

现场模拟水平分布式滑坡推力的抗滑桩试验研究

戴自航¹, 张晓咏¹, 邹盛堂¹, 卢才金², 郑也平²

(1. 福州大学岩土工程研究所, 福建 福州 350108; 2. 福建省交通规划设计院, 福建 福州 350004)

摘要: 为较真实地揭示全埋式抗滑桩在水平分布式滑坡推力作用下的受力和变形性状, 依托福建省浦南(浦城-南平)高速公路金斗山大型滑坡治理的一根工程抗滑桩进行了现场大型推桩试验, 利用抗滑桩施工现场自行设计的试验槽, 通过5台液压油泵控制5排共计10个千斤顶对该桩分别近似按三角形、矩形、抛物线形施加水平分布荷载, 以模拟滑坡推力的可能分布形式, 实测了抗滑桩的内力和变形。试验结果表明: 对于设置在滑坡体某级平台上的全埋式抗滑桩, 为大截面人工挖孔桩施工安全而构筑的桩顶钢筋混凝土挡土护墙和桩身护壁可显著减小桩身最大正弯矩, 有利于提高抗滑桩的实际承载力, 如能在现行设计中考虑这些积极因素, 将使抗滑桩的设计更为科学合理; 当作用在抗滑桩上的滑坡推力较小, 滑动面较浅时, 因不同分布形式的合力作用点位置变化不大, 使桩身锚固段弯矩的变化不大, 因而在设计计算中对滑坡推力分布形式假定的不同, 对结果的影响不大。

关键词: 抗滑桩; 滑坡推力; 推桩试验; 水平分布荷载; 内力和变形

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)10-1513-06

作者简介: 戴自航(1966-), 男, 湖南长沙人, 博士后, 教授, 博士生导师, 从事边坡稳定分析、滑坡治理、建筑基础、深基坑支护等岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail: mr.dai@163.com。

Field modeling of laterally distributed landslide thrusts over anti-slide piles

DAI Zi-hang¹, ZHANG Xiao-yong¹, ZOU Sheng-tang¹, LU Cai-jin², ZHEN Ye-ping²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Communication Planning and Design Institute, Fuzhou 350004, China)

Abstract: In order to truly disclose the behavior of wholly buried anti-slide piles under laterally distributed landslide thrusts, based on a practical anti-slide pile, one of the piles used to stabilize the great landslide, i.e., Jingdou Mountain landslide at the left side of Pucheng-Nanping highway in Fujian Province, large scale field pushing pile tests are performed by using five hydraulic oil pumps and ten jacks. Using the self-designed test pit in the construction site, the laterally triangular, rectangular and parabolic distribution loads are applied on the pile respectively to simulate the probable distribution forms of landslide thrusts. The internal forces and deformation of the anti-slide pile are measured. The experiment results show that for anti-slide piles installed in a platform of landslide mass, for the sake of construction safety of artificial excavation, the reinforced concrete retaining walls above the top of the pile and protecting wall surrounding the pile hole can remarkably reduce the maximum bending moments of the pile and enhance its bearing capacity. If these positive factors are considered in the current designs, the design of anti-slide piles will be more scientific and reasonable. When the landslide thrusts are small and the slippery surfaces are shallow, the acting points of resultant forces of different load distribution forms change so little that the bending moments of anti-slide piles in anchored segments have little variation. Therefore, the calculated results will be greatly affected by the hypothesis of different distribution forms of landslide thrusts.

Key words: anti-slide pile; landslide thrust; pushing pile test; lateral distribution load; internal force and deformation

0 引言

20世纪60年代以来, 抗滑桩^[1-4]作为滑坡治理的主要支挡结构, 在铁路、交通、水利和房建等部门得到了大量应用, 并取得了显著效果, 但直到今天, 人们对许多影响抗滑桩设计的主要因素, 如滑坡推力大小的准确计算、滑坡推力及岩土体抗力分布形式、桩

间距、桩的锚固深度等尚不能十分清楚地把握。应该说, 用抗滑桩进行滑坡治理是桩与滑坡体、桩与滑床岩土体相互或共同作用的体系, 是一个复杂的三维问题。但目前, 人们在治理设计中实质上常是将整个体

基金项目: 福建省自然科学基金重点项目(D0720001)

收稿日期: 2009-11-17

系简化为平面问题,且往往是将各部分分开考虑,设计计算过程繁复,且受许多主观因素和计算方法(如传递系数法^[5-6]、滑坡推力分布形式的假定等)本身不严谨的影响,计算结果常可能和实际情况出入很大。正如我国学者王恭先^[1]指出,尽管人们采用抗滑桩等支挡结构成功地治理了大量滑坡,但并不一定意味着人们设计计算就是科学的、合理的,许多滑坡治理的成功可能是过于保守设计的结果,安全储备太大,治理资金浪费严重,当然,也不乏因设计计算错误,造成治理失败的事故。

毫无疑问,工程抗滑桩的现场试验是认识复杂的抗滑桩支挡结构体系作用机制和了解抗滑桩受力性状最真实可靠的手段,但由于现场试验较为复杂和困难,迄今,国内外针对抗滑桩的现场试验比较少见。Ingold^[7]报道了一个抗滑桩现场实测试验结果,试验桩位于已施工完成后4个月的土堤坡脚,桩的弯矩和位移测量了13个月,桩的弯矩虽然不大,但仍在明显增大。遗憾的是没有测量软土层底部的弯矩,由于桩进入硬土层,最大弯矩可能在该处。Bigo等^[8]报道了在法国进行的现场实测试验,桩位于土堤坡脚处,土堤分级施工,桩的位移、桩影响范围外土体自由水平位移用测斜管测量,桩的弯矩1m间隔测一点,实测弯矩与从实测土体位移分布计算的弯矩非常接近。实测试验能较准确地监测抗滑桩的实际受力和变形情况,便于检验设计值和实际值的差异,但试验周期长,且如果要弄清滑坡推力的实际分布形式,还需在桩身的前后侧埋设土压力盒。现场推桩试验则具有试验周期短,模拟滑坡推力的分布形式明确等优点,国内铁道部第二勘测设计院等单位曾对成昆铁路岱湾滑坡、湘黔铁路镇远滑坡和襄渝铁路赵家塘滑坡进行了抗滑桩原型试验研究,对成昆线狮子山滑坡的第1根、第2根抗滑桩与贵昆铁路大海哨滑坡的抗滑桩进行了现场加载试验研究^[9],但已进行的推桩试验几乎都是在桩顶或桩身某个位置按集中水平推力施加的。然而,实际滑坡推力是以水平分布荷载的形式作用在抗滑桩上,设计中常根据滑动岩土体性质近似取笔者建立的各种标准分布函数形式^[4],如矩形、三角形、梯形和抛物线形等。计算表明,同样大小的滑坡推力但以不同分布形式作用在某抗滑桩上时,可使桩身位移和内力产生较大的差异,因而抗滑桩的结构设计也将有较大不同。因此,通过现场模拟各种水平分布式滑坡推力,较真实地揭示桩身内力和变形分布特点对完善和发展抗滑桩的设计计算方法具有重要的理论和现实意义,同时试验资料也可成为验证各种分析计算理论的

重要依据。为此,本文选取了福建省浦南(浦城—南平)高速公路金斗山大型滑坡治理的一根工程抗滑桩进行了这样的现场大型推桩试验,实测了抗滑桩的内力和变形。

1 试验工程抗滑桩概况

试验工程抗滑桩为福建省浦城(闽浙界)至南平高速公路ZK211+659~ZK211+960段左侧金斗山大型滑坡治理抗滑桩之一,该工程治理设计采用了66根全埋式抗滑桩,埋深25~42m不等,其中主滑坡区采用了15榀门架式抗滑刚架桩,次滑坡区采用了36根单排桩,桩间距为6m。图1为正在施工的桩排。为安全起见,试验桩选取的为单排桩中最外缘的一根,如图2所示,桩的截面尺寸为2.0m×3.0m,桩长30m,桩身混凝土强度等级为C30。



图1 正在施工的桩排

Fig. 1 Pile rows under construction



图2 试验抗滑桩的位置

Fig. 2 Location of anti-slide pile

桩周土体分为4层,由上往下依次为:坡残积碎石土夹黏土、残积砂质黏性土、砂土状强风化岩和碎块状强风化岩,如图3所示。该处滑动面位于桩顶以下15.9m的砂土状强风化岩中,如果要在实际滑动面以上模拟施加分布式滑坡推力,则所需开挖试验槽很深,需大量加载的千斤顶和配压油泵,试验难度很大。故本试验分布荷载模拟作用范围为桩顶以下3.5m深度范围内,各监测数据以推桩试验开始前的值作为初始值,以消除试验桩目前所受滑坡推力或土压力的影响。此时,相当于试验滑动面在桩顶以下3.5m。

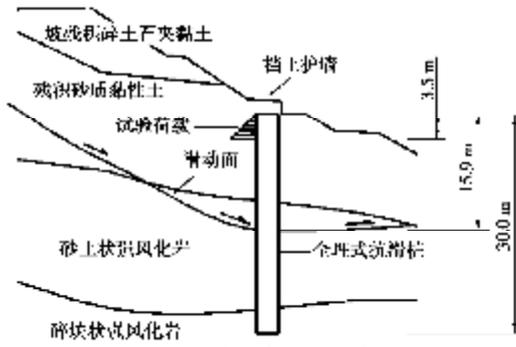


图 3 桩周岩土层分布

Fig. 3 Layers of soil and rock surrounding pile

2 抗滑桩现场推桩试验

2.1 试验系统

试验系统由试验槽、加压系统和监测系统组成。

现分别简述如下：

(1) 试验槽

试验槽提供千斤顶安置空间及其底座反力，位于抗滑桩桩后（见图 4），其长×宽×深=2.8 m×1.1 m×7.1 m。千斤顶底座反力由试验槽后侧的钢筋混凝土反力墙提供，反力墙尺寸长×宽×深=2.8 m×0.5 m×7.1 m，混凝土强度等级为 C30。反力墙下部（桩顶以下 3.5 m 深度范围内）预埋 4 排共 8 根槽钢，在每排槽钢及试验槽底面左右对称铺设木板，其上搁放混凝土垫块及千斤顶，如图 5 所示，每排 2 个，加上坑底 1 排，共计 10 个，垫块与反力墙及桩身护壁间缝隙以高强混凝土充填。

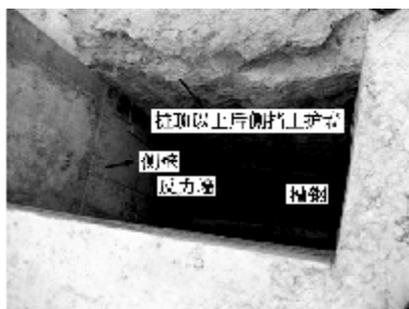


图 4 试验槽

Fig. 4 Test pit

(2) 加压系统

加压系统由加压设备和加压控制系统组成。加压设备包括发电机（图 6 所示）、油泵、千斤顶，控制系统（稳压装置和静态电阻应变仪）。水平推力通过立卧两用液压千斤顶施加，每个千斤顶最大行程为 25 cm，底面左右对称铺设木板，所能提供的最大荷载为 500 kN。为近似模拟水平分布式滑坡推力，特配备了 5 台油泵，如图 7 所示，每台油泵各负责为同排的 2 个千斤顶加压，设计各级总荷载后，按其拟定分布形式计算分摊到每排千斤顶所需施加推力，其大小通过油泵

配合静态电阻应变仪来控制。表 1 为各级 5 排千斤顶的总荷载。

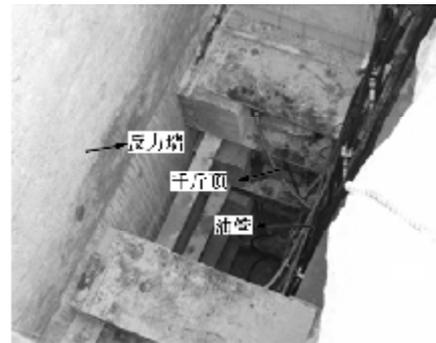


图 5 千斤顶的安置

Fig. 5 Installation of hydraulic jacks



图 6 车载 380 V 大功率发电机

Fig. 6 380 V heavy power generator carried in vehicle



图 7 液压油泵

Fig. 7 Hydraulic oil pump

表 1 试验加载表

Table 1 Test loads

| 荷载等级 | 三角形荷载 /kN | 矩形荷载 /kN | 抛物线形荷载 /kN |
|------|-----------|----------|------------|
| 一 | 280 | 168 | 150 |
| 二 | 560 | 336 | 300 |
| 三 | 840 | 504 | 450 |
| 四 | 1120 | 672 | 600 |
| 五 | 1400 | 840 | 750 |
| 六 | 1680 | 1008 | 900 |
| 七 | 1960 | 1176 | 1050 |
| 八 | 2240 | 1344 | 1200 |
| 九 | 2520 | 1512 | 1350 |
| 十 | 2800 | 1680 | 1500 |

(3) 监测系统

试验桩浇注混凝土之前，预埋的监测元器件有测

斜管和振弦式钢筋应力计。测斜管位于试验桩的前侧，埋至桩底。钢筋应力计对焊于 $\Phi 32$ 受力主筋上，并对称绑扎于桩受荷方向的主筋中心处，如图8所示，其详细布置如图9所示，鉴于考虑滑坡推力仅作用于桩顶以下3.5 m深度范围内，焊接钢筋计的两根钢筋的埋设长度为13 m，共布设17对34个钢筋计。试验中采用的监测仪器有测斜仪、频率仪、百分表、倾角仪、精密水准仪和精密经纬仪。

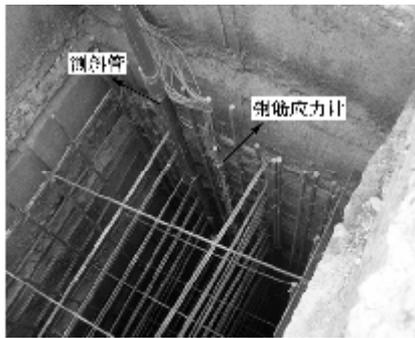


图8 监测元器件的埋设
Fig. 8 Installation of monitoring devices

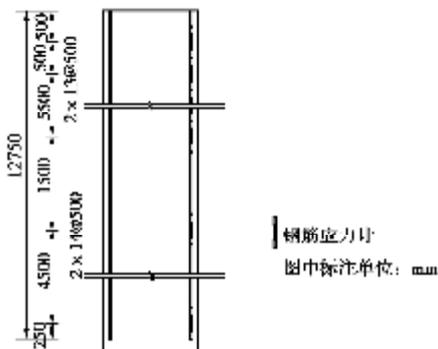


图9 钢筋应力计布置
Fig. 9 Layout of rebar stress detectors

2.2 试验方案

试验方案包括试验内容、监测项目、加载设计。

(1) 试验内容

试验共计4组：①桩顶以下3.5 m深度范围内施加三角形分布荷载；②桩顶以下3.5 m深度范围内施加矩形分布荷载；③桩顶以下3.5 m深度范围内施加抛物线形分布荷载；④桩顶施加集中荷载。因第4组集中荷载作用情况不属本文讨论范围，下文不再详述。

(2) 监测项目

监测目的是为了了解抗滑桩在各种形式水平推力作用下所产生的变形和内力。监测项目包括：①用测斜管测量桩身的水平位移；②桩顶安装百分表测量桩顶的水平位移；③桩顶安装倾角仪测量桩顶转角；④用钢筋应力计测试桩身弯矩。

(3) 加载设计

第1~3组试验原设计最大荷载为2800 kN，参照有关规范^[10]规定，试验采用单循环连续加载法，加载等级均分为十级，每施加一次荷载后，恒载20 min测

读仪器读数。每加两次荷载卸载一次至零，停10 min测读仪器读数，至此完成一个加卸载循环。如此循环直至完成最后一级荷载的观测，试验不得中间停留。

3 试验结果与分析

3.1 桩身弯矩

由桩身各点钢筋测力计的读数可以计算出抗滑桩在各级荷载下完整的弯矩分布，计算公式如下：

$$M = \frac{E_c}{E_s} \frac{S_1 - S_2}{b} I_c \quad (1)$$

式中 M 为围护结构量测断面处计算弯矩； b 为一对钢筋计之间的中心距离； S_1 、 S_2 为一对钢筋计应力计算值，以拉为正，压为负； E_c 和 E_s 分别为混凝土和钢筋计弹性模量； I_c 为量测断面惯性距。

第一组试验：桩身施加三角形分布荷载。荷载从第二级开始加载，每次加一级荷载，每加两级荷载卸载一次至零，遗憾的是因混凝土垫块强度没有严格控制，加到第六级荷载时，受荷最大的垫块被压碎，停止加载，实际施加的最大荷载为1680 kN。图10为桩身弯矩分布图，由图可知，在分别施加二、三、四级荷载时，弯矩增幅较均匀，但随着荷载继续增加时，弯矩增幅逐渐加大，呈现出非线性增加的特点，荷载越大，卸载后残余的弯矩越大。在各级荷载作用下，桩身最大弯矩均发生在桩顶以下8.0 m左右。桩顶以下0~4.0 m范围内出现了负弯矩，下文其他方式加载时也是如此，呈现出与普通悬臂式抗滑桩不同的特点，笔者认为，其原因在于：①该工程抗滑桩设置在第2级马道处，为人工挖孔的施工安全，在桩顶以上构筑了厚重的钢筋混凝土挡土护墙，见图11和图4，挡土护墙重力及其与周围土体摩擦阻作用，相当有一偏心荷载在桩顶产生了一负的附加力矩；②桩顶处桩前土体的水平抗力不为零，即若按地基系数法进行计算，则表明桩顶地基系数不为零。这两方面原因致使桩顶的

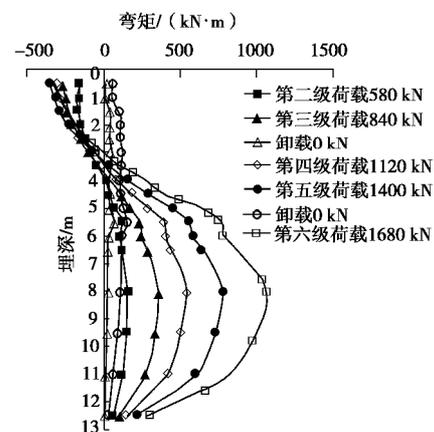


图10 三角形荷载作用下桩身弯矩

Fig. 10 Bending moments of pile under triangular loads

约束条件不同于悬臂式抗滑桩的自由状态, 弯矩的实测结果表明这种作用有利于减小桩身最大正弯矩。

第二组试验: 桩身施加矩形分布荷载。根据第一组试验情况, 以预留垫块换上被压坏的垫块后, 将最大荷载调整为 1680 kN, 荷载仍然分为十级, 从第二级荷载开始加载, 每次加两级荷载, 每加两次荷载卸载一次至零, 如此循环直至第十级荷载卸载至零。图 12 为桩身弯矩分布, 可见, 加卸载过程中桩身弯矩分布规律、最大弯矩位置与三角形分布荷载的基本一致。



图 11 对桩顶有一定约束作用的挡土护壁
Fig. 11 Retaining wall built surrounding pile top

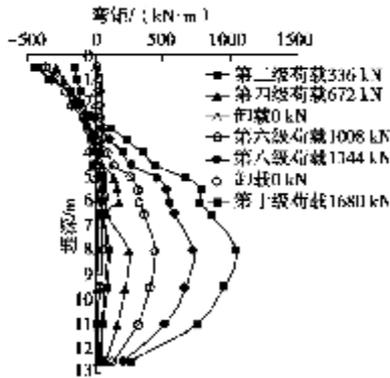


图 12 矩形荷载作用下桩身弯矩
Fig. 12 Bending moments of pile under rectangular loads

第三组试验: 桩身施加抛物线形分布荷载。考虑该分布形式下若仍以 1680 kN 为最大荷载, 则第 4 排千斤顶推力将超过垫块强度, 故将最大荷载下调至 1500 kN, 按十级加载计算, 从第四级荷载开始加载, 第二次加第八级荷载, 分三次卸载至零, 然后再加第十级荷载, 再卸载至零。图 13 为桩身弯矩分布图, 图中所示的加载过程中桩身弯矩的分布规律, 最大弯矩的位置与前面两组试验一致, 而卸载时桩身弯矩的分布略有不同。第八级荷载分三次卸载, 前两次卸载后弯矩减小的幅度比较小, 弯矩的分布规律与加载时一致, 到第三次卸载时弯矩则急剧减小, 其分布规律与第十级荷载卸载至零大致相同。

为便于不同分布荷载在桩身产生的弯矩大小比较, 以梯形分布最大一级荷载 1500 kN 按比例内插出

三角形和矩形分布荷载时的弯矩分布, 比较如图 14, 可见受荷范围以下桩身弯矩的互差不大, 这是由于分布荷载作用范围只有 3.5 m, 按矩形、抛物线形和三角形施加荷载时合力作用点分别为桩顶以下 1/2、3/5 和 2/3 的荷载分布范围上, 位置相差较小, 最大相差 0.583 m, 且试验所加荷载偏小的缘故。

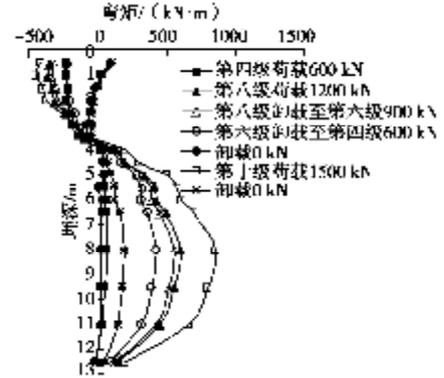


图 13 抛物线形荷载作用下桩身弯矩
Fig. 13 Bending moments of pile under parabolic loads

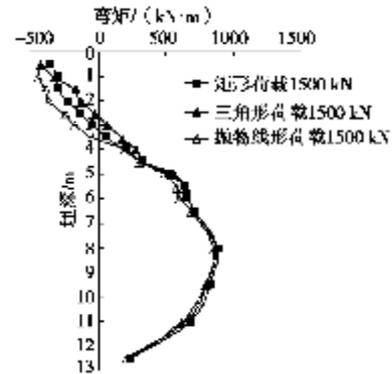


图 14 不同分布形式的等值荷载作用下桩身弯矩
Fig. 14 Bending moments of pile with equivalent loads under different distribution forms

3.2 桩身变形

相对试验桩设计水平承载力 (6000 kN) 或其实际承载力而言, 试验所加荷载量级和作用范围均显著偏小, 导致各组试验中百分表和测斜仪实测水平位移均很小, 如测斜仪读数最大值在 2~3 mm 内变化, 在试验加、卸载周期内受其灵敏度限制, 沿桩身全长分布的规律性较差。各组试验中倾角仪的读数变化也不明显。但从图 15 可以看出, 在千斤顶推力作用下桩身护



图 15 试验槽侧壁和桩身间产生的裂缝
Fig. 15 Crack between test pit wall and pile

壁和后侧试验槽侧壁之间产生了一条很明显的裂缝,说明在水平荷载作用下,桩身产生了一定的变形。

4 结论与建议

(1)对于设置在滑坡体某级平台上的全埋式抗滑桩,受桩顶以上挡土护墙的重力及其与周围岩土体的摩阻力以及桩顶处土抗力作用的影响,桩顶的约束条件不同于悬臂式抗滑桩,桩身最大正弯矩将减小。

(2)为大截面人工挖孔桩施工安全而构筑的钢筋混凝土护壁,因其厚度可能较大,如本工程抗滑桩护壁厚度为 0.375 m,且其常与后浇注的抗滑桩形成一个整体,相当于使抗滑桩的截面明显增大。但目前工程设计中没有考虑或忽视了护壁的作用,本文现场试验表明,试验实测最大正弯矩均比设计预估小一半以上,其原因与结论(1)和桩身护壁的积极作用有关。因而,如能在现行设计中考虑这些积极因素,将使抗滑桩的设计更为科学合理,而不致过于保守。

(3)试验桩在不同分布形式的水平荷载作用下,荷载作用范围以下弯矩的分布趋势是基本一致的,弯矩值随着荷载的增大而增大,荷载较小时,弯矩变化比较均匀,荷载较大时,弯矩的增幅逐渐加大。表明荷载较小时弯矩呈现线性增大的趋势,荷载较大时则呈现出非线性增大的趋势。

(4)由试验结果可知,当作用在抗滑桩上的滑坡推力较小,滑动面较浅时,因不同分布形式的合力作用点位置变化不大,使桩身锚固段弯矩的变化不大,因而在设计中对滑坡推力分布形式假定的不同,造成的差异不大,但已有的计算表明,当滑坡推力较大且滑动面较深时,则设计计算中对滑坡推力分布形式的假定的不同,桩身变形和内力计算结果将有较大差异,故对其分布形式的假定应尽可能与实际情况相符。

(5)本次试验由于没有严格跟踪控制混凝土垫块的施工质量,致使其抗压强度不够,在试验过程中多次出现被压碎的情况,以致不能完成预定的最大加载计划,使施加在试验桩上的最大水平荷载偏小,桩在相对较小的荷载作用下所产生的变形较小,增加了某些数据采集的精度和难度。这一点可作为以后类似试验研究的教训,应严格控制现场试验准备工作的各个环节,使试验研究更趋完善。

参考文献:

[1] 王恭先. 抗滑支挡建筑物的发展动向[C]// 滑坡文集编委会. 滑坡文集. 北京: 中国铁道出版社, 1998: 60 - 64. (WANG Gon-xian. Development trend of anti-slide structures[C]// The Editorial Board of Proc of landslide. Proc of Landslide.

Beijing: China Railway Publishing House, 1998: 60 - 64. (in Chinese))

- [2] 刘新荣, 梁宁慧, 黄金国, 等. 抗滑桩在边坡工程中的研究进展及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 56 - 62. (LIU Xin-rong, LIANG Ning-hui, HUANG Jing-guo, et al. Progress and applications of anti-slide piles in slope reinforcing projects[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1): 56 - 62. (in Chinese))
- [3] 沈强, 陈从新, 汪稔, 等. 边坡抗滑桩加固效果监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 934 - 938. (SHEN Qiang, CHEN Cong-xin, WANG Ren, et al. Monitoring and analysis of reinforcement effect on slope anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 934 - 938. (in Chinese))
- [4] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517 - 521. (DAI Zi-hang. Study on distribution laws of landslide thrust and resistance of sliding mass acting on anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 517 - 521. (in Chinese))
- [5] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis —— theory methods and programs[M]. Beijing: China Water Resource and Electric Power Press, 2003. (in Chinese))
- [6] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 传递系数法的模型试验验证[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 63 - 66. (HU Xiu-wen, TANG Hui-ming, LIU You-rong. Verification of transfer coefficient method applied to landslide stability analysis by physical model test[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 63 - 66. (in Chinese))
- [7] INGOLD T S. A field study of laterally loaded piles[J]. Proc 9th ICSMFE, 1977, 1: 101 - 106.
- [8] BIGOT G, BOURGES F, FRANK R. Action du displacement lateral du sol sur unpieu[J]. Proc 9th ICSMFE, 1977, 1: 407 - 410.
- [9] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983. (No 2 Survey & Design Institute, Ministry of Railways. Design and calculation of anti-slide pile[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983. (in Chinese))
- [10] DBJ08—11—89 地基基础设计规范[S]. 1989. (DBJ08—11—89 Code for design of building foundation[S]. 1989. (in Chinese))