

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.007



水平荷载作用下斜坡刚性桩非线性分析

陈兆¹, 陈骅伟¹, 蒋冲², 刘霖², 沙策², 瞿学迁²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院, 长沙 410008, 2. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要:在综合分析现有水平荷载作用下桩基分析方法的基础上,建立了考虑桩侧土体受力状态的斜坡刚性桩力学模型;根据极限平衡原理,建立横向荷载作用下斜坡刚性桩弯矩和应力平衡方程;引入考虑斜坡影响的 $p-y$ 曲线方法,提出了综合考虑桩侧土体极限承载力与水平抗力系数沿深度呈线性增加的侧向极限承载力与土体抗力承载力系数计算方法,同时,将该方法应用于计算实例,通过与已有有限元和理论计算方法对比分析,计算结果验证了本文方法的合理性与可行性;并利用该方法,分析了斜坡坡角、桩土接触面系数以及地基水平抗力系数对斜坡刚性桩承载特性的影响因素。分析表明:斜坡的坡角、桩土接触面系数对侧向荷载作用下斜坡刚性桩的荷载位移曲线影响明显,而桩侧土的抗力系数对侧向荷载作用下斜坡刚性桩的荷载位移曲线影响不明显。

关键词:斜坡;桩;水平荷载;黏土

中图分类号: TU476.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)03-0047-06

Nonlinear analysis of rigid pile in slope under lateral load

Chen Zhao¹, Chen Huawei¹, Jiang Chong², Liu Lin², Sha Ce², Qu Xueqian²

(1. Hunan provincial communications planning survey & design institute, Changsha 410008, P. R. China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China)

Abstract: The current analysis method of pile foundation under horizontal load are analyzed comprehensively. First, mechanics model of rigid pile in slope considering pile lateral stress is established. Second, according to the principle of limit equilibrium, the bending moment and stress equilibrium equation of rigid pile in slope under lateral load are proposed. Then the pile lateral ultimate bearing capacity and horizontal resistance coefficient along the depth increasing linear are developed using $p-y$ curve method. The proposed method is applied in the case study, and the results verified the rationality and feasibility of this method by comparative analysis with the existing finite element calculation methods. Finally, the method is used to perform a series of parametric analyses, such as angle of slope, pile soil contact surface coefficient and horizontal resistance coefficient, and some significant conclusions are drawn. The slope

收稿日期: 2015-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(51478479); 湖南省自然科学基金(14JJ4003); 中南大学“创新驱动计划”(2015CX005); 湖南省交通科技项目(201524)

作者简介: 陈兆(1982-), 男, 主要从事隧道与地下工程设计与研究, (E-mail) 94641293@qq.com。

Received: 2015-11-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51478479); Hunan Province Natural Science Foundation (No. 14JJ4003); Innovation Driven Plan of Central South University (No. 2015CX005); Hunan Province Transportation Science and Technology Project (No. 201524)

Author brief: Chen Zhao (1982-), main research interests: tunnel engineering and underground engineering, (E-mail) 94641293@qq.com.

Angle, contact surface coefficient of pile and soil has significant impact on the load displacement curve of rigid pile, and the resistance coefficient of pile side soil impact load displacement curve of is not obvious under the action of the lateral load.

Keywords: sloping ground; pile; lateral load; clay

水平受荷桩广泛应用于高层建筑、桥梁、海岸码头、海洋采油平台以及海上风电场等各种结构工程中,学者们对此进行了大量的研究。文献[1-3]从理论上进行了黏土中横向荷载桩的 $p-y$ 曲线分析,李卫超等[4]通过砂土中两组水平受荷刚桩试验结果,基于 API 的 $p-y$ 模型,对砂土中刚性短桩的 $p-y$ 模型案例进行了研究,刘红军等[5]对饱和粉土地基中进行了单桩水平静力和循环加载室内模型试验,刘严超等[6]开展了近海大直径单桩基础在水平荷载作用下的三维有限元数值分析;梁发云等[7]开展了水平和竖向荷载的桩基分析,朱斌等[8]、王富强等[9]进行了水平受荷桩的离心模型试验研究。国外对水平荷载桩的计算也进行了大量的研究,提出了很多经验和数值分析方法,Brinch-Hansen[10]和 Broms[11]的经验方法,Matlock[12]和 Reese[13]的荷载位移曲线法及 Brown 等[14]、Jeremic 等[15]、Georgiadis 等[16]的弹性有限元法。Zhang 等[17]研究了刚性桩在黏土中的承载特性,视桩基为弹性地基,桩周土体简化为系列独立的弹簧,此方法的优点主要是能考虑桩土体系的非线性。综合上述研究发现,现有方法主要考虑地面上的水平受荷载桩的分析,很少有考虑斜坡上的水平荷载桩的分析,然而,工程实际中水平荷载桩也常常被埋入在斜坡地基上。因此,斜坡地基上水平荷载分析方法应该反映斜坡的影响,这正是本文研究的目的。

为此,在综合分析斜坡桩基水平受荷特点的基础上,引入极限平衡原理和 $p-y$ 曲线方法,综合考虑桩侧土体极限承载力与水平抗力系数沿深度呈线性增加特性,建立考虑斜坡影响的黏土中刚性桩水平受荷非线性理论分析方法,以期使斜坡水平荷载桩非线性分析方法更趋合理。

1 模型建立

1.1 基本假设

如图 1 所示,桩完全埋入在黏土中即完成埋入桩, H 为桩顶水平荷载, L 为桩长, D 为桩径。为了便于本文方法的建立,现作如下基本假设:

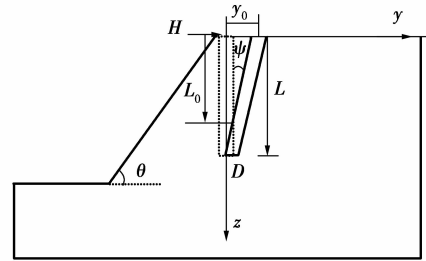


图 1 问题定义

Fig. 1 The problem definition

- 1) 桩为完全刚性,在荷载作用下,桩沿桩身某点转动;
- 2) 斜坡土体为粘性土,计算中不考虑排水;
- 3) 假定土坡是稳定的,计算中不考虑坡体破坏与失稳。

1.2 受力分析

本文所研究的横向荷载作用下斜坡刚性桩在黏土中的受力情况,如图 2 所示。

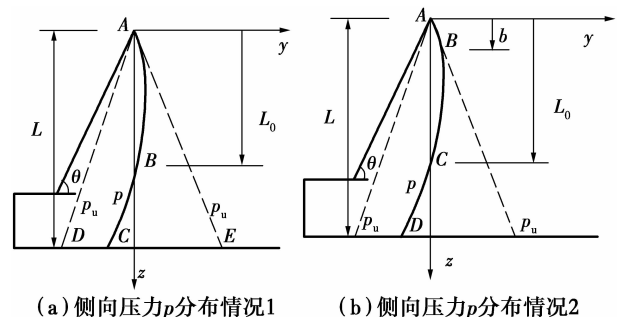


图 2 桩侧土受力模型

Fig. 2 Pile lateral soil stress model

第 1 种情况是横向荷载作用下桩基两侧土体抗力均未到达土的极限抗力 p_u ,如图 2(a)所示,曲线 ABC 为桩侧土压力 p ,直线 AD 和直线 AE 为极限抗力 p_u ;第 2 种情况如图 2(b)所示,在顶面下一定深度 b ,桩侧土压力 p 到达了土的极限抗力 p_u ,然后,沿深度方向均未达到土的极限承载力 p_u 。第 3 中情况是有可能在桩的地面处,桩侧土压力 p 到达了土的极限承载力 p_u 。这里重点分析下第 1 和第 2 种情况,第 3 种情况另文讨论。

根据图 2(a),可以推导出

$$y = \frac{(L_0 - z)y_0}{L_0} \quad (1)$$

$$p = k_h y = \frac{ny_0(L_0 - z)z}{L_0} \quad (0 \leq z \leq L) \quad (2)$$

$$M + \frac{ny_0 L^2}{L_0} \left[\frac{L_0}{3} - \frac{L}{4} \right] = 0 \quad (3)$$

$$H - \frac{ny_0 L^2}{L_0} \left[\frac{L_0}{2} - \frac{L}{3} \right] = 0 \quad (4)$$

由于以上表达式中只有两个变量 y_0 和 L_0 , 通过式(1)~(4), 可以计算出水平荷载作用下沿桩身桩的位移、弯矩及剪力。

图 2(b)中曲线 ABCD 为桩侧土压力 p , 由图可知, 在 B 点, 桩侧土压力达到了极限土抗力 p_u 。

$$p = p_u = mz \quad (0 \leq z \leq b) \quad (5)$$

$$p = k_h y = \frac{ny_0(L_0 - z)z}{L_0} \quad (b \leq z \leq L) \quad (6)$$

由于当 $z=b$ 时, $p_u = k_h y$, 从而得出 L_0 和 b 之间关系为

$$b = L_0 \left(1 - \frac{m}{ny_0} \right) \quad (7)$$

考虑到 A 点水平向力、弯矩均平衡可得

$$H - \frac{1}{2}mb^2 + \frac{ny_0}{L_0} \left[\frac{L_0}{2}(b^2 - L^2) - \frac{1}{3}(b^3 - L^3) \right] = 0 \quad (8)$$

$$M + \frac{1}{3}mb^3 + \frac{ny_0}{L_0} \left[\frac{L_0}{3}(b^3 - L^3) - \frac{1}{4}(b^4 - L^4) \right] = 0 \quad (9)$$

式(5)、(6)、(7)、(8)、(9)只有参数 p_u 、 k_h 、 y_0 、 L_0 和 b 是未知, 联立方法即可计算水平荷载和弯矩作用下 y_0 、 L_0 、 b 以及桩身弯矩和剪力。建立了不同荷载情况下的水平荷载和弯矩方程以后, 下一步将需要解决如何计算桩侧土极限抗力与地基抗力系数。

2 参数确定

2.1 桩侧土极限抗力 p_u

对于粘性土桩侧极限土抗力已有很多学者进行了大量的研究, 提出了很多计算方法, 本文的重点在于讨论黏性土情况, 因此, 继续引入传统的 $p-y$ 曲线思想, 即荷载位移曲线法如图 3 所示, p 表示桩侧土水平抗力, y 表示桩侧土水平位移, p_u 为土的极限抗力, K_h 为桩侧土的水平抗力系数。

对于粘性土坡, 桩侧极限土抗力与平地黏土中

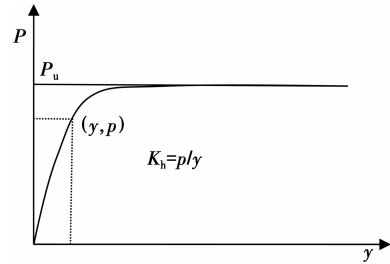


图 3 桩-土荷载位移曲线

Fig. 3 Load displacement curve of pile-soil

桩基不同, 为了考虑土坡的效应, 引入 Georgiadis 等^[16]提出的计算方法。

$$p_u = N_p c_u D \quad (10)$$

式中: N_p 为侧向荷载下土抗力承载力系数; c_u 为土的不排水抗剪强度, 其中侧向荷载下土抗力承载力系数 N_p 为

$$N_p = N_{pu} - (N_{pu} - N_{p0} \cos \theta) e^{-\lambda(z/D)/(1+\tan \theta)} \quad (11)$$

式中: $N_{p0} = 2 + 1.5\alpha$; $\lambda = 0.55 - 0.15\alpha$; $N_{pu} = \pi + 2\Delta + 2\cos \Delta + 4 \left(\cos \frac{\Delta}{2} + \sin \frac{\Delta}{2} \right)$; $\Delta = \sin^{-1} \alpha$, α 为桩土界面粘结系数, 定义为桩土表面极限剪应力与不排水抗剪强度之比; N_{p0} 为地表水平是地表面极限承载力系数; λ 为无量纲系数; N_{pu} 为极限承载力因素。

2.2 地基抗力系数 K_{h0}

对于桩侧土的极限抗力的计算, 如何确定地基的水平抗力系数 k_h , 一直是研究者关心和讨论的重点, 众多学者认为, 水平抗力系数 k_h 随着深度的增加而成线性增加, 如图 4 所示。

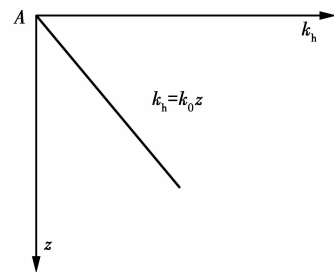


图 4 k_h 随着深度的变化关系

Fig. 4 Relationship of k_h with the change of depth

Georgiadis 等^[16,18]为了研究黏土坡度 θ 对 k_h 的影响, 进行了系列的线弹性有限元分析, 分别考虑了桩长 L 为 12 m 和 20 m, 桩径 D 为 0.5 m 和 1 m, 坡角为 0° 、 20° 、 30° 和 40° , 土的弹性模量 E 为 10、20 和 30 MPa, 通过计算和研究提出计算式(12)。引入式

(12)和(13)进行计算和分析。

$$K_{h\theta} = K_h \left[\cos \theta + \frac{\alpha}{6D} (1 - \cos \theta) \right] \quad (12)$$

式中: $K_{h\theta}$ 为考虑坡度效应的地基抗力系数,可用式(13)计算。

$$K_h = 3E_{50} \left(\frac{E_{50} D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \quad (13)$$

3 验证分析

为了验证提出的理论方法的正确性,引入已有斜坡粘土桩 3D 有限元结果和平地桩理论分析结果进行对比分析。图 5 为本文方法与 3D 有限元方法^[16]及 Zhang 等^[17]提出的理论方法的水平荷载 H

与桩顶水平位移 y_0 对比分析结果,其中,图 5(a)表示的是桩长 $L=3$ m,桩径 $D=1$ m,土的抗剪强度 $c_u=150$ kPa,土的弹性模量与抗剪强度之比 $E_s/c_u=400$,图 5(b)表示的是桩长 $L=5, 10, 20$ m,桩径 $D=1$ m,土的抗剪强度 $c_u=70$ kPa,土的弹性模量与抗剪强度之比 $E_s/c_u=250$, θ 为 20° 和 40° 。由图 5 可以看出,本文方法与已有计算方法结果吻合较好,表明了该方法的正确性,尤其当 y_0 小于 80 mm 的情况下,计算结果介于 3D 有限元方法及张等^[17]提出的理论方法之间,但当 y_0 大于 80 mm 时,本文方法计算结果小于 3D 有限元方法与张提出的理论方法。

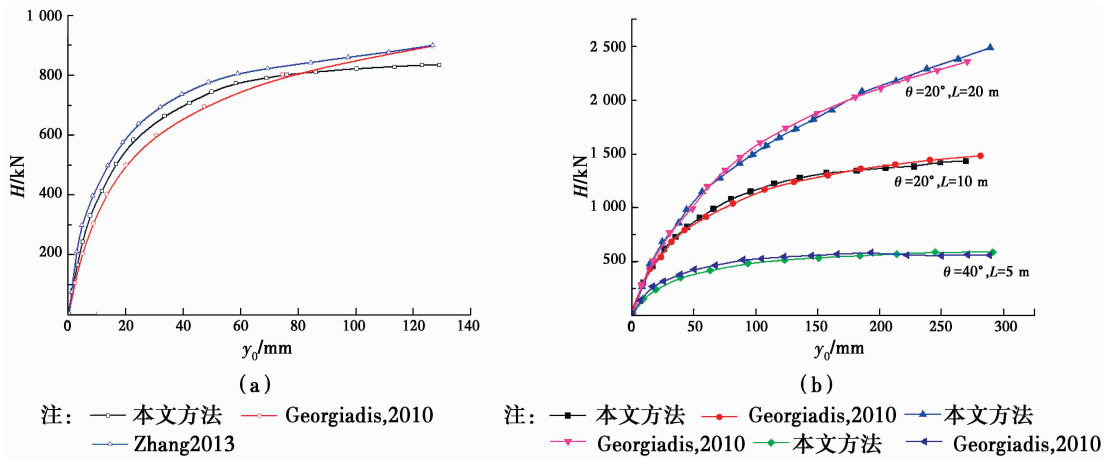


图 5 水平荷载 H 与桩顶水平位移 y_0 验证分析

Fig. 5 Relationship of level load H with pile top displacement y_0

4 参数影响因素分析

为了便于参数分析,编制了 Matlab 7.0 计算程序,如不特殊说明,计算参数取值为:斜坡坡角 θ 为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 和 45° 五种情况, $D=1$ m, $c_u=80$ kPa, $E_{50}=14$ MPa, $E_p=23.38$ MPa, $I_p=2.9 \times 10^4$ MPa, $\alpha=0, 0.3, 0.5, 0.7$ 和 $1, L=5, 12$ 和 20 m。

4.1 斜坡坡角 θ

图 6 分析了桩长等于 5 m,土坡坡角 θ 为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 和 45° 五种情况下,水平荷载 H 及水平位移 y_0 关系曲线。由图 6 可以看出,随着桩顶水平荷载的增加,桩顶水平位移也在增加,在相同的水平荷载作用下,随着坡角的增大,水平位移也随着变大。在相同的水平位移条件下, $\theta=0^\circ$ 时承受水平荷载 H 最大,而 $\theta=45^\circ$ 时承受水平荷载 H 最小。

图 7 分析了桩长等于 20 m,土坡坡角 θ 为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 和 45° 五种情况下,水平荷载 H 与桩身

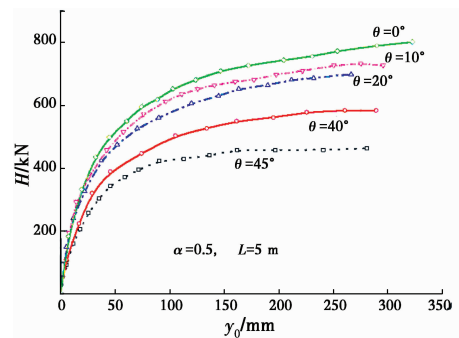


图 6 土坡坡角 θ 、水平荷载 H 及水平位移 y_0 关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of Soil slope Angle θ , horizontal loading H and displacement y_0

最大弯矩 M_{\max} 关系曲线。由图 7 可得,随着桩顶水平荷载的增加,桩身最大弯矩 M_{\max} 也在增加,在相同的水平荷载作用下,随着坡角的增大,水平位移也随着变大。在相同的桩身最大弯矩 M_{\max} 条件下, $\theta=0^\circ$ 时承受的水平荷载 H 最大,而 $\theta=45^\circ$ 时承受

的水平荷载 H 最小。

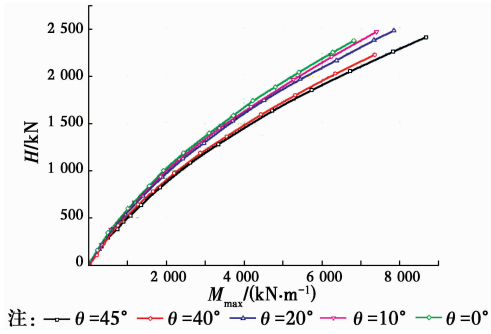


图 7 土坡坡角 θ 、水平荷载 H 及桩身最大弯矩 M_{\max} 关系曲线

Fig. 7 Relationship curve of Soil slope Angle θ , horizontal loading H and maximum bending moment of pile M_{\max}

4.2 桩土接触面系数 α

为了研究桩土接触面系数 α 对桩顶水平位移 y_0 和荷载 H 的影响且便于计算,取桩长为 $L=12\text{ m}$, 桩径 $D=1\text{ m}$, $\theta=0^\circ$ 的情况下,通过计算得桩土接触面系数 α 与水平荷载 H 及水平位移 y_0 关系曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,在相同桩顶水平情况下,随着桩土接触面系数 α 的增大,桩顶承受水平荷载增大,当 y_0 大于 100 mm 以后,桩土接触面系数 α 影响更为明显。

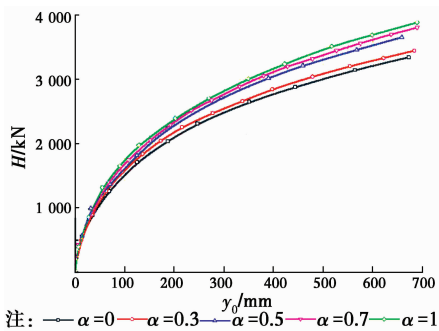


图 8 桩土接触面系数 α 与水平荷载 H 及位移 y_0 关系曲线

Fig. 8 Relationship of coefficient of pile soil contact surface α , horizontal loading H and displacement y_0

4.3 地基抗力系数 K_{h0}

为了研究地基抗力系数 K_{h0} 对桩顶水平位移 y_0 和荷载 H 的影响,取桩长为 $L=5\text{ m}$, 桩径 $D=1\text{ m}$, $\theta=15^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 三种情况,通过计算得地基抗力系数 K_{h0} 与水平荷载 H 及水平位移 y_0 关系曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出,其他条件相同的情况下, K_{h0} 的变化对水平荷载 H 及水平位移 y_0 关系曲线

影响不明显。

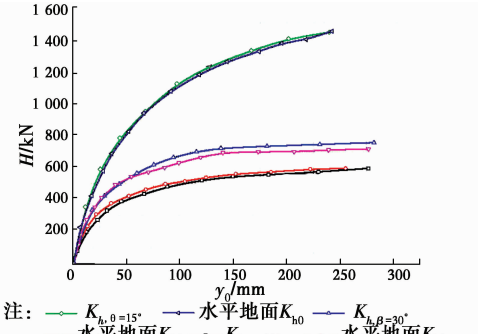


图 9 地基抗力系数 K_{h0} 、水平荷载 H 及位移 y_0 关系曲线

Fig. 9 Relationship of foundation coefficient K_{h0} , horizontal loading H and displacement y_0

5 结 论

根据水平荷载桩埋置在黏土斜坡上的工程特点,引入极限平衡原理与 $p-y$ 曲线方法,对黏土斜坡中刚性桩的受力与计算进行深入研究,得到如下结论:

1)建立一种侧向荷载作用下斜坡刚性桩在粘土中的非线性分析方法。该方法可以同时考虑桩侧土体极限承载力与水平抗力系数沿深度呈线性增加。通过与已有 3D 有限元方法和理论计算方法对比分析,计算结果验证了本文方法的合理性与可行性。

2)参数分析表明,斜坡的坡角、桩土接触面系数对侧向荷载作用下斜坡刚性桩的荷载位移曲线影响明显,而桩侧土的抗力系数对侧向荷载作用下斜坡刚性桩的荷载位移曲线影响不明显。

3)本文仅考虑了黏土不排水条件下的斜坡顶处侧向荷载作用下斜坡刚性桩的非线性分析,对于其他土体类型有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] 田平,王惠初. 粘土中横向周期性荷载桩的 $p-y$ 曲线统一法[J]. 河海大学学报,1993,21(1):9-14.
TIAN P, WANG H C. A unified method of $p-y$ curves for laterally and periodically loaded piles in clay [J]. Journal of Hohai University, 1993, 21(1):9-14. (in Chinese)

[2] 王惠初,鲁子爱. 用 $p-y$ 曲线法计算横向荷载桩的内力[J]. 重庆交通学院学报,1985,15(2):30-36.
WANG H C, LU Z A. Method for calculating internal forces of the laterally loaded pile according to $p-y$

- curves [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1985,15(2):30-36. (in Chinese)
- [3] 黄茂松,俞剑,张陈蓉. 基于应变路径法的黏土中水平受荷桩 $p-y$ 曲线[J]. 岩土工程学报, 2015,37(3):400-409.
HUANG M S, YU J, ZHANG C R. $p-y$ curves of laterally loaded piles in clay based on strain path approach [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(3):400-409. (in Chinese)
- [4] 李卫超,杨敏,朱碧堂. 砂土中刚性短桩的 $p-y$ 模型案例研究[J]. 岩土力学, 2015,36(10):2989-2995
LI W C, YANG M, ZHU B T. Case study of $p-y$ model for short rigid pile in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,35(10):2989-2995. (in Chinese)
- [5] 刘红军,张冬冬,吕小辉,等. 循环荷载下饱和粉土地基单桩水平承载特性试验研究[J]. 2015,45(1):76-82.
LIU H J, ZHANG D D, LYU X H, et al. Model tests on lateral bearing capacity of single piles under cyclic loads in saturated soil [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015,45(1):76-82. (in Chinese)
- [6] 刘晋超,熊根,朱斌,等. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性[J]. 岩土力学, 2015,36(2):591-599.
LIU J C, XIONG G, ZHU B, et al. Bearing capacity and deflection behaviors of large diameter monopile foundations in sand seabed [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(2):591-599. (in Chinese)
- [7] 梁发云,陈海兵,宋著. 轴向荷载对横向受荷桩承载性状影响的参数分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011,33(6):25-30.
LIANG F Y, CHEN H B, SONG Z. Parameter analysis of effects of axial load on the lateral response of piles [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2011,33(6):25-30. (in Chinese)
- [8] 朱斌,熊根,刘晋超,等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10):1807-1815.
ZHU B, XIONG G, LIU J C, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(10):1807-1815. (in Chinese)
- [9] 王富强,荣冰,张嘎,等. 水平循环荷载下风电机组基础离心模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(7):1926-1930.
WANG F Q, RONG B, ZHANG G, et al. Centrifugal model test of pile foundation for wind power unit under cyclic lateral loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7):1926-1930. (in Chinese)
- [10] BRINCH-HANSEN J. The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces [C]//Bulletin Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, 1961, 12(4):5-9.
- [11] Broms B. Lateral resistance of piles in cohesiveness soils [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1964,90(2):27-63.
- [12] MATLOCK H. Correlations for design of laterally loaded piles in clay [C]//Proceedings of Second Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1970, 3(1):577-594.
- [13] REESE L C. Behavior of piles and pile groups under lateral load [R]. Rep. to the U. S. Dept. of Transportation. Federal Highway Administration, Office of Research, Development and Technology, Washington, D. C. 1983.
- [14] BROWN D A, SHIE C F. Some numerical experiments with a three-dimensional finite element model of laterally loaded piles [J]. Computers and Geotechnics, 1991, 12(3):149-162.
- [15] JEREMIC B, YANG Z. Numerical analysis of pile behavior under lateral loads in layered elastic-plastic soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(7):1385-1406.
- [16] GEORGIADIS K, GEORGIADIS M. Undrained lateral pile response in sloping ground [J]. Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(10):1489-1500.
- [17] ZHANG L Y, AHMARI S. Nonlinear analysis of laterally loaded rigid piles in cohesive soil [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013,37(5):201-220.
- [18] GEORGIADIS K, GEORGIADIS M. Development of $p-y$ curves for undrained response of piles near slopes [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 40(11):53-61.

(编辑 王秀玲)