

# 深水港码头高承台桩土共同作用数值模拟分析

谢雄耀<sup>1,2</sup>, 黄宏伟<sup>1,2</sup>, 张冬梅<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 某深水港码头方案设计提出了 3 种结构形式: 斜坡堤结构、单排斜顶桩板桩、双排斜顶桩板桩。本文采用平面弹塑性有限元法进行码头施工过程模拟, 重点研究了码头平台沿水平方向位移、桩身轴力与弯矩分布, 并选取了具有典型性的 2 个断面, 持力层分别为微风化花岗岩层与粘土层, 侧重进行了不同方案比较。计算结果很好地反映出了高承台桩基受力变形特点, 并总结出高承台桩土共同作用变形的几点规律, 可为同类工程的建设提供参考。

**关键词:** 码头; 高承台桩; 桩土共同作用; 有限元法; 数值模拟

**中图分类号:** TU473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2006)06-0715-08

**作者简介:** 谢雄耀(1972-), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 主要从事遂道及地下工程等方面的教学和科研。

## Numerical modeling of pile-soil interaction in pile-supported pier of a harbor

XIE Xiong-yao<sup>1,2</sup>, HUANG Hong-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Dong-mei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Pile-supported pier of a harbor was designed as one of three types of structure: project of sloping dike, project of one row of inclined supporting piles, project of two rows of inclined supporting piles. The construction process of pile-supported pier was simulated by a plane finite element method (FEM) with a elasto-plastic constitutive relation of soil. The horizontal displacement in front of pier and distribution of axial force and moment of piles were studied. Two representative sections were chosen to compare different schemes, the supporting layers of which were weak-weathered granite and clayey soil respectively. The results reflected commendably the stress and distortion character of the pile-supported pier. Hereby, some rules about the pile-soil interaction in the pier structure were summarized.

**Key words:** dock; high pile; pile-soil interaction; finite element method (FEM); numerical simulation

## 0 引言

在斜坡堤和斜顶桩码头结构中, 桩基不仅传递上部结构所承受的荷载, 还起着限制岸坡侧向变形的作用, 是典型的被动桩与岸坡相互作用问题, 其受力特点相当复杂。在以往工程实践中, 导致码头位移过大影响装卸桥轨道工作, 甚至码头结构破坏的事故屡见不鲜<sup>[1]</sup>。为此, 研究桩基与土体之间的相互作用及其机理, 使桩基码头的设计更趋完善、合理, 具有重要的意义。采用有限元数值模拟计算能充分研究桩基和土层共同作用的应力和变形, 而且能进行多断面的方案比较研究<sup>[2-4]</sup>。为此在对斜坡堤和斜顶桩与土层共同作用分析中, 采用有限元方法对码头结构变形、桩基础内力等进行分析和模拟。

汇合处, 全长 1.4 km。码头和接岸工程处在第四纪冲海相及海相淤泥质土、粘性土或粉土等土层上, 纵、横向岩面埋深起伏很大。针对工程的地质地貌特点, 设计方案提出了 3 种主要结构形式: 斜坡堤结构、单排斜顶桩板桩、双排斜顶桩板桩。根据方案并结合地质资料, 选取了 12-12、13-13、14-14、15-15、16-16、17-17 等 6 个典型剖面进行分析计算。地质剖面沿码头纵向位置如图 1 所示, 图中尺寸为斜坡堤方案中尺寸。考虑不同的持力层, 以 13-13 剖面(持力层为 V3 层粘土层)、14-14 剖面(持力层为 VI3 层微风化花岗岩层)为例, 斜坡堤和斜顶桩所采用的典型方案如图 2~7 所示。斜坡堤方案采用  $\phi 1300@13000$  钢管桩; 斜顶桩方案中第一排斜顶桩为  $\phi 1700@4500$ , 第二排

## 1 工程实例

某深水港区码头工程地点位于长江口与杭州湾的

基金项目: 上海市科委资助项目 (03DZ12039)

收稿日期: 2005-06-18

斜顶桩为  $\phi 1700@1800$ ，第三排斜顶桩为  $\phi 1200@4500$ 。

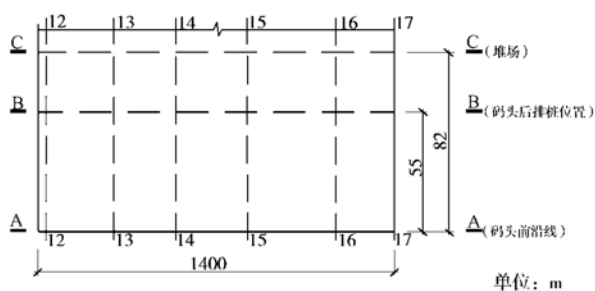


图 1 地质剖面沿码头纵向的位置

Fig. 1 Geological cross-sections along the longitudinal axis of the pier

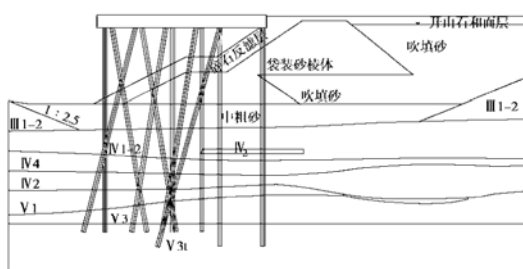


图 2 13-13 剖面斜坡堤方案简化断面示意图

Fig. 2 Simplified cross-section 13-13 with slope protection

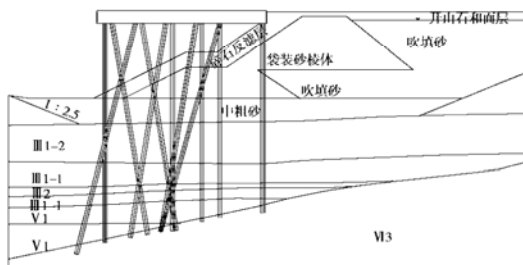


图 3 14-14 剖面斜坡堤方案简化断面示意图

Fig. 3 Simplified cross-section 14-14 with slope protection

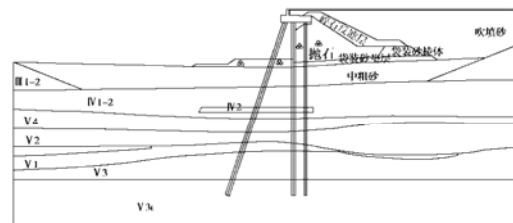


图 4 13-13 剖面单排斜顶桩板桩结构方案简化断面示意图

Fig. 4 Simplified cross-section 13-13 with of one row of inclined supporting niles

由于码头接岸结构座落在 I、III1-1、III1-2 层淤泥质土上，土的强度低、压缩性大，属于典型软弱土层，对这两层浅层淤泥质土进行清淤回填地基处理。将浅

层淤泥和淤泥质土全部清除，清淤边坡采用水平：垂直 = 2.5:1 的坡度，清淤后基槽内用中粗砂置换。斜坡堤后方堆场内的地基处理均采用吹填砂内插塑料排水板，技术参数为：塑料排水板宽 10 cm，厚 4.5 mm，间距 1.5 m，正方形布置。

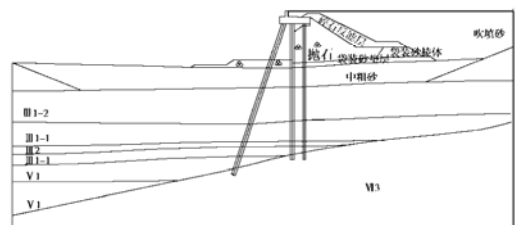


图 5 14-14 剖面单排斜顶桩板桩结构方案简化断面示意图

Fig. 5 Simplified cross-section 14-14 with one row of inclined supporting piles

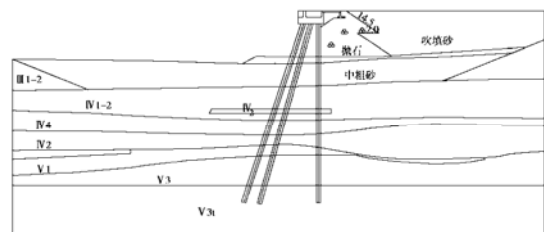


图 6 13-13 剖面双排斜顶桩板桩结构方案简化断面示意图

Fig. 6 Simplified cross-section 13-13 with two rows of inclined supporting piles

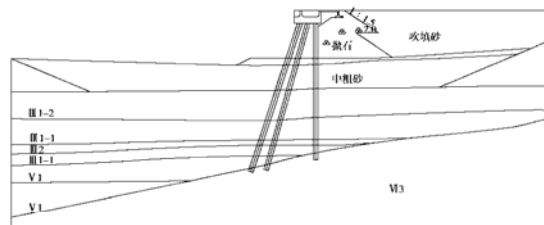


图 7 14-14 剖面双排斜顶桩板桩结构方案简化断面示意图

Fig. 7 Simplified cross-section 14-14 with two rows of inclined supporting piles

根据设计和地质报告，如果算入清淤回填厚度，接岸工程沿整个码头纵向回填土高度在 30~40 m，即使不计清淤回填厚度，接岸工程沿整个码头纵向回填土高度也在 20~28 m。如此大厚度的高填土，必然带来许多负面的影响，目前国内外的研究或类似工程仍不具备足够的经验<sup>[5]</sup>。另外，目前我国相关技术规范或行业规程提出的方法<sup>[6]</sup>，也不能完全解决在淤泥质软土上如此高填方围堤和桩基础码头的施工和运营有关问题，且传统的方法和手段无法完全满足该工程问题的需要。

表 1 地层物理力学参数  
Table 1 Properties of soil layers in the foundation

| 层序                 | 名称               | 容重<br>$\gamma /(\text{kN m}^{-3})$ | 弹性模量<br>$E/\text{MPa}$ | 泊松比  | 粘聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(^{\circ})$ |
|--------------------|------------------|------------------------------------|------------------------|------|-----------------------|------------------------------|
| II <sub>3</sub>    | 灰黄 灰色粉细砂         | 18.7                               | 20.0                   | 0.30 | 6.60                  | 33.7                         |
| III <sub>1-1</sub> | 灰黄 色淤泥           | 16.6                               | 4.00                   | 0.42 | 11.50                 | 10.0                         |
| III <sub>1-2</sub> | 灰黄 色淤泥质粘土        | 17.4                               | 5.50                   | 0.42 | 14.50                 | 13.9                         |
| III <sub>3</sub>   | 灰黄 色粉细砂          | 18.8                               | 21.25                  | 0.30 | 2.60                  | 34.0                         |
| IV <sub>1-1</sub>  | 灰绿 黄色粉质粘土        | 19.7                               | 21.00                  | 0.35 | 41.00                 | 22.7                         |
| IV <sub>1-2</sub>  | 褐黄 色粉质粘土         | 19.2                               | 16.50                  | 0.35 | 22.50                 | 24.1                         |
| IV <sub>2</sub>    | 灰色 绿色粘土          | 18.7                               | 17.50                  | 0.30 | 43.90                 | 15.1                         |
| IV <sub>3</sub>    | 灰绿 黄色粉质粘土<br>混砂砾 | 19.9                               | 18.00                  | 0.30 | 10.50                 | 22.8                         |
| IV <sub>4</sub>    | 灰 黄色粉细砂          | 19.1                               | 33.75                  | 0.20 | 2.60                  | 35.3                         |
| V <sub>1</sub>     | 杂色粘土             | 19.8                               | 29.50                  | 0.20 | 73.50                 | 19.7                         |
| V <sub>3</sub>     | 灰绿 黄色粘性土混<br>砂砾  | 20.0                               | 30.50                  | 0.20 | 50.00                 | 23.3                         |
| V <sub>4</sub>     | 灰黄色粉细砂夹粉质<br>粘土  | 18.9                               | 26.00                  | 0.20 | 8.90                  | 30.3                         |

2 共同作用计算原理

2.1 有限元计算基本假定

计算分析采用平面非线性弹塑性有限元法，程序为大型国际通用商用软件 Marc 程序。该程序能够反映土与结构的复杂的力学性质、考虑土与结构物的相互作用。计算基本假定如下：

- (1) 按平面应变问题考虑。
- (2) 土体本构模型假定为弹塑性模型，屈服准则采用库伦 - 莫尔准则，结构（如桩、平台等）采用线弹性模型模拟。
- (3) 围堤施工阶段产生的沉降与水平位移不予考虑。

2.2 施工过程的模拟

假设已填筑好的土层处于初始状态，只计自重应力，不计其位移和应变。将新填筑层与已填筑层均参加有限元计算，但计算出来新填筑层的位移和应变都充零，只保留应力。

桩基施工是一个复杂的过程，其间包括桩周围土体的扰动和重塑，孔隙压力的生成和消散，强度与土的弹性模量的降低和恢复，同时，桩中也存在一定的打桩应力。因此，要在计算中完全模拟这一过程并非易事。计算中采用修改桩身单元模量参数的办法，以近似地模拟桩基施工，即在桩基施工前采用土体的计算参数，桩基施工完成后，再重新输入桩的计算参数，把土的模量参数修改为桩的模量参数。计算步骤如下：

- 第 1 级：计算天然土层的应力，天然泥面假设为原始泥面线；
- 第 2 级：围堤回填与堆场填筑；
- 第 3 级：模拟桩基施工；

- 第 4 级：模拟码头上部结构施工；
- 第 5 级：模拟堆场使用情况。

2.3 计算参数的选取

依照地质勘察报告和国家相关规范<sup>[7]</sup>，并结合有关研究成果，现将计算需要的参数取值原则和具体取值归纳如下：

- (1) 土层参数  
土层物理力学参数取值如表 1 所示。
- (2) 加固土和桩参数  
清淤换土方案中的中粗砂弹性模量  $E$  取 8.5 MPa，泊松比为 0.2。  
抛石层按实际厚度处理，取水上重度  $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$ ，水下重度  $\gamma = 11.0 \text{ kN/m}^3$ ； $E = 150 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.25$ 。碎石层取水上重度  $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$ ，水下重度  $\gamma = 11.0 \text{ kN/m}^3$ ； $E = 120 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.21$ 。

依据相应的国家规范，钢桩的弹性模量  $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.3$ ；钢筋混凝土平台的弹性模量： $E = 3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.2$

- (3) 有限元网格剖分、单元及边界条件  
结合类似工程经验，确定如下计算范围：以各剖面横断面钻孔深度为竖向控制深度；在水平方向上，码头前沿线以前取 100 m，堆场取 70 m。由于计算域较大，计算重点放在桩基部分，该部分单元划分得较密。桩基在空间上是互不相交的，但把它们投影到横断面上时直桩与斜桩就会相交。对此，计算时采用一些特殊的处理，即划分单元时使相交的桩单元具有各自的节点而不重合，这就可使两根桩在相交处具有各自独立的单元，不同的桩单元与土单元在同一位置处节点之间通过不同的连接单元连接，以协调位移。其

中土体、平台均采用四节点等参单元；桩采用二节点梁单元模拟；土与桩体之间设置软化单元以模拟土与结构的相互作用。

#### (4) 桩体的计算宽度和计算刚度

在实际工程中，桩是按一定间距一个排架一个排架排列的，而在平面应变计算中，只能假定断面沿纵向是一样的。因此，将空间问题化成平面问题来计算时，桩的计算模量和尺寸必须按相似原理进行换算。平面有限元数值计算时，桩采用梁单元来模拟。梁单元的刚度  $EI'$  和  $E'A'$  需要 2 个截面参数来描述，即等代宽度  $b'$ ，等代高度  $h$ ，按照桩土计算宽度内沿长度均匀分摊的原则，将圆形桩截面等代为矩形截面，等代后的刚度不变，则

$$EI = EI', \text{ 即 } \frac{1}{b_1} \cdot E \cdot \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = E' \cdot \frac{1}{12} \cdot b' \cdot h^3; \quad (1)$$

$$EA = E'A', \text{ 即 } \frac{1}{b_1} \cdot E \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = E' \cdot b' \cdot h. \quad (2)$$

式中  $b_1$  为桩的计算工作宽度 (m)， $1/b_1$  将桩排架转

换成沿每米断面连续分布，为无量纲单位； $D$ 、 $d$  分别为桩的外径与内径 (m)； $b'$ 、 $h$  分别为等代梁单元的等代宽度 (m) 和等代高度 (m)； $E'$  为钢桩的弹性模量。

联立式 (1) 和 (2)，可以求得  $b'$ 、 $h$ 。

### 3 桩基受力变形分析

#### 3.1 桩身位移分析

通过计算 12-12、13-13、14-14、15-15、16-16、17-17 典型剖面码头结构或平台前沿的水平位移，比较各剖面的水平位移，将各方案的水平位移绘制在图 8~10。由图可知，斜坡堤码头结构前沿的最大水平位移为 5.76 cm，最小水平位移为 1.09 cm。单排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案平台前沿的最大水平位移为 2.48 cm，最小水平位移为 0.41 cm。双排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案平台前沿的最大水平位移为 4.83 cm，最小水平位移为 0.79 cm。

比较斜坡堤方案码头结构前沿水平位移与斜顶桩方案的平台前沿水平位移在纵向分布可知，斜顶桩平台前沿水平位移较均匀，较有利于平台结构的受力。

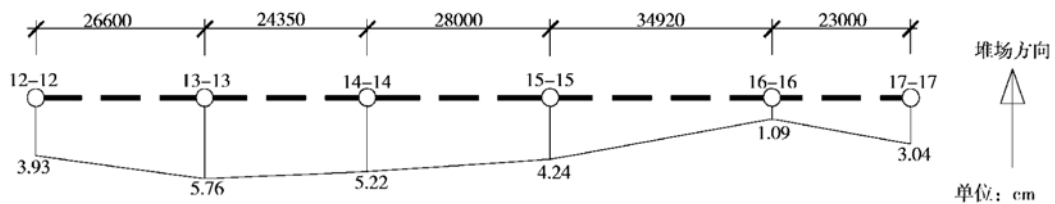


图 8 斜坡堤方案码头结构前沿水平位移纵向分布示意图

Fig. 8 Distribution of horizontal displacement in front of pier for the project with slope protection

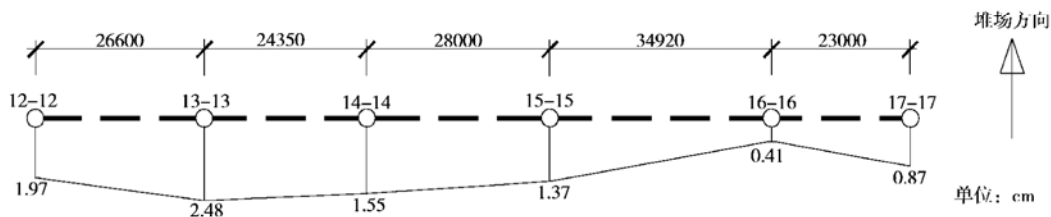


图 9 单排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案平台前沿水平位移纵向分布示意图

Fig. 9 Distribution of horizontal displacement in front of pier for the project with one row of inclined supporting piles

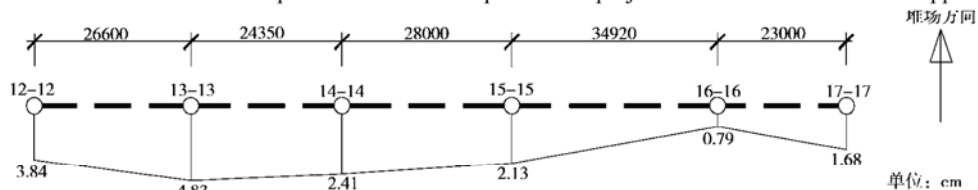


图 10 双排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案平台前沿水平位移纵向分布示意图

Fig. 10 Distribution of horizontal displacement in front of pier for the project with two rows of inclined supporting piles

表 2 14-14 剖面不同斜顶桩方案桩身最大水平位移及其所在位置

| 斜顶桩方案 | 斜桩    |           | 板桩    |           |
|-------|-------|-----------|-------|-----------|
|       | 位移/cm | 距离桩顶的位置/m | 位移/cm | 距离桩顶的位置/m |
| 单排斜顶桩 | 1.55  | 0         | 4.55  | 20        |
| 双排斜顶桩 | 2.41  | 0         | 5.97  | 20        |

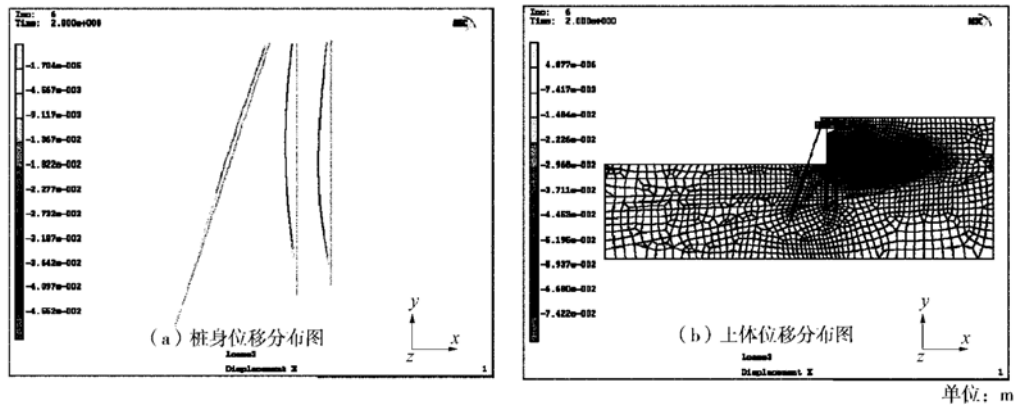


图 11 14-14 剖面单排斜顶桩板桩方案桩身位移及土体位移分布图

Fig. 11 Distribution of horizontal displacement of piles and soil for the project with one row of inclined supporting piles in cross-section 14-14

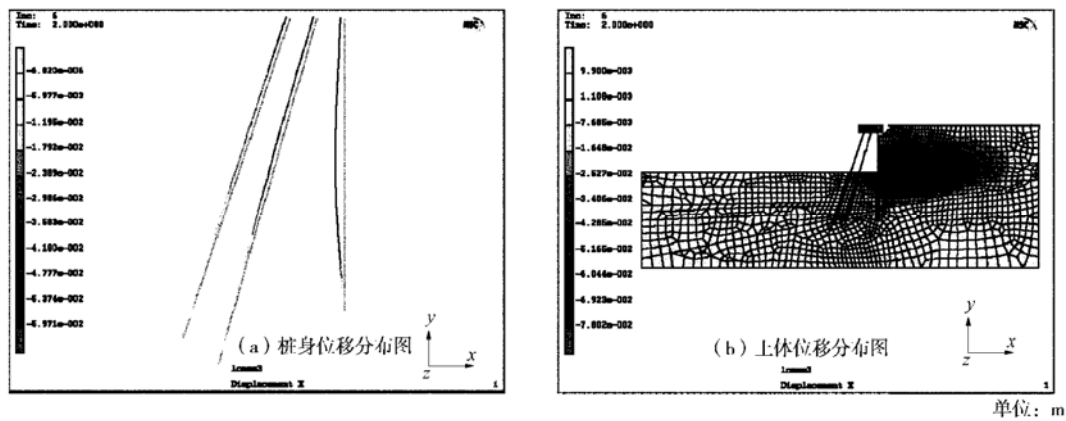


图 12 14-14 剖面双排斜顶桩板桩方案桩身位移及土体位移分布图

Fig. 12 Distribution of horizontal displacement of piles and soil for the project with two rows of inclined supporting piles in cross-section 14-14

考虑到 14-14 剖面持力层为倾斜地层,地层起伏较大,以 14-14 剖面为例,分析不同斜顶桩方案桩基施工以后的桩身及土体水平位移,如图 11、12 所示,不同方案中各桩桩身最大水平位移及其发生位置见表 2。

由表 2 可知,2 种斜顶桩方案的板桩与支承桩的最大水平位移均在设计泥面线附近,单排斜顶桩板桩结构方案的水平位移为 4.55 cm,双排斜顶桩板桩结构方案的水平位移为 5.97 cm。

2 种斜顶桩方案的斜桩的最大水平位移均发生在桩顶,其中单排斜顶桩板桩结构方案的水平位移为 1.55 cm,双排斜顶桩板桩结构方案的水平位移为 2.41 cm。

图 11 (b) 表明单排斜顶桩板桩结构方案在桩基施工后围堤最大水平位移为 7.42 cm,图 12 (b) 表明双排斜顶桩板桩结构方案在桩基施工后围堤最大水平位移为 7.80 cm。这表明,单排斜顶桩板桩结构方案较双排斜顶桩板桩结构方案更有效地减少围堤的水平变位。

### 3.2 仅考虑水土压力、堆场荷载与平台自重时的桩身轴力

本分析仅考虑由于堆场水土压力、堆场荷载与平台自重引起的桩身轴力,其中靠近码头边 40 m 范围的荷载为 30 kPa,往后堆场范围的荷载为 50 kPa。以 13-13 剖面(持力层为 V3 层粘土层)、14-14 剖面(持力层为 VI3 层花岗岩微风化层)为例,分析

桩身轴力分布。不同方案的每延米的桩身轴力图见图 13、14 所示。

将每延米的桩身轴力换算为每根桩的桩身轴力,单排斜顶桩板桩结构方案中斜桩的间距为 4.8 m,板桩的间距为 1.8 m,支承桩的间距为 4.5 m,双排斜顶桩板桩结构方案中斜桩的间距为 4.5 m,板桩的间距为 1.8 m,则换算的最大桩身轴力见表 3。

由表 3 可见,仅由水土压力、堆场荷载与平台自重作用时的桩身的轴向力,在单排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案中,13-13 剖面斜桩轴向力最大值为 4800 kN,板桩的最大值为 883 kN,支承桩的最大值为 3249 kN;14-14 剖面斜桩轴向力最大值为 3864 kN,

板桩的最大值为 1607 kN,支承桩的最大值为 3226 kN。在双排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案中,13-13 剖面外侧斜桩轴向力最大值为 3626 kN,内侧斜桩的最大值为 2838 kN,板桩的最大值为 1920 kN;14-14 剖面外侧斜桩轴向力最大值为 5274 kN,内侧斜桩的最大值为 3717 kN,板桩的最大值为 1297 kN。从轴力分布可见,斜桩承受较大轴力,直桩特别是板桩承受轴力较小。比较 2 种斜顶桩方案的轴力分布,可以看到单排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案相对于双排斜顶桩板桩结构方案而言,单排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案中各桩的轴力分更加均匀。

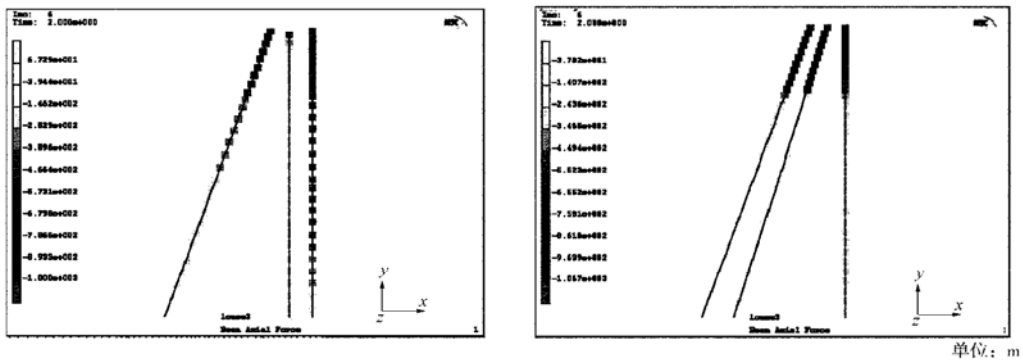


图 13 13-13 剖面不同斜顶桩板桩结构方案桩身轴力分布

Fig. 13 Distribution of axial force of piles for different projects with inclined supporting piles in cross-section 13-13

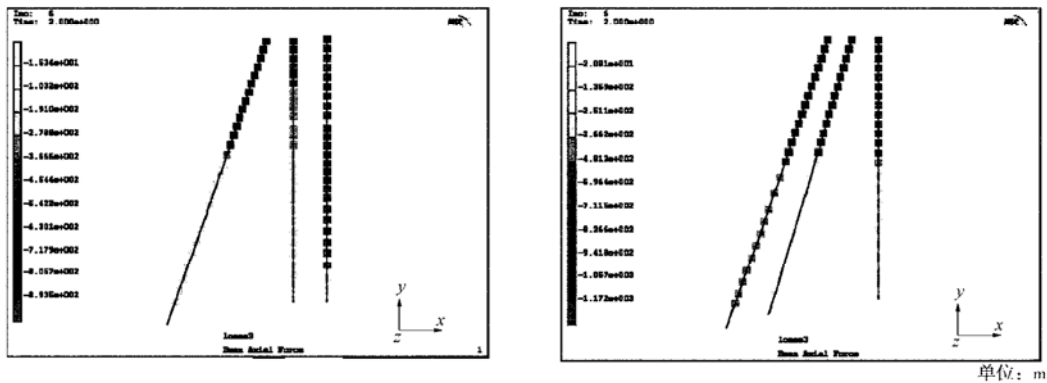


图 14 14-14 剖面不同斜顶桩板桩结构方案桩身轴力分布

Fig. 14 Distribution of axial force of piles for different projects with inclined supporting piles in cross-section 14-14

表 3 不同方案桩身最大受力及其位置

| Table 3 Maximum axial force of piles and its location in different projects with inclined supporting piles |        |                    |                   |                    |                   |                    |                   |              |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------|---------------|
| 剖面                                                                                                         | 方案     | 斜桩                 |                   |                    |                   | 直桩                 |                   |              |               |
|                                                                                                            |        | 外侧斜<br>桩轴向<br>力/kN | 距离桩<br>顶的位<br>置/m | 内侧斜<br>桩轴向<br>力/kN | 距离桩<br>顶的位<br>置/m | 支承直<br>桩轴向<br>力/kN | 距离桩<br>顶的位<br>置/m | 板桩轴向<br>力/kN | 距离桩顶<br>的位置/m |
| 13-13                                                                                                      | 单排斜顶桩板 | 4800               | 0                 | —                  | —                 | 3249               | 0                 | 883          | 0             |
|                                                                                                            | 双排斜顶桩板 | 3626               | 0                 | 2838               | 0                 | —                  | —                 | 1920         | 0             |
| 14-14                                                                                                      | 单排斜顶桩板 | 3864               | 0                 | —                  | —                 | 3226               | 0                 | 1607         | 0             |
|                                                                                                            | 双排斜顶桩板 | 5274               | 0                 | 3717               | 0                 | —                  | —                 | 1297         | 0             |

3.3 仅考虑水土压力、堆场荷载与平台自重时的桩身弯矩

本次分析仅考虑由于堆场水土压力、堆场荷载与平台自重引起的桩身弯矩,其中靠近码头边 40 m 范围的荷载为 30 kPa,往后堆场范围的荷载为 50 kPa。同样以斜顶桩的 13-13 剖面、14-14 剖面为例,分析桩身弯矩分布,不同方案的桩身弯矩图见图 15、16 所示。桩身最大弯矩及其位置分布见表 4 所示。

由表 4 可见,仅由水土压力、堆场荷载与平台自重作用时的作用在桩身的弯矩,在单排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案中,13-13 剖面斜桩弯矩最大值为 1149 kN·m,板桩的最大值为 3292 kN·m,支承桩的最大值为 1685 kN·m;14-14 剖面斜桩弯矩最大值为-563 kN·m,板桩的最大值为-2337 kN·m,支承桩的最大值为-1273 kN·m。在双排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案中,13-13 剖面外侧斜桩弯矩最大值为 875 kN·m,

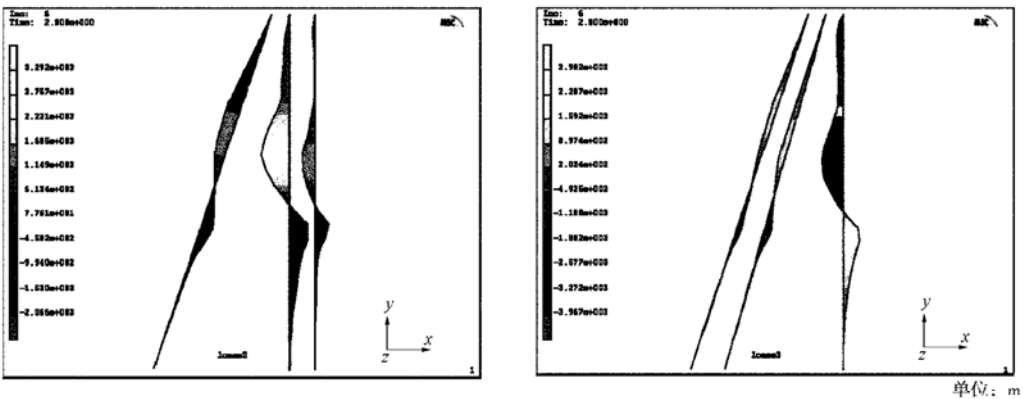


图 15 13-13 剖面不同斜顶桩板桩结构方案桩身弯矩分布

Fig. 15 Distribution of moment of piles for different projects with inclined supporting piles in cross-section 13-13

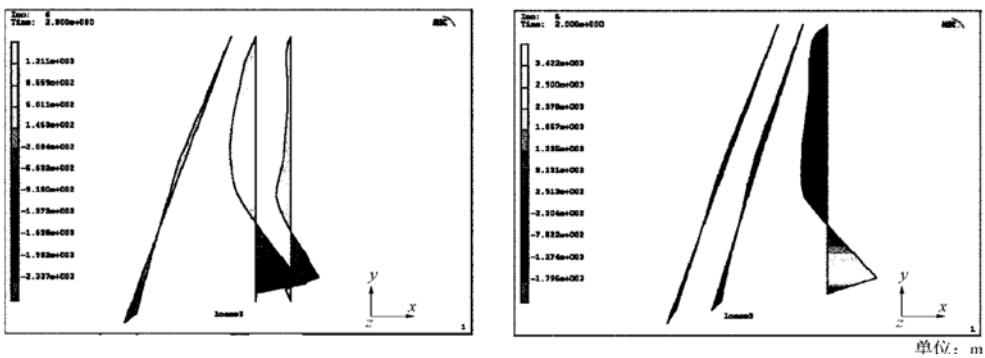


图 16 14-14 剖面不同斜顶桩板桩结构方案桩身弯矩分布

Fig. 16 Distribution of moment of piles for different projects with inclined supporting piles in cross-section 14-14

表 4 不同方案桩身最大弯矩及其位置

Table 4 Maximum moment of piles and its location in different projects with inclined supporting piles

| 剖面    | 方案        | 斜桩                                  |               |                                     |               | 直桩                             |               |                               |               |
|-------|-----------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
|       |           | 外侧斜桩<br>弯矩<br>(kN·m <sup>-3</sup> ) | 距离桩顶<br>的位置/m | 内侧斜桩<br>弯矩<br>(kN·m <sup>-3</sup> ) | 距离桩顶<br>的位置/m | 支承桩弯矩<br>(kN·m <sup>-3</sup> ) | 距离桩顶<br>的位置/m | 板桩弯矩<br>(kN·m <sup>-3</sup> ) | 距离桩顶<br>的位置/m |
| 13-13 | 单排斜<br>顶桩 | 1149                                | 近泥面线          | —                                   | —             | 1685                           | 近泥面线          | 3292                          | 近泥面线          |
|       | 双排斜<br>顶桩 | 875                                 |               | 1188                                | 近泥面线          | —                              | —             | 3967                          |               |
| 14-14 | 单排斜<br>顶桩 | -563                                | 近桩端           | —                                   | —             | -1273                          | 近桩端           | -2337                         | 近桩端           |
|       | 双排斜<br>顶桩 | -230                                |               | -752                                | 近桩端           | —                              | —             | -3422                         |               |

从弯矩图分布可见,直桩特别是板桩承受较大弯矩,斜桩承受弯矩较小,水土压力主要由直桩承担;相对内侧斜桩的最大值为  $1188 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,板桩的最大值为  $3967 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ; 14-14 剖面外侧斜桩弯矩最大值为  $-230 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,内侧斜桩的最大值为  $-752 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,板桩的最大值为  $-3422 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。对单排斜顶桩板桩结构方案而言,双排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案中板桩的所受最大弯矩较大。

比较图 15、16 可知,持力层为粘土的 13-13 剖面的最大弯矩分布在土层 III1-2 与土层 IV1-2 分界面,接近于原始泥面线;持力层为微风化花岗岩的 14-14 剖面的最大弯矩接近于桩端。

## 4 结论与讨论

(1) 比较斜坡堤方案码头结构前沿水平位移与斜顶桩方案的平台前沿水平位移在纵向分布可知,斜顶桩平台前沿水平位移较均匀。单排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案最大水平位移为  $2.48 \text{ cm}$ ;双排斜顶桩板桩结构斜顶桩方案最大水平位移为  $4.83 \text{ cm}$ 。斜坡堤方案码头平台前沿水平位移差异较大,最大水平位移为  $5.76 \text{ cm}$ 。

(2) 比较斜顶桩的 2 个方案,二直一斜方案中各桩轴向力分布相对比较均匀。仅在考虑水土压力、堆场超载与承台自重作用时,二直一斜桩方案中前排斜桩最大轴力为  $3864 \text{ kN}$ ,中间直桩最大轴力为  $1607 \text{ kN}$ ,后排直桩最大轴力为  $3226 \text{ kN}$ 。而二斜一直桩方案中前排斜桩最大轴力为  $5274 \text{ kN}$ ,中间斜桩最大轴力为  $3717 \text{ kN}$ ,后排直桩最大轴力为  $1297 \text{ kN}$ 。

(3) 无论是二直一斜还是二斜一直方案,前排倾斜桩均承受较大的压力,可见增设斜桩可以增强抵抗高填围堤侧向变形的能力。

(4) 由于桩端入土介质的差异引起桩身弯矩的分布规律有所不同,当桩端为基岩时(如 14-14 剖面),最大弯矩值为  $-3422 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,发生在垂直板桩且靠近桩端位置处;当桩端为粘土时(如 13-13 剖面),最大弯矩值为  $3967 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,发生在垂直板桩抛石下第 III1-1 层土内。

(5) 2 个斜顶桩方案中,后排直桩位移均较大,作用在桩身的弯矩也较大,而前排斜桩产生的变形与弯矩都较小,这说明,水土压力主要由直桩承

担,斜桩在分担水土压力作用方面相比较而言不太明显,双排直桩结构较单排直桩结构在高填围堤中作为支挡结构效果比较明显。

## 参考文献:

- [1] 王年香.被动桩与土体相互作用研究综述[J].水利水运科学,2000(3): 69 - 76. (WANG Nian-xiang. A summary of interaction between passive pile and soil mass [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000(3): 69 - 76.)
- [2] 魏汝龙,王年香,杨守华. 桩基码头和岸坡的相互作用[J]. 岩土工程学报,1992,14(6): 38 - 49. (WEI Ru-long, WANG Nian-xiang, YANG Shou-hua. Interaction between pile-supported pier and bank slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 38 - 49.)
- [3] 廖雄华,张克绪.天津港高桩码头桩基—岸坡土体相互作用的数值分析[J].水利学报,2002(4):81 - 87. (LIAO Xiong-hua, ZHANG Ke-xu. Numerical Analysis of pile-soil interaction in long-piled wharf of Tianjin Port [J]. Journal of hydraulic Engineering, 2002(4): 81 - 87.)
- [4] 武清玺,张旭明,李建国.桩基码头空间结构的内力计算与分析[J].水利水电科技进展,2004,24(3): 21 - 24. (WU Qing-xi, ZHANG Xu-ming, LI Jian-guo. Internal force calculation of spatial structure of pile pier by finite element method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(3). 21 - 24.)
- [5] 侯瑜京,韩连兵,梁建辉.深水港码头围堤和群桩结构的离心模型试验[J].岩土工程学报,2004,26(5): 594 - 600. (HOU Yu-jing, HAN Lian-bing, LIANG Jian-hui. Centrifuge modeling of sea dike and pile groups in harbour[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 594 - 600.)
- [6] JTJ250-98 港口工程地基规范[S]. 北京:人民交通出版社 1998. (JTJ250-98 Chinese foundation code of port engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1998.)
- [7] JTJ240-97 港口工程地质勘察规范[S].北京:人民交通出版社.1998. (JTJ240-97 Chinese geology investigation code of port engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1998.)