



基于 ABAQUS 的主桩套板结构土拱效应分析

刘子涵¹, 杜辰², 廖迎娣¹, 王琴芬¹, 陈达¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 2. 天津港港务设施管理中心, 天津 300456)

摘要: 作为一种板桩墙结构形式, 主桩套板结构的受力情况比较复杂, 当套板相对变形较大时将产生土拱效应。在介绍土拱形成原理的基础上, 利用 ABAQUS 软件建立主桩套板结构的平面应变模型, 重点研究结构尺寸和土体性质对土拱效应的影响, 结果表明前者影响较大, 后者的影响相对较小。在对主桩套板结构进行设计时, 为充分发挥土拱效应降低工程造价, 可在一定范围内适当增加主桩净距、减小套板厚度。

关键词: 板桩码头; 主桩套板结构; 土拱效应; ABAQUS

中图分类号: U 656.1⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0180-07

Soil arching effect for main pile with inlaid sheet structure based on ABAQUS

LIU Zi-han¹, DU Chen², LIAO Ying-di¹, WANG Qin-fen¹, CHEN Da¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Tianjin Port Business Facilities Management Centre, Tianjin 300456, China)

Abstract: The main pile with inlaid sheet structure is a type of sheet-pile wall with complicated force conditions. When the deformation of inlaid sheet increases, it will produce soil arching effect on the structure's back side. Based on the introduction of soil arching theory, we build a plane strain model by ABAQUS software to study the impact of structure size and soil properties on soil arching effect. The results indicate that the structure size has a greater contribution to the effect. To a certain extent, the effect of soil properties is relatively small. In the design of main pile with inlaid sheet structure, in order to give full play to the soil arching effect and save project cost, main pile interval could be increased appropriately, and inlaid sheet thickness should be reduced within a certain scope.

Keywords: sheet-pile wharf; main pile with inlaid sheet structure; soil arching effect; ABAQUS

主桩套板结构作为传统板桩结构的改进形式, 由主桩和插放在桩中间的套板组成, 可以充分发挥主桩及硬土层的作用, 具有结构可靠、适应能力强、工程造价低、施工速度快等优点, 可广泛应用于码头前墙、船闸闸墙、船坞坞墙、护岸和围堰等挡水、挡土工程。20世纪60年代在天津子牙河修建的一座内河货运码头, 设计时拉杆以上采用主桩套板结构, 使工程造价降低40%左右, 经受住了几十年的考验^[1]。但是, 由于主桩套板结构存在土拱效应, 各构件的实际受力状态比较

复杂, 结构尺寸和土体性质对土拱效应的影响也缺乏深入研究。本文基于土拱效应形成的原理利用 ABAQUS 软件建立主桩套板结构的有限元模型, 研究结构尺寸和土体性质对土拱效应的影响, 取得了一些有益的成果。

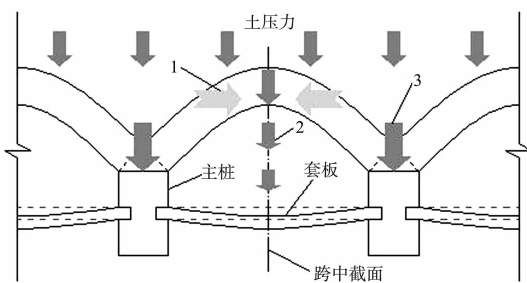
1 主桩套板结构的土拱效应

土拱的力学传递机制主要是依靠土颗粒所受的法向压力、颗粒之间的接触切向力和并行约束的法向拉力及切向力, 而颗粒之间的接触切向力

收稿日期: 2014-10-08

作者简介: 刘子涵(1991—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程方面研究。

表征为宏观的摩擦力,并行约束的法向拉力及切向力表征为宏观的粘聚力^[2]。从强度理论来讲,土拱效应是通过发挥土体自身抗剪强度来实现应力转移的,而土体抗剪强度由滑动面上土的粘聚力(阻挡剪切)和土体的内摩阻力(增加摩擦)两部分组成^[3]。即土体在荷载作用下产生不均匀位移,而土体的抗剪强度具有保持移动土体原来位置的趋势,使移动土体和不动土体接触处土颗粒间的抗剪作用发挥以阻止这种相对运动的形成,从而发生应力的传递和转移,使移动部分土颗粒的压力减少,不动部分土颗粒的压力增加,这种将移动土体的压力传递给相邻不动土体的现象就是土拱效应^[4-5]。对于主桩套板结构(图1),主桩套板结构施工完成后,在墙后主动土压力的作用下,土体的蠕变变形不断增加,由于桩间套板相对桩体而言变形能力较大,且主桩受到拉杆的锚定作用变位较难,使主桩附近土体相对位移较小,引起桩间土体与桩后土体之间抗剪强度的发挥,使套板附近的部分土体发生屈服,在主桩背侧及桩内侧形成颗粒挤压压实区,主桩和桩后挤压压实区土体共同形成稳定的土拱拱脚,作用于土拱的土压力转化为轴向力并沿拱圈传至拱脚处^[6-8]。具体表现为在相同高度的情况下,拱顶位置的轴向土压力大于相邻区域的土压力,土拱内外侧的水平土压力发生明显的变化,传至套板的土压力逐渐减小,传至主桩的土压力逐渐增大。土拱效应的发挥程度和作用范围可用土压力的变化程度和分布情况来判断。



注: 1. 跨中截面的法向土压力, 2. 跨中截面的水平土压力, 3. 作用于主桩的土压力。

图1 主桩套板结构的土拱传力原理

2 土拱效应的数值模拟

Chen Chienyuan^[9]通过有限元模拟抗滑桩与土坡的相互作用,对比三维、二维的桩间土体位移等值线图发现,采用平面应变已经能较好地模拟桩土相互作用的三维特征和桩间土拱效应。Liang 等^[10]、韩爱民等^[11]、高亚微^[12]、陈羽^[13]也分别采用平面应变模型研究了桩土结构中有关土拱的问题并取得了可靠成果。从前人的研究成果可以看出,采用平面应变模型能够较好地模拟桩间土拱效应,且是一种行之有效的办法。虽然桩后土体在一定高度范围内自上而下均有土拱效应,但对于有锚碇结构的板桩墙体来说对桩体作用最直接、最关键的则为拉杆所在的截面位置处。参考前人研究成果,本文以京唐港 32# 泊位^[14]为例,选取2个计算单元利用 ABAQUS 软件建立拉杆所在截面的平面应变模型。如图2所示,坐标系 oxy 的原点在套板跨中位置, x 轴为垂直荷载方向, y 轴为平行荷载方向, a 、 b 分别为主桩横截面长度和宽度, L 为桩间净距,拉杆长度取 $15b$; 主桩和套板采用弹性模型,土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型^[15],结构与土间的摩擦系数为 0.5; 拉杆的一端和主桩绑定,另一端固定,左右边界采用关于 x 轴的对称约束; 码头顶面高程 3.35 m, 拉杆高程 1.35 m, 上部施加均布荷载 q , 考虑土体开挖产生的压力差取 2 倍的平均土压力 e' (约 30 kPa); 桩板和土体采用 CPE8R 单元模拟, 拉杆采用 T2D2 单元模拟^[16]; 主桩截面近似采用 I 形, 套板通过横向叠放的方式嵌套在主桩中间, 主桩和套板刚性连接。模型各部分材料参数见表 1。

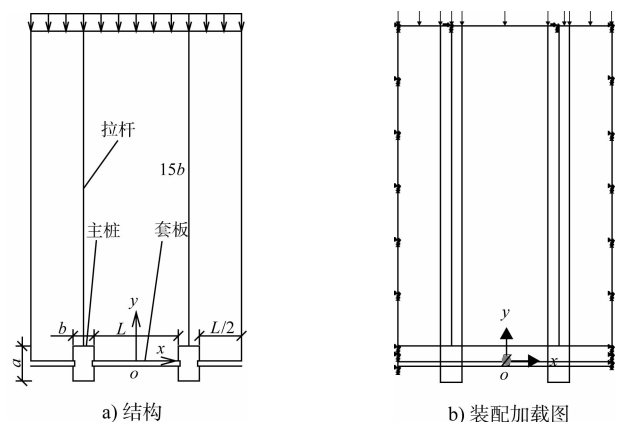


图2 模型示意

表1 模型主要物理力学参数

材料类别	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
土体	1.93	10.44	0.26	4	35
主桩和套板	2.50	3.15×10^4	0.20		
拉杆	7.85	1.95×10^5	0.30		

3 结构尺寸对土拱效应的影响

3.1 主桩净距的影响

主桩截面尺寸取 $0.6 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ (y 轴方向), 套板厚度取 0.15 m , 土体内摩擦角取 35° 、粘聚力取 4 kPa 分别建立主桩净距为 1.8 、 2.4 、 3.0 、 3.6 m 的有限元模型。为避免桩土接触面棱角附近的应力集中对结果造成干扰, 后处理云图中没有显示桩周 0.15 m 范围内的土体, 处理后的应力云图见图3 (S_{22} 表示 y 轴方向应力)。由图3可知, 主桩套板结构产生了明显的土拱效应, 改变了结构的受力状态。

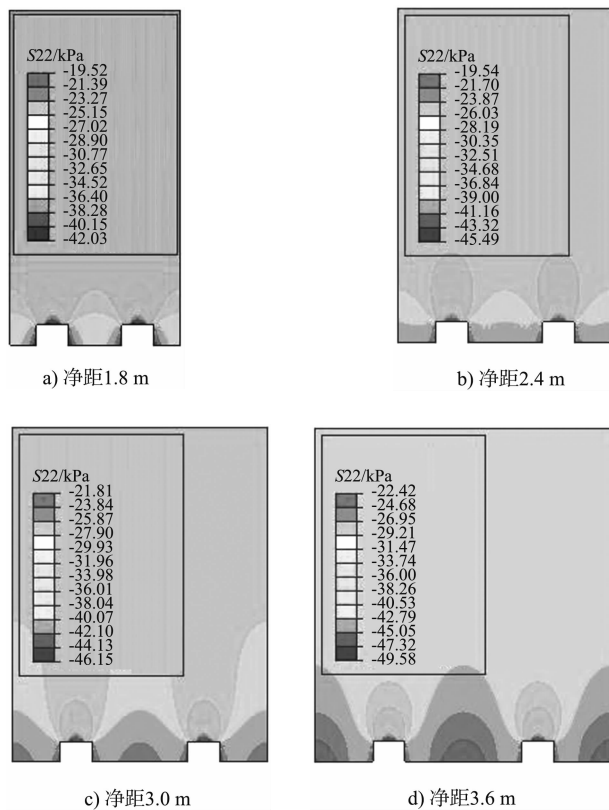


图3 不同主桩净距的土体 S_{22} 应力云图

图4表示 $x=0$ 截面上 $y=6.0 \sim 0 \text{ m}$ 每隔 0.15 m 处的土体 S_{22} 应力曲线, 由图4可知, 主桩净距为 1.8 、 2.4 、 3.0 、 3.6 m 时, 土体的土压力分别

在距离套板大约 3.1 、 3.5 、 4.2 、 4.5 m 处开始折减, 这说明随着桩距的增加土拱高变大, 土拱效应作用的范围逐渐扩大。桩距 1.8 m 时在靠近套板位置时土体应力出现反弯, 主要是因为桩距较小时套板的相对刚度较大, 对土体产生了较强的阻挡作用。由图5可知, 在远离套板位置的 $y=4 \text{ m}$ 和 $y=3 \text{ m}$ 截面处的应力曲线比较平直, 几乎没有产生土拱效应; 在靠近套板位置的 $y=2 \text{ m}$ 和 $y=1 \text{ m}$ 截面处应力曲线出现了明显的起伏变化, 套板跨中和主桩中部的土体应力出现了明显的两极分化, 可见土拱效应的作用范围仅限于结构背侧一定的土体范围内。

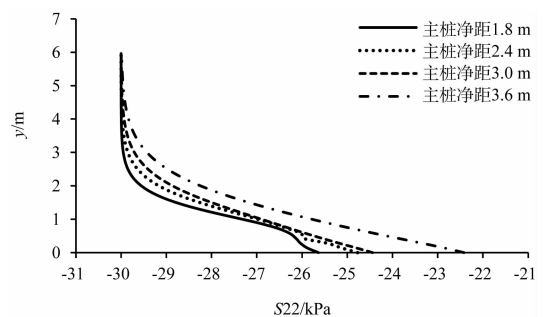


图4 $x=0$ 截面处土体 S_{22} 应力曲线

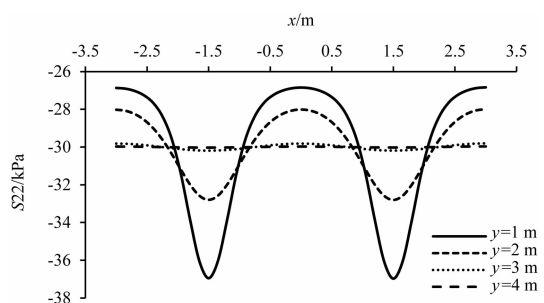
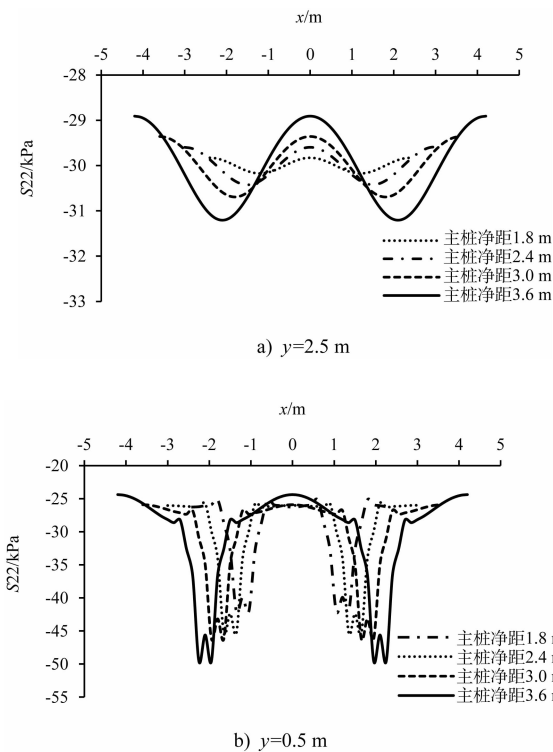
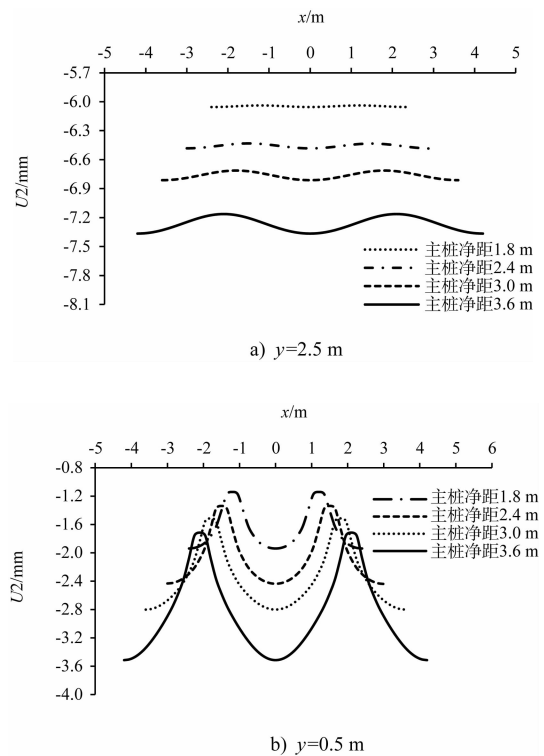


图5 净距 2.4 m 时不同 y 截面的土体 S_{22} 应力曲线

由图6可知, 随着主桩净距的增大, 套板对应位置处的土压力明显变小, 主桩对应位置处的土压力显著变大, 土体应力的传递和转移是土拱效应的直接体现, 这说明在研究的范围内桩距越大土拱效应越明显。对比两图可知靠近结构处的土压力变化幅度较大, 土拱效应的存在大大削弱了套板的土压力。主桩作为卸荷拱的拱脚承受较大的作用力, 其稳定性直接关系到整体结构的安全。另外, 靠近主桩的土体产生应力突变是因为主桩中部受到拉杆的锚碇作用所致。

图6 不同截面处不同桩距下的土体 S_{22} 应力曲线图7 不同截面处不同桩距下的土体 U_2 位移曲线

由图7 (U_2 表示 y 轴方向位移) 可知, 随着桩距的增加主桩和套板的土体位移均有明显增加。在距离结构较远处 ($y = 2.5$ m 截面), 桩距较小时套板和主桩的土体位移基本相同, 桩距较大时土体位移曲线出现了明显的起伏变化, 这主要是因为桩距较小时土拱效应作用的范围较小, 选取的研究截面不在土拱作用的范围内所致; 在距离结构较近处 ($y = 0.5$ m 截面), 套板处位移明显大于主桩处位移, 且前者变化幅度比后者大得多, 这主要是因为桩距的加大导致套板的柔性变大, 变形能力增强, 而主桩受到拉杆的锚定作用变形能力较小。另外, 提取不同桩距下套板的土压力值并计算, 结果表明主桩净距从 1.8 m 增加到 3.6 m 时, 套板所受的平均土压力从 23.00 kPa 增加到 25.11 kPa, 即当主桩净距增大到原来的 2 倍时, 套板所受土压力只增加到原来的 1.09 倍。因此, 为降低工程造价、提高施工速度, 可以在设计规范允许的水平位移条件下适当增加主桩净距。

3.2 套板厚度的影响

主桩截面尺寸取 0.6 m \times 1.0 m, 净距取 2.4 m, 土体内摩擦角取 35° 、粘聚力取 4 kPa 分别建立套板厚度为 0.15、0.20、0.25、0.30 m 的有限元模型。在 $x = 0$ 截面上, 在 $y = 6.0 \sim 0$ m 之间每隔 0.15 m 提取一个土体 S_{22} 应力值, 绘制距离应力变化曲线, 发现套板厚度为 0.15、0.20、0.25、0.30 m 的土压力分别在距离套板约 4.5、4.3、4.0、3.6 m 位置处开始折减, 这说明套板厚度增加土拱拱高减小, 土拱效应作用的范围逐渐减小。当套板厚度为 0.25 m 和 0.30 m 时, 在靠近套板的地方出现应力稍微增大再减小的现象, 这主要是因为套板刚度较大, 对土体产生了较强的阻挡作用所致。

由图 8 可知, 随着套板厚度的增加, 主桩和套板附近土压力的差值逐渐减小, 土拱效应呈越来越弱的趋势, 这主要是因为套板厚度越大其刚度越大, 限制了土体间的相对位移, 减弱了土体抗剪强度的发挥。随着套板厚度的增加, 套板附近土体位移的减小并不十分明显, 当套板厚度从 0.20 m 增加到 0.30 m 时, 跨中土体位移从 2.14 mm

减小到 1.98 mm，即套板厚度增大到原来的 1.5 倍时，土体位移仅减小到原来的 0.93 倍；且由图 9 可知，随着套板厚度的增加，套板所受的土压力有增大趋势，但当套板厚度增加到一定程度后，套板所受的土压力基本保持不变；即当套板厚度达到一定程度后，继续增加套板厚度，既不能有效减小套板位移，也不能明显减小套板所受土压力的大小，因此在满足挡土和防渗的条件下为降低工程造价可适当减小套板厚度。

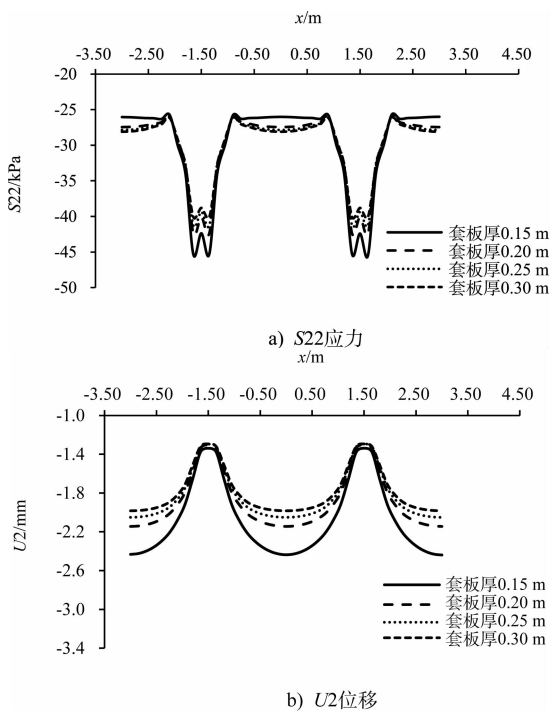


图 8 y = 0.5 m 截面处的土体 S22 应力和 U2 位移曲线

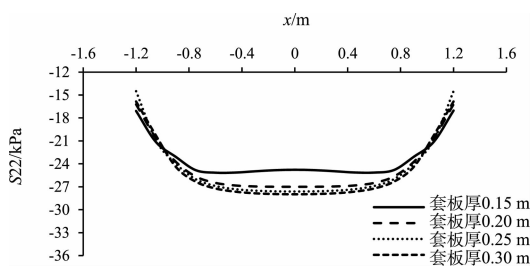


图 9 不同厚度套板所受土压力曲线

3.3 主桩截面尺寸的影响

主桩净距取 2.4 m，套板厚度取 0.15 m，土体内摩擦角取 35°，粘聚力取 4 kPa，分别建立主桩截面为 0.6 m × 1.0 m 和 1.0 m × 0.6 m 的有限元模型。

在 x = 0 截面上，在 y = 6.0 ~ 0 m 之间每隔 0.15 m 提取一个土体 S22 应力值，绘制距离应力变化曲线，发现截面为 0.6 m × 1.0 m 和 1.0 m × 0.6 m 的土压力，分别在距离结构大约 4.3 m 和 3.8 m 处开始折减，并在套板位置处分别减小到最小值 26.42 kPa 和 24.71 kPa，这说明截面为 0.6 m × 1.0 m 的土拱拱高较大，土拱作用范围较大。另外，由图 10 可知，不同的主桩截面尺寸对主桩和套板的土体应力和位移都有较大的影响，相同的主桩截面积，0.6 m × 1.0 m 的套板和主桩处的土体应力差更大，土体的相对位移也较大，土拱效应表现得较为显著；这一方面是因为截面为 0.6 m × 1.0 m 的截面惯性矩较大，抗弯刚度较大，减弱了主桩的土体位移，增加了主桩和套板土体之间的相对位移，促使土颗粒之间抗剪强度的充分发挥；另一方面是因为 0.6 m × 1.0 m 的截面增加了桩侧与土体之间的接触面积，增大了桩土之间的摩擦阻力，增加了摩擦拱脚的稳定性。提取套板所受土压力的数据并计算，结果表明前者所受的平均土压力也相对后者小得多。因此对于相同截面积的主桩，选择使截面抗弯刚度大，即截面惯性矩大的尺寸对工程具有明显的实际意义。

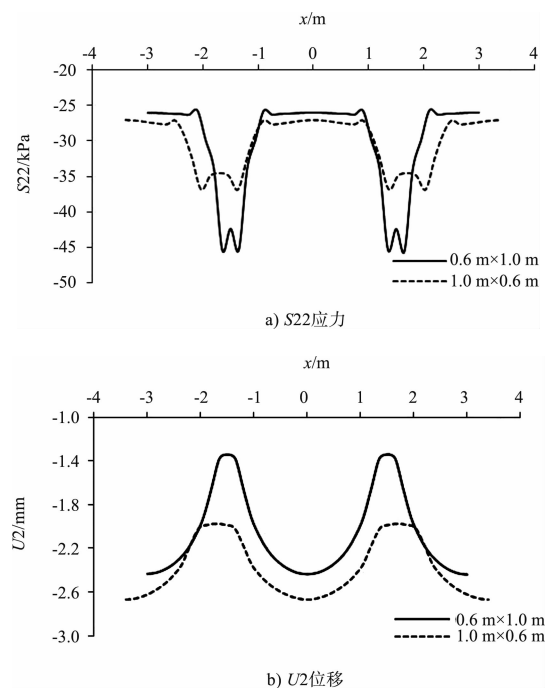


图 10 y = 0.5 m 截面处的土体 S22 应力曲线和 U2 位移曲线

4 土体性质对土拱效应的影响

4.1 内摩擦角的影响

主桩截面尺寸取 $0.6\text{ m} \times 1.0\text{ m}$,净距取 2.4 m ,套板厚度取 0.15 m ,土体粘聚力取 4 kPa 分别建立内摩擦角为 20° 、 28° 、 35° 和 42° 的有限元模型。在 $x=0$ 截面上,在 $y=6.0\sim 0\text{ m}$ 之间每隔 0.15 m 提取一个土体 $S22$ 应力值,绘制距离应力变化曲线,发现内摩擦角为 20° 的土体土压力在距离结构大约 2.6 m 的位置处开始折减,而内摩擦角为 28° 、 35° 和 42° 的土体,均在距离结构大约 4.1 m 的位置处开始折减。这说明在一定范围内内摩擦角越大土拱拱高越大,土拱效应作用的范围越大;当内摩擦角增大到一定程度后,拱高基本保持不变,土拱效应作用的范围也不再扩大。

由图11可知,土体内摩擦角对土拱效应有一定的影响,具体表现为摩擦角较小时土拱效应表现较差,土颗粒之间的应力传递较弱,土体之间的应力差很小,套板的土压力也较大;当内摩擦角较大时,土拱效应较为明显,土颗粒之间的应力传递较强,土体之间的应力差较大,套板的土压力也较小。但当内摩擦角增大到一定程度后,土体应力曲线基本重合,较大的内摩擦角并未对土拱效应的显著提高产生明显的影响。由上述的土拱力学传递机制和土拱强度理论可知,这主要是因为当内摩擦角达到一定程度后,继续增加土体的内摩擦角,虽然提高了土颗粒之间的抗剪强度,但在外荷载等条件保持不变的情况下,并未充分发挥出因内摩擦角增大而提高的这部分土体抗剪强度,造成土体抗剪强度的富裕,出现较大内摩擦角的继续增大,并未对土拱效应产生显著影响的现象。

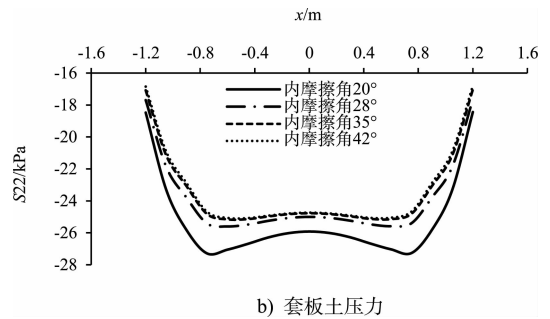
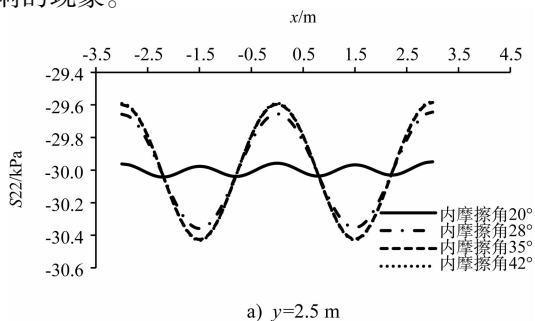


图11 $y=2.5\text{ m}$ 截面处和套板所受土压力的应力曲线

4.2 粘聚力的影响

主桩截面尺寸取 $0.6\text{ m} \times 1.0\text{ m}$,净距取 2.4 m ,套板厚度取 0.15 m ,土体内摩擦角取 35° ,分别建立非黏性土、粘聚力为 4 、 14 和 24 kPa 黏性土的有限元模型,由于ABAQUS软件中粘聚力必须输入一个值,所以在非黏性土模型中,粘聚力的大小输入了一个 0.01 kPa 的极小值来模拟非黏性土。在 $x=0$ 截面上,在 $y=6.0\sim 0\text{ m}$ 之间每隔 0.15 m 提取一个土体 $S22$ 应力值,绘制距离应力变化曲线,发现非黏性土的土体土压力在距离结构约 3.7 m 处开始折减,而粘聚力为 4 、 14 、 24 kPa 的土体,均在距离结构约 4.3 m 处开始折减。这说明非黏性土的土拱拱高较小,土拱效应作用的范围较小;黏性土的土拱拱高基本相同,粘聚力对黏性土的土拱效应虽然有一定的影响,但影响较小。

由图12可知,土体的粘聚力对土拱效应有一定的影响,非黏性土的土拱效应较差,套板的平均土压力也相对较大;但在黏性土中粘聚力对土拱效应的影响并不十分明显,土体应力应变曲线基本保持一致。由上述土拱力学传递机制和土拱强度理论可知,这主要是因为当粘聚力达到一定程度后,继续增土体的粘聚力,虽然提高了土颗粒之间的抗剪强度,但在外荷载等条件保持不变的情况下,并未充分发挥出因粘聚力增加而提高的这部分土体抗剪强度,造成土体抗剪强度的富裕,出现了增大土体粘聚力并未对土拱效应产生显著影响的现象。

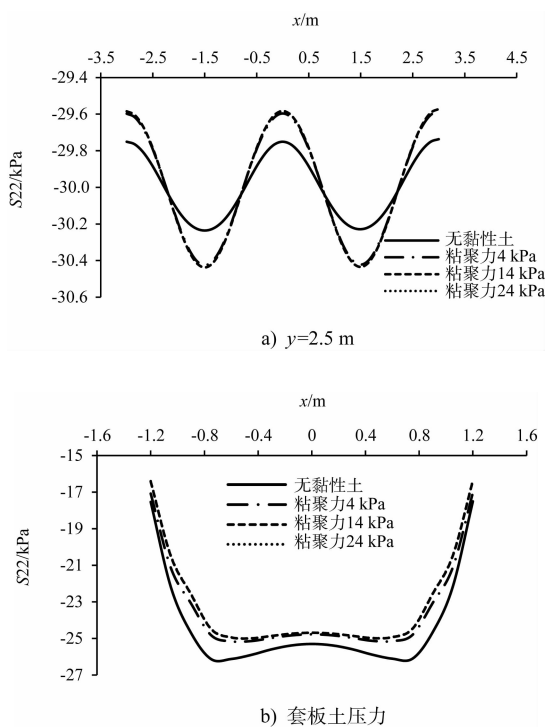


图12 $y=2.5\text{ m}$ 截面处和套板所受土体应力曲线

5 结论

1) 综合考虑套板所受的平均土压力和设计规范允许的结构位移, 为充分利用土拱效应、缩短施工工期, 可在一定范围内适当增加主桩净距。增加套板厚度不利于土拱效应的发挥, 且不能明显减小套板位移和套板所受土压力的大小, 因此在满足挡土、抗渗以及配筋的要求下, 为降低工程造价可在一定范围内适当减小套板厚度。相同截面积的不同主桩截面尺寸对土拱效应的影响较大, 选择使截面抗弯刚度大的尺寸对工程具有明显的实际意义。

2) 土体的内摩擦角和粘聚力对土拱效应具有一定的影响, 小摩擦角和非黏性土的土拱效应较弱; 较大内摩擦角和黏性土的土拱效应较为明显, 但较大的内摩擦角和黏性土的粘聚力对土体土拱效应的提高并不明显。因此对于土质较好的码头, 可以充分利用其土拱效应进行设计; 但对于土质较差的地质条件, 要充分考虑土体性质的影响, 并保守设计。

参考文献:

- [1] 陈万佳. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997: 129-133.
- [2] 杨明. 桩土相互作用机理及抗滑加固技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2008: 60-61.
- [3] 朱碧辉. 预应力锚索复合土钉支护数值分析及方案比选研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013: 38-39.
- [4] 吴子树, 张利民, 胡定. 土拱的形成机理及存在条件的探讨[J]. 成都科技大学学报, 1995(2): 15-19.
- [5] 杨雪强, 何世秀, 庄心善. 土木工程中的成拱效应[J]. 湖北工学院学报, 1994(1): 1-7.
- [6] 郑学鑫. 抗滑桩桩间土拱效应及其有限元模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2007: 12-20.
- [7] 吴建川. 典型堆积层滑坡抗滑桩土拱形成机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 51-55.
- [8] 张建华, 谢强, 张照秀. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(4): 699-703.
- [9] Chen Chienyuan. Numerical analysis of slope stabilization concepts using piles [D]. Los Angeles: University of Southern California, 2001: 191-196.
- [10] Liang R, Zeng S. Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization[J]. Soil and foundation, 2002, 42(2): 83-92.
- [11] 韩爱民, 肖军华, 梅国雄. 被动桩中土拱形成机理的平面有限元分析[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2005(3): 89-92.
- [12] 高亚微. 遮帘式板桩码头结构的土压力计算及优化设计[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012: 27-31.
- [13] 陈羽. 遮帘式板桩码头计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 14-15.
- [14] 黄伟. 全遮帘式板桩码头结构受力变形分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 47-49.
- [15] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 16-20.
- [16] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 44-60.

(本文编辑 武亚庆)