

## 钢板桩护岸结构数值模拟分析

赵伏田<sup>1,2</sup> 张福海<sup>1,2</sup> 张永立<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 堤坝与岩土工程重点实验室 江苏 南京 210098)

**摘要:** 采用有限元计算软件 ABAQUS 对钢板桩航道护岸结构进行数值模拟分析与研究。通过大量的数值计算与分析, 研究悬臂式钢板桩护岸结构不同插入比下岸坡土体的塑性变形以及桩的位移与内力, 得出悬臂式钢板桩的最优插入比为 1.05 ~ 1.27。在此基础上研究锚杆对悬臂式钢板桩护岸的加固效果, 通过增设锚杆可改善护岸结构的变形与内力、约束岸坡土体的变形, 并起到减小桩长的效果。在确定插入比的情况下研究锚杆位置与倾角对护岸的影响, 通过对比岸坡土体塑性变形与结构的位移得出锚杆的最佳锚固位置为距离桩顶 1.5 ~ 2 m, 锚杆倾角对于钢板桩护岸结构的影响较小。

**关键词:** 钢板桩护岸; 数值模拟; 土体塑性应变; 结构变形及内力

中图分类号: U617.8

文献标识码: A

## The numerical analysis of steel sheet piles revetment structure

ZHAO Fu-tian<sup>1,2</sup>, ZHANG Fu-hai<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-li<sup>1,2</sup>

(1. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Geo-mechanics and Embankment Engineering, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The general finite element software ABAQUS was utilized to analysis and study the steel sheet piles revetment structure. Through a lot of numerical analysis and study, this article researches the slope soil plastic deformation and the displacement and internal force of the pile for cantilever steel sheet pile revetment structure in the case of different insertion ratio. The results show that the optimal insertion ratio of steel sheet pile is 1.05 ~ 1.27. On this basis, this article researches bolt reinforce for cantilever sheet pile revetment. Adding bolt can improve revetment structure's deformation and internal force, constraint slope soil deformation and aim to reducing the pile length. In the case of fixed insertion ratio, this article researches anchor's position and inclination affect on revetment. Through comparing slope soil plastic deformation and structure displacement, it is concluded that the optimal anchor position is 1.5 ~ 2m from the top of pile, the influence of bolt inclination is small.

**Key words:** steel sheet piles revetment; numerical analysis; soil plastic deformation; structure deformation and internal force

钢板桩因其自身结构轻、强度高、施工简便、耐久性好、可循环利用等优点广泛应用于码头、船坞、基坑等工程。王维成等人在研究基坑中钢板桩支护结构支护效果中发现钢板桩的入土深度并非越长越好<sup>[1]</sup>。夏军在研究软土地基中钢板桩码头的位移变形时指出板桩位移与结构受力的相关性, 并提出了单锚式板桩结构的允许位移值<sup>[2]</sup>。本文就将从研究钢板桩应用于航道支护结构的实

用性出发, 通过数值模拟研究钢板桩的入土深度、锚杆锚固位置和锚杆倾角对钢板桩护岸结构变形与内力以及岸坡整体稳定性的影响。

### 1 计算模型的建立与模型参数的选取

本文模型的建立主要依据苏南运河常州段航道升级工程中 N2 型钢板桩护岸断面, 岸坡计算模型如图 1 所示, 水平方向为 60 m, 竖直方向 30 m,

表1 不同深度土体的计算参数

Tab.1 The calculation parameters at different depths of the soil

| 深度/m    | $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ | $E/\text{MPa}$ | $\nu$ | 摩擦角 $\varphi/^\circ$ | 粘聚力 $c/\text{kPa}$ |
|---------|--|----------------|-------|----------------------|--------------------|
| 0~4.5   | 19.5                                   | 7              | 0.35  | 10                   | 15                 |
| 4.5~7.9 | 20.0                                   | 11             | 0.35  | 10                   | 15                 |
| 7.9~9.9 | 19.6                                   | 15             | 0.35  | 10                   | 15                 |
| 9.9~30  | 20.0                                   | 23             | 0.32  | 10                   | 15                 |

表2 锚杆参数

Tab.2 The parameters of anchor

| 锚杆材料  | 锚索直径/mm | 锚索长度/m | $E/\text{MPa}$    | 预应力/kN |
|-------|---------|--------|-------------------|--------|
| 6条钢绞线 | 18      | 20     | $2.0 \times 10^5$ | 110    |

表3 冷弯钢板桩材料性质

Tab.3 Cold-formed steel sheet pile material properties

| $[\sigma]/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ | $W_x/\text{cm}^3$ | $M_{\text{max}}/\text{kN} \cdot \text{m}$ | 钢材强度等级 |
|--|-------------------|---|--------|
| 228                                      | 1500              | 152.6                                     | Q345   |

上部的斜坡坡高 2.4 m, 坡比为 2.4:1, 下部的斜坡坡高 2 m, 坡比 1:5, 两斜坡中间的直立边坡的高度为 4.4 m, 下部斜坡与中间直立边坡之间有个 1 m 宽的平台。

### 2.1 不同插入比钢板桩对岸坡整体稳定性的影响

图2给出了不同插入比钢板桩支护岸坡土体的塑性应变图。

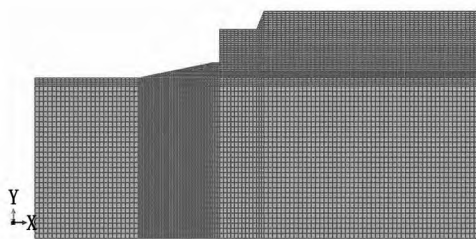


图1 ABAQUS平面有限元计算模型

Fig.1 The finite element model of ABAQUS plane

模型中土体单元采用四结点平面应变单元, 土体本构模型采用 Mohr - Coulomb 弹塑性模型, 不同深度的土体计算参数如下表 1 所示。锚杆采用线弹性二维弹性杆单元模拟, 假定只有轴向变形, 其计算参数如下表 2 所示。

钢板桩选用 900 × 350 型冷弯钢板桩, 钢板桩假定为矩形截面, 弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ , 桩厚为单位厚度, 根据抗弯刚度  $EI$  折算为等模量实体截面宽度为 0.09 m。钢板桩具体的力学性质参数如表 3 所示:

### 2 悬臂式钢板桩护岸结构数值模拟分析

悬臂式钢板桩护岸结构的整体稳定性和结构的变形主要取决于钢板桩的入土深度。本节将模拟不同插入比条件下的悬臂式钢板桩护岸结构, 选取的插入比分别为 0.82、1.05、1.27、1.5, 对应的桩长为 8、9、10、11m。

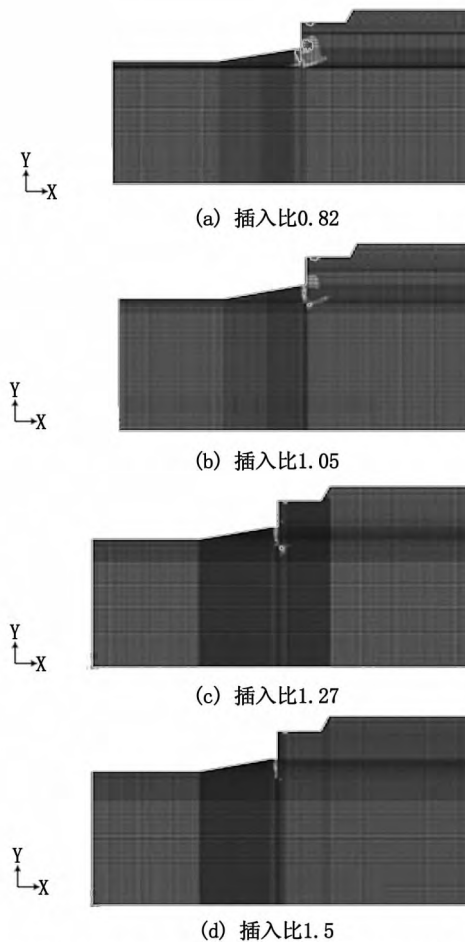


图2 不同插入比钢板桩支护结构岸坡土体塑性应变图

Fig.2 The slope soil plastic strain of different insertion steel sheet piles revetment structure

由图 2(a) 可以看出, 钢板桩插入比为 0.82 时, 岸坡的塑性变形较大, 桩体顶部与底部之间土体的塑性区完全贯穿, 此时岸坡发生破坏。由图 2(b) 可以看出, 钢板桩插入比为 1.02 时, 岸坡连续贯穿的塑性应变区消失了。随着钢板桩入土深度的增加, 岸坡的塑性应变逐渐减小, 当钢板插入比 1.5 时, 此时岸坡的塑性应变最小。说明增加悬臂钢板桩的入土深度, 可以提高岸坡的整体稳定性。

## 2.2 不同插入比对钢板桩护岸结构的位移与内力的影响

钢板桩合理的入土深度不仅要满足护岸结构稳定性的要求, 也要满足结构位移变形的要求。图 3 为不同插入比的钢板桩水平位移图, 图 4 为不同插入比的钢板桩弯矩图。

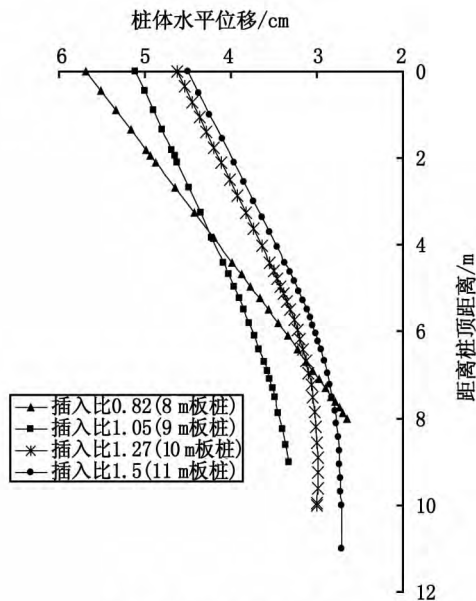


图3 钢板桩水平位移图

Fig. 3 The horizontal displacement of steel sheet piles

如图 3 可以看出, 随着钢板桩入土深度的增加, 桩身的最大位移均逐渐减小。钢板桩插入比为 0.82 时, 钢板桩整体有明显的倾覆趋势。钢板桩插入比为 1.05 时, 桩身的最大位移有 5.2 cm, 明显大于插入比 1.27 与 1.5 的情况。而板桩插入比为 1.27 与 1.5 时, 板桩位移变化趋势与最大水平位移值相近, 由此可以得出当钢板桩的插入比超过 1.27 时, 增加板桩的入土深度对于减小岸坡和板桩的水平位移作用不明显。

由图 4 可以看出, 钢板桩插入比在 0.8 ~ 1.5 范围内的最大弯矩均小于桩身的最大弯矩, 桩身的抗弯强度均满足要求。但钢板桩插入比为 0.82

与 1.05 时的弯矩值均在一侧, 根据工程经验可知板桩的入土深度还未达到最佳入土深度, 此时桩体的破坏模式主要是由于桩身入土深度不足而导致的桩身倾覆破坏。

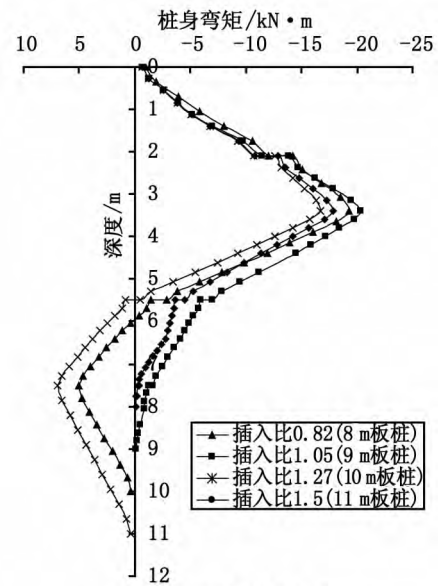


图4 钢板桩弯矩图

Fig. 4 The moment of steel sheet piles

综合考虑岸坡的塑性变形与钢板桩的位移及内力可知, 板桩的最优插入比应在 1.05 ~ 1.27。当钢板桩的插入比小于最优插入比时, 板桩易发生倾覆破坏, 此时增加钢板桩的入土深度能明显改善护岸结构的位移变形, 提高岸坡整体稳定性。当板桩插入比超过最优插入比时, 继续增加钢板桩入土深度对于改善结构的变形与内力效果不明显。

## 3 拉锚对悬臂式钢板桩护岸结构的加固效果研究

钢板桩通常联合锚杆形成桩锚体系, 通过锚杆的受拉作用限制钢板桩桩顶的水平位移和约束岸坡土体的变形。本节将研究锚杆对岸坡稳定性与板桩位移变形的影响。钢板桩桩长为 10 m, 锚杆锚固端距离桩顶 2.0 m。

### 3.1 拉锚对岸坡的整体稳定性与位移变形的影响

图 5 为悬臂式钢板桩护岸与拉锚式钢板桩护岸的塑性应变云图。

对比图 5(a) 和 5(b) 可以发现, 未施加锚杆时, 插入比为 1.27 的悬臂钢板桩岸坡出现连续贯穿的塑性应变区, 岸坡处于失稳状态, 在施加锚杆后, 岸坡连续贯穿的塑性应变区消失。说明增设

锚杆可以有效地改善岸坡的塑性应变,提高岸坡整体稳定性。

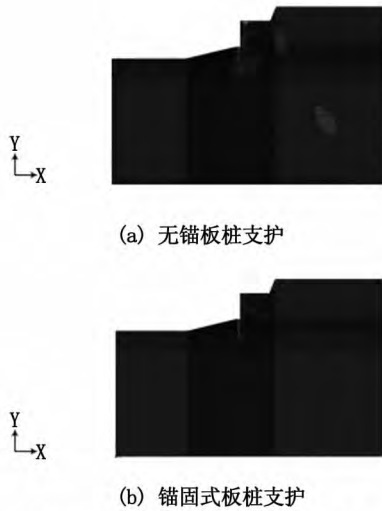


图5 钢板桩支护岸坡塑性应变云图

Fig.5 The slope soil plastic strain of steel sheet piles revetment structure

图 6 为悬臂式钢板桩护岸与拉锚式钢板桩护岸的土体位移云图。

图 6 (a) 中岸坡土体位移最大值是 8.6 cm,出现在板桩悬臂段中上部。图 6 (b) 中岸坡土体的最大位移发生在板桩下部,数值为 3.2 cm,说明锚拉式板桩护岸结构能够有效地约束岸坡土体的变形,提高岸坡的整体稳定性。

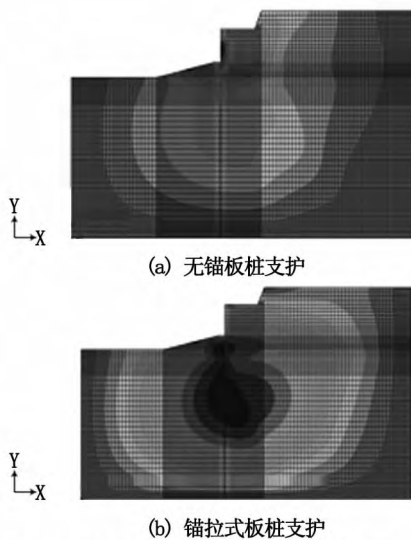


图6 钢板桩支护岸坡土体位移云图

Fig.6 The slope soil displacement of steel sheet piles revetment structure

### 3.2 拉锚对减小钢板桩桩长的影响

图 7 为钢板桩的水平位移图。

由图 7 中两种不同形式的钢板桩水平位移变形可以看出,增设锚杆后,9 m 拉锚钢板桩的最大位移值为 2.8 cm,小于 10 m 悬臂钢板桩的最大位移 4.6 cm,说明通过增设锚杆不仅可以有效地约束岸坡的变形而且可以起到减小钢板桩桩长的效果。

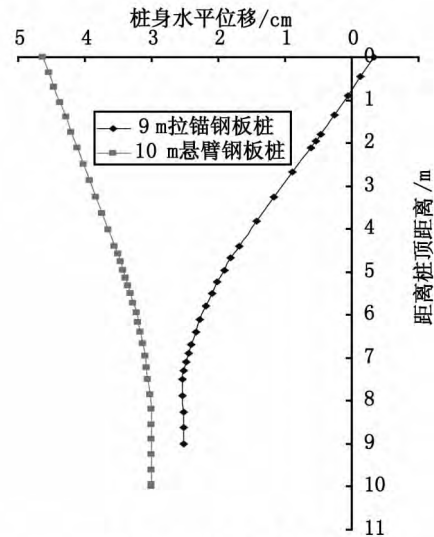


图7 钢板桩水平位移图

Fig.7 The horizontal displacement of steel sheet piles

## 4 锚杆锚固位置与锚杆倾角的确定

研究拉锚式钢板桩护岸结构的变形与内力时除了要考虑钢板桩的入土深度不同对结构的变形与内力产生影响外,还应考虑锚杆的锚固位置与倾角的不同对其产生的影响。

### 4.1 锚杆锚固位置对岸坡水平位移的影响

本节选取了 7 个不同锚固位置,通过数值模拟研究其锚固位置对岸坡位移的影响。图 8 为岸坡最大水平位移随锚固位置下移的数值变化图。

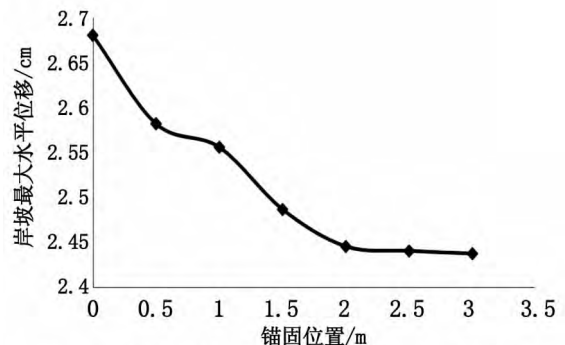


图8 岸坡土体最大水平位移随锚固位置变化图

Fig.8 The slope soil maximum horizontal displacement change by anchor position

由图8可以看出,当锚固点距离桩顶距离超过1.5 m时,继续降低锚固位置桩体最大位移减小幅度明显减小,说明此时通过增加锚固深度来达到约束桩身最大位移的效果不再明显。若再降低锚杆锚固位置不仅对于约束钢板桩的变形没有明显效果反而会增加土方的开挖,容易导致岸坡在开挖过程中发生失稳。由此得出锚杆的最佳锚固位置在距离桩顶以下1.5~2 m左右,此时锚杆对桩体变形的约束效果最好且利于岸坡的整体稳定。

#### 4.2 锚杆倾角对岸坡水平位移的影响

针对锚杆倾角,本节模拟了倾角为 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 三种情况,锚杆锚固位置均距离桩顶2 m。图9为锚杆不同倾角的钢板桩水平位移图。

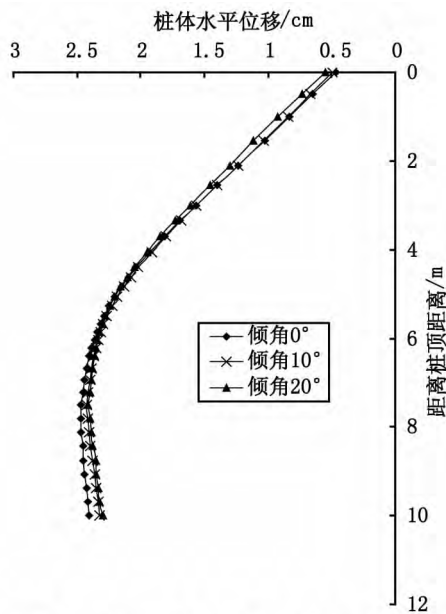


图9 锚杆不同倾角时钢板桩的水平位移图

Fig.9 The horizontal displacement of different anchor inclination steel sheet piles

由图9可知,不同倾角的钢板桩水平位移沿深度的变化趋势基本相同且水平位移值也大致相等,表明改变锚杆倾角对于约束桩身的变形影响较小。

## 5 结论

1) 对于悬臂式钢板桩护岸结构,板桩的最优

插入比为1.05~1.27。当钢板桩的入土深度较小,即插入比较小时,钢板桩会发生倾覆,导致岸坡失稳。当钢板桩的入土深度以满足最优插入比的要求,继续增加钢板桩长度,及增加入土深度,对于改善护岸结构的变形与内力和岸坡的整体性的效果不大。

2) 在钢板桩的插入比一定的情况下,增设锚杆后护岸结构的最大水平位置会下移,且最大位移值明显小于悬臂式钢板桩护岸结构,说明增设锚杆可以有效地改善护岸结构的变形和内力,提高岸坡的整体稳定性。

3) 在满足岸坡整体稳定性要求的情况下,增设锚杆还可以起到减小钢板桩长度的作用,降低了工程成本。

4) 对于拉锚式钢板桩护岸结构,当钢板桩的长度为10 m时,锚杆最佳锚固位置为距离桩顶1.5~2 m位置,锚杆倾角的改变对结构变形和内力的影响较小。

#### 参考文献:

- [1] 王维成, 田李亚, 陈昌文. 基坑支护中钢板桩嵌固长度相关问题探讨[J]. 建筑监督检测与造价, 2009, 2(10): 10-15.
- [2] 夏军. 软土地基钢板桩码头允许位移探讨[J]. 水运工程, 2010(11): 137-140.
- [3] 李学. 钢板桩支护结构的实验研究与有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [4] 贺炜, 邹建房, 泓华. 考虑桩土共同作用的钢板桩支护结构计算研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(34): 97-98.
- [5] US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Engineering and Design - Design of Sheet Pile walls [S]. 1994.
- [6] TAN Y, PAIKOWSKY S G. Performance of sheet pile wall in peat [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2008, 134(4): 445-458.
- [7] ENDLEY S N, DUNLAP W A, KNUCKEY D M, et al. Performance of an anchored sheet-pile wall [J]. Geotechnical Measurements 2000: 179-197.

(责任编辑 王利君)