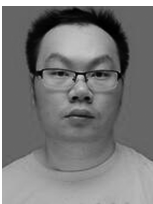


· 地基与基础 ·



桩基支撑轨道梁结构设计影响因素分析

邓 涛, 戈浩波, 陈章楷

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 桩基支撑轨道梁是具有弹性支座的连续梁结构, 计算发现并非轨道梁尺寸越大, 结构就越安全。设计参数相近时不同项目采用的轨道梁尺寸及桩基布置有较大差异。对此, 从桩基竖向抗压刚度、桩距、轨道梁刚度 3 个方面进行轨道梁内力分析。结果表明当荷载和桩基布置确定时, 存在一个最优梁高, 使得轨道梁钢筋用量最小。进一步分析可知, 当荷载和梁长度一定时, 轨道梁的内力分布与桩和梁的相对刚度有关。在设计桩基支撑轨道梁时需试算出最优相对刚度, 可使内力分布更合理且节省工程造价。同时, 基于工程实例给出不同桩距下的最优相对刚度区间, 可为类似项目的设计提供参考。

关键词: 桩基轨道梁; 桩竖向抗压刚度; 断面尺度; 相对刚度

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0161-06

Influencing factors of structural design for track beam supported by pile foundation

DENG Tao, GE Hao-bo, CHEN Zhang-kai

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The track beam supported by pile foundation is a continuous beam structure with elastic support. It is found that the larger the track beam size is, the safer the structure is. When the load and foundation parameters are similar, the track beam size and pile foundation layout adopted by different engineers are also quite different. Aiming at this problem, this paper analyzes the internal force of track beam from three aspects, i. e. vertical compressive stiffness of pile foundation, pile distance and stiffness of track beam. The results show that when the load and pile foundation layout are determined, there is an optimal beam height to minimize the amount of reinforcement in the track beam. Further analysis shows that when the load and beam length are certain, the internal force distribution of track beam is only related to the relative stiffness of pile and beam. When designing pile foundation to support track beam, it is necessary to try to calculate the optimal relative stiffness, which can make the internal force distribution more reasonable and save the project cost. Moreover, the optimal relative stiffness interval under different pile distances is given, which can provide reference for the design of similar projects.

Keywords: pile foundation track beam; vertical compressive stiffness of pile; cross section of beam; relative stiffness of pile and beam

重力式码头和板桩码头的后方一般需要建设独立的轨道梁结构以支撑装卸机械的后轨。当轮压较小、地基条件较好时一般采用弹性地基梁结构。随着码头大型化、深水化的推进, 许多码头需要建造在软土地基上, 而且装卸机械轮压较大,

此时码头后方一般采用桩基支撑的轨道梁结构——弹性支座连续梁结构^[1], 以使地基稳定并减少与前轨的差异性沉降^[2]。

计算发现, 在荷载一定的情况下, 桩基支撑轨道梁结构的内力与轨道梁截面抗弯刚度、桩基

竖向抗压刚度和桩距有关。同等条件下，并非轨道梁尺寸越大结构就越安全。当荷载和桩基支撑条件一样时，轨道梁弯矩对梁高非常敏感，轨道梁高度 1.50 m 和 2.50 m 时的最大弯矩相差近 1 倍；当荷载和地基条件相差不大时，不同项目采用的轨道梁断面尺寸也有差异^[3]。针对此问题，采用有限元软件对桩基支撑轨道梁结构受力影响因素进行分析，研究轨道梁内力随轨道梁刚度、桩基竖向抗压刚度、桩径的变化规律。结果表明：桩距和桩基竖向刚度一定时，增大轨道梁尺寸会导致梁弯矩快速增大，并存在最优断面高度使得轨道梁钢筋用量最小。基于力法对弹性支撑轨道梁结构进行理论计算，建立力法典型方程和柔度矩阵，求解得知，当荷载和梁长度一定时，轨道梁的内力分布与桩基刚度和轨道梁刚度之比（即桩和梁的相对刚度）有关。

1 计算参数

选取西非某大型集装箱码头的后轨道梁作为研究对象，单个结构段长度 153 m，桩基采用直径 1 m 的灌注桩，桩间距初始考虑为 5 m，结构段两端各设置 1.5 m 长的悬臂。桩基和轨道梁材料为 C40 混凝土，弹性模量 E 为 32.5 GPa。轨道梁上设置 A150 钢轨，岸桥基距 16.6 m，8 个轮/支腿，工作状态最大轮压为 1 300 kN/轮，计算工况为两机联合作业，最小间距为 2 m。考虑岸桥荷载为移动荷载自左向右在轨道梁上移动。采用有限元软件 SAP 进行内力计算，桩基支撑轨道梁采用二维梁单元模拟，桩基处采用线弹簧模拟，计算模型见图 1，弹簧刚度 K 为桩基竖向抗压刚度，根据土层参数由下述方法确定，土层参数见表 1。

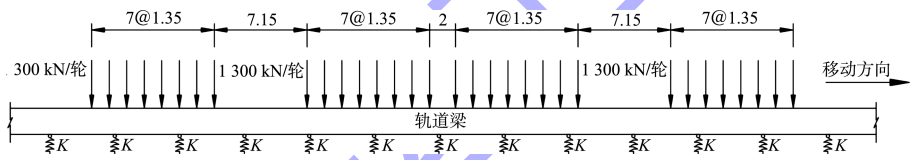


图 1 计算模型 (单位: m)

表 1 各土层参数

土层	深度/m	标准贯入度 N/击	不排水抗剪 强度 C_u /MPa	有效内摩擦 角 $\varphi'/(^{\circ})$
①回填砂	-15.5~2.0	15<N<30	-	30
②中粗砂	-21.0~-15.5	10<N<20	-	32
③粘土	-25.0~-21.0	15<N<25	90	-
④中粗砂	-45.0~-25.0	30<N<50	-	35

2 桩基竖向抗压刚度及桩距影响

2.1 桩基竖向抗压刚度计算

进行轨道梁内力分析首先要计算出支座刚度系数，即桩基竖向抗压刚度。《码头结构设计规范》^[4]规定，采用弹性支撑连续梁进行高桩码头横梁计算时，应考虑支座（桩基）的刚性系数，桩轴向抗压刚度可根据桩基承载力估算，计算公式如下：

$$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{E_p A_p} + \frac{1}{C} \tag{1}$$

$$C = T_c Q_{ud} \tag{2}$$

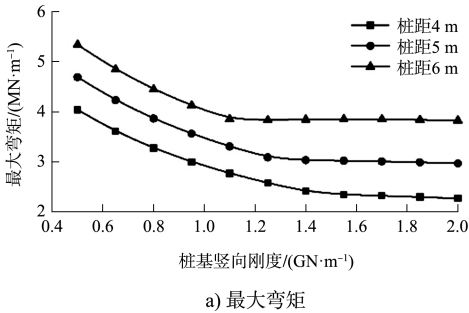
式中： K 为桩的轴向抗压刚度（kN/m），即桩顶单

位轴向变形所需要的轴向力； L_0 为桩在计算泥面以上的长度（m）； E_p 为桩的弹性模量（kPa）； A_p 为桩的截面面积（ m^2 ）； C 为桩入土段的单位变形所需的轴向力（kN/m），变形包括土中桩身的压缩变形与桩端土的沉降变形两部分； T_c 为系数（1/m），可取 115~145，本文按 115 取值； Q_{ud} 为单桩抗压极限承载力标准值（kN）。可以看出，入土段的轴向刚度与桩基承载力直接相关，泥面以上部分的刚度根据桩的弹性压缩计算求得。本文轨道梁的桩基全部埋于土内，可直接根据桩基承载力求得轴向抗压刚度。

2.2 不同桩距和桩基刚度下轨道梁内力

此项目在桩间距 5 m 时最大压桩力标准值为 5 300 kN，取桩长 41 m 计算出桩基承载力标准值为 10.9 MN（根据国标查表法计算求得，受篇幅限制未列出桩基承载力计算过程），根据式（2）计算出桩基竖向抗压刚度为 1.25 GN/m。轨道梁截面

高和宽暂取 1.50 m, 为探究桩距、桩基竖向刚度对轨道梁内力的影响, 暂不考虑桩距和桩基竖向刚度的相关关系, 分别计算桩距为 4、5、6 m 时



桩基竖向刚度从 0.5 GN/m 增加到 2 GN/m 时的轨道梁内力, 最大弯矩和最大剪力标准值变化曲线见图 2。

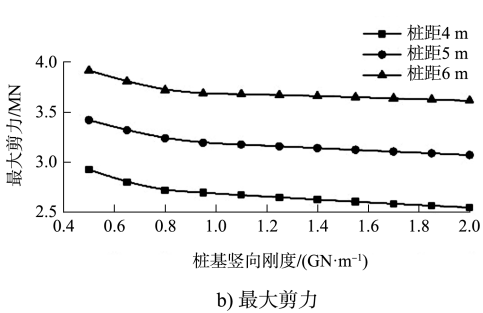


图 2 轨道梁内力与桩基竖向刚度关系

从图 2a) 可知最大弯矩先随着桩基竖向刚度增大近似呈线性减小, 到达一定程度后, 最大弯矩的减小渐缓, 并趋于一定值。说明当桩基竖向刚度增大到一临界值后再增加竖向刚度意义不大, 对轨道梁弯矩减小的效果不明显, 反而会引起桩基工程量增加。表 2 给出不同桩距下的临界桩基

刚度 K , 发现当桩基到达临界刚度时, 最大弯矩已接近刚性支撑时候的最大弯矩, 此时可简化为刚性支撑连续梁进行计算。并计算出此时的相对刚度比 K/EI (桩基竖向抗压刚度 K 与轨道梁刚度 EI 之比)。从表 2 可知, 临界相对刚度比随着桩距的增大而减小。

表 2 不同桩距下临界桩基竖向刚度

桩距/m	临界桩基竖向刚度 $K/(GN \cdot m^{-1})$	轨道梁刚度 $EI/(GN \cdot m^{-2})$	临界桩基竖向刚度时最大弯矩 $M_1/(kN \cdot m)$	刚性支撑连续梁时最大弯矩 $M_2/(kN \cdot m)$	$(M_2/M_1)/\%$	$K/(EI)$
4	1.55	13.7	2 344	2 172	93	0.11
5	1.40	13.7	3 085	2 883	93	0.10
6	1.10	13.7	3 850	3 642	94	0.08

从图 2b) 可以看出桩基竖向刚度对剪力的影响很小, 桩距 4 m 时, 竖向刚度系数从 0.5 GN/m 增加到 2 GN/m 过程中, 最大剪力减小仅为 12%。

2.3 最优桩距的确定

以上分析考虑桩距和桩基竖向刚度分别变化, 而实际进行桩基设计时, 桩距和桩基刚度具有相关性, 当桩距确定时, 桩基竖向刚度随之确定。

从式(2)可知, 桩基竖向刚度与桩基承载力呈线性关系, 当桩距越大, 所需要的桩基承载力就越大, 因此桩距和桩基竖向刚度会同时增大。计算不同桩距下的桩基内力, 确定桩长和桩基承载力, 再计算出不同桩距下的桩基竖向刚度和轨道梁内力, 计算结果见表 3, 最大弯矩和剪力变化曲线见图 3。

表 3 不同桩距下桩基刚度及轨道梁内力

桩距/m	压桩力标准值/kN	桩长/m	桩基承载力标准值/MN	桩基竖向刚度/ (GN·m ⁻¹)	最大弯矩/ (kN·m)	最大剪力/ kN	每延米桩长/ m
3.5	3 710	35	7.72	0.89	2 826	2 476	10.0
4.0	4 240	38	8.84	1.02	2 891	2 643	9.5
4.5	4 770	40	9.65	1.11	3 008	2 883	8.9
5.0	5 300	43	10.90	1.25	3 080	3 160	8.6
5.5	5 830	45	11.80	1.36	3 419	3 407	8.2
6.0	6 360	47	12.70	1.46	3 848	3 660	7.9
6.5	6 890	50	14.17	1.63	4 251	3 920	7.6
7.0	7 420	52	15.05	1.73	4 881	4 198	7.4

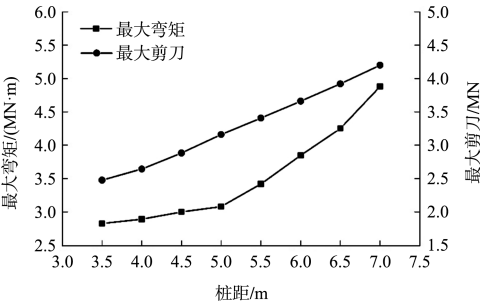


图 3 最大弯矩和剪力随桩距变化

从图 3 可以看出轨道梁最大弯矩和最大剪力都随桩距的增大而增大，其中剪力基本呈线性增长。当桩距大于 5 m 时，轨道梁弯矩随桩距增加迅速增大；而桩距小于 5 m 时，轨道梁弯矩随桩距增加增速较缓。因此，当桩距大于 5 m 时，增大桩距会造成轨道梁弯矩大幅增加，导致较大的轨道梁尺寸和钢筋量；而桩距由 5.0 m 减小为 3.5 m，轨道梁最大弯矩仅相差 8%，基本不会对轨道梁尺寸产生决定性作用。但从表 2 可知每延米桩长增加了 1.6 m，对于长度较长的码头将造成桩基工程量的大幅增加。因此，桩距 5 m 时的桩基布置和桩基竖向刚度最为经济合理，为最优桩距。

3 轨道梁刚度影响

3.1 不同梁高下轨道梁内力

轨道梁刚度 EI 为梁高的三次函数，计算不同梁高下的轨道梁内力可分析出轨道梁刚度对梁内力的影响。在桩距 5 m 的条件下，将梁高从 0.25 m 变化到 3.00 m，最大弯矩和最大剪力的变化见图 4。从图 4a) 可以看出，随着梁高的增加，桩基支撑轨道梁的最大弯矩先呈现平稳变化的趋势(先略有减小后缓慢增加)，到达一临界高度后迅速增大。并且临界梁高随桩基竖向刚度 K 的增大而增大，桩基竖向刚度为 0.5 GN/m 时，临界梁高为 1.00 m；桩基竖向刚度为 1.25 GN/m 时，临界梁高为 1.50 m；桩基竖向刚度为 2 GN/m 时，临界梁高为 1.75 m。从图 4b) 可以看出，随着梁高的增加，剪力也呈现先减小后增大的趋势，但总体变化不大。

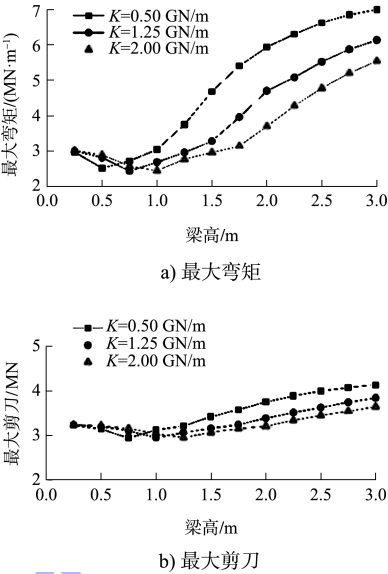


图 4 轨道梁内力与轨道梁高度关系

3.2 最优梁高的确定

在桩距 5 m、支座刚度系数为 1.25 GN/m 时，计算不同梁高断面所需的钢筋，纵向受力钢筋直径取 32 mm，箍筋直径取 16 mm，计算结果见表 4。

表 4 不同梁高下轨道梁钢筋量

截面高度/m	计算所需纵向钢筋数量/根	实配纵向钢筋数量/根	纵向受力钢筋量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	箍筋量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	总钢筋量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)
1.00	22.8	23	145.2	99.6	244.9
1.25	21.5	22	138.8	82.7	221.6
1.50	20.6	21	132.6	82.4	214.9
1.75	21.2	22	138.9	82.1	221.0
2.00	21.5	22	138.9	81.8	220.7
2.25	21.7	22	138.9	80.3	219.2
2.50	21.8	22	138.9	79.9	218.8

由配筋结果可知，当梁高小于 1.25 m 时，由于轨道梁内力不会随梁高降低而发生较大变化，断面减小反而引起纵向受力钢筋和抗剪钢筋的增加；当梁高大于 1.75 m 时，增大截面高度，由于轨道梁内力迅速增大，所需钢筋量也不会减少，此时增大梁高没有意义，反而会引起混凝土量的增加。因此，梁高 1.50 m 是最经济合理的截面，此时所需钢筋量最少。同样计算出支座刚度为 0.5 GN/m、2 GN/m 时的最优梁高分别是 1.00 m 和 1.75 m。可见，随着支座刚度的增大，最优梁高也在增大。

4 基于力法的轨道梁受力分析

4.1 力法典型方程建立

力法是求解超静定结构最基本的理论分析方法。针对桩基支撑轨道梁结构进行理论分析, 探究轨道梁内力与桩基竖向刚度、桩距、轨道梁刚度的内在规律联系, 验证有限元计算结果。

具有 n 个桩基支撑轨道梁结构可简化为如图 5a) 所示超静定结构, 桩基视为弹性支座, 支座刚度为桩基竖向抗压刚度 K , 超静定次数为桩基个数 n 。设荷载作用下桩基内力为 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$, 原结构中去掉 n 个桩基的弹性支撑, 代以相应的 n 个多余未知力 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$, 此时原结构转变为静定的单跨简支梁结构, 即为力法的基本体系^[5], 如图 5b) 所示, 基本体系中沿多余未知力方向的位移应与原结构相等。在外荷载和多余未知力作用下, 梁在原桩位处的位移应等于弹簧变形, 此为变形协调条件, 根据变形协调条件可列出力法典型方程:

$$\begin{cases} \Delta_{1F} - \delta_{11}X_1 - \delta_{12}X_2 - \dots - \delta_{1n}X_n = \frac{X_1}{K} \\ \Delta_{2F} - \delta_{21}X_1 - \delta_{22}X_2 - \dots - \delta_{2n}X_n = \frac{X_2}{K} \\ \vdots \\ \Delta_{nF} - \delta_{n1}X_1 - \delta_{n2}X_2 - \dots - \delta_{nn}X_n = \frac{X_n}{K} \end{cases} \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \frac{1}{EI} \left[\frac{i^2(l-i)(l-j)}{2l} + \frac{ij(l-j)^3}{3l^2} + \frac{i(l-j)(j-i)(5il-3i^2-2ij)}{6l^2} + \frac{(j-i)^2(l-j)(8il-6i^2-2ij)(5il-3i^2-2ij)}{54jl(3il-2i^2-ij)} \right] \quad (5)$$

假设轨道梁长度按相对值计算, 即每段长度为 1, 若有 n 处桩基, 则总长 l 为 $n+1$, 式(5)中假设 $j>i$ 。根据位移互等原理 $\delta_{ji} = \delta_{ij}$, 求解出柔度系数后即可获得完整的柔度矩阵。

4.3 桩基支撑轨道梁结构受力敏感性分析

以 $n=2$ 为例按上述方法进行轨道梁内力计算, 设轨道梁刚度为 EI , 长度为 l , 弹簧刚度为 K , 代入式(5)计算出柔度系数:

$$\delta_{11} = \delta_{22} = 0.016 \, 5 l^3 / EI \quad (6)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = 0.014 \, 4 l^3 / EI \quad (7)$$

Δ_{iF} 根据 $X_i = 1$ 弯矩 \overline{M}_1 图和外荷载 F 下的弯矩

式中: Δ_{iF} 为基本体系中由外荷载 F 产生的在未知力 X_i 处的挠度, 可由图乘法^[6]或有限元计算求得; δ_{ij} 为基本体系中单位力 $X_j = 1$ 产生的沿 X_i 方向上的挠度, 也称为柔度系数; K 为弹簧刚度, 即桩基竖向抗压刚度。

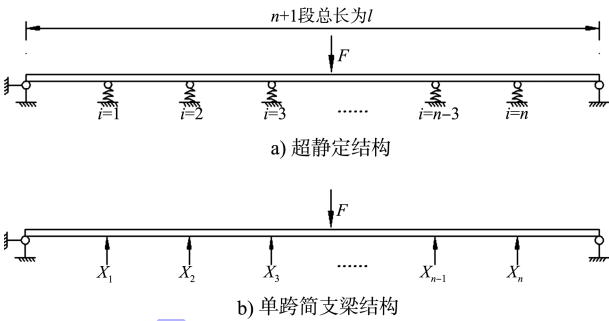


图 5 力法基本体系图示

4.2 柔度矩阵求解

式(3)可改写为:

$$\begin{bmatrix} \delta_{11}+1/K & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22}+1/K & \dots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & \delta_{nn}+1/K \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta_{1F} \\ \Delta_{2F} \\ \vdots \\ \Delta_{nF} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

中间大括号内即为柔度矩阵, 若解出柔度矩阵即可求得未知力 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$, 进而可以计算出各个位置的弯矩和剪力。柔度矩阵中各数包含两部分, 即柔度系数 δ_{ij} 和桩基等效成弹簧的柔度 $1/K$ 。柔度系数根据图乘法求得:

M_F 图根据图乘法计算得到:

$$\Delta_{1F} = \int \frac{\overline{M}_1 M_F}{EI} ds = \alpha_1 F l^3 / EI \quad (8)$$

$$\Delta_{2F} = \int \frac{\overline{M}_2 M_F}{EI} ds = \alpha_2 F l^3 / EI \quad (9)$$

其中 α_1 和 α_2 为常数, 仅与荷载位置有关。代入式(4)即可算出多余未知力 X_1 和 X_2 :

$$X_1 = \frac{\Delta_{1F} - \frac{\delta_{12}}{\delta_{22}} \Delta_{2F}}{\delta_{11} + \frac{1}{K} - \frac{\delta_{12}}{\delta_{22}} \delta_{21}} = \frac{(\alpha_1 - 0.87\alpha_2) F}{0.003 \, 9 + EI/Kl^3} \quad (10)$$

$$X_2 = \frac{\Delta_{2F} - \frac{\delta_{21}}{\delta_{11}} \Delta_{1F}}{\frac{1}{\delta_{22}} + \frac{1}{K} - \frac{\delta_{21}}{\delta_{11}} \delta_{12}} = \frac{(\alpha_2 - 0.87\alpha_1) F}{0.0039 + EI/Kl^3} \tag{11}$$

多余未知力求出后，代入静定结构弯矩方程，即可解出轨道梁最大弯矩：

$$M = M_p - \overline{M}_1 X_1 - \overline{M}_2 X_2 = \beta Fl - \frac{\alpha Fl}{0.0039 + \frac{EI}{Kl^3}} = \frac{256\alpha Fl}{\frac{0.0039 Kl^3}{EI} + 1} + (\beta - 256\alpha) Fl \tag{12}$$

其中 α 、 β 为常数，仅与荷载位置有关。可以看出当荷载 F 、梁长度 l 确定时，最大弯矩仅与弹性支座刚度与轨道梁刚度之比 $K/(EI)$ （即相对刚度）有关；当相对刚度 $K/(EI)$ 为 0，即弹簧刚度为 0 时，轨道梁弯矩最大，为无弹性支撑时候的简支梁的弯矩 βFl ；当相对刚度 K/EI 趋向于无穷大，即桩基为刚性支撑时，轨道梁弯矩最小，为 $(\beta - 256\alpha) Fl$ 。

图 6 为最大弯矩与相对刚度的反比例函数关系。可以看出此图与图 2a) 的弯矩与桩基刚度关系图近似。当相对刚度较小时，轨道梁弯矩随相对刚度变化剧烈；当相对刚度较大时，轨道梁弯矩随相对刚度增大的变化幅度变缓。存在一个最优相对刚度范围，如图 6 中加粗部分，使得截面较为经济合理：大于最优相对刚度时，最大弯矩受相对刚度影响不敏感，一味增大相对刚度（增加桩长或减小截面面积）并不会使轨道梁弯矩明显减小，反而引起较大的桩基工程量增加；小于最优相对刚度时，轨道梁弯矩随相对刚度变化剧烈，稍微减小相对刚度（如增大轨道梁断面尺度），都会导致轨道梁弯矩快速增大，造成较大的钢筋量，反而产生不经济的效果。因此，进行轨道梁设计时，需试算出不同桩基刚度、轨道梁尺寸下的内力，得到最优相对刚度范围，以达到经济合理的目的。基于本文工程实例，以桩距 5 m 为例介绍最优相对刚度区间的确定过程：先取轨道梁断面高度为 1.50 m，增大桩基刚度确定临界桩基竖向刚度 K （桩基竖向刚度大于 K 时，轨道梁弯矩的变

化已不明显），此时为相对刚度比的上限；在桩基竖向刚度 K 下，不断增加轨道梁断面高度以确定最优断面尺度（大于此尺度时，轨道梁弯矩随梁高迅速增大），此时为最优相对刚度区间的下限。由此分别计算出桩距为 4、5 和 6 m 时的最优相对刚度区间，结果见表 5。

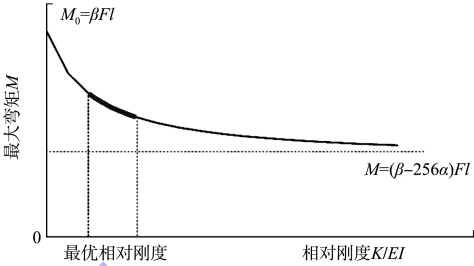


图 6 最大弯矩与相对刚度关系

表 5 不同桩距下最优相对刚度区间

桩距/m	最优相对刚度 $K/(EI)$ 下限	最优相对刚度 $K/(EI)$ 上限
4	0.084	0.113
5	0.078	0.102
6	0.057	0.080

5 结论

- 1) 轨道梁断面高度、桩基竖向刚度、桩距是影响轨道梁内力的重要因素，一般情况下，梁高越大、桩基刚度越小、桩距越大，轨道梁内力越大，且弯矩变化幅度明显大于剪力变化幅度。
 - 2) 当桩距及轨道梁刚度确定时，存在临界桩基竖向刚度，当桩基竖向刚度大于此值时，轨道梁内力随桩基刚度变化不敏感，此时再增加桩基刚度已意义不大；当荷载和桩基布置确定时，存在一个最优梁高，使得轨道梁钢筋用量最小，可作为设计梁高。
 - 3) 轨道梁的内力分布与桩基竖向刚度和轨道梁刚度之比（相对刚度）有关，也存在一个最优相对刚度范围，可通过试算不同桩距、桩基刚度及轨道梁尺寸下的内力以确定最优相对刚度，以节省工程造价。
 - 4) 实际工程中还需要考虑各种因素，如：轨道梁结构段如何布置会直接影响桩距和桩数；桩基一般需进入持力层一定深度，很大程度上决定了桩基布置；采用灌注桩还是打入桩直接影响桩基竖向刚度。
- （下转第 200 页）