

桩基支承梁与弹性地基梁承载性能对比研究

薛 鹏^{1,2}, 杨雅师³, 孟星宇², 董 腾², 陈灿明²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

3. 皖江工学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘 要: 桩基支承梁的梁体承载能力由桩基及梁体本身的刚度提供, 而弹性地基梁由于梁体下方和两侧土体的影响, 其承载能力较桩基支承梁有一定的提升。以长江下游某内河重力式码头的后轨道梁为研究对象, 建立二维模型选取轨道梁危险工况并建立轨道梁三维数值模型, 对比分析弹性地基梁与桩基支承梁的内力及位移, 研究表明弹性地基梁相比于桩基支承梁, 最大挠度减小 26.4%~35.3%, 最大正弯矩减小 11.3%~12.4%, 桩身最大压应力减小 1.8%~45.3%, 最大竖向位移减小 28.1%~39.0%, 弹性地基梁相比于桩基支承梁在相同的受力情况下, 梁体以及桩身的内力、应力均有所减小, 弹性地基梁的承载能力更强, 同时发现土体轨道梁协同受载不仅使得轨道梁及桩基的受力减小, 还会影响轨道梁及桩基的应力分布状态。

关键词: 桩基支承; 弹性地基; 轨道梁; 数值模型

中图分类号: TU398.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0060-08

Bearing Performance Comparison of Pile Foundation Support Beam and Elastic Foundation Beam

XUE Peng^{1,2}, YANG Yashi³, MENG Xingyu², DONG Teng², CHEN Canming²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

3. Wanjiang Institute of Technology, Maanshan, Anhui 243000, China)

Abstract: The bearing capacity of the pile – supported beam is provided by the pile and the stiffness of the beam itself, while the elastic foundation beam has a certain increase in its bearing capacity compared with the pile – supported beam due to the influence of the soil below and on both sides of the beam. By taking the rear track beam of an inland gravity wharf in the lower reaches of Yangtze River as the research object, a two – dimensional model is established to select the danger performances of the track beam and a three – dimensional numerical model of the track beam is established to compare and analyze the internal force and displacement of the elastic foundation beam and the pile – supported beam. The results show that the maximum deflection is reduced by 26.4%~35.3%, the maximum positive bending moment is reduced by 11.3%~12.4%, the maximum compressive stress in the pile is reduced by 1.8%~45.3%, and the maximum vertical displacement is reduced by 28.1%~39.0% for the elastic foundation beam compared with the pile – supported beam. Compared to pile – supported beams, the internal forces and stresses in the beam and pile are reduced under the same stress conditions, and the elastic foundation beam has a stronger bearing capacity. It is also found that the coordinated loading of soil and track beam not only reduces the stress of track beam and pile, but also affects the stress distribution of track beam and pile.

Keywords: pile foundation support; elastic foundation; track beam; numerical model

收稿日期: 2022-11-09

修稿日期: 2022-12-12

基金项目: 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y421001)

作者简介: 薛 鹏(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港工结构。E-mail: 1833742504@qq.com

通讯作者: 陈灿明(1962—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工结构安全鉴定与科学研究工作。E-mail: ccm9640@126.com

弹性地基梁相比于桩基支承梁在结构形式及受力方面有诸多差异,桩基支承梁是静定结构或有限次超静定结构,而弹性地基梁是无限次超静定结构,且必须考虑梁体与地基的共同变形。弹性地基梁将梁上的载荷传递到较大面积的地基上,使得梁的内力降低、变形减少,而桩基支撑梁仅靠梁体本身和其下方的桩基承受梁上的荷载。对于桩基支承梁与弹性地基梁,少有学者对其工程上的差异做具体的研究,因此本文结合具体的工程,借助有限元分析软件对桩基支承梁与弹性地基梁的差异做出具体的量化分析研究。

对于码头中轨道梁的设计计算,学者们对影响轨道梁内力的因素做出了研究。陈文等^[1,4]采用 ANSYS 研究了支座刚性系数和是否考虑支座宽度对轨道梁内力的影响。陆微等^[2]研究了轨道梁截面高度对梁体内力的影响,并分析了桩间距对梁的最优断面尺寸的影响。邓涛等^[3]研究了桩基竖向刚度、桩距、轨道梁刚度三个因素对轨道梁内力的影响。综上,对于轨道梁的内力影响因素,已有学者对其进行了研究,但少有学者对土体的影响做出相应的研究,因此本文研究弹性地基梁与桩基支承梁的承载性能差异,分析土体对轨道梁的受力影响。

弹性地基梁计算理论方面,不同的地基模拟假定有不同的解法,诸多学者对其进行了大量的研究。常见的地基模拟假定有反力直线假定、基床系数假定、半无限弹性体假定等,针对这些假定分别有初参数法、变截面法、链杆法、有限单元法及有限差分法等计算方法^[1],近年来也有学者提出各种新的解法。张季容等^[5]通过典型实例对比了分层地基模型、弹性半空间地基模型和 Winkler 地基模型,并探讨了梁的不同刚度和不同地基条件对结果的影响。张晓玲^[6]分别采用有限元法和链杆法计算弹性地基梁的基底反力与沉降,对比其优缺点。高同玉^[7]采用 ANSYS 建立了龙门吊轨道基础的有限元模型,并对比分析了有无伸缩缝情况下的结果。庄辉等^[8]对比了初参数法、链杆法和有限元法计算弹性地基梁时的结果,分析了三种方法计算得到的结果。廖志坚等^[9]采用弹性地基梁理论对矩形地下通道的变形和受力机理进行分析,推导出矩形地下通道的弹性地基梁计算方法。杨建辉等^[10]结合具体地基梁实例,使用 ABAQUS 对比了有限元计算方法与倒梁法、链杆法及温克勒地基梁法,分析了有限元计算方法的优越性。李潇等^[11]推导得到通用模型弹性地基梁的挠度控制方程及挠度系统,并给出了不同工况下弹性地基梁的挠度系数及挠度方程。林军

志等^[12]基于 Winkler 模型对弹性地基梁和弹性地基板的挠度求解提出了一种新方法,利用加权余量法中的配点法结合径向基函数逼近得到挠度近似解。有限元计算方法可以考虑土体的非线性,能够模拟轨道梁实际受力情况,因此本文选择有限元的计算方法,分别建立两种梁的三维模型。

本文通过 ANSYS 建立轨道梁的二维模型,分析轨道梁的危险工况;通过 ABAQUS 建立轨道梁的三维模型,分别建立桩基支承梁和弹性地基梁的三维实体模型,模拟轨道梁受力实际情况,分析各工况下轨道梁的内力、挠度及桩基的应力、竖向位移等在两种模型中的分布情况。

1 模型建立

1.1 工程概况

本文以长江下游某内河重力式码头为模型算例开展分析研究。该码头结构为重力扶壁式结构,前轨道梁架设于扶壁肋板上,前轨跨间距 4.2 m。后轨道梁根据地基土的情况采用 $\Phi 800$ mm 的 C25 钻孔灌注桩,桩长为 20 m。后轨道梁为矩形截面,宽 1.2 m,高 1.5 m,桩距 5.5 m,灌注桩顶部嵌入梁 50 mm。码头后轨道梁共 14 个结构段,计算时取单结构段进行考虑,采用四跨连续梁进行计算,两端各悬臂 1.5 m,基本段长 25 m。轨道梁和灌注桩均为钢筋混凝土结构,混凝土强度等级分别为 C30、C25。轨道梁具体断面尺寸见图 1、图 2。

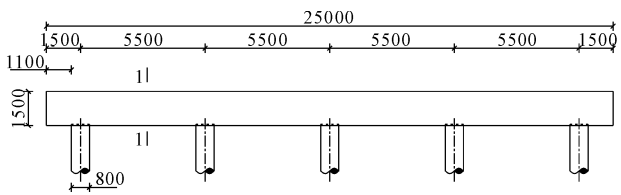


图 1 轨道梁断面图(单位:mm)

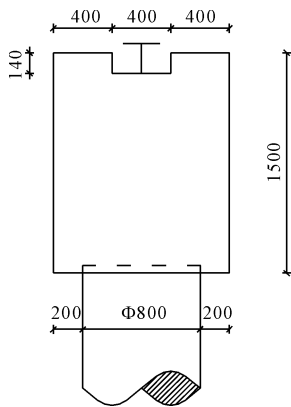


图 2 1-1 断面尺寸图(单位:mm)

作用在轨道梁上的荷载考虑移动门机荷载,轨道式龙门吊按最大的 40 t 吊重的龙门吊,轨距 10.5 m,轮距 1.1 m,基距 8 m,轮数 8 个,每侧四个轮子,轮压按最大轮压 480 kN。门机荷载作用示意图见图 3。

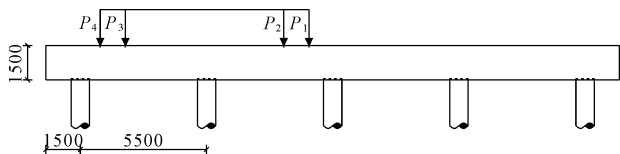


图 3 门机作用示意图(单位:mm)

1.2 连续梁结构有限元模型

利用 ABAQUS 建立连续梁的三维实体模型。轨道梁弹性模量取 3.00×10^4 MPa,重度取 25 kN/m³,灌注桩弹性模量取 2.80×10^4 MPa,重度取 24 kN/m³,混凝土泊松比取 0.167。考虑轨道梁两侧以及前后大于 12 倍桩径范围内的土体,桩径为 0.8 m,取大于 12 倍桩径 10 m,土层厚度取 1.5 倍桩长为 30 m^[13]。土体考虑为单层均质土体,土体密度取 1 940 kg/m³,弹性模量 24 MPa,泊松比取 0.3,考虑地基土的非线性,采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型定义其应力-应变属性,摩擦角取 16.6°,膨胀角取摩擦角的一半为 8.3°,黏聚力取 23 kPa,土体及轨道梁采用三维八节点减缩积分单元(C3D8R),梁与桩顶部设置为绑定接触,土体与桩及梁体的接触设置为:法向为硬接触,切向采用罚函数定义为摩擦接触,服从 Coulomb 摩擦定律^[14]。边界约束采用对土体四周法向约束,土体底部全约束。

计算时考虑重力的影响,在计算分析步中添加地应力分析步,并在定义荷载时通过关键字定义初始地应力,进行模型的地应力平衡^[14],轨道梁所受的门机荷载以均布力的形式施加在轨道梁上,并在划分网格时加密此处的网格。计算模型如图 4、图 5。桩基支撑梁模型共 76 806 个单元,90 621 个节点;弹性地基梁模型共 93 260 个单元,108 662 个节点。

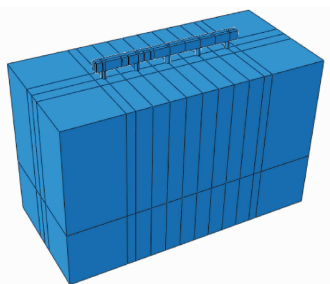


图 4 桩基支撑梁三维模型图

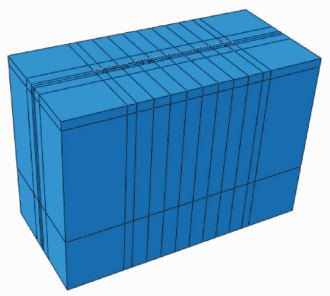


图 5 弹性地基梁三维模型图

2 轨道梁二维模型迭代筛选

随着门机荷载的移动,轨道梁各个构件的内力值发生相应的变化,为了全面地研究轨道梁的内力值变化情况,选取轨道梁弯矩、挠度、剪力和桩顶弯矩、轴力最大时门机位置做相应的研究。

为探究以上各工况对应的门机位置,采用 ANSYS 建立轨道梁的二维模型,通过命令流的方式定义循环荷载,在梁上施加移动门机荷载,使门机自左向右每次循环移动 0.1 m,得到门机荷载移动情况下轨道梁的受力情况,分析随着门机荷载的移动,轨道梁的受力何时处于危险状态,并选定相关的危险工况。建模时,单元选取为 beam188 单元,桩与梁的连接为固接,材料模型与三维模型一致,考虑重力的影响,门机荷载以集中力的形式作用在梁上。为方便叙述,对桩自左向右进行编号,分别为 1#—5#桩,门机荷载自右向左分别为 P_1 — P_4 。二维模型见图 6。

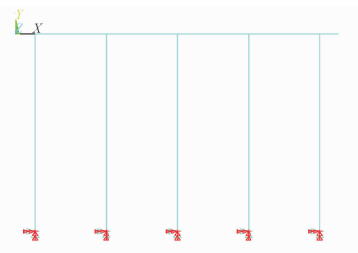


图 6 二维轨道梁模型

根据计算结果,分析随着门机移动,桩顶轴力 F_p 、弯矩 M_p 以及梁的挠度 U_b 、跨中弯矩 M_b 、支座处剪力 F_{sb} 的最大值及出现时门机所处位置,并以此确定计算工况。计算结果如表 1—表 3 所示。

计算结果表明:当 P_2 作用在轨道梁的悬臂最左端时,轨道梁的挠度、剪力以及桩顶弯矩出现最大值;当 P_2 作用在第一跨跨中时,第一跨跨中弯矩出现最大值;当 P_4 作用在悬臂最左端时,1#桩桩顶轴

力出现最大值。

表 1 轨道梁跨中内力与位移计算结果表

位置	$M_{bmax}/(kN \cdot m)$	F_{sbmax}/kN	U_{bmax}/mm
第一跨	1090.53	459.12	1.625
第二跨	815.35	441.14	1.641
第三跨	815.35	446.84	1.641
第四跨	972.20	466.96	1.625

表 2 桩顶内力计算结果表

桩号	$M_{pmax}/(kN \cdot m)$	F_{pmax}/kN
1 [#]	45.16	1214.32
2 [#]	20.97	931.06
3 [#]	16.76	911.41
4 [#]	20.97	931.06
5 [#]	31.60	1214.32

表 3 轨道梁剪力计算结果表

单位:kN

桩号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
左侧	1012.43	916.28	875.22	822.77	860.71
右侧	887.14	865.56	875.22	916.28	1012.43

根据上述分析,选取 P_2 作用在轨道梁的悬臂最

左端为工况 1, P_2 作用在第一跨跨中为工况 2, P_4 作用在悬臂侧最左端为工况 3。各工况如图 7。

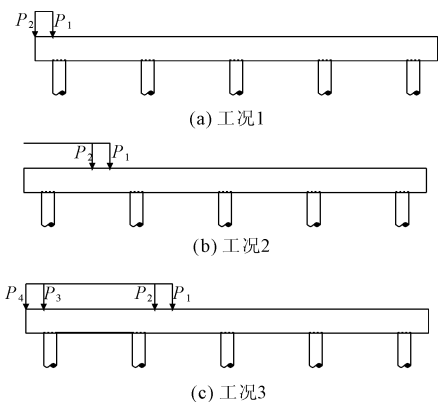


图 7 工况示意图

3 三维模型结果分析

3.1 桩基支承梁受载分析

桩基支承梁在工况 1 状态下梁的轴向应力和竖向位移云图以及桩的竖向应力和位移云图见图 8, 三种工况下梁体及桩身内力、应力、位移情况见表 4。

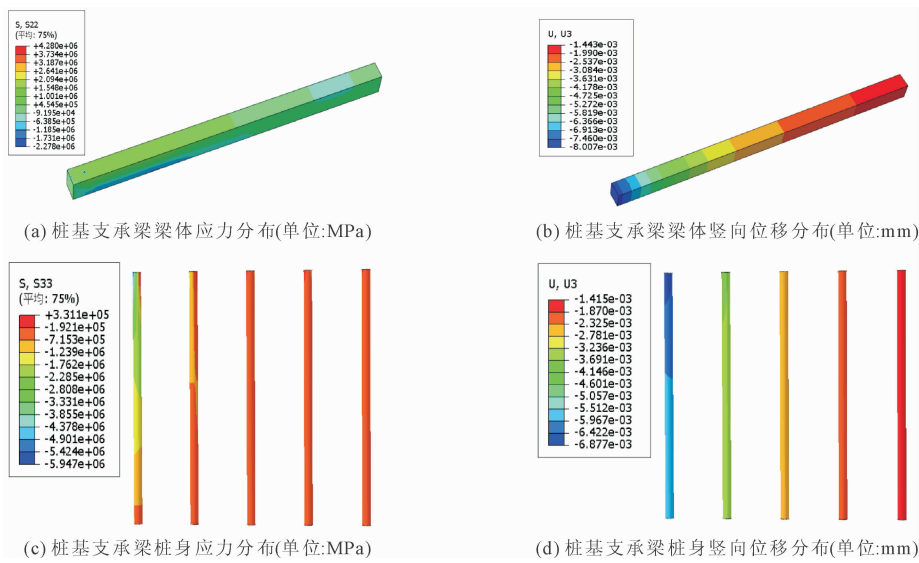


图 8 工况 1 桩基支承梁应力及位移云图

计算结果表明:

(1) 由于门机荷载作用范围较小,荷载作用处出现应力集中,此处的梁体拉压应力受门机荷载影响极大,因此分析时去除此处的单元,分析梁本身的应力情况。工况 1,轨道梁梁体最大压应力及最大拉应力均出现在 1[#]桩左侧的梁截面上部及底部;工况 2,轨道梁梁体最大压应力和最大拉应力分别出

现在第一跨跨中的梁截面上部和底部;工况 3,轨道梁梁体最大压应力出现在 P_1 作用处的梁截面顶部,最大拉应力出现在 1[#]桩右侧梁截面顶部。

(2) 桩基支承梁的梁体最大挠度出现在工况 3 的 P_4 作用处,为 9.018 mm,三种工况下梁体最大挠度均出现在门机荷载作用处,工况 1 和工况 3 的最大挠度较接近,工况 2 的挠度最小。

表 4 桩基支承梁模型计算结果表

构件	参数	工况 1		工况 2		工况 3	
		计算值	位置	计算值	位置	计算值	位置
梁	$M_{\max}^{+}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	112.4	第四跨跨中	1128.0	第一跨跨中	702.8	P_4 作用处
	$M_{\max}^{-}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	693.3	2 [#] 桩左侧	228.9	3 [#] 桩左侧	739.0	1 [#] 桩右侧
	$F_{\text{Smax}}/\text{kN}$	876.8	1 [#] 桩左侧	594.3	2 [#] 桩左侧	766.8	2 [#] 桩右侧
	$\sigma_{\max}^{+}/\text{MPa}$	4.28	1 [#] 桩左侧	2.35	第一跨跨中	1.55	1 [#] 桩右侧
	$\sigma_{\max}^{-}/\text{MPa}$	2.28	1 [#] 桩左侧	6.29	第一跨跨中	5.47	P_1 作用处
	$u_{\text{ymax}}/\text{mm}$	8.007	P_2 作用处	5.221	P_1 作用处	9.018	P_4 作用处
桩	$\sigma_{\max\text{顶}}^{+}/\text{MPa}$	0.33	1 [#] 桩右侧	1.07	1 [#] 桩左侧	—	—
	$\sigma_{\max\text{顶}}^{-}/\text{MPa}$	5.95	1 [#] 桩左侧	3.91	1 [#] 桩右侧	3.89	1 [#] 桩左侧
	$u_{\text{ymax顶}}/\text{mm}$	6.877	1 [#] 桩	4.839	2 [#] 桩	8.178	1 [#] 桩

注： $M_{\max}^{+}$ 表示最大正弯矩， $M_{\max}^{-}$ 表示最大负弯矩， F_{Smax} 表示最大剪力， $\sigma_{\max}^{+}$ 表示最大拉应力， $\sigma_{\max}^{-}$ 表示最大压应力， u_{ymax} 表示最大竖向位移。

(3) 三种工况下梁体的最大正弯矩、最大负弯矩和最大剪力出现位置各不相同,且其值相差较大,最大正弯矩出现在跨中或门机荷载作用处,最大负弯矩及最大剪力出现在桩侧。

(4) 轨道梁受门机荷载作用后,考察桩基的轴向应力情况,工况 1 和工况 2,桩顶最大拉压应力出现在 1[#]桩两侧;工况 3,桩基均受压,最大压应力出现在 1[#]桩左侧。三种工况下桩身最大压应力出现在工况 1 的 1[#]桩桩顶,各工况下最不利受载桩均为

1[#]桩,桩身的最大压应力均出现在 1[#]桩顶部;三种工况下桩身最大竖向位移出现在工况 3 的 1[#]桩桩顶,工况 2 的桩身最大位移出现在 2[#]桩桩顶,其余两种工况下出现在 1[#]桩桩顶。

3.2 弹性地基梁受载分析

弹性地基梁在工况 1 状态下梁的轴向应力和竖向位移云图以及桩的竖向应力和位移云图见图 9,三种工况下梁体及桩身内力、应力、位移情况见表 5。

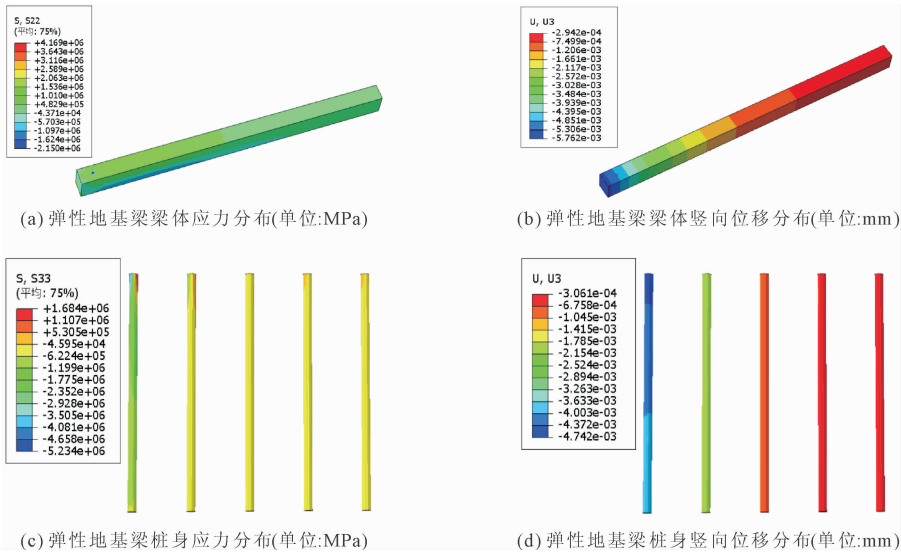


图 9 工况 1 弹性地基梁应力及位移云图

计算结果表明:

(1) 工况 1 和工况 2 下,弹性地基梁与桩基支承梁的梁体应力分布基本相同。工况 3 下,门机荷载全部作用在轨道梁上,由于土体协助轨道梁受载的影响,梁体最大拉应力的出现位置发生变化,最大拉应力位置由 1[#]桩右侧梁截面顶部转变为 P_1 作用处的梁截面底部,最大压应力出现在 P_1 作用处的梁

截面上部。

(2) 弹性地基梁的梁体最大挠度出现在工况 3 的 P_4 作用处,为 6.636 mm,三种工况下梁体最大挠度均出现在门机荷载作用处,工况 1 和工况 3 的最大挠度较接近,工况 2 的挠度最小。

(3) 三种工况下梁体的最大正弯矩、最大负弯矩和最大剪力出现位置各不相同,且其值相差较大,

最大正弯矩出现在跨中或门机荷载作用处,最大负弯矩及最大剪力出现在桩侧,最大正弯矩出现在梁

跨中或门机荷载作用处,最大负弯矩出现在桩侧。

表 5 弹性地基梁模型计算结果表

构件	参数	工况 1		工况 2		工况 3	
		计算值	位置	计算值	位置	计算值	位置
梁	$M_{\max}^{+}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	22.3	第四跨跨中	987.7	第一跨跨中	623.4	P_4 作用处
	$M_{\max}^{-}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	606.2	2 [#] 桩左侧	216.9	3 [#] 桩左侧	537.8	1 [#] 桩右侧
	$F_{\text{Smax}}/\text{kN}$	693.4	1 [#] 桩左侧	503.0	P_4 作用处	627.8	P_3 作用处
	$\sigma_{\max}^{+}/\text{MPa}$	4.17	1 [#] 桩左侧	2.05	第一跨跨中	1.37	P_1 作用处
	$\sigma_{\max}^{-}/\text{MPa}$	2.15	1 [#] 桩左侧	6.03	第一跨跨中	5.32	P_1 作用处
	$u_{\text{ymax}}/\text{mm}$	5.762	P_2 作用处	3.376	P_2 作用处	6.636	P_4 作用处
桩	$\sigma_{\max\text{顶}}^{+}/\text{MPa}$	1.68	1 [#] 桩右侧	0.64	1 [#] 桩左侧	0.51	3 [#] 桩右侧
	$\sigma_{\max\text{顶}}^{-}/\text{MPa}$	5.23	1 [#] 桩左侧	2.14	1 [#] 桩右侧	3.82	1 [#] 桩左侧
	$u_{\text{ymax顶}}/\text{mm}$	4.742	1 [#] 桩	2.953	2 [#] 桩	5.877	1 [#] 桩

注: $M_{\max}^{+}$ 表示最大正弯矩, $M_{\max}^{-}$ 表示最大负弯矩, F_{Smax} 表示最大剪力, $\sigma_{\max}^{+}$ 表示最大拉应力, $\sigma_{\max}^{-}$ 表示最大压应力, u_{ymax} 表示最大竖向位移。

(4) 轨道梁受门机荷载作用后,考察桩基的轴向应力情况,工况 1 和工况 2,桩顶最大拉压应力出现在 1[#]桩两侧;工况 3,由于土体协助受载作用,桩基出现了拉应力。三种工况下桩身最大应力出现在工况 1 的 1[#]桩桩顶,各工况下最不利受载桩均为 1[#]桩,桩身的最大应力均出现在 1[#]桩顶部;三种工况

下桩身最大竖向位移出现在工况 3 的 1[#]桩桩顶,工况 2 的桩身最大位移出现在 2[#]桩桩顶,其余两种工况的桩身最大位移出现在 1[#]桩桩顶。

4 计算结果对比分析

各工况下梁体内力对比图见图 10—图 12。

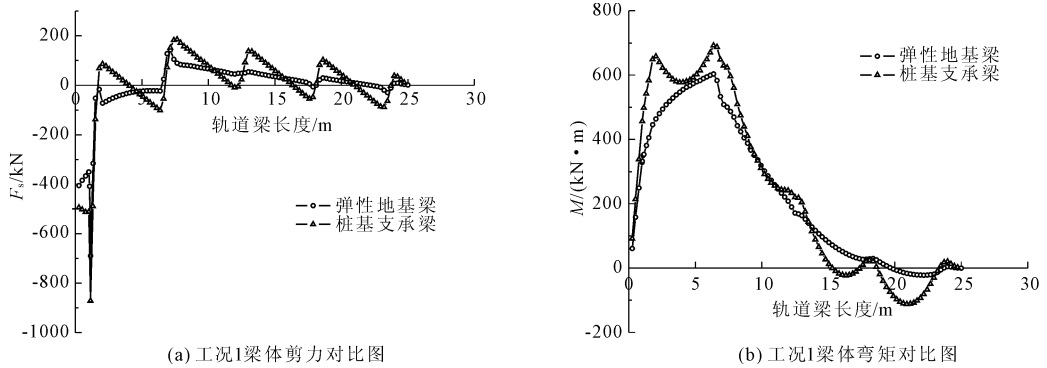


图 10 工况 1 下梁体内力对比图

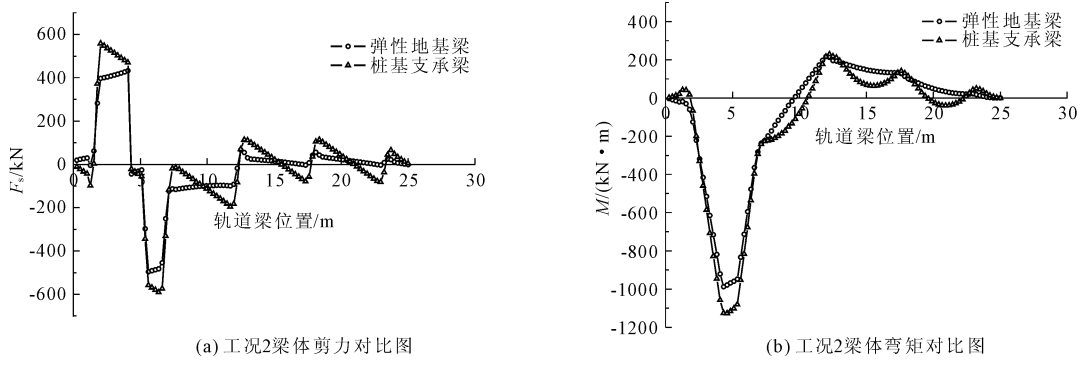


图 11 工况 2 下梁体内力对比图

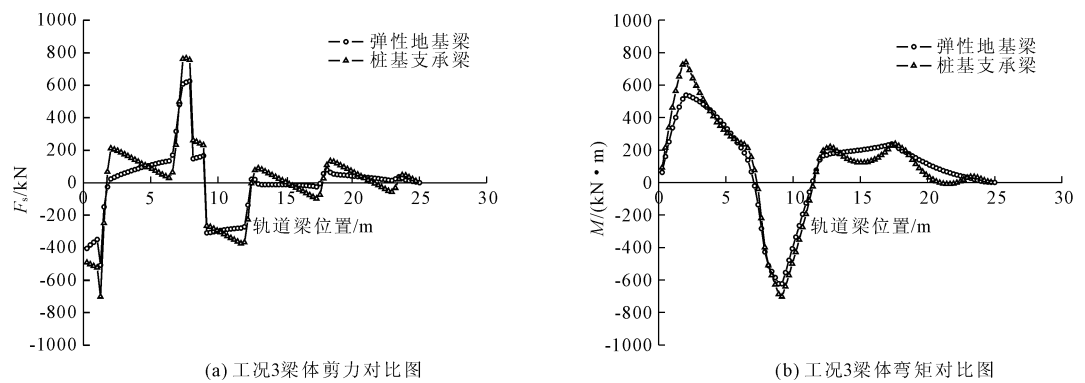


图 12 工况 3 下梁体内力对比图

表 6 桩基支承梁与弹性地基梁内力模型计算结果对比表

工况		轨道梁						桩顶		
		$M_{\max}^{+}$ /(kN·m)	$M_{\max}^{-}$ /(kN·m)	$F_{S\max}$ /kN	$\sigma_{\max}^{+}$ /MPa	$\sigma_{\max}^{-}$ /MPa	$u_{\max}$ mm	$\sigma_{\max}^{+}$ MPa	$\sigma_{\max}^{-}$ MPa	$u_{\max}$ /mm
1	桩基支承梁	112.4	693.3	876.8	4.28	2.28	8.007	0.33	5.95	6.877
	弹性地基梁	22.3	606.2	693.4	4.17	2.15	5.762	1.68	5.23	4.742
	变化幅度/%	-80.2	-12.6	-20.9	-2.6	-5.7	-28.0	409.1	-12.1	-31.0
2	桩基支承梁	1128.0	228.9	594.3	2.35	6.29	5.221	1.07	3.91	4.839
	弹性地基梁	987.7	216.9	503.0	2.05	6.03	3.376	0.64	2.14	2.953
	变化幅度/%	-12.4	-12.0	-15.4	-12.8	-4.1	-35.3	-40.2	-45.3	-39.0
3	桩基支承梁	702.8	739.0	766.8	1.55	5.47	9.018	—	3.89	8.178
	弹性地基梁	623.4	537.8	627.8	1.37	5.32	6.636	0.51	3.82	5.877
	变化幅度/%	-11.3	-27.2	-18.1	-11.6	-2.7	-26.4	—	-1.8	-28.1

对比计算结果表明：

- (1) 弹性地基梁相比于桩基支承梁,梁体轴向的拉压应力减幅较小,在 2.6%~12.8% 之间,梁体的竖向挠度减小较明显,在 26.4%~35.3% 之间。
- (2) 弹性地基梁相比于桩基支承梁,梁体的最大正弯矩、最大负弯矩以及最大剪力均有所减小,最大正弯矩减小 11.3%~12.4%,最大负弯矩减小 12.0%~27.2%,最大剪力减小 15.4%~20.9%。除工况 1 轨道梁的正弯矩减幅较大,其余工况下的内力值减幅较接近。

(3) 三种工况下,弹性地基梁相比于桩基支承梁,桩基的最大拉压应力在各工况下变化不同:工况 1,桩基的最大压应力减小,最大拉应力增大,经分析是由于重力和土体的共同影响,对于桩基支承梁,第一跨梁体在重力影响下向上弯曲的程度较小,对于弹性地基梁,由于梁下方土体的影响,轨道梁向上弯曲程度变大,导致 1[#]桩桩顶右侧拉应力增大;工况 2,桩基的最大拉压应均减小,经分析,是由于第一跨梁体下方的土体协助受载的影响,使得第一跨向下弯曲的程度减小,从而梁体的最大拉压应力均减小;

工况 3,桩基的最大压应力减小,桩基由不受拉应力转变为出现拉应力,且最大拉应力出现在 3[#]桩右侧,其原因与工况 1 相同,即受重力和土体的共同影响。三种工况下,桩基的最大压应力减幅在 1.8%~45.3%,此外,桩基的竖向位移减小较明显,在 28.1%~39.0%。

5 结 论

- (1) 在门机作用下,由于轮压以区域均布荷载的形式施加在轨道梁上且作用范围很小,轨道梁在门机荷载作用处发生应力集中,门机轮子作用处轨道梁的竖向挠度及正弯矩较大。梁的悬臂最左端为危险位置,当门机荷载作用在悬臂端以及边跨跨中时,轨道梁及边桩的受力处于最不利状态,桩顶端的应力和竖向位移达到最大值。
- (2) 工况 3 中,弹性地基梁相比于桩基支承梁,轨道梁梁体的最大拉应力位置发生变化,桩基的受力由全部受压状态转变为部分受压部分受拉状态。可见土体协助轨道梁受载不仅使得轨道梁及桩基的受力减小,还会影响轨道梁及桩基的应力分布状态。

(3) 各种工况作用下,弹性地基梁相比于桩基支承梁,梁的最大挠度、弯矩及剪力均相应减小。建议设计板桩码头或重力式码头的后轨道梁时按弹性地基梁进行计算,且优先使用有限元软件对轨道梁进行三维实体建模,三维模型可以考虑地基土的非线性,模拟的结果更接近轨道梁的实际受力情况,从而优化轨道梁结构。

参考文献:

- [1] 陈 文,张玉萍. 基于 ANSYS 的高桩码头轨道梁内力分析[J]. 水运工程,2014(10):71-75.
- [2] 陆 微,李春良,任增金. 钢筋混凝土轨道梁最优断面尺度的确定[J]. 水运工程,2017(7):103-107,135.
- [3] 邓 涛,戈浩波,陈章楷. 桩基支撑轨道梁结构设计影响因素分析[J]. 水运工程,2022(8):161-166,200.
- [4] 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的计算[M]. 北京:国防工业出版社,1983.
- [5] 张季容,姚祖恩,楼文娟. 有限单元法计算分层地基上的弹性地基梁[J]. 岩土工程学报,1986(3):16-26.
- [6] 张晓玲. 链杆法和有限元法计算弹性地基梁的比较与分析[J]. 煤炭技术,2008(12):100-101.
- [7] 高同玉. 弹性地基梁的有限元分析及其工程应用[J]. 工业建筑,2014,44(S1):871-873,870.
- [8] 庄 辉,邵传东. 三种方法下弹性地基梁挠度计算与对比[J]. 低温建筑技术,2016,38(11):65-66,69.
- [9] 廖志坚,陈尚荣,曹传祥. 深基坑开挖对邻近矩形地下通道变形影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):220-226.
- [10] 杨建晖,戴自航. 弹性地基上柱下条形基础计算的有限元法[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(6):95-100.
- [11] 李 潇,罗 双,曹琼琼,等. 通用模型弹性地基梁挠度方程及其适用性分析[J]. 建筑结构,2021,51(S1):1910-1913.
- [12] 林军志,杨 笛,徐绩青. 弹性地基梁板的径向基函数逼近求解方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),[2022-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1190.u.20220713.0844.002.html>.
- [13] 胡钺波,梅 岭,梅国雄,等. 桩土模型中土体边界选取的有限元分析[J]. 建筑科学,2009,25(9):18-20,29.
- [14] 陈灿明,孟星宇,李 致,等. 闸基灌注桩水平承载力现场试验与反演分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):161-167.
- [15] 于 新,范博文. ABAQUS 的平衡初始地应力的方法研究[J]. 山西建筑,2020,46(21):1-3.
- [16] 胡长明,袁一力,梅 源,等. 基于 ABAQUS 的地层-结构法模型的地应力平衡方法研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(4):76-86.
- [17] 马云峰. 基于 ABAQUS 岩土工程中地应力平衡的探讨[J]. 科技与创新,2014,18(8):61,64.

(上接第19页)

- [5] 严根华. 水动力荷载与闸门振动[J]. 水利水运工程学报,2001(2):10-15.
- [6] 严根华,阎诗武. 流激闸门振动及动态优化设计[J]. 水利水运科学研究,1999(1):12-22.
- [7] 严根华,阎诗武. 水工弧形闸门三维水弹耦合共振频率的数值计算[J]. 水利水运科学研究,1993(1):45-53.
- [8] 辛华荣,王 建,严根华,等. 大型平面有轨对拉式弧形闸门的流激振动特性及抗振措施研究[J]. 水利水运工程学报,2012(6):87-94.
- [9] Kolrman P. A. Flow-induced gate vibration, water-loop-kunding laboriorium[J]. Delft Hydraulics Laboratory, 1976.
- [10] Yan Genhua. Experiments and researches on flow-induced vibration of large radial working gate in sand sluicing chamber[C]//16th Asia and Pacific Division Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research/3rd IAHR International Symposium on Hydraulic Structures Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, October, 2008.
- [11] 严根华,阎诗武,樊宝康. 水工泄水结构动态优化方法及其在弧形闸门中的应用[J]. 水利水运科学研究,1993(2):27-37.
- [12] 严根华,阎诗武,樊宝康. 水工泄水结构振动的模态分析与有限元综合法[J]. 振动测试与诊断,1994,14(1):1-7.
- [13] 严根华. 水工闸门流激振动研究进展[J]. 水利水运工程学报,2006(1):66-73.
- [14] 水电工程钢闸门设计规范:NB 35055—2015[S]. 北京:中国电力出版社,2016.