

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.006

## h型抗滑桩抗滑机制模型试验研究

刘新荣<sup>1</sup>, 欧明喜<sup>1,3</sup>, 郑颖人<sup>2</sup>, 张永兴<sup>1</sup>, 周 杨<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 401311; 3. 昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650500)

**摘要:**为了探讨h型抗滑桩加固滑坡体的作用机制,利用专门设计的物理模型试验装置,在室内进行了不同锚固深度、不同前后桩间距的抗滑桩模型试验。试验结果可以看出:粘聚力较大地层中h型抗滑桩前桩前侧抗力和后侧推力呈三角形分布,后桩的前侧抗力呈矩形分布,对于后桩的后侧推力试验中有抛物线、重心偏上的抛物线、矩形3种分布形式。由此可知,在确定粘聚力较大地层中h型抗滑桩结构计算图式时,前桩前侧抗力和后侧推力都可以按三角形分布计算,后桩前侧抗力按矩形分布计算,后桩后侧推力分布不仅要考虑滑体力学性质,还应根据抗滑桩锚固深度及前后桩间距具体分析。

**关键词:**h型抗滑桩;模型试验;抗力分布;推力分布;锚固

**中图分类号:**TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0033-05

## Model Investigation of Sliding Resistance Mechanism for h-type Anti-slide Pile

Liu Xinrong<sup>1</sup>, Ou Mingxi<sup>1</sup>, Zheng Yingren<sup>2</sup>, Zhang Yongxing<sup>1</sup>, Zhou Yang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Department of Architecture & Civil Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, P. R. China;

3. College of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China)

**Abstract:**In order to improve the understanding of the mechanism of h-type anti-slide pile to reinforce the slope, this type of anti-slide pile with different anchorage depth and distance between fore pile and back pile was investigated through model test by specially designed experimental apparatus. The test results indicate that the distribution of resistance and thrust acting on fore pile is triangular, and the resistance acting on back pile is rectangular. For the landslide thrust acting on back pile, there are three types of distribution: parabolic, parabolic with upper center of gravity and rectangular. Therefore, when the calculation pattern for the part of h-type pile above the potential slip surface is defined, the distribution of resistance and thrust acting on fore pile can be fixed as triangular, and the resistance acting on back pile can be fixed as rectangular. Whilst the distribution of landslide thrust acting on back pile should consider the influence of property of soil, anchorage depth and the distance between fore pile and back pile. Some conclusions drawn from this test can provide useful reference for the design of h-type anti-slide pile.

**Key words:**h-type anti-slide pile; model test; distribution of resistance; distribution of thrust; anchorages

收稿日期:2012-06-23

基金项目:国家自然科学基金创新群体基金(50921063);2010年度教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1045);国家留学回国人员科研启动基金重点项目(教外司留[2002]247号)

作者简介:刘新荣(1969-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程研究,(E-mail)liuxrong@cqu.edu.cn.

采用抗滑桩(亦称锚固桩)治理滑坡,中国于 20 世纪 50 年代开始使用,国外始于 20 世纪 30 年代。抗滑桩是利用桩与周围岩土体的共同作用把滑坡推力传递到稳定地层,即利用稳定地层的锚固作用和被动抗力来平衡滑坡推力,抗滑桩在一定程度上改善了滑坡状态,使滑坡向稳定转化<sup>[1]</sup>。h 型排架抗滑桩自 1983 年在川黔线路堤滑坡治理中成功应用以来,在中国得到了广泛的应用。由于其前后排桩之间有横梁将其连接成整体,故其刚度较大,能够提供较大的抗力。

关于双排桩的研究相对较多,而关于 h 型抗滑桩的报道较少。Wang 等<sup>[2]</sup>对双排桩在基坑工程中应用的空间效应进行了三维模拟分析,通过变换计算参数,计算得出一些可供参考的结论。郑刚等<sup>[3]</sup>提出了考虑桩土相互作用的平面杆系有限元双排桩分析模型,在计算中取得了满意的计算结果。周翠英等<sup>[4]</sup>将前、后排桩及中间连系梁和桩间土视为一个整体;前排桩和后排桩受到的地基土的抗力简化为弹性支承,提出了桩间土对前排桩和后排桩的作用模式和作用力计算分析模型。杨波等<sup>[5]</sup>采用强度折减的有限元法,讨论了双排桩在 3 种不同类型滑坡中桩前抗力、桩后推力、实际承担推力等的变化规律。Zhang 等<sup>[6]</sup>采用有限元方法对双排桩的复合土拱进行了探讨,分析了桩体的变形和内力,并对双排桩的优化设计提出了建议。吕美君等<sup>[7]</sup>从理论上分析了双排桩的结构和受力特点,探讨了不同分布形式的滑坡推力在两排桩上的分配问题。Xiao<sup>[8]</sup>对无连接双排桩和门架式双排桩进行了对比分析,认为应用门架式双排桩更为经济,并对门架式双排桩合理间距进行了研究。肖世国<sup>[9]</sup>认为可以将 h 型抗滑桩以滑面为界分为上下两个部分进行计算分析,并分别提出了上半部分及下半部分的计算理论。赵海玲<sup>[10]</sup>、张泽坤<sup>[11]</sup>采用有限元方法对 h 型抗滑桩进行了数值分析研究,得出了一些有益的结论。

以上针对双排抗滑桩的研究对认识双排抗滑桩的抗滑机制具有很好的指导作用,但是用于治理滑坡的 h 型抗滑桩在作用机制上不同于双排门架式抗滑桩,因此不能直接套用双排门架式抗滑桩的理论体系。已有的针对 h 型抗滑桩的研究,只是对其结构计算进行了初步的探讨,或者是对某个具体的工程进行数值分析。目前尚没有 h 型抗滑桩系列模型试验的报道,笔者将进行不同锚固深度、不同前后桩间距的 h 型抗滑桩模型试验来研究其抗滑机制。

## 1 物理模型试验

文献[12]认为尽管各国计算滑坡推力大小及桩前抗力大小的方法不尽相同,但是结果却相差不大,而在滑坡推力及桩前抗力的分布形式上却有很大的分歧。然而抗滑桩的设计合理性在很大程度上取决于对滑坡推力及抗力分布形式的正确认识。对于滑面以下部分,文献[9]认为可以按照弹性地层中的弹性桩进行结构计算,计算过程可以参见文献[13-14]。笔者试验的主要目的就是确定 h 型抗滑桩滑面以上部分前桩、后桩的受力情况。

### 1.1 模型试验装置

模型试验装置如图 1 所示,主要由模型试验箱、加载系统、数据采集系统组成。



图 1 试验装置整体图

1)模型试验箱:采用角钢焊接作为骨架,由底板和四周的侧板组成。为加强其刚度,在箱体中部加设 2 道角钢。尺寸为 0.9 m×1.0 m×0.4 m。

2)加载系统:由垫块、杠杆、加载框、标准试块组成,试验之前需要进行称重。

3)数据采集系统:土压力盒采用应变式微型土压力盒,由丹东前阳工程测试仪器厂生产,量程 0~10 kPa,满量程精度±0.1%。通过 DH3816 数据采集仪采集数据信号,然后在 PC 机上读取相关数据。

### 1.2 模型试验材料

1)滑体:材料取自某滑坡体,其自然状态物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 自然状态土体物理力学参数

含水率/ %	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ MPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
16.3	1 887.76	6.0	0.3	48.6	19.8

2)滑床:采用击实状态的滑体土体,其物理力学性质指标如表 2 所示。

表 2 击实状态土体物理力学参数

含水率/ %	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
12.6	2 026.53	8.0	0.25	57.5	23.5

3)模型桩:抗滑桩采用 25 mm×25 mm 空心不锈钢管焊接而成,正立面如图 2 所示,7 组试验所用桩模型各部分尺寸如表 3 所示,试验设计坡,角为 45°,变换连系梁长度同时改变冒出长度,使前后桩顶都能置于坡面。

4)滑面:采用双层薄膜纸模拟滑面。

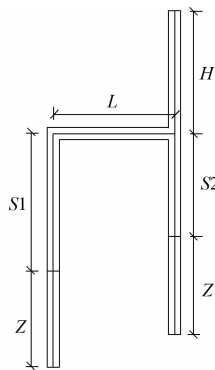


图 2 h 型抗滑桩示意图

表 3 模型桩尺寸 mm

	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	试验 6	试验 7
$L=H$	250	250	250	250	200	150	100
S1	256	256	256	256	290	329	366
S2	189	189	189	189	239	289	339
Z	88	132	176	220	220	220	220

1.3 模型试验步骤

模型试验正立面示意图如图 3 所示,按以下主要步骤进行试验:

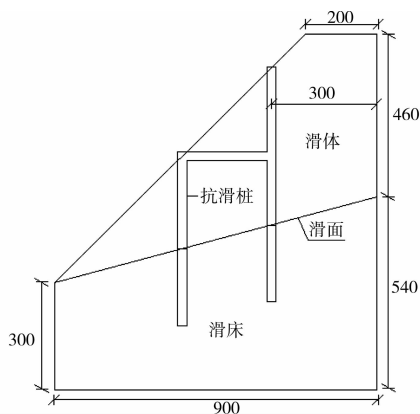


图 3 h 型抗滑桩布置图

1)根据滑床部分土体含水率需要,首先计算出

滑床部分需要的自然状态土体重量,然后进行晾晒,当土体达到最优含水率 12.6%时,分层压实成图示滑床形状。

2)在滑床上铺设双层薄膜纸模拟滑面,为消除模型箱两侧的摩擦阻力,在模型箱两侧同样粘贴双层光滑薄膜纸。

3)在桩体上标记锚固线位置及压力盒布设位置,土压力盒布置位置如图 4 所示。定位后排桩(伸出横梁),然后将桩体压入至设计深度。

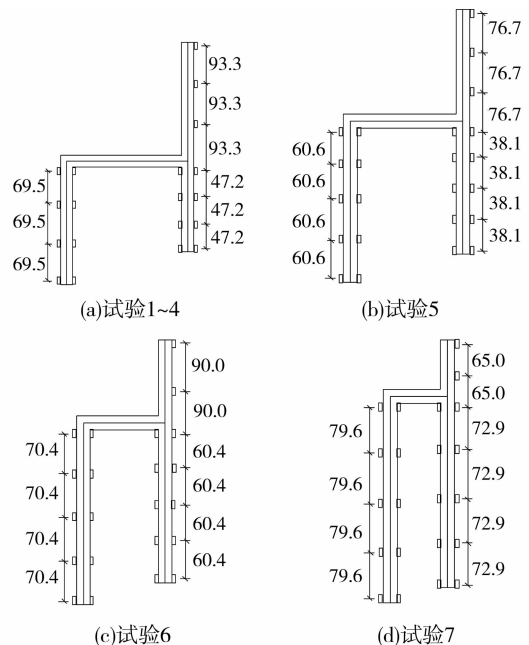


图 4 土压力盒的布置位置

4)分层压实滑体土,为保证土体的均匀性,将每 10 cm 高度作为一个分层,倒入相应质量的土体,然后压实至预先标记的高度线处,同时在标记土压力盒位置安装土压力盒,然后将其切成如图所示的坡面形状。

5)静置 2 d,让土体内部应力自动调整平衡,连接土压力盒与应变仪及电脑,进行数据初始平衡。如图 1 所示,在模型顶部平台上安装事先称重的垫块,然后依次安装杠杆、加载框、标准试块,经计算所加荷载为 18.09 kPa。

6)开始采集数据,监测其中某个点的土压力变化情况,当其量测值趋于稳定时结束试验。

1.4 试验数据整理

试验共进行 7 组,试验 1~4 主要体现在锚固深度从 88 mm 增加到 220 mm,试验 4~7 锚固深度相同,前后桩间距从 250 mm 减小到 100 mm。限于篇幅,只列出部分具有代表性的试验结果,见图 5~11,图中负号表示桩后侧推力。

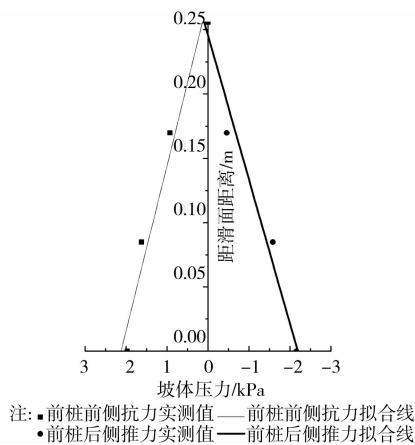


图 5 试验 1 前桩试验结果

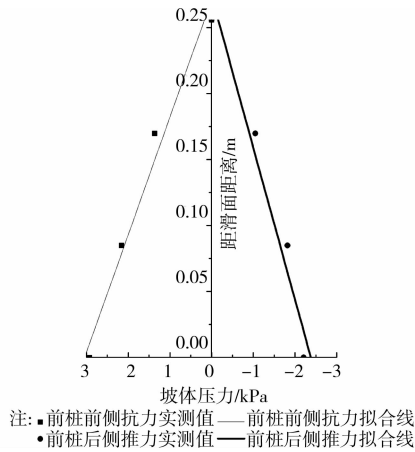


图 6 试验 4 前桩试验结果

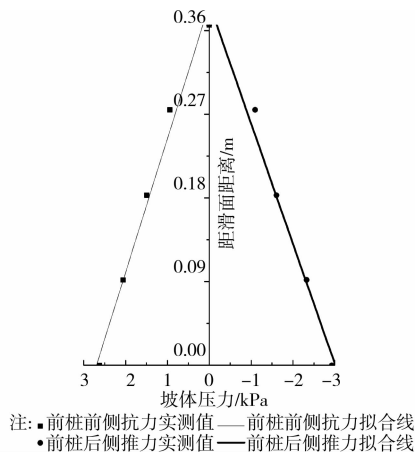


图 7 试验 7 前桩试验结果

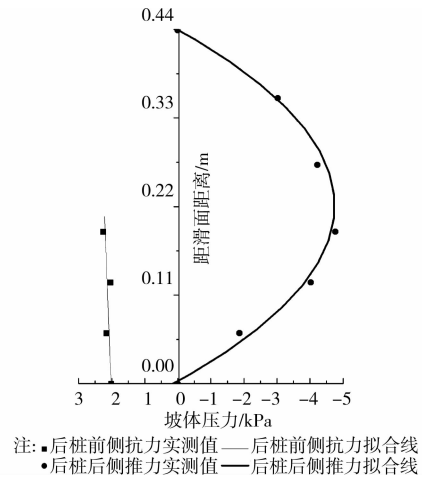


图 8 试验 1 后桩试验结果

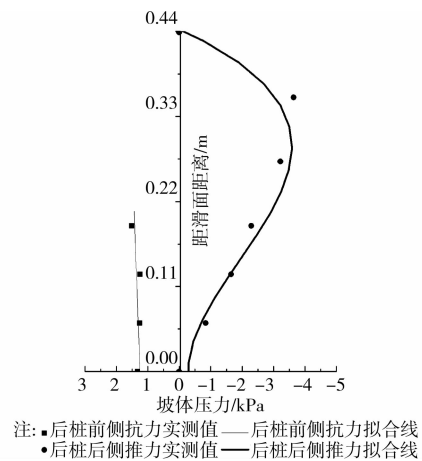


图 9 试验 4 后桩试验结果

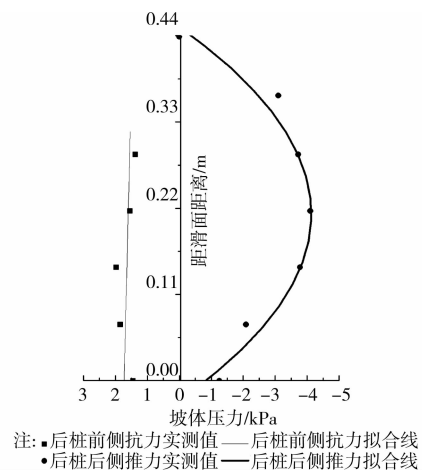


图 10 试验 6 后桩试验结果

## 2 试验结果分析

图 5、6、7 分别为试验 1、4、7 的前桩所受坡体压力试验结果,图中直线为试验实测值的线性拟合线,从图中可以看出拟合线与实测结果具有很好的相关性。根据 h 型抗滑桩的作用机制认为由于结构向前

变形挤压桩前坡体,坡体会对前桩产生被动抗力,前桩后侧所受坡体推力应为静止土压力与后桩通过桩间岩土体传递到前桩的弹性压力之和。分析以上 3 组试验结果及其他组试验结果可以看出,h 型抗滑桩前桩的前侧抗力和后侧推力分布不受其锚固深度

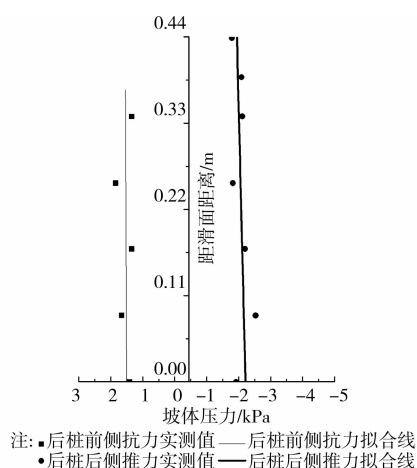


图 11 试验 7 后桩试验结果

和前后桩间距的影响,都可以按三角形分布来考虑。

图 8、9、10、11 分别为试验 1、4、6、7 的后桩所受坡体压力试验结果,前侧抗力线性拟合和后侧推力曲线拟合情况如图中所示,从图中可以看出拟合线与实测结果具有很好的相关性。分析以上 4 组试验结果及其他组试验结果可以看出,h 型抗滑桩后桩的前侧抗力在考虑简化计算和误差允许的情况下可近似为矩形分布。

在前 4 组试验中,后桩后侧推力呈抛物线分布,但是随着锚固深度的增加,抗滑桩抵抗侧向变形的能力不断增强,滑坡推力的合力作用点逐渐上移。当锚固深度不变,前后桩间距逐渐减小时,抗滑桩抵抗侧向变形能力逐渐减弱,后侧推力分布从重心偏上的抛物线分布逐渐过渡到抛物线分布,最后趋于矩形分布。当前后桩间距逐渐减小相当于从双排抗滑桩逐步向单排抗滑桩转换,滑坡推力的分布应该逐渐接近单桩的滑坡推力分布,而文献[1]中建议的当滑体是一种粘聚力较大的土层时,单桩滑坡推力分布图式可近似按矩形考虑,试验结果刚好与此相吻合,这也说明了笔者试验的可靠性。综合上述分析可以得出,粘性土中 h 型抗滑桩的滑坡推力分布不仅与滑体性质有关,还跟抗滑桩的锚固深度及前后桩间距有关。可以认为随着抗滑桩抵抗侧向变形能力的不断减弱,滑坡推力分布形式依次为:重心偏上的抛物线分布、抛物线分布、矩形分布。

### 3 结 论

1) 作用于 h 型抗滑桩的主要荷载滑坡推力不能简单的认为其在粘性土中为矩形分布、砂性土中为三角形分布、介于两者之间的为梯形分布。从试验结果可以看出,滑坡推力的分布形式还与抗滑桩的锚固深度和前后桩间距有关。

2) 粘性土中的 h 型抗滑桩,前桩前侧抗力和后侧推力都可以按三角形分布进行计算,后桩的前侧抗力可以近似为矩形分布。对于滑坡推力的分布形式必须考虑抗滑桩锚固深度和前后桩间距的影响,可以认为随着抗滑桩抵抗侧向变形能力的不断减弱,滑坡推力从重心偏上的抛物线分布逐渐向抛物线分布过渡,最后趋向于矩形分布。

3) h 型抗滑桩作为一种具有较大侧向刚度的结构形式,其比单桩能够承担更大的滑坡推力。虽然在工程中已有大量应用,但是理论研究工作却远远跟不上实践需求。笔者的模型试验研究虽然得出了一些有益的结论,但没有充分考虑模型的相似问题,很多问题尚需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wang Z H, Zhou J. Three-dimensional numerical simulation and earth pressure analysis on double-row piles with consideration of spatial effects [J]. Journal of Zhejiang University-science A: Applied Physics & Engineering, 2011, 12(10): 758-770.
- [3] 郑刚, 李欣, 刘畅, 等. 考虑桩土相互作用的双排桩分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 99-106. Zheng G, Li X, Liu C, et al. Analysis of double-row piles in consideration of the pile-soil interaction [J]. Journal of Building Structure, 2004, 25(1): 99-106.
- [4] 周翠英, 刘祚秋, 尚伟, 等. 门架式双排抗滑桩设计计算新模式[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 441-449. Zhou C Y, Liu Z Q, Shang W, et al. A new model for calculation of portal double row anti-sliding piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 441-449.
- [5] 杨波, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(Sup1): 237-244. Yang B, Zheng Y R, Zhao S Y, et al. Two-row anti-slide piles in three kinds of typical landslide computations and stress rule analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1): 237-244.
- [6] Zhang J W, Guo Y C, Xue Q, et al. Optimization design of double-row piles composite gravity arch supporting system [C]//Proceedings of the 2011 GeoHunan International Conference-Slope Stability and Earth Retaining Walls, Reston: ASCE, 2011.
- [7] 吕美君, 晏鄂川. 埋入式双排抗滑桩滑坡推力分配研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(Sup1): 4866-4871.

- Buildings, 2003, 35:605-17.
- [13] Linden B D. Optimization of solar district heating systems: seasonal storage, heat pumps, and cogeneration [J]. Energy, 2000, 25:591-608.
- [14] AlZyood M, Harahsheh H. Thermal economical analysis of renewable energy buildings towards low energy house in Jordan [C]//International Renewable Energy congress, Sousse, Tunisia, November, 2010.
- [15] Neymark J. Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs [J]. Energy and Buildings, 2002, 34:917-31.
- [16] ANSI/ASHRAE, Standard 140-2001, Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. R. American Society of Heating, and Air-Conditioning and Engineers, editors [S]. ASHRAE, Atlanta, GA; 2001.
- [17] Viorel B. Case study for active solar space heating and domestic hot water preparation in a passive house [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2011, 3: 50-55.
- [18] Zogou O, Stamatelos A. Optimization of thermal performance of a building with ground [J]. Energy Convers Manage, 2007, (7):12.
- [19] Viktoria M, Fredrik S. Compact heat storage for solar heating systems [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2009, 131:

(编辑 胡玲)

(上接第37页)

- Lyu M J, Yan E C. Study on distribution laws of landslide-thrust in double-row embedded anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup1): 4866-4871.
- [8] Xiao S G. Comparison of the mechanical characteristics of double-row piles and door-type piles with medium and small row spacing in a large-scale landslide [C]// Proceedings of the 2010 International Conference of Logistics Engineering and Management, Reston: ASCE, 2010.
- [9] 肖世国. 边(滑)坡治理中 h 型组合抗滑桩的分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2146-2151.  
Xiao S G. Analytical method for h-type combined anti-slide pile retaining landslide or excavated slope and its application to practical projects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2146-2151.
- [10] 赵海玲. h 形抗滑桩变形性状的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [11] 张泽坤. h 型抗滑桩的有限元分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [12] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517-521.  
Dai Z H. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislide piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 517-521.
- [13] Hassiotis S, Chameau J L, Gunaratne M. Design methods for stabilization of slopes with piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4): 341-323.
- [14] Ito T, Matsui T, Hong W P. Design method for stabilizing piles against landslide-one row of piles[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 21-37.

(编辑 胡英奎)