

文章编号: 1000-7598-(2006)07-1092-05

横向载荷作用下刚性桩变位规律研究

崔新壮^{1,2}, 丁桦¹, 金青², 李术才²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘要: 目前对横向受载刚性桩的研究主要集中在其承载力方面, 对变化规律研究很少。为此提出了利用刚性桩上两点位移求桩上任意一点位移、桩回转中心位置及转角的方法。通过对粉质黏土中的刚性桩进行模型试验与数值计算发现, 回转中心位置随位移和载荷的增大, 先是急剧下降, 然后变缓, 最后基本趋于稳定, 而且桩埋置参数与土力学参数对回转中心位置的变化规律影响很小; 而桩的转角随位移增大近似线性变化。比较发现, 由试验和数值计算得到的回转中心极限位置与由极限地基反力法得到的结果相差不大。

关键词: 刚性桩; 横向载荷; 回转中心; 转角

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Study on deflection of rigid piles under lateral loads

CUI Xin-zhuang^{1,2}, DING Hua¹, JIN Qing², LI Shu-cai²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The researches on rigid piles were mostly focused on their bearing capacities; and few people studied their deflections. So a method for determining rigid pile positions is put forward; and thus the displacement of any point on pile, the position of rotation center and the deflection angle of rigid pile can be obtained from the lateral displacements of any two points on rigid pile. The rigid piles embedded in silty clay are tested and analyzed numerically. It is found that the rotation center falls sharply firstly, then descends slowly and finally tends to be stable with displacement and load. Embedding parameters of piles and mechanical parameters of soil have few effects on the varying laws of the position of rotation center with lateral loads. The deflection angle of rigid pile increases linearly with loads on the whole. By comparison, it is found that the ultimate positions of rotation centers obtained from test and numerical analysis are consistent basically with those from some limit subgrade reaction methods.

Key words: rigid piles; lateral loads; rotation center; deflection angle

1 前言

刚性桩应用非常广泛, 如埋置于相对软弱地基中的各种护栏立柱、电线杆、桥墩及海洋平台基础等。在横向载荷作用下刚性桩变形与土的变形相比很小, 可以不计, 而柔性桩的许多研究方法^[1,2]并不适用于刚性桩, 对横向载荷作用下刚性桩的研究主要集中在其承载力方面, 诸如 Meyerhof 等^[3,4]对砂土和黏土中刚性桩承载力的试验研究, Snitko^[5], Broms^[6]及 Petrasovits & Award^[7]等的求刚性桩承载力的极限地基反力法, 如图 1 所示 (图中 D 为垂直方向上桩的宽度; l 为埋深; h 为加载高度; γ 为土

的重度; c_u 为土的不排水强度; K_a 、 K_p 分别为朗肯主动与被动土压力系数) 以及 Murff 等^[8]对黏土中刚性桩承载力的三维极限分析方法, 但是对横向载荷作用下刚性桩运动规律的研究还很少。这些规律对于刚性桩的研究和设计有时是很需要的。例如在极限地基反力法中, 一般先假设极限土反力的分布模式, 再通过刚性桩的整体受力平衡间接得到回转中心的位置, 如果已知极限状态时回转中心的真实位置, 反过来则可以验证所假设的极限土反力分布模式的有效性, 为刚性桩的设计提供更可靠的依据。本文通过试验及数值分析, 对横向受载刚性桩的运动规律进行较详细地研究。

收稿日期: 2004-09-30

修改稿收到日期: 2005-01-21

基金项目: 国家 973 项目 (No.2002CB412706) 和国家自然科学基金项目 (No.10372104) 资助。

作者简介: 崔新社, 男, 1974 年生, 博士, 讲师, 主要从事桩基工程和岩土土力学方面的研究。E-mail: cuixz@sdu.edu.cn

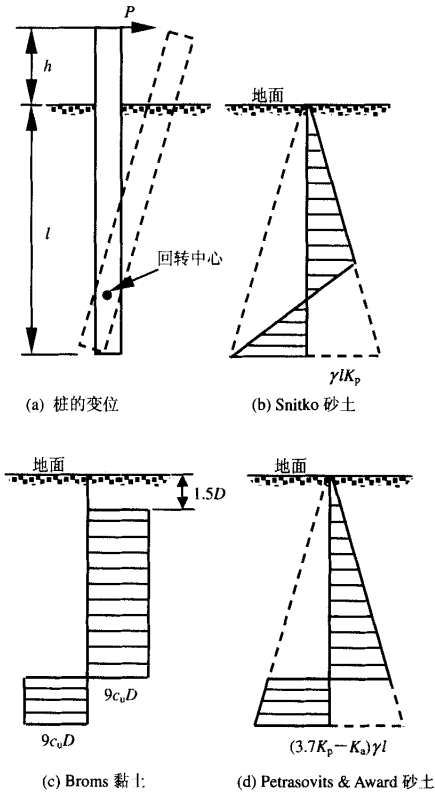


图 1 几种极限土反力分布模式
Fig.1 Some distribution modes of limit soil reaction

2 试验研究

试验所用刚性桩为无缝钢管，外径 $D=46\text{ mm}$ ，壁厚 $t=3.5\text{ mm}$ ，埋置深度 $l=50\text{ cm}$ ，加载高度 $h=31\text{ cm}$ 。地基土为粉质黏土^[9]，取自北京四环路保福寺段路基，最优含水量为 14.2%，最大干密度为 1.68 g/cm^3 ，塑限为 15.15%，塑性指数为 10.87。试验中土的含水量为 14.7%，压实度为 85.6%。试验是在长×宽×深为 $1.86\text{ m}\times 1.73\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 的试验槽内完成的。加载装置是一量程为 3 t 的手扳葫芦，试验时以大约 5 mm/s 的速度缓慢连续地加载，与 Meyerhof 等^[3, 4]在模型试验中的加载方式相同。加载过程中桩头是自由的，为了对刚性桩的运动进行跟踪测试，专门安装了 2 个位移传感器，借助动态应变放大器和数据采集系统来量测桩身上某两点的横向位移。

2.1 测试原理

若已知刚性桩上两点的横向位移，则可通过几何关系得到桩上任一点的位移。如图 2 所示， om 为桩的初始位置， od 为试验后桩的位置， o 为桩的回

转中心，而 a 在试验前为桩与地面相交的点； b 、 c 为被测位移的点， d 为桩上任意一点。假设：(1) 试验前 b 、 c 、 d 三点离地面的高度分别为 h_1 、 h_2 和 h_a ，即 $ab=h_1$ ， $ac=h_2$ ， $ad=h_a$ 。(2) b 、 c 、 d 三点的水平位移分别为 s_1 、 s_2 和 s ，从 b 、 c 、 d 三点向 om 作垂线，垂足分别为 i 、 k 、 m ，则有 $ib=s_1$ ， $kc=s_2$ ， $md=s$ 。(3) $oa=H$ ，则由几何相似得：

$$\frac{h_1+H}{h_2+H} = \frac{s_1}{s_2}; \quad \frac{h_a+H}{h_2+H} = \frac{s}{s_2} \quad (1)$$

由上式可得：

$$s = s_2 + \frac{(h_a - h_2)(s_2 - s_1)}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

$$H = \frac{h_2 s_1 - h_1 s_2}{s_2 - s_1} \quad (3)$$

式中 H 为回转中心的深度，是一个重要参数。

令桩的转角 θ ，由几何关系可得：

$$\sin \theta = \frac{s_1}{h_1 + H} \quad (4)$$

联立式 (3) 和式 (4) 可得：

$$\theta = \arcsin \left(\frac{s_2 - s_1}{h_2 - h_1} \right) \quad (5)$$

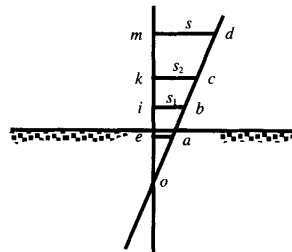


图 2 位移测试原理图
Fig.2 Measuring principle diagram of displacements

2.2 试验规律

图 3 为回转中心相对位置 H/l 随地面处桩的无量纲水平位移 s_g/l (s_g 为地面处刚性桩的水平位移) 及横向载荷水平 PL (载荷与极限载荷的比值) 的变化规律。回转中心随着位移和横向载荷的增大，先是急剧下降，然后变缓，最后基本趋于稳定。桩的转角 θ 随 s_g/l 的变化规律如图 4 所示，桩的转角与地面处桩的位移成近似线性关系。

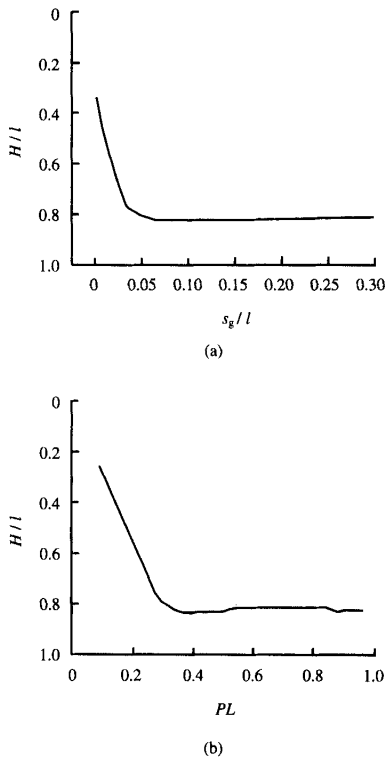


图3 回转中心位置随位移和载荷的变化规律
Fig.3 Varying law of rotation center location with displacement and load

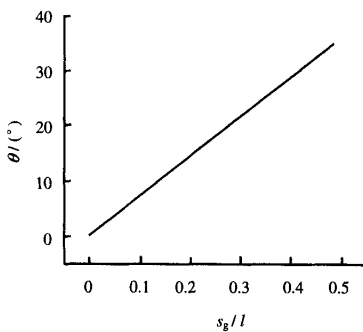


图4 刚性桩转角随位移的变化规律
Fig.4 Varying law of deflection angle with displacement of rigid piles

3 数值分析

为了考察桩埋置参数和土的力学参数等对刚性桩运动规律的影响,用有限差分程序包FLAC^{3D}对刚性桩与土的相互作用进行了三维数值分析。桩土界面允许滑动和分离,通过建立接触单元来模

拟这种非线性边界问题。计算时采用准静态刚性加载方式,即控制桩头节点的横向速度,但不考虑桩与土的加速度效应。加载过程中桩头是自由的。计算中采用莫尔-库仑模型,对回转中心位置和转角的求解仍借助于式(3)和式(5),只是其中的 s_1 和 s_2 是由计算得到的。

3.1 参数对回转中心位置变化规律的影响

图5~8为由计算得到的回转中心相对位置随PL的变化规律,可见计算与试验得到的规律相同,回转中心位置随位移和载荷增大先是急剧下降,然后逐渐变缓,最后基本趋于稳定。而且稳定后由试验和计算得到的H/l值相差不大,基本都在0.75~0.8之间。由图5、7、8可见,埋深l、土内摩擦角φ及桩土界面摩擦角δ对回转中心的运动规律影响很小。例如图5中,当PL=1.0时,l=0.3,0.4m和0.6m的桩对应的H/l极限值分别为0.768,0.762和0.749,相差很小。但由图6可见,加载高度h对回转中心的运动规律有较大影响,对相同的PL,h越大,H/l越小。

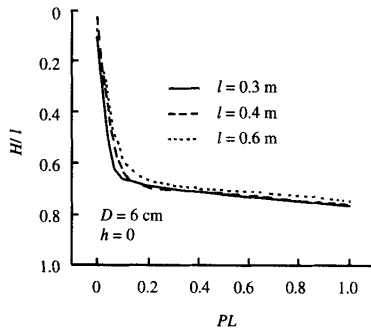


图5 埋深对H/l变化规律的影响
Fig.5 Effect of embedding depth on varying law of H/l

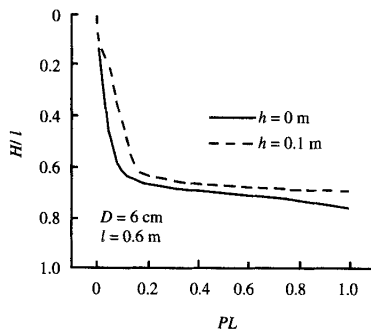


图6 加载高度对H/l变化规律的影响
Fig.6 Effect of loading height on varying law of H/l

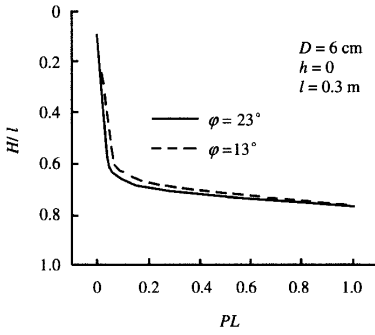


图 7 φ 对 H/l 变化规律的影响
Fig.7 Effect of φ on varying law of H/l

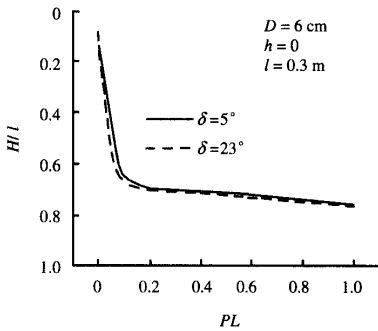


图 8 δ 对 H/l 变化规律的影响
Fig.8 Effect of δ on varying law of H/l

对 $D=46\text{ mm}$ ， $l=50\text{ cm}$ ， $h=31\text{ cm}$ 的桩，将由试验、数值计算及 3 种极限地基反力法得到的极限载荷对应的 H/l 极限值进行了比较，见表 1。表中由 Snitko 法^[5]和 Petrasovits & Award 法^[7]得到的 H/l 极限值与桩埋置的几何参数无关，而且由 3 种极限地基反力法得到的 H/l 极限值都与土的强度参数无关。虽然，表 1 中 3 种方法对应的土性不完全相同，但比较可知，由 Petrasovits & Award 砂土极限地基反力法^[7]得到结果与试验结果最接近，而由 Broms 黏土极限地基反力法^[6]得到结果偏小。另外，由 Snitko 砂土极限地基反力法^[5]得到的结果与有限差分计算结果非常接近。

表 1 H/l 极限值比较

Table 1 Comparison between ultimate values of H/l

试验粉质黏土	数值计算	极限地基反力法		
粉质黏土	粉质黏土	Snitko 砂土 ^[5]	Broms 黏土 ^[6]	Petrasovits & Award 砂土 ^[7]
0.81	0.77	0.764	0.714	0.830

3.2 刚性桩转角变化规律

已知桩头位移、转角、回转中心的位置三者中的 2 个就可确定刚性桩的变位。在回转中心位置一

定的情况下转角与桩头位移存在对应关系。图 9(a) 为 $D=6\text{ cm}$ ， $h=0$ ， $l=0.3\text{ m}$ 和 0.6 m 对应的转角随 s_g/l 的变化规律，可见转角随 s_g/l 近似线性变化，这与试验所得规律相同，而且转角随 s_g/l 的变化规律受埋深 l 影响很小。图 9(b) 则是它们对应的转角随 PL 的变化规律，可见转角随 PL 的变化规律受埋深影响同样很小。

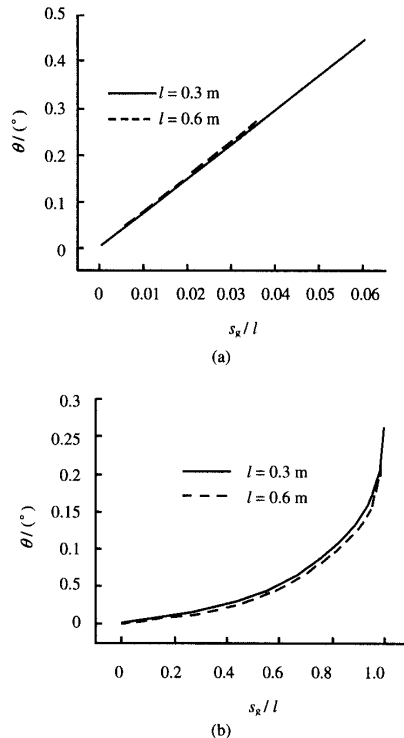


图 9 转角的变化规律
Fig.9 Varying law of deflection angle

3.3 桩土的位移

这里仅讨论桩土的轴向位移。若已知土的轴向位移，就可以了解桩土的相对轴向运动规律，而这一规律很难通过试验观察到。为了研究这一规律，对 $D=6\text{ cm}$ ， $h=0.6\text{ m}$ ， $l=0.3\text{ m}$ 的刚性桩进行了大变形计算分析，横向载荷一直与地面平行，随桩的偏转，会在桩头存在一个向上的拉力分量，相应的存在一个向上的位移分量，这与大多数实际问题相符合。

横向载荷作用下桩土的相互作用是对称问题。图 10 为对称面上桩与土轴向位移的平面等值线图。可见桩尖后下方土的轴向位移为负的，但桩尖以上桩后土的轴向位移为正的，即使这样，土的位移仍小于桩的位移，即土相对于桩向下运动。桩近

区的桩前土位移为正，特别是在近地表处，土的位移比桩的位移大得多，即土相对于桩向上运动；而远区的桩前土位移向下。

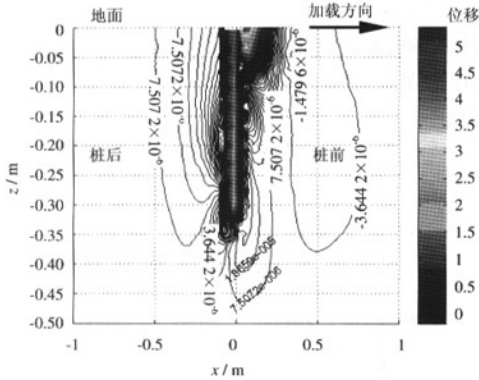


图 10 对称面上桩土轴向位移的等值线图 (单位: mm)
Fig.10 Contour map of axial displacement of pile and soil on symmetrical plane (unit: mm)

4 结 语

本文提出了利用桩上两点位移求刚性桩上任意一点位移、桩回转中心位置及转角的方法，并通过试验与数值计算得到了刚性桩回转中心位置和转角等随位移和载荷水平的变化规律，对桩埋置参数和土力学参数对这些规律的影响进行了研究。比较发现，Petrasovits & Award 的砂土极限地基反力法得到的 H/l 极限值与本文试验结果最接近，而由 Snitko 砂土极限地基反力法得到的结果与本文有限差分计算结果基本一致。最后，通过对桩与土的相对轴向运动规律进行分析知道，地表附近的桩前土相对于桩向上运动。

参 考 文 献

- [1] 王梅, 楼志刚, 李建乡, 等. 水平荷载作用下单桩非线性 m 法试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 23-27.
WANG Mei, LOU Zhi-gang, LI Jian-xiang, et al. Nonlinear analysis of m method for single pile under lateral loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 23-27.
- [2] 叶万灵, 时蓓玲. 桩的水平承载力实用非线性计算方法——NL 法[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 98-102.
YE Wan-ling, SHI Bei-ling. A practical non-linear calculation in method of piles lateral bearing capacity—NL method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(2): 98-102.
- [3] Meyerhof G G, Mathur S K, Valsangkar A J. The bearing capacity of rigid piles and pile groups under inclined loads in layered sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1981, 18: 514-519.
- [4] Chari T R, Meyerhof G G. Ultimate capacity of rigid single piles under inclined loads in sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1983, 20: 849-854.
- [5] Poulos H G, Davis E H. Pile Foundation Analysis and Design[M]. New York: John Wiley, 1980.
- [6] Broms B B. Lateral resistance of piles in cohesive soils[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering**, 1964, 90(SM2): 27-59.
- [7] Petrasovits G, Award A. Ultimate lateral resistance of a rigid pile in cohesionless soil[A]. **Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Division**[C]. New York: John Wiley & Son, 1972. 407-412.
- [8] Murff J D, Hamilton J M. P-ultimate for undrained analysis of laterally loaded piles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineering**, 1993, 119(1): 91-107.
- [9] GBJ7-89, 建筑地基基础设计规范[S].

桩承载力自平衡测试技术及工程应用

建筑科学类 龚维明、戴国亮编著 16 开 300 千字 240 页 压膜装 估价: 30.00 元 2006 年 3 月出版

该书是关于桩承载力自平衡测试技术的一本专著，系统介绍了这项技术的基本原理、基本理论及其在典型房屋建筑工程和桥梁工程中的具体应用，包括润扬长江大桥、苏通长江大桥、杭州湾跨海大桥等国家重点工程。全书包括基本理论、在典型桩型中的应用、在桥梁工程中的应用及在特殊岩土中的应用与展望等共 11 章。

读者对象：桩基检测机构、设计院和质量监督等部门技术人员，相关院校师生。

(摘自新华书目报·科技新书目)