

# 岩溶区桥梁基桩水平承载特性及影响因素分析

刘逸飞, 王琛

(湖南湘江新区投资集团有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 根据某岩溶区桥梁基桩的水平承载特性及桩—土相互作用机理, 考虑基桩受力变形传递协调条件, 建立简化计算模型及桩身挠曲微分方程, 基于传递矩阵法推导基桩内力与位移的理论解答, 并通过计算分析验证传递矩阵解答的合理性; 以湖南长沙湘府路(河西段)快速化改造工程中某钻孔灌注桩为例, 探讨水平荷载、桩身抗弯刚度及地基水平抗力比例系数对桥梁基桩内力与位移的影响。结果表明, 其他条件相同时, 桩身水平位移和弯矩随桩顶水平荷载增加而显著增大, 桩身弯矩随埋深向下呈现先增大后减小的趋势, 桩身最大弯矩出现在基桩埋深 3~4 m 位置, 即约 2 倍桩径处; 随桩身抗弯刚度的增加, 桩身弯矩小幅增加, 而桩身水平位移稍有减小; 桩身水平位移和弯矩随地基土体水平抗力比例系数的增加而减小; 通过增大桩身抗弯刚度提高基桩水平承载能力并不可取, 在一定程度上提高地基土体水平抗力系数可有效增强基桩水平承载能力。

**关键词:** 桥梁; 基桩; 水平承载特性; 岩溶区; 传递矩阵法; 影响因素分析

中图分类号: U443.15

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)06-0104-05

桥梁基桩除承受上部结构和车辆载重传递下来的竖向荷载外, 还会受到车辆行驶产生的离心力、风荷载等水平向荷载及偏心弯矩, 若忽视水平荷载和偏心弯矩对基桩产生的不利影响, 会给桥梁基桩带来极大安全隐患, 严重时可能导致事故。为深入分析桥梁基桩的水平承载特性及受力变形机理, 赵明华等通过室内模型试验, 研究了复杂荷载作用下桥梁双桩基础的内力与位移变化发展规律及破坏模式; 张浩等基于实际工程, 分析了路基边载作用下软土地基桥梁桩柱的位移特征和受力机制; Sawant V. A. 等通过有限元数值计算, 分析了水平荷载作用下桩身弯矩和位移分布规律; 赵海鹏等基于高性能有限单元法, 分析了多层地基水平受荷桩的受力变形特性, 反映了非线性桩—土相互作用; 胡文韬等基于线弹性地基反力法, 提出了水平荷载作用下阶梯形变截面桩内力及变形解析算法; 邢康宇等基于双曲线水平荷载传递模型, 考虑桩—土体系变形的非线性特征, 分析了成层土中轴横受荷桩的水平响应。总体来说, 横向受荷基桩的受力和变形计算方法主要包括有限杆单元法、幂级数法、有限差分法和传递矩阵法等, 其中传递矩阵法计算过程清楚, 可考虑桩身尺寸变化、桩周土体各向异性及复杂边界条件等, 便于实际工程应用。本文以位于岩溶区的某桥梁基桩为依托, 分析基桩的水平受荷特性, 建立相应挠曲

微分方程, 并基于传递矩阵法推导基桩桩身内力与位移的理论解答, 编制相应计算程序, 对桥梁基桩的受力与变形影响因素进行分析。

## 1 桩身内力与位移计算的理论解答

实际工程中, 由于桥梁基桩的截面尺寸、桩身强度及桩周土体性质等不尽相同, 桩身受力变形特性存在较大差异。为考虑桩身参数和桩周土体的各向异性, 建立图 1 所示基桩简化计算模型。桩顶受轴向荷载  $P_0$ 、横向荷载  $Q_0$  及弯矩  $M_0$  的作用, 基桩长度为  $L$ , 其中地面或局部冲刷线以上的自由段长度为  $l_0$ , 位于地面以下的入土段深度为  $l_p$ 。依次将桩

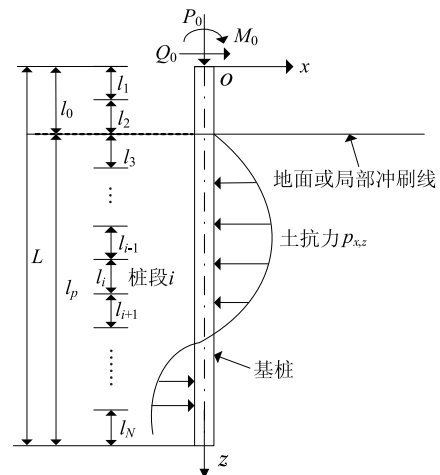


图 1 基桩简化计算模型

身划分为  $N$  段,每段长度为  $L/N$ 。

为便于分析计算,以桩顶轴心为原点建立  $xOz$  坐标系,以基桩第  $i$  微元段轴顶点为坐标原点建立  $wO\zeta$  坐标系,其中  $z = \sum_{j=1}^{i-1} l_j + \lambda_i$  ( $\lambda_i$  为微元段顶部距  $w$  轴的距离)。基桩第  $i$  微元段受力分析见图 2。

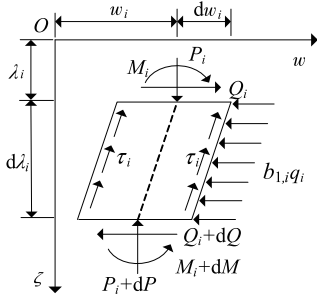


图 2 基桩第  $i$  微元段受力分析示意图

基于 Winkler 弹性地基理论及  $m$  法的基本假定,对于入土段基桩,根据图 2 取第  $i$  微元段进行受力分析,建立该桩段的挠曲微分方程:

$$E_i I_i \frac{d^4 w_i}{d\lambda_i^4} + (P_{0,i} + f_i \lambda_i) \frac{d^2 w_i}{d\lambda_i^2} + f_i \frac{dw_i}{d\lambda_i} + b_{1,i} q_i = 0 \quad (1)$$

式中:  $E_i I_i$  为第  $i$  微元段桩身抗弯刚度;  $w_i$  为水平位移;  $\lambda_i$  为计算点到该桩段顶点的距离;  $P_{0,i}$  为第  $i$  微元段桩顶轴力;  $f_i$  为桩身轴力增长系数;  $b_{1,i}$  为基桩有效计算宽度;  $q_i$  为第  $i$  微元段对应岩土层的水平地基抗力,按式(2)计算。

$$q_i = m \left( \sum_{i=2}^{i-1} l_i + \lambda_i \right) w_i \quad (2)$$

式中:  $m$  为地基水平抗力比例系数。

可根据《公路桥涵地基与基础设计规范》查表确定  $m$ ,  $i \leq 2$  时,  $m = 0$ ; 也可开展现场试验测得相应参数,根据《建筑桩基技术规范》由实测参数按式(3)确定  $m$ 。

$$m = \frac{(H_{cr}/x_{cr} v_x)^{5/3}}{b_1 (EI)^{2/3}} \quad (3)$$

式中:  $H_{cr}$  为基桩水平临界荷载;  $x_{cr}$  为临界水平位移;  $v_x$  为桩顶水平位移系数。

将式(2)代入式(1),整理得:

$$\frac{d^4 w_i}{d\lambda_i^4} + \frac{P_{0,i} + f_i \lambda_i}{E_i I_i} \cdot \frac{d^2 w_i}{d\lambda_i^2} + \frac{f_i}{E_i I_i} \cdot \frac{dw_i}{d\lambda_i} + m w_i \frac{b_{1,i}}{E_i I_i} \left( \sum_{i=2}^{i-1} l_i + \lambda_i \right) = 0 \quad (4)$$

$$\text{令: } \epsilon_i = \frac{P_{0,i}}{E_i I_i}, \phi_i = \frac{f_i}{E_i I_i}, \varphi_i = \frac{b_{1,i}}{E_i I_i} \sum_{i=2}^{i-1} l_i, \gamma_i = \frac{b_{1,i}}{E_i I_i}, \text{式(4)可简化为:}$$

$$\frac{d^4 w_i}{d\lambda_i^4} + (\epsilon_i + \phi_i \lambda_i) \frac{d^2 w_i}{d\lambda_i^2} + \phi_i \frac{dw_i}{d\lambda_i} + m w_i (\varphi_i + \gamma_i \lambda_i) = 0 \quad (5)$$

根据幂级数法对式(5)求解,设其解答为:

$$w(\lambda_i) = \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} \beta_{i,j} \quad (6)$$

式中:  $\eta_{i,0}, \eta_{i,1}, \eta_{i,2}, \eta_{i,3}$  均为待定系数,可通过比较系数求得;  $\beta_{i,j} = \sum_{n=0}^{+\infty} a_{i,j,n} \lambda_i^n$ ;  $a_{i,j,n}$  为常数项。

基于 Euler-Bernoulli 理论,第  $i$  微元段的桩身转角  $\theta_i$ 、弯矩  $M_i$  和剪力  $Q_i$  可表示为:

$$\begin{cases} \theta_i = \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} \beta'_{i,j} \\ M_i = E_i I_i \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} \beta''_{i,j} \\ Q_i = E_i I_i \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} \beta'''_{i,j} + P_i \sum_{j=0}^3 \eta_{i,j} \beta'_{i,j} \end{cases} \quad (7)$$

采用比较系数法消除待定系数  $\eta_{i,j}$ ,得:

$$\begin{bmatrix} w_i \\ \theta_i \\ M_i \\ Q_i \end{bmatrix} = X X_i \begin{bmatrix} w_{i,0} \\ \theta_{i,0} \\ M_{i,0} \\ Q_{i,0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $w_{i,0}, \theta_{i,0}, M_{i,0}, Q_{i,0}$  分别为桩段  $\lambda_i = 0$  处的水平位移、转角、弯矩和剪力;  $X X_i$  为桩段  $i$  的内力与位移传递矩阵,可表示为:

$$X X_i = X_i (X_i |_{\lambda_i=0})^{-1} \quad (9)$$

$$X_i = \begin{bmatrix} \beta_{i,0} & \beta_{i,1} & \beta_{i,2} & \beta_{i,3} \\ \beta'_{i,0} & \beta'_{i,1} & \beta'_{i,2} & \beta'_{i,3} \\ E_i I_i \beta''_{i,0} & E_i I_i \beta''_{i,1} & E_i I_i \beta''_{i,2} & E_i I_i \beta''_{i,3} \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = E_i I_i \beta''_{i,0} + P_i \beta'_{i,0} \\ \alpha_2 = E_i I_i \beta''_{i,1} + P_i \beta'_{i,1} \\ \alpha_3 = E_i I_i \beta''_{i,2} + P_i \beta'_{i,2} \\ \alpha_4 = E_i I_i \beta''_{i,3} + P_i \beta'_{i,3} \end{cases} \quad (11)$$

另外,各桩段之间满足内力与位移的传递协调条件,即第  $i$  与  $i-1$  两相邻桩段状态变量相等。将所有桩段的基桩传递矩阵连乘,即可建立第  $i$  段与第 1 段之间内力与位移的传递关系:

$$\begin{bmatrix} w_i \\ \theta_i \\ M_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \overline{XX}_i \overline{XX}_{i-1} \overline{XX}_{i-2} \overline{XX}_{i-3} \cdots \overline{XX}_1 \begin{bmatrix} w_0 \\ \theta_0 \\ M_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $\overline{XX}_{i-1} = \overline{XX}_{i-1} |_{\lambda_{i-1}=l_{i-1}}$ ;  $w_0, \theta_0, M_0, Q_0$  分别为桩顶水平位移、转角、弯矩和剪力。

综上,结合基桩受荷情况和桩顶、桩底边界条件,即可求解基桩内力与位移,其求解过程可通过编制 MATLAB 程序进行。

## 2 工程概况及影响因素分析

### 2.1 工程概况

湖南长沙湘府路(河西段)快速化改造工程中某钻孔灌注桩,桩长  $L=19.5$  m,其中自由段长 2.0 m,入土段长 17.5 m,桩径  $D=1.8$  m,桩身为 C30 混凝土和直径 28 mm 的 HRB400 钢筋通长配置。桩侧土层自上而下依次为杂填土、粉质黏土、强风化白云岩及强风化灰质白云岩,局部揭露岩层存在溶洞,不具备嵌岩桩设计的地质条件。各土层参数见表 1。

表 1 岩土层分布及力学参数

地层名称	层厚/ m	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦 角/( $^\circ$ )	黏聚力/ kPa
杂填土	1.5	18.3	15.8	6.1
粉质黏土	12.0	18.5	16.0	14.8
强风化白云岩	4.6	20.5	23.1	18.8
强风化灰质白云岩	6.7	23.1	22.7	18.2

### 2.2 理论与数值计算对比验证

当桩顶受荷情况为水平荷载  $Q_0=80$  kN、竖向荷载  $P_0=50$  kN 时,通过理论和数值计算(数值计算模型见图 3),得到图 4、图 5 所示桩身水平位移和弯矩随深度的变化。

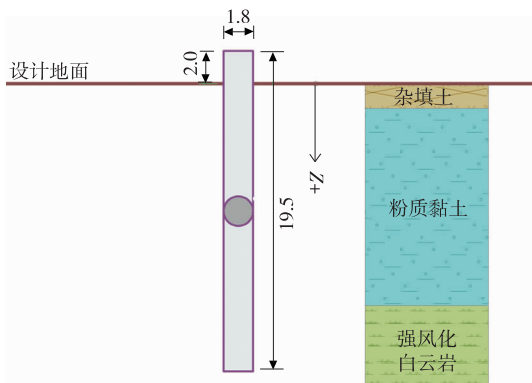


图 3 数值计算模型示意图(单位:m)

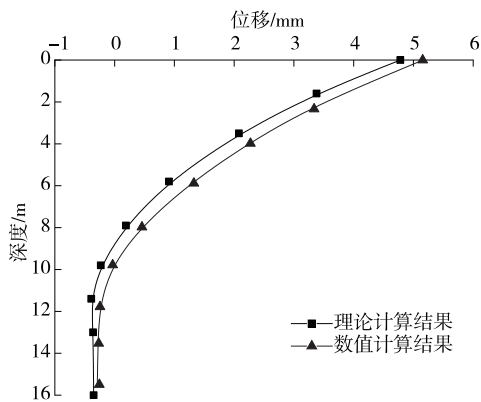


图 4 桩身水平位移计算结果对比

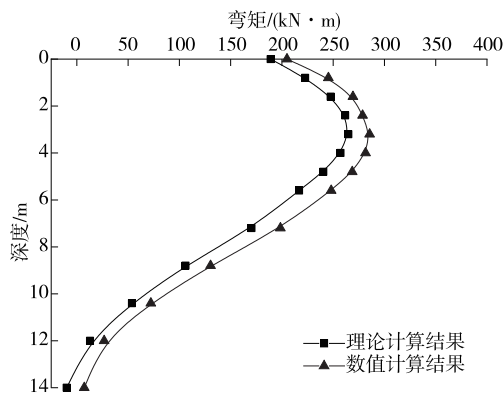


图 5 桩身弯矩计算结果对比

由图 4、图 5 可知:理论和数值计算的桩身水平位移及弯矩变化趋势较吻合,验证了理论解答的合理性;数值计算结果略大于理论计算结果,这是因为数值计算对地基水平抗力比例系数进行了一定程度折减,导致基桩内力计算结果偏大。

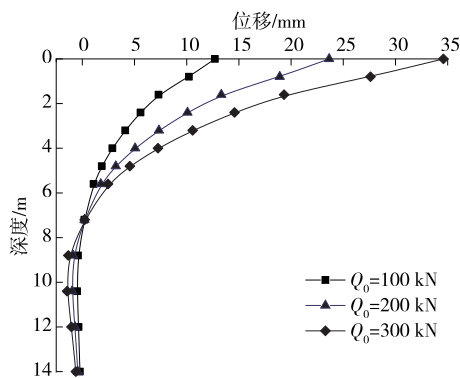
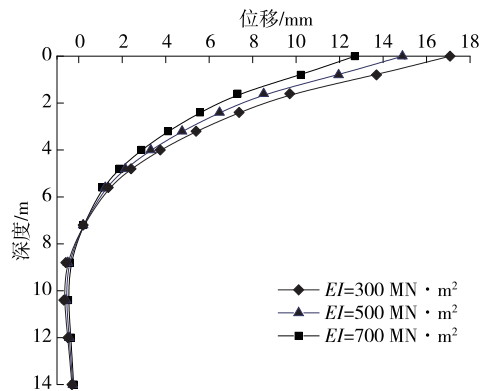
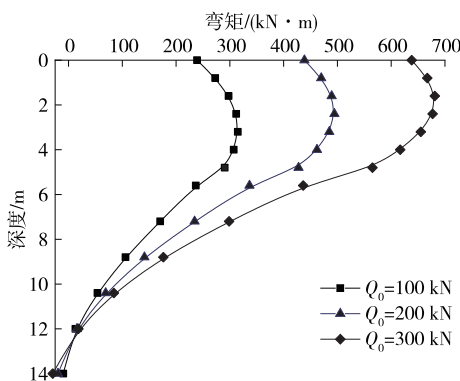
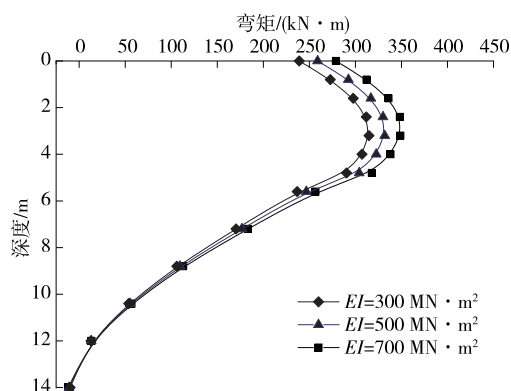
### 2.3 影响因素分析

为研究水平荷载  $Q_0$ 、桩身抗弯刚度  $EI$  及地基水平抗力比例系数  $m$  对桩顶自由、桩端固定的桥梁基桩水平承载性能的影响,在保持其他参数不变的情况下,对水平荷载  $Q_0=100$  kN、200 kN、300 kN,桩身刚度  $EI=300$   $\text{MN} \cdot \text{m}^2$ 、500  $\text{MN} \cdot \text{m}^2$ 、700  $\text{MN} \cdot \text{m}^2$ ,地基水平抗力比例系数  $m=6$   $\text{MN}/\text{m}^4$ 、9  $\text{MN}/\text{m}^4$ 、12  $\text{MN}/\text{m}^4$  时基桩弯矩和位移进行对比分析。

#### 2.3.1 桩顶水平荷载的影响

假定桩身刚度和桩侧土体抗力比例系数等参数不变,通过传递矩阵法分别计算水平荷载  $Q_0$  为 100 kN、200 kN 和 300 kN 时桩身水平位移和弯矩,结果见图 6、图 7。

从图 6、图 7 可以看出:桩身水平位移随桩顶水平荷载增加而增大,桩身弯矩随埋深向下呈现先增

图6 不同水平荷载  $Q_0$  下桩身水平位移图8 不同桩身抗弯刚度  $EI$  下桩身水平位移图7 不同水平荷载  $Q_0$  下桩身弯矩图9 不同桩身抗弯刚度  $EI$  下桩身弯矩

大后减小的趋势,且桩身弯矩随桩顶水平荷载增加而显著增大。桩顶水平荷载为 100 kN、200 kN、300 kN 时,桩顶水平位移分别为 12.7 mm、23.6 mm、34.6 mm,桩身最大弯矩分别为 315 kN·m、500 kN·m、690 kN·m,后者与前者相比,桩顶水平荷载每增加 100 kN,对应地面处水平位移分别增加 85.8%、46.6%,桩身最大弯矩分别增加 58.7%、38.0%。不同水平荷载作用下,桩身最大弯矩出现在基桩埋深 3~4 m 位置,即约 2 倍桩径处。可见,桩顶水平荷载对基桩受力变形有较大影响,且水平荷载越大其影响程度越大,相对而言桩身位移对水平荷载变化的敏感程度更大。

### 2.3.2 桩身抗弯刚度的影响

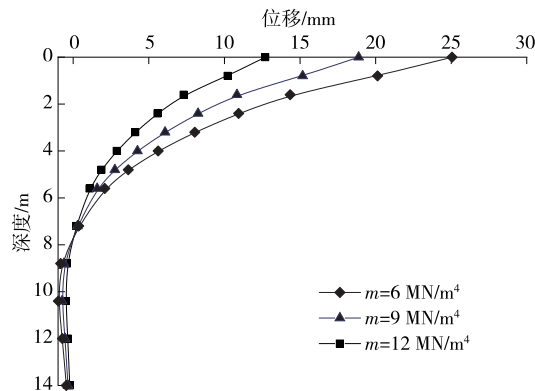
为研究桩身抗弯刚度  $EI$  对桥梁基桩水平承载特性的影响,以桩顶水平荷载为 100 kN、地基水平抗力比例系数为 6 MN/m<sup>4</sup> 为例,计算  $EI$  分别为 300 MN·m<sup>2</sup>、500 MN·m<sup>2</sup>、700 MN·m<sup>2</sup> 时桩身水平位移和弯矩,结果见图 8、图 9。

从图 8、图 9 可以看出:桩身抗弯刚度为 300 MN·m<sup>2</sup>、500 MN·m<sup>2</sup>、700 MN·m<sup>2</sup> 时,桩顶水平位移分别为 17.2 mm、15.0 mm、12.7 mm,桩身最

大弯矩分别为 314.7 kN·m、331.8 kN·m、348.8 kN·m。随桩身抗弯刚度增加,桩身弯矩小幅增加,桩身水平位移稍有减小。表明盲目通过增大桩身抗弯刚度来提高基桩水平承载能力并不能达到较好的效果,反而会增加工程成本。这与文献[16]的结论一致。

### 2.3.3 地基水平抗力比例系数的影响

以桩顶水平荷载为 200 kN、桩身刚度为 300 MN·m<sup>2</sup> 为例,计算不同地基水平抗力比例系数  $m$  下桩身水平位移和弯矩,结果见图 10、图 11。

图10 不同地基水平抗力比例系数  $m$  下桩身水平位移

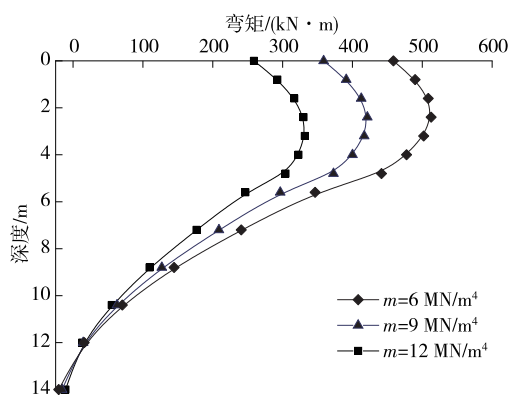


图 11 不同地基水平抗力比例系数  $m$  下桩身弯矩

由图 10、图 11 可知:地基土体水平抗力比例系数  $m$  为  $6 \text{ MN/m}^4$ 、 $9 \text{ MN/m}^4$ 、 $12 \text{ MN/m}^4$  时,桩顶水平位移分别为  $25.1 \text{ mm}$ 、 $18.8 \text{ mm}$ 、 $12.7 \text{ mm}$ ,桩身最大弯矩分别为  $512.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $421.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $338.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。地基土体水平抗力比例系数对桩身水平位移和弯矩的影响较大,这是因为  $m$  值越大,土体越密实,硬度越高,能提供的土抗力越大,在相同水平荷载作用下桩身水平位移和弯矩值越小。在其他条件不变的情况下,提高桩侧地基土体强度,增大地基土体水平抗力系数可有效减小基桩内力和位移,提高基桩水平承载能力。

### 3 结论

本文根据桥梁基桩的水平承载特性,建立桩—土相互作用简化计算模型及桩身挠曲微分方程,基于传递矩阵法推导基桩内力与位移的理论解答,分析水平荷载、桩身抗弯刚度及地基水平抗力比例系数对基桩内力与位移的影响,得到以下主要结论:

(1) 桩身水平位移和弯矩均随桩顶水平荷载增加而显著增大,桩身弯矩随埋深向下呈现先增大后减小的趋势,桩身最大弯矩出现在基桩埋深 2 倍桩径处。

(2) 随桩身抗弯刚度增加桩身弯矩小幅增加,桩身水平位移稍有减小,表明增大桩身抗弯刚度不能明显提高基桩水平承载能力。

(3) 桩身水平位移和弯矩随地基土体水平抗力比例系数增加而减小,增大地基土体水平抗力系数可在一定程度上提高基桩水平承载能力。

### 参考文献:

[1] 芦全喜.城市高架桥梁设计分析[J].中国高新区,2017(16):190.

[2] 肖志祥,吴定俊,贾允祥.轨道交通高架桥梁设计的若干特点[J].城市轨道交通研究,2005,8(1):28—31.

[3] 苟栋元,何卫锋,王洋.震后液化侧流场地桥梁桩基受力特性研究[J].公路与汽运,2019(5):118—120.

[4] 荣雪宁,徐日庆,冯苏阳,等.基于拉格朗日乘数法的大弯矩水平受荷桩研究[J].岩土力学,2017,38(9):2605—2612.

[5] 赵明华,尹平保,杨明辉,等.高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础模型试验[J].中国公路学报,2013,26(4):57—63.

[6] 张浩,石名磊,郭院成,等.边载作用下桥梁基桩—立柱的位移特征与受力分析[J].岩土力学,2017,38(9):2683—2692.

[7] SAWANT V A, SHUKLA S K. Three-dimensional finite element analysis of laterally loaded piles in sloping ground [J]. Indian Geotechnical Journal, 2012, 42(4): 278—286.

[8] 赵海鹏,黎学优,万建宏,等.基于高性能有限单元法的多层地基水平受荷桩受力分析[J].岩土力学,2021,42(7):1995—2003.

[9] 胡文韬,刘豆,耿大新,等.水平受荷阶梯形变截面桩的内力及变形分析[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(4):739—747.

[10] 邢康宇,陆洪智,陈耀春,等.成层土中轴横受荷桩水平响应的非线性解[J].地质科技通报,2021,40(1):166—174.

[11] 张玲,赵明华,赵衡.倾斜荷载下桩柱式桥墩受力变形分析传递矩阵法[J].中国公路学报,2015,28(2):69—76.

[12] ZHANG L, ZHAO M H, ZOU X J. Behavior of laterally loaded piles in multilayered soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2015, 15(2): 06014017.

[13] 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:JTG 3363—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

[14] 中国建筑科学研究院.建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[15] BRITO W K F, MAIA C D C D, MENDONÇA A V. Bending analysis of elastically connected Euler-Bernoulli double-beam system using the direct boundary element method [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 74: 387—408.

[16] 张建伟,刘汉龙,戴自航.分布荷载推力桩计算的  $p-y$  曲线法研究[J].岩土力学,2008,29(12):3370—3374.