

文章编号:1673-2049(2017)02-0056-08

悬臂式抗滑桩桩前被动土拱效应研究

罗丽娟,夏香波,王 瑞,陈 悦

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:基于1:10的抗滑桩与土体相互作用模型试验,对悬臂式抗滑桩桩前被动区土体的成拱效应趋势做了初步探讨,利用ANSYS对悬臂式抗滑桩桩前被动土拱效应的形成过程及其影响因素进行数值分析,研究了桩身水平位移、桩间距、土体黏聚力和内摩擦角等因素对被动土拱效应的影响。结果表明:相邻两桩桩前一定范围内土体中会产生被动土拱效应,且随着桩身水平位移的增加和沿桩深度的减小,被动土拱效应增强,土拱范围变大;随着桩间距的增加,被动土拱效应减弱,土拱形态先变陡峭而后逐渐变平缓;土体黏聚力与被动土拱效应呈正相关关系,而土体内摩擦角对被动土拱效应的影响较小。

关键词:悬臂式抗滑桩;被动土拱效应;模型试验;数值分析;黏聚力;内摩擦角

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

Research on Passive Soil-arching Effect Before Cantilever Anti-slide Pile

LUO Li-juan, XIA Xiang-bo, WANG Rui, CHEN Yue

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the 1:10 physical model test on soil-pile interaction, the formation tendency of soil-arching effect in passive areas before cantilever anti-slide piles was discussed preliminarily. In addition, the analysis of numerical model was constructed to study the formation process and influence factors of passive soil-arching effect before cantilever anti-slide piles by using ANSYS, the influences of horizontal displacement of pile, pile-space, soil cohesion and internal friction angle on passive soil-arching effect were analyzed. The results show that the passive soil-arching effect appears in a certain range of passive area before two adjacent piles, and strengthens with the increase of horizontal displacement of pile and with the decrease of depth, and the range of soil-arching grows larger. With the increase of pile-space, the passive soil-arching effect weakens gradually, the shape of soil-arching becomes steep firstly and then becomes smooth gradually. The soil cohesion plays a positive role in passive soil-arching effect, but the internal friction angle has little influence on passive soil-arching effect.

Key words: cantilever anti-slide pile; passive soil-arching effect; model test; numerical analysis; cohesion; internal friction angle

0 引言

滑坡治理一直是中国地质灾害防治的重要任务

之一,悬臂式抗滑桩作为一种以横向受力为主的支挡结构物,因其对周边地质体的扰动相对较小,施工便捷,被广泛应用于滑坡治理等工程中。桩和土体

收稿日期:2016-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41202190);陕西省自然科学基金研究计划项目(2016JM4019)

作者简介:罗丽娟(1973-),女,山西平遥人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:luojuan@chd.edu.cn。

之间的相互作用问题一直是抗滑桩加固机制和设计理论研究的核心问题。在侧向荷载作用下,由于桩和土体之间的相互作用而产生了所谓的“土拱效应”,土拱现象最早由 Terzaghi^[1] 基于活动门试验提出,Ladanyi 等^[2]、Wang 等^[3]、Chen 等^[4] 先后通过理论、试验和数值方法验证了土拱效应的存在。中国学者由不同土拱形态及破坏形式得到了形式各异的临界桩间距计算公式^[5-10];李邵军等^[11] 基于土力学和弹性力学理论得到了桩后土体水平截面内任意点的应力解析解,根据应力等值线得到了 4 种土拱形态,并分析了桩间距、桩宽、桩后距离及土的力学特性对土拱效应的影响及变化规律;此外,部分学者对桩间土拱效应进行了二维及三维数值研究^[12-15],探讨了土拱效应与桩间距等因素之间的关系;杨明等^[16] 采用 PFC 2D 对抗滑桩桩间土拱效应进行细观数值模拟,研究了二维条件下桩间土拱的形成及破坏过程。

Norris^[17] 根据主动桩的桩土相互作用特点,以及土性参数对单桩水平承载力特点的影响规律提出了应变楔模型。在水平力作用下,悬臂式抗滑桩桩身结构通过自身刚度和强度以及桩土相互作用将所受滑坡推力(荷载)传递到桩前一定范围的土体中,此时桩前土体会产生一个应变楔形体(抗力楔形体)以抵抗桩体的变形和位移。因为相邻桩的相互影响,使得桩前被动区土体中的附加应力出现相互影响和叠加,桩前土体产生相对不均匀位移,随着这种相对不均匀位移的增加,土颗粒之间的“楔紧”效应不断增强,从而在桩前出现被动土拱效应。

在上述有关悬臂式抗滑桩与桩周岩土体的相互作用研究中,对桩前被动土拱效应的研究还罕见报道。鉴于此,本文首先基于 1:10 的抗滑桩与土体相互作用物理模型试验,对矩形悬臂式抗滑桩桩前被动区土体的成拱效应做了初步探讨,并利用有限元软件 ANSYS 对悬臂式抗滑桩桩前被动土拱效应的形成过程及其影响因素进行了三维数值分析。

1 模型试验概况

桩前应变楔形体模型示意如图 1 所示。需要说明的是:桩前应变楔形体模型试验中,存在有护壁桩和无护壁桩,原本该模型试验是为了研究人工挖孔护壁抗滑桩在考虑护壁贡献作用下的桩身水平承载力性状及水平变形特征,而为了同时对桩前被动区土体的成拱效应作一些初步探讨和研究,在护壁桩和无护壁桩前布置了一定数量的土压力盒,鉴于护

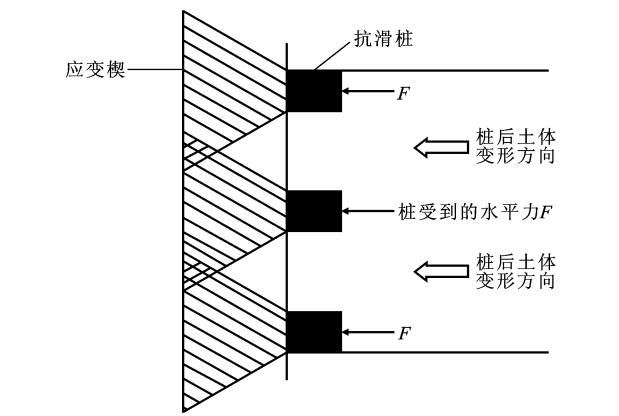


图 1 桩前应变楔形体模型

Fig.1 Strain Wedge Model Before Piles

壁厚度较小,对桩前被动土拱的影响可以忽略,故本文所述试验部分仅对桩前被动抗力的成拱趋势进行探讨。

1.1 模型桩材料的选用

原型抗滑桩结构桩身截面尺寸为 2 m×3 m,桩长 20 m,桩身混凝土等级为 C30,模型桩截面尺寸为 0.2 m×0.3 m,抗滑桩桩长设计为 2.0 m,嵌固段长度取 1.3 m。模型混凝土强度等级取为 C15,混凝土配合比由试验确定,水泥、砂子、碎石、粉煤灰、外加剂、水的配合比为 280:700:1 000:140:0.01:200;水泥、砂子、碎石、粉煤灰、外加剂、水的质量比为 1:2.5:3.57:0.5:0.01:0.71。采用 P.O32.5 秦岭水泥,卵石粒径为 1~1.5 cm,水胶比为 0.476。试验测得桩身模型混凝土材料力学参数如表 1 所示。

表 1 抗滑桩模型材料力学参数

Tab.1 Material Mechanical Parameters of Anti-slide Pile Model

参数	立方体抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
参数值	18.30	2.28×10 ⁴

1.2 模型土材料的选用

土颗粒之间的“楔紧”效应能否充分发挥,与试验选用的模型土性质关系密切,试验用土必须选择均匀性较好、传力效果较为理想的土体材料。为此,该试验采用黏性土(黄土)分层夯实填筑得到抗滑桩桩土模型剖面图,如图 2 所示,模型土的物理力学性质指标如表 2 所示。

1.3 测点布置

为探讨桩前被动土拱的形成过程,桩前土压力盒分 3 层布置,测定桩前被动土压力。土压力盒层间间距为 400 mm,每层土压力排间距为 300 mm,桩间土压力盒水平距离为 300~400 mm 不等。对

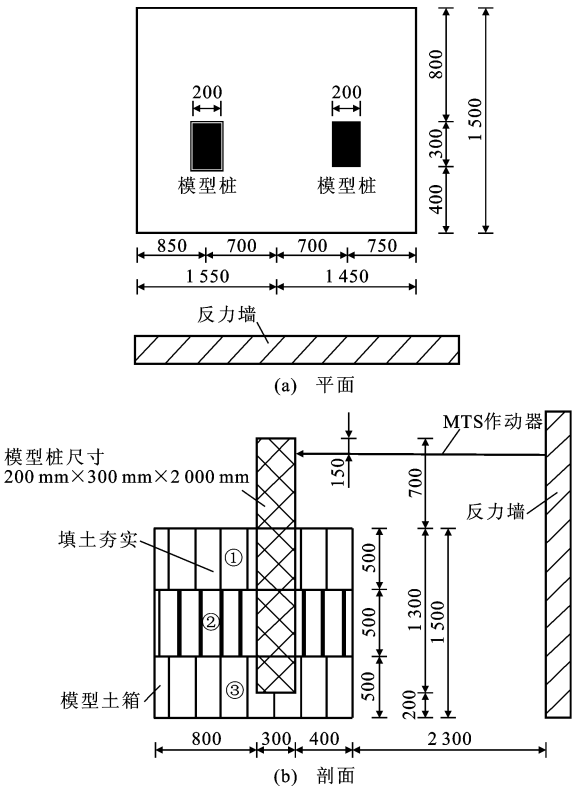


图2 抗滑桩桩土模型及加载装置(单位:mm)
Fig.2 Pile Soil Model of Anti-slide Pile and Loading Device (Unit:mm)

表2 模型土物理力学指标

Tab.2 Physical and Mechanical Indexes of Model Soil

层号	含水率 $\omega/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	压缩模量 $E_{\text{SI-2}}/\text{MPa}$	压缩模量 $E_{\text{SI-3}}/\text{MPa}$
①	19.1	19.7	0.638	15.0	5.6	5.31	8.89
②	17.3	19.8	0.601	8.5	5.8	5.98	9.94
③	22.2	20.8	0.592	9.0	4.9	6.54	9.72

定范围内被动区土体承担。当桩顶水平位移增加到一定程度时,承担荷载的这部分土体就会与桩间未承担荷载的土体产生较大的相对位移,促使土体颗粒之间产生“楔紧”效应,随着这种相对位移的增加,土颗粒之间的“楔紧”效应随之增强,从而在桩前一定范围内产生被动土拱效应。

从图5可知:当桩顶水平位移较小时(2~20 mm),桩前被动区土体中的土压力较小,尤其是离桩较远处的土体中,土压力值更小且变化不明显[图5(a),(b)]。这表明桩前被动区土体的相对位移不大,土颗粒之间的“楔紧”效应还很弱,此时桩前土拱还处在孕育发展阶段。继续加载,当桩顶水平位移在20~80 mm之间时,桩前被动区土体中的土压力也随之增加,当桩顶水平位移达到52 mm时,土压力值的突变现象较为明显,土颗粒的“楔紧”效应增强,土压力曲线呈拱形,桩前被动土拱开始形成[图

每层每个土压力盒进行编号,土压力盒编号为:TP1-1~TP1-15,TP2-1~TP2-15,TP3-1~TP3-15。土压力盒布置及编号见图3。

1.4 模型加载

模型试验所用模型土箱由H型钢和槽钢加工而成,尺寸为3.0 m×1.5 m×1.5 m,所加荷载由2个25 t的MTS作动器分别同时施加在2根模型桩桩顶,考虑桩水平承载力精确估计困难及作动器加载安全,加载速率由作动器位移控制,稳定标准为各级荷载下持续10 min,由数据采集系统同时自动采集各土压力盒数据。抗滑桩模型土箱及加载设备如图4所示。

2 模型试验结果分析

2.1 桩前被动土拱的发展与形成

图5为第1层土(深170 mm)桩前被动土压力分布。由图5可知,随着桩顶水平位移 s 的增加,桩前被动土压力呈增加趋势,但是在两抗滑桩桩间中心对称线附近,被动土压力却始终很小,土压力值基本为0。这表明,随着桩顶水平位移的增加,两桩间中心对称线附近的土体并没有承担由抗滑桩传递到桩前被动土层中的荷载,这部分荷载主要由桩前一

5(c),(d)]。当桩顶水平位移继续增加时,近排土压力值较大,土体可能已经破坏,但远排土压力值的突变现象比较明显,被动土拱效应增强,被动土拱影响范围扩大[图5(e),(f)]。

2.2 被动土拱效应沿桩深度方向的变化特征

为研究被动土拱效应沿桩深度方向的变化规律,桩前被动区土体中的土压力盒分3层埋设,埋设深度 h 分别为170,570,970 mm。现选取桩顶水平位移分别为20,60,80,120 mm加载条件下远排土压力盒量测得到的数据作对比分析,如图6所示。显然,随着桩顶水平位移的增加,桩前被动土压力随之增加,且随着深度的增加被动土压力呈减小趋势。当桩所受荷载较小,桩顶水平位移为20 mm时,桩前被动区土体中的土压力较小,不同深度处各点土压力的变化幅度不大,此时桩前土拱还未形成[图6(a)]。当桩顶水平位移达到60 mm时,深度为

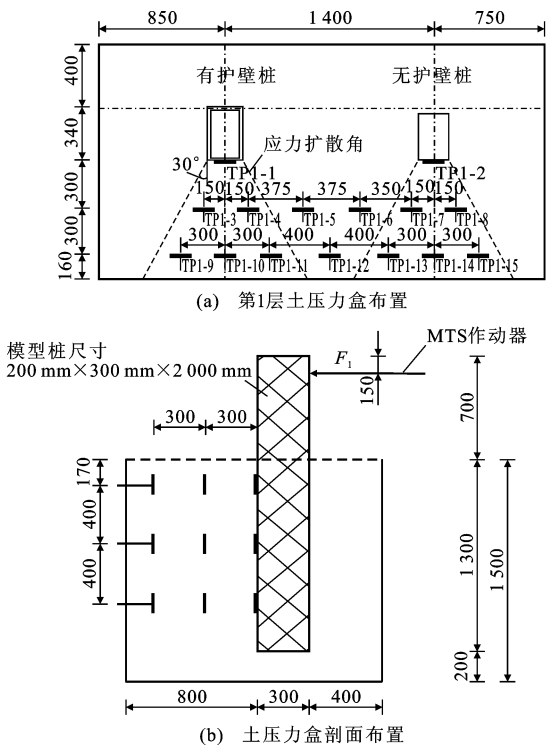


图 3 土压力盒布置(单位:mm)

Fig. 3 Arrangement of Soil Pressure Cells (Unit:mm)

170 mm 和 570 mm 处各点土压力突变更为明显,曲线呈拱形,被动土拱效应开始形成,但 2 个深度处的

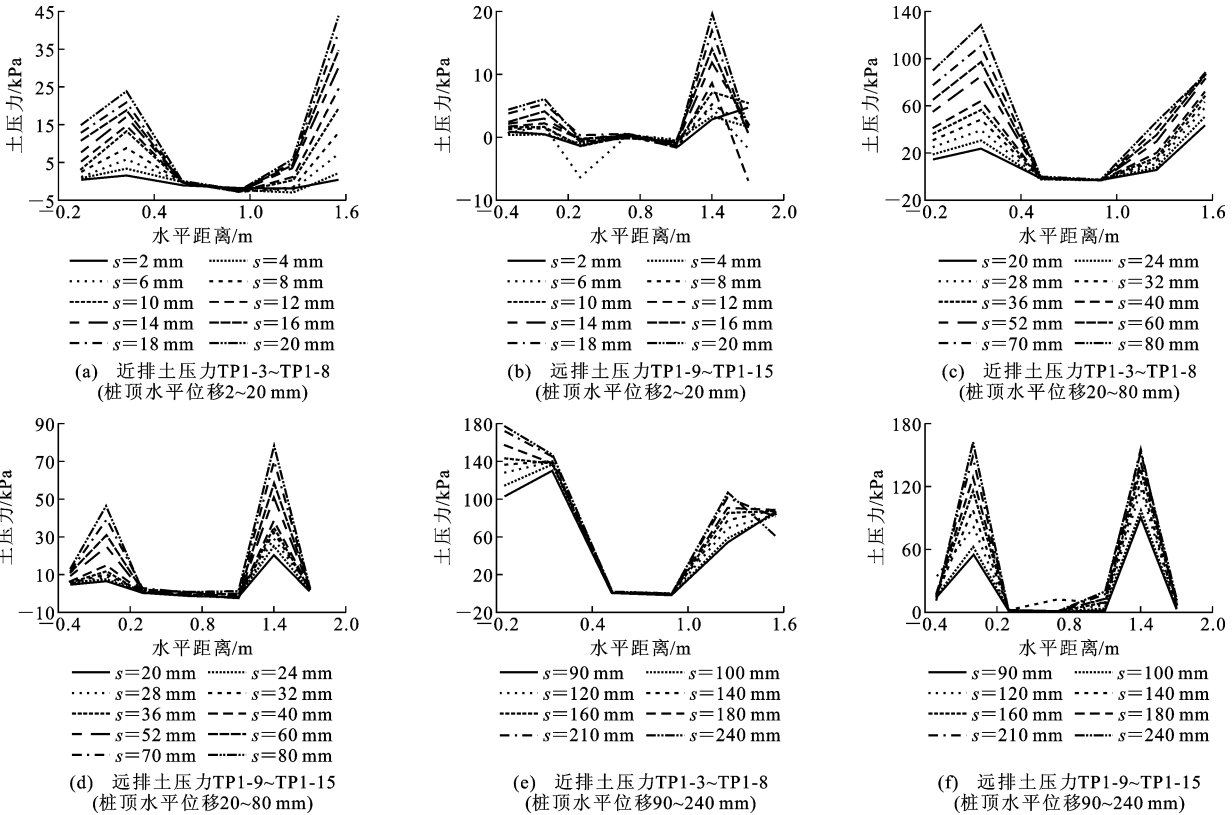


图 5 第 1 层土桩前被动土压力分布

Fig. 5 Distribution of Passive Soil Pressures Before Piles of the First Layer of Soil



图 4 抗滑桩模型土箱及加载设备

Fig. 4 Model Soil Container of Anti-slide Pile and Loading Device

土拱效应强度差别不明显,而深度为 970 mm 处各点土压力保持在 0 kPa 左右,变化幅度很小,并未有土拱形成[图 6(b)].继续加载,当桩顶水平位移为 80,120 mm 时,深度为 170 mm 和 570 mm 处各点土压力突变更明显,桩前被动土拱效应更强,且深度为 170 mm 处的土拱效应比 570 mm 处要强,但深度为 970 mm 处各点土压力仍保持在 0 kPa 左右,被动土拱效应基本不存在[图 6(c),(d)].

综上所述,在桩深度方向上桩前被动土拱效应随深度的增加而减弱.产生这种现象的原因可能与

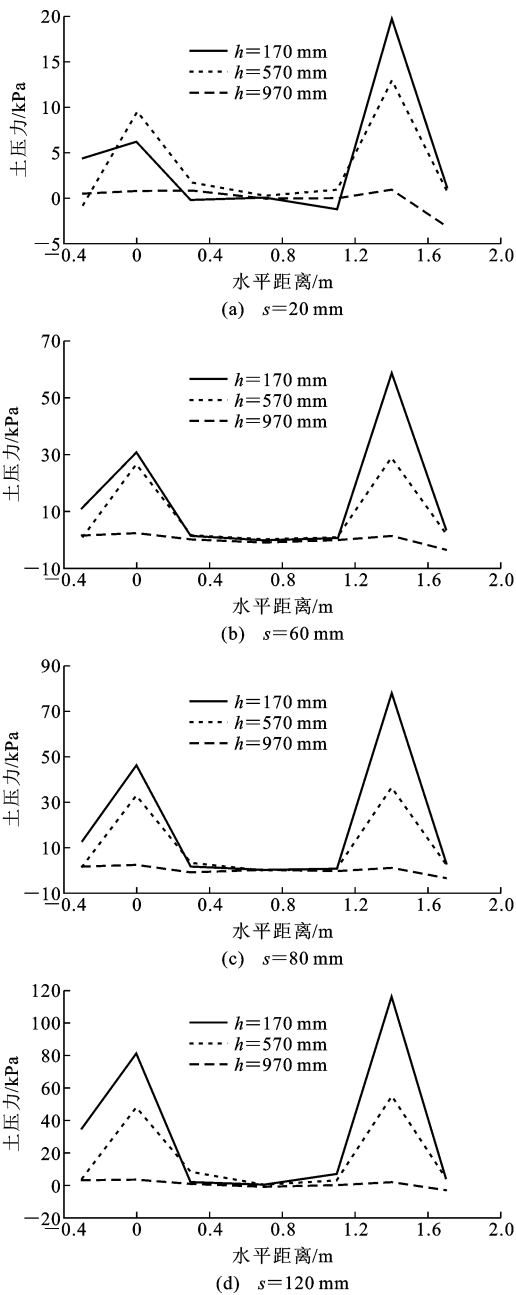


图6 不同桩顶水平位移下远排土压力沿深度方向的分布
Fig. 6 Distributions of Forane Soil Pressures Along Depths Under Varied Horizontal Displacements of Pile Top

该深度处桩身水平位移有关,深度较浅时,对应深度的桩身水平位移越大,导致桩前被动区土体中产生的不均匀相对位移越大,土颗粒之间的“楔紧”效果越强,被动土拱效应越强。

3 桩前被动土拱效应数值模拟试验

3.1 悬臂式抗滑桩三维有限元模型建立

考虑到悬臂式抗滑桩在水平方向具有一定的对称性,故取桩间土体和抗滑桩的 1/2 部分进行分析,模型前后的计算域取 10B(B 为矩形抗滑桩桩宽),

以减少人工边界的影响。模型边界条件为:对称边界施加对称约束,确保对称面不产生 z 方向的位移,控制对称边界上各点不发生绕 x 轴方向的转动,对模型前后侧施加 x 轴方向约束,模型底部施加 y 轴方向约束。三维模型单元采用实体单元,土体采用 D-P 屈服准则,桩与土体间的摩擦因数为 0.25。本文主要研究抗滑桩桩前被动区土体中产生的土拱效应,在数值分析中,桩宽 B 取 1.0 m,悬臂段长度取 7.0 m,锚固段长度取 13.0 m。若无特殊说明,土体与桩的物理力学参数取值见表 3,ANSYS 三维计算模型如图 7 所示。

表 3 模型计算参数

Tab. 3 Calculation Parameters of Model					
材料	弹性模量 E/kPa	泊松比 ν	剪胀角 $\psi/(\text{^\circ})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c/kPa
土体	5.0×10^3	0.30	0	30	19
桩	3.0×10^7	0.18			

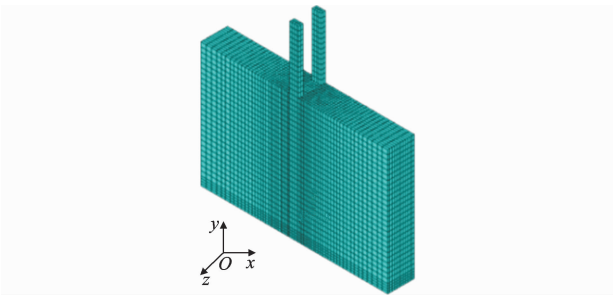


图7 有限元模型
Fig. 7 Finite Element Model

3.2 桩前被动土拱效应

抗滑桩在桩后滑坡推力作用下产生向前的水平位移,由于应力扩散范围的影响,导致桩前一定范围内的土体之间产生不均匀的相对位移,同时,作为拱脚的相邻 2 根桩的存在满足土拱产生的条件。随着荷载(桩身水平位移)的增加,桩前被动区土体土颗粒之间的“楔紧”效应增强,被动土拱逐渐形成,如图 8 所示。为了分析计算方便,模型加载以桩顶水平位移控制,采用分步加载的方式,第 1 步施加重力荷载,第 2 步到第 6 步在桩顶施加 x 反方向的位移,分别为 0.02,0.04,0.06,0.08,0.10 m,每级递增 0.02 m。

现取桩间距 $S=3.0\text{ m}$ 为例,以深度为 0.5 m ($y=12.5\text{ m}$)处两桩中心对称线上 z 方向应力 σ_z 的变化规律来分析各级桩顶水平位移下桩前被动土拱的形成过程,如图 9 所示。当桩顶水平位移较小时, z 方向应力 σ_z 突变效应较弱,桩前被动土拱效应很微弱;随着桩顶水平位移的增加,应力 σ_z 突变越明显,土体颗粒之间的“楔紧”效应增强,被动土拱效应

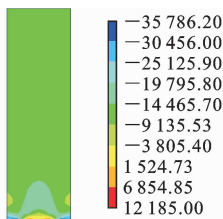


图 8 桩前被动土拱 (单位: Pa)

Fig. 8 Passive Soil-arching Before Piles (Unit: Pa)

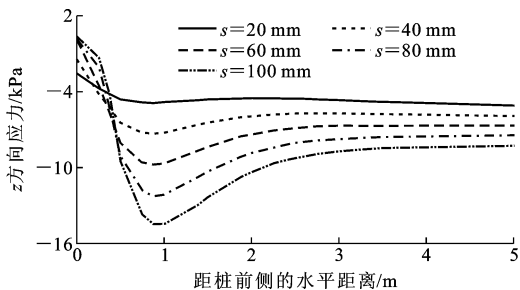


图 9 被动土拱的形成过程

Fig. 9 Forming Process of Passive Soil-arching

逐渐形成并愈来愈强,且土拱范围随之增大。

3.3 被动土拱效应的主要影响因素

3.3.1 桩间距对被动土拱效应的影响

模型加载仍以桩顶水平位移控制,分步加载至桩顶水平位移为 100 mm。现保持桩宽 $B=1.0$ m 不变,逐渐增大桩间距 S ,取桩间距与桩宽比 S/B 分别为 2.0,3.0,4.0,5.0,6.0 五种工况,提取深度 0.5 m ($y=12.5$ m) 处两桩的中心对称线上 z 方向应力 σ_z ,并绘制其变化曲线,如图 10 所示。

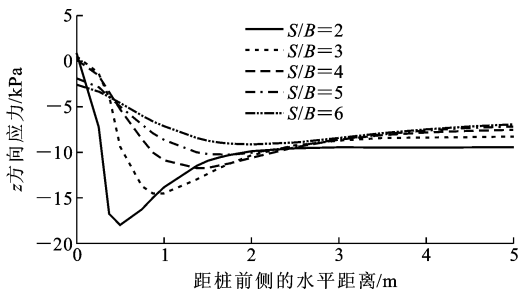


图 10 桩间距对被动土拱效应的影响

Fig. 10 Influence of Pile Spacing on Passive Soil-arching Effect

由图 10 可知,在此深度平面内桩前被动土拱产生的范围主要在桩前 3 m 内的被动区土体中,随着桩间距的增大,被动土拱效应减弱,当桩间距与桩宽比 $S/B=6$ 时, z 方向应力 σ_z 突变很小,被动土拱效应很微弱。另外,从最大压应力点出现的位置可以看出,随桩间距的增加被动土拱有向前扩展的趋势,这可能是因为随着桩间距的增加,两桩桩前应力

重叠区域是向前发展的。若以最大压应力点为土拱拱顶中心,当 S/B 分别为 2,3,4,5,6 时,土拱拱顶中心距桩前侧的水平距离分别约为 0.5,1.0,1.4,1.6,2.0 m,则土拱矢跨比分别为 0.25,0.33,0.35,0.32,0.30。这说明,桩前被动土拱形态随桩间距的增加先是越来越陡峭而后逐渐变平缓,由于土体材料的抗压强度远大于其抗拉强度,平缓的拱形对其受力是不利的。因此,为充分发挥桩前土体的被动土拱效应,桩间距不宜太小,也不宜过大,从上述分析可知,桩间距取 3 倍~4 倍桩宽较为合适。

3.3.2 被动土拱效应沿深度方向的变化特征

以桩间距 $S=3.0$ m ($S/B=3$),桩顶水平位移加载至 100 mm 的工况为例,取两桩的中心对称线上 z 方向应力 σ_z 来研究被动土拱效应沿桩深度方向的变化规律。图 11 为桩身水平位移随深度的变化。由图 11 可知,桩的水平位移随深度的增加基本呈线性减小趋势,深度 7 m ($y=6.0$ m) 处桩的水平位移接近 0。图 12 为被动土拱效应在深度方向上的变化。由图 12 可知,随深度的增加,应力 σ_z 增加,但应力 σ_z 的突变效应却逐渐减弱,突变效应影响的范围也逐渐减小,当深度大于 3 m ($y<10.0$ m) 时,应力 σ_z 基本不存在突变。

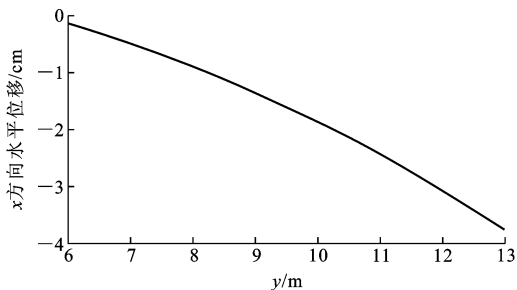


图 11 桩身水平位移随深度的变化

Fig. 11 Variation of Horizontal Displacement of Pile with Depth

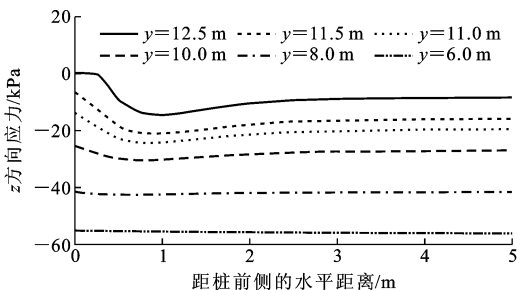


图 12 被动土拱效应在深度方向上的变化
Fig. 12 Variation of Passive Soil-arching Effect in Direction of Depth

这表明,随深度的增加,桩身水平位移减小,对

应深度处产生的被动土拱效应减弱,这与模型试验的结果基本吻合。

3.3.3 土体抗剪强度对被动土拱效应的影响

直接在悬臂段桩背施加均布荷载,荷载大小为 35 kPa,桩间距 $S=3.0$ m ($S/B=3$),以深度 0.5 m ($y=12.5$ m)处两桩的中心对称线上 z 方向应力 σ_z 为研究对象,分析被动土拱效应随土体抗剪强度指标 c, φ 的变化规律。

图 13 为土体黏聚力对被动土拱效应的影响。从图 13 可知,随着土体黏聚力的增加, z 方向应力 σ_z 的突变效应增强,但突变范围变化不大。这表明,随着黏聚力的增加,被动土拱效应逐渐增强,但土拱形态受黏聚力的影响较小。图 14 为土体内摩擦角对被动土拱效应的影响。从图 14 可知,应力 σ_z 的突变程度和范围受土体内摩擦角的影响很小,被动土拱效应对土体内摩擦角的变化不敏感。

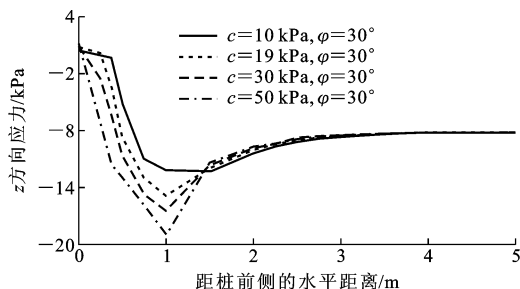


图 13 土体黏聚力对被动土拱效应的影响

Fig. 13 Influence of Cohesion of Soil on Passive Soil-arching Effect

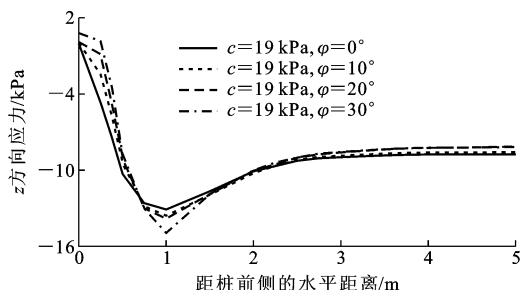


图 14 土体内摩擦角对被动土拱效应的影响

Fig. 14 Influence of Internal Friction Angle of Soil on Passive Soil-arching Effect

4 结 语

(1)根据物理模型试验及数值模拟试验结果,悬臂式抗滑桩在受到桩后滑坡推力(荷载)作用下,因相邻桩的相互影响,使得桩前被动区土体中的附加应力出现相互影响和叠加,导致桩前被动区土体产生相对不均匀位移,随着这种相对不均匀位移的增加,土颗粒之间的“楔紧”效应不断增强,从而产生被

动土拱效应。

(2)桩间距对被动土拱效应的影响较大,随着桩间距的增大,被动土拱效应减弱,土拱形态先变陡峭而后逐渐变平缓;当桩间距与桩宽比 $S/B>6$ 时,被动土拱效应很微弱,为保证桩前被动土拱效应的充分发挥,桩间距建议取 3 倍~4 倍桩宽。

(3)桩身水平位移对被动土拱效应的形成影响较大,随着桩身水平位移的增加,被动土拱效应增强,土拱范围变大;在桩深度方向上,随深度增加,被动土拱效应减弱,土拱范围变小。

(4)与土体内摩擦角相比,土体黏聚力对桩前被动土拱效应的影响更为显著,随着黏聚力的增加,被动土拱效应增强,但土拱形态变化不大。

参考文献:

References:

- [1] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [2] LADANYI B, HOYAUX B. A Study of the Trap Door Problem in a Granular Mass[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1969, 6(1): 1-14.
- [3] WANG W L, YEN B C. Soil Arching in Slopes[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1974, 100(1): 61-78.
- [4] CHEN C Y, MARTIN G R. Soil-structure Interaction for Landslide Stabilizing Piles[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(5): 363-386.
- [5] 周德培, 肖世国, 夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 132-135.
ZHOU De-pei, XIAO Shi-guo, XIA Xiong. Discussion on Rational Spacing Between Adjacent Anti-slide Piles in Some Cutting Slope Projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 132-135.
- [6] 贾海莉, 王成华, 李江洪. 基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 98-103.
JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Analysis of Pile Spacing Between Anti-sliding Piles and Retaining Piles in Accordance with Soil Arching Effect[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 98-103.
- [7] 赵明华, 陈炳初, 刘建华. 考虑土拱效应的抗滑桩合理桩间距分析[J]. 中南公路工程, 2006, 31(2): 1-3, 28.
ZHAO Ming-hua, CHEN Bing-chu, LIU Jian-hua. Analysis of the Spacing Between Anti-slide Piles Considering Soil-arch Effect[J]. Central South Highway

- Engineering, 2006, 31(2): 1-3, 28.
- [8] 张永兴,董捷,文海家,等.考虑自重应力的悬臂式抗滑桩三维土拱效应及合理间距研究[J].中国公路学报, 2009, 22(2): 18-25.
- ZHANG Yong-xing, DONG Jie, WEN Hai-jia, et al. Research on Three-dimensional Soil Arching Effect and Appropriate Spacing of Cantilever Anti-slide Piles with Consideration of Geostatic Stress [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 18-25.
- [9] 李长冬,唐辉明,胡新丽,等.基于土拱效应的改进抗滑桩最大桩间距计算模型[J].地质科技情报, 2010, 29(5): 121-124.
- LI Chang-dong, TANG Hui-ming, HU Xin-li, et al. Improved Maximum Pile Interval Model of Anti-slide Pile Based on Soil Arching Effect [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(5): 121-124.
- [10] 周文权,冷伍明,阮波,等.考虑桩土相互作用的抗滑桩临界桩间距研究[J].铁道科学与工程学报, 2014, 11(3): 83-87.
- ZHOU Wen-quan, LENG Wu-ming, RUAN Bo, et al. Research of Critical Pile Spacing of Anti-slide Pile Considering the Interaction of Pile and Soil [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(3): 83-87.
- [11] 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): 1352-1358.
- 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): 1352-1358.
- [12] 李忠诚,杨敏.被动受荷桩成拱效应及三维数值分析[J].土木工程学报, 2006, 39(3): 114-117.
- LI Zhong-cheng, YANG Min. Soil Arching Effect on Passive Piles and 3-D Numerical Analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 114-117.
- [13] 陈福全,侯永峰,刘毓炆.考虑桩土侧移的被动桩中土拱效应数值分析[J].岩土力学, 2007, 28(7): 1333-1337.
- CHEN Fu-quan, HOU Yong-feng, LIU Yu-chuan. Numerical Analysis of Soil Arching Effects in Displaced Passive Piles Considering Lateral Soil Movements [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1333-1337.
- [14] 据晓东,冯文娟,朱金明.桩后土拱作用范围研究[J].三峡大学学报:自然科学版, 2006, 28(3): 197-200.
- JU Xiao-dong, FENG Wen-juan, ZHU Jin-ming. Research on Affecting Scope of Soil Arch Behind Anti-slide Piles [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2006, 28(3): 197-200.
- [15] 刘钦,李地元,刘志祥,等.水平推力作用下抗滑桩间土拱效应影响因素的数值分析[J].中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(7): 2071-2077.
- LIU Qin, LI Di-yuan, LIU Zhi-xiang, et al. Numerical Analysis of Influence Factors on Soil Arching Effect Between Anti-sliding Piles Under Horizontal Pushing Loads [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(7): 2071-2077.
- [16] 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.
- [17] NORRIS G M. The Drained Shear Strength of Uniform Quartzs S and as Related to Particle Size and Natural Variation in Particle Shape and Surface Roughness [D]. Berkeley: University of California, 1997.