

刚性根式基础水平承载性能分析¹⁾

胡 丰* 龚维明^{*,2)} 殷永高[†] 童小东* 单 建*

^{*}(东南大学土木学院, 南京 210096) [†](安徽省高速公路总公司, 合肥 230051)

摘要 根据 Winkler 地基梁理论, 分析根式基础及根键水平受力特性, 并建立计算模型. 利用载荷传递法推导根式基础弹性解答, 计算其水平向承载性能, 获得井身位移、弯矩、剪力和土反力随深度的分布规律. 结果表明, 根式基础承载性能优于沉井基础, 可使顶部水平位移减少 35%~45%, 承载力提高 45%~55%. 载荷传递法结果在弹性范围内与试验数据接近, 故可用于工程计算.

关键词 根式基础, 水平载荷, 承载性能, Winkler 地基梁, 载荷传递法

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)05-067-05

ANALYSIS OF LATERAL BEARING CAPACITY OF RIGID ROOT-FOUNDATION¹⁾

HU Feng* GONG Weiming^{*,2)} YIN Yonggao[†] TONG Xiaodong* SHAN Jian*

^{*}(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[†](Expressway Corporation of Anhui Province, Hefei 230051, China)

Abstract Based on the Winkler beam theory, the working mechanism and the bearing capacity of a lateral-loaded root-foundation are investigated, with a model of calculation. The elastic solution of the lateral-loaded root-foundation is obtained by using the load transfer method. The lateral bearing capacity is calculated, and the distributions of the lateral displacement, flexural moment, shear force and soil resistance of the root-foundation are obtained. The results show that the lateral bearing capacity of the root-foundation is better than the traditional caisson foundation, with the top lateral displacement being reduced by 35%~45% and the lateral bearing capacity being increased by 45%~55%. The calculated results are in good agreement with the test results in the elastic range, therefore, the load transfer method can be applied in the engineering calculation of root-foundations.

Key words root-foundation, lateral load, bearing capacity, Winkler foundation beam, load transfer method

引 言

根式基础^[1]由沉井基础发展而来, 是一种新型的变截面基础形式, 通过与井壁固结的根键来增加基础与土的接触面积, 以提高基础的整体承载能力. 根键是具有一定长度的预制钢筋混凝土结构, 抗弯能力强、强度高、不易破坏. 其受力机理与地基梁相似, 根键能有效发挥周围土体的法向承载力及侧向摩擦阻力, 并大幅提升原沉井基础的承载性能^[2].

根式基础在桥梁工程中可作为桥墩基础及锚碇

基础等. 在使用时, 这些基础形式都将承受一定的水平载荷, 例如船碰力、波浪力、锚索拉力等. 目前, 对沉井水平承载性能的理论研究已较深入^[3], 但有关根式基础的研究尚未开展. 有限元法或有限差分法等数值计算方法虽用来计算根式基础的承载力, 但根式基础结构复杂, 建模困难, 计算中还要涉及土体计算, 计算量大, 故亟需一套简便有效的理论方法来准确预估根式基础的水平承载性能, 为设计提供依据.

2008-09-22 收到第 1 稿, 2010-06-23 收到修改稿.

1) 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2008314).

2) 龚维明, 教授, 主要从事桩基础的研究. E-mail: wmgong@seu.edu.cn

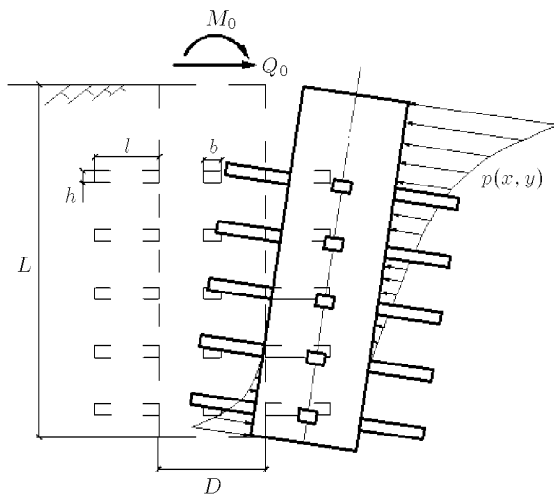
根据水平承载桩 m 法^[4-6], 假设地基反力系数与深度呈线性, 将根键简化为 Winkler 地基梁构件, 可推导出根式基础水平承载性能的矩阵计算方程, 其中根键上的土反力作为等效节点力附加在含根键的井壁节点上. 对埋深浅、直径大的根式基础, 可将井体的抗弯刚度近似为无穷大, 使计算简便.

本文以安徽淮河公路大桥工程中淮南试验根式基础为算例, 对比了理论计算值、现场实测值以及数值计算值三者的结果, 以验证本文计算方法的准确性.

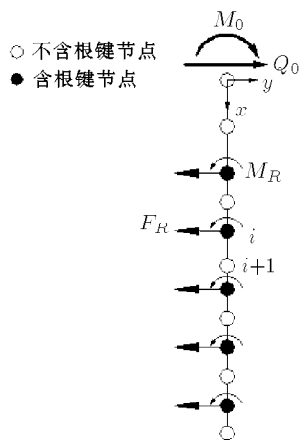
1 理论推导

1.1 井壁载荷传递关系

当根式基础顶部作用水平载荷 Q_0 或力矩 M_0 时, 如图 1(a) 所示, 基础发生平动和转动, 周围土体产生土反力. 假设沿深度方向单位面积的土反力



(a) 受力分析



(b) 简化形式

图 1 水平载荷作用下根式基础受力分析

为 $p(x, y)$, 则根式基础的位移方程可表达为^[7]

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + b_0 p(x, y) = 0 \tag{1}$$

式中, EI 为基础井壁抗弯刚度, b_0 为井壁的计算宽度. 可用下式计算^[4]

$$b_0 = 0.9(D + 1) \tag{2}$$

式中 D 为根式基础中沉井的直径.

根据 Winkler 弹性地基梁理论^[8-9], 弹性范围内, 井壁单位面积的土反力 p 与位移 y 成正比, 土反力系数 k 是深度 x 和位移 y 的函数, 即

$$p(x, y) = k(x, y)y \tag{3}$$

若假设土反力系数 k 仅随土体深度线性增加 (m 法), 则式 (1) 变为

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + b_0 m x y = 0 \tag{4}$$

式中, m 为比例系数.

将根式基础离散成图 1(b) 所示的节点形式, 采用载荷传递法计算式 (1). 文献 [3-4] 给出了式 (1) 的级数解答, 若不考虑井壁弯曲, 即 $EI \rightarrow \infty$, 则首节点 i 到下一节点 $i + 1$ 的传递关系为

$$\begin{Bmatrix} y_{i+1} \\ \theta_{i+1} \\ M_{i+1} \\ Q_{i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{i+1} - x_i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_1 & B_1 & 1 & x_{i+1} - x_i \\ A_2 & B_2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ Q_i \end{Bmatrix} \tag{5}$$

式中

$$A_1 = -\frac{b_0 m (x_{i+1} - x_i)^3}{6}, \quad B_1 = -\frac{b_0 m (x_{i+1} - x_i)^4}{12}$$

$$A_2 = -\frac{b_0 m (x_{i+1} - x_i)^2}{2}, \quad B_2 = -\frac{b_0 m (x_{i+1} - x_i)^3}{3}$$

若 $i + 1$ 节点为含根键节点, 则还需在式 (4) 中叠加土体对根键的反力 F_R 和弯矩 M_R , 弹性范围下根键的土反力和弯矩分别与位移和转角成线性

$$F_R = \sum_{i=1}^n F_{Ri} = k_u y, \quad M_R = \sum_{i=1}^n M_{Ri} = k_\theta \theta$$

式中, n 为此层根键个数, k_u, k_θ 分别为根键产生的位移与转动刚度.

叠加后, 传递方程 (5) 变为

$$\begin{Bmatrix} y_{i+1} \\ \theta_{i+1} \\ M_{i+1} \\ Q_{i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{i+1} - x_i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_1 & B_1 - k_\theta & 1 & x_{i+1} - x_i \\ A_2 - k_u & B_2 - k_u(x_{i+1} - x_i) & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ Q_i \end{Bmatrix}$$

1.2 根键受力分析

根式基础的平动和转动对根键产生不同的反力模式，忽略二者耦合效应的影响，可单独计算各自根键土反力，最后再将二者之和叠加到井壁相应节点上。抗弯刚度大的根键可简化为刚体，不考虑根键的弯曲作用。

1.2.1 平动分析

基础整体平动时，在根键表面产生法向土反力 σ_N 和切向土反力 τ_N ，如图 2 所示。弹性情况下，与 y 轴成 φ 角的根键所受到的土反力合力 F_R 可表达为

$$F_R = hl \sin^2 \varphi K_0 k_n y + hl \cos^2 \varphi K_0 k_s y + bh \cos^2 \varphi K_0 k_n y - bh \sin \varphi K_0 k_s y + 2bl k_s y$$

式中， l, b, h 分别为根键的长度、宽度和高度， k_n 为土法向刚度， k_s 为土切向刚度， K_0 为土侧压系

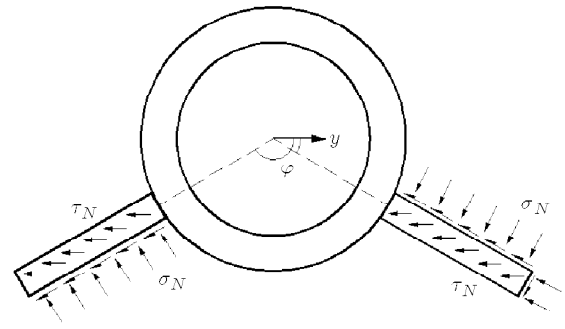


图 2 平动受力分析

数。

1.2.2 转动分析

根键与井壁固结，并随基础一同转动，根键上产生的上反力对基础横截面形成弯矩，如图 3 所示。弯矩含法向土反力产生的弯矩 σ_M 和切向土反力产生的弯矩 τ_M 。

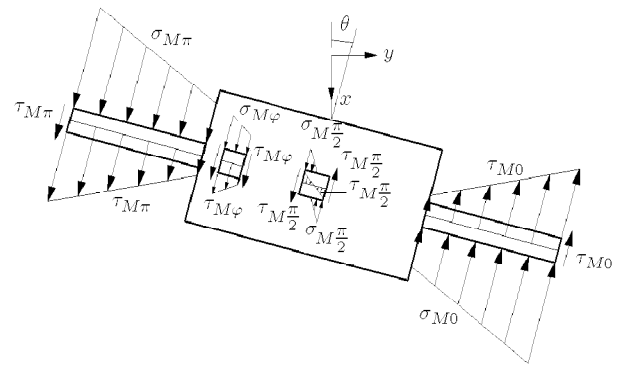


图 3 转动受力分析

根式基础转动 θ 角时，与 y 轴成 φ 角的根键产生的反力弯矩为

$$\begin{aligned} M_R(\varphi) = & \int_0^{-b \cos \varphi} \int_{s \tan \varphi}^{-s \cot \varphi} k_n \theta \left[-\left(\frac{D}{2} + \frac{b}{2} \cot \varphi\right) \cos \varphi + \frac{b}{2 \sin \varphi} + t \right]^2 dt ds + \\ & \int_0^{l \sin \varphi} \int_{-s \cot \varphi - \frac{b}{\sin \varphi}}^{-s \cot \varphi} k_n \theta \left[-\left(\frac{D}{2} - \frac{b}{2} \cot \varphi\right) \cos \varphi + \frac{b}{2 \sin \varphi} + t \right]^2 dt ds + \\ & \int_0^{-b \cos \varphi} \int_{-s \cot \varphi}^{s \tan \varphi - \frac{b}{\sin \varphi}} k_n \theta \left[-\left(\frac{D}{2} + l - \frac{b}{2} \cot \varphi\right) \cos \varphi - \frac{b}{2 \sin \varphi} + t \right]^2 dt ds + \\ & \int_0^l h K_0 k_s \theta \left[-\left(\frac{D}{2} - \frac{b}{2} \cot \varphi\right) \cos \varphi - \frac{b}{2 \sin \varphi} - t \cos \varphi \right]^2 dt + \\ & \int_0^l h K_0 k_s \theta \left[-\left(\frac{D}{2} + \frac{b}{2} \cot \varphi\right) \cos \varphi + \frac{b}{2 \sin \varphi} - t \cos \varphi \right]^2 dt + \\ & \int_0^b h K_0 k_s \theta \left[-\left(\frac{D}{2} + l - \frac{b}{2} \cot \varphi\right) \cos \varphi - \frac{b}{2 \sin \varphi} + \frac{t}{\sin \varphi} \right]^2 dt \end{aligned}$$

2 算例分析

为验证本文计算方法的正确性, 特对安徽淮河公路大桥工程中现场试验根式基础进行验算, 试验地区覆盖层以黏土为主. 该试验基础入土深度为 12m, 主体采用外径 5m 的空心钢筋混凝土沉井, 壁厚为 0.4m, 封底厚 1m, 上下共布置 10 层根键, 每层间距 1m, 根键等角度交错布置, 每层 6 根, 长 1.85m、宽 0.35m 和厚 0.3m.

计算参数从原位试验中获得^[2], 在井身钢筋上和根键表面布置了钢筋计(应变计), 用来测量摩阻力、端阻力、根键水平抗力与位移的变化关系, 根据曲线斜率可以导出土体法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s . 由于基础埋深浅, 测得不同深度的根键对应的土体刚度系数基本一致, 土体法向刚度 k_n 为 40MPa/m³, 切向刚度 k_s 为 4MPa/m³, 侧压系数 K_0 为 0.33, m 值为 5.76MN/m⁴.

试验分别测得压入根键前后, 各级载荷下基础顶部位移值. 本文还采用 Flac3D 软件对根式基础进行数值计算. 实测值与计算值的比较见表 1.

表 1 计算值与实测值比较

		无根键		
加载级数	顶部载荷 /kN	顶部水平位移 /mm		
		实测值	数值计算值	本文理论值
0	0	0.00	0.00	0.00
1	2000	7.98	8.05	8.04
2	3000	12.87	12.83	12.06
3	4000	25.34	27.30	16.08

		有根键		
加载级数	顶部载荷 /kN	顶部水平位移 /mm		
		实测值	数值计算值	本文理论值
0	0	0.00	0.00	0.00
1	2400	5.89	5.71	6.01
2	3600	9.62	8.91	9.01
3	4800	15.12	13.00	12.02

从表 1 可知, 小位移情况下, 本文计算结果与实测值及数值计算值接近, 说明本文的理论方法可满足一般的工程计算需要, 但超过弹性范围时, 本文的结果误差较大, 需作非线性分析.

相同载荷下, 根式基础较沉井基础(无根键)顶部水平位移可减少 35%~45%; 相同位移下, 水平承载力提高 45%~55%.

各级载荷下, 根式基础井身位移、弯矩、剪力和土反力随深度分布曲线分别如图 4~ 图 7 所示, 可知弯矩、剪力和土反力曲线存在反弯点, 随载荷增加, 井身位移、弯矩、剪力和土反力都将增大. 图 5

和图 6 中曲线在含根键节点上出现拐点, 表明根键分担了部分外载荷.

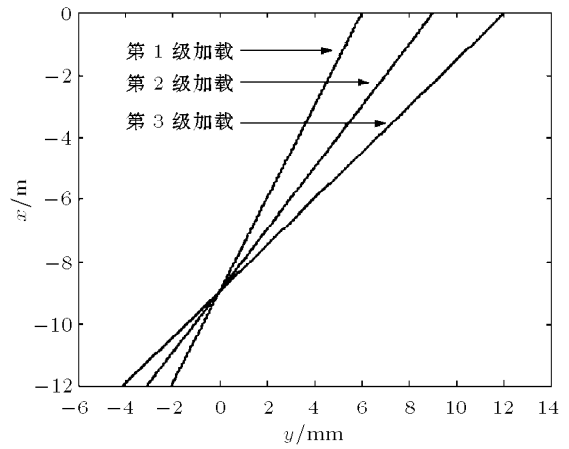


图 4 各级载荷根式基础井身水平位移曲线

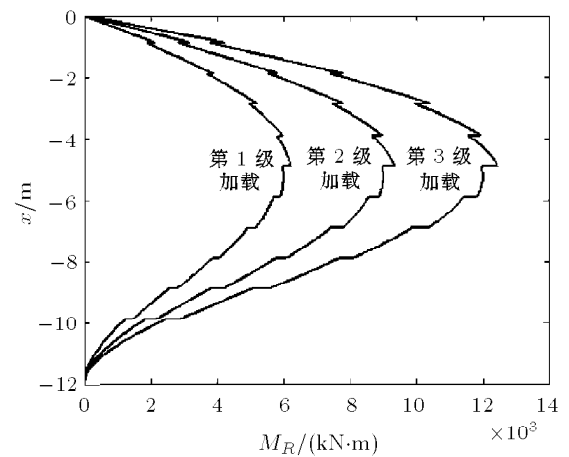


图 5 各级载荷根式基础井身弯矩曲线

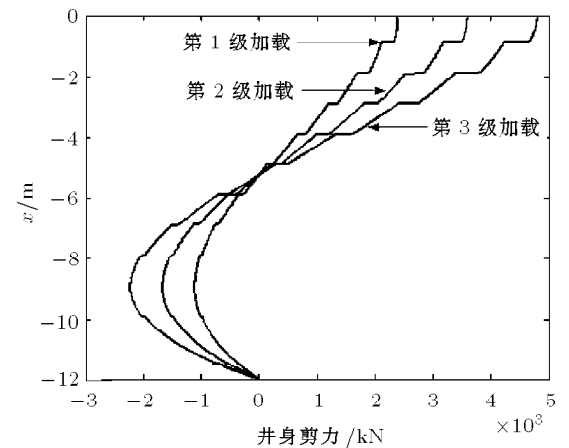


图 6 各级载荷根式基础井身剪力曲线

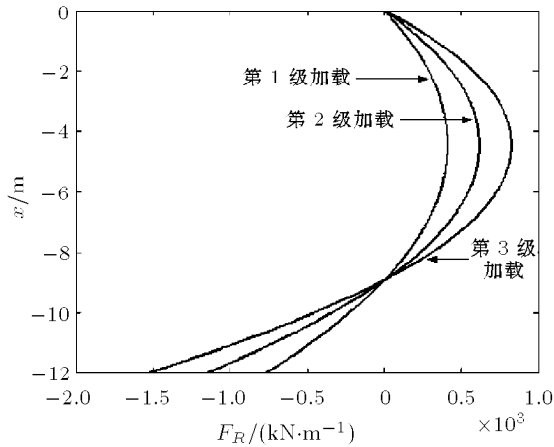


图 7 各级载荷根式基础井身土反力曲线

3 结 论

(1) 利用 Winkler 地基梁理论, 对受水平载荷的根式基础的承载性能进行理论研究. 将根键的运动分解为平动和转动, 分别求出各运动形式下根键的土反力, 并作为附加节点力叠加到含根键的基础节点上. 假设地基反力系数与深度成正比, 利用传递矩阵, 推导出根式基础水平承载性能的弹性解答. 位移计算值与实测值、数值计算值在弹性范围内接近, 说明本文的算法可满足工程需要.

(2) 比较了各级横向载荷下, 不含根键(沉井基础)和含根键(根式基础)的顶部位移实测值、数值计算值和本文理论值, 可知相同载荷下, 根式基础较沉井基础(无根键)顶部水平位移可减少 35%~45%; 相同位移下, 水平方向承载力提高 45%~55%. 说明根式基础承载性能明显优于沉井基础, 故可将根式基础作为新的基础形式应用在工程实际中.

(3) 给出了各级水平载荷下, 根式基础井身位移、弯矩、剪力和土反力随深度的分布曲线. 井身位移、弯矩、剪力和土反力随载荷的增大将增大, 弯矩、剪力和土反力曲线存在反弯点. 因根键为沉井分担了部分外载荷, 故弯矩和剪力曲线在含根键节点上出现拐点.

(4) 当外载荷超过弹性极限时, 本文理论解与实

测值、数值计算值误差较大, 说明在大位移情况下, 需对根式基础进行非线性分析.

(5) 本文没有考虑根键之间类似于群桩效应的相互折减影响, 这会影响到计算结果的准确性, 而关于折减系数的确定, 还需由今后详尽的试验给出.

参 考 文 献

- 1 殷永高. 根式基础及根式锚碇方案构思. 公路, 2007, (2): 46-49 (Yin Yonggao. Scheme conception of root foundation and anchor block. *Highway*, 2007, (2): 46-49 (in Chinese))
- 2 龚维明, 胡丰, 童小东等. 根式基础竖向承载性能的试验研究. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1789-1795. (Gong Weiming, Hu Feng, Tong Xiaodong, et al. Experimental study on vertical bearing capacity of root foundation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(12): 1789-1795 (in Chinese))
- 3 Gerolymos N, Gazetas G. Winkler model for lateral response of rigid caisson foundations in linear soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(5): 347-361
- 4 韩建安. 水平承载桩的计算. 长沙: 中南大学出版社, 2004 (Han Lian. Calculation of Lateral Pile. Changsha: Central South University Press, 2004 (in Chinese))
- 5 王伯惠, 上官兴. 中国钻孔灌注桩新发展. 北京: 人民交通出版社, 1999 (Wang Bohui, Shang Guanxing. New Development of Bored Piles in China. Beijing: The People's Communications Press, 1999 (in Chinese))
- 6 刘金砺. 桩基础设计与计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990 (Liu Jinli. Design and Calculation of Pile Foundations. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990 (in Chinese))
- 7 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例. 唐业清, 吴庆荪译. 北京: 中国铁道出版社, 1984 (Yokoyama Y. Solution and Example of Pile Foundation. Tang Yeqing, Wu Qingsun, Translated. Beijing: China Railway Publishing House, 1984 (in Chinese))
- 8 黄义, 何芳杜. 弹性地基上的梁、板、壳. 北京: 科学出版社, 2005 (Huang Yi, He Fangdu. Beam, Plane and Shell on Elastic Foundation. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese))
- 9 Selvadurai APS. Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction. Netherlands. Elsevier, 1979
- 10 Bowles JE. Foundation Analysis and Design. New York: McGraw-Hill, 1977
- 11 Poulos HG, Davis EH. Pile Foundation Analysis and Design. New York: Wiley, 1980

(责任编辑: 陶彩军)