

双排抗滑桩桩顶连接方式的优化设计

申永江^{1, 2}, 孙红月¹, 尚岳全¹, 王迎超¹, 严克伍³

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 3. 核工业井巷建设公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 采用有限元程序 ANSYS 建立双排抗滑桩有限元模型, 分析桩顶连接方式对抗滑桩的侧向位移分布和内力分布的影响, 找出最优的桩顶连接方式。桩顶的连接方式可分为无连接、同排相连、前后排相连和全连接等 4 种方式。通过对比这 4 种桩顶连接方式可知, 前后排相连和全连接均可以使双排抗滑桩的变形相协调, 弯矩和剪力分布更加的合理, 能更好地发挥前后 2 排桩的抗滑效果, 但是全连接增加抗滑桩的成本。选取同排相连和前后排相连 2 个工程实例, 监测分析发现, 同排相连时前排桩的侧向位移和弯矩均远小于后排桩, 前后排相连时前后 2 排桩的位移和弯矩比较接近, 这与有限元分析结果相吻合。在双排抗滑桩的设计中, 建议采用前后排相连的桩顶连接方式。

关键词: 桩基工程; 双排抗滑桩; 桩顶连接方式; 滑坡; 监测

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 3034 - 05

OPTIMIZATION DESIGN OF CONNECTION METHODS OF DOUBLE-ROW ANTI-SLIDE PILES TIP

SHEN Yongjiang^{1, 2}, SUN Hongyue¹, SHANG Yuequan¹, WANG Yingchao¹, YAN Kewu³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

3. Nuclear Industrial Well and Tunnel Construction Company, Huzhou, Zhejiang 313000, China)

Abstract: Based on the finite element program ANSYS, a finite element model with double-row anti-slide piles was established. The piles tip connection methods for the lateral displacement are analyzed, including bending moment and shear stress of piles, and the optimal piles tip connection. Piles tip connection methods include no connection, the row connection, the front-and-back rows connection and all connection. Compared with the four methods, it can be seen that the front-and-back rows connection is optimal. Using the front-and-back rows connection and all connection methods, the double-row piles have better anti-slide effect. But using the all connection, the cost of anti-slide piles will increase. Two engineering examples which are respectively the row connection and the front-and-back rows connection, are simulated. Through monitoring and analysis of the stresses and displacements of the piles, it is found that the results are consistent with that of finite element analysis. So the front-and-back rows connection of piles tip joint in the design can be suggested.

Key words: pile foundations; double-row anti-slide piles; pile-tip connection method; landslide; monitoring

1 引言

抗滑桩是加固滑坡的主要手段。在大型滑坡治理中, 由于桩间距和滑坡体宽度的限制, 单排抗滑

桩有时无法满足抗滑力的要求, 而又不便把多排抗滑桩分别布置到滑坡体的不同部位, 所以有些滑坡治理工程中就采用了双排抗滑桩^[1~3]。目前双排抗滑桩的设计施工中, 桩顶连接方式没有统一的标准, 各设计单位只能根据工程经验来确定。

收稿日期: 2009 - 01 - 07; **修回日期:** 2009 - 05 - 04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672185); 浙江省重大科技专项社会发展重点项目(2006C13027)

作者简介: 申永江(1979 -), 男, 2004年毕业于中国地质大学(武汉)土木工程专业, 现为讲师, 主要从事地质灾害的防治与治理方面的研究工作。
E-mail: shyj79@163.com

在深基坑双排桩支护结构研究方面, 对桩顶为前后排相连的双排桩进行了研究^[4~6], 并对带圈梁^[7]和带撑^[8]双排桩进行了研究。而对大型滑坡中双排桩应用研究, 大多是针对某特定双排桩问题^[9~11]。如周翠英等^[12]对门架式双排抗滑桩的设计计算方法进行了研究, 吕美君和晏鄂川^[13]运用结构力学方法对门架式双排桩中滑坡推力在前后排抗滑桩的分配进行了研究, 熊治文等^[14]对双排单桩进行了室内模型试验研究。

目前, 还很少把桩顶连接方式作为专门的研究对象, 对各种桩顶连接方式的优劣性了解也不够深入。本文从双排抗滑桩的监测入手, 建立有限元分析模型, 分析桩顶连接方式对双排桩的侧向位移、弯矩和剪力分布的影响, 为抗滑桩桩顶连接方式的优化设计提供必要的依据。

为便于陈述, 作如下规定: 位于滑坡体后部, 首先承受滑坡推力的桩排称为后排桩, 靠近滑坡体前部的桩排则称为前排桩。

2 有限元分析模型

2.1 基本假定

(1) 按空间结构考虑, 有限元计算模型见图 1。边界条件为: 模型左右两侧边界平面法向约束, 模型下边界水平和竖向约束, 上边界为自由表面。

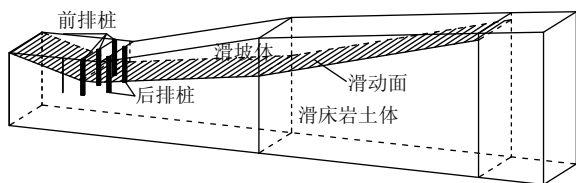


图 1 计算模型示意图

Fig.1 Sketch of the numeration model

(2) 滑坡岩土体满足 Drucker-Prager 弹塑性强度准则, 滑床岩土体、抗滑桩和桩顶连系梁为线弹性材料。

(3) 桩土界面不考虑相对滑移, 在临界面上共用有限元网格节点, 以此来满足桩土界面的变形协调条件。通过岩土体的变形将滑坡推力传递到抗滑桩上。滑坡推力在前后排桩上的分配, 主要通过前后排抗滑桩与桩顶连梁及桩间土体的变形协调来实现。

(4) 不考虑岩土体的抗拉强度。抗滑桩与连系梁的连接点均为刚性节点, 可以传递力和弯矩。滑坡推力均匀分布并垂直于抗滑桩布置方向。

2.2 材料参数

有限元分析时, 抗滑桩、连系梁和滑床岩土体看作线弹性材料, 只需给定弹性模量 E 、泊松比 μ 和重度 γ 3 个参数; 滑坡体看作弹塑性材料, 除上面 3 个参数外还要考虑黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 。桩和岩土体的基本参数见表 1。

表 1 桩和岩土体的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of pile and rock

介质	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
抗滑桩及连系梁	30 000	0.2	-	-	25
滑坡岩土体	100	0.4	400	20	20
滑床岩土体	5 000	0.3	-	-	20

2.3 桩顶连接方式

双排抗滑桩桩顶连接方式可分为无连接、同排相连、前后排相连和全连接(见图 2)。

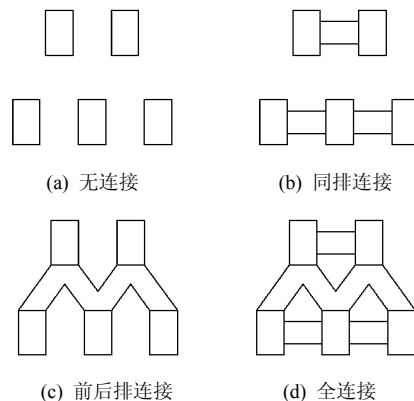


图 2 双排抗滑桩桩顶连接方式平面示意图

Fig.2 Layout of double-row anti-slide pile-tip joint

3 数值模拟结果分析

利用有限元程序建立分析模型, 在其他条件不变的情况下, 建立双排抗滑桩不同桩顶连接方式的分析模型, 分析桩顶连接方式对双排抗滑桩侧向位移、弯矩和剪力的影响。计算模型取: 抗滑桩的长度为 35 m, 锚固段长度为 15 m, 桩间距为 6 m, 桩排距为 8 m, 截面尺寸为 2.5 m × 4 m。

3.1 不同桩顶连接方式双排抗滑桩的侧向位移

桩顶分别取无连接、同排相连、前后排相连和全连接等 4 种方式, 模拟分析双排抗滑桩的位移。图 3 为桩顶不同连接方式时前、后排抗滑桩的侧向位移。

由图 3 可知, 4 种连接方式中, 桩顶无连接与同排相连的侧向位移基本相同, 而前后排相连与全连接的侧向位移相近。与桩顶无连接相比, 前后排相连时, 其前排抗滑桩的侧向位移略有增大, 而后

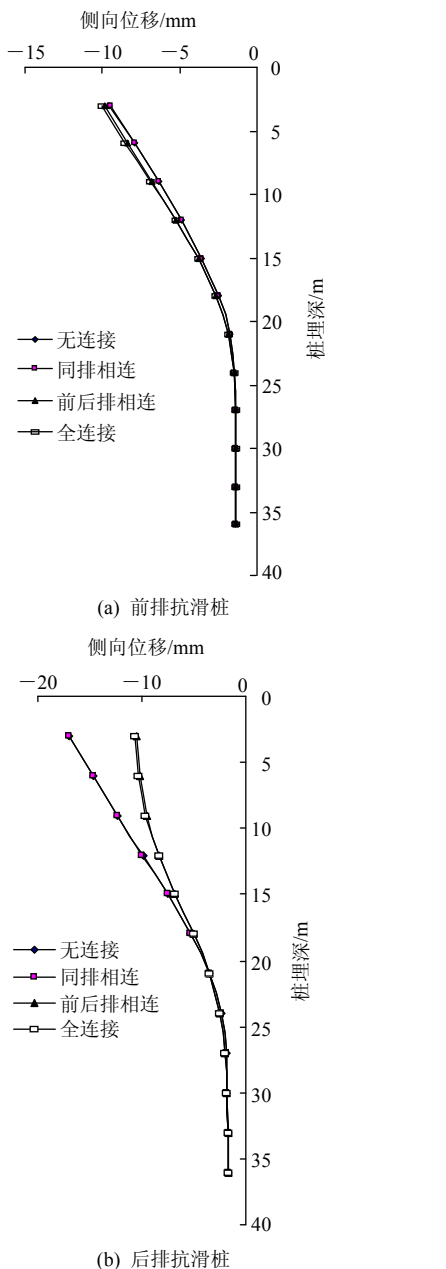


图3 桩顶为不同连接方式时桩的侧向位移

Fig.3 Lateral displacement of piles in the row at different pile tip joints

排桩的位移明显减小。从侧向位移的分布来看，无连接时，后排桩的位移明显大于前排桩；而前后排相连时，前后2排抗滑桩的桩顶位移基本一致。由此可见，桩顶为前后排相连时，可以使前后2排桩更好地协调变形，而同排相连基本不会改善前后2排桩侧向位移的协调性。

3.2 不同桩顶连接方式双排抗滑桩的弯矩

桩顶连接方式分别采用无连接、同排相连、前后排相连和全连接，模拟分析双排抗滑桩的弯矩。图4为桩顶不同连接方式时前、后排抗滑桩的弯矩。

由图4可知，桩顶无连接与同排相连的双排抗滑桩弯矩分布基本相同，而前后排相连与全连接基

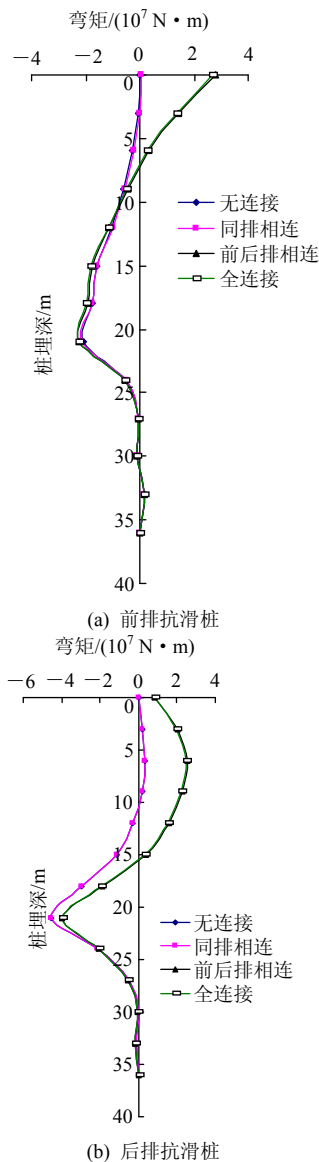


图4 桩顶为不同连接方式时桩的弯矩

Fig.4 Bending moment of piles in the row at different pile tip joints

本一致。与无连接相比，前后排相连时前排桩的弯矩略有增大，后排桩的弯矩有所减小。无连接时，前、后排抗滑桩的最大弯矩相差较大；而前后排相连时，前、后排抗滑桩弯矩分布更加合理。采用前后排桩顶连接方式，能更好地发挥前排抗滑桩的作用，而同排相连起不了这样的效果。

3.3 不同桩顶连接方式双排抗滑桩的剪力对比

分别采用无连接、同排相连、前后排相连和全连接的桩顶连接方式，模拟分析双排抗滑桩的剪力分布，计算结果见图5。

由图5可知，桩顶无连接与同排相连的双排抗滑桩剪力分布基本相同，而前后排相连与全连接基本一致。桩顶的连接方式对前后排抗滑桩剪力分布的影响较大，最大剪力的位置也发生了改变。与桩

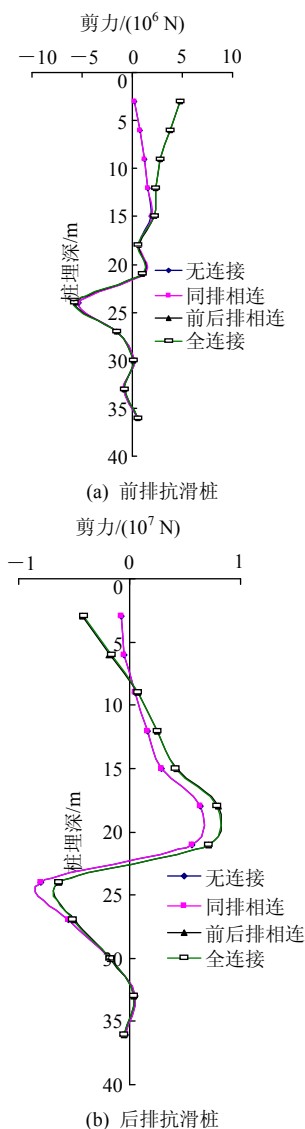


图 5 桩顶为不同连接方式时桩的剪力

Fig.5 Shear stress of piles in the row at different pile tip joints

顶无连接相比, 前后排相连时双排抗滑桩桩顶的剪力增加十分明显。

综上所述, 在滑坡推力均匀分布并与抗滑桩布置方向垂直时, 桩顶同排相连对抗滑桩的侧向位移、弯矩和剪力基本没有影响, 前后 2 排相连对抗滑桩的侧向位移、弯矩和剪力分布影响明显。前后排相连与无连接相比, 能较好地发挥前排桩的作用, 使双排桩具有更好的抗滑性能。全连接并不能起到比前后排相连更好的效果。因此, 在双排抗滑桩的设计中, 采用桩顶前后排相连是最合理的方式。

4 监测实例

4.1 桩顶为同排相连的实例分析

杭金衢高速公路 K103 滑坡, 采用了双排抗滑

桩作为主要的加固手段, 48 根抗滑桩呈梅花形交错布置, 桩排距为 8 m。桩顶连接方式为同排相连, 部分抗滑桩的桩顶设置了预应力锚索, 这里选取桩顶没有设置预应力锚索的 2 根桩(一根为前排桩, 另一根为后排桩)进行分析。抗滑桩上设置测斜孔, 对抗滑桩的侧向位移进行监测; 布置钢筋计, 对抗滑桩的钢筋应力进行监测。抗滑桩的侧向位移见图 6。由钢筋的应力监测数据计算得到的抗滑桩各监测截面的弯矩见表 2。

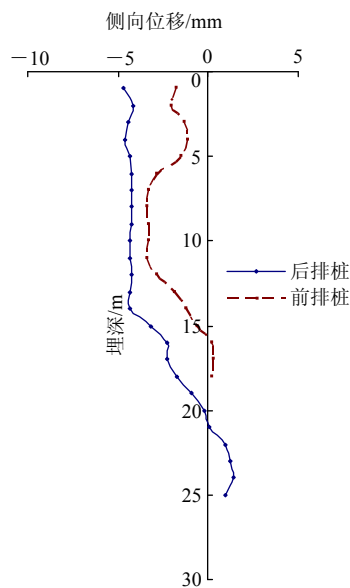


图 6 抗滑桩的侧向位移曲线

Fig.6 Lateral displacement curves of piles in the row

表 2 前后 2 排桩不同部位的弯矩

Table 2 Bending moments of all parts of the piles

截面位置到桩顶 距离/桩长	前排桩弯矩 /(kN · m)	后排桩弯矩 /(kN · m)
1/3	-297.85	-964.13
1/2	2 056.10	2 415.40
2/3	2 099.55	2 786.18
3/4	3 656.39	6 094.20

由图 6 和表 2 可知, 桩顶为同排相连时, 同一埋深处, 后排桩的位移及截面弯矩明显大于前排桩, 其中后排桩的桩顶位移约为前排桩的 2.6 倍, 滑面附近的弯矩约为前排桩的 1.7 倍。

4.2 桩顶为前后排相连的实例分析

本文引用孙 勇^[15]中的工程实例, 该滑坡采用了双排抗滑桩治理措施, 桩顶为前后排相连。桩截面尺寸为 1.25 m×2.00 m, 桩间距为 6 m。在抗滑桩的纵向受力钢筋上安装了钢筋计以推算桩身弯矩, 并用经纬仪监测抗滑桩的桩顶位移。监测数据见表 3^[15]。

表3 抗滑桩位移与弯矩的监测数据^[15]

Table 3 Displacement and bending moment of the piles^[15]

抗滑桩	桩顶位移 /mm	桩顶弯矩 /(kN·m)	滑面附近弯矩 /(kN·m)
前排桩	4.9	10 076	6 346
后排桩	6.6	10 102	8 527

由表3的数据可知,前后排相连时,前后两排抗滑桩的桩顶位移和桩身弯矩均比较接近,后排桩的桩顶位移约为前排桩的1.3倍,滑面附近的弯矩约为前排桩的1.3倍。所以,采用前后排相连的桩顶连接方式能使抗滑桩之间的位移和受力相协调,达到更好的抗滑效果。

5 结 论

(1) 实际工程监测结果与数值分析结果均表明,桩顶连接方式影响滑坡推力在前后两排桩上的分配,选择合适的桩顶连接方式能够更好的发挥前后排抗滑桩的抗滑效果。

(2) 桩顶无连接与同排相连相比,抗滑桩侧向位移、弯矩和剪力分布是基本相同的;前后排相连与全连接相比,抗滑桩侧向位移、弯矩和剪力分布是基本相同的。同排相连与无连接所起的抗滑作用基本一致,前后排相连与全连接基本一致。

(3) 桩顶无连接与同排相连时,前后排抗滑桩的最大位移、剪力和弯矩相差较大;前后排相连与全连接时,前后排抗滑桩的最大位移、剪力和弯矩比较接近。因此,桩顶为前后排相连或全连接时,前后2排抗滑桩的侧向位移、弯矩和剪力分布更加合理,能够加强前后两排抗滑桩的共同作用。

(4) 综合考虑双排桩的变形和受力特点以及抗滑桩工程的经济因素,在双排抗滑桩的设计中,建议使用前后排相连的桩顶连接方式。

参考文献(References):

[1] 祝 辉,唐红梅,李 明,等.重庆—贵州高速公路向家坡滑坡稳定性分析及防治对策研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增1):2 687 - 2 693.(ZHU Hui, TANG Hongmei, LI Ming, et al. Stability analysis and preventive treatment measures to Xiangjiapo landslide along Chongqing—Guizhou expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 687 - 2 693.(in Chinese))

[2] 王 凯,郑颖人,王其洪,等.捆绑式抗滑桩优越性初步研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(3):533 - 538.(WANG Kai, ZHENG Yingren, WANG Qihong, et al. Pilot study of advantage of the trussed slide-resistant pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3): 533 - 538.(in Chinese))

[3] 钟庆华.π型抗滑桩治理滑坡的研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),1998,21(增1):102 - 105.(ZHONG Qinghua. Research on the

slope protection by placing the π stakes[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 1998, 21(Supp.1): 102 - 105.(in Chinese))

[4] 蔡袁强,赵永倩,吴世明,等.软土地基深基坑中双排桩式围护结构有限元分析[J].浙江大学学报,1997,31(4):442 - 448.(CAI Yuanqiang, ZHAO Yongqian, WU Shiming, et al. Finite element analysis of the deep pit excavation with retaining structure of the double piles in soft clay[J]. Journal of Zhejiang University, 1997, 31(4): 442 - 448.(in Chinese))

[5] 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 Gang, LI Xin, LIU Chang, et al. Analysis of double row piles in consideration of the pile-soil interaction[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 99 - 106.(in Chinese))

[6] 陆培毅,杨 靖,韩丽君.双排桩尺寸效应的有限元分析[J].天津大学学报,2006,39(8):963 - 967.(LU Peiyi, YANG Jing, HAN Lijun. Finite element analysis of double-row piles in consideration of dimensional effect[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(8): 963 - 967.(in Chinese))

[7] 曹俊坚,平 扬,宋长歧,等.考虑圈梁空间作用的深基坑双排桩支护计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(6):709 - 712.(CAO Junjian, PING Yang, SONG Changqi, et al. Study of calculation method of bracing structure with double-row piles of deep foundation pit with consideration of the spatial influence of ring beam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 709 - 712.(in Chinese))

[8] 应宏伟,初振环.带撑双排桩支护结构形状分析[J].岩土工程学报,2006,28(增):1 450 - 1 454.(YING Hongwei, CHU Zhenhuan. Analysis of braced retaining structures with double-row piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Supp.): 1 450 - 1 454. (in Chinese))

[9] 孙 勇,张广栋.双排抗滑桩受力机制及计算方法探讨[J].山西建筑,2008,34(4):120 - 121.(SUN Yong, ZHANG Guangdong. Discussion on forcing principle and calculating methods of double-row anti-slide pile[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(4): 120 - 121.(in Chinese))

[10] 董必昌,邱红胜.双排桩对边坡稳定影响分析的仿真研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2007,31(3):502 - 505.(DONG Bichang, QIU Hongsheng. Simulation study of stability of slope with double-row piles[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2007, 31(3): 502 - 505.(in Chinese))

[11] 申永江,吕 庆,尚岳全.桩排距对双排抗滑桩内力的影响[J].岩土工程学报,2008,30(7):1 033 - 1 037.(SHEN Yongjiang, LU Qing, SHANG Yuequan. Effect of pile row distance on internal stress of double-row anti-slide piles[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1 033 - 1 037.(in Chinese))

[12] 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 - 445.(ZHOU Cuiying, LIU Zuoqiu, SHANG Wei, et al. A new mode for calculation of portal double row anti-sliding piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 441 - 445.(in Chinese))

[13] 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(增1):4 866 - 4 871.(LU Meijun, YAN Echuan. Study of distribution laws of landslide-thrust in double-row embedded anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 4 866 - 4 871.(in Chinese))

[14] 熊治文,马 辉,朱海东.全埋式双排抗滑桩的受力分布[J].路基工程,2002,102(2):5 - 11.(XIONG Zhiwen, MA Hui, ZHU Haidong. The distribution of mechanical properties in double-row embedded anti-slide piles[J]. Subgrade Engineering, 2002, 102(2): 5 - 11.(in Chinese))

[15] 孙 勇.西部山区双排抗滑桩的机制及设计研究[J].工程地质学报,2008,16(3):383 - 387.(SUN Yong. Mechanical model and design of double-row anti-sliding piles for slope stabilization in mountainous regions of Western China[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3): 383 - 387.(in Chinese))