

文章编号: 1000-7598(2010)08-2489-08

柔性板桩板墙加固斜坡填方地基 的土压力分配问题研究

董捷^{1,2}, 张永兴², 黄治云²

(1 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142; 2 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 通过对桩板墙挡土板的受力变形特征分析, 指出桩间采用柔性挡土板时, 作用于挡土板上的土压力相对较小。在对分析简化简仓法与卸荷拱法的基础上, 针对当前挡土板土压力计算中存在的问题, 对柔性板桩板墙加固斜坡填方地基展开试验研究, 并重点研究桩前、桩后施工挡土板时墙后土压力的分布规律。通过对布置在挡土板上的位移计及预埋的土压力计进行监测, 结果表明, 挡土板布置在桩前时其挠曲变形及承受的土压力值较小, 且桩间土拱效应更易得到发挥。挡土板上土压力自上而下多呈抛物线型分布, 而作用于桩背侧的土压力分布相对复杂。通过对桩后布置挡土板的土压力分布规律进行为期 21 d 的监测, 研究了土压力变化的时间效应。

关键词: 柔性板; 桩板墙; 填方地基; 土压力计; 时间效应

中图分类号: TU 413.6+2

文献标识码: A

Study of earth pressure distribution of flexiboard sheet-pile walls used in reinforced fill foundation on ramp

DONG Jie^{1,2}, ZHANG Yong-xing², HUANG Zhi-yun²

(1. Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The viewpoint that earth pressure acted on breast board is lesser when flexiboard is used in sheet-pile wall engineering, which is expounded based on the load distribution and deforming characteristic of board between two adjacent piles. There are some problems which exist in simplified granary method and unloading-arch theory; therefore, the model tests for simulating the flexiboard sheet-pile walls used in reinforced fill foundation on ramp are designed to primarily research and compare earth pressure distribution patterns when flexiboards are fixed on frontal or dorsal surface of piles. It is indicated that both of earth pressure acted on flexiboards and their deflection deformations are lesser; moreover, soil arching effect is more intensive, when the flexiboards are constructed on the frontal surface of piles according to testing results of dial indicators and earth pressure cells. The measured soil pressure distributions of flexiboards almost present parabolic curves, whereas dorsal load distributions of piles are complex. In addition, the comparison and analysis are made about two theoretical calculation values and testing results. Finally, the time effect of earth pressure variation is studied by monitoring earth pressure cells when flexiboard is on the dorsal surface of piles; this process that has been lasting for 21 days since boulder strips had been stacked on fill foundation.

Key words: flexiboard; sheet-pile wall; fill foundation; earth pressure cell; time effect

1 引言

在我国西南地区及三峡库区, 斜坡是一种常见的地表形态。受场地条件制约, 铁路路基、建筑物基础常施工于斜坡场地, 为提高地基的整体稳定性,

工程中常在斜坡上施工桩板墙, 对斜坡填土进行加固, 形成桩板墙加固的斜坡填方地基。

研究表明, 当桩间距较大时, 桩背的土拱效应得不到有效的发挥, 作用在挡土板上的土压力相对较大^[1-2]。为此, 《铁路路基支挡结构设计规范》

收稿日期: 2008-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50878218); 国家杰出青年科学基金(No. 50625824); “十一五”国家科技支撑计划课题子题(No. 2008BAJ06B04); 国务院三峡办移民安置规划司三峡库区三期地质灾害防治科研项目(No. 2008SXG02-2)。

第一作者简介: 董捷, 男, 1980年生, 博士后, 工程师, 主要从事路基支挡结构设计、路基加固、地质灾害防治方面的研究。E-mail: dongjie_511@163.com

(TB10025-2006)指出,实际工程中桩板墙的桩间距宜为 5~8 m,而桩间净距一般为 2~4 m,桩间挡土结构上的土压力可根据桩间岩土体的稳定情况按全部岩土压力或部分岩土压力计算。需要指出的是,当前桩板墙设计桩间净距大多满足上述桩间距的要求,但桩间挡土板的尺寸及布置方式却各不相同。更为重要的是,桩间挡土板的设计尺寸直接控制着桩板墙工程的总投资。为此,部分学者针对桩间挡土板土压力的分布规律作了一些研究,叶晓明^[3]采用卸荷拱理论分析了桩背侧施工挡土板上所承受的土压力,指出当填料为无黏性土时挡土板上的土压力远小于采用均布荷载计算得到的土压力值。文献[4]认为考虑土拱效应时,若挡土板设置在桩面侧,挡土板所承受的土压力不受桩背侧土压力大小的影响,可采用拟化简仓法计算作用于挡土板上的水平土压力。蒋忠信等^[5]对南昆铁路支挡结构进行现场观测,认为锚拉式桩板墙上部呈三角形分布,中下部为矩形分布。王广军^[6]采用铝合金板作为桩间挡土板,通过对离心模型试验所观测的挡土板跨中位移进行反算,指出若桩间的土拱效应得不到有效发挥,挡土板所承受的土压力值与 Rankine 土压力计算结果较接近。蒋楚生^[7]对云南某高速公路预应力锚索桩板墙工程进行调研发现,挡土板刚度须减小到一定程度后,才会出现桩上土压力大,板上土压力小的现象。

综上所述,有关桩板墙土拱效应及土压力分配问题研究尚未达成共识^[7],挡板上土压力研究多针对预应力锚索桩板墙^[5,7-8],且桩前施工挡土板时土压力分布规律的相关研究较少。鉴于此,本文采用大型试验对柔性板桩板墙土压力的分配问题及墙背填土的成拱效应展开研究,并与常见的挡板荷载计算结果进行对比,为柔性挡土板设计提供科学依据。

2 桩板的土压力分配问题

2.1 桩-板相对刚度的影响

设计桩间挡土板时,若将计算土压力在水平方向上视为均为分布,土压力集度为 $\bar{q}$,即按全部土压力计算,挡土板设计厚度 t 往往较大,形成厚板,如图 1(a)所示。因桩-板相对刚度较接近,在水平土压力作用下,挡土板相对桩身的侧向变形较小,挡土板背侧附近土体与桩背正后方土体的相对位移较小,造成桩板墙背侧土拱效应得不到有效发挥。故在同一高度上,挡土板单位面积所承受的土压力 q_b 与桩背侧单位面积所承受的土压力 q_p 值较接近^[7]。Terzaghi^[9]认为,屈服土体和临近静止土体的相对移动受土体内剪应力的阻碍作用,从而使屈服区域内

土压力减小,而临近静止区域土压力增加,有时当屈服土体比临近土体移动量更大时,也将发生土拱效应。据此,只有当桩-板的相对刚度比足够大(形成柔性板),土压力作用下挡土板后侧土体相对桩背侧附近土体有较大相对位移时,土拱效应才能得到有效发挥,如图 1(b)所示。采用柔性板促使绝大部分土压力沿“土拱结构”传递至桩背“拱脚”处,有效降低了作用在挡土板上的土压力。

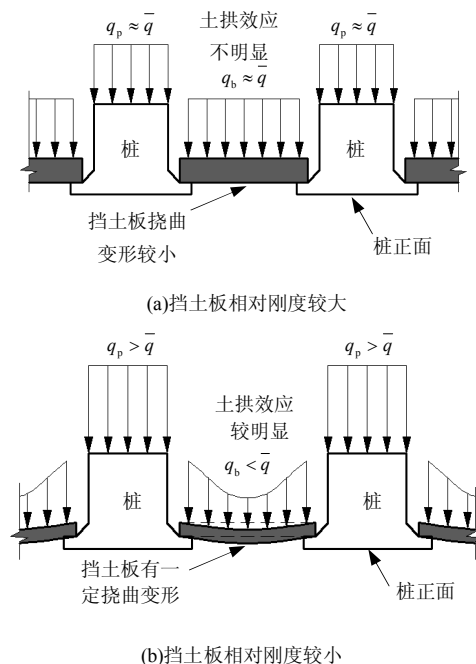


图 1 桩板墙土压力分布示意图

Fig.1 Earth pressure distribution of sheet-pile wall

2.2 土压力计算分析

文献[4]认为,桩间挡土板宜施工在桩前,作用在挡土板上的土压力 q_{bc} 在同一高度上可视为均匀分布,将作用在挡土板上的水平土压力假定为由墙后及桩间的多边形仓 ABCDE 范围内土体所产生的侧向压力,如图 2 所示。

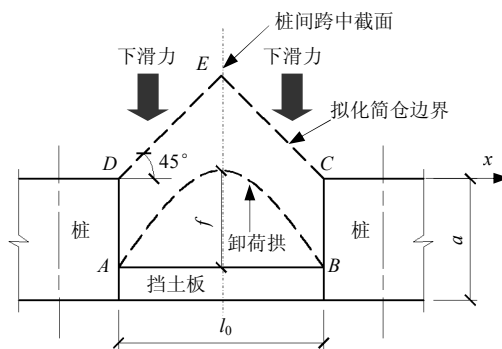


图 2 拟化简仓与卸荷拱的形态

Fig.2 Shape of simplified granary and unloading arch

若桩间净距为 l_0 , 桩截面高度为 a , 桩后土体重度为 γ , 内摩擦角为 φ , 挡土板厚度为 t , 采用拟化简仓法计算得到距桩顶深度为 z 处挡土板承受的水平土压力 q_{bz} 为

$$q_{bz} = \frac{A\gamma}{P \tan \varphi} (1 - e^{-PzK_a \tan \varphi / A}) \quad (1)$$

式中: A 、 P 分别表示闭合多边形 $ABCD$ 的面积和周长; K_a 为 Rankine 土压力侧压系数。

若挡土板厚度 t 较小, 将各变量代入式(1), q_{bz} 可以表示为

$$q_{bz} = \frac{l_0 \gamma (a + 0.25l_0)}{(2a + 2.414l_0) \tan \varphi} \left(1 - e^{\frac{-(2a + 2.414l_0)z \tan \varphi}{l_0 (a + 0.25l_0) \cot^2 (45^\circ - \varphi/2)}} \right) \quad (2)$$

部分学者认为, 若挡土板具有一定的柔性或采用先桩后板的施工顺序, 作用在挡土板上的土压力受桩间卸荷成拱效应控制, 卸荷拱内土体产生的水平土压力由挡土板承受^[1,3], 如图 2 所示。对无粘性土而言, 卸荷拱的矢高 f 可以表示为

$$f = 0.5l_0 / \tan \varphi \quad (3)$$

若挡土板与桩间土的摩擦角为 δ , 侧压力系数为 λ 可以表示为

$$\lambda = \frac{1 + \sin^2 \varphi - 2\sqrt{\sin^2 \varphi - \tan^2 \delta \cos^2 \varphi}}{4 \tan^2 \delta + \cos^2 \varphi} \quad (4)$$

由卸荷拱范围桩间土的平衡条件, 得到

$$q_{bz} = \frac{\lambda \gamma}{\beta} (1 - e^{-\beta z}) \quad (5)$$

参数 β 可以表示为

$$\beta = \frac{3\lambda}{2f} (\tan \delta + \tan \varphi) \quad (6)$$

对比式(2)与式(5)发现, 两种方法均假定作用于挡土板上的土压力 q_{bz} 不随桩板墙后侧滑体下滑力的增加而增大, 忽略土体的黏聚力 c , 认为土拱效应的作用范围自上而下是不变的。

综上所述, 为进一步研究桩前施工挡土板与桩后施工挡土板各自所承受的土压力大小, 分析下滑力及时间变化对挡土板水平土压力的影响, 本文在一处人工开挖的边坡上对柔性板桩板墙加固斜坡填方地基进行试验研究, 重点研究了桩-板间的土拱效

应及土压力分配问题。

3 试验方案

3.1 模型槽和抗滑桩的施工

经坡面整平后的人工开挖边坡, 坡面倾角为 36° , 下伏基岩主要为侏罗系中统沙溪庙组中风化砂岩 (J_{2s})。因坡面开挖过程中, 造成侧壁岩体粗糙不平, 为了减小侧壁岩体对滑体的摩阻效应, 在开挖的模型槽两侧岩壁表面铺设两块光滑的高强度防潮板, 两块板的水平净距控制为 2.0 m。在安装侧壁防潮板前, 在两侧岩壁上固定一定数量的木桩, 将侧壁挡板与木桩通过木质格构梁牢固搭接。

工程实践发现, 抗滑桩的设计间距多处于 3~5 倍桩正截面宽度, 且重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》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”。为使试验结果具有一定的代表性, 两根抗滑桩中心间距取 1.0 m, 桩正截面宽度取 0.3 m, 桩截面高度取 0.5 m, 确保每根桩分担一延米滑体产生的下滑力。

在抗滑桩施工前对嵌固段附近中风化砂岩进行钻孔取样, 参考试件的室内变形试验及三轴试验结果, 并考虑到长期试验对桩顶变形的控制条件, 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脚线齐平。桩身材料采用 C20 混凝土, 截面最大配筋率 $\rho_s = 1.33\%$ 。施工完毕的抗滑桩及模型试验槽如图 3 所示。



图 3 试验槽与抗滑桩的施工照片
Fig.3 Picture of test flume and anti-slide

3.2 挡土板的选择与安装

为满足挡土板刚度小、柔性好、力学性能均匀等要求, 试验用挡土板选取厚度为 18 mm 的高密度板, 由出厂检验报告知板材弹性模量为 2 454 Mpa, 颗粒结合强度 0.45 Mpa, 板材密度 790 kg/m^3 。将板

材加工成 4 块高为 550 mm，长为 2 000 mm 的挡土板，使挡土板防水一侧（白色）面向桩后填土。每次试验前，用直径 2 mm 的铁丝穿过预制孔将挡土板与两根桩固定，为避免在下滑力作用下因铁丝伸长或孔壁局部压缩造成挡土板与桩身之间出现缝隙，铁丝在最终锁定前应做一定的超张拉，以确保挡土板与桩身牢固搭接。

3.3 填土材料

成拱效应及挡土板上的荷载分布与试验选用的填土材料性质关系密切，试验须选择均匀性好，传力效果较理想的材料。为此，试验用土均取自重庆巴南区李家沱长江二级阶地的冲洪积土(Q_4^{al+pl})，试验，土样物理性质参数见表 1。填土主要成分为粉细砂，含较多黏粒，内摩擦角 φ 为 28° 。

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%

3.4 试验步骤

试验主要分为桩前施工挡土板和桩后施工挡土板两个工况，两种工况的试验步骤及监测内容基本一致，主要包括

(1) 在每根抗滑桩背侧高 0.275、0.550、0.825、1.375、1.925 m 的位置共安装 5 个土压力计，每块挡土板背侧中心处各安装 1 个土压力计，如图 4 所示。通过塑钢表架在桩前挡土板跨中位置自下而上安装 8 个 WBD 型机电百分表位移传感器，在填土前记录初值。

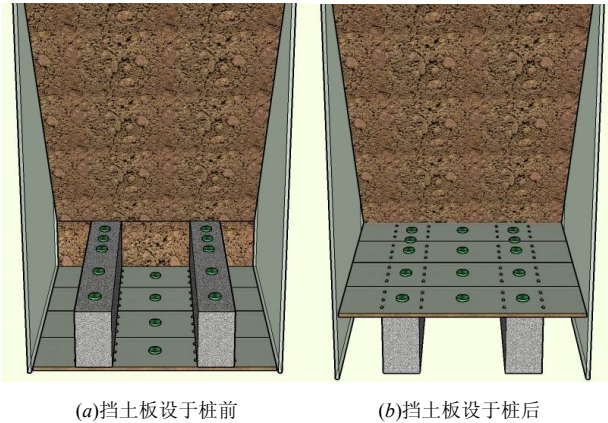


图 4 土压力计布置俯视图
Fig.4 The fixing planform of earth pressure cells

(2) 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，通过 DH3816 静态应变测量系统进行数据采集。

(3) 两种工况均分 4 层进行填土，前 3 次每层填土厚 550 mm，第 4 层填土厚 350 mm，总填土高度为 2 000 mm。数值研究发现，土拱的作用范围在桩背侧一般不超过桩间净距^[10-11]。同时考虑到桩背至坡面的水平距离随高度的增加而增大，若将桩背侧平面视为基准面，在桩后跨中截面每两层填土之间布置 SZY-3-B 型电阻应变式土压力计，以测量不同位置土体法向土压力分布，桩间土跨中截面土压力计布置如图 5 所示。每两个土压力计之间间距为 100 mm，通过土压力的变化衡量直接土拱及摩擦土拱的作用程度^[12]。

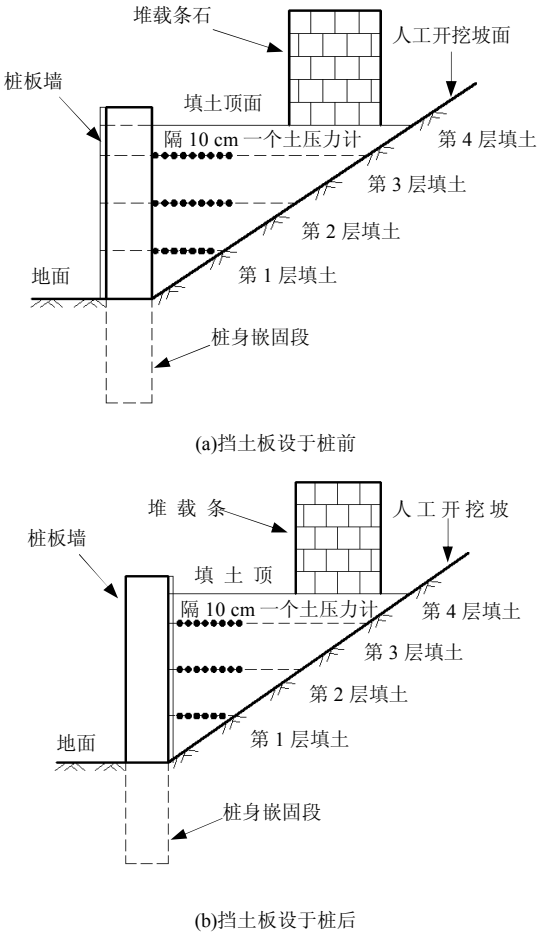


图 5 桩间跨中截面上土压力计布置剖面图
Fig.5 Midspan-section layout of earth pressure cells

(4) 待监测元件读数稳定后，开始对填土顶面分级堆载条石，为使下滑力沿坡面逐渐向前方传递，堆载共分 5 级进行，待挡土板上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, 条石边界距桩背侧距离均保持 1.5 m, 堆载宽度为 1.0 m, 长度为 2.0 m。两种工况下, 堆载所采用的条石均为同一批条石, 即确保不同工况下因填土顶面堆载所产生的均布荷载 q_L 不变。经测定, 在填土顶面因堆载条石所产生的均布荷载 q_L 大小为 26.18 kPa。

4 监测结果及分析

4.1 挡土板的位移分布

桩前布置挡土板或桩后布置挡土板, 桩顶水平位移均较小。鉴于此, 位移分析时忽略桩身位移对挡土板挠曲变形的影响。挡土板的变形观测主要分两个阶段, 即填土阶段与堆载条石阶段。模型槽填土完毕及条石堆载完毕, 挡土板跨中位置水平位移如图 6 所示。

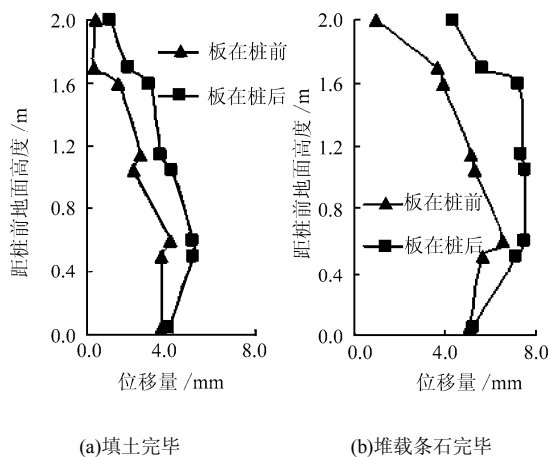


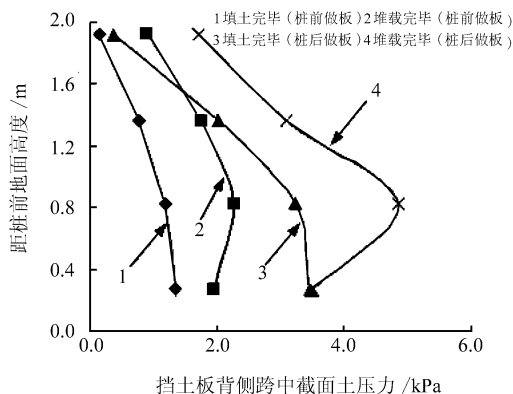
图 6 挡土板跨中位置的水平位移

Fig.6 Horizontal displacement curves of boards at midspan

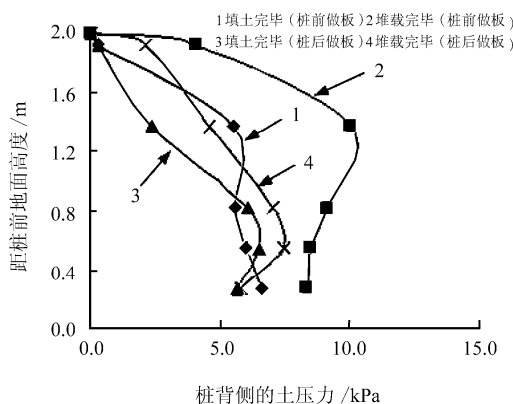
挡土板位移监测结果表明, 桩板墙加固斜坡填方地基时, 挡土板的挠曲变形自上而下逐渐增加, 但在滑面位置附近有所减小。挡土板布置于桩前侧时, 在高 1.7 m 的位置, 堆载条石完毕后该测点挡土板跨中水平位移值增加了 3.26 mm; 若挡土板布置于桩后侧, 在高 1.6 m 的位置, 堆载条石完毕后该测点挡土板跨中水平位移值增加了 4.12 mm。对比发现, 将挡土板布置在抗滑桩的面侧时, 挡土板的挠曲变形相对较小, 作用在挡土板背侧的土压力合力值相对较小。堆载条石完毕, 在附加应力作用下, 中上部挡土板挠曲变形值增长趋势较显著, 挡土板布置在桩后时, 这一现象表现得更为明显。

4.2 土压力分布

在填土及堆载条石过程中, 挡土板跨中位置及桩身背侧的土压力分布规律如图 7 所示。



(a) 作用在挡土板跨中截面上的土压力



(b) 悬臂段抗滑桩桩背侧土压力

图 7 土压力监测结果

Fig.7 Testing results of earth pressure

监测结果表明:

①若将挡土板布置在桩前, 同一高度上挡土板跨中位置的土压力值较小, 而作用在桩背侧的土压力值较大。

②堆载条石结束后, 作用在挡土板及桩背侧的土压力均发生不同程度的增大。挡土板布置在桩前时, 桩背侧土压力增加显著, 墙后的土拱效应有所发挥; 倘若将挡土板布置在桩后, 作用于挡土板上的土压力值增加较明显, 而作用于桩背侧的土压力增幅相对较小。

③堆载条石完毕, 若挡土板布置在桩身面侧时, 高 1.375 m 的测点位置桩、板土压力比达到 5.83, 若挡土板布置在桩身背侧时, 该位置桩、板土压力比仅为 1.49。因此, 挡土板布置在桩面侧, 有助于减小作用在挡土板背侧的土压力, 桩的遮拦效应更易发挥。

为与理论值作对比, 将试验参数代入式 (2) 和式 (5), 分别算出由拟化简仓法和卸荷拱法得到的挡土板背侧土压力值, 如图 8 所示。

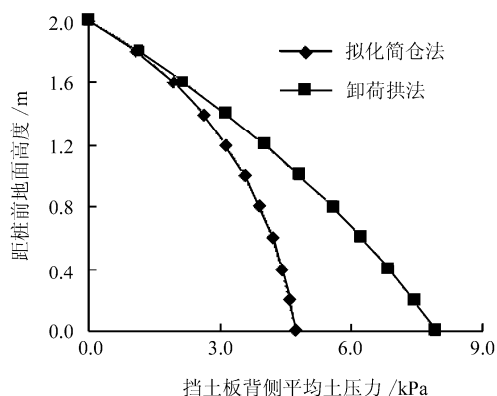


图 8 挡土板土压力理论计算值

Fig.8 Two theoretical calculation curves of earth pressure acted on board

分析发现,卸荷拱法相对拟化筒仓法计算得到的土压力值偏大。值得肯定的是,若桩间采用柔性板进行支挡,填土完毕时,无论挡土板布置于桩前或是桩后,实测值均不超过由筒仓法计算得到的土压力值。但需要指出,对填土顶面进行堆载后,即增加下滑力,挡土板上部土压力的实测值却超过了上述两种理论的计算值。据此,当挡土板布置在桩背侧,且作用在桩板墙的土压力值相对较大或存在顶面超载等不利工况时,采用上述理论对挡土板进行设计将存在一定风险,建议将作用在桩板墙背侧的土压力视为沿挡墙布置方向均匀分布,见图 1(a)。

4.3 桩板墙背侧土体的成拱效应

研究发现,桩间土压力的传递机理与其内部的土拱效应之间存在密切联系^[5-6]。土拱效应的发挥,表现为该范围土体沿土拱结构轴线方向的压应力相对较高。倘若取土拱跨中截面为研究对象,则作用于该截面上沿 x 方向的土压力相对较高。本为对不同工况每两层填土间跨中截面的土压力进行监测,土压力监测方向为土拱拱顶处轴力的作用方向(沿 x 方向,见图 2),桩间跨中截面上土压力分布如图 9 所示。分析发现,挡土板布置位置及条石堆载对 x 方向土压力分布有一定影响,主要表现为:

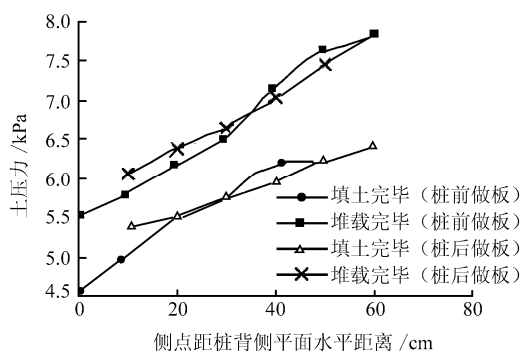
(1) 中下部填土受堆载条石产生的附加应力影响,随着测点距桩背侧平面水平距离的增加, x 方向土压力也随之增长,在填土的下部表现的更为明显,而上部填土则基本不受附加应力的影响。

(2) 挡土板布置在桩前,桩间土的中上部(高 1.1~2.0 m)距桩背侧约 0~20 cm 范围内, x 方向土压力相对较大,存在一定的摩擦土拱效应。堆载条石后,在桩间土的中部(高约 1.1 m)处,距桩背侧约 40~70 cm 范围内, x 方向土压力出现向上

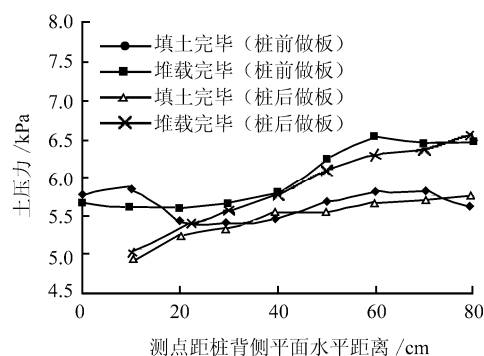
波动现象,表明该范围内土拱直接作用相对较强。

(3) 挡土板布置在桩后,在距挡土板约 20 cm 范围内 x 方向土压力值偏小,即挡土板背侧附近土体存在一定的“膜效应”,随着测点与桩背侧平面水平距离的增加,测点 x 方向土压力波动现象不明显,桩间土的直接土拱作用范围相对模糊。

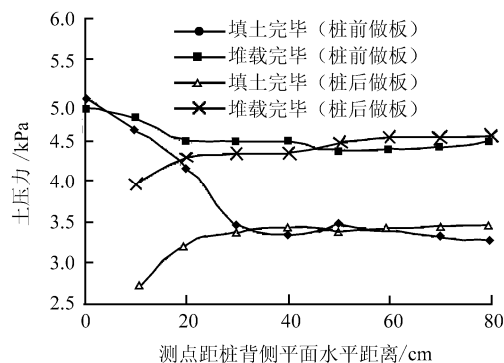
(4) 总体上看,将挡土板布置在桩前,桩板墙背侧的土拱效应相对较强,堆载条石促使桩间土的下滑力增加,桩间土拱效应得到进一步增强。



(a)第一层与第二层填土间



(b)第二层与第三层填土间



(c)第三层与第四层填土间

图 9 桩间跨中截面 x 方向土压力分布

Fig.9 X-direction earth pressure distribution at midspan

4.4 土压力的时间效应

上述研究发现, 挡土板布置在桩背侧作用于挡土板上的土压力相对较大, 土拱效应发挥程度相对较弱。因此, 若将挡土板布置在桩背侧时, 土压力的变化应给予足够的重视。鉴于此, 本文对桩后布置挡土板时桩、板背侧的土压力进行了为期 21 d 的监测。监测结果表明, 桩背侧土压力随时间变化波动不大, 而作用在挡土板上的土压力随时间变化显著, 挡土板背侧不同高度监测点土压力随时间的变化规律如图 10 所示。

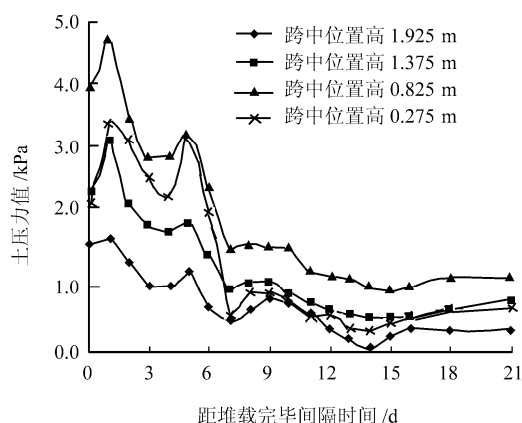


图 10 挡土板土压力的监测曲线

Fig.10 Testing curves of earth pressure acted on boards

监测结果表明, 作用于挡土板背侧的土压力并不是一成不变的, 土压力呈现出由波动向稳定逐渐过渡的一个过程。桩背侧布置挡土板时, 土压力呈现出先增长而后减小, 并最终趋于稳定的态势。最大值出现于堆载完毕间隔 1 d 后, 16 d 后土压力值逐渐趋于稳定。分析发现, 作用于中下部挡土板上的土压力稳定时间相对较长, 且该范围作用于桩板墙上的土压力值相对较大。因此, 桩间土的应力传递存在一个过程, 土拱效应的形成须经历一个由发展到稳定的阶段, 当墙背土压力较大时, 上述过渡阶段需要经历的时间就越多。

5 结 论

(1) 挡土板挠曲变形的最大值一般位于中下部挡板处, 堆载后中上部挡土板跨中位移值增加较明显, 挡土板布置于桩背侧时挠曲变形量相对较大。

(2) 作用于挡土板跨中位置的土压力呈现出抛物线型的分布模式, 最大值位于挡板中下部。作用于挡土板上的荷载随下滑力的增加而增大, 但其增幅较同一高度位置桩背侧的土压力较小。

(3) 桩前布置挡土板时, 悬臂段桩背侧土压

力分布形态较复杂, 呈 B 字型或梯形的分布模式; 桩后布置挡土板时, 作用于桩背侧与挡土板上的土压力分布形态基本一致, 多表现为抛物线型。

(4) 无论将挡土板布置于桩前或是桩后, 桩板墙的土压力最终将全部传递至桩身的嵌固段。为减小作用在挡土板上的土压力, 挡土板宜布置在桩面侧附近。

(5) 通常, 卸荷拱法相对拟化筒仓法计算得到的挡土板土压力值偏大。若仅对墙后进行填土, 作用于挡土板上的土压力一般不超过筒仓法的计算值。当填土顶面存在堆载等不利条件时, 作用于挡土板上土压力值较大, 安全起见, 应将作用在桩板墙背侧的土压力视为沿桩板墙布置方向均匀分布。

(6) 土压力监测结果表明, 桩前布置挡土板时, 桩背侧填土的成拱效应较强, 在高为 1.1 m 的跨中位置, x 方向的应力波动现象较明显, 桩间土拱效应沿高度方向分布并不均匀。

(7) 挡土板背侧的土压力随时间表现为先增加后减小的趋势, 土压力的稳定需要一定时间, 若墙背土压力较大, 非稳定阶段需经历的时间就越多。

参 考 文 献

- [1] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 273—294.
- [2] 代军, 胡岱文, 吴曙光. 桩锚支挡结构体系挡土板土压力试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(4): 48—54. DAI Jun, HU Dai-wen, WU Shu-guang. Experimental study of soil stress on the holding sheet of pile-anchor holding-block structure system[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2001, 23(4): 48—54.
- [3] 叶晓明. 柱板结构挡土墙上的土压力计算方法[J]. 地下空间, 1999, 19(2): 142—146. YE Xiao-ming. Soil pressure calculation method of slab for column-slab structure[J]. *underground Space*, 1999, 19(2): 142—146.
- [4] 重庆市地方标准编写组. DB50/5029—2004 地质灾害防治工程设计规范[S]. 重庆: [s.n.], 2004.
- [5] 蒋忠信, 蒋良潍. 南昆铁路支挡结构主动土压力分布图式[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1035—1040. JIANG Zhong-xin, JIANG Liang-wei. Distribution map forms of active earth pressure on retaining structures in Nanning-Kunming railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 1035—1040.

- [6] 王广军. 桩板墙工程土拱效应及合理桩间距研究[硕士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 42—45.
- [7] 蒋楚生. 路堤(肩)式预应力锚索桩板墙结构设计理论及工程应用研究[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 183—185.
- [8] 甘建国, 李志勇, 邓宗伟. 预应力锚索桩板墙受力现场测试与计算研究[J]. 公路工程, 2007, 32(5): 105—109.
- [9] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Son, 1943.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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.