

板桩悬臂长度对护岸变形及稳定性的影响研究

王福喜^{1,2}, 陈龙^{1,2}, 刘旭^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:以杭平申线航道平湖段升级改造工程为依托, 基于有限元程序, 考虑老护岸影响, 对不同悬臂长度的板桩护岸进行清淤试验模拟, 对比分析不同悬臂长度的板桩护岸有限元计算的水平位移、板桩内力、及其护岸稳定性, 同时分析研究不同入土深度条件下悬臂长度对板桩护岸的影响规律。结果表明: 考虑老护岸作用下, 在板桩与老护岸的重叠区域, 板桩的悬臂长度对护岸的变形破坏趋势有较大影响, 但对板桩的内力影响很小, 板桩悬臂长度的减小有助于护岸的稳定性, 但当板桩顶端低于老护岸底端时, 随着悬臂长度的减小, 整体稳定性安全系数 FOS 开始减小, 并且随着入土深度的增加, 悬臂长度对护岸稳定性的影响越小。

关键词:老护岸; 悬臂长度; 水平位移等值线; 入土深度; 稳定性

中图法分类号: TV861

文献标识码: A

Research on effect of cantilever length of sheet pile on deformation and stability of revetment

WANG Fuxi^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, LIU Xu^{1,2}

(1. School of Hohai University Geotechnical Engineering Research Institute¹, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. School of Hohai University Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering², Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract:Based on Hang-Ping-Sheng line waterway upgrading project in Pinghu City, considering effect of old revetment, the simulating the dredging experiment of sheet pile revetment with different cantilever length of sheet pile is implemented by the finite element software, then the comparative analysis is conducted for the horizontal displacement, internal stress and stability of revetment of sheet pile revetment with different cantilever length of sheet pile. In addition, the study of influence rule of cantilever length on sheet pile revetment is extended under the condition of different embedded depth. The results show that cantilever length of sheet pile has obvious influence on deformation and trend of failure of revetment in the overlapping region of sheet pile and old revetment, but it has a very little influence on internal stress of sheet pile. In the overlapping region, the decreasing of cantilever length of sheet pile is conducive to stability of revetment, but when the top of sheet pile is lower than the bottom of old revetment, with the decreasing of cantilever length of sheet pile, the global stability safety factor FOS begins to decrease gradually, and with the increasing of embedded depth, the effect of cantilever length on stability of revetment becomes weaker.

Key words:old revetment; cantilever length; horizontal displacement contour; embedded depth; stability

随着国家经济结构调整, 重视低碳经济的发展, 内河航运由于其自身的优势具有良好的发展前景。U 型板桩作为挡土结构类型之一, 板桩护岸具有结

构性能优越, 较好的承载能力、施工效率高、减少征地等优点, 使其在内河航道护岸工程中已被逐步推广应用。相应地, 在很多内河航道升级改造工程中,

收稿日期: 2016-12-31

基金项目: 水利部公益性行业科研专项项目 (201501043); 浙江省交通厅科技计划项目 (2013W02)

作者简介: 王福喜 (1992-), 男, 安徽马鞍山人, 硕士, 主要从事岩土工程研究。

都会遇到老护岸存在的问题,由于缺乏相应的研究,给工程优化带来较大的困难。曾有不少学者对板桩进行过相关研究^[1-7]。但仅限于板桩墙后堆载,且优化设计研究也只考虑入土深度和板桩截面,对于老护岸的挡土作用和板桩悬臂长度优化的研究几乎没有。本文基于有限元程序,考虑老护岸作用,分别对不同悬臂长度的板桩护岸进行清淤试验模拟,为板桩进一步在老护岸存在的航道升级工程中的优化应用提供理论支持。

1 工程概况

杭平申线航道由五级航道改造升级为三级航道项目是浙江省实施港航强省战略以及实现内河水运复兴的重要基础设施项目。杭平申线主线平湖境内段全长为 32.52 km,该地区属于冲湖平原区。护岸结构采用 U 型板桩护岸方案,板桩在老护岸临水侧约 2 m 位置形成板桩连续墙,断面见图 1。

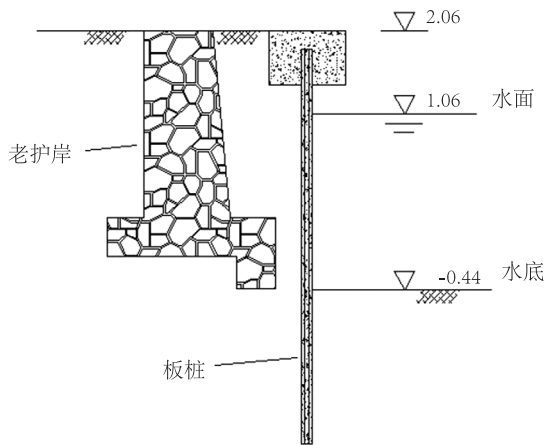


图 1 新型板桩护岸结构示意图 单位: m
Fig.1 The sketch map of a new type of sheet pile revetment structure Unit: m

根据平湖段的勘察报告,同时为了方便计算,将土性指标相近的土层结合,地层自上而下简化为粉质粘土、淤泥质粉质粘土和粉土三层,同时为了数值模拟的需要,通过经验值确定土层的泊松比和

材料界面作用系数 R_{inter} , 整理后各土层土体模型参数见表 1, 地下水位主要受季节性影响, 设计最高通航水位为 1.96 m, 设计最低通航水位 0.46 m, 试验期间水位为 1.06 m。高程系统为黄海高程。

2 有限元二维模型建立

考虑边界效应的影响, 确定计算模型的长度为 60 m, 高度为 24.5 m。由于航道两侧护岸是对称的, 故只需对护岸一侧进行模拟。模型中老护岸、板桩及帽梁等混凝土结构的本构模型采用线弹性模型; 板桩采用板单元模拟, 土—结构接触面采用界面单元模拟, 模型中各结构材料参数如表 2 所示。

表 2 结构参数
Tab. 2 The parameters of structure

材料类型	E/MPa	ν	$EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1})$
板桩	3.0×10^4	0.15	7.41×10^6	2.77×10^5
帽梁	2.5×10^4	0.15	—	—
老护岸	300	0.20	—	—

模型边界采用底边固定约束, 两侧为水平约束, 老护岸高度为 2.5 m, 水位标高位于 24.0 m 处, 初始水深 1.5 m, 模型渗流边界条件设置为底端和两侧为隔水边界。土层为三层, 自上而下依次是粉质粘土、淤泥质粘土和粉土, 厚度分别为 0.5、6 和 16.5 m。

以清淤后入土深度为 1 m 的板桩为例, 悬臂长度分别采用为 5、4.5、4、3.5、3、2.5 m, 其中悬臂长度为 3 m 时, 板桩顶端刚好与老护岸底端承台相对应, 悬臂长度为 2.5 m 时, 板桩顶端则刚好位于老护岸底端下方。

桩前共进行 3 次清淤, 每次清淤 1 m, 清淤后板桩最终入土深度均为 1 m。如图 2 为悬臂长度为 5 m 时的板桩护岸模型网格划分图。

为了能够充分考虑老护岸作用, 即挡土和堆载作用。在有限元分析过程中, 采用分步施工的方法, 先让老护岸在原始航道中保持稳定作为初始状态, 并计算初始应力, 然后在老护岸的基础上分步施工,

表 1 土层的模型参数
Tab. 1 Model parameters of soil

土层	弹性模量 E/kPa	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	饱和重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘聚力 C/kPa	泊松比 ν	R_{inter}
粉质粘土	12 480	18.9	19.1	14.5	26.2	0.30	1.0
淤泥质粉质粘土	9 060	18.0	18.2	11.8	13.6	0.33	0.6
粉土	30 600	19.3	19.6	30.2	10.4	0.30	1.0

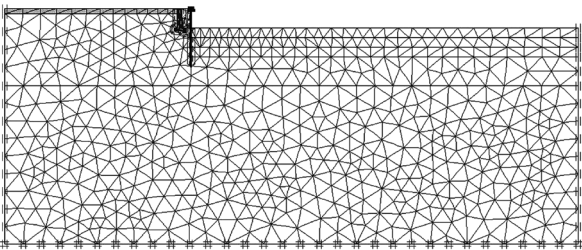


图 2 悬臂长度为 5 m 的板桩护岸模型网格划分图
Fig.2 Meshing figure of sheet pile revetment with 5 meters cantilever length

名称	工序号	起自	计算	加载类型
初始工序	0	0	N/A	N/A
✓ 初始应力计算	1	0	塑性分析	总乘子
✓ 打桩	2	1	塑性分析	分步施工
✓ 浇筑帽梁	3	2	塑性分析	分步施工
✓ 填土	4	3	塑性分析	分步施工
✓ 清淤 1m	5	4	塑性分析	分步施工
✓ 清淤 2m	6	5	塑性分析	分步施工
✓ 清淤 3m	7	6	塑性分析	分步施工

图 3 模拟分步施工过程
Fig.3 Simulating the staged construction
依次进行打桩、浇筑帽梁、填土和清淤，如图 3 所示。

3 数值计算结果分析

以清淤后入土深度为 1 m 的板桩为例，对比分析不同悬臂长度的板桩护岸的水平位移、板桩剪力及整体稳定性。此外还进行了不同入土深度下板桩悬臂长度对护岸的影响规律研究。

3.1 水平位移分析

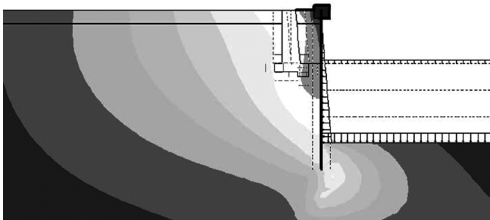
通过 3 次清淤后，不同悬臂长度的板桩入土深度均为 1 m，其清淤后的水平位移分布云图分别如图 4 所示，各云图比例尺相同。

根据其水平位移云图，可以看出，随着板桩悬臂长度的减小，其护岸水平位移也逐渐减小。且其位移等值线大致可分为三种情况：老护岸后土体水平位移等值线与水平线呈小于 90°、等于 90°、大于 90°这三种情况见图 5。

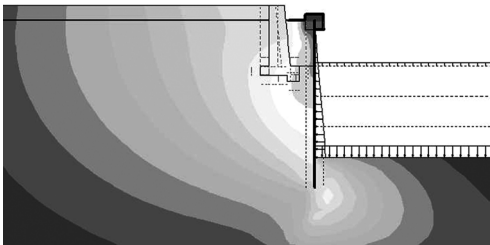
3.1.1水平位移等值线与水平线小于 90°

老护岸后土体水平位移等值线与水平线呈小于 90°时，对应悬臂长度为 5 m 和 4.5 m 两种情况，做其老护岸后土体剖面，取其水平位移如图 6 所示：

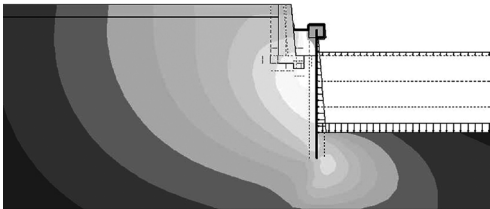
如图 6 所示，可以明显看出其土体上部位移大于下部位移，说明上部土体的张拉破坏产生的水平位移大于下部土体剪切破坏产生的水平位移，所以护岸最终的破坏形式趋于以上部土体张拉破坏为主的倾倒破坏。



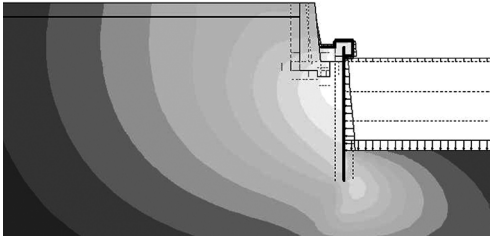
(a) 悬臂长度 5 m



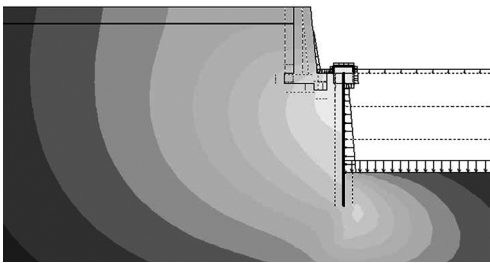
(b) 悬臂长度 4.5 m



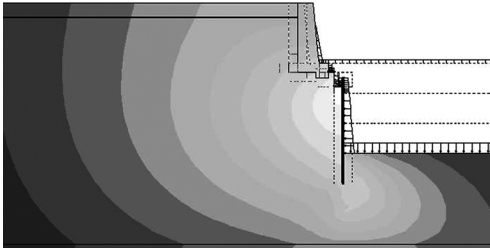
(c) 悬臂长度 4 m



(d) 悬臂长度 3.5 m



(e) 悬臂长度 3 m



(f) 悬臂长度 2.5 m

图 4 不同悬臂长度板桩消淤后的水平位移分布云图
Fig.4 Horizontal displacement of sheet piles after desilting for different cantilever lengths

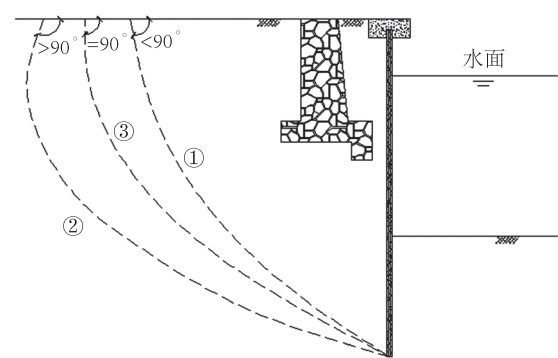


图 5 岸后土体三种水平位移等值线示意图
Fig.5 The sketch map of three types of horizontal displacement contour of soil behind revetment

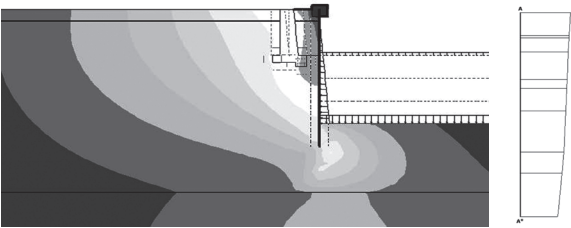


图 6 悬臂长度 5 m 板桩护岸土体剖面水平位移
Fig.6 The horizontal displacement of soil profile behind revetment with 5 meters cantilever length

3.1.2 水平位移等值线与水平线大于 90°

老护岸后土体水平位移等值线与水平线呈大于 90° 时，对应悬臂长度为 3 m 和 2.5 m 两种情况，做其老护岸后土体剖面，取其水平位移如图 7 所示：

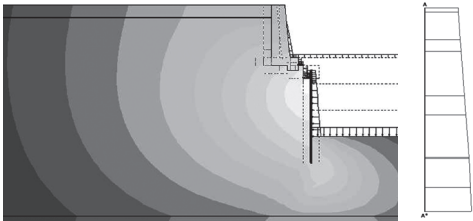


图 7 悬臂长度 2.5 m 板桩护岸土体剖面水平位移
Fig.7 The horizontal displacement of soil profile behind revetment with 2.5 meters cantilever length

如图 7 所示，可以明显看出其老护岸后上部土体水平位移小于下部土体，此时说明下部土体受剪切破坏产生的水平位移大于上部土体受张拉破坏产生的水平位移，故护岸最终趋于以下部土体剪切破坏为主的滑移破坏。

3.1.3 水平位移等值线与水平线等于 90°

老护岸后土体水平位移等值线与水平线呈等于 90° 时，对应悬臂长度为 4 m 和 3.5 m 两种情况，做其老护岸土体剖面，取其水平位移如图 8 所示：

如图所示，可以明显看出在一定区域内，其上

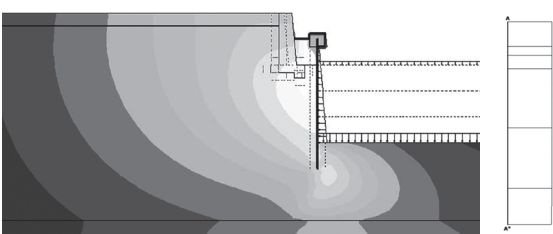


图 8 悬臂长度 4 m 板桩护岸土体剖面水平位移
Fig.8 The horizontal displacement of soil profile behind revetment with 4 meters cantilever length

部土体水平位移和下部水平位移相差微小，说明此时老护岸后方上部土体和下部土体受剪切和张拉产生的水平位移相近，护岸既不表现出倾倒破坏，也不表现出滑移破坏。但当护岸在受到某种外在偶然作用时，则既可能发展为倾倒破坏，也可能发展为滑移破坏。

3.2 板桩内力分析

3 次清淤后，即板桩入土深度为 1 m 时，不同悬臂长度情况下对应的板桩剪力和弯矩分布情况如图 9 所示。

如图 9 和图 10 所示，在板桩与老护岸重叠区域，即板桩上部 2.5 m 区域，所受剪力和弯矩很小，而老护岸底端以下区域的板桩所受弯矩和剪力较大，由此可见老护岸的挡土作用明显。

此外，板桩弯矩基本呈抛物线型分布，随着悬臂长度在板桩和老护岸重叠区域减小，板桩剪力和弯矩变化很小，而当悬臂长度减小至 2.5 m 时，即板桩顶端开始低于老护岸底端时，板桩剪力和弯矩明显减小，相比之前较稳定不变的弯矩和剪力，说明此时板桩的挡土作用已经开始减弱。

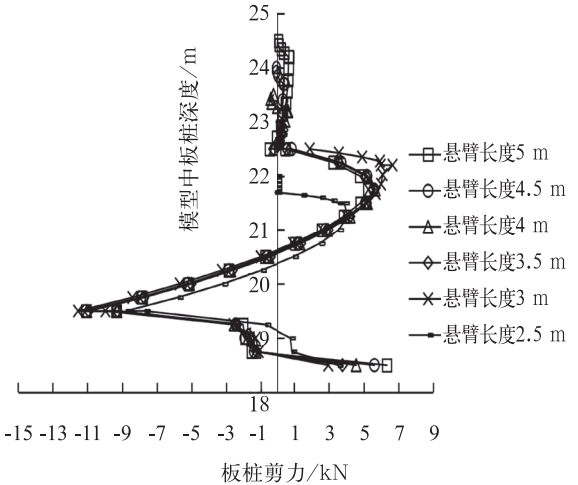


图 9 不同悬臂长度板桩剪力分布图
Fig.9 The distribution of shear force of sheet piles with different cantilever lengths

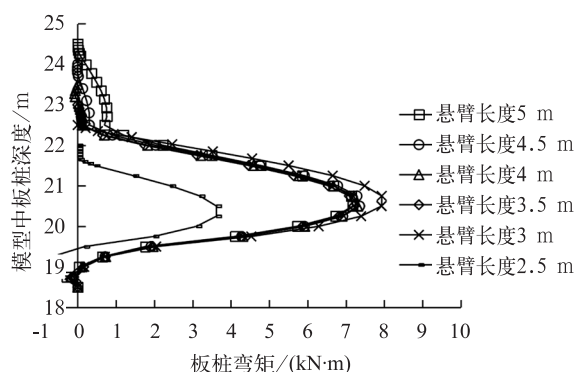


图 10 不同悬臂长度板桩弯矩分布图

Fig.10 The distribution of bending moment of sheet piles with different cantilever lengths

3.3 稳定性分析

3.3.1 板桩稳定性计算方法

考虑老护岸影响,本文所采用的板桩稳定性计算方法主要体现以下四点:考虑到现场填土为河流底淤,开挖过程中,其结构完全破坏,如按照常规公式计算,土压力均为零,这与事实不符,故本文的板桩墙后填土土压力值是从有限元软件中计算得出;将老护岸作为桩后条形荷载施加于老护岸底端,条形荷载向板桩处的扩散角取 45° ^[1];老护岸底端以下土压力按库伦土压力计算,上部土体作为竖向荷载;位于水位以下的土体均采用浮重度,且板桩两侧水压力相互抵消^[8]。

按照如图 11 受力情况,板桩稳定性安全系数 k 的计算公式为

$$k = \frac{E_p \cdot l_p}{E_{a1} \cdot l_{a1} + E_{a2} \cdot l_{a2} + E_{aq} \cdot l_{aq}}$$

$$E_{aq} = K_a \cdot \cos \delta \cdot q \cdot h$$

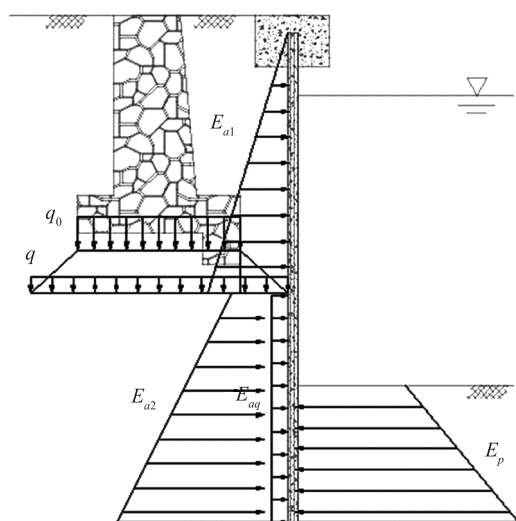


图 11 板桩受力分布图

Fig.11 The distribution of stress of sheet pile

式中: E_p 为被动土压力合力; E_{a1} 为桩后填土桩顶土压力合力; E_{a2} 为老护岸底端以下主动土压力合力; E_{aq} 为老护岸作为条形荷载引起的侧向附加压力; l_p 、 l_{a1} 、 l_{a2} 、 l_{aq} 分别为对应压力的合力到桩底端的距离; K_a 为库伦主动土压力系数; δ 为墙背与土体间的摩擦角。

3.3.2 稳定性计算结果分析

利用上述计算方法,计算板桩稳定性安全系数 K ,同时根据有限元程序进行强度折减法计算出护岸整体稳定性。下面为了深入研究不同悬臂长度对板桩护岸的影响规律,分别针对不同入土深度的板桩护岸,在相同清淤条件下,即同样清淤 3 m,对比分析不同入土深度下板桩悬臂长度对护岸的稳定性影响规律研究。

如表 3 所示,计算出的板桩稳定性安全系数 K ,对于同一入土深度的板桩,随着悬臂长度的减小,其呈微幅增大,但随着入土深度的增加, K 值的增幅明显较大。可见入土深度对板桩稳定性安全系数 K 的影响更明显,而悬臂长度对其影响微小。

如图 12 所示,板桩护岸的整体稳定性安全系数 FOS,对于不同入土深度的板桩护岸,其变化的趋势基本一致,即随着悬臂长度的增加, FOS 值均先增大后减小,其变化转折点都位于悬臂长度 3 m 的位置, 3 m 悬臂长度的板桩顶端所对应的位置恰好是老护岸底端前趾位置。由此可见,当悬臂长度超过老护岸底端,板桩悬臂部分与老护岸重叠的长度越多,则整体稳定性安全系数 FOS 就会越小,而当悬臂长度低于老护岸底端时,其 FOS 值也会变小。此外,随着入土深度的增加,在板桩和老护岸重叠区域,板桩悬臂长度对护岸整体稳定性的影响越小。

综上分析,在板桩和老护岸重叠区域,随着悬臂长度的减小,板桩稳定性和整体稳定性都是增强的。当板桩顶端低于老护岸底端时, FOS 值开始减小,

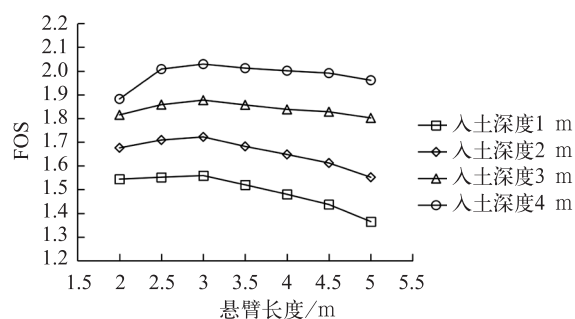


图 12 整体稳定性安全系数 FOS

Fig.12 Safety factor FOS of global stability of revetment

表 3 板桩稳定性安全系数 K
Tab.3 Safety factor K of stability of sheet pile

入土深度 /m	悬臂长度 /m						
	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2
1	0.316	0.323	0.328	0.33	0.332	0.333	0.365
2	0.736	0.742	0.754	0.755	0.771	0.776	0.818
3	1.057	1.068	1.077	1.081	1.095	1.098	1.134
4	1.326	1.36	1.347	1.355	1.387	1.396	1.430

而 K 值依旧在微幅增大, 可以看出此时板桩稳定性在稳定性评价中的作用渐渐失去效益, 而整体稳定性的评价效益得到增强。这也与上述水平位移等值线分析得出的破坏趋势相吻合。

4 结论

- 1) 随着板桩悬臂长度的减小, 其护岸水平位移也逐渐减小。且其位移等值线大致可分为三种情况: 老护岸后土体水平位移等值线与水平线呈小于 90° 、等于 90° 、大于 90° 这三种情况, 对应的桩后土体的变形破坏形式逐渐从倾倒破坏向滑移破坏转变。
- 2) 在板桩与老护岸重叠区域, 即板桩上部 2.5 m 区域, 所受剪力和弯矩很小, 而老护岸底端以下区域的板桩所受弯矩和剪力突然增大, 由此可见老护岸的挡土作用明显。
- 3) 在板桩和老护岸重叠区域, 悬臂长度的减小对板桩内力影响很小, 而当悬臂长度减小至老护岸底端以下时, 板桩剪力和弯矩则明显减小, 相比之前较稳定不变的弯矩和剪力, 说明此时板桩的挡土效果已经开始减弱。
- 4) 在板桩和老护岸重叠区域, 随着悬臂长度的减小, 板桩稳定性和整体稳定性都是增强的。当板桩顶端低于老护岸底端时, FOS 值开始减小, 而 K 值依旧在微幅增大, 说明此时板桩稳定性安全系数 K 在稳定性评价中的作用渐渐失去效益, 而整体稳定性安全系数 FOS 的评价效益得到增强。这也与上述水平位移等值线分析得出的破坏趋势的转变相吻合。
- 5) 随着入土深度的增加, 在板桩和老护岸重叠

区域, 板桩悬臂长度对护岸整体稳定性影响越小。

参考文献:

[1]GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C. Lateral pressure on sheet pile walls due to strip load[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124 (1): 95.

[2]DAS M R, DAS S K.Optimal Design of sheet pile wall embedded in clay[J].Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 2015, 96 (3): 249-258.

[3]BABU G L S, BASHA B M.Optimum design of cantilever sheet pile walls in sandy soils using inverse reliability approach[J].Computers and Geotechnics, 2008, 35 (2): 134-143.

[4]刘文平, 郑颖人, 雷 用, 等. 遮帘式板桩码头结构有限元数值分析 [J]. 岩土工程学报, 2010 (Z1): 135-141.

[5]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.

[6]俞 晓, 杨泰华. 运用 ANSYS 对板桩墙支护模型的计算分析 [J]. 岩土力学, 2003 (Z2): 57-60.

[7]王新泉, 陈永辉, 章宇强, 等. 板桩加固护岸受力机制的现场试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (6): 1749-1756.

[8]JTS 167-3-2009, 板桩码头设计与施工规范 [S].

(责任编辑 王利君)