

文章编号: 1000-5013(2013)02-0192-05

围桩平面布置及其内力分布的数值分析

孔祥营<sup>1</sup>, 郑明新<sup>1</sup>, 刘伟宏<sup>2</sup>, 董超<sup>1</sup>

( 1. 华东交通大学 道桥与岩土工程研究所, 江西 南昌 330013;  
2. 南通纺织职业技术学院 建筑工程系, 江苏 南通 226007)

**摘要:** 采用三维有限差分软件 FLAC3D 分析新型围桩-土耦合式抗滑结构, 建立该新型抗滑结构的计算模型. 通过分析不同围桩平面布置下的桩-土位移, 确定围桩的合理平面布置, 即 6 根围桩, 呈正六边形布置(前、后两条边均垂直于滑坡推力方向), 围桩中心距  $s=5d$ . 在此平面布置下, 分析并得出抗滑结构中各围桩的内力分布规律, 即各围桩弯矩、剪力分布一致, 中间和后排围桩受拉, 前排围桩受压.

**关键词:** 围桩; 抗滑结构; 平面布置; 内力分布; 数值分析

**中图分类号:** TU 433      **文献标志码:** A

抗滑桩具有抗滑能力强、桩位灵活、理论和技术较为成熟等优势, 在实际工程中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>. 然而, 由于抗滑桩主要通过结构本身的强度抵抗滑坡推力来实现稳定滑坡的目的, 却没有充分调动坡体岩土体自身的强度. 鉴于此, 郑明新等<sup>[2]</sup>首次提出了围桩-土耦合式新型抗滑结构, 通过充分调动岩土体自身强度来达到抗滑的目的<sup>[3-5]</sup>. 对于围桩-土耦合结构, 徐典等<sup>[3-4]</sup>采用模型试验, 主要从应力场的变化研究了该新型抗滑结构中围桩-土的耦合作用, 将该抗滑结构等效成一根普通抗滑桩, 从而计算其内力. 本文在以上研究的基础上, 采用 FLAC3D 软件从位移场的变化探讨围桩-土的耦合效应, 确定合理的平面布置形式, 并进一步分析各围桩的内力分布规律.

1 计算模型

以某中小型规模的滑坡为例. 该滑体主要由粘土夹杂碎石组成, 下伏基岩为千枚岩, 滑体与基岩之间有软塑状砂粘土组成的软弱夹层.

对问题进行如下简化分析: 1) 将滑体、滑带和滑床作为 3 种均质岩土体分别处理; 2) 设桩位置处的滑带倾角为零, 即粗略认为该处滑坡推力为水平方向, 故取  $xy$  平面上  $\sigma_{xx}$  应力场进行分析(滑坡纵向为  $x$  轴, 横向为  $y$  轴, 竖向为  $z$  轴, 且桩位处滑床顶面  $z=0$ ).

考虑对称性, 在坡体横向上取排桩中的两根围桩-土耦合式抗滑结构为研究对象, 抗滑结构外侧计算域均取抗滑结构中心距的一半, 边界采用  $y$  向约束, 前后侧边界采用  $x$  向约束, 底面采用  $z$  向约束. 三维数值计算模型如图 1 所示.

在 FLAC3D 计算模型中, 取围桩桩长 13.2 m, 其中受荷段 8.2 m(包括贯穿滑体部分 8 m 和贯穿滑带部分 0.2 m), 锚固段 5.0 m. 对于桩土接触, 采用分段建立接触面的方式进行处理, 包括桩与滑体的接触面、桩与滑

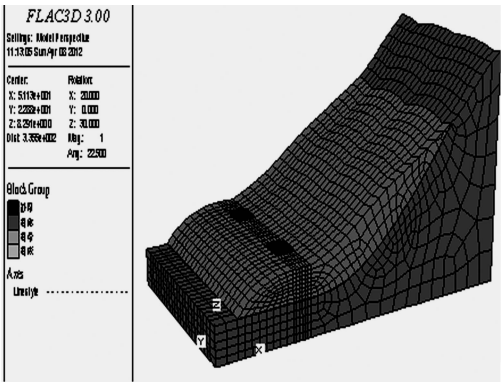


图 1 三维数值分析模型  
Fig. 1 3-D numerical calculation model

带的接触面,以及桩与滑床的接触面.

计算模型中各岩土物理力学指标依据室内试验,并结合工程地质手册<sup>[5]</sup>确定,如表 1 所示.表 1 中: $c$  为粘聚力; $\phi$  为内摩擦角; $\gamma$  为土的容重; $G$  为剪切模量; $K$  为体积模量;滑体、滑带、滑床的  $\mu$  值分别为 0.25,0.30,0.22.

表 1 计算参数表  
Tab. 1 Calculation parameters

分组	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{^\circ})$	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$G/\text{MPa}$	$K/\text{MPa}$
滑体	6	32	2.0	12.00	20.00
滑带	13	13	1.8	3.85	8.33
滑床	570	42	2.4	3 720.00	6 200.00
桩体	—	—	2.5	8 930.00	8 770.00

## 2 围桩-土耦合式抗滑结构的平面布置

### 2.1 平面布置形式的确定

在前人研究的基础上,初步选定围桩-土耦合式抗滑结构由 5 根或 6 根围桩(直径  $d=500\text{ mm}$ )组成,围桩中心距  $s=5d$ ,其平面布置角度又各有两种,如图 2 所示.

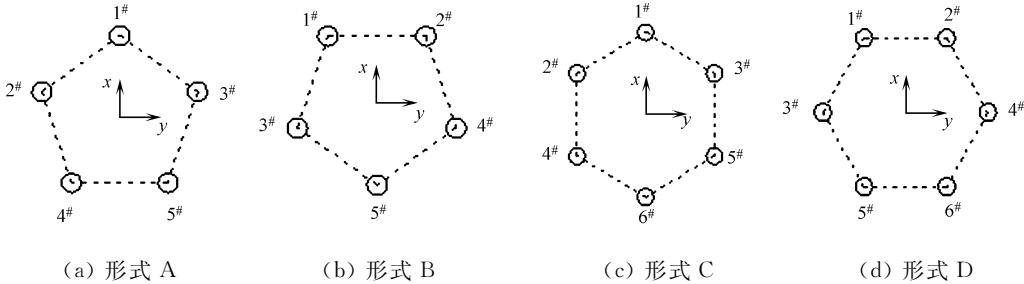
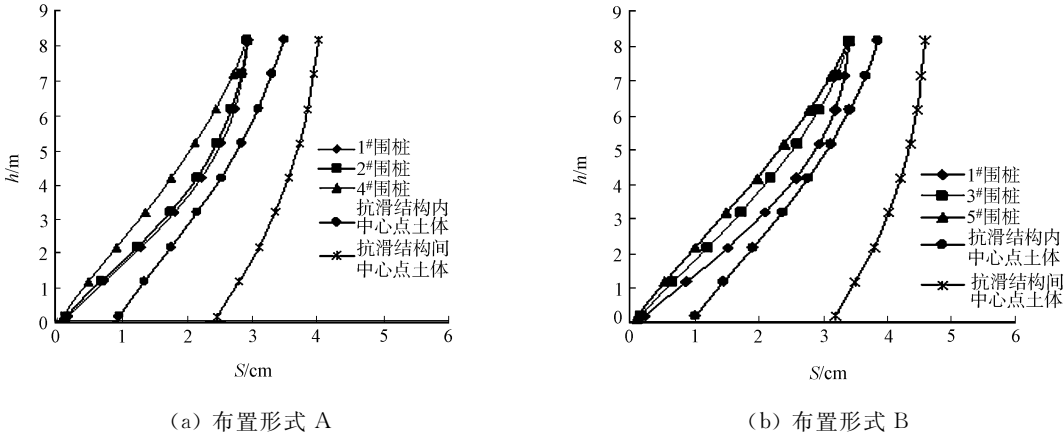


图 2 围桩平面布置图  
Fig. 2 Plan arrangement of surround pile

依据单位宽度滑体分担围桩截面面积相等的原则,在横向布桩.布置形式 A,B 下的抗滑结构中心距  $S_1=5\times S_2/6$ ,布置形式 C,D 下的抗滑结构中心距  $S_2=5d_2$  ( $d_2$  为正六边形外接圆的直径).不同平面布置形式下围桩-土的耦合效应,如图 3 所示.图 3 中: $S$  为水平位移; $h$  为滑带以上桩身截面的高度.

由图 3 可以看出:桩内中心点处土体的水平位移明显大于其后侧围桩的水平位移,变形不连续、不协调.这种水平位移的差异直观的表现就是桩内土体与后侧围桩剥离,从而切断了后侧围桩向桩内土体传递应力的途径,围桩与桩内土体没能形成耦合.

相对于这 3 种工况,图 3(d)中桩内土体位移更大程度上小于其后侧的 1<sup>#</sup> 围桩,与同一横截面的 3<sup>#</sup> 围桩基本一致,却大于其前侧的 5<sup>#</sup> 围桩.这种变形的连续和协调为围桩与桩内土体之间应力的传递提供了传递路径,从而形成良好的耦合.故选定围桩的平面布置形式为 D 布置形式.



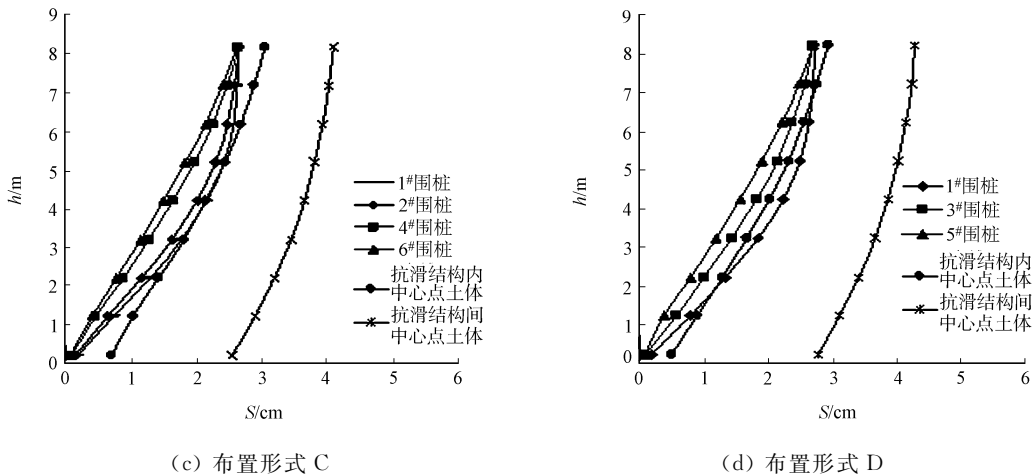


图 3 不同平面布置形式下围桩-土的耦合效应

Fig. 3 Pile-soil coupling effect in different plan arrangement

2.2 围桩中心距的确定

围桩中心距越小,则围桩与土的耦合效果越好,但围桩对结构中心的截面惯性矩变小;反之,围桩中心距越大,则围桩对结构中心的截面惯性矩越大,而围桩与土的耦合效果变差,整个抗滑结构的抗弯刚度和抗剪强度反而会减小.所以,最优的结构平面布置形式应该是在保证围桩-土耦合作用的前提下尽可能地增大围桩中心距,同时,围桩中心距增大也有利于施工时成孔的安全与质量.

围桩中心距( $s$ )选取  $3d, 4d, 5d, 6d$ ,如图 4 所示.其中: $s=5d$  即为布置形式 D.依据单位宽度滑体分担围桩截面面积相等的原则,在横向布桩,耦合式抗滑结构中心距均取  $S=25\text{ m}$ ,结果如图 5 所示.围桩中心距对桩间中心土体位移的影响,如图 6 所示.

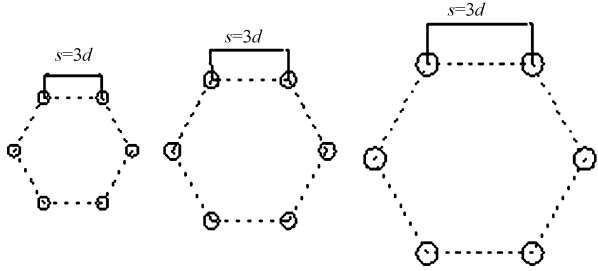


图 4 不同围桩中心距下的围桩平面图

Fig. 4 Plan arrangement of surround pile

由图 5,6 可知:围桩中心距等于  $3d, 4d, 5d$  时,围桩-土耦合式抗滑结构的直径逐渐增大,而抗滑结构中心距不变,桩后及桩间土体受耦合式抗滑结构的约束增强,故桩间土体位移减小,要想进一步减小桩间土体位移,就需要减小桩间距,势必增加单位宽度滑体内抗滑结构的工程量;当围桩中心距增加到  $6d$  时,由于围桩-土耦合效应明显减弱,围桩与桩内土体没能良好地耦合为一个整体共同受力,导致围桩对桩后及桩间土体约束力的削弱,故桩间土体水平位移较  $s=5d$  时大.

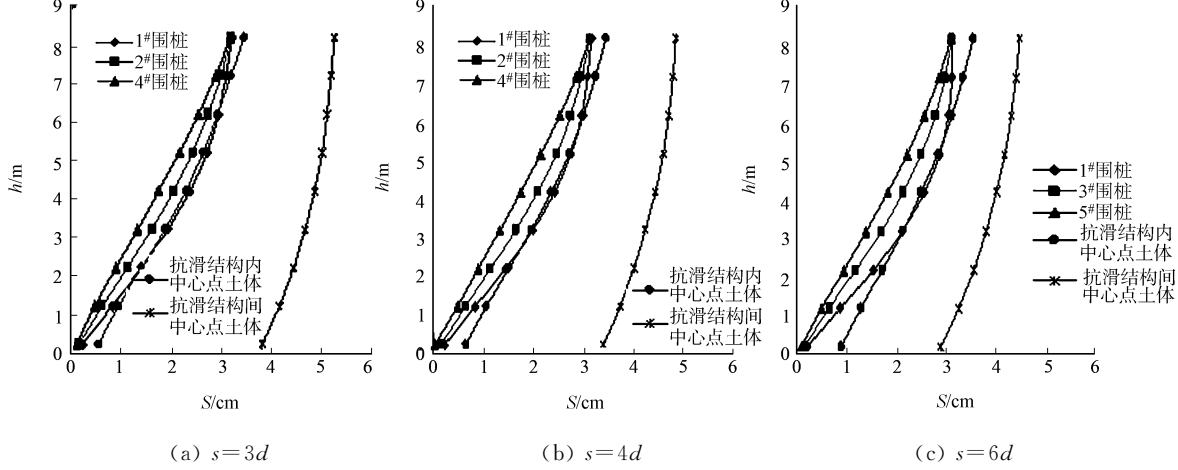


图 5 不同围桩中心距下围桩-土的耦合效果

Fig. 5 Pile-soil coupling effect in different pile space

根据以上计算和分析,选定围桩中心距  $s=5d$ . 即最终确定围桩的平面布置为形式 D,且围桩中心距为  $5d$ .

### 3 围桩内力的分布

#### 3.1 桩身弯矩的分布

桩身弯矩的分布如图 7 所示. 由图 7 可知:各围桩桩身弯矩总体的分布规律基本保持一致,只是在桩顶位置由于受到冠梁的约束作用而略有差异.

在受荷段,由于桩顶冠梁的刚性约束作用,1# 围桩顶出现正弯矩( $M$ ),3# 和 5# 围桩顶为负弯矩. 当桩身高度( $z$ )为 3.5 m,即自桩顶起受荷段长度 55%附近,各围桩负弯矩达到峰值,且按照 1#,3#,5# 围桩的顺序依次递减约 20%. 当  $z$  为 1~2 m 即自桩顶起受荷段长度 80%附近,各围桩出现零弯矩. 之后,弯矩值迅速增大. 进入锚固段后,桩身弯矩值先略有增大,后迅速减小. 在锚固段顶面略靠下的位置,正弯矩达到峰值,且其值远大于受荷段的负弯矩峰值,故该处弯矩控制着围桩的截面设计,弯矩值按照 1#,3#,5# 围桩的顺序依次递减约 8%.

#### 3.2 桩身剪力的分布

桩身剪力的分布如图 8 所示. 由图 8 可以看出:各围桩桩身剪力( $F$ )总体的分布规律基本保持一致,只是在桩顶位置由于受到冠梁的约束作用而略有差异.

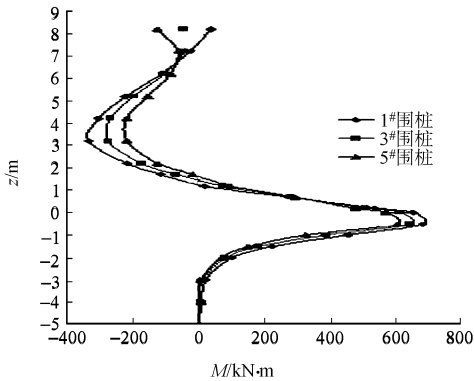


图 7 桩身弯矩

Fig. 7 Bending moment along surround pile

在受荷段,由于桩顶冠梁的约束作用,1# 围桩顶剪力值为负,而 3# 围桩顶剪力值接近于零,5# 围桩顶剪力值为正. 当  $z=5.2$  m,即自桩顶起受荷段长度 37%处,各围桩负剪力达到峰值,且按照 1#,3#,5# 围桩的顺序依次递减 19%,13%. 当  $z=3.5$  m,即自桩顶起受荷段长度 55%附近处,各围桩出现零剪力. 当  $z=0.2$  m,即滑体与滑带的交界处,正剪力达到峰值,且按照 1#,3#,5# 围桩的顺序依次递减约 14%. 进入锚固段后,在滑床岩土体的抗力作用下,桩身剪力迅速减小. 在锚固段顶面略靠下的位置,各围桩出现零剪力. 在滑床顶面以下 1.2 m 即锚固段长度 25%处,各围桩出现负剪力峰值,且按照 1#,3#,5# 围桩的顺序依次递减,递减幅度均不超过 5%.

#### 3.3 桩身轴力的分布

桩身轴力的分布如图 9 所示. 由图 9 可以看出:围桩桩身轴力分布有明显差异,1#,3# 围桩受拉,5# 围桩受压.

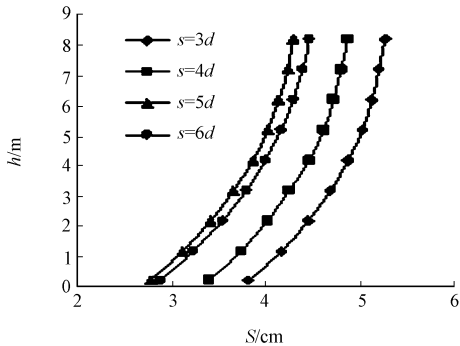


图 6 围桩中心距对桩间中心土体位移的影响

Fig. 6 Effect of surround pile center distance to soil displacement

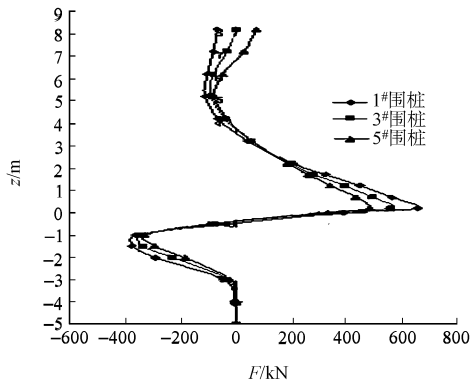


图 8 桩身剪力

Fig. 8 Shear force along surround pile

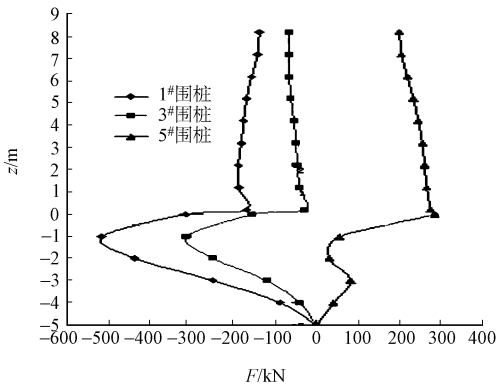


图 9 桩身轴力

Fig. 9 Shaft-load of surround pile

在受荷段,随着桩身深度的增加,1<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>围桩轴力逐渐增加,而3<sup>#</sup>围桩逐渐减小,但总体变化幅度较为缓慢.进入锚固段后,各围桩轴力发生急剧变化.其中1<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>围桩轴力大幅度增加,在滑床顶面以下1 m左右即锚固段长度20%处,桩身轴力达到最大值.之后,剪力值减小,直至桩底剪力值接近于零.

4 结 论

采用FLAC3D对围桩-土耦合式新型抗滑结构进行数值模拟分析,主要得出以下3点主要结论.

1) 围桩中心距越小,围桩-土的耦合效应越强,但考虑到整个抗滑结构的刚度因素,依据抗滑效果最终确定围桩的平面布置,即6根围桩,呈正六边形布置(前、后两条边均垂直于滑坡推力方向),围桩中心距 $s=5d$ .

2) 各围桩桩身弯矩的分布基本保持一致,在锚固段顶面略靠下的位置,正弯矩达到峰值,控制着围桩的截面设计;各围桩桩身剪力的分布基本保持一致,滑体与滑带交界处,正剪力达到峰值,控制着围桩的截面设计.

3) 围桩桩身轴力的分布有明显差异,1<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>围桩受拉,5<sup>#</sup>围桩受压,结构设计时须满足1<sup>#</sup>围桩锚固段的抗拔要求,5<sup>#</sup>围桩的压杆稳定要求.

参 考 文 献:

[1] 王恭先. 中国铁路滑坡灾害及其防治研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,1996,7(1): 6-9.  
[2] 李培植. 微桩-土耦合式抗滑结构计算方法研究[D]. 南昌:华东交通大学,2007:10-11.  
[3] 徐典. 耦合式抗滑结构模型试验及设计方法研究[D]. 南昌:华东交通大学,2008:54-55.  
[4] 刘伟宏,郑明新,王虹,等. 单个围桩-土耦合抗滑结构的土压力试验分析[J]. 河北农业大学学报,2012,35(1):89-93.  
[5] 张有良. 最新工程地质手册[M]. 北京:中国知识出版社,2006:336-467.

Numerical Analysis of Plan Arrangement and Internal Force of Surround Pile

KONG Xiang-ying<sup>1</sup>, ZHENG Ming-xin<sup>1</sup>,  
LIU Wei-hong<sup>2</sup>, DONG Chao<sup>1</sup>

(1. Institute of Bridge and Road and Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;  
2. Nantong Textile Vocational Technology College, Department of building engineering, Nantong 226007, China)

**Abstract:** The calculation model of new surround pile-soil coupling anti-slide structure was established and analyzed with the three-dimensional finite difference software FLAC3D. By analyzing on the displacement of pile and soil in the different plan arrangement, the rational arrangement is found, that is, six surround piles are arranged according to the regular hexagon, two forward and backward sides are perpendicular to landslide-thrust direction, and surround pile center distance  $s=5d$ . Under this arrangement, the internal force distribution of each surround pile is: bending moment and shear force distribution of each surround pile are uniform, middle and backward surround piles sustain tension, and forward surround piles sustain precession.

**Keywords:** surround pile; anti-slide structure; plan arrangemen; internal force distribution; numerical analysis

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)