

DOI: 10.11779/CJGE2015S2020

双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究

申永江, 杨 明, 项正良

(中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 针对双排抗滑桩前、后排桩受力与变形差异较大, 前、后排抗滑桩无法充分发挥抗滑作用以及沉埋式抗滑桩因沉埋深度过大可能引起越顶破坏的问题, 提出了双排长短组合抗滑桩的支护形式。建立有限元模型, 分析了后排桩在不同沉埋深度时, 前、后排桩桩身最大弯矩和剪力的变化情况。计算结果表明: 当后排桩沉埋到一定深度时, 前、后排桩桩身最大弯矩、剪力及变形程度均较接近, 并以此深度为后排桩的设计沉埋深度。在此基础上, 与几种常见的抗滑桩进行对比发现, 双排长短组合桩能够有效地调节前后排桩的内力与变形, 充分发挥前后排桩的抗滑作用, 并且桩身受力较小, 避免反向弯矩的产生, 同时减少材料用量, 节约滑坡治理费用。

关键词: 滑坡; 长短组合抗滑桩; 门架式双排桩

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S2-0096-05

作者简介: 申永江(1979-), 男, 讲师, 主要从事边坡防治技术研究工作。E-mail: shyj79@163.com。

Comparative study on double-row piles with different lengths several common anti-slide piles

SHEN Yong-jinag, YANG Ming, XIANG Zheng-liang

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: There are huge differences in internal force and deformation between the front and back rows of double-row anti-slide piles, so they cannot display their sliding resistances simultaneously and adequately. The slide may originate from pile head in the slope reinforced by deeply buried anti-slide piles. In order to solve the above problems, a new concept is put forward that the double-row piles with shorter back row can be used. A finite element model is established and the maximum bending moments and shear forces in the front and back rows of piles with different embedded depths of back row are obtained and discussed. It is indicated that the maximum bending moments, shear forces and deformation degree in the front row of piles are close to those in the back row when the embedded depth in back row increases to a certain value, and this value can be regarded as the design embedded depth. Through comparison with those of several common anti-sliding piles, the internal force and deformation in the front and back rows of the proposed piles are more reasonable, and the two rows of piles can display their sliding resistances adequately. The internal forces are relatively small, and the counter bending moments can be avoided. What's more, it can save materials and reduce the cost.

Key words: landslide; anti-slide pile with different lengths; frame double-row pile

0 引 言

在中国山地丘陵地区, 滑坡是一种常见的地质灾害, 双排抗滑桩和沉埋桩是治理滑坡的有效措施。沉埋桩一般设置于滑坡体较厚处, 作为一种新型的抗滑结构在工程中开始应用, 如重庆市武隆县政府滑坡^[1]、奉云高速分界梁滑坡^[2]等。沉埋桩可以充分利用滑坡阻滑段的阻滑作用, 减小桩长, 降低工程造价。

目前, 已有很多学者对双排抗滑桩进行了大量研究。申永江等^[3]通过对双排桩的现场监测发现, 前、后排桩的变形和受力状况有明显不同。唐芬^[4]通过建立有限元模型, 分析了不同排距下双排桩对推力的分

担。熊治文等^[5]通过全埋式双排桩大型物理模型试验, 探讨了不同布置形式时, 滑坡推力在不同桩排的分配、桩身受力分布形式等。徐骏等^[6]通过离心模型试验, 研究了直线型滑坡在滑面位置已知而桩间距不同情况下, 各排抗滑桩的推力分配规律。以上针对双排抗滑桩的研究均表明, 在滑坡推力的作用下, 前、后排桩所承担的滑坡推力、桩身内力及变形有较大差异, 前

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102171); 中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2013T001); 中国博士后科学基金项目(2012M521556)

收稿日期: 2015-03-26

排抗滑桩往往无法充分发挥其抗滑能力。

对于沉埋式抗滑桩，也有许多学者进行了一些积极的探索。宋雅坤^[7]在进行了室内大型模拟试验的基础上，对模型试验进行了数值分析，计算了桩身、桩顶土所受的推力大小以及桩长变化时滑坡体加固后的稳定安全系数。雷文杰等^[8-10]通过有限元分析及室内模型试验，研究了桩长与潜在滑面、边坡安全系数、桩身内力、桩身及桩顶所承担的滑坡推力之间的关系。张晓曦等^[11]采用扇形条分法结合上限定理，研究了沉埋式抗滑桩设置位置、沉埋深度对次级滑动稳定性的影响。陈卫兵等^[12]结合数值模拟与模型试验的结果，研究了桩长与桩加固后滑面位置以及滑坡体稳定安全系数之间的关系。研究表明，沉埋桩可以充分利用阻滑段的阻滑作用，有效减小桩身内力，但沉埋深度过大可能会导致上部坡体发生越顶破坏，形成新的次级滑坡。

针对上述双排抗滑桩和沉埋桩在工程应用中所存在的问题，提出了双排长短组合抗滑桩的支护形式，如图1所示。这里后排桩采用沉埋式抗滑桩的目的是通过调整后排桩受荷段长度，来调节前、后排桩的受力与变形，使前、后排抗滑桩均能充分发挥抗滑作用；同时，由于前排全长式抗滑桩的存在，还可避免因后排桩沉埋深度过大而发生的越顶破坏现象。

本文以双排长短组合桩为研究对象，建立有限元分析模型，分析后排桩不同沉埋深度时，前后排桩桩身最大弯矩和剪力的变化情况，以前后排桩桩身内力与变形最接近时后排桩沉埋深度为设计沉埋深度。在此基础上，对比双排长短组合桩与几种常见形式的抗滑桩之间的差异，验证其适用性，为滑坡治理工程提供一种新手段。

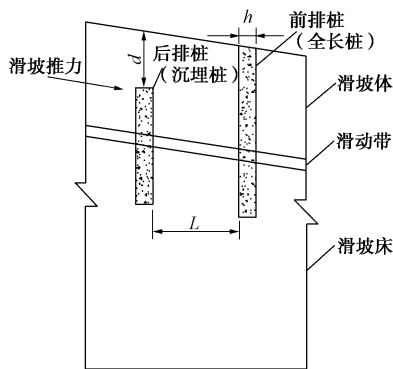


图 1 双排长短组合桩布置示意图

Fig. 1 Layout of double-row piles with different lengths

1 有限元分析模型及基本假设

1.1 基本假设、模型及其简化

以一个典型的滑坡地质剖面作为计算模型，抗滑桩设置于滑坡阻滑段，有限元分析模型如图 2 所示。

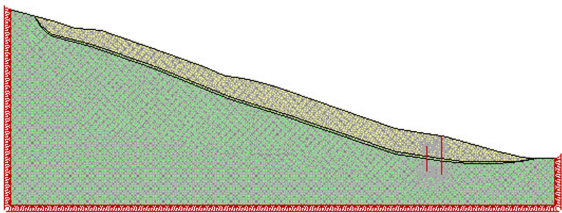


图 2 有限元分析模型

Fig. 2 Model of finite element analysis

(1) 不考虑桩间土的破坏，假设桩间土所受的滑坡推力通过土拱效应传递到相应的抗滑桩上。采用梁单元模拟抗滑桩，抗滑桩尺寸通过设置梁单元截面面积及截面惯性矩体现。

(2) 模型宽 216 m，左边高 77 m，右边高 18 m。对模型左右两边界施加水平约束，对模型下边界施加竖向约束，模型上边界不加约束。

(3) 滑坡体、滑动带及滑坡床均采用弹塑性模型，抗滑桩采用线弹性梁单元模型。

(4) 桩土之间通过设置接触单元来模拟桩土之间的过渡段。对于现浇桩，接触单元上的粘聚力和内摩擦角可取与桩相邻土层的 0.8 倍左右^[13]。

1.2 模拟方法

本文采用文献[14]所介绍的数值计算方法：天然情况下滑坡处于重力荷载初始平衡后的稳定状态，由于某种外界因素影响或人为计算需要（抗剪强度折减），造成滑带岩土体的强度指标降低，从而使滑坡产生滑动变形效应。在此基础上，模拟桩后滑坡岩土体及抗滑桩结构的受力及变形情况。

1.3 材料参数设置

在有限元分析时，抗滑桩采用线弹性梁单元进行模拟，需要给定弹性模量 E 、截面面积及截面惯性矩；滑体、滑带和滑床采用弹塑性模型，需要给定材料弹性模量 E 、泊松比 μ 、重度 γ 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。材料参数是基于滑坡各部位岩土体差异并结合工程经验选取。抗滑桩和岩土体的基本参数见表1。

表 1 抗滑桩及岩土体物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of piles and rock

材料	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	重度 /(kN·m ⁻³)
抗滑桩	30000	0.20	—	—	—
滑体	45	0.30	30.0	22.0	22.0
滑带	10	0.35	15.0	12.0	19.0
滑床	3000	0.25	250.0	45.0	24.0
滑带（降低）	10	0.35	13.5	10.8	19.5

双排桩的截面尺寸为 $2\text{ m}\times 3\text{ m}$ ，桩间距为 6 m ，桩排净距为 6 m ，桩长 15 m ，其中锚固段长度 5 m 。

2 后排桩设计沉埋深度的确定

建立有限元分析模型，在其他条件保持不变的情况下，逐渐增大后排桩的沉埋深度。分析不同沉埋深度下，前、后排桩桩身最大弯矩和剪力的变化情况。如图 1 所示， d 表示后排桩沉埋深度， h 表示抗滑桩身截面高度， L 表示桩排间距。

逐渐增大后排桩的沉埋深度，每隔 0.5 m 设置一个工况并进行计算，直到出现前排桩桩身最大弯矩与剪力大于后排桩的情况。图 3，4 为前、后排桩桩身最大弯矩和剪力在后排桩沉埋深度变化时的对比图。

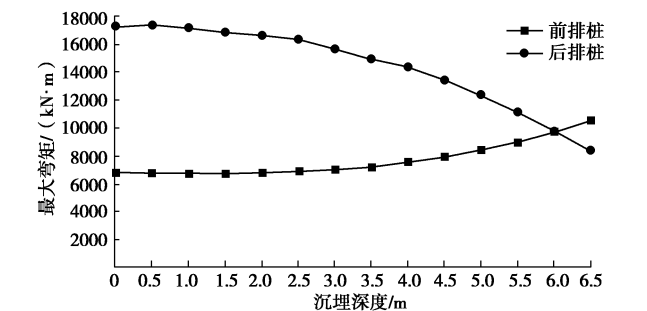


图 3 前、后排桩桩身最大弯矩

Fig. 3 Maximum bending moments of the front-and back-row piles

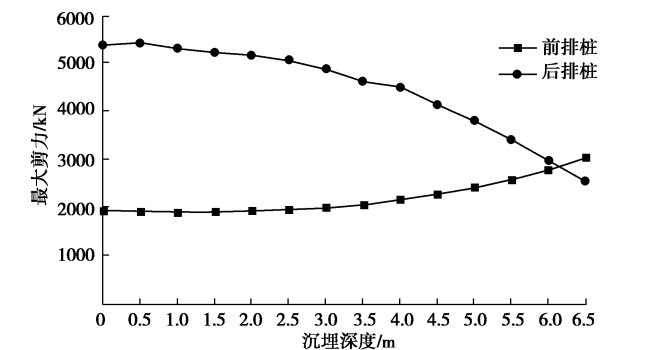


图 4 前、后排桩桩身最大剪力

Fig. 4 Maximum shears of the front-and back-row piles

由图 3，4 可知：随着后排桩沉埋深度的增大，前排桩桩身最大弯矩和剪力逐渐增大，后排桩与之相反；当沉埋深度达到 6.0 m 左右时，前、后排桩桩身最大弯矩和剪力比较接近，继续增大沉埋深度则会出现前排桩桩身最大弯矩、剪力大于后排桩的情况。

综上所述，当后排桩沉埋深度达到 6.0 m 时，前、后排桩桩身内力非常接近；若继续增大沉埋深度，则会出现前排桩的内力大于后排桩的情况。因而，对于该滑坡及相应的设桩条件下，后排桩的设计沉埋深度应取 6.0 m 。采用同样的方法，在其他条件不变的情况下，针对不同桩排距的双排桩进行计算分析，并确定其最优沉埋深度，桩排净距为 $3, 6, 9, 12, 15\text{ m}$ 时，最优沉埋深度为 $5, 6, 6.5, 7, 7\text{ m}$ 。

3 长短组合桩与常见双排桩的对比

对于大型滑坡的治理，常用的抗滑桩形式有大孔径单排抗滑桩、悬臂式双排抗滑桩以及门架式双排抗滑桩，见图 5。

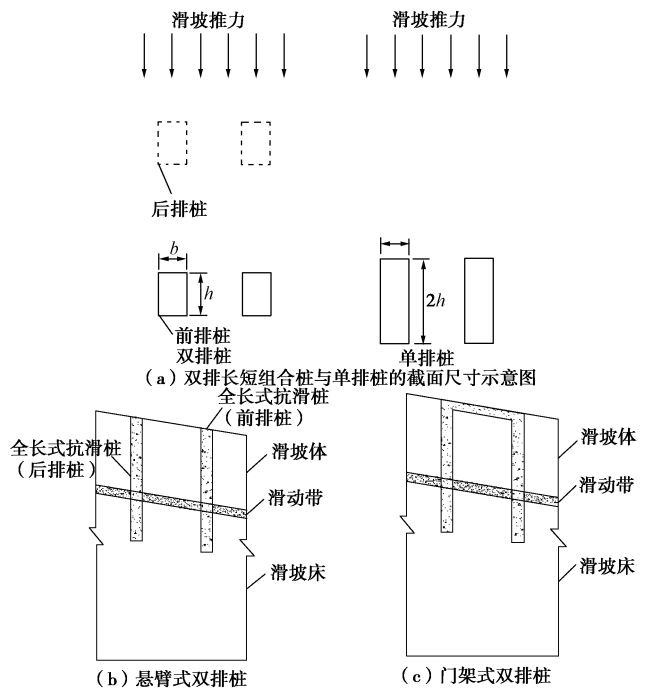


图 5 双排桩的示意图

Fig. 5 Diagram of double-row piles

3.1 与大孔径单排抗滑桩的对比

文献^[3]指出：将双排桩合并为单排桩时，具有更强的抵抗滑坡变形的能力，抗滑桩受力也更加合理。建立相应的单排桩有限元分析模型，将双排桩合并为单排桩，即桩身截面宽度 b 不变，桩身截面高度 h 变为原来的 2 倍。如图 5 (a) 所示，双排长短组合桩截面尺寸为 $2\text{ m}\times 3\text{ m}$ ，大孔径单排桩截面尺寸为 $2\text{ m}\times 6\text{ m}$ 单排桩设置在双排桩前排桩处。计算结果见表 2。

表 2 双排长短桩与大孔径单排桩的计算结果对比
Table 2 Comparison of results of double-row piles with different lengths and large-diameter single pile

类型	最大弯矩 /(kN·m)	最大剪力 /kN	最大水平 位移/m	最大剪 应变
大孔径 单排桩	26223	8405	0.1996	0.1849
双排长短 组合桩				
前排桩	9758	2785	0.1964	0.1671
后排桩	9761	2969	0.1964	0.1671
长短桩前后 排桩之和	19519	5754	—	—

由表 2 可知：与双排桩合并而成的单排桩相比，双排长短组合桩的桩身最大弯矩、剪力均更小；采用双

排长短组合桩加固后的滑坡体表面位移与滑坡体最大剪应变均小于单排桩加固的滑坡。除此之外, 施工大孔径抗滑桩时, 开挖桩孔也具有一定的施工难度和风险。因此, 相比于大孔径单排桩, 双排长短组合桩能有效发挥桩间岩土体的抗滑作用, 减小桩身受力, 同时也可减小所需的桩长, 进一步降低工程造价; 滑坡体表面最大水平位移及滑坡体内部最大剪应变更小, 能更加有效地抵御滑坡变形; 同时也避免了施工大孔径桩孔时带来的难度和风险。

3.2 与悬臂式双排抗滑桩的对比

悬臂式双排桩是一种常见的双排桩形式, 建立相应的悬臂式双排桩有限元分析模型, 桩身截面宽度 b 与桩身截面高度 h 均不变。如图5(b)所示, 模型中悬臂式双排抗滑桩前、后排桩受荷段长度均与滑坡体厚度相同。悬臂式双排桩与双排长短桩的位置、桩截面尺寸相同。计算结果见表3。

表 3 双排长短桩与悬臂式双排桩的计算结果对比

Table 3 Comparison of results of double-row piles with different lengths and cantilever double-row anti-slide piles					
类型	最大弯矩 /(kN·m)	最大剪力/kN	最大水平 位移/m	最大剪 应变	
悬臂式 前排桩	6818	1927	0.1926	0.1619	
双排桩 后排桩	17280	5361	0.1926	0.1619	
悬臂桩前后 排桩之和	24098	7288	—	—	
双排长短 前排桩	9758	2785	0.1964	0.1671	
组合桩 后排桩	9761	2969	0.1964	0.1671	
长短桩前后 排桩之和	19519	5754	—	—	

由表3可知: 双排长短组合桩的前后排桩桩身最大弯矩、剪力均较接近; 而悬臂式双排桩后排桩桩身最大弯矩剪力均明显大于前排桩。双排长短组合桩前后排桩桩身最大弯矩、剪力之和明显小于悬臂式双排桩。采用双排长短组合桩加固后的滑坡体表面位移与滑坡体内部最大剪应变与悬臂式双排桩比较接近。因此, 相比于悬臂式双排桩, 双排长短组合桩能调节前后排桩的受力与变形, 使前后排桩都充分地发挥抗滑作用, 在保证一定加固效果的同时减小桩身内力, 使前后排桩受力更加合理; 同时, 由于后排桩桩长减短, 大大降低了工程造价。

3.3 与门架式双排抗滑桩的对比

门架式双排桩前后两排桩内力分布差距较小^[15], 且具有抵抗力大桩顶位移小的特点。建立相应的门架式双排桩有限元分析模型, 桩身截面宽度 b 与桩身截面高度 h 均不变, 如图5(c)所示。前后排桩通过桩顶连梁连接。门架式双排桩的位置与双排长短桩位置相同, 抗滑桩截面尺寸为2 m×3 m, 桩顶连梁截面尺寸按工程经验取2 m×2 m。计算结果见表4。

表 4 双排长短桩与门架式双排桩的计算结果对比

Table 4 Comparison of results of double-row piles with different lengths and gantry type double-row anti-slide piles					
类型	最大弯矩 /(kN·m)	最大剪力/kN	最大水平 位移/m	最大剪 应变	
门架式双 前排桩	7562	2137	0.1913	0.1615	
排桩 后排桩	9685	3052	0.1913	0.1615	
门架桩前后排桩 之和	17247	5189	—	—	
双排长短 前排桩	9758	2785	0.1964	0.1671	
组合桩 后排桩	9761	2969	0.1964	0.1671	
长短桩前后排桩 之和	19519	5754	—	—	

由表4可知: 双排长短组合桩的桩身最大弯矩、剪力与门架式抗滑桩比较接近; 其滑坡体表面最大水平位移和滑坡体内部最大剪应变略大于门架式双排桩, 但差别并不明显。因此, 相比于门架式双排桩, 双排长短组合桩在调节前后排桩的受力与变形, 减小桩身受力的同时, 避免了较大的反向弯矩, 降低了配筋设计的难度与配筋量; 同时, 节省了施作桩顶连梁所需的费用, 减短后排桩桩长, 大大降低了工程造价。

4 结论与建议

(1) 提出一种双排长短组合抗滑桩, 即前排桩采用全长式抗滑桩, 后排桩采用沉埋式抗滑桩。当后排桩的沉埋深度合适时, 前后排桩桩身内力与变形较接近, 前后排桩均能充分发挥各自的抗滑作用。

(2) 与大孔径单排抗滑桩的对比结果表明, 双排长短组合桩能有效发挥桩间岩土体的抗滑作用, 减小桩身内力及滑坡体变形, 同时避免了开挖大直径桩孔所带来的施工难度和风险。

(3) 与悬臂式双排抗滑桩的对比结果表明, 双排长短组合桩能调节前后排桩的受力, 使前后排桩同时发挥抗滑作用, 同时减小桩身内力, 使前后排桩受力更加合理。

(4) 与门架式双排抗滑桩的对比结果表明, 双排长短组合桩前后排桩桩身内力与门架式抗滑桩桩身内力比较接近, 在减小桩身受力的同时避免了较大的反向弯矩, 降低了配筋设计的难度与配筋量, 同时节省了施作桩顶连梁所需的费用。

(5) 与上述几种桩型相比, 双排长短组合桩在桩身受力方面均具有一定的优越性; 同时, 由于减短了后排桩桩长, 大大降低了工程造价。采用双排桩治理滑坡时, 建议采用双排长短组合抗滑桩。

参考文献:

[1] 赵尚毅, 郑颖人, 李安洪, 等. 多排埋入式抗滑桩在武隆县政府滑坡中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 160 -

164. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, LI An-hong, et al. Application of multi-row embedded anti-slide piles to landslide of Wulong county government[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S1): 160 - 164. (in Chinese))
- [2] 雷文杰. 沉埋桩加固滑坡体的有限元设计方法与大型物理模型试验研究[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2006. (LEI Wen-jie. Study on design method of deeply buried piles stabilizing slides and large-scale model test[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese))
- [3] 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): 1033 - 1037. (SHEN Yong-jiang, LU Qing, SHANG Yue-quan. Effect of pile row distance on internal stress of double-row anti-slide piles[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(7): 1033 - 1037. (in Chinese))
- [4] 唐芬, 郑颖人, 杨波. 双排抗滑桩的推力分担及优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 3162 - 3168. (TANG Fen, ZHENG Ying-ren, YANG Bo. Thrust share ratios and optimization design for two-row anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3162 - 3168. (in Chinese))
- [5] 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**(3): 5 - 11. (XIONG Zhi-wen, MA Hui, ZHU Hai-dong. The distribution of mechanical properties in double-row embedded anti-slide piles[J]. Subgrade Engineering, 2002, **102**(3): 5 - 11. (in Chinese))
- [6] 徐骏, 李安洪, 赵晓彦. 大型滑坡桩排推力分担比离心模型试验研究[J]. 路基工程, 2010, **3**: 57 - 59. (XU Jun, LI An-hong, ZHAO Xiao-yan. Large-scale landslides thrust share ratios studied by centrifugal model test[J]. Subgrade Engineering, 2010, **3**: 57 - 59. (in Chinese))
- [7] 宋雅坤, 郑颖人, 雷文杰. 沉埋式抗滑桩机制模型试验数值分析研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊): 63 - 68. (SONG Ya-kun, ZHENG Ying-ren, LEI Wen-jie. Analysis of the experimental mechanism of deeply buried anti-slide pile by FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S0): 63 - 68. (in Chinese))
- [8] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡加固系统中沉埋桩的有限元极限分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(1): 28 - 33. (LEI Wen-jie, ZHENG Ying-ren, FENG Xia-ting. Limit analysis of slope stabilized by deeply buried piles with finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(1): 27 - 33. (in Chinese))
- [9] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 沉埋桩的有限元设计方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 1): 2924 - 2929. (LEI Wen-jie, ZHENG Ying-ren, FENG Xia-ting. Study on finite element design method of slope stabilized by deeply buried piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S1): 2924 - 2929. (in Chinese))
- [10] 雷文杰, 郑颖人, 王恭先, 等. 沉埋桩加固滑坡体模型试验的机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(7): 1347 - 1355. (LEI Wen-jie, ZHENG Ying-ren, WANG Gong-xian, et al. Mechanism analysis of slope reinforcement with deeply buried piles with model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(7): 1347 - 1355. (in Chinese))
- [11] 张晓曦, 何思明, 尹平保. 沉埋式抗滑桩优化设计研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(12): 143 - 149. (ZHANG Xiao-xi, HE Si-ming, YIN Ping-bao. Study on optimal design of deeply buried piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(12): 143 - 149. (in Chinese))
- [12] 陈卫兵, 郑颖人, 雷文杰. 沉埋桩加固滑坡体模型试验的三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊): 273 - 276. (CHEN Wei-bing, ZHENG Ying-ren, LEI Wen-jie. 3-D finite element simulation of slope model test stabilized by deeply buried piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S0): 273 - 276. (in Chinese))
- [13] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (CHEN Yu-min, XU Ding-ping. The basic knowledge and engineering examples of FLAC/FLAC^{3D}[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese))
- [14] 郑轩, 孔令伟. 连续桩键结构的抗滑机制及加固效果研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(9): 2616 - 2622. (ZHENG Xuan, KONG Ling-wei. Research on anti-slide mechanism and reinforcement Effects of continuous pile-plug structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(9): 2616 - 2622. (in Chinese))
- [15] 申永江, 孙红月, 尚岳全, 等. 锚索双排桩与刚架双排桩的对比研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1838 - 1842. (SHEN Yong-jiang, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Comparative study of anchor double-row piles and frame double-row piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1838 - 1842. (in Chinese))