

文章编号: 1000-7598 (2009) 08-2259-05

底端嵌固桩与滑体相互作用的物理模型试验研究

魏作安¹⁻³, 李世海², 赵颖²

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;
3. 湖南科技大学 湖南省煤矿安全开采技术重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 抗滑桩与滑坡体的相互作用是一个复杂系统。利用专门设计的安置有光纤和电测器件的物理模型试验装置, 通过改变抗滑桩的几何尺寸、布置间距以及滑体的滑移面角等有关参数, 研究抗滑桩与滑坡体之间的相互作用, 获得了在不同桩体几何尺寸、间距以及滑体滑移面角 β 等参数情况下抗滑桩的受力状况和滑体作用在抗滑桩上的滑坡推力函数 $q(H)$, 进一步揭示了抗滑桩与滑体之间的相互作用机制。

关键词: 岩土工程; 抗滑桩; 物理模型试验; 滑坡灾害防治

中图分类号: O 319.56 **文献标识码:** A

Model study of interaction mechanism between anti-sliding piles and landslide

WEI Zuo-an¹⁻³, LI Shi-hai², ZHAO Ying²

(1. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The interaction mechanism between anti-sliding piles and landslide mass is complex. In this paper, this interaction mechanism was investigated through physical model tests of anti-sliding piles and landslide mass, in which FBG sensors and common electric sensors were installed as measurement devices. Main parameters such as pile sizes, pile spaces and angle of sliding surface were investigated. Their relationship with the resistance force function was correlated. Some special landslide phenomena and pile bearing status were observed, and the interaction mechanism was understood.

Key words: geotechnical engineering; anti-sliding pile; physical model test; landslide disaster control

1 引言

目前, 在滑坡灾害防治中, 抗滑桩已成为一种主要的防治技术措施被广泛使用^[1-4]。由于抗滑桩的应用仅有 40 年的历史, 应用时间短; 同时, 滑坡体与抗滑桩是一个相互作用的复杂系统^[5], 对它们的作用机制的认识还很模糊, 一些关键的力学问题未解决, 且实际工程中凭经验确定抗滑桩的主要设计参数, 缺少科学的计算方法等。国内铁道部门在 20 世纪 70~80 年代对抗滑桩进行了一些现场测试与研究, 对抗滑桩的受力计算均采用 Winkler 的模型作为理论基础^[6]。国外, 一般把抗滑桩纳入到侧向受力桩的研究范畴^[7]。

为了对抗滑桩在滑坡防治中的作用机制进行更深入的研究与探讨, 国内外一些学者采用数值模

拟的方法对抗滑桩与土的相互作用以及抗滑桩的作用效果等进行了分析, 取得了一些成果^[8-10]。本文则利用物理模型试验的手段来研究抗滑桩与土的相互作用关系。物理模型试验是指在实验室条件下按照事物原型用不同比例(包括缩小、放大及等尺寸)的模型, 对工程问题或现象进行研究的一种重要的科学方法^[11]。为了保证试验测试数据的准确, 在模型试验中同时采用了 FBG 传感测试技术和电测测试技术进行测试。

2 物理模型试验

2.1 模型试验装置

如图 1 所示, 模型试验装置主要由两部分组成。

(1) 试验槽 它由钢板制成, 底板非常光滑, 长×宽×高分别为 163 cm×60 cm×25 cm, 由三部分组

收稿日期: 2007-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10772205); 重庆市自然科学基金(No. 2007BB0136); 西部资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室访问学者基金; 湖南省煤矿安全开采技术重点实验室开放基金(No. 200806)资助。

第一作者简介: 魏作安, 男, 1965 年生, 博士后, 副教授, 主要从事采矿工程、岩土力学和滑坡灾害防治等方面的研究与教学工作。

E-mail: weiza@cqu.edu.cn

成,如图 1 (a) 所示,前槽 (ABOD 部分)、后槽 (BCEO 部分) 和桩的紧固装置。试验时,前槽固定不动,后槽可以按照设定的速度和角度 (β 角,可近似认定为滑体的滑面角) 绕 O 点向上抬升,以模拟滑坡的形成及产生下滑力 (图 1 (b))。

(2) 抗滑桩的应变监测系统 由 2 套测试系统组成,即普通的电测系统 (电阻应变片, YE2538 程控静态应变仪) 和光纤光栅测试系统 (FBG, Si425 swept laser interrogator, USA) (图 1 (a))。

2.2 试验材料

抗滑桩的材料为有机玻璃板,厚度为 10 mm,宽度分为 10、15、20 mm 三种,长度为 30 cm (包括紧固段) (图 2 (a))。按照材料相似性准则,滑坡体的材料为常规建筑用、干燥的中细砂,内摩擦角为 $25^\circ \sim 27^\circ$,内聚力为 0。

2.3 模型试验

试验主要按照下列步骤进行:

(1) 先在抗滑桩上粘贴传感器,连接好输出导线 (见图 2 (a))。

(2) 按照设定的桩位尺寸 (2B 或 4B, B 为桩的宽度) 安装抗滑桩,并将其固定 (见图 2 (b))。

(3) 往试验槽内堆置砂土,达到设定高度 (图 2 (c))。为了确保每次试验时砂土的密度等参数相同,在堆置过程中,均采用同样经过筛选的砂土,按照自然状态堆置,且每次堆置的高度相同。

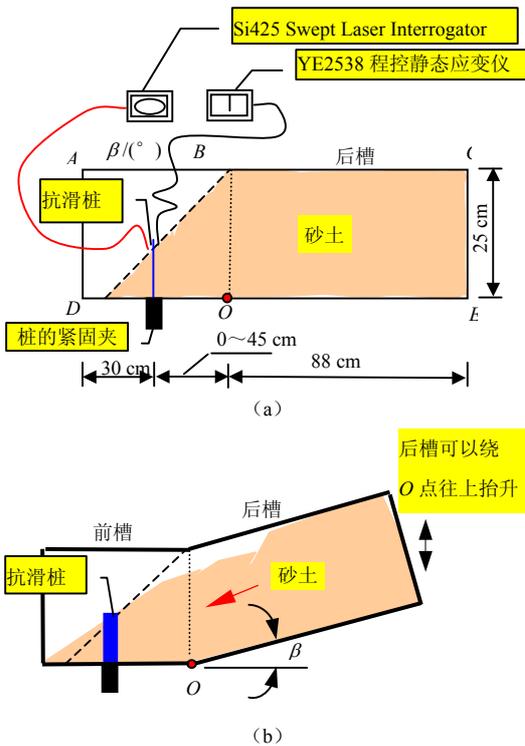


图 1 物理模型实验装置原理图
Fig.1 Physics model principle about anti-landslide pile action in landslide

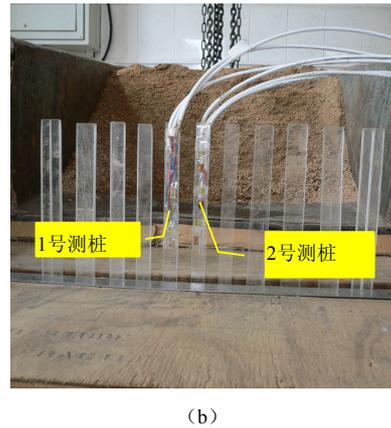
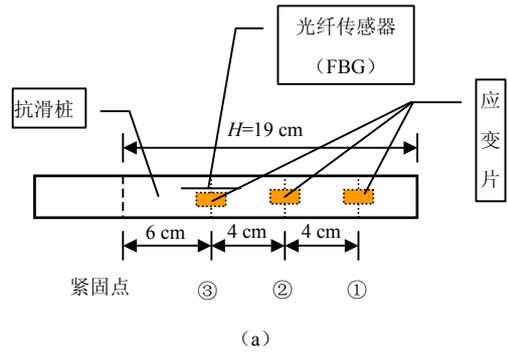


图 2 桩位安置及其 FBG 传感器和电阻应变片的布置图
Fig.2 FBG sensor and electricity sensors distribution on anti-sliding pile

(4) 加载模拟滑坡阶段,即 β 角按照每 5° 为一档,慢慢向上提升试验槽的后槽,直至边坡破坏,同时记录仪器的读数。

(5) 卸载阶段:边坡破坏后,后槽提升停止;之后,后槽 β 角仍然按 5° 一档往下降,同时记录仪器读数。

2.4 试验结果

模型试验中,按照事先设计的 4 大类 (3 种不同宽度的抗滑桩和无抗滑桩)、前 3 大类分 2 组 (两种不同的桩间距) 进行试验。这样,共计完成 7 组试验测试 (见表 1)。

在 7 组试验中,边坡发生破坏时后槽抬升角 β

的值见表 2。

同时，按虎克定理将试验测的应变值换算成应力值，即

$$\sigma(x) = E\varepsilon(x) \quad (1)$$

式中： σ 为应力 (MPa)； ε 为应变； E 为桩材料的弹性模量，取 3.205×10^3 /MPa。

表 1 试验种类
Table 1 Testing cases

桩类	桩的宽度 B /mm	桩间距 /mm	
		①组	②组
I	10	$2B$	$4B$
II	15	$2B$	$4B$
III	20	$2B$	$4B$
IV	0 (无桩)	0	

表 2 边坡破坏时后槽抬升角 β 值
Table 2 The back-slot uplifting angle β values while the slope sliding

桩类	抬升角 β / (°)		桩间距 /mm	
	①组	②组	①组	②组
I	30	25	$2B$	$4B$
II	25	20~25	$2B$	$4B$
III	25	20~25	$2B$	$4B$
IV	10~20		0	

换算后，FBG 传感器和电测（电阻应变片）传感器测试到抗滑桩相同点的应力值见图 3。

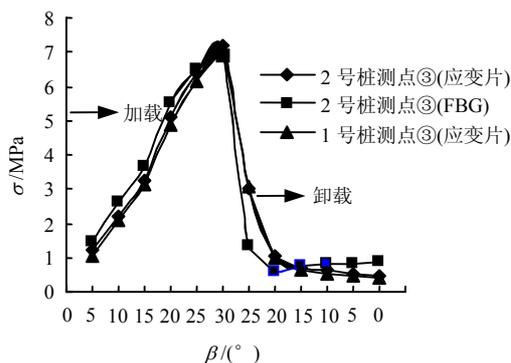


图 3 模型试验中两种传感器对桩身应力的测试结果
Fig.3 Two sensors test results of pile stresses at the model experiment

桩身各测点的应力值随着后槽抬升角 β 的增加或减小时的变化情况见图 4。

桩身应力随着后槽抬升角 β 增加时的变化情况见图 5，图中横坐标 H 为滑面以上桩的长度。通过对测试数据进行拟合，得出桩身应力分布曲线函数。

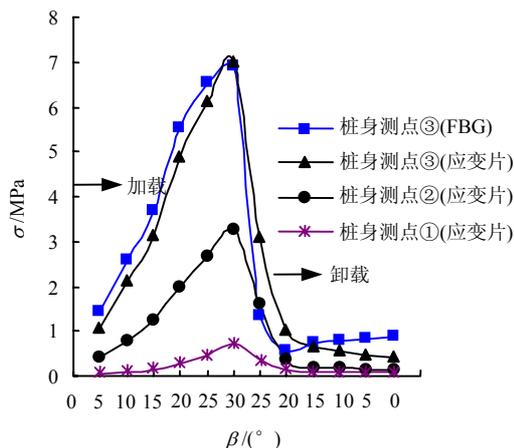


图 4 桩身测点的应力分布与后槽抬升角 β 的关系实测曲线
Fig.4 The relation curve between the back-slot uplifting angle β and stress of pile

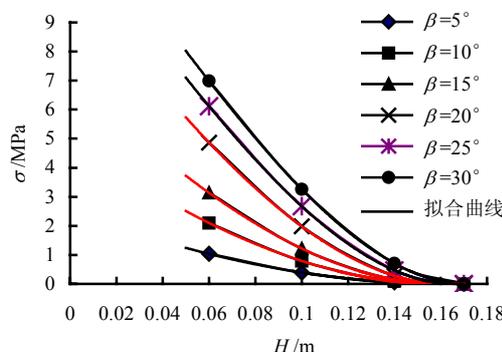


图 5 桩身测点的应力实测与拟合分布曲线
Fig.5 Distribution curve about the stress of pile through testing

当 $\beta = 30^\circ, 25^\circ, 20^\circ, 15^\circ, 10^\circ, 5^\circ$ 时，所得到的应力分布曲线函数为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 1847.3H^3 - 186.76H^2 - 99.446H + 13.227, \beta = 30^\circ \\ \sigma &= 1586.2H^3 - 88.165H^2 - 103.05H + 12.274, \beta = 25^\circ \\ \sigma &= 922.15H^3 + 93.325H^2 - 105.08H + 10.636, \beta = 20^\circ \\ \sigma &= 469.49H^3 + 121.5H^2 - 76.501H + 7.187, \beta = 15^\circ \\ \sigma &= 228.22H^3 + 118.35H^2 - 56.061H + 4.989, \beta = 10^\circ \\ \sigma &= 12.081H^3 + 90.345H^2 - 30.727H + 2.553, \beta = 5^\circ \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将上面式 (2) 中的系数转化为 β 角的函数，即为

$$\sigma = f_1(\beta)H^3 + f_2(\beta)H^2 + f_3(\beta)H + f_4(\beta) \quad (3)$$

通过拟合求出函数 $f_1(\beta)$ 、 $f_2(\beta)$ 、 $f_3(\beta)$ 和 $f_4(\beta)$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} f_1(\beta) &= -0.0267\beta^4 + 1.7095\beta^3 - 34.817\beta^2 + \\ & 318.4\beta - 908.18 \\ f_2(\beta) &= 0.0081\beta^4 - 0.5535\beta^3 + 11.84\beta^2 - \\ & 92.571\beta + 323.2 \\ f_3(\beta) &= -2.9322\beta - 27.163 \\ f_4(\beta) &= 0.4496\beta + 0.6104 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

把式(4)代入式(3)中, 得到:

$$\sigma = f(H, \beta) \quad (5)$$

式(5)即为桩身应力沿桩长的分布函数。

如图6所示, 梁纯弯曲时, 其横截面上任一点处的正应力与弯矩的计算公式为

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \quad (6)$$

变换为

$$M(x) = \frac{\sigma(x)I_z}{y} \quad (7)$$

式中: M 为横截面上的弯矩; y 为所求应力点到中性轴 z 的距离; I_z 为横截面对中性轴 z 的惯性矩。即

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

式中: b 为抗滑桩横截面的宽度; h 为抗滑桩横截面的厚度。

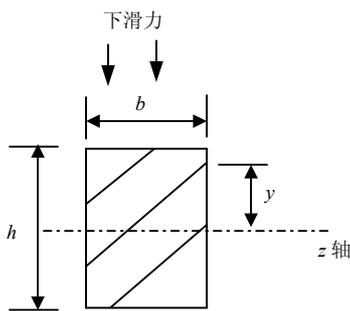


图6 抗滑桩的截面图
Fig.6 The section size of pile

将桩的几何尺寸代入式(7)弯矩计算公式, 得出:

$$M(x) = \sigma(x) \frac{I_z}{y} = \sigma(x) \times 10^{-6} / 6 \quad (9)$$

再把式(5)代入式(9), 得出桩截面上的弯矩函数:

$$M(H) = f(H, \beta) \times 10^{-6} / 6 \quad (10)$$

由弯矩 $M(x)$ 求两次导数得到外力分布函数 $q(x)$, 即

$$q(x) = M''(x) \quad (11)$$

式(11)求两次导数得到外力分布函数 $q(H)$ 为

$$q(H) = [6f_1(\beta)H + 2f_2(\beta)] \times 10^{-6} / 6 \quad (12)$$

将函数 $f_1(\beta)$ 和 $f_2(\beta)$ 代入式(12), 并进行单位换算得

$$\begin{aligned} q(H) = f_1(\beta)H + f_2(\beta) / 3 = & (-0.0267\beta^4 + 1.7095\beta^3 - \\ & 34.817\beta^2 + 318.4\beta - 908.18)H + 0.0027\beta^4 - \\ & 0.1845\beta^3 + 3.947\beta^2 - 30.857\beta + 107.73 \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)即为滑体作用在抗滑桩上的滑坡推力。

与常规的计算方法相比, 在式(13)中多了滑移面的倾角, 考虑滑体的因素要多一项。

2.5 试验结果分析

(1) 如表2, 桩的几何尺寸(主要是桩宽度 B) 相同, 桩的间距越大, 则边坡破坏时的后槽抬升角 β 值越小, 即成反比; 桩间距的绝对值越大, 则边坡破坏时的后槽抬升角 β 值越小, 即成反比, 但敏感性较差。桩的宽度 B 与后槽抬升角 β 也成反比, 但敏感性差。

(2) 无论是加载(后槽抬升角 β 增加), 还是卸载(后槽抬升角 β 减小), FBG传感器和电测(电阻应变片)传感器的测试结果基本一致(图3)。

(3) 加载阶段, 即后槽抬升角 β 增加, 抗滑桩的受力也会随着增加, 两者基本成正比关系; 卸载阶段, 即后槽抬升角 β 减小, 抗滑桩的受力比较复杂, 主要分两个阶段。开始卸载时, 抗滑桩的受力随着后槽抬升角 β 的减小而迅速减小(曲线降幅很陡)。当 β 角减小到达一定值后, 桩的受力基本与 β 角的变化无关, 受力处于一个恒稳状态(图4)。

(4) 从图4中的加载过程可以看出, 抗滑桩的受力与整个坡体的下滑力有关。抗滑桩不仅受到桩身周边土体土压力的直接作用, 而且会受到桩后远距离非稳定、下滑土体传递的下滑推力的间接作用。

(5) 如图5及式(12), 桩身各点应力值沿埋深方向上的变化与滑面以上桩长 H 不仅成非线性关系, 而且与后槽抬升角 β 的成线性关系, 即随着后槽抬升角 β 的增加(由 $0^\circ \rightarrow 30^\circ$), 桩身的埋深越大 (H 值越小) 处的应力值增加越大。

(6) 从式 (13) 可以判断, 滑体作用于抗滑桩上的力基本为复合函数形式, 即外力分布函数为与滑面以上桩长 H 呈线性函数关系, 还与抬升角 β 呈非线性关系。如图 7 所示, 假定 β 角为滑面角, 则滑体作用于抗滑桩上的力与滑面角呈非线性关系。

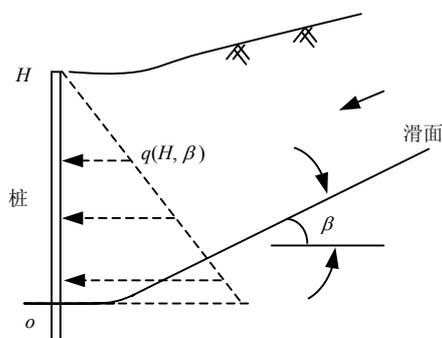


图 7 抗滑桩受力分析图
Fig.7 The pile bearing force

3 结 论

从上述试验结果可以得出下列结论:

(1) 在诸多影响因素中, 桩间距对抗滑桩治理滑坡的效果影响最大。在实际工程中应慎重考虑, 正确确定桩间距。

(2) 抗滑桩的受力与整个坡体的下滑状态有关。抗滑桩不仅受到桩后土体土压力的直接作用, 而且会受到桩后远距离非稳定、下滑土体传递的下滑推力的间接作用。

(3) 滑体作用于抗滑桩上的力基本为复合函数形式, 即外力分布函数为与滑面以上桩长呈线性函数关系, 还与滑面角呈非线性关系。

由于抗滑桩已成为当今滑坡防治中的一种主要措施, 被许多滑坡治理工程所应用, 而抗滑桩与滑体之间的相互作用力又非常复杂, 还有许多问题亟待探讨与解决。本文利用模型试验手段对底端嵌固的抗滑桩的受力等情况进行了研究, 得到了一系列结果 (限于篇幅, 文中仅列举了部分结果), 对底端嵌固的抗滑桩与滑体之间的相互作用关系进行了探讨。

参 考 文 献

[1] 铁道科学研究院西北研究所. 滑坡防治[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1980.
[2] HARRY G POULOS. Design of reinforcing piles to increase slope stability[J]. **Canadian Geotechnical**

Journal, 1995, 32(5): 800—818.
[3] ADACHI T, KIMURA M, TADA S. Analysis on the preventative mechanisms of landslide stabilizing piles[C]//Proc. 3rd International Symposium on Numerical Models in Geomechanics (NUMOG III). London: Elsevier Applied Science, 1989.
[4] WEI ZUOAN, LI SHIHAI, WANG J G, et al. A dynamic comprehensive method for landslides control[J]. **Engineering Geology**, 2006, 84: 1—11.
[5] 张友良, 冯夏庭, 范建海, 等. 抗滑桩与滑坡体相互作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 839—842.
ZHANG You-liang, FENG Xia-ting, FAN Jian-hai, et al. Study on the interaction between landslide and passive piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 839—842.
[6] 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.
[7] SANGSEOM JEONG, BYUNGCHUL KIM, JINOH WON, et al. Uncoupled analysis of stabilizing piles in weathered slopes[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30: 671—682.
[8] 李荣建, 于玉贞, 李广信. 抗滑桩加固非饱和土边坡三维稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 968—972.
LI Rong-jian, YU Yu-zhen, LI Guang-xin. 3D global stability analysis of unsaturated soil slope reinforced with piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 968—972.
[9] 年廷凯, 栾茂田, 郑德凤, 等. 考虑边坡内孔隙水压力效应的抗滑桩简化分析方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1067—1071.
NIAN Ting-kai, LUAN Mao-tian, ZHENG De-feng, et al. Simplified analytical procedure of stabilizing piles against sliding considering pore water pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 1067—1071.
[10] CHIEN YUAN CHEN. Numerical analysis of slope stabilization concepts piles[D]. Los Angeles: University of Southern California, 2001.
[11] 雷阿林, 唐克丽. 土壤侵蚀模型试验的原型选定问题[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 60—65.
LEI A-lin, TANG Ke-li. Discussion on choosing prototypes in simulated test of soil erosion[J]. **Journal of Soil and Water Conservation**, 1995, 9(3): 60—65.