

文章编号: 1000-7598-(2013)06-1709-07

新型抗滑结构围桩-土的耦合效应分析

郑明新¹, 孔祥营¹, 刘伟宏^{1,2}

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

摘 要: 在引入围桩-土耦合式抗滑结构的基础上建立数值分析模型; 通过分析该抗滑结构中围桩-土的应力、应变分布规律, 详细探讨围桩-土整个结构的耦合效应特征。进一步开展模型试验, 测试并分析围桩前、后土压力和桩身弯矩分布特征, 论证了围桩-土耦合式抗滑结构的作用机制。最后, 分析了桩后距离、不同深度及不同土体强度参数对土拱效应的影响。得到: (1) 围桩与桩内土体耦合呈现出 4 种应力拱形态: 紧邻围桩后为扩肩型拱、围桩间双曲线型拱、围桩间凸向桩外的抛物线型拱、围桩间凸向桩内的抛物线型拱; (2) 相邻围桩采用约 4 倍桩径间距、正六边形布置并顶部用圈梁固结、锚固一定深度可形成一种耦合式抗滑结构。该结论对于该新型抗滑结构的推广应用具有一定的指导意义。

关 键 词: 围桩; 抗滑结构; 土拱效应; 耦合效应; 数值分析; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Aanalysis of coupling effect of new surrounding pile-soil anti-slide structure

ZHENG Ming-xin¹, KONG Xiang-ying¹, LIU Wei-hong^{1,2}

(1. Institute of Bridge & Road and Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Nantong Textile Vocation Technology College, Nantong, Jiangsu 226006, China)

Abstract: Based on the introduction of surrounding pile-soil coupling anti-slide structure, a numerical analysis model of this new structure is set up. By analyzing the characteristics of stress and strain, soil-arching effect about surrounding pile-soil and coupling effect of the entire structure are discussed. Furthermore, by the model test, soil pressure distribution before and after surrounding pile and surrounding pile bending moment distribution are tested. The mechanism of surrounding pile-soil coupling effect is proved. Finally, according to relative horizontal displacement of pile-soil coupling, the influences of the distance of behind pile, different depths of plan and different parameters of soil strength and varying effect of soil arching effect are discussed. Then, the main conclusions are drawn as follows: (1) There are four arch forms among the couple structure, such as expanding arch close to the surrounding piles, hyperbola arch between surrounding piles, hyperbola arch protruding outside between surrounding piles and hyperbola arch protruding inside between surrounding piles. (2) Anchoring to a definite depth, it can form a coupling anti-slide structure in the condition of about 4 times diameter space between surrounding piles, horizontal section using hexagon and the top using a ring girder. It can provide a guide to use the new anti-slide structure.

Key words: surrounding pile; anti-slide structure; soil arching effect; coupling effect; numerical analysis; model test

1 引 言

在坡体加固和滑坡治理工程中, 抗滑桩具有抗滑能力强、桩位灵活、理论和技术较为成熟得到广泛应用^[1]。但由于抗滑桩主要通过结构本身的强度来抵抗滑坡推力以实现稳定滑坡, 未能充分调动

岩土体自身的强度。鉴于此种情况, 郑明新等^[2]提出围桩-土耦合式新型抗滑结构, 即采用钻孔桩 5~6 根 (直径为 400~600 mm) 与桩间岩土体共同耦合构成正五边形或六边形的柱体, 其顶部用刚性联系梁牢固连接形成一个超静定框架抗滑结构。它侧重于对岩土体的改造与有利组合, 既不同于微型排

收稿日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51068006)。

第一作者简介: 郑明新, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 主要从事地质与岩土工程的教学、滑坡与路基病害防治方面的研究工作。

E-mail: zhengmx2002@yahoo.com.cn

桩, 也不同于人工挖孔钢筋混凝土桩。其桩顶由圈梁刚性连接组成, 实现将钢筋混凝土结构与岩土体的有机耦合, 通过充分调动岩土体自身强度来达到抗滑的目的^[3-4], 具有较高的应用价值和较好的经济效益。

围桩-土耦合式抗滑结构的最大特点是充分利用两围桩与土相互作用形成土拱, 进而整个围桩-土形成一个耦合式抗滑桩, 其多个耦合式抗滑结构成排布置则可实施对滑坡的整治。但围桩-土耦合式抗滑结构中土拱效应是否存在、耦合效果如何, 已成为该新型结构应用成功与否的关键。以往研究^[2-4]采用模型试验, 主要从应力场的变化研究了围桩-土耦合作用的抗滑机制。鉴于模型试验的局限性, 本文主要采用 FLAC^{3D} 从位移场、应力场分析土拱效应的形成机制和分布特征, 并结合模型试验进行对比, 进一步分析围桩-土耦合效应随桩后距离、深度及土体强度参数对土拱效应的影响。

2 数值分析

围桩-土耦合效应的形成, 即围桩-土之间必须形成土拱, 整个围桩-土耦合成一个整体结构, 确保 5~6 根桩所围土体既不被挤出、又不使外围土体挤入, 从而形成一个整体的围桩-土耦合式抗滑桩(结构)。关于土拱的产生是由于桩后土体发生不均匀位移而导致应力重分布和传递的一种现象^[5]。桩后土体在滑坡推力作用下不断向桩身及桩间土体挤压, 而桩体相对于土体是刚性的, 桩间土体位移大于桩体位移, 于是在桩间形成楔紧作用, 依赖于土体抗剪强度, 滑坡推力所产生的应力转移并由桩体承担。因此, 需要从位移场和应力场两方面来判别土拱效应是否存在。

2.1 计算模型的建立

从两方面对围桩-土耦合式抗滑结构进行简化:

①考虑滑坡滑体、滑带和滑床为 3 种岩土体分别处理; ②在设桩位置处的滑带倾角为 0° , 即该处滑坡推力为水平方向, 故可取 xy 平面应力场进行分析(滑坡纵向为 x 轴, 横向为 y 轴, 竖向为 z 轴)。

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, 桩体外侧计算域均取桩间距的 1/2, 边界采用 y 方向约束, 前后侧采用 x 方向约束边界, 底面采用 z 方向约束。围桩采用梁板单元, 滑坡土体均采用摩尔-库仑弹塑性单元。围桩-土耦合式抗滑结构布置如图 1 所示, 三维数值计算模型见图 2。

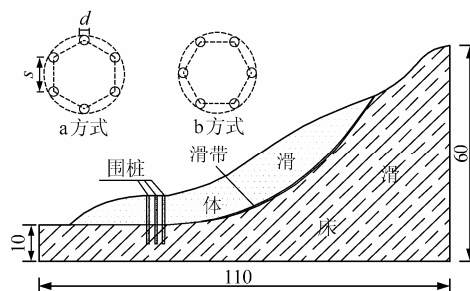


图 1 围桩-土抗滑结构布置纵断面图 (单位: m)
Fig.1 Section of surrounding pile-soil anti-slide structure (unit: m)

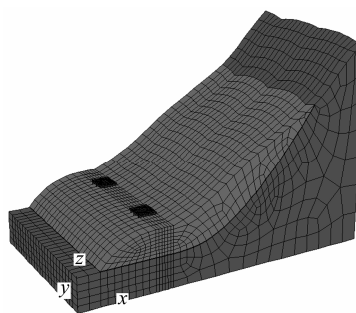


图 2 三维数值分析模型
Fig.2 Three-dimensional numerical analysis model

在 FLAC^{3D} 计算模型中, 取围桩桩长为 13.2 m, 其中受荷段为 8.2 m (包括贯穿滑体部分 8.0 m 和贯穿滑带部分 0.2 m), 锚固段为 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、桩与滑带的接触面和桩与滑床的接触面。桩和岩土体物理力学参数依据室内试验并结合工程地质手册综合确定, 见表 1。

表 1 数值计算参数一览表
Table 1 Parameters of numerical calculation

材料名称	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)	重度 γ / (kN/m ³)	泊松比 μ	剪切模量 G / MPa	体积模量 K / MPa
滑体	6	32	20	0.25	12.00	20.00
滑带	13	13	18	0.30	3.85	8.33
滑床	570	42	25	0.22	3 720.00	6 200.00
桩体			25		8 930.00	8 770.00

计算表明: 当 $S/d=5.0$ 时 (d 为围桩直径, S 为围桩间距), 方式 a 较方式 b 围桩分担的滑坡推力增加 18.3%, 而桩间土体的最大位移减小 5%, 滑坡体剪切塑性区域面积减小 72.5%, 相应张拉塑性区域面积减小 48.7%。故采用方式 a 较为合理。

2.2 围桩-土耦合效应的形成机制及形态特征

2.2.1 位移拱

通过数值计算, 作出不同深度平面的位移运动

特征图。以下重点分析滑带以上 2.0 m 处滑体在 x 方向的位移等值线图(围桩附近局部放大), 如图 3 所示。图中矩形线框内的圆点代表围桩的位置。

为方便分析受荷段通长范围内的围桩-土耦合效果, 作出不同深度情况下围桩、围桩内土体和围桩外土体水平位移曲线, 见图 4。

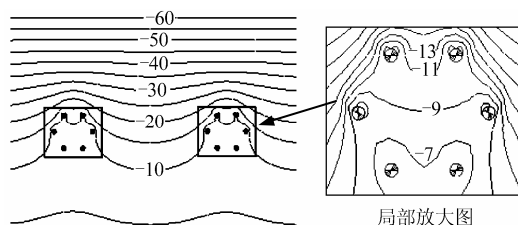


图3 滑带以上 2 m 处滑体 x 方向位移等值线图(单位: mm)
Fig.3 x -displacement contours above slip surface 2.0 m (unit: mm)

从图 3 可以看出:

(1) 在同一深度的横截平面上, 围桩与其内部所围土体位移一致, 总体上明显小于围桩外部土体的水平位移, 表明围桩间的土层形成了明显的顺坡方向的位移拱^[6]。说明围桩与围桩内部所围土体耦合成一个整体, 作为位移拱的拱脚抵抗滑坡推力, 形成了围桩-土耦合式新型抗滑结构。

(2) 依据围桩附近区域的局部放大图可以看出, 1[#]围桩和 2[#]围桩之间形成了较强的位移拱。结合图 4 受荷段范围内的围桩-土耦合效果较好, 即围桩

与其内部所围土体位移基本一致, 位移量从 0.1~2.6 cm, 明显小于围桩外部土体 2.7~4.2 cm 的水平位移。

(3) 由于桩顶圈梁的固定作用 and 下部滑床的锚固作用, 桩顶及滑动面附近围桩与土充分耦合。而在地面与滑动面中部, 围桩与土耦合作用不十分充分, 这也表明围桩-土耦合式新型抗滑结构抗滑效果具有一定的适用性, 适于中层滑坡的治理。

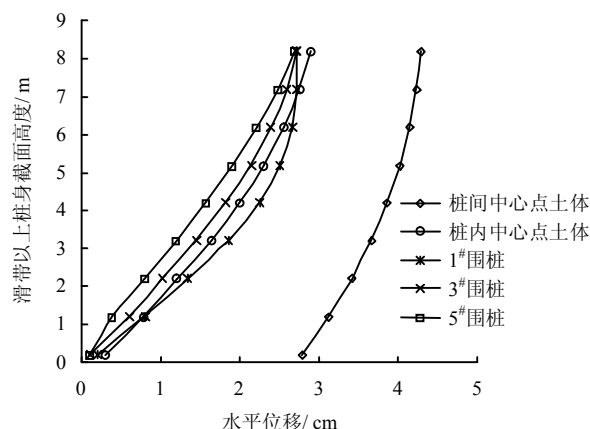


图4 不同深度情况下的桩-土耦合效果
Fig.4 Pile-soil coupling effects with different depths

2.2.2 应力拱的形成及其形态特征

进一步分析滑带以上 2.0 m 处平面上 x 方向主应力 σ_{xx} 等值线图及在围桩附近应力图(见图 5)。

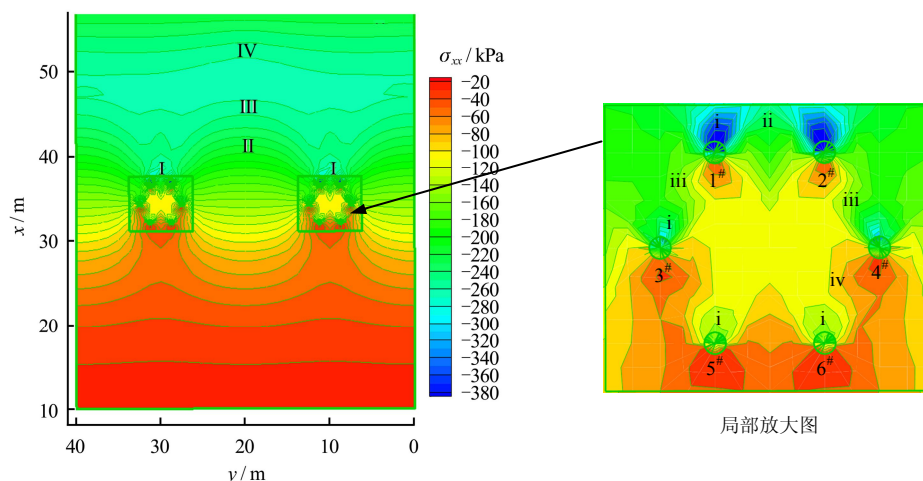


图5 滑带以上 2.0 m 处滑体 σ_x 等值线图
Fig.5 σ_x contours above slip surface 2.0 m

从图中可以看出:

(1) 排桩后的土层形成了明显的应力拱。桩后应力拱呈现以下 3 种分布形态: 紧邻桩后为扩肩型拱, 如区域 I; 桩间为双曲线型拱, 如区域 II; 距

桩较远处是马鞍型拱, 如区域 III。然后应力分布逐渐趋于平缓, 如区域 IV。虽然不同深度处桩后土压力大小不同, 但应力拱的分布形态并没有发生变化, 仅仅相应等值线的数值发生改变^[7]。

(2) 围桩-土耦合式抗滑结构内亦呈现出 4 种应力拱形态。从图 5 围桩体附近局部放大图可以看出, 紧邻围桩后为扩肩型拱, 如区域 i; 1[#]和 2[#]、5[#]和 6[#]围桩间为双曲线型拱, 如区域 ii; 1[#]和 3[#]、2[#]和 4[#]围桩间为抛物线型拱, 凸向桩外, 如区域 iii; 3[#]和 5[#]、4[#]和 6[#]围桩间为抛物线型拱, 凸向桩内, 如区域 iv。

(3) 滑坡推力通过围桩-土之间的土拱效应传递推力。坡体变形作用于该抗滑结构并产生一定土体不均匀位移, 桩后土压力首先经由 1[#]~4[#]围桩后区域 i 分别直接传递给 1[#]~4[#]围桩, 围桩充当直接拱脚, 并在区域 i 形成扩肩型拱。随着桩后土压力的增大, 该 4 根围桩之间土体由于楔紧作用, 在区域 ii 和 iii 处逐渐形成应力拱, 并将桩后土压力一小部分直接传递给此 4 根围桩, 大部分通过区域 i 传递给围桩, 这时开始由前半部分的围桩和桩后土拱共同作用。

(4) 围桩-土之间的土拱效应使围桩-土耦合形成一个“耦合抗滑桩”。由于土体位移的连续性, 区域 ii 和 iii 的土体向围桩内部挤压, 将一部分力传给围桩内部所围土体, 而内部土体受挤压后变得更加密实, 抗剪强度得以提高, 传递过来的土压力在克服该部分土体抗剪强度后, 经由围桩后半部分区域 i、ii 和 iv 土拱, 传递至 3[#]~6[#]围桩。这种围桩间土拱效应促使围桩与其内部土体形成良好的耦合, 共同承担桩后土压力, 见图 6。

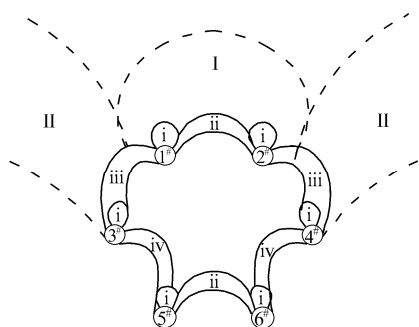


图 6 应力拱示意图

Fig.6 Diagram of soil stress arch

3 模型试验分析

3.1 试验方案

结合上述围桩-土耦合抗滑结构模型, 根据相似理论综合考虑单个耦合结构的影响范围和边界效应, 采用 1:20 几何相似比开展模型试验。

3.1.1 模型材料

(1) 模型桩

原型虽然是钢筋混凝土桩但桩径较小, 按照相似比关系, 采用普通杉木桩作为模型围桩。桩径按组数的要求, 分别采用直径为 20~30 mm, 桩长为 600~800 mm, 联系梁采用宽度为 35~45 mm, 厚度为 40 mm 樟木板。

(2) 滑坡体

采用黏性土作为滑体材料, 分层填筑, 保证不同的压实度, 滑面形状采用圆弧形, 并铺设双层塑料薄膜作为滑动分界。

(3) 加载装置

考虑滑坡体不能完全采用相似比, 故在侧向采用千斤顶施加推力以模拟滑坡推力, 如图 7 所示。

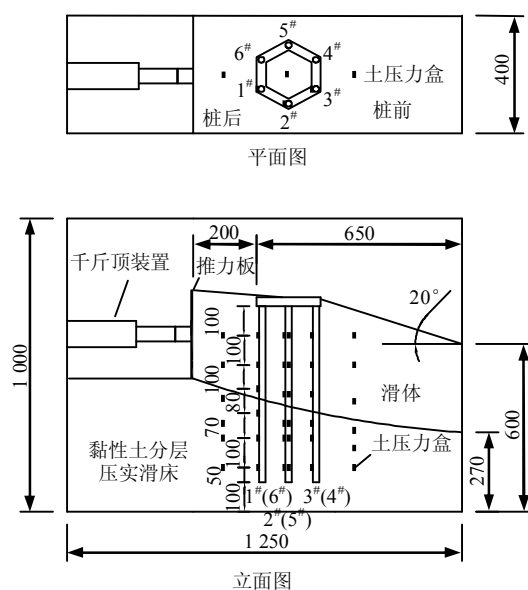


图 7 模型试验装置图(单位: mm)

Fig.7 Scheme of model test (unit: mm)

3.1.2 测试元件

为了更好地控制千斤顶施加荷载的大小, 在其顶部连接量程为 0~50 kN 的传感器。桩身应变采用应变片测试, 并反算出测试点的弯矩值。耦合结构的水平和竖向位移, 采用百分表测定。

3.1.3 试验方案

通过测试各围桩前、后土压力变化状态、各围桩桩身弯矩变化规律和滑动方向滑体的土压力变化, 以验证结构的桩-土耦合整体效应。

3.2 试验成果分析

3.2.1 围桩桩后、桩-土耦合体中心的土压力分布

(1) 围桩桩后土压力分布

在围桩桩后埋设土压力盒, 测得 1[#]、2[#]围桩后土压力分布情况, 见图 8。

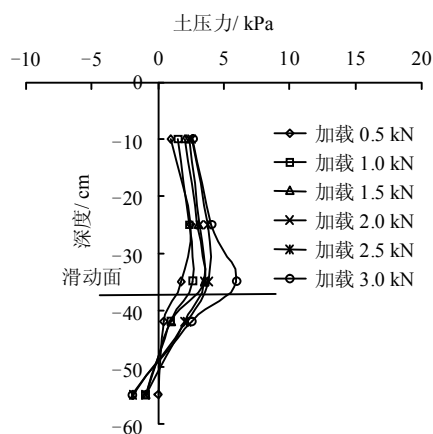
从图中可以看出:

①在滑动面以上土压力分布呈正三角形分布,并且在滑动面附近处出现最大值,当加载至 3.0 kN 时,1[#]围桩的最大值为 6.5 kPa,2[#]围桩的土压力最大值为 6 kPa;

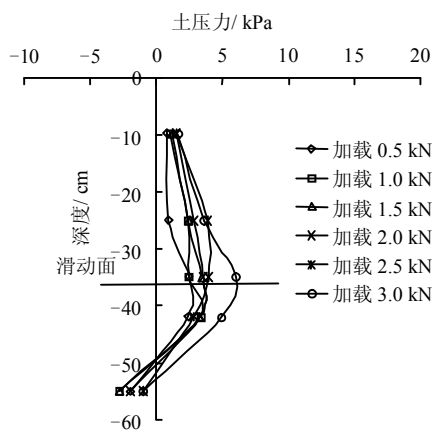
②滑动面以下锚固段内,桩底以上 10 cm 处出现土压力负值,说明此处的土压力盒存在脱空现象或土压力盒不受力,在滑动面以下至脱空处深度范围内,土压力呈倒三角形分布。

(2) 耦合体中土压力分布: 将土压力盒埋设在耦合结构中心处,土压力分布见图 9 所示。滑动面以上基本呈三角形分布,滑动面以上 3 cm 处出现最大值,在滑动面以下,土压力变化较为复杂,随深度先减小再增大最后减小,在桩底 10 cm 处出现负值。

从图 8、9 中可以得到,滑动面以上围桩 1[#]、2[#]及耦合结构桩中土体的土压力分布大致相同,且最大值基本相同,说明该结构较好地形成了一个桩-土耦合抗滑整体。



(a) 1[#]围桩



(b) 2[#]围桩

图 8 围桩桩后土压力分布

Fig.8 Soil pressure distributions after piles

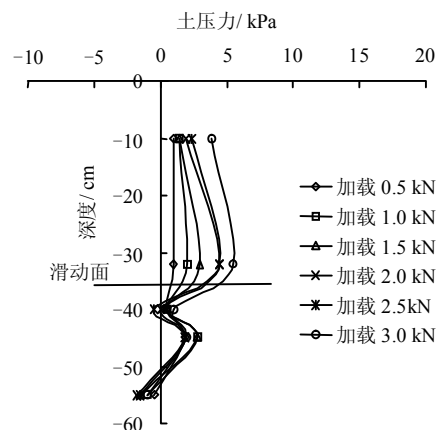


图 9 耦合结构桩间土的土压力分布

Fig.9 Soil pressure distributions in the middle of coupled structure

3.2.2 不同深度沿滑动方向土压力分布

滑面以上 20 cm 深度处沿滑动方向土压力的分布情况见图 10 (5 cm 深度处图略)。

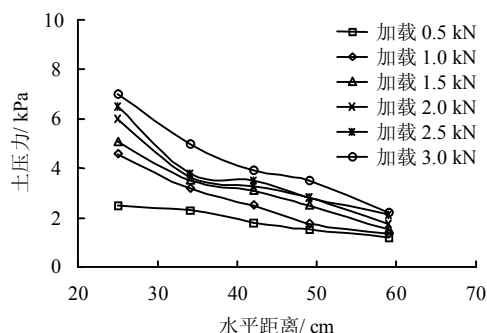


图 10 滑动面以上 20 cm 处的土压力分布

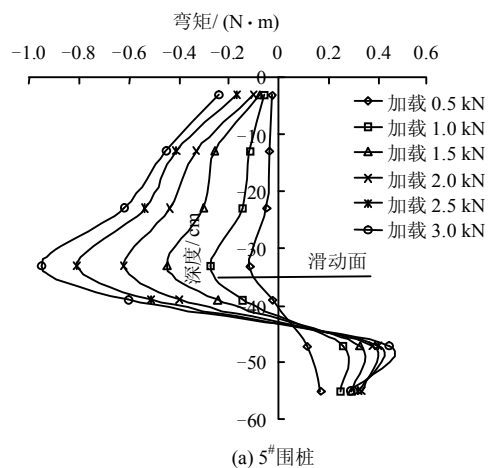
Fig.10 Soil pressure distributions above slip surface 20 cm

可以看出,在同级荷载作用下,土压力沿滑动方向不断减小,其中在耦合结构位置处,即水平距离 35~45 cm 范围,滑动方向土压力值变化很小,说明耦合结构内部的土体任一点处土压力值基本一致,证明存在桩-土耦合体效应。

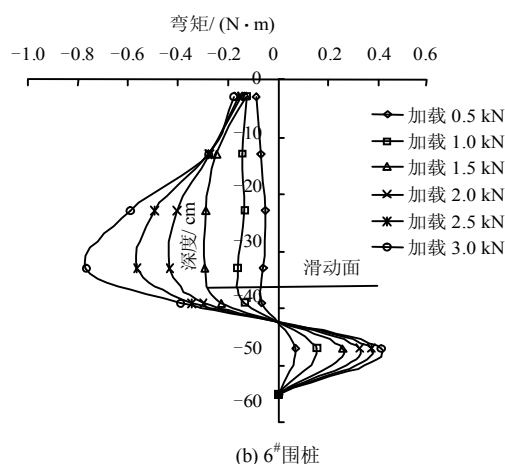
3.2.3 各围桩的桩身弯矩分布

在各级荷载作用下,6[#]、5[#]围桩的桩身弯矩分布分别见图 11。

从图中可以看出,6[#]围桩加载 1.0 kN 以内时,滑动面以上桩身弯矩呈矩形,随着加载不断增大,桩身弯矩呈抛物线分布,在滑动面以上 6 cm 处出现最大值,在滑动面以下呈抛物线分布,桩底处弯矩较小;5[#]围桩的桩身弯矩分布图在滑动面以上呈抛物线分布,在滑动面以上 6 cm 处出现最大值,其值略大于 6[#]围桩的弯矩最大值。



(a) 5# 围桩



(b) 6# 围桩

图 11 围桩桩身弯矩分布

Fig.11 Distributions of pile bending moment

总体来看,在滑动面以上滑坡推力较小时呈矩形分布,随着滑坡推力不断增大则呈抛物线分布,在滑动面以上约为桩长的 10% 时出现最大值,在滑面以下呈抛物线分布;纵观后排和中排围桩的弯矩分布图式基本相同。这些特征与前述数值计算结果趋势基本一致,证明耦合效应较好。

4 其他因素对围桩-土耦合效应的影响

4.1 滑面以上位置

采用前述数值计算模型,若取不同深度的土层其应力水平不同,土拱效应则发生变化。在 $S/d=5$ 条件下,围桩内部中心点和围桩间中心点土体水平位移随桩体深度的变化曲线,见图 12。

从图中可以看出,在土拱效应作用下,两者差值随着临近桩围顶部,由于桩顶圈梁刚性连接使桩-土耦合效应更为明显,而且桩顶圈梁连接刚度越强,土体的楔紧程度增强,土拱效应也越增强。

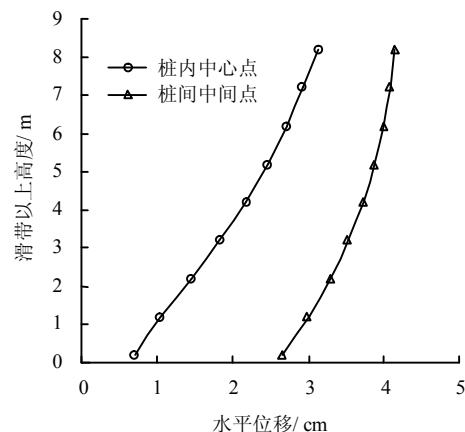


图 12 土体水平位移随深度的变化
Fig.12 Horizontal displacement vs. depth of pile above slip surface

4.2 土体强度参数对围桩-土耦合效应的影响

已有研究表明,土体强度参数对土拱效应有直接影响。以下分析不同 c 、 φ 在 $S/d=5$ 条件下对围桩-土耦合效应的影响。不同黏聚力和内摩擦角时,相应桩体不同位置的土拱效应状况见图 13、14。

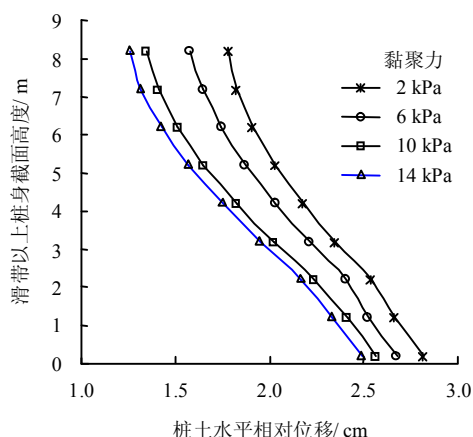


图 13 土体黏聚力对土拱效应的影响
Fig.13 Effect of cohesion on soil arching effect

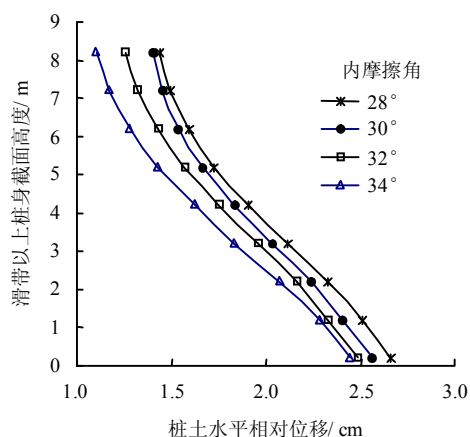


图 14 土体内摩擦角对土拱效应的影响
Fig.14 Effect of internal frictional angle on soil arching effect

从图 13 可以看出, 土体黏聚力越大, 桩-土相对位移越小, 土拱效应越强。黏聚力越大, 其影响越弱, 而且越接近桩顶, 其影响越明显。

从图 14 可知, 土体内摩擦角越大, 桩土相对位移越小, 土拱效应越强, 而且越接近桩顶其影响越明显。

5 结 论

(1) 通过数值分析和模型试验, 较系统地分析了围桩-土土拱效应及形态特征, 证明围桩-土能够耦合形成一种新型抗滑结构, 该新型结构对于滑坡防治经济、实用。

(2) 围桩与桩内土体耦合呈现出 4 种应力拱形态: 紧邻围桩后为扩肩型拱、围桩间双曲线型拱、围桩间凸向桩外的抛物线型拱、围桩间凸向桩内的抛物线型拱, 证明“围桩-土耦合形成了新型抗滑结构”。

(3) 模型试验表明, 相邻围桩采用 4 倍桩径间距、正六边形布置并顶部用圈梁固结、锚固深度一定深度时, 各围桩的桩后土压力分布、耦合结构中的土体的土压力分布图式较为相似, 桩间土体是一个共同体来承受外荷载。

(4) 滑面以上不同深度的土层, 土拱效应有一定变化。随着临近围桩的顶部, 由于桩顶圈梁刚性连接使之桩-土耦合效应更为明显。

(5) 土体内摩擦角和黏聚力越大, 则围桩-土相对位移越小, 土拱效应越强, 围桩-土耦合效果越好。

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-土耦合式抗滑桩计算方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2007.
- [3] 徐典. 耦合式抗滑桩模型试验及设计方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2008.
- [4] 刘伟宏, 郑明新, 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] LIU Wen-hong, ZHENG Ming-xin. Experimental study on earth pressure of single surrounding pile-soil coupled anti-slide structure[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2012, 35(1): 89—93.
- [6] WANG W L, YEN B C. Soil arching in slopes[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1974, 100(GT1): 61—78.
- [7] 张建勋, 陈福全, 简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 174—180.
- [8] ZHANG Jian-xun, CHEN Fu-quan, JIAN Hong-yu. Numerical analysis of soil arching effects in passive piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(2): 174—180.
- [9] 李邵军, 陈静, 练操. 边坡桩-土相互作用的土拱力学模型与桩间距问题[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1352—1359.
- [10] LI Shao-jun, CHEN Jing, LIAN Cao. Mechanical model of soil arch for interaction of piles and slope and problem of pile spacing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1352—1359.
- [11] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1542—1544.
- [12] JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min, LI Yuan. Analysis and calculation of surface and subsurface settlement profiles due to tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(10): 1542—1544.
- [13] 夏永旭, 裘军良, 王永东. 神经网络在公路隧道支护设计中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(2): 69—72.
- [14] XIA Yong-xu, QIU Jun-liang, WANG Yong-dong. Application of artificial neural network in highway tunnel's support design[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2005, 25(2): 69—72.
- [15] 刘文德, 韦国民. 京珠高速公路坪石隧道施工监控量测[J]. 铁道建筑技术, 2004, (4): 22—25.
- [16] LIU Wen-de, WEI Guo-min. Control measure in construction of Pinshi tunnel[J]. *Railway Construction Technology*, 2004, (4): 22—25.
- [17] 李晓红, 康勇, 顾义磊, 等. 监控量测技术在通渝隧道出口段中的应用[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(9): 1—5.
- [18] LI Xiao-hong, KANG Yong, GU Yi-lei, et al. Applications of monitoring measurement technology in Tongyu tunnel[J]. *Journal of Chongqing University*, 2003, 26(9): 1—5.

上接第 1708 页