

# 短木桩在加固深基坑坑内反压土坡中的应用

衣书磊<sup>1</sup>, 王广涛<sup>1</sup>, 曲艺<sup>1</sup>, 王成<sup>1</sup>, 宋谦<sup>1</sup>, 朱一飞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中建八局浙江建设有限公司, 浙江 杭州

<sup>2</sup>江苏先行建设有限公司, 江苏 常州

收稿日期: 2023年1月27日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月27日

## 摘要

在受水浸泡情况下, 悬臂双排桩支护深基坑坑内反压留坡在围护墙推力作用下极易滑塌, 严重者会导致基坑严重变形, 进而导致坑内工程桩偏位, 甚至危及坑内施工人员的安全。短木桩以其经济和可就地取材的优点, 常常被用来加固坑内反压土坡。反压土坡开挖前将短木桩打设在土坡边缘处可以起到超前加固的作用, 短木桩打设后, 增加了坑内被动土的抗力, 增强了留土边坡的稳定性。由于木桩是预制桩, 不需要养护, 而且采用挖土机反铲便可快速打设, 在基坑抢险加固中特别适用, 可供类似工程借鉴。

## 关键词

基坑, 反压土, 木桩, 地基加固, 基坑抢险

# The Application of Short Timber Pile in Consolidating the Reserved Earth Berm in Deep Excavation

Shulei Yi<sup>1</sup>, Guangtao Wang<sup>1</sup>, Yi Qu<sup>1</sup>, Cheng Wang<sup>1</sup>, Qian Song<sup>1</sup>, Yifei Zhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Jiangsu Xianxing Construction Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Received: Jan. 27<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 27<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

For the deep excavation retained with a double-row cantilever pile, the reserved earth berm always tends to slide when soaked, and this always leads to serious remarkable displacement of retaining wall and earth berm, and further leads to the tilt of foundation piles, and even endangers the people working on the site. With cost-effectiveness and easy availability, short timber piles are

文章引用: 衣书磊, 王广涛, 曲艺, 王成, 宋谦, 朱一飞. 短木桩在加固深基坑坑内反压土坡中的应用[J]. 土木工程, 2023, 12(2): 165-175. DOI: 10.12677/hjce.2023.122020

often chosen to consolidate the earth berm. Short timber piles are driven before excavation to consolidate the berm in advance, and with timber piles driven on the edge, the capability of earth berm against slide increases and becomes more stable. Because the timber piles are pre-processed, and need no other curing like concrete materials, and can be easily driven by excavators, they are suitable for dealing with the failure of retaining wall of deep excavation in case of emergency.

## Keywords

Deep Excavation, Earth Berm, Timber Pile, Soil Consolidation, Danger Removal of Deep Excavation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

双排桩悬臂支护技术以其抗侧移刚度大、可以为土方开挖和基础施工创造大的无空间阻隔的工作面等优点而广受欢迎。我国现行的标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012) [1]也推荐了这一技术。但是,这一技术在位移控制上很大程度上取决于坑底土的被动支承能力,坑底土层压缩性越低,坑底土层越稳定,被动支承能力越强,围护桩的水平侧移越小。为此,有些设计人员采用坑底预留反压土坡来减小围护桩的侧移,认为反压土坡的设立,可以增加坑内土体对围护桩的被动约束作用,计算中可以减小开挖深度。但是,如果对于反压土坡对围护桩的约束能力缺乏深入分析,容易高估反压土坡的作用,从而导致围护墙的计算位移低估,走向偏于冒险的一面。易丽丽等人就坑内留土对双排桩支护结构的影响机理开展了研究,得到了坑内留土情形下双排桩的位移、弯矩及被动区土压力的变化规律[2]。吴龙梁等人针对反压土对围护桩的约束作用,提出反压土的水平弹簧刚度折减方法,并对反压土水平弹簧刚度影响因素进行了研究[3]。

松木桩以其低廉、施工便利、可快速发挥作用的特点,常被用来加固软土地基和已毁工程的抢险加固。杨挺等人报道了采用木桩在南京市内秦淮河三期综合整治污水截流沟工程的应用案例[4]。张文志等人报道了辽宁盘锦市太平河治理工程采用圆木桩作为护岸结构的应用案例[5],曾春林报道了采用松木桩与块石压脚固基相结合方法对填方坝体滑坡抢险加固的案例[6]。

基于江苏武进某高铁枢纽工程深基坑事故抢险的施工实践,借鉴前人研究成果,本文就木桩加固反压土坡的工作机理进行了分析研究。

## 2. 工程概况

江苏南沿江城际铁路某综合交通枢纽工程基坑开挖深度约 11.2 m,采用双排桩悬臂支护:前排桩直径 0.9 m,桩中心间距 1.3 m,桩长 21 m;后排桩直径 0.9 m,桩中心间距 2.6 m,桩长 21 m;前后排间距 2.7 m,排间土体采用三轴水泥土搅拌桩加固。基坑坑底留反压土坡,土坡宽 2.7 m,坡高 4.2 m,坡度 1:1。

基坑所处地层自上而下为:① 填土、③ 1 黏土、④ 1 粉质黏土夹粉土、④ 2 粉土夹粉质黏土、⑤ 1 黏质粉土、⑥ 2 粉质黏土、⑥ 3 黏土、⑥ 4 粉质黏土、⑦ 1 粉质黏土、⑦ 2 粉质黏土。基坑支护剖面如图 1。

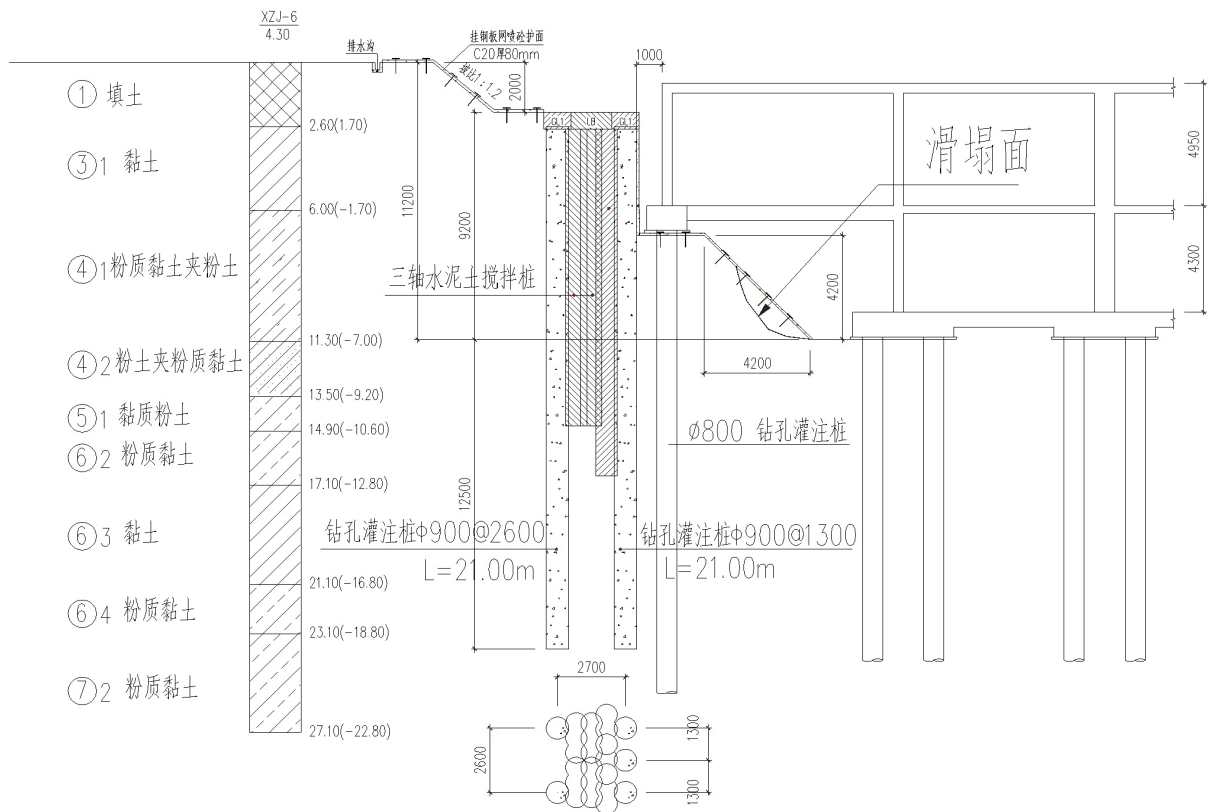


Figure 1. Profile of the supporting pile (unit: mm)

图 1. 围护桩剖面(单位: mm)

各土层的主要物理力学参数如表 1 所示。

Table 1. Properties of the soils

表 1. 土层物理力学参数

层号	土层名称	天然重度	内摩擦角	粘聚力
		$\text{kN/m}^3$	$^\circ$	$\text{kPa}$
③1	黏土	19.7	47.1	16.4
④1	粉质黏土夹粉土	19.1	21.2	17.1
④2	粉土夹粉质黏土	19.0	14.5	23.2
⑤1	黏质粉土	19.0	13.0	28.2
⑥2	粉质黏土	19.5	51.8	16.4
⑥3	黏土	20.0	63.8	18.9
⑥4	粉质黏土	19.3	36.3	17.0
⑦2	粉质黏土	19.3	35.8	16.1

由于连续多日降雨, 2022 年 4 月 25 日, 反压土坡大部分滑塌, 悬臂支护桩出现较大侧移, 预留土坡平台出现裂缝, 严重威胁坑内施工人员安全, 导致坑内垫层和底板无法浇筑混凝土。图 2 为滑塌现场照片。为了快速有效地遏制滑塌势头, 本文作者提出了在反压土坡坡脚处打设短木桩加固留土边坡的防治方案, 实施后取得了良好的效果。



Figure 2. The photo of local collapse of the earth berm  
图 2. 反压土坡坡底滑塌照片

本文就此案例中短木桩加固留土边坡的力学机理进行了计算分析。

### 3. 反压土坡滑塌前后双排桩计算分析

#### 3.1. 反压土坡稳定时围护结构的变形计算

根据施工图设计计算书，原设计假定反压土坡稳定时，反压土坡对围护桩具有支承作用。于是计算时以土弹簧来模拟反压土，此时双排桩悬臂支护的计算模型如图 3 所示。

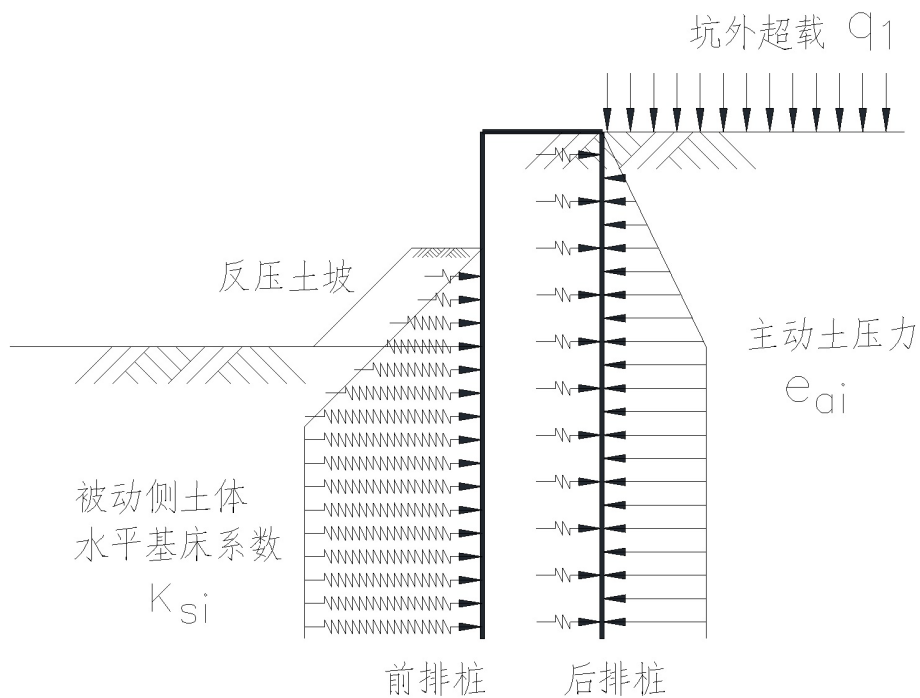
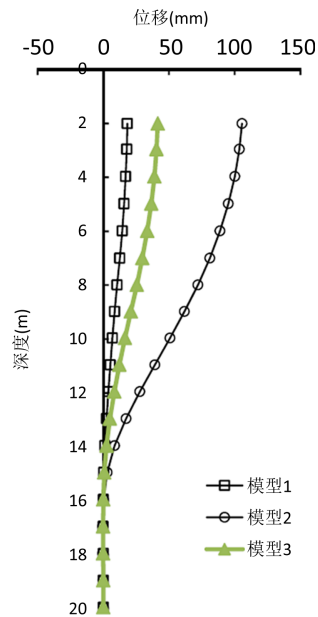


Figure 3. Model 1: Calculation model for supporting pile with earth berm  
图 3. 模型 1: 反压土坡稳定时围护桩计算模型

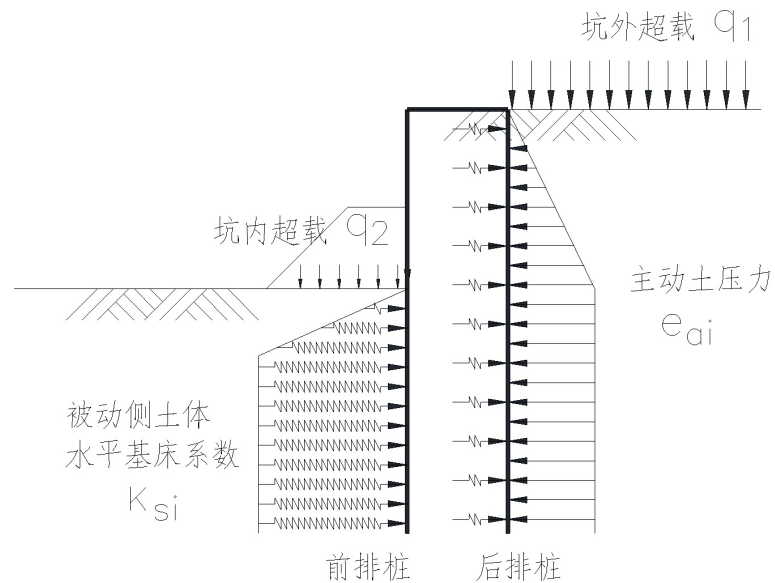
计算得到围护桩的变形曲线,如图4中的模型1所示。从图4可知,反压土坡稳定时,围护桩最大侧移为18.3 mm。



**Figure 4.** Deflection curves of the supporting pile calculated according to three models

**图4.**三种计算模型对应的围护桩的计算变形曲线

### 3.2. 反压土坡滑塌时围护结构的变形计算



**Figure 5.** Model 2: Calculation model for supporting pile after earth berm sliding

**图5.**模型2:反压土坡滑塌时围护桩计算模型

反压土坡滑塌后,土坡对围护桩的被动支承作用迅速下降,此时,反压土坡可假定为坑内超载,于

是双排桩悬臂支护的计算模型可采用图 5 所示的计算模型。计算得到围护桩的变形曲线, 如图 4 中的模型 2 曲线所示。从图 4 可知, 反压土坡滑塌时, 围护桩最大侧移达到 105.6 mm。围护桩如此大的侧移已经超出了基坑安全限值, 势必对坑内工程桩产生推挤作用, 导致工程桩的承载能力降低。

#### 4. 短木桩加固方案和计算分析

作为施工应急抢险措施, 施工方案必须达到快速高效目的, 同时尽可能经济。采用松木桩加固反压土坡能够很好地满足上述要求。松木桩相比混凝土预制方桩价格低廉, 每延米价格只是混凝土方桩的 30% 不到; 作为加固土坡的抗滑桩, 无需养护可以立即发挥作用; 施工工艺简单, 采用挖土机反铲就可将 6 米长木桩打入土中。

##### 4.1. 短木桩对滑塌土坡的抢险加固方案

抢险加固方案如下: 1) 在坡顶处打设 4 米长松木桩, 在坡面上打入第一道钢管土钉, 土钉采用  $\Phi 48 \times 2.5$  钢管, 钢管长度 3 m, 土钉间距 1200 mm, 挂钢筋网, 钢筋网采用  $\Phi 6 @ 250 \times 250$  mm, 混凝土抹面, 混凝土厚 80 mm; 2) 在坡腰处打设 4 米长松木桩, 打入第二道钢管土钉, 土钉参数同第一道; 3) 继续开挖至设计标高。4) 松木桩稍径 100 mm 以上, 小头在下, 大头在上, 小头削尖; 木桩净距 100~200 mm, 以防止桩间流土为原则。加固方案如图 6 所示。

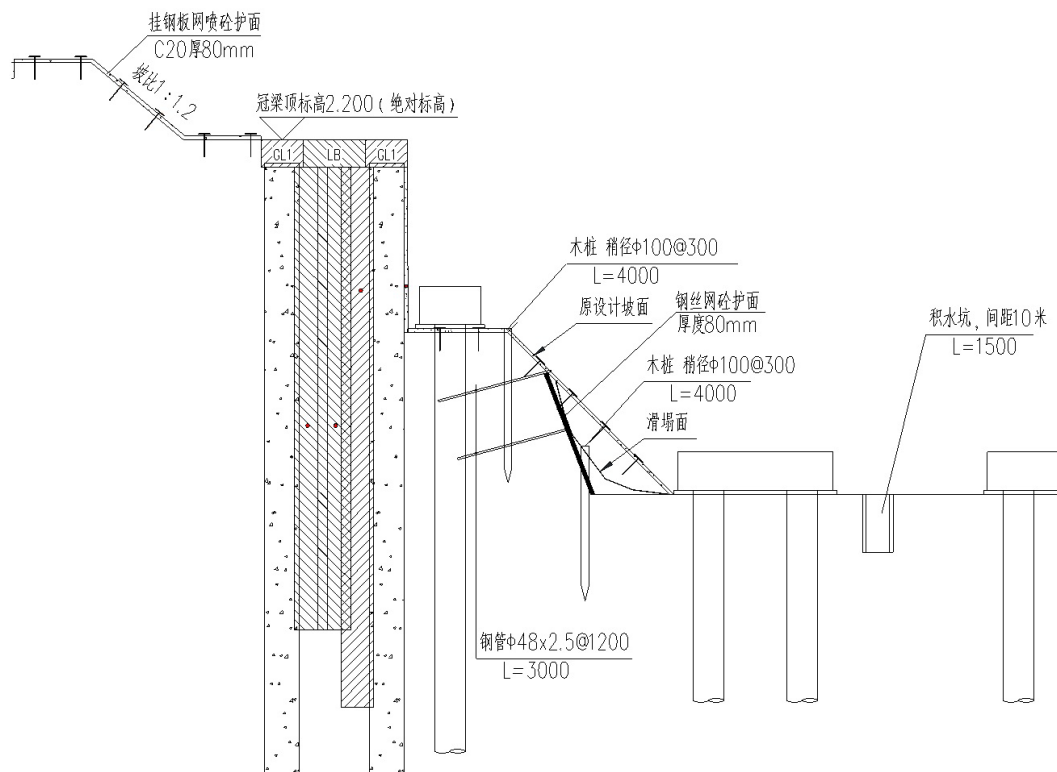


Figure 6. Profile of the consolidation at the sliding berm (unit: mm)

图 6. 土坡滑塌处抢险加固剖面(图中单位: mm)

##### 4.2. 短木桩对未开挖土坡的超前加固方案

反压土坡加固方案如下: 1) 反压土坡开挖至留坡坡腰处; 2) 在坡腰处打设 6 米长松木桩, 松木桩稍径 100 mm 以上, 小头在下, 大头在上, 小头削尖; 木桩净距 100~200 mm, 以防止桩间流土为原则。3)

继续开挖至设计标高。加固方案如图7所示。

### 4.3. 短木桩超前加固土坡的计算分析

反压土坡加固后，其对围护桩的支承作用得以加强。考虑到土坡顶部的支承作用很弱，计算时忽略不计，只考虑木桩加固范围土体的被动支承作用。土坡顶部的作用等效为坑内超载，计算简图如图8所示。计算得到围护桩的变形曲线，如图4中的模型3曲线所示。从图4可知，反压土坡加固后，围护桩

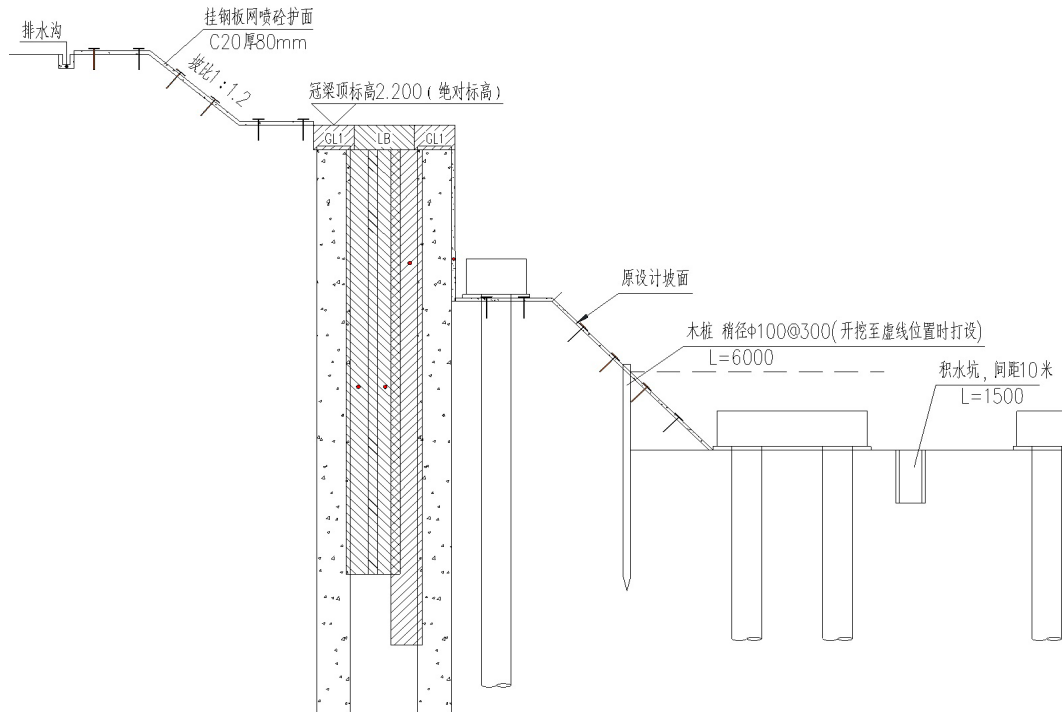


Figure 7. Scheme of advance consolidation for the earth berm  
图7. 土坡超前加固剖面(图中单位: mm)

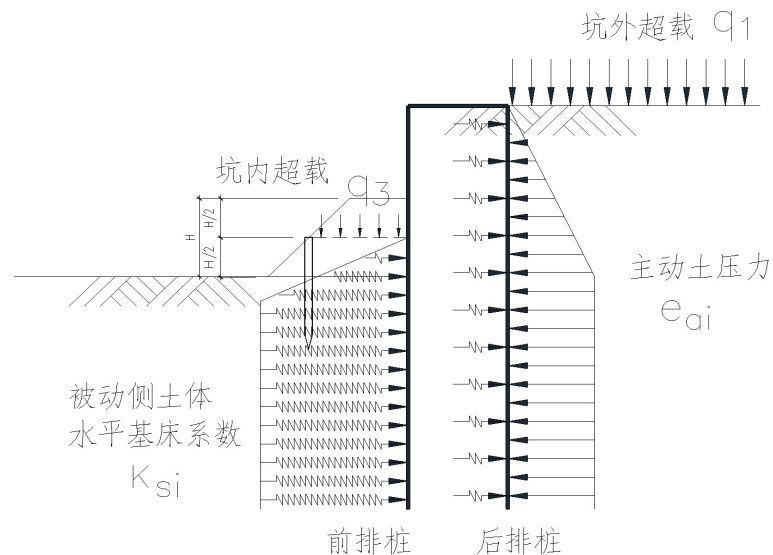


Figure 8. Model 3: Calculation model for supporting pile after consolidation  
图8. 模型3: 反压土坡加固后围护桩计算模型

最大侧移为 41.5 mm，为开挖深度的 0.37%，作为二级基坑，满足《建筑基坑工程监测技术规范》(GB50497-2009)关于围护桩顶部位移不大于开挖深度的 0.5%~0.6%之规定。

## 5. 木桩加固效果和现场监测结果分析

### 5.1. 木桩加固效果

按照前述方案，2022 年 4 月 28 日施工单位开始对滑塌土坡抢险加固处理。同时根据开挖进程对后续区段进行超前加固。加固现场照片如图 9 所示。

从图 9 照片可以看到，木桩加固后，反压土坡稳定，坡脚处地面干燥无积水，确保了基础承台及垫层混凝土的顺利浇筑。



Figure 9. Photo of site excavation after consolidation with timber piles

图 9. 木桩加固反压土坡现场照片

### 5.2. 现场位移监测

#### 1) 测点埋设

为了实时了解围护桩的工作状况和基坑安全状况，在双排桩上埋设了测斜管，以监测基坑开挖期间围护桩侧向位移沿深度变化的情况。图 10 为测斜管埋设示意图。

测点 CX-2 位于滑塌事故，属于抢险加固区段；测点 CX-3 位于超前加固区段。

#### 2) 抢险加固区段监测结果分析

监测得到测点 CX-2 在土坡滑塌当天(4 月 25 日)和抢险加固前一天(4 月 27 日)后一天(4 月 29 日)的位移。如图 11 所示。

从图 11 可以看出，土坡滑塌后，现场监测数据远比原设计理论值大，而与滑塌计算模型的理论值较为接近。说明反压土坡滑塌后，反压土坡确实降低了对围护桩的支承约束作用。图 11 还表明，在抢险加固前，围护桩变形发展较快，但当木桩打设后，位移发展得到迅速遏制。说明采用打设木桩进行抢险加固是可行的。

从图 11 我们看到，监测值和理论值还存在一些偏差，说明计算模型和参数的选择还需要根据实际情况进行优化。对于已获得足够监测数据的情况，可以采用模式识别和参数反演方式得到较好的计算模型和计算参数。



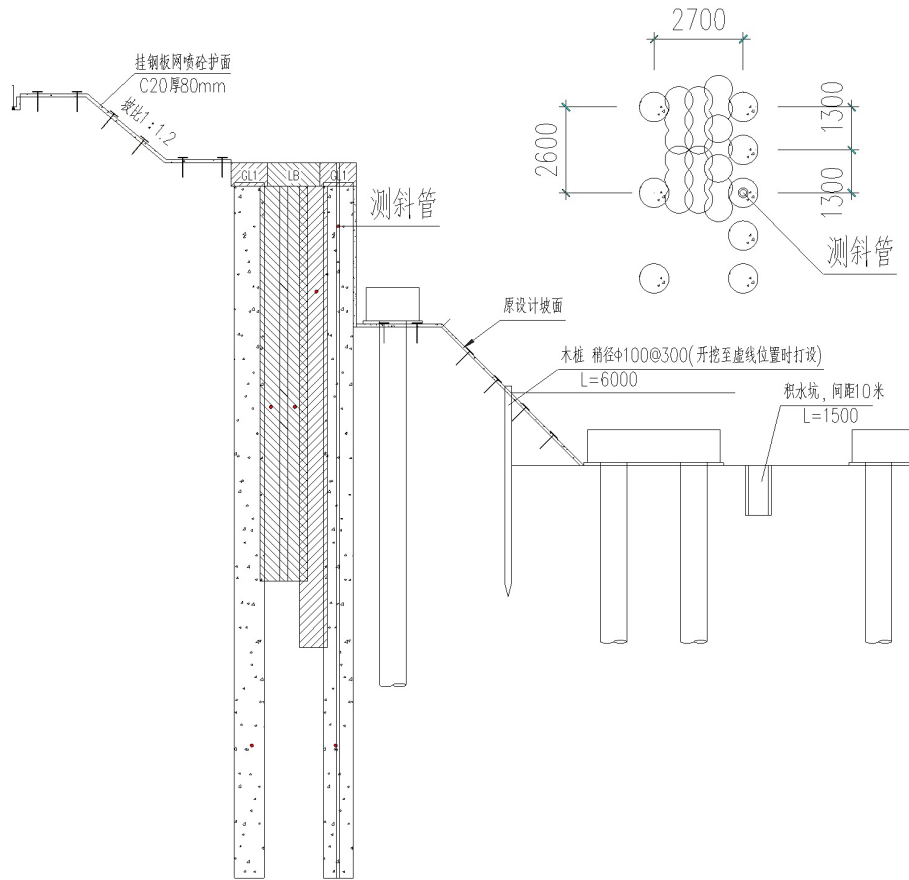


Figure 10. Installation scheme of inclination monitoring for double-row-pile retaining wall  
图 10. 双排桩支护测斜管埋设示意图

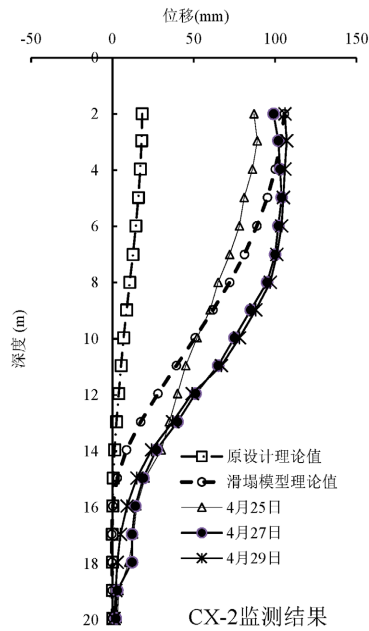
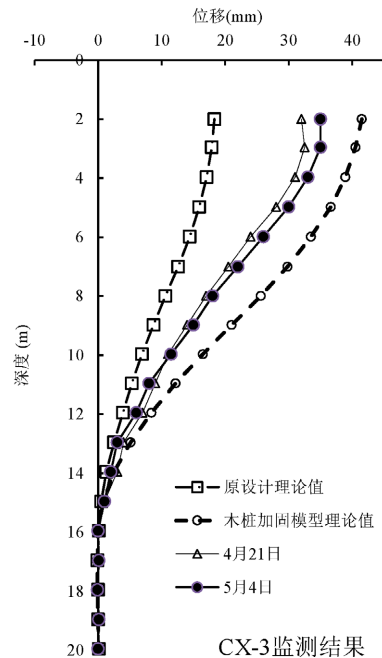


Figure 11. Deflection curves of the supporting pile at CX-2 monitoring point  
图 11. 测点 CX-2 围护桩变形曲线

### 3) 超前加固区段监测结果分析

监测得到测点 CX-3 在抢险加固前一周(4月21日)后一周(5月4日)的位移。如图 12 所示。



**Figure 12.** Deflection curves of the supporting pile at CX-3 monitoring point  
**图 12.** 测点 CX-3 围护桩变形曲线

从图 12 可以看出,反压土坡采用木桩加固后,土坡保持稳定,围护桩的位移曲线介于原设计理论曲线和木桩加固模型的理论值曲线之间。而且木桩加固前(开挖深度为土坡平台面)和加固后(开挖至基坑底)的变化不大,说明木桩加固效果很好。

从图 12 我们看到,监测值和理论值还存在一些偏差,说明计算模型和参数的选择还需要根据实际情况进行优化。对于已获得足够监测数据的情况,可以采用模式识别和参数反演方式得到较好的计算模型和计算参数。

## 6. 结论

- 1) 预留坑内反压土对双排桩悬臂支护的位移控制有益,但计算模型需考虑反压土可能滑动的不利因素。
- 2) 短木桩在反压土滑塌治理上具有快速、经济的优势。
- 3) 短木桩对反压土坡进行超前加固,可减少反压土坡位移,确保基坑位移可控。
- 4) 本文短木桩在反压土滑塌治理和超前加固的成功实践可供类似工程借鉴。

## 致 谢

本文撰写得到同济大学土木工程学院赖允瑾同志的帮助,特此致谢。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 易丽丽, 马郢, 李松, 郭运, 朱佳, 倪欣. 坑内留土对双排桩支护结构的影响分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(10): 79-83.

- 
- [3] 吴龙梁, 江辉煌, 向卫国, 高明显, 郭栋, 闫晓夏. 基于水平弹簧刚度折减的反压土计算方法[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1485-1491.
- [4] 杨挺, 周健, 周晨. 软基中木桩复合地基的分析与设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1560-1565.
- [5] 张文志, 张潇允. 圆木桩生态护岸在中小河流治理工程中的应用桩基工程[J]. 东北水利水电, 2022(5): 38-39.
- [6] 曾春林. 松木桩与块石压脚在欧阳海灌区干渠 51+000 外滑坡抢险加固中的应用[J]. 湖南水利水电, 2014(6): 7+14.