

DOI: 10.11779/CJGE201501002

单锚板桩结构的工作机理研究

蔡正银¹, 侯伟^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 板桩结构作为支挡建筑物广泛应用于基坑、码头等工程中, 其涉及的主要问题是土压力作用下板桩的受力和变形, 而土压力与变形又是相互关联的, 属于典型的土与结构相互作用问题。以单锚板桩码头结构为例, 基于有限元数值模拟, 探讨了板桩结构的工作机理, 研究了码头港池开挖过程中前墙两侧的土压力分布、结构的内力与变形、地基土的应力应变关系, 以及地基不同位置处土单元的主应力旋转等问题。研究表明: 正确地模拟土体的应力应变关系是分析此类问题的关键; 港池开挖过程中, 前墙陆侧土压力向主动方向发展, 而海侧土压力则向被动方向发展; 港池开挖造成了土体单元的主应力方向旋转, 特别是港池海侧下方的土体主应力方向旋转剧烈。

关键词: 板桩码头; 数值模拟; 土压力; 主应力方向

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)01-0029-06

作者简介: 蔡正银 (1965-), 男, 江苏海安人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 从事岩土基本理论和试验研究工作。E-mail: zycail@nhri.cn。

Mechanism of sheet-pile structure with a single anchorage

CAI Zheng-yin¹, HOU Wei^{1, 2}

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The sheet-pile structure is extensively used in deep excavations and wharfs as the retaining structure. The key issue is the forces acting on the sheet piles as well as their deformations under the earth pressure. However, the deformations closely relate to the earth pressure. This issue becomes a typical problem of soil-structure interaction. Based on FEM numerical simulations, the working mechanism of the sheet-pile structure is investigated. The following aspects are studied with regard to a wharf case during its excavation: distribution of earth pressures at both sides of the front wall; internal forces and deformation of the structure, stress-strain relationship of foundation soils and rotation of the principal stresses. The results show that accurate modeling of stress-strain relationship of soils is the key to this kind of problem. During the excavation of the harbor basin, the seaward earth pressure of the front wall develops towards the active direction, while the landward one develops towards the passive direction. The excavation induces the rotation of the direction of the principal stress of soils, especially that of the soils under the harbor basin at the seaward side of the front wall.

Key words: sheet-pile wharf; numerical simulation; earth pressure; direction of principal stress

0 引言

板桩结构在基坑工程、护岸工程、码头工程中得到了普遍的应用, 主要是作为支挡结构抵抗侧向土压力作用。在板桩的设计分析中, 主要外部荷载为作用于板桩上的土压力^[1-4]。以单锚板桩码头为例, 其结构由前墙、锚碇墙和拉杆组成, 如图 1 所示。码头前沿原始状态为水平地面, 港池是开挖出来的, 称之为挖入式港池。港池开挖前, 前墙两侧土压力可以近似认为是静止土压力, 处于平衡状态。随着港池的开挖, 前墙海侧土压力随土层的开挖不断消失, 造成前墙两侧土压力不平衡, 这样前墙陆侧土压力推动前墙不断

向海侧位移。随着前墙位移的不断增大, 陆侧的土压力也随之向“主动”方向发生变化(变小), 而土压力的变化又影响了前墙的变形与受力情况, 这是典型的土和结构相互作用问题^[5-6]。同样, 在码头运行过程中, 码头面载作用于地基, 也造成前墙陆侧土压力的增加, 从而间接影响结构的受力与变形。总之, 在港池开挖和码头表面堆载过程中, 前墙两侧的土压力在不断地变化, 始终处于“主动”和“被动”之间的某一个状

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2012AA112510)

收稿日期: 2014-05-20

态,其大小与结构作用面处土体的位移有关。可以想象,板桩结构工作特性既取决于土的变形特性,又与结构本身的刚度有关^[7-8]。

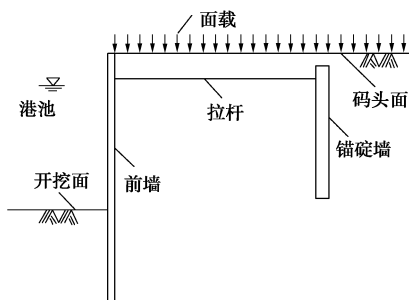


图1 单锚板桩码头示意图

Fig. 1 Profile of sheet-pile wharf

从数值分析的角度来看,要合理地模拟板桩结构与土的相互作用,必须解决两个关键技术问题。首先能正确描述地基土层的变形特性,其次是能合理地模拟土和结构的接触^[9-10]。现有的计算一般将板桩结构作为线弹性体,用线弹性模型来分析板桩的应力应变关系,而将土体作为非线性弹性体,采用非线性弹性模型来模拟土体的本构特性。也有一些计算采用简单的弹塑性模型如 Mohr-Coulomb 模型、D-P 模型等来描述土体的本构关系。这些模型主要适用于极限分析,如分析结构的强度和整体稳定性。而要合理地分析板桩结构的变形特性,显然是有问题的。

板桩结构分析的另一个关键技术问题就是如何正确地模拟土与结构的接触。由于板桩与土体的力学性质差异很大,特别是模量,板桩与土体之间形成接触面或接触带,如果直接采用土和结构体各自的本构关系分别进行计算并直接耦合,会带来很大的问题。目前一般采用接触面单元来模拟土与结构体的接触性质,包括薄层单元、无厚度单元等,这些单元的计算参数基本上都为假定,无法真正地反映接触面的特性,很难得到合理的结果。

本文基于在 ABAQUS 有限元平台上开发的土与结构相互作用计算软件,并利用“南水模型”来描述地基土的应力应变关系,采用基于接触力学的接触模型来模拟土与板桩结构的接触面特性,研究了单锚板桩码头结构的工作机理,探讨了板桩结构与地基的相互作用规律。

1 单锚板桩码头方案

为了研究单锚板桩的受力与变形特性,以京唐港#32 泊位 10 万吨级板桩码头结构为背景,并对码头结构和地基土层进行了概化,模拟的码头剖面如图 1 所示。前墙厚 1.0 m,墙高 32.7 m。锚碇墙厚 1.2 m,墙高 19 m,墙顶与码头面距离为 1.2 m,前墙和锚碇墙均为钢筋混凝土地下连续墙结构,间距为 40 m。前墙

和锚碇墙之间设置 $\phi 95$ 的钢拉杆,拉杆距地面 3.7 m,钢拉杆水平方向等间距布置,间距为 2.75 m,长度为 40 m。模拟的码头前沿港池水面距码头面为 5.73 m,水深为 15.47 m。

为了更好地获得单锚板桩码头的受力与变形特性,模拟的地基土层只有一层细砂层。土层的基本物理力学性质:重度 $\gamma=19.7 \text{ kN/m}^3$,含水率 $w=21.9\%$,孔隙比 $e=0.63$,黏聚力 $c=0.0 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi=32.0^\circ$,压缩模量 $E_s=39.4 \text{ MPa}$ 。

为了掌握地基土的变形特性,进行了细砂的三轴排水剪切试验,根据试验结果整理的细砂的南水模型参数: $c=0.0 \text{ kPa}$, $\varphi=32.0^\circ$, $R_f=0.92$, $K=476$, $K_{ur}=952$, $n=0.38$, $c_d=0.012$, $n_d=0.5$, $r_d=0.91$ 。

2 三维有限元数值分析模型的建立

2.1 模拟范围与边界的确定

考虑到沿码头纵向结构的对称性,并考虑边界效应,确定数值模拟的范围为深度 60 m,长度 80 m,宽度(纵向) 5.5 m。经过扩大模拟范围的数值分析验证,选择的模拟范围基本合理。这样,模拟的前墙、锚碇墙和地基土层的宽度都为 5.5 m,沿宽度(纵向)方向设置两根拉杆,拉杆间距为 2.75 m,每根拉杆距前后侧表面的距离都是 1.375 m。

2.2 地基土层的模拟

地基模型为长方体,高度为 60 m,长度为 80 m,宽度为 5.5 m,如图 2 所示。模拟的地基为水平地基,模拟过程中不考虑土层的空间变化,针对细砂土,采用空间实体单元(C3D10M)模拟,土体的应力应变关系采用南水双屈服面弹塑性本构模型模拟。为了让码头结构能够进入地基中,地基模型事先给码头结构留出相应的空间,图 2 中实线圈定的位置就是给前墙和锚碇墙预留的空间。

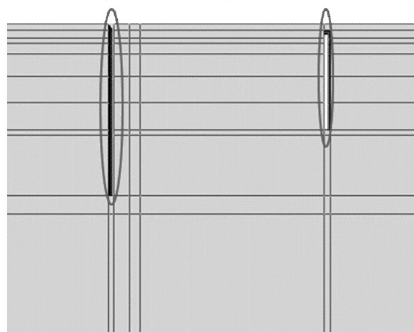


图2 地基模型

Fig. 2 Model of foundation soils

2.3 板桩码头结构的模拟

模拟的板桩码头结构如图 3 所示。前墙和锚碇墙都为地下连续墙结构,采用钢筋混凝土材料,数值模

拟时采用实体单元模拟 (C3D10M), 本构模型采用 ABAQUS 有限元平台自带的线弹性模型。钢筋混凝土的模量取为 26 GPa, 泊松比为 0.167。

前墙与锚定墙之间采用拉杆连接。拉杆采用桁架单元来模拟 (T3D2), 以方便获取拉杆的轴力及变形, 并真实输入实际拉杆横截面积, 计算中不考虑拉杆的自重及与土体之间的摩擦力。拉杆的材料本构模型也采用线弹性模型, 钢材的模量取为 206 GPa, 泊松比为 0.3。

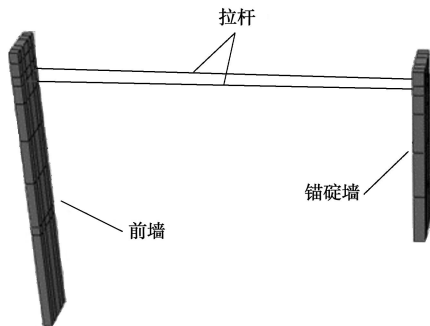


图3 码头结构模型

Fig. 3 Model of wharf structure

2.4 接触的模拟

前墙和地基土层、锚碇和地基土层的各个面之间都存在接触, 数值模拟时采用基于接触力学思想的接触本构模型。墙、土接触假定为有限滑移, 法向为硬接触, 接触压力假定不衰减。拉杆与墙体之间的链接采用绑定链接, 点面接触的方式。

2.5 墙体施工与港池开挖过程的模拟

对墙体施工及港池开挖的模拟, 则采用单元的“生死”功能, 所谓单元的“死”, 就是将单元的刚度和质量乘以一个极小值, 这样其刚度和质量近似为零, 使这部分单元在计算中扣除。所谓“生”即单元的激活, 使单元回复原来的刚度和质量, 这时单元上既没有初始应力, 也没有初始应变。通过激活前墙、锚碇墙和拉杆, 来模拟结构的施工过程, 通过杀死开挖部分单元来模拟港池的开挖。利用单元的“生死”功能, 模拟结构施工及港池开挖, 这与实际工程的工况基本一致。

2.6 初始应力场的确定

地基初始应力场的模拟对于具有复杂本构关系的非线性问题和接触问题的计算非常重要, 是后继分析正确与否的关键。在板桩码头施工前, 地基为水平成层地基, 假设已固结完成, 土体处于自重应力下的平衡状态, 地基中的水平应力可以视为静止土压力, 而这个力就是作用于结构上的初始侧压力。静止土压力等于自重应力乘以静止土压力系数, 因此如何确定地基的静止土压力系数非常重要。本次数值分析中细砂

的静止土压力系数取 0.45。

3 单锚板桩的工作机理

3.1 单锚板桩的变形与受力情况

图 4 是计算得到的港池开挖完成后 (开挖深度 21.2 m) 地基的水平位移等值线图。从图中可以发现地基土体整体向港侧发生水平位移, 最大的位移位于前墙陆侧上部位置。

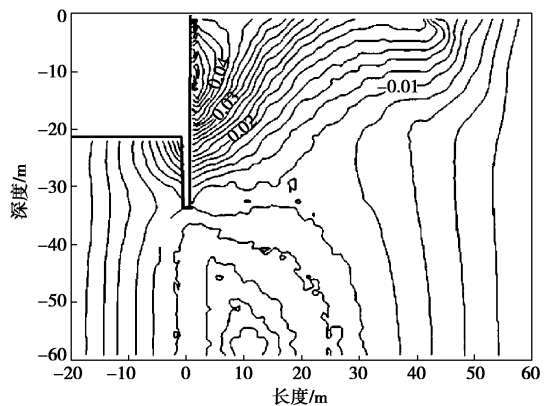


图4 地基水平位移等值线

Fig. 4 Contours of horizontal displacement of foundation

单锚板桩码头前墙的水平位移和土压力如图 5, 6 所示。从图 5 中可以发现, 随着港池开挖深度的不断增加, 由于前墙陆侧的土压力作用, 前墙不断向港侧位移, 最大位移发生在距地面约 12 m 的地方, 大小为 5.2 cm。从图 6 中可以发现, 由于前墙发生向海侧的位移, 其陆侧土压力由静止状态向主动方向变化(变小), 同一水平位置位移越大, 土压力变化越大, 土压力最大的变化发生在前墙的中部。到了前墙的底部, 由于水平位移比较小, 引起的侧向土压力变化也比较小, 基本接近于静止土压力状态。开挖完成后前墙的整体土压力分布基本呈“R”型, 这与许多现场观测结果是一致的。

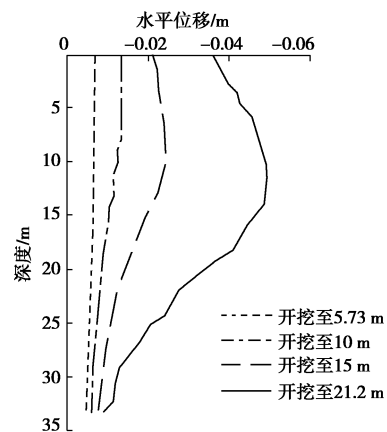


图5 前墙水平位移

Fig. 5 Horizontal displacements of front wall

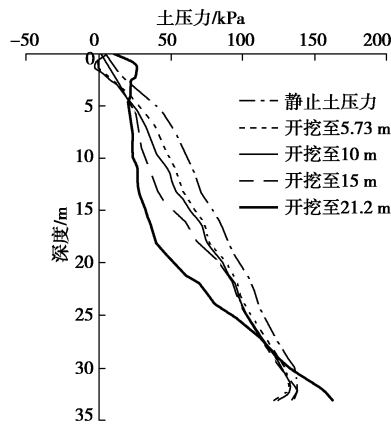


图 6 前墙陆侧土压力

Fig. 6 Earth pressures on front wall at landward side

图 7 是开挖面以下前墙海侧土体的土压力分布。随着开挖深度的增加，前墙整体向海侧位移。开挖至 21.2 m 时，前墙底部向前移动了 0.95 cm，开挖面处墙体向前移动了 3.1 cm。在整个开挖过程中，海侧土压力向“被动”方向发展，不断地增加。

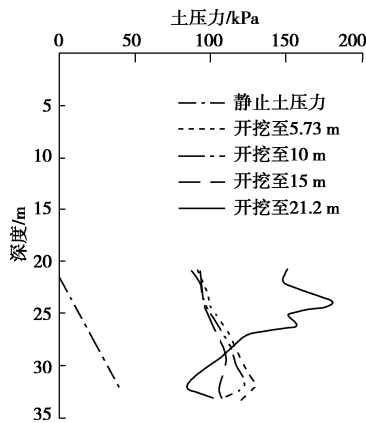


图 7 前墙海侧土压力

Fig. 7 Earth pressures on front wall at seaward side

图 8 是港池开挖过程中前墙的弯矩分布。从图中可以发现在整个开挖过程中，前墙上部出现正弯矩，而下部出现负弯矩。当开挖完成后，最大正弯矩距墙

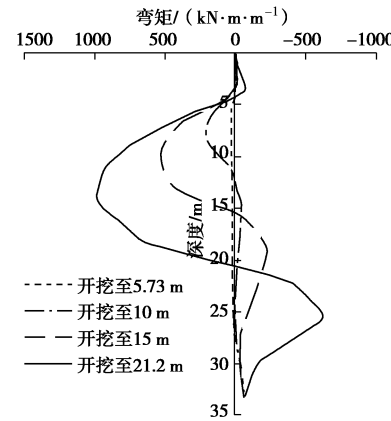


图 8 前墙单宽弯矩

Fig. 8 Bending moments of front wall

顶深度为 14.3 m，其单宽弯矩为 983.3 kN·m/m。最大负弯矩距墙顶深度为 25.2 m，其单宽弯矩为 -616.7 kN·m/m。

3.2 地基中土体的应力应变关系

从前面的分析可知，前墙陆侧的土体都是向海侧方向发生位移，土压力随开挖深度的增加向主动方向逐渐减小，而竖向应力变化不大，其应力路径相当于三轴条件下的侧向减载压缩试验 ($\Delta\sigma_1=0$ ， $\Delta\sigma_3<0$)，如图 9 中的应力路径 3。事实上，由于前墙位移随深度而变化，导致土体中的主应力方向发生旋转，不再是严格意义上的三轴状态，下节将会详细讨论这个问题。

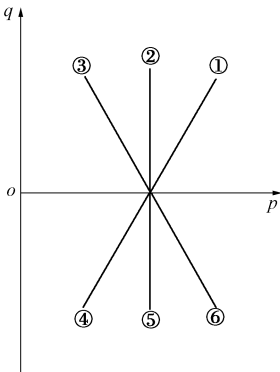


图 9 土体应力路径

Fig. 9 Stress paths of soils

为了揭示墙后土体的应力应变规律，在深度分别为 3.7, 15.0, 32.7 m，靠近前墙陆侧的地基中取 3 个土体单元，图 10 所示是计算得到的不同位置处土体单元的应力应变关系。从图中可以发现，在锚碇点（距地面 3.7 m）处，随着剪应变的增加，剪应力也发生一定程度的增加，当剪应变增加到 0.063%后，剪应力反而降低。从总体上来看，前墙陆侧土体的剪应变值不大，最大只有 0.2%左右，位置为靠近前墙底部。墙后土体的变形特性显示，在小应变条件下，土体的变形以弹性变形为主，应力应变曲线的类型总体为应变硬化型。

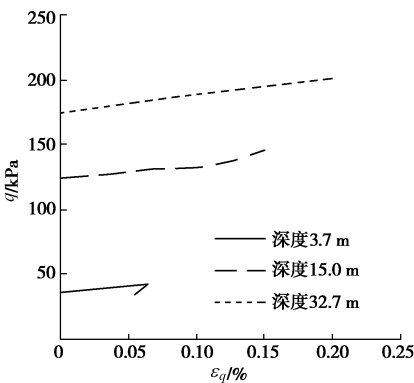


图 10 前墙陆侧土体应力应变关系

Fig. 10 Stress-strain relationship of soil elements at landward side of front wall

图 11 所示是前墙海侧开挖面以下深度分别为 21.2, 32.7 m, 靠近前墙的地基中两个土体单元的应力应变曲线, 随着剪应变 (绝对值) 的增加, 剪应力 (绝对值) 先减小后增加。对于该区域的土体, 其变形特性受两个因素的影响: ①由于上部土层的不断开挖, 土体单元表现为竖向卸载; ②由于前墙不断地向前位移, 墙体海侧土压力不断增加, 土体单元表现为侧向加载。当开挖深度较浅时, 竖向卸载起主要作用, 此时竖向应力大于水平向应力, 偏应力大于零。而当开挖到某一深度, 由于侧向土压力的不断增加, 使得竖向应力小于水平向应力, 土体的偏应力变为负值, 此时土体的应力路径相当于图 9 中的路径 4 和 6 的组合。此外, 不管是侧向加载, 还是竖向卸载, 土体单元都发生竖向的伸长, 类似三轴伸长过程, 只不过主应力发生了旋转, 不再是三轴状态。

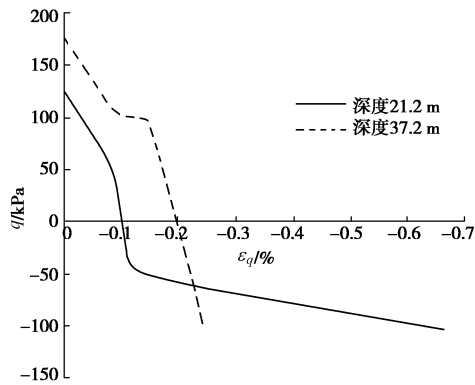


图 11 前墙海侧土体应力应变关系

Fig. 11 Stress-strain relationship of soil elements at seaward side of front wall

图 12 所示为地面以下 10 m 距前墙陆侧分别为 5, 10, 15, 20 m 处, 各土体单元的剪应变随开挖过程的变化规律。总体来说, 在开挖的任一阶段, 离前墙越远, 土体单元的剪应变越小。随着开挖深度的不断加大, 各处的土体单元的剪应变都在不断的加大。当开挖到 21.2 m (开挖完成, 第 4 步) 时, 所有点的剪应变都急剧增大, 距前 5 m 处已经达到墙 0.23%。总之, 在同一深度, 离墙越近剪应变发展越快, 随着距离的增大, 剪应变呈逐渐衰减的趋势。

3.3 前墙两侧土体的主应力方向变化规律

在港池开挖前, 天然地基为水平地基, 地基中任一点竖向应力为大主应力 σ_1 , 水平应力为小主应力 σ_3 。由于港池的开挖, 造成前墙向海侧位移, 引起土体应力的改变。随着开挖深度的不断增加, 不仅土体应力的大小发生变化, 主应力方向也发生变化。图 13 是计算得到的土体大主应力方向变化图, 图 14 是前墙陆侧不同深度的土体单元的主应力角 θ 随开挖深度的变

化规律 (此处 θ 是大主应力面与竖向的夹角)。从图中可以发现, 前墙陆侧的土体主应力角变化不大, 在开挖面 (深度 21.2 m) 处, θ 的变化值在 6° 左右, 主要发生在第一步开挖过程中, 随后变化较小。在前墙陆侧靠近底部位置, 主应力方向变化较大, 开挖完成后 θ 从 90° 变为 59° 。

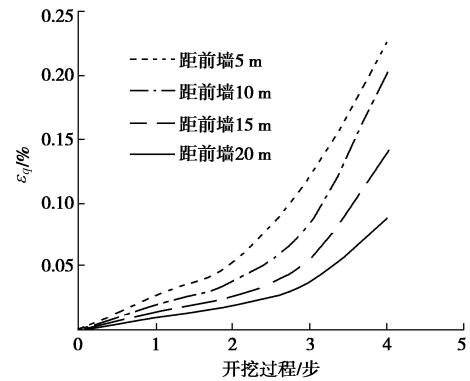


图 12 距离前墙陆侧不同位置处的土体应变

Fig. 12 Variation of strains of soil elements with distances to front wall

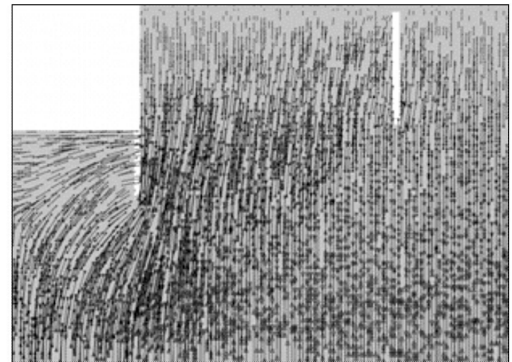


图 13 土体大主应力方向

Fig. 13 Direction of maximum principal stress of soils

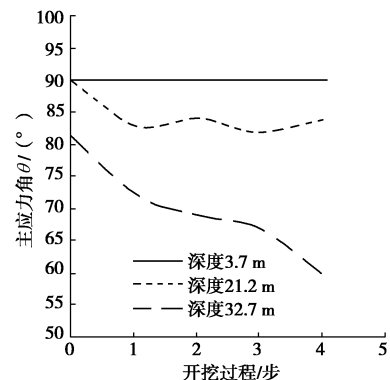


图 14 前墙陆侧土体主应力角

Fig. 14 Angles of principal stress of soils at landward side of front wall

图 15 所示是前墙海侧不同深度的土体单元的主应力角 θ 随开挖深度的变化规律。对于该区域的土

体, 由于开挖引起的竖向卸载和侧向被动土压力引起的侧向加载, 主应力方向发生了剧烈的旋转。在开挖面附近区域, 土体单元的主应力方向几乎发生 90° 的旋转, 水平方向变为大主应力方向。在靠近前墙底部的位置, 主应力角旋转了 80° 左右。

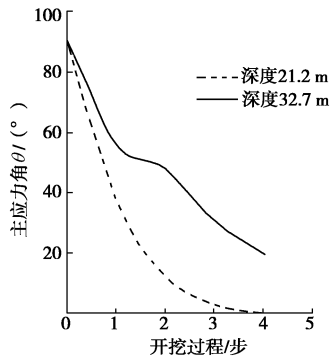


图 15 前墙海侧土体主应力角

Fig. 15 Angles of principal stress of soils at seaward side of front wall

4 结 论

本文利用有限元数值模拟方法探讨了单锚板桩码头工程中土与结构的相互作用规律, 研究了码头开挖过程中前墙两侧的土压力分布、结构的变形、地基土的应力应变关系, 以及开挖过程中地基土单元的主应力旋转等问题。主要结论如下:

(1) 对于单锚板桩问题, 其荷载的变化来源于港池的开挖和码头表面荷载, 最终都表现为侧向土压力作用于码头前墙的陆侧, 从而引起结构和地基土的变形。随着结构和地基的变形, 土压力又在不断的变化。因此从数值计算的角度出发, 要对此类问题进行正确地模拟, 必须合理地描述土体的应力应变关系。

(2) 港池开挖过程中, 前墙陆侧土压力从静止土压力向主动土压力方向发展, 其分布呈典型的“R”型, 墙体中部土压力变化最大。前墙海侧土压力从静止土压力向被动土压力方向发展。

(3) 港池开挖过程中, 前墙陆侧土体的应力应变关系为典型的应变硬化型, 其应力路径相当于三轴侧向卸载压缩过程。前墙海侧土体的应力应变关系比较复杂, 其应力路径相当于三轴侧向加载与竖向减载的“伸长试验”过程。

(4) 港池开挖过程中, 地基中土体单元的主应力方向都发生了旋转, 前墙陆侧大部分土体的主应力方向变化不大, 只有靠近前墙底部的地方有较大的变化, 而海侧土体的主应力方向旋转剧烈, 大主应力方向基本变为水平方向。

参考文献:

- [1] SIPMSON B. Rankine lecture: retaining structure: displacement and design[J]. *Géotechnique*, 1992, **42**(4): 541 - 576.
- [2] 吴明. 深基坑工程若干力学问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. (WU Ming. Study on some problems of soil mechanics in deep excavation engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese))
- [3] FANG Y S, CHENG F P, CHEN R C, et al. Earth pressures under general wall movements[J]. *Geotechnical Engineering*, 1993, **24**(2): 113 - 131.
- [4] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (LI Hai-guang. Design and engineering cases of new retaining structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [5] 刘永绣. 板桩和地下墙码头的设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (LIU Yong-xiu. Design theories and methods for wharfs with sheet piles and diaphragms[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [6] 司海宝, 蔡正银, 俞 缙. 遮帘式板桩码头结构与土共同作用 3D 数值模拟分析[J]. *土木工程学报*, 2012(5): 182 - 190. (SI Hai-bao, CAI Zheng-yin, YU Jin. 3D numerical modeling of pile-soil interaction for covered sheet-piled wharf[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012(5): 182 - 190. (in Chinese))
- [7] ZHANG J M, SHAMOTO Y, TOKIMATSU K. Evaluation of earth pressure under any lateral deformation[J]. *Soils and Foundations*, 1998, **38**(1): 15 - 33.
- [8] CHANG M F. Lateral earth pressure behind rotating walls[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, **34**(2): 498 - 509.
- [9] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. (ZHU Bai-li, SHEN Zhu-jiang. Computational soil mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990. (in Chinese))
- [10] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 广义塑性力学: 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. Generalized plastic mechanics: principles of geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))