

合理间距条件悬臂式抗滑桩三维土拱效应试验研究

张永兴, 董捷, 黄治云

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 在人工开挖的斜坡上施工满足合理桩间距的两根悬臂式抗滑桩, 通过对模型槽内填土的顶面进行堆载, 研究了桩前施工挡土板时挡土板水平变形和桩-板土压力比的变化规律。待位移传感器和土压力计读数稳定后, 采用自上而下摘板的措施模拟桩前土开挖的施工过程。通过分析不同高度上测点 x 方向土压力的分布规律, 探讨了桩间土沿高度方向直接土拱与摩擦土拱的作用程度及作用范围。摘板过程结束后, 对桩间土的局部滑塌面进行测量, 通过与三维土拱效应的作用范围进行比较, 证实了合理桩间距条件下桩间土产生局部滑塌的范围总是处于直接土拱的拱圈内侧区域。采用自制的简易静力贯入设备对拱脚剪切线附近的原状土进行测定, 基于实测锤尖贯入曲线, 分析了桩间不同高度上拱脚的极限剪切作用厚度。

关键词: 悬臂式抗滑桩; 堆载; 土拱效应; 局部滑塌; 静力贯入

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)12-1874-08

作者简介: 张永兴(1961-), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 博士生导师, 国家注册土木(岩土)工程师, 主要从事地下工程、边坡工程防灾减灾方面的研究。E-mail: yxzhang@cqu.edu.cn。

Experimental investigation on three-dimensional soil arching effect between adjacent cantilever anti-slide piles with rational spacing

ZHANG Yong-xing, DONG Jie, HUANG Zhi-yun

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In manual excavation of slopes two cantilever anti-slide piles are constructed in rational spacing. Through stacking boulder strips on the top of fill heaped on the back of piles, horizontal deformation of breast boards and soil pressure ratio of piles to breast board are studied when the breast boards are constructed in front of piles. In order to simulate the excavation process of soil in front of piles, the boards are taken down from top to bottom after the readings of displacement sensors and soil pressure cells are stable. The action extents and ranges of direct and friction soil arches are discussed according to the analysis on regularities of x -direction soil pressure distribution along different levels. The partial slump surface of soil between piles is measured after the breast boards are taken down. The results which contrast the partial slump surface of soil between piles and influence circle of three-dimensional soil arching effect testify that partial slump surface is usually located at the inner of soil arching area between piles with rational spacing. Finally, a simple static penetration device is made for evaluating the solidity of undisturbed soil on shear failure line of arch spring, and the ultimate thicknesses of shear action are analyzed at different heights based on the measured penetration curves.

Key words: cantilever anti-slide pile; stacking; soil arching effect; partial slump; static penetration

0 引言

在我国西南山区, 悬臂式抗滑桩被广泛应用于切方边坡支护、斜坡填方地基加固、地质灾害治理等领域。对悬臂式抗滑桩而言, 土压力传递至距桩背侧一定范围时, 凭借桩结构自身的遮拦效应迫使该范围土颗粒间的楔紧效应不断增加, 在土颗粒楔紧效应增加的区域逐渐形成了一种类似于拱形且具有一定厚度和一定强度的土质传力结构, 并借此将绝大部分土压力传递至桩上。自 Terzaghi 首次提出土拱效应, 并采用活动门试验对其作了初步验证之后^[1], 工程技术人员

已逐渐意识到土拱效应在岩土工程领域是广泛存在的。同时, 不少学者将抗滑桩的荷载传递机理与桩间土拱效应的形成过程紧密联系起来, 并围绕桩间土拱效应展开了一定的研究^[2]。

李忠诚、陈福全等通过对埋入式抗滑桩及被动桩

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878218); 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目(50625824); “十一五”国家科技支撑计划课题子题(2008BAJ06B04); 国务院三峡办移民安置规划司项目(2008SXG02-2)

收稿日期: 2008-11-10

建立三维数值模型^[3-4], 指出三维模型得到的土拱效应与二维情况下的作用形式以及变化规律相似, 仅拱效应的作用程度略小于相同工况下二维模型的计算结果, 认为桩间距是影响桩间土拱效应发挥最为重要的因素之一。杨明、姚令侃等采用颗粒流程序PFC^{2D}对抗滑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^[5]。日本建设省土木研究所^[6-7]用实验证实了滑坡体进入极限平衡状态时的抗滑桩为被动桩, 并应用土拱效应的概念推导了与实验数据吻合良好的圆形桩极限阻力计算公式。Bosscher和Gray^[8]通过室内模型试验, 针对砂土边坡抗滑桩的土拱效应做了研究, 发现桩间距是影响桩间土拱效应最重要的因素。Lawrence等^[9]对抗滑桩进行了模型试验研究, 对桩周土对抗滑桩的传力机理作了深入研究。杨明等^[10]采用离心模型试验对桩间距、桩正截面宽度与土拱效应之间的关系作了分析。

综上所述, 抗滑桩间土拱效应研究多基于数值方法, 悬臂式抗滑桩土拱效应的大型试验研究亟待开展。

1 试验目的

一般认为, 桩间距过大土拱效应得不到有效发挥, 抗滑桩的平面布置应满足合理桩间距的要求。重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》指出^[11]: “当桩间距为桩宽的 3~5 倍时, 桩间土在滑坡推力作用下会产生拱效应”。实际调查发现, 当前悬臂式抗滑桩设计桩间距大多满足上述规定, 但部分工程的桩间土依然出现滑塌等失稳现象。2004 年 5 月重庆鸡冠石污水处理厂二期场地开挖整平时, 由于坡体开挖和持续降雨致使原已施工的抗滑桩桩间土体部分垮塌, 且滑体后缘开裂、变形现象明显, 该工程桩间净距仅 3.5 m。襄渝二线铁路工程某工点施工的抗滑桩因桩前土开挖, 桩间部分土体出现滑塌现象, 但边坡整体上处于稳定状态, 该工程桩间距为 6 m, 如图 1 所示。为避免桩间土出现局部滑塌现象, 悬臂式抗滑桩之间一般需施工挡土板, 为减小挡板上的土压力, 文献^[11]建议挡土板应施工于桩面侧。鉴于桩间土拱效应较复杂, 且桩间土拱的空间分布形态也没有一个清晰的认识, 因此当前桩间挡板设计多过于保守, 在一定程度上增加了支挡工程的投资。

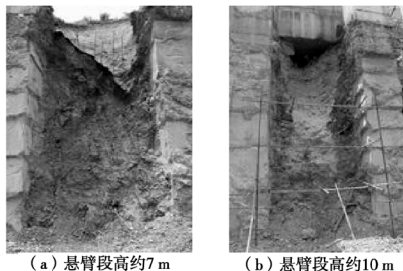


图 1 切方后桩间土的局部垮塌

Fig. 1 Partial collapse of soil between adjacent piles in excavated slope

为深入研究工程中所面临的实际问题, 我院在校内某人工边坡上完成了悬臂式抗滑桩三维成拱效应大型试验。研究了合理桩间距条件下土拱效应的三维作用规律、桩前施工挡土板时桩-板土压力分配、桩间土稳定性、拱脚极限剪切作用厚度等相关问题, 为悬臂式抗滑桩及桩间挡土板的设计提供了科学依据。

2 试验方案

2.1 试验场地及滑体模型槽

试验场地位于人工开挖的边坡上, 选择原天然地基作为设计滑床, 滑床岩体为侏罗系中统沙溪庙组中风化砂岩 (J_{2s})。为获得相对较大的水平下滑力, 滑床坡面设计倾角为 36° , 竖直高度为 2.30 m。为减小侧壁岩体对滑体的摩阻效应, 在开挖的模型槽两侧壁表面铺设两块光滑的高强度防潮板, 防潮板的尺寸与开挖模型槽的侧壁大小相同, 两块板的水平距离控制在 2.0 m。为抑制侧壁挡板 (防潮板) 在试验过程中与侧壁岩体间发生相对位移, 通过木桩将侧壁挡板固定于模型槽内, 并在填土过程中, 将侧壁挡板与侧壁岩体间的缝隙填实, 模型槽如图 2 所示。

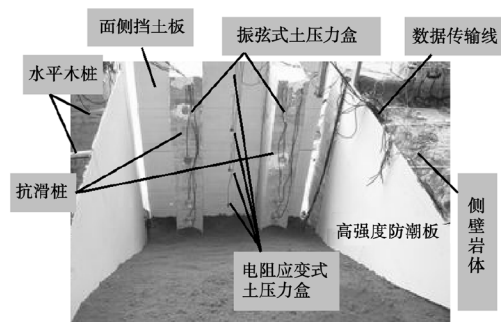


图 2 试验模型槽示意图

Fig. 2 Sketch of model test pit

2.2 抗滑桩的施工

研究桩间三维土拱效应, 桩身截面尺寸及桩间距对最终测试结果影响较大^[10]。为避免桩间土出现绕流现象, 部分规范就此作了相关规定, 文献^[11]指出: 当桩间距为桩宽的 3~5 倍时, 桩间土在滑坡推力作用下会产生拱效应, 但目前尚无合理的计算方法。参考上述建议, 并考虑桩侧摩擦拱脚的影响^[12], 抗滑桩设计桩间距取 1.0 m, 即控制每根桩分担一延米滑体所产生的下滑力。为便于桩孔开挖, 桩孔不宜过小, 桩正截面宽度取 0.3 m, 桩截面高度取 0.5 m。为确保每次试验时桩结构处于正常使用工作状态, 桩身嵌固段设计深度均取 1.2 m, 抗滑桩桩长设计为 3.4 m, 悬臂段长均为 2.2 m, 桩背侧悬臂段根部与开挖边坡坡脚线齐平。

因嵌固段岩体均匀性较好, 且桩孔开挖后岩体完整, 无明显裂隙, 故采用 K 法对抗滑桩进行内力计算。

经计算,对桩底至滑面上0.3 m范围的主筋、箍筋配筋量予以加强,加强区桩截面配筋率 $\rho_s = 0.0133$,钢筋笼制作如图3所示。桩孔开挖后,将制作好的钢筋笼吊装至已开挖的桩孔内,固定后安装模板,并浇筑C20混凝土。养护28 d后,采用MMS-1多波地震仪对已施工抗滑桩的完整性进行检测,检测结果表明桩身材料均匀,完整性良好,满足试验要求。



图3 抗滑桩钢筋笼的制作

Fig. 3 Construction of reinforcing cages for anti-slide piles

2.3 挡土板的制作及安装

工程实践发现,在桩前施工挡土板桩间土拱效应更容易得到发挥^[11],同时桩-土相对位移量随桩-板刚度比 k 的增加而增大,土拱结构内部的“楔紧”效应也随之增强。同时,为满足挡土板弹性挠曲变形及力学性能均匀性要求,试验采用的挡土板取厚度为18 mm的高密度板,面板表面较光滑,由出厂检验报告查得板材弹性模量为2454 MPa,颗粒结合强度为0.45 MPa,板材密度为790 kg/m³。

悬臂式抗滑桩前土的开挖是自上而下分阶段进行的,为模拟桩前土的开挖过程,研究该过程所产生的卸荷成拱效应,将面侧挡土板平均分为4块,每块挡土板高550 mm,长2000 mm,使挡土板防水一侧(白色)与桩身紧贴,用直径2 mm的铁丝穿过预制孔将挡土板与两根桩固定,见图2和4所示。

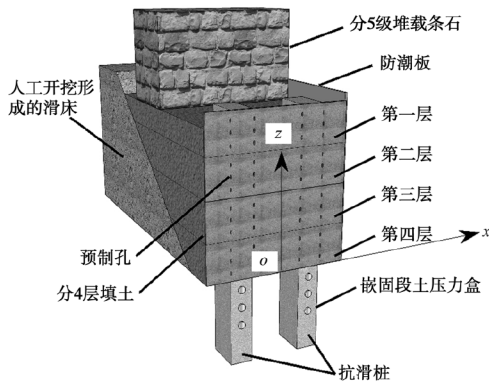


图4 堆载过程示意图

Fig. 4 Schematic plan of preloading process

2.4 滑体材料的选用

土颗粒之间的楔紧效应能否充分发挥,与试验选用的滑体材料性质关系密切,试验用土须选择均匀性

好,传力效果理想的滑体材料。为此,试验所选用的滑体材料均取自重庆市巴南区李家沱长江二级阶地的冲洪积土(Q₄^{al+pl}),土体经现场筛分后装运至试验场地。经测定,土样物理性质参数见表1。滑体主要成分为粉细砂,含较多黏粒。

表1 试验土样参数

Table 1 Parameters of soil samples

土样编号	天然密度/(kg·m ⁻³)	含水率/%	孔隙比	黏粒含量/%
#1	1621	15.4	0.92	31.2
#2	1604	15.2	0.94	33.5
#3	1623	16.1	0.93	31.7

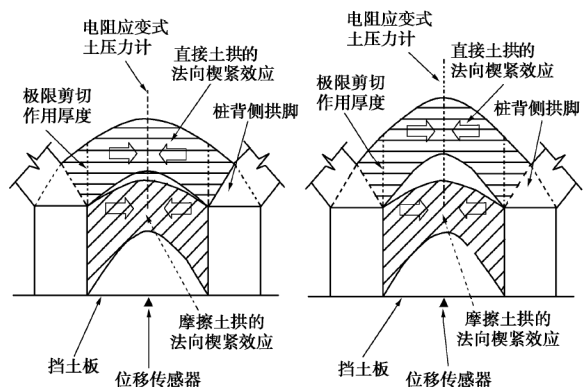
2.5 试验过程

准备工作完成后,首先对测试元件进行标定,并依次记录仪器编号,试验过程主要包括:

(1)在每根抗滑桩背侧安装5个TYJ-2020型振弦式土压力计,每块挡土板背侧中心处安装1个SZY-3-B型电阻应变式土压力计,如图2所示。通过在桩前挡土板跨中位置安装的8个WBD型机电百分表位移传感器监测挡土板的变形量。

(2)为减小仪器尺寸及自重对土拱效应监测结果的影响,桩间土体内的应力监测均采用SZY-3-B型电阻应变式土压力计(直径35 mm,厚7 mm),通过DH3816静态应变测量系统进行数据采集。

(3)分4层进行填土,前3次每层填土厚550 mm,第四层填土厚350 mm,总填土高度为2000 mm。在第一层与第二层回填土之间布置7个电阻应变式土压力计,第二层与第三层、第三层与第四层土之间各布置9个电阻应变式土压力计,若将桩背侧平面视为基准面,桩间土最外侧的土压力计紧贴基准面布置,每两个土压力计之间间距100 mm,通过土压力的变化衡量直接土拱(大土拱^[12])及摩擦土拱(小土拱^[12])的作用范围及作用程度,如图5所示。



(a) 第一层与第二层填土间
(b) 第二层与第三层、第三层与第四层填土间

图5 桩间土内土压力计的布置

Fig. 5 Layout of pressure-measuring device in soil

(4)待位移传感器及土压力计读数稳定后,开始

对填土顶面分级堆载条石, 为使下滑力逐渐向前方传递, 堆载共分 5 级进行, 待所有位移传感器读数稳定至每隔 30 min 水平变形均小于 0.1 mm 时, 再进行下一级条石堆载。为确保堆载产生的局部应力不直接作用于土拱效应发挥区域上, 条石堆放的边界线距桩背侧距离均保持 1.5 m, 堆载宽 1.0 m, 长 2.0 m, 如图 4 所示, 经测定, 因条石堆载产生的局部均布荷载 q_L 大小为 26.18 kPa。

(5) 待位移传感器和土压力计读数均稳定后, 卸掉百分表架。并在抗滑桩之间的坡顶表面划分 100×110 mm 大小的网格。剪断挡土板面侧的铁丝, 按照自上而下的顺序进行摘板, 模拟桩前土开挖对桩间土拱效应的影响, 记录每一级摘板前、后的各土压力计读数。为使土颗粒间的楔紧效应充分得到发挥, 待土压力计读数稳定后, 方可摘掉下一级挡土板。

(6) 待卸荷效应充分发挥后, 采用预加工的 PVC 套管在桩内侧拱脚高 1.4 和 0.8 m 两个平面位置各自分前后 8 个阶段取出原状土。通过自制的简易静力贯入设备确定拱脚的极限剪切作用厚度。

3 三维土拱效应及桩间土稳定性分析

3.1 填土及堆载结束后土拱的承载力分析

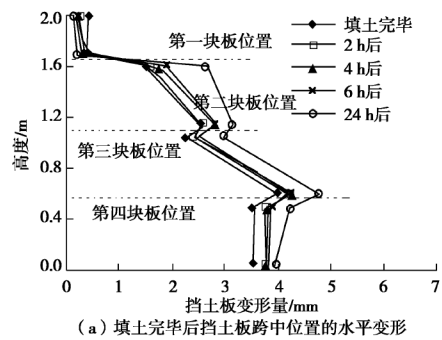
试验完毕后, 因桩顶水平变位较小, 分析时忽略其对挡土板挠曲变形的影响。桩间挡土板的变形观测主要分两个阶段。

(1) 填土完毕后, 挡土板跨中位置的水平变形如图 6 (a) 所示。分析发现, 除顶部第一块挡土板外, 其余挡土板的挠曲变形随时间逐渐增大。挠曲变形较大的位置发生在第三块板的下缘及第四块板的上缘附近, 24 h 后挡土板跨中最大变形达到 4.78 mm。挡土板挠曲变形较小的位置出现在填土顶面附近。

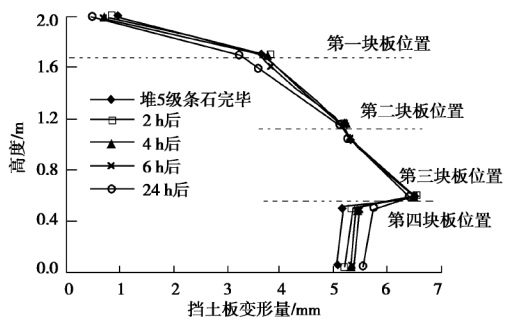
(2) 堆载条石完毕后, 挡土板跨中位置的水平变形如图 6 (b) 所示。不难看出, 挡土板的挠曲变形相对填土稳定后有一定幅度增长。下部第四块板的挠曲变形随时间逐渐增大, 而上部第一块板及第二块板的上缘附近跨中位置的挠曲变形均随时间的增加而减小, 第三块板在堆载条石后跨中位置的挠曲变形随时间变化并不明显, 其下缘水平变形稳定在 6.5 mm 附近, 其上缘稳定在 5.25 mm 附近。

为研究填土及堆载过程中土拱承载力的变化, 将两根桩背侧土压力的平均值 \bar{E}_p 与同一高度挡土板背侧中心处实测土压力 E_b 的比值定义为桩 - 板土压力比 K_s 。图 7 为填土及堆载完毕后桩 - 板土压力比 K_s 随时间的变化曲线。监测结果表明, 无论是在填土完毕或堆载条石完毕后, 高 1.925 m 处 K_s 均随时间的增加而出现较大幅度增长, 值得注意的是该位置处挡土板的水平挠曲变形却始终在减小。因此, 单纯凭借 K_s 的

大小来衡量土拱效应的强弱是不妥的。分析认为, 填土主要由粉细砂构成, 且黏粒含量较多, 有一定的黏聚力, 滑体结构性随着时间的增加而逐渐增强, 上部挡土板所受的水平土压力随土体结构性的增强而减小, 挡土板自身的挠曲变形也逐渐得到恢复。倘若 K_s 增加, 而挡土板自身的挠曲变形未出现减小现象, 直接土拱的承载力才会有所增强。据此, 无论是在填土完毕或是堆载条石完毕, 在高 0.825~1.375 m 范围内, 直接土拱的承载力均相对较大, 并随时间的增长而增大, 土拱效应伴有逐渐增强的趋势。在填土底部高 0.275 m 附近, K_s 增加较缓慢, 而挡土板所受的土压力在 24 h 内却随时间缓慢增长, 故直接土拱的承载力也表现出呈缓慢增长的趋势。



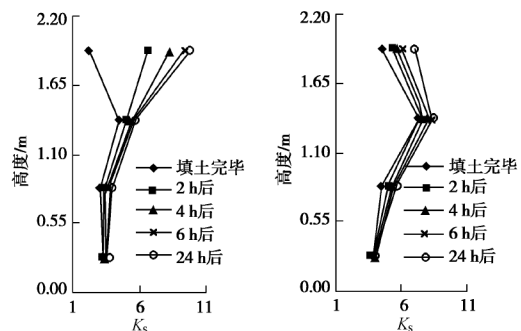
(a) 填土完毕后挡土板跨中位置的水平变形



(b) 堆载条石完毕后挡土板跨中位置的水平变形

图 6 挡土板跨中位置的水平变形

Fig. 6 Horizontal deformation of midspan on breast boards



(a) 填土完毕 (b) 堆载条石完毕后

图 7 桩 - 板土压力比 K_s

Fig. 7 Soil pressure ratio of pile to breast board

对比发现, 在填土及堆载条石过程结束后, 填土的中下部直接土拱作用较明显, 随着时间的发展, 拱

圈附近土体的楔紧效应缓慢增加，土拱结构的承载力也逐渐得到提高。

3.2 卸荷过程桩间土的成拱效应

一般认为，土拱效应越强，该位置土颗粒间的楔紧效应就表现得较为突出。研究发现，土拱作用位置 x 方向土压力略大于同一高度周边土体内的土压力值，土颗粒间的楔紧效应也在该范围表现尤为明显。

同时，采用摘取桩前面板的措施模拟桩前土自上而下的开挖过程。在整个试验过程中，记录每一个工况完成后桩间土 x 方向土压力的稳定读数，如图 8 所示。水平坐标轴表示各测点距基准面的水平距离，即各测点距桩背侧平面的距离。分析发现，在填土及堆载过程中 x 方向土压力的突变现象并不显著。仅在第二和第三层填土间（高 1.1 m 处）距基准面 40~70 cm 范围内 x 方向土压力略有增加，表明该范围土颗粒间楔紧效应相对较强，土体间存在一定的起拱现象。

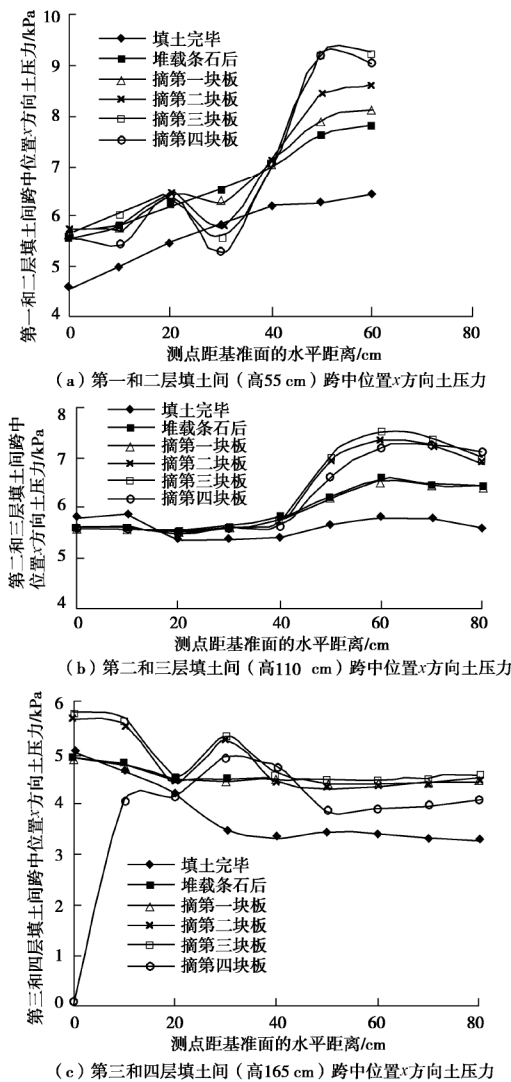


图 8 桩间土跨中位置 x 方向土压力

Fig. 8 Soil pressure of x -direction at span centre of spacing

在摘板卸荷过程中，各层填土间 x 方向土压力均发生一定程度的波动，主要表现为：

(1) 直接土拱位于摩擦土拱作用区域的正后方。在填土的中下部，直接土拱范围内土颗粒间产生的楔紧效应更强， x 方向土压力的突变现象更为显著。

(2) 摘下第四块板后，中上部桩间土产生了滑塌现象，促使摩擦土拱效应基本丧失，主要表现为基准面附近 0~20 cm 范围 x 方向土压力呈现不同程度的减小趋势，其中第三和第四层填土间最外侧的土压力计已从桩间土中脱落，如图 9 所示。

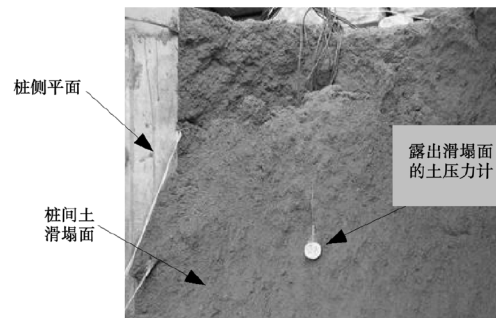


图 9 桩间土滑塌后壁

Fig. 9 Sliding posterior of soil between piles

(3) 摘下第四块板后，桩间土出现部分滑塌现象，在填土的中上部， x 方向应力峰值点向直接土拱作用区域的后方发生一定偏移，且直接土拱效应并没有因此产生削弱，如图 8 (b)、(c)。因桩间下部第一层填土基本处于稳定状态，故摘下第四块挡板后，第一和第二层填土间 x 方向应力变化不大，如图 8 (a)。

倘若将 x 方向应力的突变峰值点视为理想拱轴线在跨中截面所处的位置，则直接土拱的矢高 f 为应力峰值点至基准面的水平距离。监测结果表明， f 在桩间土的中上部表现为自上而下逐渐增加的趋势，在桩间土的中下部变化较小。

3.3 土拱效应与桩间土稳定性分析

在摘板卸荷的过程中，土体仅在桩悬臂段中上部的有限范围内产生滑塌现象，桩背侧直接土拱转而承担了由摩擦土拱及挡土板承担的小部分土压力，故直接土拱效应略有增强，填土顶面破坏模式见图 10。

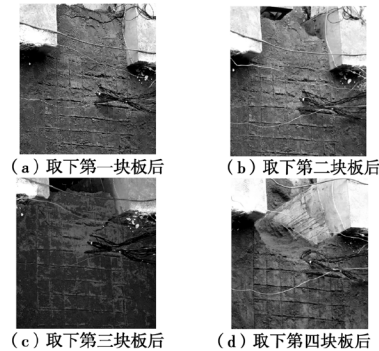


图 10 填土顶面变形情况

Fig. 10 Soil deformation at top surface of fill

通过对桩间土三维滑塌曲面进行观测, 桩间土滑塌面在不同高度上均位于直接土拱效应的拱圈内侧区域。填土顶面附近滑塌面后缘与该位置水平土拱作用的区域距离较小, 后缘距基准面的最大间距为 23 cm。同时, 滑塌面相对跨中截面呈对称分布, 且滑面的曲率半径自上而下有逐渐增加的趋势, 如图 11 所示。因此, 拱圈内部土体的楔紧效应较强, 该范围内土体不易产生局部滑塌现象, 工程中常见的桩间土滑塌面与土拱效应作用的空间曲面并不重叠。

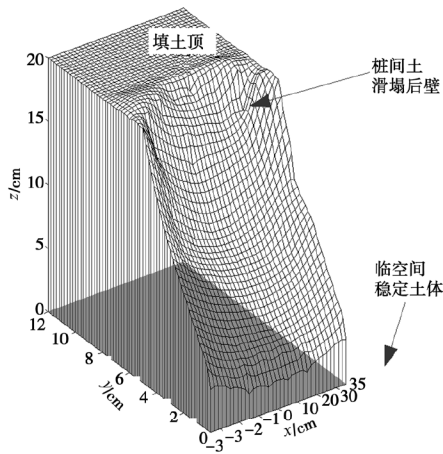


图 11 桩间土滑塌面的空间位置

Fig. 11 Spatial location of soil sliding surface between piles

4 拱脚极限剪切作用厚度的测定

4.1 拱脚极限剪切作用厚度

当实际桩间距满足合理桩间距时, 上述楔紧效应集中出现在土拱拱圈附近, 特别是在桩背侧附近的拱脚处表现尤为强烈。研究发现, 直接土拱产生临界破坏时, 主要表现为沿拱脚处的整体剪切破坏现象^[13]。多数学者通常将直接拱脚的几何形状视为等腰三角形, 认为拱圈的厚度与桩正截面宽度成正比, 基于上述建立了桩间土拱效应的力学模型^[13-14]。

目前拱脚土颗粒的楔紧效应研究主要是基于数值模拟^[5], 而相关试验研究成果较少。因此, 通过试验手段探索拱脚的几何特征, 研究控制土拱结构整体稳定性的拱脚极限剪切作用厚度, 就显得尤为迫切。

4.2 测定方法

对试验所采用的滑体材料而言, 若土颗粒之间的楔紧效应越强, 其密实度就越高。通过在摘板结束后, 对桩背拱脚剪切面附近原状土的楔紧程度进行测试, 据此分析拱脚的极限剪切作用厚度。

摘板过程结束后, 为减小取土过程对试件的扰动, 试验采取了如下措施:

(1) 取土器采用 $\phi 75$ mm 的 PVC 管, 将钻进端

管口加工为 30° 的刃脚。取样前, 将距管口 200 mm 范围 PVC 管的内外两侧均涂上一层润滑油。

(2) 考虑到试验模型具有对称性, 且滑体材料均匀性较好, 为减少侧壁阻力对测试结果的影响, 采用分阶段取样的措施, 每次取样钻进深度均保持 200 mm, 一次取样仅测试一个测点, 测孔中心距管口的距离为 100 mm, 按测点 1~8 顺序逐段取样, 同一高度沿桩的侧壁有两条钻进线, 取土管推进到设计深度后, 将取土管连同土样一并取出, 按 A~F 的顺序挖除其周边 150 mm 范围内土体, 为防止桩间土发生塌方, 测点 7、8 两测点周边土体并不开挖, 见图 12。

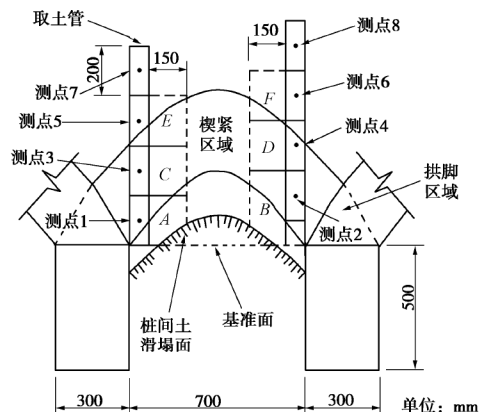


图 12 取土过程示意图

Fig. 12 Sketch of soil sampling

自制的简易静力贯入设备, 如图 13 所示。采用液塑限联合测定仪的锤头作为贯入锤头, 将锤头与固定在木板上的钢质基座牢固连接, 采用 50 mm 量程的 WBD 型位移传感器测量锤尖贯入量。

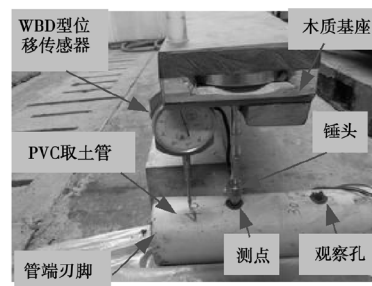


图 13 静力贯入测试示意图

Fig. 13 Sketch of static penetration tests

4.3 测定成果

按照上述测试步骤先后在填土高度为 1.4 m, 和 0.8 m 的两个水平面的拱脚处进行取样, 测试范围取基准面水平向里 800 mm。同一高度处左右各有一条钻进线, 沿钻进线每隔 200 mm 取 1 个点作为测点, 两条钻进线上测点位置相错 100 mm。采用上述方案

可测定同一高度沿钻进线方向每钻进 100 mm 原状土的锥尖贯入值, 测点 2~8 的锤尖最终贯入值见图 14。

不难发现, 桩背侧中下部高 0.8 m 处锤尖总贯入值普遍低于高 1.4 m 处相同测点位置的总贯入值。为消除测孔表面土体在取土过程中产生的局部挤压效应对最终测定结果的影响, 在瞬时沉陷结束后, 每隔 10 s 采集一次位移传感器的读数值。图 15 为各测点在瞬时沉陷结束后锤尖的贯入速率, 即各条曲线斜率大小。

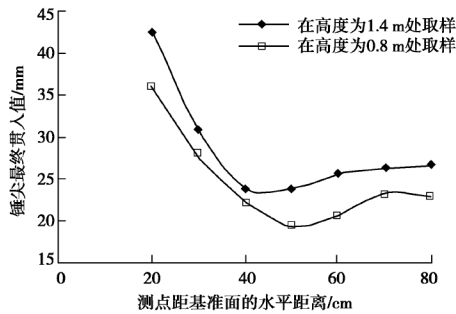
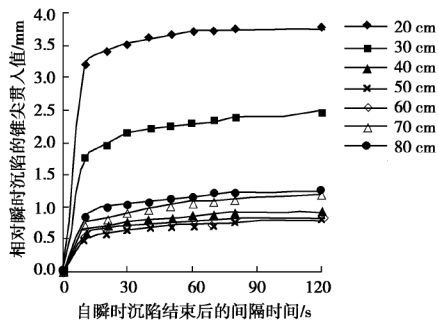
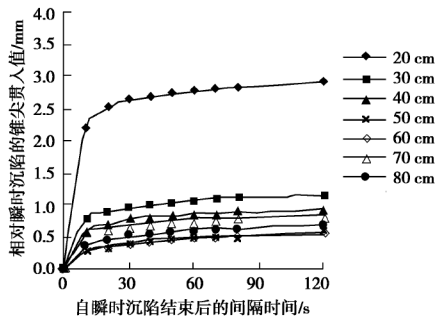


图 14 沿钻进方向锤尖最终贯入值

Fig. 14 Final penetration distance of hammer pick along drilled direction



(a) 土样取自填土高度为1.4 m的桩侧拱脚处



(b) 土样取自填土高度为0.8 m的桩侧拱脚处

图 15 初始沉陷后锤尖的贯入速率

Fig. 15 Penetration speed rate of hammer pick after initial subsidence

不难看出, 各测点在瞬时沉陷产生后的前 30 s 内的沉陷速率较快, 尤其是前 10 s 内贯入值增长较快。分析发现, 沿取土管钻进方向约 30 cm 处拱脚土颗粒

间的楔紧效应均呈现一定程度的增强现象, 在 40~50 cm 处楔紧效应表现得最为强烈, 在 60 cm 处测点的贯入速率略有增加, 该处土颗粒间的楔紧效应有所降低。

分析认为, 由于摘板后桩间土产生局部滑塌现象, 基准面附近土体失去了桩侧摩擦土拱的作用, 表现为拱脚滑塌面附近土体相对松散, 在距基准面水平距离不足 20 cm 范围内, 测点的锥尖最终贯入值和贯入速率普遍偏大。同时, 伴随摘板过程中桩间土内部的土水平卸荷效应逐渐增大, 直接土拱效应得到继续发展, 拱脚附近土颗粒间楔紧效应进一步增大。若取距基准面 30 cm 的拱脚位置为其厚度估算的起始点, 填土高度为 1.4 m 处, 由测点静力贯入曲线观察到拱脚的极限剪切厚度约 35 cm, 相当于桩正截面宽度的 1.17 倍。桩背侧中下部距悬臂段根部 0.8 m 处, 直接土拱效应作用更趋强烈, 拱脚极限剪切作用厚度约 40 cm, 相当于桩正截面宽度的 1.33 倍。

5 结 论

(1) 土拱效应的形成是桩间土颗粒楔紧效应逐渐发挥的过程, 综合考虑不同高度挡土板的挠曲变形量及桩-板土压力比 K_s 来衡量该位置直接土拱效应的发挥程度较合理。填土完毕及堆载条石结束后, 在填土高度的中下部直接土拱作用较明显。

(2) 监测发现, 土拱作用的范围也并非是一个具有清晰轮廓的圈状结构, 倘若将 x 方向应力的突变峰值点视为理想拱轴线与跨中截面的交点, 则直接土拱的矢高在桩间土的中上部表现为自上而下逐渐增加, 在桩间土的中下部随高度变化不大。

(3) 摘板卸荷过程中, 填土中上部摩擦土拱效应趋于减弱, 甚至消失, 桩背侧直接土拱作用程度却逐渐增强。合理桩间距范围内, 桩间土若发生滑塌仅仅是小范围的局部滑塌现象, 直接土拱的整体结构并没有破坏, 直接土拱的极限承载力对桩间土的整体稳定性起决定性作用。

(4) 由于直接土拱作用区域土颗粒间楔紧效应明显高于附近土体, 迫使桩间土的滑塌面常常位于直接土拱作用的拱圈内侧区域。

(5) 通过对拱脚剪切线附近的原状土进行测试, 结果表明在直接土拱作用相对显著的填土区域, 拱脚附近土体较密实, 拱脚的极限剪切作用厚度相对较大; 而在填土中上部, 拱脚的极限剪切作用厚度相对较小。

参考文献:

[1] TERZAGHI K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door[C]// Proceedings of 1st

- Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Boston, 1936, **1**: 307 - 316.
- [2] 吴子树, 张利民, 等. 土拱的形成机理及存在条件的探[J]. 成都科技大学学报, 1995(2): 15 - 19. (WU Zi-shu, ZHANG Li-min, et al. Studies on the mechanism of arching action in loess[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995(2): 15 - 19. (in Chinese))
- [3] 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. (in Chinese))
- [4] 陈福全, 侯永峰, 刘毓毓. 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. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] TOMIO Ito, TAMOSSU M. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. Soils and Foundations, 1975, **15**(4): 43 - 59.
- [7] TOMIO Ito. Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide[J]. Soils and Foundations, 1982, **22**(1): 1 - 13.
- [8] BOSSCHER J, GRAY H. Soil arching in sandy slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **112**(6): 626 - 645.
- [9] LAWRENCE. The mechanism of load transfer in granular materials utilizing tactile pressure sensor[D]. Lowell: University of Massachusetts Lowell, 2002.
- [10] 杨明, 姚令侃, 王广军. 抗滑桩宽度与桩间距对桩间土拱效应的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1477 - 1482. (YANG Ming, YAO Ling-kan, WANG Guang-jun. Study on effect of width and space of anti-slide piles on soil arching between piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1477 - 1482. (in Chinese))
- [11] DB50/5029—2004 地质灾害防治工程设计规范[S]. 重庆, 2004. (DB50/5029 — 2004 Design specifications of implementation project for geologic hazards[S]. Chongqing, 2004. (in Chinese))
- [12] 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 Chen-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. (in Chinese))
- [13] 周应华, 周德培, 冯君. 推力桩桩间土拱几何力学特性及桩间距的确定[J]. 岩土力学, 2006, **27**(3): 455 - 457. (ZHOU Ying-hua, ZHOU De-pei, FENG Jun. Geometrically mechanical characters of soil arch between two adjacent laterally loaded piles and determination of suitable pile spacing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(3): 455 - 457. (in Chinese))
- [14] 蒋良淮, 黄润秋, 蒋忠信. 黏性土桩间土拱效应计算与桩间距分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(3): 445 - 450. (JIANG Liang-wei, HUANG Run-qiu, JIANG Zhong-xin. Analysis of soil arching effect between adjacent piles and their spacing in cohesive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(3): 445 - 450. (in Chinese))