_0 \lambda f_1(\lambda x)}{2kb} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{P_0 \lambda^2 e^{-\lambda x} \sin(\lambda x)}{kb} = \frac{P_0 \lambda^2 f_2(\lambda x)}{kb} \quad (2)$$

$$M = \frac{P_0 \lambda e^{-\lambda x} [\cos(\lambda x) - \sin(\lambda x)]}{4\lambda} = \frac{P_0 \lambda f_3(\lambda x)}{4\lambda} \quad (3)$$

$$V = -\frac{P_0 e^{-\lambda x} \cos(\lambda x)}{2} = -\frac{P_0 f_4(\lambda x)}{2} \quad (4)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{kb}{4E_b I_b}} \quad (5)$$

$$p = ky \quad (6)$$

式中: y 为梁的挠度, m; φ 为角变位, rad; M 为梁的弯矩, kN·m; V 为梁的剪力, kN; p 为地基应力, kPa; λ 为弹性地基梁的弹性特征, m^{-1} ; E_b 为梁的弹性模量, kPa; I_b 为梁惯性矩, m^4 ; b 为梁的宽度, m; k 为基床系数, kN/m^3 ; x 为作用力离开计算原点的距离, m。

有限长梁的长度一般介于 $0.5\pi\lambda \sim 2\pi\lambda$, 其两端的弯矩、剪力都为零。在无限长梁上引入端部条件弯矩、端部条件剪力, 以满足有限长梁两端弯矩、剪力都为零的条件, 然后将总的荷载效应

叠加, 即可求得有限长梁的结构内力。

解析法概念清晰简单, 但计算较繁琐。

1.2 有限元法

随着结构计算电算法的普及, 采用有限元法计算可大幅简化计算工作。有限元法又称结构矩阵法, 可根据不同地基模式, 求得地基反力和梁的内力^[6]。其基本原理是将弹性地基梁看作由有限个力学小单元所组成的集合体, 建立力的平衡关系和变形协调关系, 以便对复杂的地基与梁的相互作用进行精确建模和计算, 从而求出各杆件的内力、位移和支撑反力等。

适合轨道基础滚动荷载的有限元计算软件有《桥梁博士》、《易工水运工程设计系列软件》^[7], 这两个软件应用于计算弹性地基梁的方法基本一致。计算方法为: 对轨道基础梁建模, 计算模型为 n 跨弹性支撑的连续梁, 每跨为 1 个单元, 单元长度 1 m, 每个支座的弹性支撑系数 $K = kb$, 输入移动荷载, 可计算得每个单元的弯矩、剪力、位移以及每个支座反力, 其中的位移乘以基床系数即为基底应力, 或者用支座反力除以基础宽度即为轨道基础梁的基底应力。

有限元法在弹性地基梁的设计中, 提供了较为精确的计算结果。为了确保计算结果的准确性, 本文对模型的各项参数进行详细设定, 并对不同梁段长度、连接方式进行对比分析。

2 算例

2.1 计算资料

某工程门式起重机轨距 37 m、基距 16 m, 起重机整机质量约 300 t, 最大轮压 $p' = 300$ kN, 单门腿 4 个轮子, 轮系布置见图 1^[8], 轨道型号 QU80。场地基床系数 20 MN/m^3 ^[9]。设计轨道梁底宽 1.6 m、梁高 1.3 m, 截面见图 2。

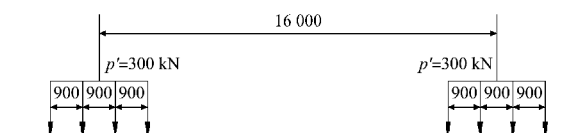


图1 起重机轮压荷载 (单位: mm)

Fig.1 Crane wheel load (unit: mm)

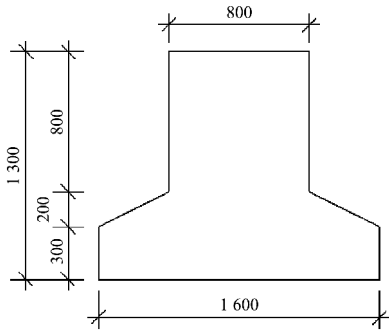


图2 轨道梁截面 (单位: mm)
Fig. 2 Section of track beam (unit: mm)

轨道梁采用 C30 混凝土, 弹性模量为 30 GPa^[10]。根据轨道梁的截面形式、场地基床系数, 可以求得轨道梁的弹性特征长度为 5.23 m, 取轨道梁分段长度为 10 m, 折算长度为 1.9, 属于有限长梁范围。

2.2 计算

采用《易工水运工程设计系列软件》的多跨连

续梁计算模块。轨道梁计算长度 10 m, 计算模型为 10 跨弹性支撑的连续梁, 每跨即单元长度均为 1 m, 每个支座的弹性支撑系数 $K=32 \text{ MN/m}$ 。起重机荷载分项系数取 1.5。轨道梁弯矩计算按承载能力极限状态, 地基应力计算按正常使用极限状态。梁段 10 m 的轨道梁弯矩、位移计算结果见图 3, 其中的位移可以换算出基底应力。同时对轨道梁长度为 20 m、以及 $2 \times 10 \text{ m}$ 铰接状态进行对比计算, 其中轨道梁 $2 \times 10 \text{ m}$ 铰接状态的计算模拟了实际工程中轨道梁分段通过传力杆联系的工况, 计算结果可反映出通长联系在一起的轨道梁受力状况。轨道梁 $2 \times 10 \text{ m}$ 铰接状态的弯矩、位移计算结果见图 4。轨道梁通过传力杆铰接在一起, 可降低梁段端部的基底应力、减小沉降变形, 改善轨道梁运行效果。

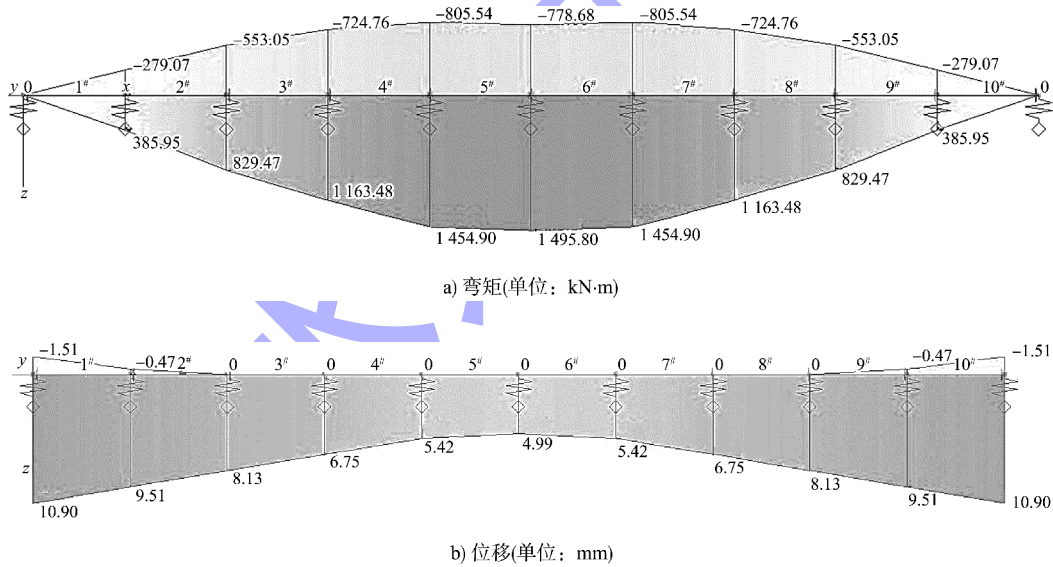
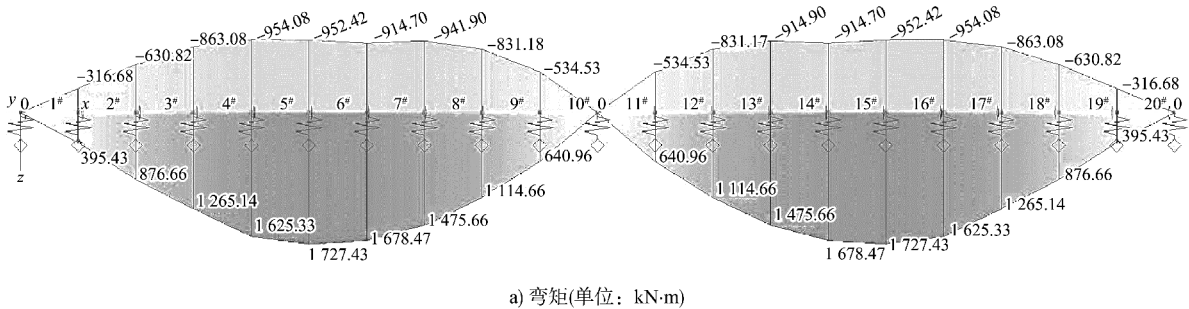


图3 10 m 轨道梁弯矩、位移
Fig. 3 Bending moment and displacement of 10-meter track beam



a) 弯矩(单位: kN-m)

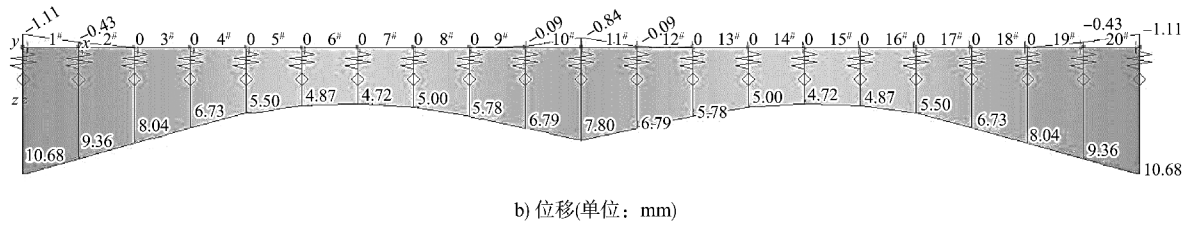


图 4 2×10 m 铰接轨道梁弯矩、位移

Fig. 4 Bending moment and displacement of 2×10-meter articulated track beam

3 轨道梁不同分段长度的计算

力计算结果见表 1。

3 种不同梁段长度的梁体弯矩、位移及基底应

表 1 计算结果

Tab. 1 Calculation results

梁段长度/m	最大正弯矩/ (kN·m)	最小负弯矩/ (kN·m)	梁中		梁端		作用形式
			位移/mm	基底应力/kPa	位移/mm	基底应力/kPa	
10	1 496	-805	4.99	100	10.9	218	1 个支腿作用
2×10	1 727	-954	4.87	97	7.8(铰接处)	156(铰接处)	2 个支腿作用
20	1 821	-1 825	4.79	96	9.8	197	2 个支腿作用

4 结论

1) 梁段长度从 10 m 加大到 20 m，梁体弯矩增加较大，特别是负弯矩大幅增加，负弯矩增加的根本原因是梁体受力支腿由 1 个变为 2 个。基底应力虽然有所降低，但降低的程度有限，对改善地基受力收效不大。所以梁段长度太大不经济，特别要避免 2 个支腿作用在 1 个梁段上。

2) 当 2 个梁段通过传力杆铰接联系起来后，梁体分段端部的基底应力值转变为梁体铰接处的基底应力值，降低幅度可达 30% 左右，大幅改善了梁底的地基应力分布。

3) 二段梁体铰接后，由于相邻梁段第 2 个支腿作用力的传递，梁体的内力(弯矩)有所增加，在结构配筋设计时要予以适当加强。

4) 在地质条件不良、地基承载力较低的情况下，应将通长的轨道梁各分段梁体铰接联系起来，这样轨道基础中部所有铰接处的基底应力最大值将大幅降低，再通过设置梁底垫层进一步扩散地基应力。至于基础端部基底应力较大的情况，只要适当延长轨道梁，不让最远端的轮压荷载作用到梁端位置，即可避免。

5) 在地质条件较好、地基承载力较高的情况下，轨道梁可以独立分段、不连接，以降低梁体

的配筋率，但应采取有关措施，如在分段伸缩缝下设置混凝土垫块，以防止梁体之间变形高差导致的轨道运行效果不佳。

参考文献：

[1] 闫笑铭. 弹性地基梁在中东地区自动化集装箱堆场 ARMG 基础中的应用[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(9): 30-33.
YAN X M. Application of elastic foundation beam in ARMG foundation of automated container yard in the Middle East[J]. China harbour engineering, 2021, 41(9): 30-33.

[2] 闫笑铭, 张斌. 砂性地基自动化集装箱堆场 ARMG 基础分段长度[J]. 水运工程, 2020(5): 187-191, 228.
YAN X M, ZHANG B. Segment length of ARMG foundation in automated container yard upon sandy subgrade[J]. Port & waterway engineering, 2020 (5): 187-191, 228.

[3] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 港口道路与堆场设计规范: JTS 168—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd. Design code of road and storage yard for port area: JTS 168-2017[S]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2017.

- [4] 张季容, 朱向荣. 简明建筑基础计算与设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
ZHANG J R, ZHU X R. Concise manual of building foundation calculation and design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [5] 侯勇, 宋兰芳. 弹性地基梁弯矩系数的影响因素[J]. 水运工程, 2011(5): 132-135.
HOU Y, SONG L F. Effect factors of bending moment coefficient for elastic foundation beams [J]. Port & waterway engineering, 2011(5): 132-135.
- [6] 张荣, 张鸿儒. 弹性地基梁计算模型研究[J]. 山西建筑, 2007(26): 20-22.
ZHANG R, ZHANG H R. Research on the calculation model of elastic foundation beam[J]. Shanxi architecture, 2007(26): 20-22.
- [7] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海易工软件有限公司. 多跨连续梁计算程序[CP]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2023.
CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai Yigong Software Co., Ltd. Calculation program for multi-span continuous beam [CP]. Shanghai: CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., 2023.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Load code for harbour engineering: JTS 144-1-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [9] 中国船舶工业总公司第九设计研究院. 弹性地基梁及矩形板计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
The Ninth Design and Research Institute of China State Shipbuilding Corporation. Calculation of elastic foundation beams and rectangular plates [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983.
- [10] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Design code of concrete structure in port and waterway engineering: JTS 151-2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- (本文编辑 王璁)
-
- (上接第 100 页)
- [7] 查文洋, 赵耀璞. 复杂地质条件下 PHC 桩可打性与实际沉桩全程动测对比分析[J]. 水运工程, 2021(2): 174-181.
CHA W Y, ZHAO Y P. Comparative analysis of drillability of PHC piles and whole-process PDA during pile sinking under complex geological conditions [J]. Port & waterway engineering, 2021(2): 174-181.
- [8] 雷斌, 尚增弟. 大直径潜孔锤岩土工程施工新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
LEI B, SHANG Z D. New construction technology of geotechnical engineering with large-diameter down-hole hammer [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [9] 李俊华, 黄汉林. 预应力高强度混凝土管桩在地基补强工程中的应用[J]. 工程勘察, 2020, 48(1): 34-39.
LI J H, HUANG H L. Application of pre-stressed high-strength concrete piles in the treatment of composite foundation [J]. Geotechnical investigation & surveying, 2020, 48(1): 34-39.
- [10] 黄目升. 浅析港口码头 PHC 桩沉桩施工技术应用[J]. 中国标准化, 2018(2): 142-144.
HUANG M S. Application of PHC pile sinking construction technology in port terminals [J]. China Standardization, 2018(2): 142~144.
- [11] 刘提, 王钦, 李树卿, 等. 复杂场地条件下 PHC 桩沉桩可行性分析评价研究[J]. 工程勘察, 2024, 52(10): 15-22.
LIU T, WANG Q, LI S Q, et al. Feasibility analysis and evaluation of PHC pile sinking under complex site conditions [J]. Geotechnical investigation & surveying, 2024, 52(10): 15-22.
- (本文编辑 赵娟)