

# Finite Element Analysis of Slope Treatment Scheme in Eastern Fuling River

Zuokang Liu<sup>1</sup>, Gang Li<sup>2</sup>, Shaojun Fu<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Chongqing Surveying & Design Institute of Water Resources and Architecture, Chongqing

<sup>2</sup>Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: 332581900@qq.com, T\_bag945@126.com, sgjg@whu.edu.cn

Received: Oct. 29<sup>th</sup>, 2017; accepted: Nov. 12<sup>th</sup>, 2017; published: Nov. 17<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

Slope instability is easy to cause landslides, and anti-sliding piles are widely used in slope treatment. Based on the slope treatment project of the eastern Fuling River, the slope was treated by the system which coupled the pile groups, retaining wall and the slope revetment structure. The calculation model of the typical profile was established, and the finite element program CORE3D was used for calculating the deformation and stability of slope, and the deformation and stress characteristics of landslide and anti-sliding piles were compared between 4 piles and 5 piles system, which provide a reference for engineering practice. The results show that compared with the 5 piles system, the vertical and horizontal displacement of the slope and the retaining wall of the 4 piles system were larger, and the main tensile stress and compressive stress of anti-sliding pile were larger too. The anti-sliding piles showed "s-shaped" deformation, and the soil arching effect was formed. The single wide thrust of the slope increases gradually from the post, and attained the peak before the anti-sliding piles. It is recommended that 4 pile system is better, and the longitudinal rebar and stirrup at the nodes should be reinforced.

## Keywords

Anti-Sliding Pile, Finite Element Method, Slope, Retaining Wall, Soil Arching Effect

# 涪陵江东边坡治理方案有限元分析

柳作康<sup>1</sup>, 李刚<sup>2</sup>, 傅少君<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>重庆水利建筑勘测设计研究院, 重庆

<sup>2</sup>西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

<sup>3</sup>武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉

Email: 332581900@qq.com, T\_bag945@126.com, sgjg@whu.edu.cn

文章引用: 柳作康, 李刚, 傅少君. 涪陵江东边坡治理方案有限元分析[J]. 土木工程, 2017, 6(6): 606-615.

DOI: 10.12677/hjce.2017.66072

收稿日期：2017年10月29日；录用日期：2017年11月12日；发布日期：2017年11月17日

## 摘要

边坡失稳易导致山体滑坡，抗滑桩被广泛应用于边坡治理工程中。依托于涪陵江东边坡治理工程，结合群桩承台基础、扶臂式挡墙及斜坡护岸结构体系对边坡进行治理。选取典型剖面建立计算模型，采用有限元程序CORE3D针对边坡在结构体系作用下的变形与稳定性进行了计算，对比分析了4排桩与5排桩体系作用下滑坡体与抗滑桩的变形与受力特性，为工程实践提供参考。研究表明：与5排桩结构体系相比，4排桩体系作用下边坡、挡墙的竖向与水平向位移较大；抗滑桩最大主拉应力与压应力亦较大。抗滑桩表现出明显的“S形”变形，并形成土拱效应。滑坡体单宽推力自后缘起逐渐增加，至抗滑群桩前推力达到峰值。推荐采用4排桩方案，注意在节点处加强纵向受力钢筋与箍筋作用。

## 关键词

抗滑桩，有限元，边坡，挡墙，土拱效应

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

边坡失稳易导致山体滑坡，是一种常见的地质灾害，针对边坡的加固与治理是岩土工程领域重要的研究课题。抗滑桩是边坡治理中常用措施之一，是通过穿过滑坡体深入于滑床的桩柱来支档滑动力，起稳定边坡的作用，具有施工快、安全可靠、节省工期等特点，在水利水电、公路、机场、矿山及运河等工程建设中被广泛应用。为了研究抗滑桩对边坡的稳定作用，赵安林[1]、王聪聪等[2]、徐爱民等[3]采用数值计算分析了抗滑桩位置、桩长、桩间距、桩截面、桩体弹性模量及锚固深度等对于桩顶位移、边坡变形及应力的影响。研究结构表明，抗滑桩位置对于边坡水平位移的影响较大，当抗滑桩位于边坡破面中下部时，对岩土体变形的控制效果最佳。随着桩长的增大，边坡水平位移突变与最大位移逐渐减小。抗滑桩截面尺寸的变化对桩顶位移的影响较小，而锚固深度与桩间距的改变对桩顶位移的影响较大。冯文娟等[4]、罗根传等[5]采用FLAC3D软件模拟了滑坡传力与抗滑桩受力过程，指出抗滑桩的阻挡作用使桩周岩体局部应力增加，抗滑桩桩体在滑裂面位置处的剪力与弯矩最大，数值计算方法克服了长期以来以经验为主的刚体极限平衡体系，可为工程实践提供借鉴。朱泳等[6]、刘怡林等[7]结合强度折减法与有限元法针对抗滑桩加固均质边坡和含软弱夹层边坡情况进行了数值模拟，分析了桩位、桩长等因素对抗滑桩加固边坡稳定状态的影响规律。指出当桩径相同时，边坡稳定性随桩距的增大而减小，随桩刚度的减小而减小，桩后土压力值随桩距的增加而增大。俞晓等[8]、戴自航等[9]结合强度折减法与ABAQUS软件，探讨了抗滑桩截面尺寸及桩侧摩阻对边坡稳定的影响，以特征部位的位移拐点作为边坡达到临界破坏状态的标准，由求得的强度折减系数评价边坡的稳定性。建立了土质边坡加固安全系数与抗滑桩桩长、桩径及桩距间的关系，揭示边坡抗滑桩桩周土压力的分布规律。年廷凯等[10] [11]基于有限元软件ABAQUS，以迭代不收敛联合破面特征点位移陡增作为抗滑桩加固边坡失稳判据，通过二次开发建立了能够自动搜索安全系数的抗滑桩加固边坡稳定性强度折减弹塑性模型，并结合典型算例验证了该判据的

有效性。胡晓军等[12]考虑抗滑桩桩间土拱效应、以桩侧与边坡土体间的摩阻力及黏着力承担滑坡推力,考虑土拱跨中与拱脚处截面的强度条件共同控制,建立了抗滑桩间距的计算公式,该公式考虑了滑坡推力分布的影响。梁冠亭等[13]基于 M-P 法抗滑桩支护边坡分析模型,建立了抗滑桩下滑力和边坡安全系数的表达式。通过引入自适应遗传优化算法,建立了边坡稳定性分析优化模型,探索采用抗滑桩支护边坡的非圆弧最危险滑动面。张谭等[14]将整个滑坡体代替传统的条块作为分析对象,通过建立三力矩平衡方程实现了滑体的整体极限平衡分析,并将此应用于抗滑桩加固边坡的稳定性计算中。

边坡治理因地质构造不同而差异明显,目前针对抗滑桩治理边坡的研究内容主要通过数值计算开展,重点分析抗滑桩设计参数(桩位、桩长、桩间距、桩截面等)与失稳判据对边坡稳定或失稳的影响,而针对耦合抗滑桩群桩承台基础、扶臂式挡墙及斜坡护岸组合结构体系治理边坡的研究内容相对较少。本文依托于涪陵江东边坡治理工程实例,结合有限元强度折减法来分析群桩承台基础、扶臂式挡墙及斜坡护岸组合结构体系作用下边坡的稳定性、支挡结构的受力与变形特性,为工程设计提供依据。

## 2. 工程概况

在重庆市涪陵区长江、乌江汇合口东岸防洪护岸综合整治工程区内有师专、上渡口两个大型滑坡。这两个滑坡在 2003 年进行了局部治理,上渡口滑坡实施抗滑桩 93 根,师专滑坡实施抗滑桩 58 根。本段塌岸危及涪陵城区,为县级迁建城市,危害长江新光纸厂、贵州航运站、乌江船厂等迁建企业、城市道路、污水管、天然管道及其他市政设施的安全,可能造成的经济损失大于 10000 万。按照《三峡库区三期地质灾害防治工程地质勘察技术要求》,根据致灾体危害对象的重要性和成灾后可能造成的损失大小,涪陵区长江乌江汇合口东岸危害程度为 I 级。

由于三峡库区蓄水、原长委指导线的限制和为了修建江东滨江路等原因对工程方案的限制较多,在滑坡段拟采用的方案为群桩承台基础 + 扶臂式挡墙 + 斜坡护岸(见图 1)。

由于边坡规模大,问题较复杂,采用传统方法(如刚体极限平衡方法)难以全面深入弄清边坡的变形、失稳模式及支护结构的受力性态。而有限单元法是分析研究这类复杂问题的有效途径之一。因此,结合该边坡工程的实际情况,运用有限单元法系统深入地研究该边坡在多种工况下的变形、稳定性及支护结构受力状态,为设计提供科学依据,具有十分重要现实意义和参考价值。

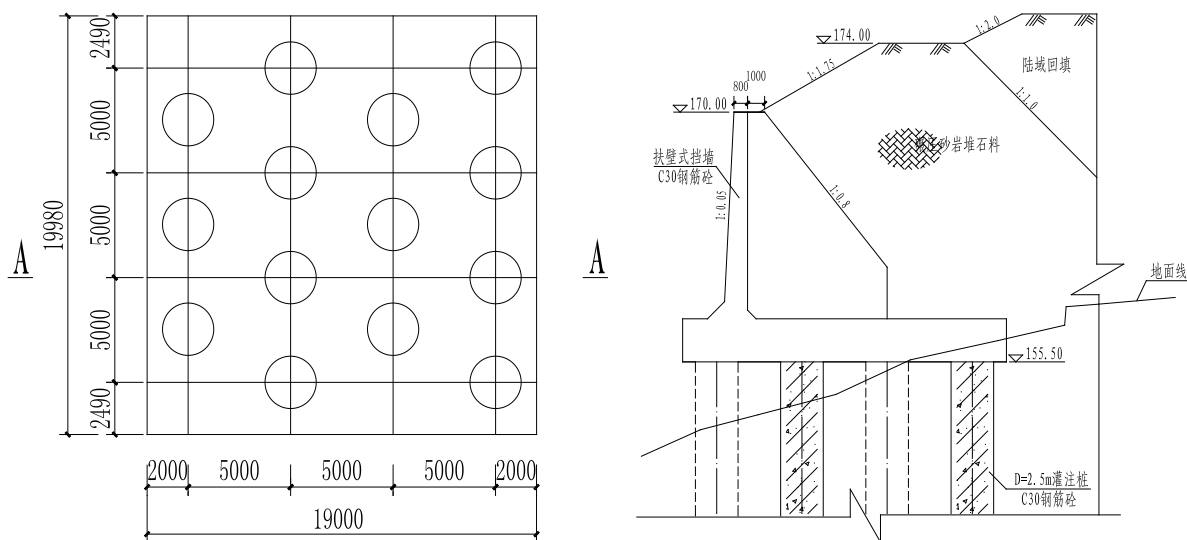


Figure 1. Pile group structure system  
图 1. 群桩结构体系

### 3. 计算模型建立

#### 3.1. 网格剖分

以 56#号剖面为例(见图 2), 采用自编有限元程序 CORE3D [15]针对断面进行计算分析。对典型剖面进行有限单元离散, 采用 8 节点六面体等参单元进行网格划分。网格划分时充分考虑了支挡结构布置、堆积体、基岩、滑带、桩长及其排数优化等, 模型共划分为 339512 个单元, 357230 个节点。其中, 滑带单元厚度为 10 cm。模型网格如图 3 所示。

#### 3.2. 计算参数

1) 荷载: 自重+地表荷载+水库水位从 162 米降至 145 米+汛期 50 年一遇暴雨( $q_{全}$ ), 降速 2 m/d。

2) 材料参数

I) 扶壁挡土墙及桩的混凝土强度等级为 C30, 根据《水工混凝土结构设计规范》(SL/T 191-96), C30 混凝土参数如下: 重度  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ , 轴心抗压强度标准值:  $20.1 \text{ N/mm}^2$ ; 轴心抗拉强度标准值:  $2.01 \text{ N/mm}^2$ 。

II) 岩土体的物理力学参数见表 1。

#### 3.3. 计算过程

数值计算按以下步骤进行:

第 1 步: 基岩形成; → 第 2 步: 堆积体形成; → 第 3 步: 抛石护脚、石渣回填至 EL.155.5 m; → 第 4 步: 防护工程灌注桩成孔; → 第 5 步: 防护工程灌注桩成型; → 第 6 步: 挡土墙成型; → 第 7 步: 碾压砂岩堆石料、陆域回填施工; → 第 8 步: 地下水、地面荷载及江水荷载的施加。

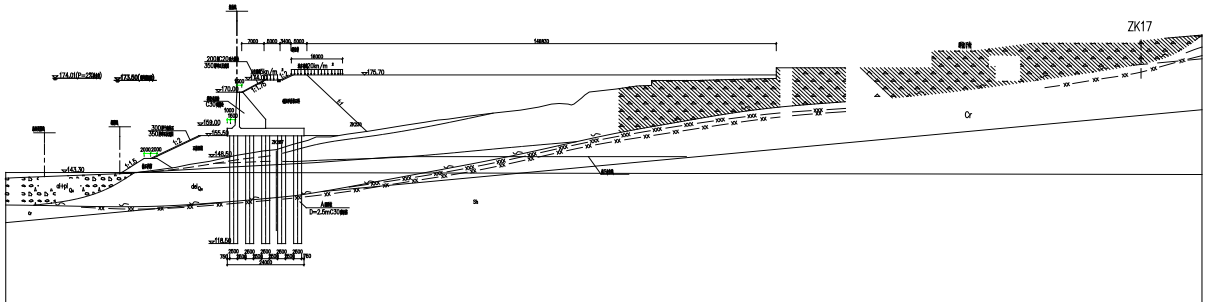


Figure 2. Typical geological profile

图 2. 典型地质剖面

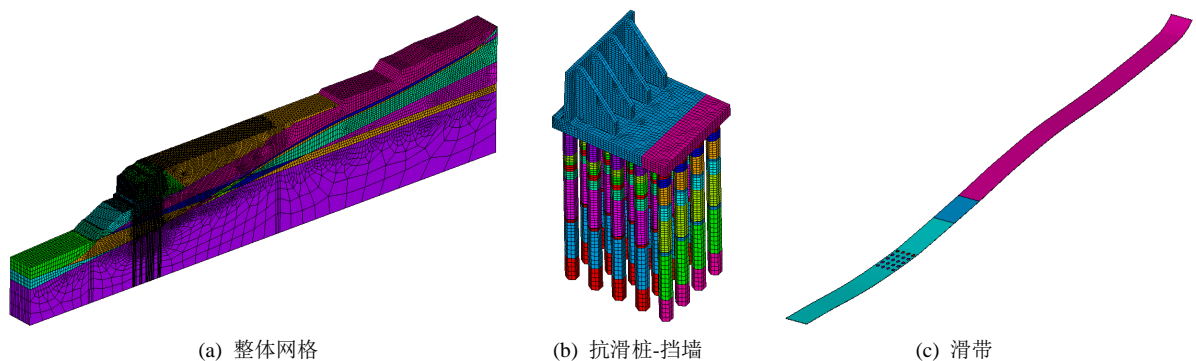


Figure 3. Mesh divided

图 3. 网格剖分

## 4. 计算结果与分析

### 4.1. 变形分析

#### 1) 边坡变形

图 4 为典型剖面位移矢量图。由图可见，影响区域主要集中于陆域回填区附近，对其余部位堆积体的影响不显著。4 排桩与 5 排桩体系作用下的边坡变形趋势基本一致，即竖向向垂直向下，水平向偏向河床。其中，4 排桩体系作用下，竖向最大位移约为 401.1 mm，水平向最大位移约为 75.2 mm；而 5 排桩体系作用下，竖向最大位移约为 384 mm，水平向最大位移约为 64.3 mm。产生上述特征的主要原因在于 5 排桩体系受到桩底的侧向阻力更大，可以更好的分担下滑力，故对边坡的稳定作用明显好于 4 排桩体系，因此竖向与水平向位移更小。

#### 2) 挡墙与抗滑桩变形

图 5 为挡土墙剖面位移矢量图。由图可见，同边坡变形规律相似，挡墙的变形同为竖向向垂直向下，水平向偏向河床。4 排桩体系作用下，水平向与竖向向的最大位移分别为 50.7 mm 与 6.6 mm；而 5 排桩体系作用下，水平向与竖向向的最大位移分别为 44.0 mm 与 6.4 mm。图 6 为抗滑桩与挡土墙变形云图。由图可见，4 排桩与 5 排桩体系作用下挡墙自身的变形相对很小，约在 2 mm 左右。而抗滑桩的变形表现出明显的“S 形”特征，即桩顶处向岸坡弯曲，滑带土处向河床侧弯曲。而总体来看是向河床方向变形，且水平向最大位移约为 50.7 mm。由上述变形规律可以得出滑坡推力的传递机制为，抗滑群桩给下滑土体提供了一个刚性支撑，当滑体土产生的推力传递到第 1 排抗滑桩时，通过上部承台及隔板的作用将荷载分摊到其他抗滑桩上，并通过群桩将上部推力传递给下部的岩体，依靠群桩的下部侧向阻力来承担边坡的下推力，从而使边坡保持稳定。

Table 1. Soil physical-mechanical parameters

表 1. 土体物理力学参数

土层名称	弹性模量/kPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/°	容重/(kN/m <sup>3</sup> )
人工填土	0.95E4	0.35	10	25	20.5
粉土	0.75E4	0.35	22	13	19.8
粉质粘土	0.55E4	0.35	20	10	19.2
土夹碎石	0.95E4	0.30	20	16	19.8
砂卵石	0.40E5	0.30	0	31	21.0
块碎石土	0.25E5	0.30	5	27	20.5

注：上述材料强度为水上，地下水以下均乘 0.9。

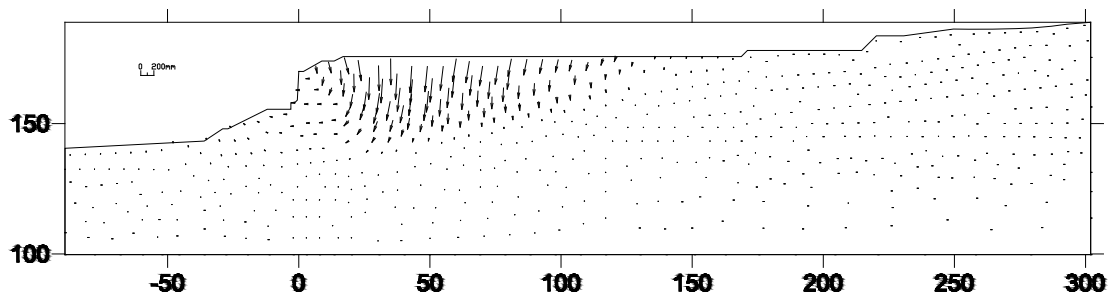


Figure 4. Displacement vector of typical profile

图 4. 典型剖面位移矢量

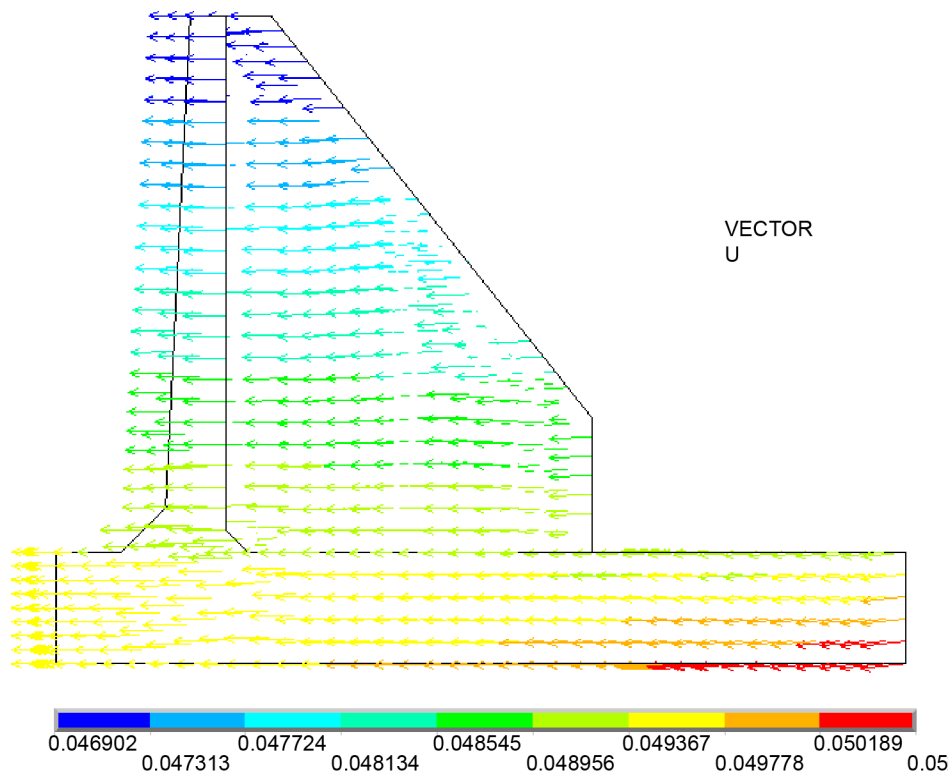


Figure 5. Displacement vector of retaining wall

图 5. 挡土墙剖面位移矢量

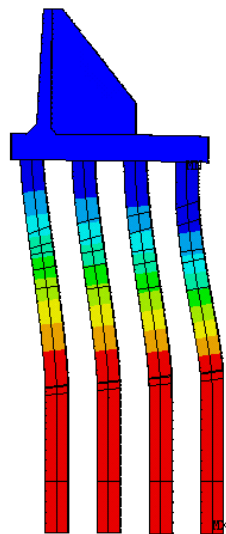


Figure 6. Displacement nephogram of anti-sliding piles and retaining wall

图 6. 抗滑桩与挡土墙位移云图

### 3) 土拱效应

图 7 为抗滑桩与桩间土位移云图。由图可见，桩间土在水平向存在明显的向桩间挤入的现象，形成土拱效应。自滑带土开始随高程增加土拱效应愈加明显，至 5~6 m 高度(距离滑带土)后变化稳定。4 排桩与 5 排桩体系作用下的最大塑性变形小于总变形的 25%，主要为荷载瞬时变形。产生土拱效应的主要原



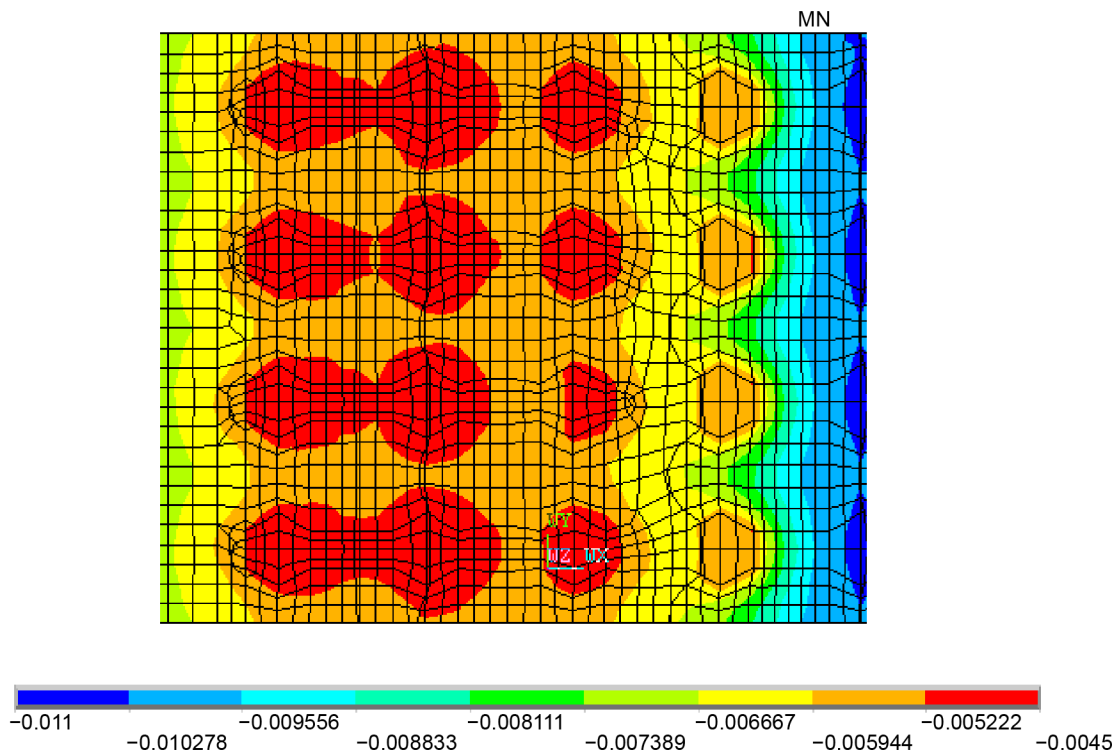


Figure 7. Displacement nephogram of piles and soils in horizontal direction

图 7. 桩及桩间土水平向位移云图

因在于土体在荷载或自重作用下, 土体发生压缩和变形, 从而产生不均匀沉降, 致使颗粒间相互“楔紧”, 于是在一定范围土层内产生土拱效应。产生土拱效应后移动部分土体的压力减小, 而不动部分土体的压力增加。

## 4.2. 结构应力分析

### 1) 应力分析

4 排桩体系作用下, 抗滑桩在滑带土高程附近表现为靠岸坡侧受拉、靠河床侧受压, 最大主拉应力与主压应力分别为 2.5 MPa 与 17.4 MPa; 而在抗滑桩顶高程附近表现为靠河床侧受拉、靠岸坡侧受压, 最大主拉应力与主压应力分别为 2.2 MPa 与 9.5 MPa (见图 8)。5 排桩体系作用下, 靠河床侧抗滑桩拉应力较大, 最大主拉应力大于 2.0 MPa、最大主压应力约为 14.5 MPa, 其余桩体的主拉应力均小于 2.5 MPa, 且最大主压应力在 12.0 MPa 以内。由 4 排桩与 5 排桩体系计算结果可知, 5 排桩体系由于受到桩底的摩阻力较大, 导致单排抗滑桩受力较小, 结构的安全性更高。

### 2) 滑坡体推力分析

图 9 为 4 排桩与 5 排桩体系作用下单宽推力沿滑带分布图。由图可见, 4 排桩与 5 排桩体系作用下滑坡体推力自后缘至抗滑桩逐渐增大, 至抗滑群桩前单宽推力最大, 经过抗滑桩后推力逐渐减小。其中, 第 1 排抗滑桩承担了大部分的滑坡体推力。4 排桩体系作用下的推力峰值约为 4942 kN, 而 5 排桩体系作用下的推力峰值约为 4223 kN。

## 4.3. 安全储备能力分析

天然状态下(见图 10(a)), 随降强系数的增加(1.0~1.25), 边坡的变形变化不大, 没有明显的塑性变形。

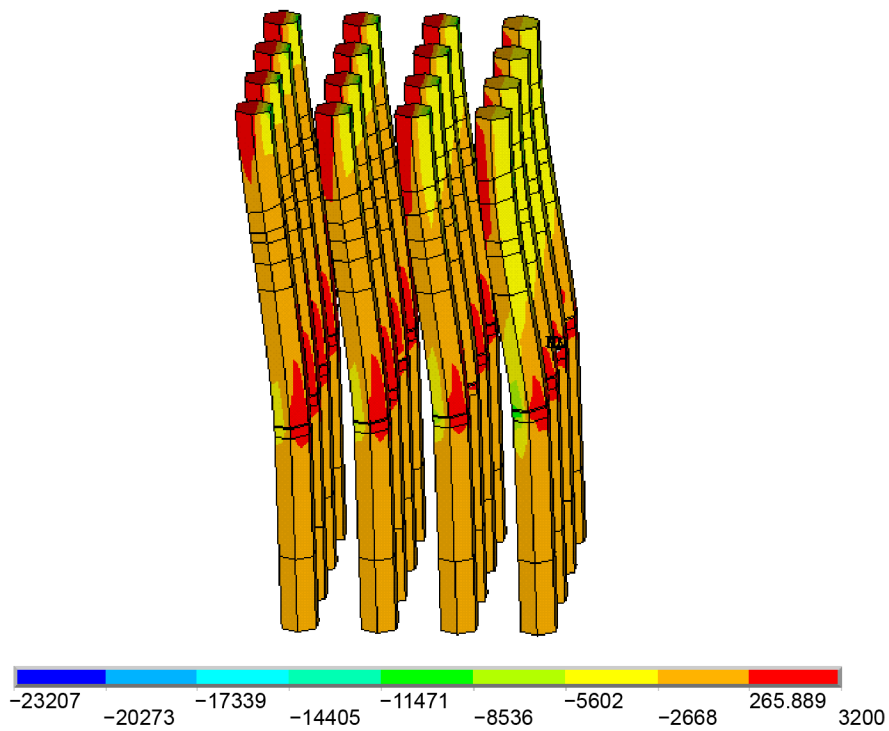
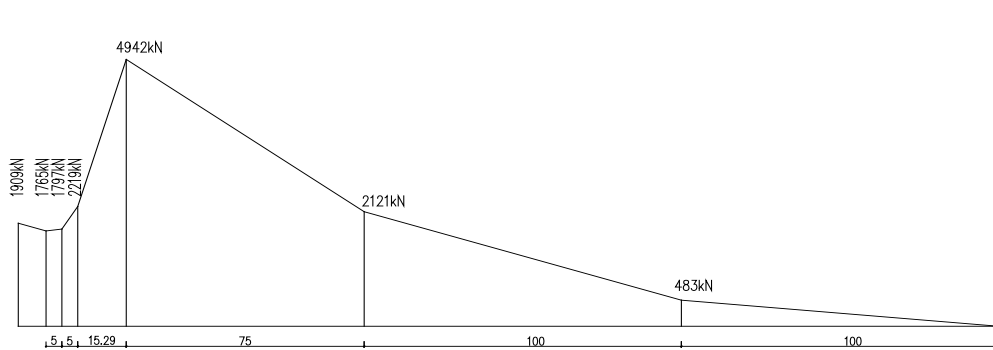
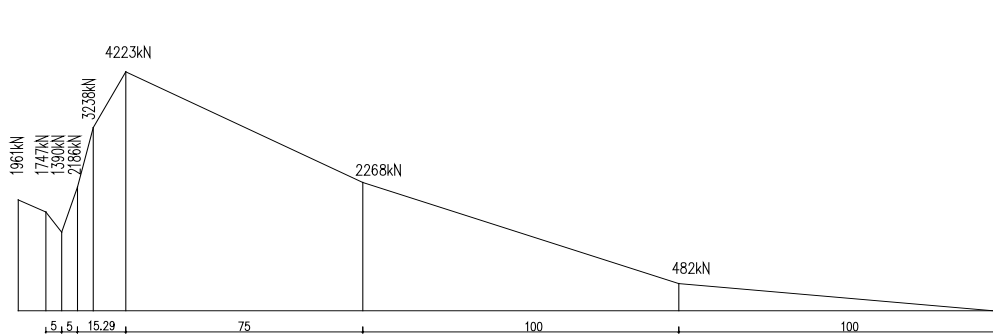


Figure 8. Stress nephogram of anti-sliding piles  
图 8. 抗滑桩应力云图



(a) 4 排桩



(b) 5 排桩

Figure 9. Single width thrust curve of pile group  
图 9. 多排桩单宽推力曲线



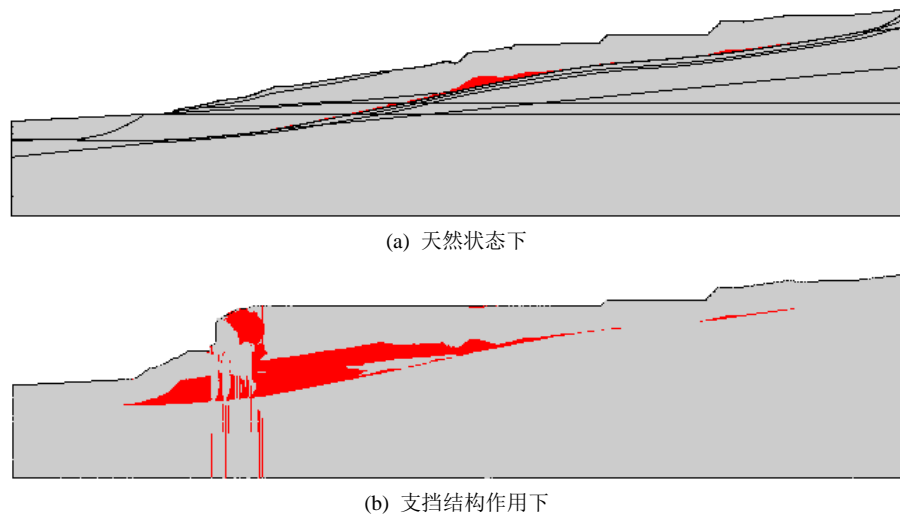


Figure 10. Yield region nephogram of typical profile  
图 10. 典型剖面屈服区云图

滑带土的塑性区逐渐增大,当降强系数达到 1.25 时滑带土塑性区扩展明显,而堆积体的塑性区变化较小。因此,该剖面在天然状态下的安全储备系数应在 1.25 以上。当实施支挡结构与陆域回填后(见图 10(b)),边坡的塑性区面积明显增加。4 排桩与 5 排桩体系作用下,陆域回填区均出现大面积的塑性区,堆积体塑性区面积随滑带土降强产生的变化不大。当降强系数达到 1.15 时,滑带土塑性区扩展明显,继续增大降强系数时两者塑性区均为贯通滑带土。由此可以得出,经过加固后边坡的安全储备系数在 1.15 以上,满足边坡稳定的规范要求。

## 5. 结论

结合涪陵江东边坡治理工程实例,选取典型剖面建立三维有限元模型,采用有限元程序 CORE3D 对抗滑群桩结构体系作用下的边坡稳定性进行了研究,通过对比 4 排桩与 5 排桩数值计算结果,得出以下结论:

1) 在 4 排桩体系作用下,边坡的竖向最大位移约为 401.1 mm、水平向最大位移约为 75.2 mm,挡墙的水平最大位移约为 50.7 mm、竖向最大位移约为 6.6 mm;而 5 排桩体系作用下边坡与挡墙在竖向与水平向的位移均较小。抗滑桩的变形表现为明显的“S 形”,即滑带土处向河床侧弯曲,桩顶处向岸坡弯曲。桩间土在水平向有明显的向桩间挤入现象,形成土拱效应。

2) 在 4 排桩体系作用下,抗滑桩最大主拉应力约为 2.5 MPa,最大主压应力约为 17.4 MPa;而 5 排桩作用下抗滑桩的最大主拉应力超过 2.0 MPa、最大主压应力约为 14.5 MPa。滑坡体推力自后缘至抗滑桩逐渐增大,至抗滑群桩前单宽推力最大,经过抗滑桩后推力逐渐减小。

3) 该剖面在支挡结构作用下的安全储备系数在 1.15 以上,推荐采用 4 排桩方案,但应在节点位置加强纵向受力钢筋和箍筋。桩入岩处均未出现屈服现象,可以考虑按构造要求确定入岩深度。

## 基金项目

西京学院院科研基金项目(XJ170121),贵州省科技计划项目(黔科合基础[2016]1154)。

## 参考文献 (References)

- [1] 赵安林. 抗滑桩结构设计研究——以某建筑边坡为例[J]. 甘肃水利水电技术, 2015, 51(5): 30-33.

- [2] 王聪聪, 李江腾, 廖峻, 等. 抗滑桩加固边坡稳定性分析及其优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(1): 231-237.
- [3] 徐爱民, 柳群义, 朱自强, 等. 层状岩体边坡抗滑桩加固效应的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2453-2458.
- [4] 冯文娟, 琚晓冬. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的抗滑桩设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(Supp.2): 256-259.
- [5] 罗根传, 何忠明, 曾铃. 高速公路改扩建工程边坡抗滑桩加固效果数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2244-2249.
- [6] 朱泳, 朱鸿鹄, 张巍, 等. 抗滑桩加固边坡稳定性影响因素的参数分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 833-840.
- [7] 刘怡林, 宁兆轲, 姜瑞清, 等. 抗滑桩加固含软弱夹层边坡三维弹塑性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Supp.1): 216-221.
- [8] 俞晓, 贺伟明, 汤斌, 等. 抗滑桩截面尺寸和桩侧摩阻对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(2): 64-69.
- [9] 戴自航, 徐祥. 边坡抗滑桩设计计算的三维有限元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2572-2578.
- [10] 年廷凯, 栾茂田, 杨庆, 等. 基于强度折减弹塑性有限元法的抗滑桩加固边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(Supp.): 558-562.
- [11] 年廷凯, 徐海洋, 刘红帅. 抗滑桩加固边坡三维数值分析中的几个问题[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2521-2535.
- [12] 胡晓军, 王建国. 边坡加固工程中抗滑桩间距的确定[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 330-333.
- [13] 梁冠亭, 陈昌富, 朱剑锋, 等. 基于 M-P 法的抗滑桩支护边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 451-469.
- [14] 张谭, 郑宏, 聂治豹. 基于整体分析法的抗滑桩加固边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(6): 109-114.
- [15] 傅少君, 罗滔, 邱焕峰. 边坡工程中抗滑群桩工程特性的数值分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(3): 334-340.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)