



船坞基坑开挖对底板桩基承载特性影响的数值分析*

江杰^{1,2,3}, 顾倩燕², 陈俊羽¹, 马少坤^{1,3}

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063;
3. 广西大学工程防灾与结构安全重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要: 利用有限元软件 ABAQUS, 基于实际工程验证的数值分析方法, 对地面加套管试桩及船坞基坑开挖条件下底板桩基进行有限元计算, 并讨论开挖深度、开挖半径、围护墙的深度和位置等因素对桩基极限承载力的影响规律, 取得了船坞基坑开挖对底板桩基承载力影响的基本认识。这些认识对于改进船坞底板桩基设计方法有参考价值。

关键词: 基坑开挖; 桩基; 数值分析; ABAQUS

中图分类号: U 673.33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0174-06

Numerical analysis for vertical bearing behavior of piled slab foundation in dock considering excavation effect

JIANG Jie^{1,2,3}, GU Qian-yan², CHEN Jun-yu¹, MA Shao-kun^{1,3}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd, Shanghai 200063, China;

3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Based on the verified finite element parameters of a project, we carry out load tests with sleeve and under excavation of piles of slab in dock by the software of ABAQUS, and discuss the changes of the bearing load of pile due to the depth and radius of excavation, depth and location of support wall. Through this study, the basic knowledge of the effects of excavation on pile foundation of slab in dock are initially obtained, which is of some referential significance for the improvement of theories for piled foundation design.

Keywords: excavation; pile foundation; numerical analysis; ABAQUS

受现场条件的限制, 船坞底板桩基静载荷试验一般在基坑开挖之前进行, 即在地面试桩。通常有 2 种做法: 1) 常规试桩法, 即根据地面试桩得到承载力, 再扣除开挖面以上桩的侧摩阻力来计算桩的实际承载力, 即使采用 Osterberg 法, 其实质也是如此。2) 套管试桩法, 即在开挖深度范围内在桩侧加设套管, 以消除开挖范围内桩侧摩阻力。然而在实际工程中, 桩的承载是在船坞基

坑开挖完后随着底板的施工而开始的, 此时桩的工作条件和试桩时的受力条件是不同的, 静载荷试验经过折算得到的桩基承载力不能反映基坑开挖对桩基力学性能的影响。

船坞基坑开挖完成后, 上覆土体的移去使得桩周中的土体有效应力减小, 桩侧摩阻力减小, 导致桩的承载力降低。同时由于回弹的作用, 桩周存在的侧摩阻力会影响桩侧摩阻力的发展趋

收稿日期: 2014-10-06

*基金项目: 上海市青年科技启明星计划项目 (13QB1404300); 广西岩土力学与工程重点实验室资助课题 (14-KF-03)

作者简介: 江杰 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 从事基坑及桩基的教学和科研工作。

势,影响桩的刚度,从而严重影响上部结构的稳定性和可靠性。上海某基坑开挖深度为13 m,基桩检测资料表明,开挖完成后30%工程桩在钢筋笼底部断裂^[1]。广东地区某基坑开挖深度为5 m,高应变检测资料表明,40%的基桩承载力达不到要求^[2]。事实表明,基坑开挖卸荷对基桩力学性能有重要影响。因此,基坑开挖对基桩的影响不容忽视,其定量评价对实际工程具有重要指导意义。

为了得到船坞底板基桩真实的承载力,理想的方法是在基坑开挖后于坑底桩顶处进行加载试验。然而这种试验在工程中很难实现,但这对于数值模拟来说却相对简单,这为评价基坑开挖对坑底桩的影响提供了手段。王成华^[3]建立了桩筏基础—地基—基坑开挖三维有限元分析模型,研究基坑开挖对群桩基础竖向承载性状的影响。郑刚^[4]基于实际工程验证的有限元参数,研究基坑开挖对坑底不同长度的单桩的影响,并对开挖条

件下桩基础沉降计算进行分析。但以上分析方法都只分析大面积开挖条件下基坑中心桩的情况,没有考虑开挖半径及围护墙的因素对桩基承载力的影响。

本文利用有限元软件 ABAQUS,基于实际工程验证的数值分析方法,研究基坑开挖对坑底单桩竖向承载性状的影响,讨论开挖深度、开挖半径、围护墙的深度和位置等因素对坑底桩基极限承载力的影响规律,并与地面套管试桩的结果进行对比分析。

1 数值分析方法验证

1.1 现场试桩

中船长兴造船基地3[#]、4[#]船坞底板桩基采用PHC管桩,该工程试桩桩长为39 m,直径为600 mm,试桩采用慢速维持荷载法,锚桩反力方式。该工程场地内土层分布及物理力学参数见表1。

表1 土的物理力学计算参数

土层名称	层底深度/m	密度/(t·m ⁻³)	C/kPa	φ/(°)	E ₀ /MPa	泊松比
灰色淤泥质粉质黏土夹粉性土黏土夹粉性土	3.6	1.88	4	12.0	108.53	0.40
灰色砂质粉土	0.9	1.82	14	15.0	79.41	0.40
灰色砂质粉土	10.6	1.84	10	17.0	86.76	0.40
灰色淤泥质黏土	6.4	1.79	13	19.5	78.29	0.40
粉质黏土	4.5	1.68	11	20.0	55.96	0.35
灰色粉质黏土	6.0	1.74	16	25.0	60.86	0.32
灰色粉质黏土夹粉性土	4.0	1.80	19	30.0	60.31	0.30
灰色粉质黏土与粘质粉土互层	3.0	1.80	21	32.0	12.90	0.25
灰色粉砂		1.80	21	32.0	12.90	0.25

1.2 有限元模型

在有限元计算中,桩基采用弹性材料模拟,密度2 500 kg/m³,弹性模量为20 GPa,泊松比为0.16。土体采用Mohr-Coulomb模型。桩、土之间的接触通过接触对实现,采用库仑摩擦模型描述接触面之间的相互作用,通过对载荷试验结果模拟反演得到接触面间的综合摩擦系数为0.33。

试桩的有限元模型利用对称性,取1/4模型进行分析。根据经验^[5],为了消除边界效应,模型竖向取2倍的桩长。故土体模型在x(水平向)、y(水平向)和z(竖向)的尺寸分别为70、70、

80 m。土体和桩采用C3D8R单元,共18 444个单元,21 118个节点。模型底面边界施加固定边界条件,两个侧面采用水平连杆支座固定侧向位移,顶面为自由面。

1.3 计算结果与实测对比

有限元计算得到的桩顶Q-s曲线与现场静载试验成果对比见图1。由图中可以看到有限元计算结果和试桩结果基本吻合,说明有限元模型中所取的桩土接触面参数、土体及桩身材料参数及有限元网格划分合理,能较好地模拟现场试桩过程。

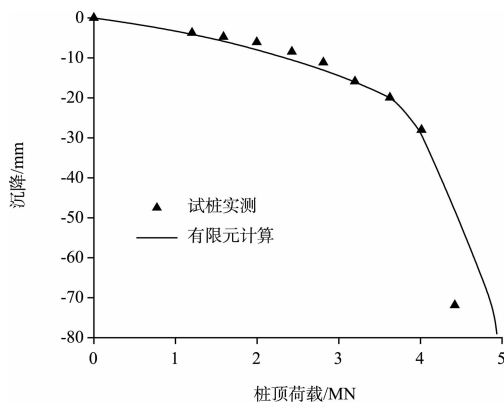


图1 桩顶荷载位移曲线

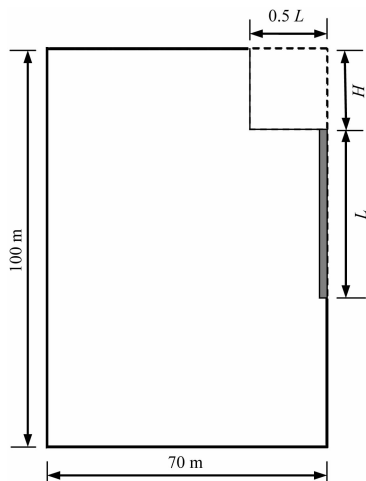
2 开挖对坑底桩基承载特性的影响

为避免土层分布的影响及简化计算和分析,模型中采用单一土层,选用表1中粉质黏土层。桩长为39 m,直径为600 mm,计算参数及单元类型均与验证模型中相同。

本文分别模拟地面套管试桩和坑底桩顶试桩。套管试桩有限元模型中,套管部分(开挖土体部分)设置硬接触,桩与周围土体只作用有法向接触,而无摩擦作用。坑底桩顶试桩先将开挖部分移除,然后对单桩进行逐级加载,以模拟实际工程中单桩受荷情况。

2.1 开挖深度对单桩承载性状的影响

桩长度 L 不变,均为39 m。开挖深度 H 分别取0.1倍、0.2倍、0.4倍和0.5倍桩长。开挖半径为0.5倍桩长,在竖向开挖面施加水平约束,计算模型与1.2节类似(图2)。



注:虚线部分为开挖部分,下同。

图2 开挖深度影响模型

图3为地面套管试桩及不同开挖深度条件下坑底桩顶的荷载位移曲线。从图3中可以看出:

1) 套管试桩和坑底试桩的 $Q-s$ 曲线呈现相同的规律,即桩的埋置深度越深,桩的极限承载力越大。

2) 坑底试桩得到的极限承载力要比套管试桩的小,开挖卸载导致单桩刚度减小,目前工程中采用套管试桩作为确定单桩极限承载力的方法是偏于不安全的。

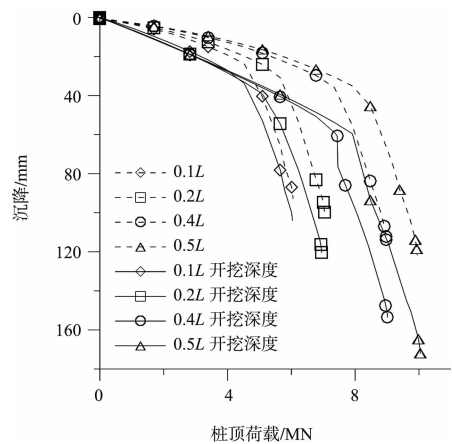


图3 不同开挖深度的桩基荷载位移关系

图4为桩基极限承载力损失随着开挖深度的变化曲线,其中,横坐标为开挖深度与桩长的比值,纵坐标为开挖后单桩极限承载力的损失比,即开挖后单桩极限承载力的减少量与地面套管试桩确定的极限承载力的比值。由图4中可以看出,随着开挖深度的增加,桩的极限承载力减小量逐渐增大,并趋向于稳定值。当开挖深度到达0.5倍桩长后,桩的极限承载力减小量趋于7%。

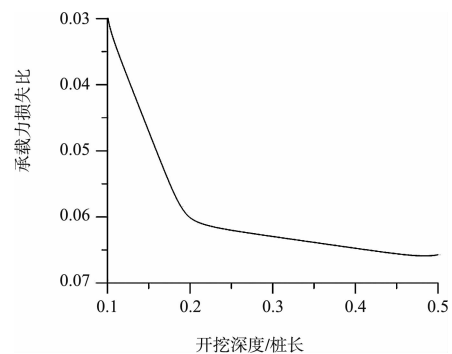


图4 桩基极限承载力损失随开挖深度的变化

2.2 开挖半径对单桩承载性状的影响

桩长度 L 为 39 m, 开挖深度均为 0.2 倍桩长。开挖半径 r 分别取 0.25 倍、0.5 倍、1 倍和 1.5 倍桩长, 分别模拟桩基在基坑中不同的位置。在竖向开挖面施加水平约束。计算模型与 1.2 节类似 (图 5)。

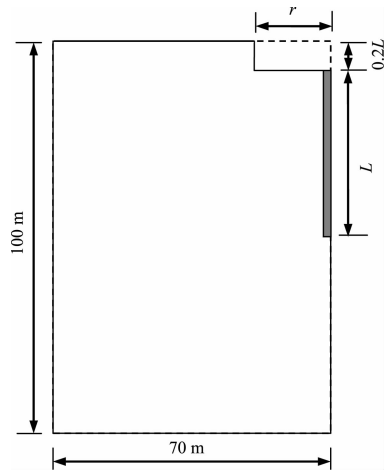


图 5 开挖半径影响模型

图 6 为地面套管试桩及不同开挖半径条件下坑底桩顶的荷载位移曲线。从图 6 中同样可以看出: 坑底试桩得到的极限承载力要比地面套管试桩的小, 开挖卸载导致单桩刚度减小。随着开挖半径的增大, 桩的极限承载力降低。在开挖半径到了 1 倍桩长的时候, 会出现荷载位移曲线陡降的现象, 说明土体和桩身的差异回弹较大。

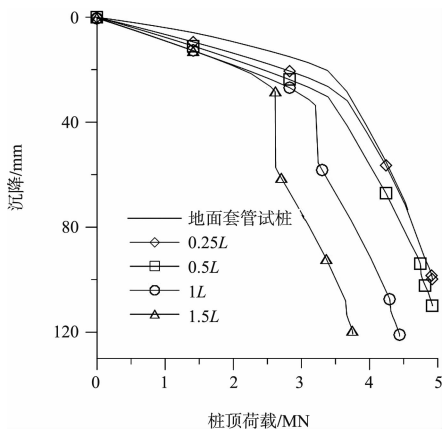


图 6 不同开挖半径的桩基荷载位移关系

图 7 为桩基极限承载力损失随开挖半径的变化曲线, 其中, 横坐标为开挖半径与桩长的比值的平方, 纵坐标为开挖后单桩极限承载力的损失

比, 即开挖后单桩极限承载力的减少量与地面套管试桩确定的极限承载力的比值。从图 7 中可以看出, 随着开挖半径的增大, 单桩极限承载力不断减小, 当开挖半径超过桩长的 1.5 倍时, 桩的下降量趋于稳定, 约为 32%, 这说明基坑开挖后处于中间位置的桩基比处于基坑边缘的桩基承载力要小很多。

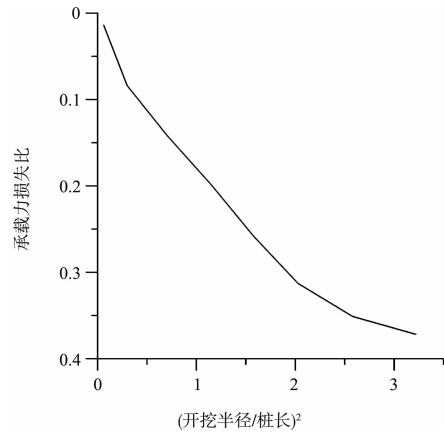


图 7 桩基极限承载力损失随开挖半径的变化

2.3 围护墙的深度对单桩承载力的影响

桩长度 L 为 39 m, 开挖深度为 0.2 倍桩长, 开挖半径为 0.5 倍桩长。围护墙的深度 h 分别为 0.3 倍、0.5 倍、0.6 倍和 1 倍桩长。围护墙的厚度为 1 m, 密度 $2\,500\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 20 GPa, 泊松比为 0.16。计算模型与 1.2 节类似 (图 8)。

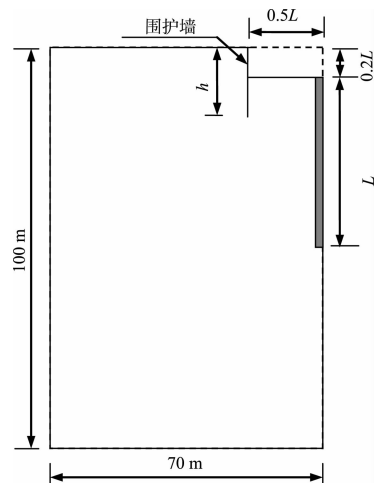


图 8 围护墙深度影响模型

图 9 为地面套管试桩及不同围护墙深度条件下坑底桩顶的荷载位移曲线。从图 9 中可以看出:

坑底试桩得到的极限承载力要比地面套管试桩小。随着墙的埋置深度的增大，桩的极限承载力有所降低，这是由于围护墙的“遮拦效应”，使得桩身的侧摩阻力减小，从而降低了桩的极限承载力，但降低的幅度不大，因此围护墙深度的改变对桩极限承载力的影响较小。

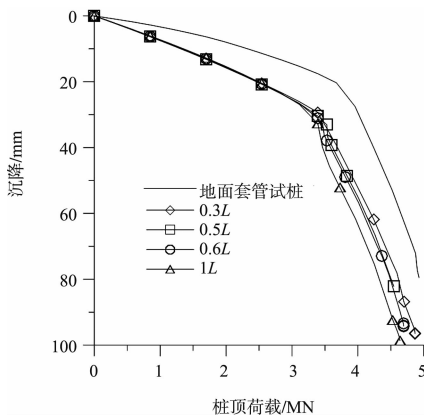


图9 不同围护墙深度的桩基荷载位移关系

图 10 为桩基极限承载力损失随着围护墙深度的变化曲线，其中，横坐标为围护墙深度与桩长的比值，纵坐标为开挖后单桩极限承载力的损失比，即开挖后单桩极限承载力的减少量与地面套管试桩确定的极限承载力的比值。从图 10 中可以看出，当围护墙的深度为 $0.3L$ 时，单桩极限承载力下降 6% 左右。与图 7 对比可知，这主要是由开挖引起的。当围护墙深度增加到 $1L$ 时，单桩的极限承载力下降百分比趋于稳定，约为 10% ，可见由围护墙深度增加引起的承载力损失约为 4% 。

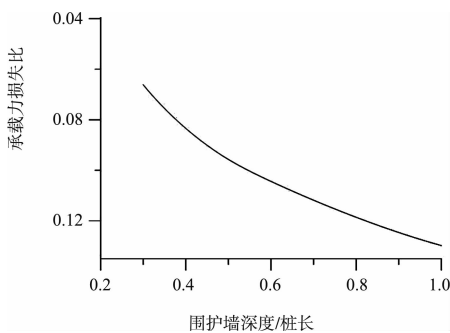


图 10 桩基极限承载力损失随围护墙深度的变化

2.4 围护墙的位置对单桩承载力的影响

桩长度 L 为 39 m ，开挖深度为 0.2 倍桩长，

围护墙深度为 0.4 倍桩长。围护墙和桩的距离 d 分别取 0.25 倍、 0.5 倍、 1 倍和 1.5 倍桩长，围护墙的计算参数取值与 2.3 节中一致。计算模型与 1.2 节类似 (图 11)。

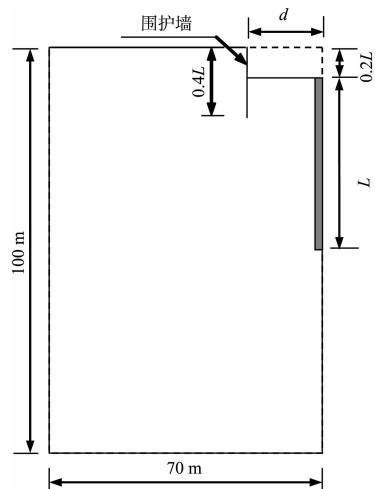


图 11 围护墙位置影响模型

图 12 为地面套管试桩及不同开挖半径条件下有无围护墙情况下的对比曲线。从图 12 中可以看出：坑底试桩得到的极限承载力要比地面套管试桩的小。在开挖条件下，随着围护墙与桩的距离的增大，桩的极限承载力也有所降低。但是对比有围护墙和无围护墙时的结果可以发现，围护墙的距离对桩的承载性影响较小。

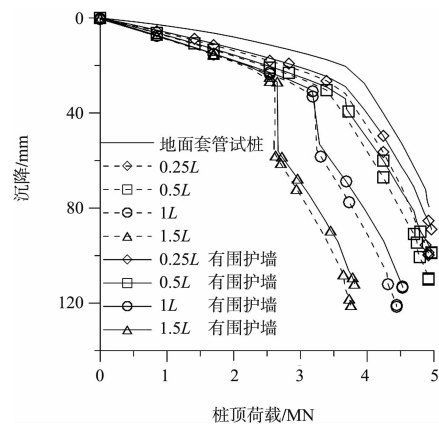


图 12 不同围护墙位置的桩基荷载位移关系

图 13 为桩基极限承载力损失随着围护墙位置的变化曲线，其中，横坐标为围护墙与桩的距离与桩长的比值的平方，纵坐标为开挖后单桩极限承载力的损失比，即开挖后单桩极限承载力的减少量与地面套管试桩确定的极限承载力的比值。

当围护墙与桩的距离超过 1.5 倍桩长时,单桩的极限承载力减小量趋于稳定,约为 35%。图 7 中显示开挖半径引起的承载力下降约为 32%,由此可知承载力损失主要是开挖引起的,由围护墙位置的增加引起的承载力损失约为 3%。

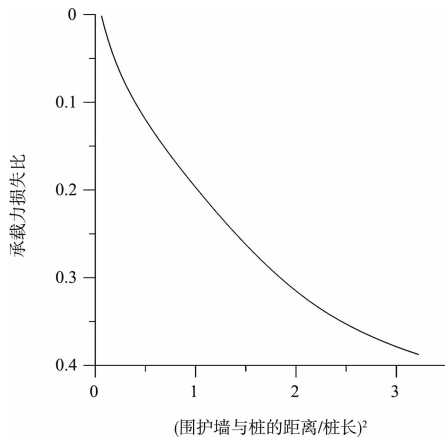


图 13 桩基极限承载力损失随围护墙位置的变化

3 结论

1) 套管试桩和坑底试桩的 $Q-s$ 曲线呈现相同的规律,即桩的埋置深度越深,桩的极限承载力也越大。坑底试桩得到的极限承载力要比套管试桩的小,开挖卸载导致单桩承载力减小,目前工程中采用套管试桩作为确定单桩极限承载力的方法是偏于不安全的。

2) 随着开挖深度的增加,桩的极限承载力减小量逐渐增大,并趋向于稳定值。当开挖深度到达 0.5 倍桩长后,桩的极限承载力减小量趋于 7%。

3) 随着开挖半径的增大,单桩极限承载力下降比较明显,当开挖半径超过桩长的 1.5 倍时,桩

的下降量趋于稳定,约为 32%。基坑开挖后处于中间位置的桩基比处于基坑边缘的桩基承载力要小很多。

4) 随着墙的埋置深度的增大,桩的极限承载力有所降低。当围护墙深度增加到 $1L$ 时,由围护墙深度增加引起的承载力损失约为 4%,围护墙深度的改变对桩极限承载力的影响较小。

5) 随着围护墙与桩的距离的增大,桩的极限承载力逐渐降低,但这主要是开挖半径的增大引起的。当围护墙与桩的距离超过 1.5 倍桩长的时候,单桩的极限承载力约为 3%,围护墙深度的改变对桩极限承载力的影响也较小。

限于数值分析条件和计算能力,本文只是对船坞基坑开挖对底板桩基影响进行了规律性的探讨,对于具体工程,由于土层和施工等条件不同,需做详细的分析。但本文取得的一些基本认识对于改进底板桩基设计方法有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 朱火根,孙加平. 上海地区深基坑开挖坑底土体回弹对工程桩的影响[J]. 岩土工程界, 2005, 8(3): 43-46.
- [2] 徐情根,徐醒华,梁朝晖,等. 深基坑开挖对坑底桩基的影响[J]. 广东土木与建筑, 2006(1): 33-34.
- [3] 王成华,刘庆晨. 考虑基坑开挖影响的群桩基础竖向承载性状数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1 851-1 856.
- [4] 郑刚,张立明,刁钰. 开挖条件下坑底工程桩工作性状及沉降计算分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3 089-3 096.
- [5] 江杰,顾倩燕,瞿革,等. 试验水池施工对邻近桩基的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 588-591.

(本文编辑 郭雪珍)

