

基于土拱效应的板桩码头遮帘桩间距的设计计算

章玲玲¹, 林 海²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 全遮帘式板桩码头作为一种新型结构, 为板桩码头向深水化发展提供了可能。全遮帘式码头的设计尚无完备理论, 遮帘桩排列的间距一般多依据工程经验确定, 尚无成熟的计算方法。遮帘桩属于典型的被动桩, 一定条件下遮帘桩后形成土拱效应, 使得桩后大部分土压力由土拱传递给遮帘桩, 从而改善了前墙的受力情况。基于遮帘桩后土拱效应存在的假定, 联合桩间静力平衡条件、土拱跨中截面强度条件和拱脚三角受压区破坏条件, 确定了遮帘桩间距的计算公式。

关键词: 板桩码头; 遮帘桩; 桩间距; 土拱效应

中图分类号: TU473.1 **文章编号:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-1134-04

作者简介: 章玲玲(1990-), 女, 江西鄱阳人, 硕士研究生, 从事码头结构计算和分析研究。E-mail: zhanglingling_hi@163.com。

Design calculation on spacing of barrier piles for sheet-pile wharf based on soil-arching effect

ZHANG Ling-ling¹, LIN Hai²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The all-covered type of sheet-pile wharf is a new type structure, which makes the sheet wharf possibly be used in the construction of deep water berth. There is still no complete theory for the design of the all-covered type of sheet-pile wharf, and the spacing of barrier piles is mostly determined by engineering experience, as there is a lack of any mature method. The barrier pile is a typical passive pile. The soil arching behind the barrier piles will be formed under a certain condition. Most of the soil pressure behind the piles is transferred to the barrier piles by the soil arching, and thereby the mechanical behaviors of the front wall can be improved. Based on the assumption that soil arching effect exists behind the piles, combined with the static equilibrium equation, strength condition for mid-span section of the soil arching, and the failure condition for the triangle compression zone at the arch springing, a formula for the spacing of barrier piles is proposed.

Key words: sheet-pile wharf; barrier pile; pile spacing; soil-arching effect

0 引言

板桩码头随着水深的变化, 对其强度和稳定性的影响是非常敏感的。板桩码头为薄壁结构, 抗弯能力有限。我国建成的板桩码头中, 大多数属于中小型码头。全遮帘式板桩码头的提出, 为板桩码头向深水化发展提供了可能^[1]。全遮帘式板桩码头是一种新型的板桩码头结构型式, 主要由前板桩墙、遮帘桩、拉杆和锚定墙组成, 如图1所示。遮帘桩能够承受一部分的陆侧土压力, 从而使前板桩的土压力减小, 再加上钢拉杆在前板墙上端提供的约束, 使得前板墙的受力情况有明显改善。即使对于深港池, 也无需采用太厚的桩体及较大的嵌固深度, 即可保证前板墙的稳定及

控制其侧向位移量。数值模拟分析结果表明, 遮帘桩的存在使得结构受力优化, 作用在前墙的土压力和最大弯矩大幅减小^[2-4]。然而遮帘式板桩码头作为一种全新码头结构, 因缺少相关设计规范和计算方法, 给结构工程设计、施工与优化带来很大困难。

遮帘桩间存在的水平土拱效应, 能够有效地为前板桩遮挡土压力, 码头的设计中应该考虑土拱效应的存在^[5]。在实际工程中, 遮帘桩的间距一般按照设计者的经验选取, 尚无成熟的设计理论。桩间距是遮帘桩设计的重要技术指标, 如果遮帘桩间距过大则土体将从桩间滑出或产生绕桩滑动, 遮帘桩起不到有效的

遮拦作用, 过小则造成经济浪费, 所以在保证结构安全的前提下, 确定合理的桩间距使土体能够产生土拱效应而且土拱不被破坏。许多学者基于土拱效应的基本理论开展了桩间距计算方法的研究。王成华等^[6]根据静力平衡条件得到桩间距计算公式, 但分析并未考虑土拱的强度。黄伟等^[7]通过两侧摩阻力与桩后土拱土压力的平衡及拱脚强度条件得到桩间距计算方程, 未考虑跨中截面的强度条件, 跨中截面垂直于外荷载, 易发生剪切破坏, 所以应该校核其强度。王玉平^[8]提出了以桩间静力平衡条件、跨中截面强度条件以及拱脚处截面强度条件共同控制来确定桩间距, 在拱脚处截面强度控制条件下, 虽然验证了“三角受压区”腰边截面满足莫尔-库仑准则, 但是没有对最危险的腰边截面进行分析。本文在以往学者研究的基础上, 从土拱的存在条件出发分析土拱受力, 提出一种遮帘桩间距的设计计算方法。

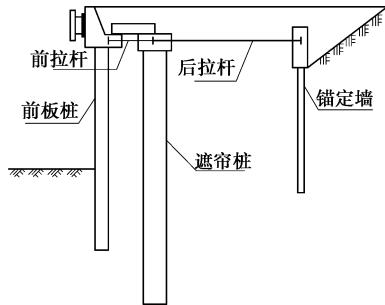


图 1 全遮帘式板桩码头结构示意图

Fig. 1 Structure of all-covered type of sheet-pile wharf

1 土拱存在条件

Terzaghi^[9]通过活动门试验证明了土拱效应的存在, 并提出其存在条件为: ①土体之间产生不均匀位移或者相对位移; ②作为支撑拱脚的桩体存在。贾海莉等^[10]认为, 土拱效应的存在还应满足第 3 个条件, 即拱体形成处土体中的剪应力应小于其抗剪强度。只有土体所受剪应力小于其抗剪强度的条件下, 土体才可能调动其自身强度以抵抗外力。

在遮帘式板桩码头工程中, 遮帘桩是间隔排列的, 港池的开挖使得水深增加, 遮帘桩间的土体在更大的压力差下有向前板桩移动的趋势, 引起桩间土体与桩后土体抗剪强度的发挥而在土体中形成所谓的“楔紧”作用, 以限制桩间土体的大幅移动。桩间土体通过抗剪强度的发挥将土压力传递到遮帘桩背侧不动土体上, 并最终传递到两侧的遮帘桩上, 从而减少了前板桩的土压力, 这种现象即为桩间土变形引起的水平土拱效应, 如图 2 所示。

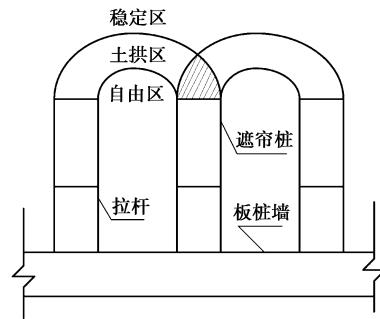


图 2 遮帘桩后土拱示意图 (俯视图)

Fig. 2 Diagram of soil arching behind barrier piles (top view)

2 基本假定

- (1) 不计土拱的自重, 把土拱问题近似简化成沿桩长方向的平面应变问题。
- (2) 取单位厚度的土层, 土体在土拱区内是连续均匀的介质。
- (3) 假定相邻两桩间的土拱主要在桩后侧土体中形成, 桩侧摩阻力对土拱形成的影响忽略不计。
- (4) 假定桩后土压力沿桩间均匀分布, 则其以分布力的形式作用于土拱上。
- (5) 假定土拱不对自由区土体施加水平压力。

3 土拱的计算模型

在对土拱进行分析研究之前, 首先应该确定土拱的拱形, 拱形的确定直接关系到土拱受力分析的正确与否。土拱形成过程是土体调整其自身内力分布的过程, 以期最大限度地发挥自身的承载能力。土拱效应主要是利用土体抗压性能好、抗拉能力差的特点, 是土体变形后受力的自我优化调整的结果。因此, 土压力均匀分布于桩间土体的假定下, 可以认为土拱的形状为合理拱轴线, 合理拱轴线的每一截面上只存在压力, 没有弯矩和拉力, 适合于土体抗压不抗拉的特点。根据结构力学知识, 可求出合理拱轴线的方程为:

$$y = 4x^2/l, \text{ 受力简图如图3所示。}$$

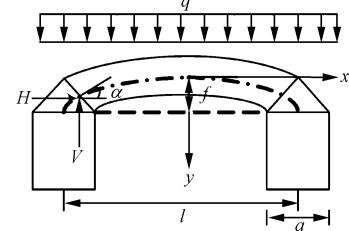


图 3 土拱受力简化计算模型

Fig. 3 Simplified mechanical calculation model of soil arching

因为该结构为对称结构, 可求得拱脚水平反力 $H = ql^2/8f$, 竖向力 $V = ql/2$ 。其中起拱角

$\tan \alpha = dy/dx = 4f/l$, 所以 $f = l \tan \alpha / 4$ 。当土体达到极限平衡状态时, $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ 。

4 控制条件

4.1 静力平衡条件

要保证相邻两桩间的土拱正常发挥, 就需要满足桩间静力平衡条件。

水平方向上土拱将土压力传递到拱脚, 在拱脚处的水平力是由垂直产生的水平最大摩擦力来维持平衡, 并且摩擦力的大小是由土体的抗剪强度控制。若土体间的水平最大摩擦力小于传递到拱脚的水平力, 则拱脚产生较大的水平位移而导致整个拱的内力分布变化使土拱破坏, 土拱从桩间滑出。可得土拱水平方向的平衡控制条件: 土拱传递到拱脚的水平方向的力不应大于由土体间抗剪强度发挥的最大水平摩阻力, 即:

$$\frac{ql^2}{8f} \leq \frac{ql}{2} \tan \varphi + ca \quad (1)$$

式中, c , φ 为土体的黏聚力和内摩擦角, a 为桩背宽度。

取其极限状态, 得出满足静力平衡条件下的桩间距 l_1 :

$$l_1 = \frac{2ca \tan \alpha}{q - q \tan \alpha \tan \varphi} \quad (2)$$

4.2 土拱跨中截面强度条件

分析土拱受力特点, 拱顶和拱脚是最容易破坏的地方。拱顶处截面, 即跨中截面, 垂直于外荷载, 易发生剪切破坏, 为最不利截面。而跨中截面前缘点比后缘点受力更为不利, 所以取前缘点分析其应力状态, 进行强度验算。

$$\sigma_1 = \frac{H}{h} = \frac{ql^2}{8fh} \quad (3)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (4)$$

式中, h 为土拱厚度。将式(3)、(4)代入莫尔-库仑准则 $\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$, 可得

$$\frac{ql}{2h \tan \alpha} = 2c \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (5)$$

由式(5)可得, 满足跨中截面强度的桩间距 l_2 :

$$l_2 = \frac{4hc \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \tan \alpha}{q} \quad (6)$$

4.3 拱脚三角受压区破坏条件

相邻两侧土拱在桩后形成三角受压区, 应保证该三角受压区能正常发挥效用不被破坏。拱脚土体受相邻两个土拱作用力的挤压达到塑性破坏^[11]。理想完全

塑性材料, 不是脆性材料。当达到弹性极限之后, 会产生连续不断的流动变形, 对于这种材料, 可以认为弹性变形与塑性变形的界限十分清楚, 屈服点也等于塑性流动的起始点, 最后这种材料要趋于破坏, 由于屈服条件与应变无关, 在此情况下, 屈服条件与破坏条件是相同的。假定该三角区内土体为理想完全塑性材料, 仍用莫尔-库仑理论校核三角受压区腰边强度。图4为三角受压区受力分析简图, h 为土拱拱厚。

$$\frac{T \cos(\theta + \alpha)}{h} = c + \frac{T \sin(\theta + \alpha)}{h} \tan \varphi \quad (7)$$

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} = \frac{ql}{2} \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \alpha} + 1} \quad (8)$$

$$h = \frac{a}{2 \cos \theta} \quad (9)$$

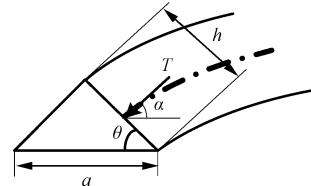


图 4 三角受压区受力分析简图

Fig. 4 Simplified mechanical analysis diagram of triangle compression zone

联立式(7)、(8)和(9), 得出

$$l = \frac{\frac{ca}{2 \cos \theta}}{\frac{q}{2} \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \alpha} + 1} (\cos(\theta + \alpha) - \sin(\theta + \alpha) \tan \varphi)} \quad (10)$$

当 θ 满足 $\frac{\partial l}{\partial \theta} = 0$ 时, 得到的 θ 值使得函数 $l(\theta)$ 取得极小值,

此时的 θ 值需要较小的桩间距 l 来满足土拱拱脚的稳定, 而已设定的桩间距 l 不能满足, 可认为此时三角截面是最危险截面。求导可得 θ 与 α 的关系为 $\tan(2\theta + \alpha) = -\tan \varphi$ 。

由此可以由式(10)计算出满足三角受压区破坏条件的桩间距 l_3 。综合以上计算, 桩间距 $l = \min\{l_1, l_2, l_3\}$, 则遮帘桩桩间净距 $l_0 = l - a$ 。

土拱效应作用过程具有阶段性特征, 在最后阶段中出现的土拱为大主应力拱, 基于此建立的桩间距计算模型即为最不利情况下桩间距计算模型。传统的基于桩间土拱效应的桩间距模型忽视桩后土拱的作用, 实际工程中, 桩间土拱和桩后土拱往往是以两者联合的形式共存, 其联合体称为联合拱^[12]。联合拱的发育以桩间拱最先形成开始, 以桩后拱最终破坏结束^[13]。所以在本文中, 主要以桩后土拱的破坏条件为计算桩间距的控制条件来建立公式。

5 结语

本文通过考虑板桩码头中遮帘桩间存在土拱作用, 以土拱的受力平衡、最危险破坏面强度验算和土拱重叠三角受压区的稳定破坏验算为手段, 推算出满足土拱存在要求的合理遮帘桩间距。限于水平, 本文并无具体结论, 希望本文的工作能为遮帘式板桩码头的计算和研究提供一定的帮助。

参考文献:

- [1] 刘永绣, 吴荔丹. 遮帘式板桩码头计算理论和方法[J]. 港工技术, 2005(增刊 1): 33 - 36. (LIU Yong-xiu, WU Li-dan. Calculation theory and method for covered type of deep water sheet pile wharf[J]. Port Technology Engineering, 2005(S1): 33 - 36. (in Chinese))
- [2] 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, 32(增刊 1): 135 - 141. (LIU Wen-ping, ZHENG Ying-ren, LEI Yong, et al. Finite element numerical analysis of covered sheet pile wharfs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 135 - 141. (in Chinese))
- [3] 刘文平, 郑颖人, 蔡正银, 等. 遮帘式板桩码头结构有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 573 - 577. (LIU Wen-ping, ZHENG Ying-ren, CAI Zheng-yin, et al. Finite element method for covered sheet pile wharfs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 573 - 577. (in Chinese))
- [4] 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, 45(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, 45(5): 182 - 190. (in Chinese))
- [5] 崔冠辰, 蔡正银, 李小梅, 等. 遮帘式板桩码头工作机理初探[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 762 - 766. (CUI Guan-chen, CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, et al. Preliminary investigation on working mechanism of covered sheet-pile wharfs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 762 - 766. (in Chinese))
- [6] 王成华, 陈永波, 林立相. 抗滑桩间土拱特性及最大桩间距分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 556 - 559. (WANG Cheng-hua, CHEN Yong-bo, LIN Li-xiang. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile[J]. Journal of Mountain Research, 2001, 19(6): 556 - 559. (in Chinese))
- [7] 黄伟, 潘泓, 王燕燕. 全遮帘式板桩码头结构遮帘桩合理桩间距确定[J]. 地下工程与空间学报, 2012, 8(1): 129 - 134. (HUANG Wei, PAN Hong, WANG Yan-yan. Determination on rational spacing of barrier pile for all-covered type of sheet pile wharf[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 129 - 134. (in Chinese))
- [8] 王玉平. 全埋式抗滑桩最大桩间距的探讨[J]. 四川建筑科学研究所, 2008, 34(5): 120 - 123. (WANG Yu-ping. Discussion on rational spacing between embedded anti-slide piles[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(5): 120 - 123. (in Chinese))
- [9] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- [10] 贾海莉, 王成华, 李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(4): 398 - 402. (JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Discussion on some issues in theory of soil arch[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(4): 398 - 402. (in Chinese))
- [11] 杨明, 姚令侃, 王广军. 桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 817 - 822. (YANG Ming, YAO Ling-kan, WANG Guang-jun. Study of centrifuge model tests and numerical simulation on soil arching in space of piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 817 - 822. (in Chinese))
- [12] 林治平, 刘祚秋, 商秋婷. 抗滑桩结构土拱的分拆与联合研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3109 - 3114. (LIN Zhi-ping, LIU Zuo-qiu, SHANG Qiu-ting. Research on soil arch of anti-slide pile structure with methods of separation and combination[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3109 - 3114. (in Chinese))
- [13] 董捷. 悬臂桩三维土拱效应及嵌固段地基反力研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. (DONG Jie. Study on three-dimensional soil arching effect of cantilever piles and ground resisting force acted on its build-in zone[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese))