

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0747

基于复合抗滑桩模型加固边坡稳定性分析

陈 冲¹, 王 卫², 吕华永³

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 3. 商丘师范学院 建筑工程学院, 河南 商丘 476000)

摘 要: 数值分析方法能够同时考虑抗滑桩的受力行为及加固边坡稳定性, 是研究抗滑桩加固边坡稳定性的重要手段。但在数值模拟计算中, 尚未形成一种建模易、精度高和计算快的抗滑桩数值模拟模型。因此, 提出一种复合单元抗滑桩模型, 基于该模型系统研究抗滑桩顶部自由和固定约束条件下, 不同桩位、间距等设计参数对抗滑桩加固边坡效果的影响以及抗滑桩潜在失效模式, 研究结果表明, 复合单元抗滑桩模型可以真实地模拟桩的力学性能, 计算精度高且计算结果不受单元网格疏密的影响。抗滑桩布置在边坡中部时, 加固边坡安全系数最大, 越靠近边坡两端, 加固边坡安全系数越小。当桩间距 $S \leq 3D$ 时, 边坡潜在滑面被分为两个独立部分, 桩间土形成明显应力拱, 当桩间距 $S \geq 4D$ 时, 桩间中心土体塑性剪切带完全贯通, 桩间土体形成反向应力拱。桩顶自由和固定约束时, 抗滑桩分别布置在边坡中部 ($L_x/L=0.5$) 和边坡中下部 ($L_x/L=0.3$) 时, 抗滑桩易发生弯曲破坏。研究结果对抗滑桩加固边坡工程设计具有指导意义。

关 键 词: 抗滑桩; 边坡; 稳定性; 桩位; 间距; 失效判别

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)08-3207-11

Stability analysis of slope reinforced with composite anti-slide pile model

CHEN Chong¹, WANG Wei², LÜ Hua-yong³

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Architecture and Engineering, Shangqiu Normal University, Shangqiu, Henan 476000, China)

Abstract: The numerical analysis method is an important method to study the stability of the slope reinforced with anti-slide pile, which can take both the mechanical behavior of the anti-slide pile and the stability of the slope into consideration at the same time. However, in the previous numerical simulation, it is hard to find a numerical model of the anti-slide pile with easy modeling, high precision and low time cost. Therefore, an anti-slide pile model coupled with the composite solid-structural element is proposed in this study. Based on this model, the influence of design parameters such as pile location and space on the stability of slope reinforced by composite anti-slide pile are studied under the free and fixed constraints of anti-slide pile top. Besides, the potential failure modes of anti-slide pile is also studied. The results show that the proposed model can realistically simulate the mechanical properties of the pile with a high calculation accuracy, and the calculation results are independent on the mesh density. When the anti-slide pile is arranged in the middle of the slope, the safety factor of the reinforced slope reaches to a maximum value. The closer to both ends of the slope, the smaller the safety factor of the reinforced slope. When the pile space is less than $3D$, the potential sliding surface of the slope is divided into two independent parts, and the soil between the piles forms an obvious stress arch. When the pile space is larger than $4D$, the plastic shear zone of the center soil between the piles completely penetrates, and the soil between the piles forms the reverse stress arch. When the anti-sliding piles are arranged in the middle ($L_x/L=0.5$) and in the lower part of the slope ($L_x/L=0.3$) with the free and fixed constraints in pile top, respectively, the anti-sliding pile is easy to bend and damage. The results have guiding significance for the engineering design of slope reinforced with anti-slide pile.

Keywords: anti-slide pile; slope; stability; pile location; pile space; failure discrimination

1 引 言

国内外工程实践表明, 抗滑桩适用范围广且能

与其他防治措施灵活配合使用, 在边坡加固工程中具有明显的技术优势^[1]。因此, 对于抗滑桩加固边坡的作用机制和设计计算理论研究一直未曾间断并

收稿日期: 2018-08-05

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2018YFC1507805)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program (2018YFC1507805).

第一作者简介: 陈冲, 男, 1987 年生, 博士后, 主要从事露天矿边坡稳定性评价与控制方面的研究。E-mail: 451431687@qq.com

取得了较丰硕的成果, 桩侧土压力大小和分布形态^[2]、桩-土相互作用^[3]、桩的计算模型^[4-5]和设计方法等^[6-8]都取得了较大的进展。

抗滑桩是一种侧向受荷桩, 在滑坡推力作用下, 它可以调动远超过桩体宽范围的地层与之共同抗滑, 使加固地层的抗力得到发挥。由于岩土工程的对象复杂性, 单从理论上对桩的受力特性进行分析有一定的困难和局限性, 难以将桩的受力行为及边坡的稳定性同时考虑, 即把桩-土看成一个共同的体系, 而数值分析方法则能适用复杂的地质条件, 同时考虑岩土体与结构物的相互作用, 已经成为解决岩土问题的重要方法。国内外学者采用数值分析方法对桩-土共同作用下抗滑桩的受力特性进行了研究。Kourkoulis 等^[9]研究了均布边界位移作用下抗滑桩的土拱效应, 研究表明, 在垂直推力方向上产生土拱效应的最大间距为 4 倍桩径, 超过 4 倍的桩径后, 可按单桩考虑, 桩间距减小可加强桩间土拱效应, 提高抗滑桩群加固边坡体系抗力, 但桩间距减小的同时会增加抗滑桩数量, 造成工程投资增加。雷文杰等^[10]研究了单排抗滑桩不同设桩位置对边坡安全系数、滑裂面的位置和形态的影响, 研究表明, 抗滑桩位于斜坡中下部, 桩长短且推力小, 为最佳桩位。陈正等^[11]对抗滑桩水平承载力进行数值模拟, 研究表明, 较大桩径和较高桩周土内摩擦角对提高抗滑桩水平承载力有显著作用。

数值模拟技术有效延伸和扩展了研究人员的认知范围, 为洞悉岩土体内部的破坏机制提供了强有力的可视化手段。一般可以建立实体单元桩^[12-14]和结构单元桩^[15-17]等模型来模拟工程实际中的抗滑桩。实体单元桩模型即根据工程实际中抗滑桩的形状和尺寸采用网格生成器生成三维结构网格模型。但是模型的单元网格尺寸对计算结果的精度影响很大。而且采用实体单元模拟桩时, 不能直接获取抗滑桩沿轴线方向上的任意截面的弯矩和剪力; 结果单元桩是对工程中实际抗滑桩的一种抽象, 采用简单的单元形式模拟复杂的结构体。一个桩单元采用一系列的结构节点和结构构件组合而成, 通过指定两端节点的坐标和中间结构构件数量进行建立。计算过程中, 结构节点与周围实体单元网格建立连接, 通过连接实现结构与岩土体或其他结构的相互作用。但是当结构单元桩与周围实体单元网格进行连接时, 所有连接默认为三个平移自由度刚性和三个转动自由度自由, 需要根据工程实际情况进行改变连接形式。另外, 由于结构单元桩是建立在

实体单元网格中, 相当于结构单元和实体单元协同受力, 其计算结果的精度受限于周围实体单元的受力状态^[18-19]。

综上所述, 不同抗滑桩模型在初始建模、计算周期和精度各有优势和缺点, 尚未形成一种建模易、精度高和计算快的抗滑桩数值模拟模型。因此, 本文在以往研究基础上, 提出了一种复合单元抗滑桩模型, 基于该模型系统研究抗滑桩顶部自由和固定约束条件下, 不同桩位、间距等设计参数对抗滑桩加固边坡效果的影响以及抗滑桩的潜在失效模式, 对抗滑桩加固边坡工程设计具有指导意义。

2 复合单元桩模型验证

2.1 复合单元桩模型

复合单元桩是采用实体单元网格建立桩模型, 模型中心设置结构单元, 不同的是实体单元周边和横截面均设置结构单元, 实体单元网格节点用结构单元固定连接, 这样沿桩长的每一层实体单元都形成一个固定圆盘, 圆盘只能产生垂直桩轴线的旋转。通过设置实体桩模型刚度为结构单元的 10^{-6} 倍或更小, 桩的变形和受力全由中心结构单元承担, 桩的剪力和弯矩便可以通过中心结构单元直接获取。

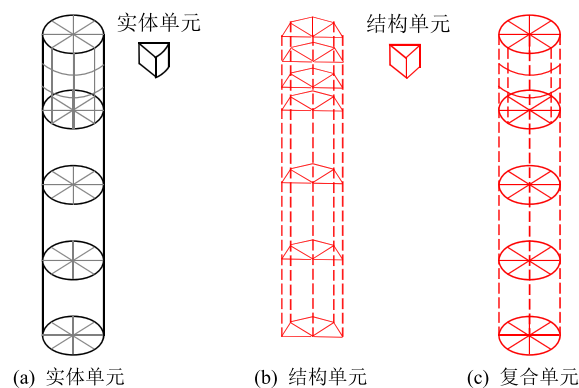


图1 复合单元桩模型

Fig.1 Composite solid-structural pile model

2.2 结构受力理论分析

根据结构力学中均布荷载作用的悬臂梁理论和两端固定梁理论, 桩身挠度 (f)、弯矩 (M) 和剪力 (F) 的计算表达式如下:

$$f = \frac{qL^4}{24EI} (3 - \xi + \xi^4) \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{2} q(L-h)^2 \quad (2)$$

$$F = q(L-h) \quad (3)$$

$$\xi = \frac{L-h}{L} \quad (4)$$

$$f = \frac{qL^2(L-h)^2}{24EI}(1-\xi)^2 \quad (5)$$

$$M = \frac{qL^2}{2} \left(1 - \frac{6\xi h}{L} \right) \quad (6)$$

$$F = \frac{qL}{2} (2\xi - 1) \quad (7)$$

式中： E 为桩的弹性模量； I 为桩的惯性矩；圆形截面 $=0.25\pi r^4$ ； r 为桩的半径； L 为桩身长度； h 为桩截面高度； q 为均布荷载。

桩左侧沿轴向施加均布荷载 $q=48\text{ kN/m}$ 时，桩长 $L=10\text{ m}$ ，当桩底固定且桩顶自由约束时，根据式(1)~(4)，桩身挠度存在最大值 $f_{\max}=10\text{ mm}$ ，弯矩和剪力存在最大值 $M_{\max}=2.4\text{ MN}\cdot\text{m}$ 和 $F_{\max}=0.48\text{ MN}$ 。当桩底和桩顶均固定约束时，根据式(5)~(7)，桩身挠度存在最大值 $f_{\max}=0.208\text{ mm}$ ，弯矩和剪力存在最大值 $M_{\max}=0.4\text{ MN}\cdot\text{m}$ 和 $F_{\max}=0.24\text{ MN}$ 。

2.3 计算模型及参数

由于圆形截面桩的对称性，因此选取半根桩作为研究对象。模型长 $L=10\text{ m}$ ，桩径 $D=1.0\text{ m}$ 。模型底部采用固定边界，顶部考虑自由和固定两种工况。为了检验网格尺寸对计算结果精度的影响程度，建立4个轴线方向划分为10、20、40和80个网格的实体单元桩模型，模型截面的尺寸一致，如图2所示。

实体单元桩和结构单元的计算参数如表1所示。

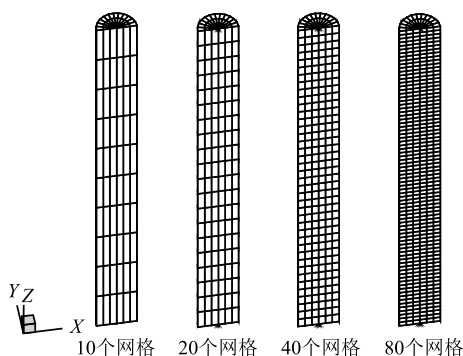


图2 FLAC^{3D}计算模型
Fig.2 Grid model in FLAC^{3D}

表1 计算参数

Table 1 Mechanical parameters for simulation

名称	弹性模量 E / GPa	体积模量 K / GPa	剪切模量 G / GPa	泊松比
桩体	122.2	101.8	47.0	0.3
结构单元	122.2	101.8	47.0	0.3

2.4 计算结果分析

图3为抗滑桩结构变形和受力特征，采用复合单元桩进行模拟时，单元网格的疏密对计算结果精度影响很小，桩身挠度、剪力和弯矩的最大相对误差均小于10%，可以满足工程的精度要求。

3 复合单元桩加固边坡稳定性

3.1 计算模型及参数

选用理想化边坡模型进行稳定性分析，模型长35 m，高20 m，坡高10 m，坡率为1:1.5，如图4所示。计算中选用复合桩模型进行模拟分析，桩径为 D ，桩间距为 S ，桩位 L_x 为桩轴线到坡脚的距离， $L=15\text{ m}$ 为坡脚到坡顶的水平距离。计算过程中模型四周为滚动边界，底部为固定边界。

采用Mohr-Coulomb模型对岩土材料进行模拟分析，采用弹性模型对桩体进行模拟分析，结构单元均采用Beam单元，桩-土界面（桩周和桩底）采用Interface单元模拟。桩、结构单元、接触面和岩土体的计算参数如表2所示。

3.2 加固边坡模型验证

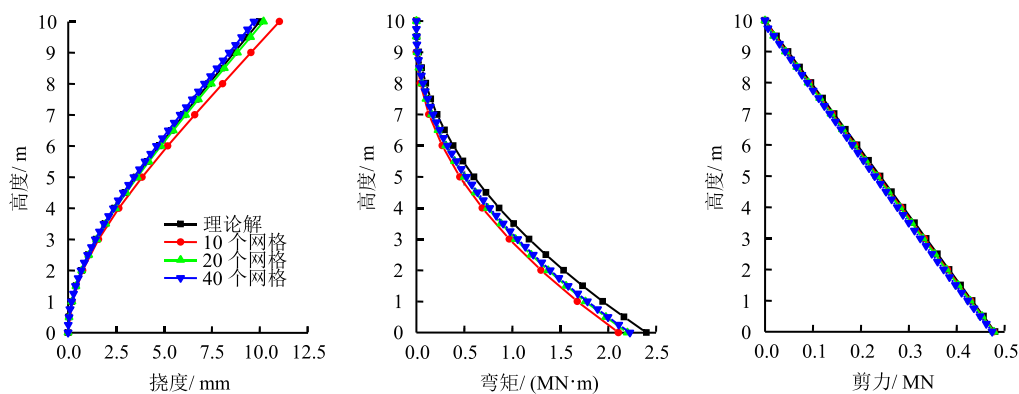
边坡在不设桩的条件下的破坏形态如图5(a)所示，运用强度折减法计算边坡在重力场作用下的安全系数为1.16，与极限平衡法计算的安全系数1.14较为接近。从图5可以看出，在剪应变率梯度较大区域形成了塑性贯通区域，贯通区域即为潜在滑动面，滑动面位置与极限平衡法计算得到的边坡最危险滑动面位置（见图5(b)）基本一致。

边坡在中部设桩的条件下的破坏形态如图5(c)、5(d)所示，运用强度折减法计算边坡的安全系数FOS为1.55，设桩边坡内部未形成剪切应变贯通区，未设桩边坡潜在滑面被抗滑桩分割为两个独立的部分，潜在滑面由边坡深部向浅部发展。桩顶自由和固定情况下边坡变形模式如图6所示，设桩能够有效限制边坡变形，桩顶自由约束时，桩后土体和抗滑桩发生脱离，桩顶发生了较大的变形，而桩顶固定约束更好地限制了边坡变形。

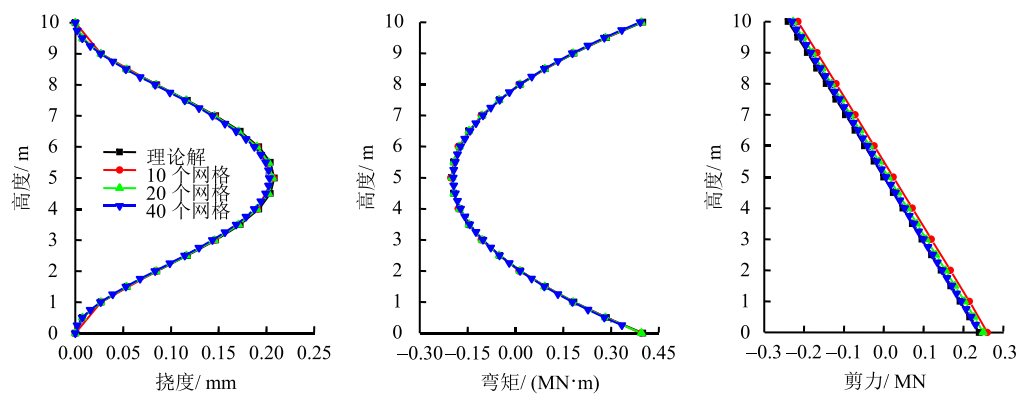
3.3 桩位分析

抗滑桩布置在 $L_x/L=0.1、0.3、0.5、0.7、0.9$ 等5个不同的位置时边坡的安全系数如图7所示。

由图可知，抗滑桩设置在边坡中部（ $L_x/L=0.5$ ）时边坡的安全系数最大，越靠近坡脚和坡顶位置，边坡安全系数越小。但是，桩顶约束条件（桩顶自由和桩顶固定）对边坡安全系数影响不大，桩顶固定条件下的边坡安全系数较桩顶自由条件下仅提高了0.01。



(a) 复合单元桩 (桩顶自由)



(b) 复合单元桩 (桩顶固定)

图3 桩的结构变形和受力特征

Fig.3 Characteristics of deformation and force in pile

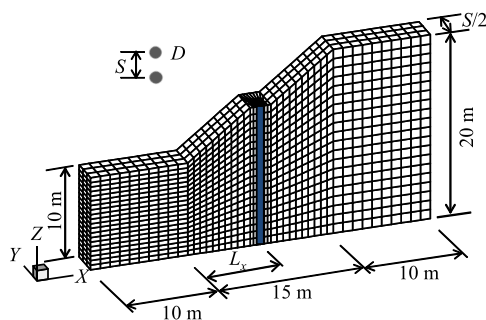


图4 边坡模型

Fig.4 Numerical model of slope

表2 结构单元和岩土体的物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of structure and rock mass

材料名称	重度 γ / (kN/m ³)	弹性模量 E / kPa	泊松比 ν	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	直径 D / m
土体	20	200	0.25	10	20	—
桩体	—	60 000	0.20	—	—	0.8
结构单元	—	60 000	0.20	—	—	—
接触面	—	200	0.25	10	20	—

不同布设位置下, 抗滑桩加固边坡的失稳形态有所不同, 不同桩顶约束条件 (固定和自由) 的边

坡破坏形态和变形模式基本相同。由图 8、9 可以看出, 当抗滑桩设置在边坡中下部 ($L_x/L=0.1$ 和 $L_x/L=0.3$) 时, 桩后坡体内部产生了贯通的塑性剪切带, 滑体越过桩顶产生了整体推移式滑动; 当抗滑桩设置在边坡中上部 ($L_x/L=0.7$ 和 $L_x/L=0.9$) 时, 桩前坡体内部形成了贯通的塑性剪切带, 边坡脱离抗滑桩产生了整体牵引式滑动。对比抗滑桩加固前后边坡的破坏形态可知, 边坡的破坏形式与抗滑桩布置位置关系较大, 当抗滑桩布置在边坡中部 $L_x/L=0.5$ 时加固边坡的效果最优。

由图 10 可知, 抗滑桩布置在边坡中部时, 桩身挠度和弯矩最大, 越靠近边坡两端, 桩身挠度和弯矩相应减小。桩顶自由时, 最大挠度位于桩顶, 最大弯矩位于桩身中下部, 桩顶固定时, 最大挠度位于桩身中部, 最大弯矩位于桩顶。沿桩轴线的第一个剪力极值为潜在滑面影响深度。桩顶自由时, 影响深度和未设桩边坡潜在滑面位置基本一致, 最大弯矩位于影响深度以下。桩顶固定时, 影响深度为桩顶以下 $0.25L \sim 0.35L$ 之间, 最大弯矩位于影响深度以上。一般来说, 抗滑桩抗剪不抗弯, 桩身弯矩越小, 抗滑桩越不容易失效。桩顶自由时最大弯矩

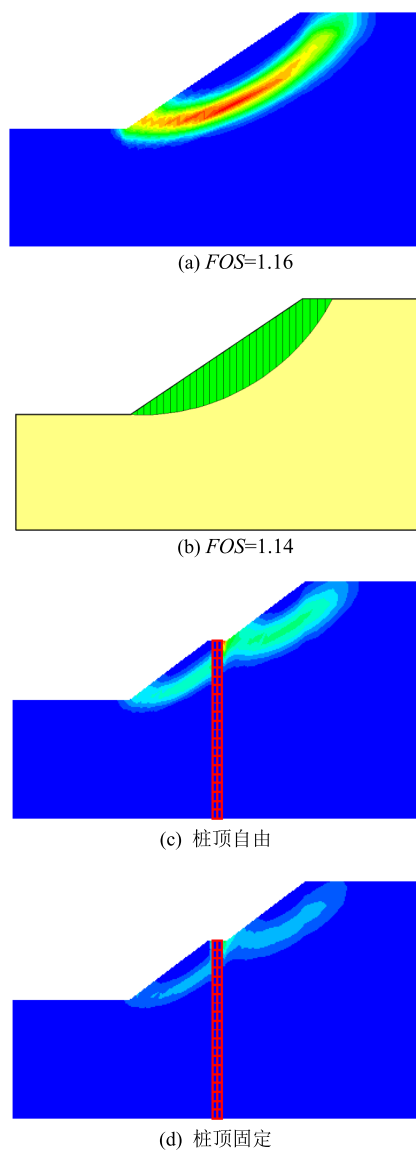


图 5 边坡破坏形态

Fig.5 Failure modes of reinforced slope

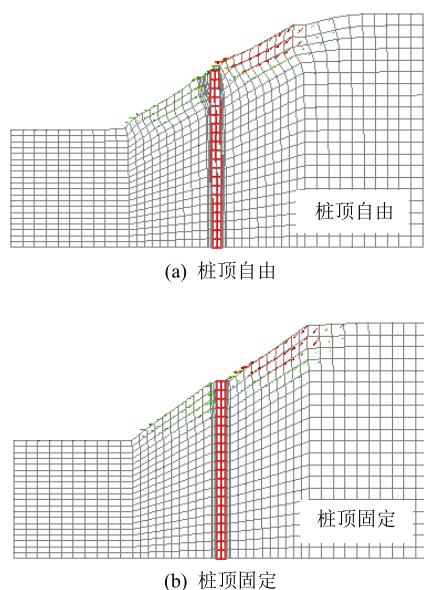


图 6 边坡变形模式

Fig.6 Deformed mesh of reinforced slope

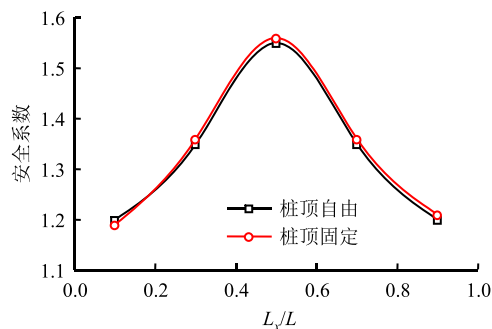


图 7 抗滑桩位置对边坡稳定性的影响

Fig.7 Effects of pile position on slope stability

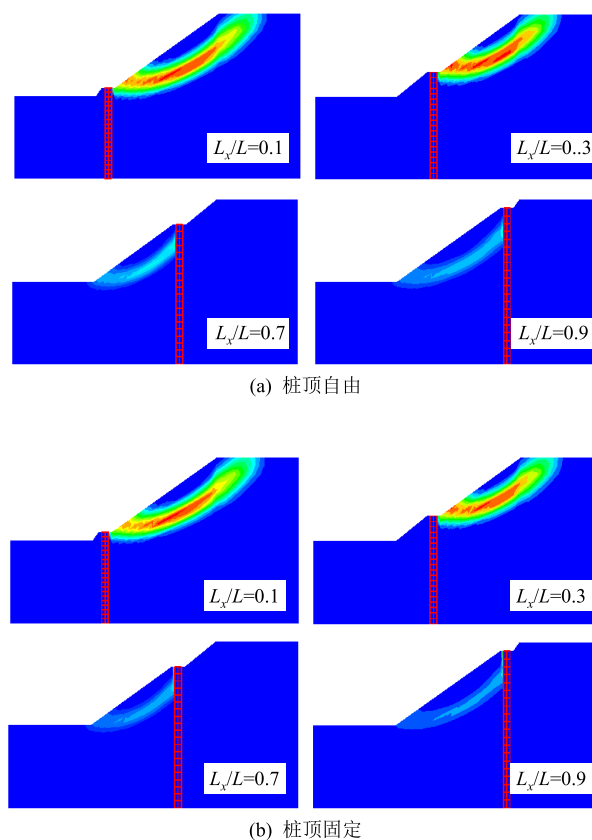


图 8 边坡滑动模式

Fig.8 Effects of pile position on failure mode of slope

是桩顶固定时最大弯矩的 2 倍，最大剪力却是桩顶固定时最大剪力的 1/2。桩侧土压力可通过弯矩的二次求导或者剪力一次求导获得，也就是作用在桩身轴线上的载荷集度，桩侧阻力为正值时，其方向与滑动方向相反，正值越大说明抗滑桩提供的抗力越大，加固边坡也越安全。桩顶自由时，沿桩轴线 2/3 长度土压力为正值，桩顶固定时，沿桩轴线的桩侧阻力基本为正。

3.4 间距分析

抗滑桩布置在边坡中部于 ($L_x/L = 0.5$) 时，不同桩间距 $S = 2D$ 、 $3D$ 、 $4D$ 、 $6D$ 、 $8D$ 加固边坡的

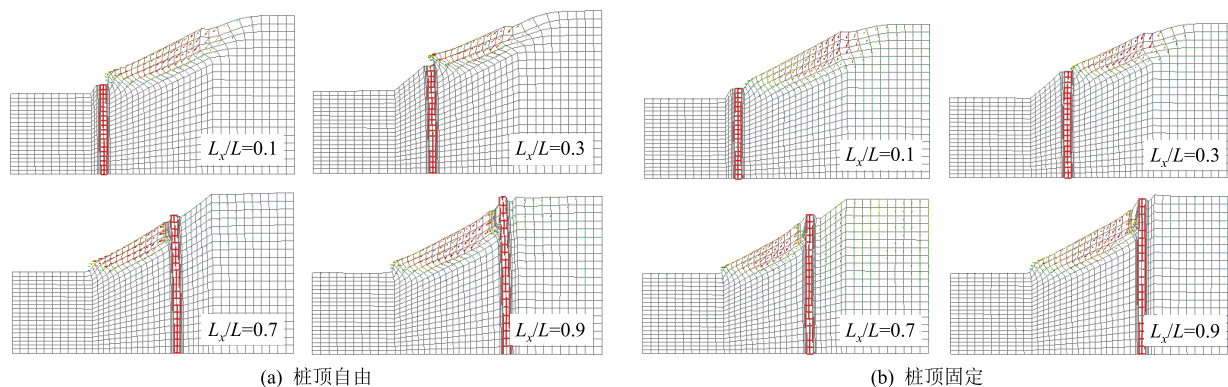


图9 不同设桩位置边坡变形模式

Fig.9 Effects of pile position on deformed mesh of slope

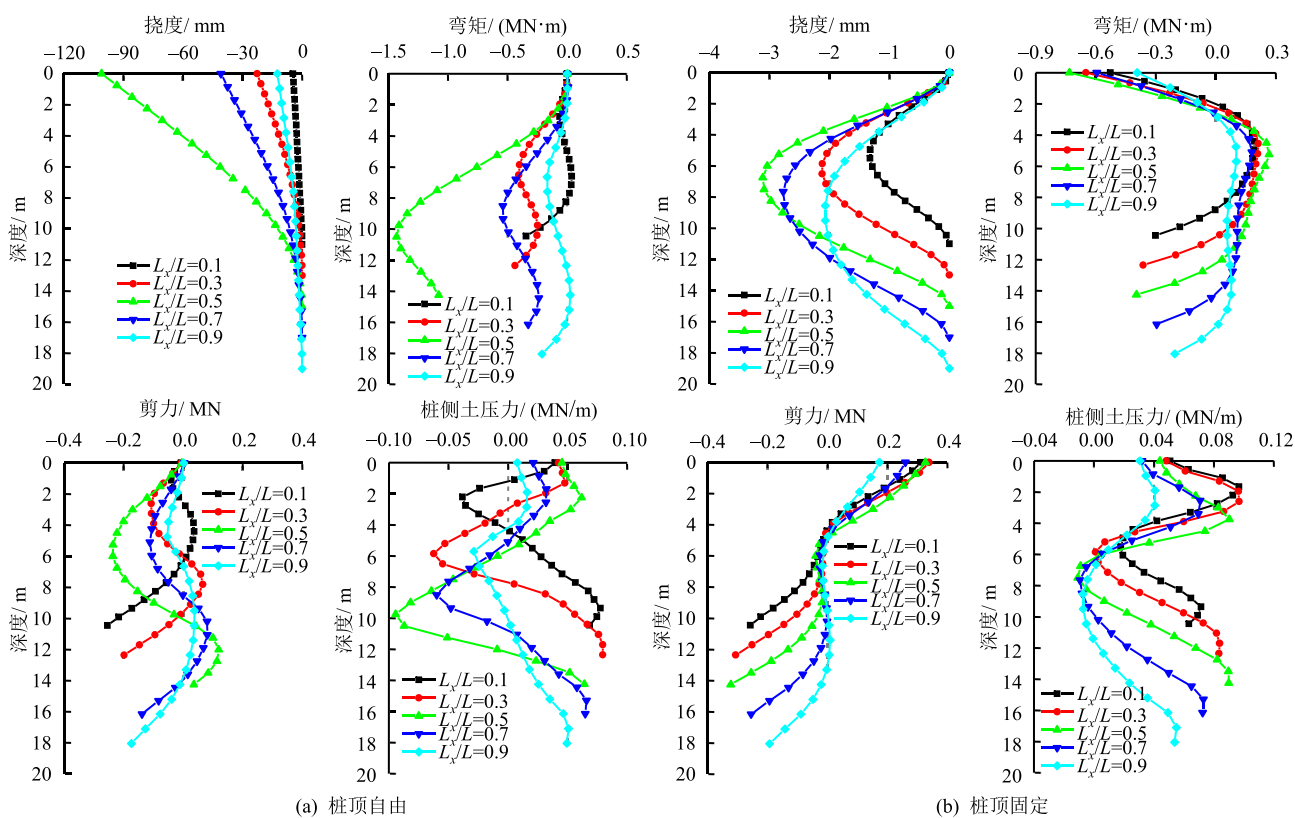


图10 不同设桩位置抗滑桩受力特性

Fig.10 Mechanical behavior of pile in different positions

安全系数如图 11 所示。由图可知, 桩间距越小, 加固边坡的安全系数越大。桩间距一定时, 桩顶固定加固边坡安全系数较桩顶自由略大。

由图 12 可知, 随着桩间距增加, 桩身挠度先增大后减小。当桩间距 $S \leq 6D$ 时, 桩间距增加, 桩体挠度略微增加。当桩间距 $S \geq 8D$ 时, 桩间距增加, 桩身挠度减小。桩身挠度和桩间土拱效应密切相关, 当桩间形成不了土拱时, 桩身挠度减小。桩间距越大, 桩身弯矩、剪力和桩侧阻力越大。但是, 桩顶自由的最大弯矩是桩顶固定的 2 倍, 而桩顶固定的最大剪力是桩顶自由的 2 倍。

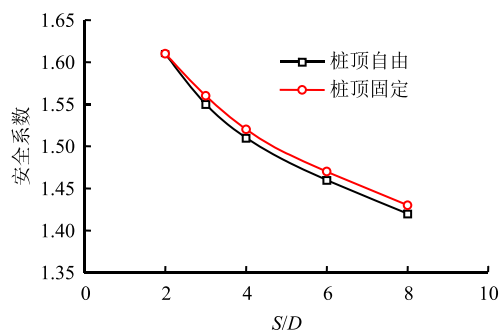


图11 不同桩间距对边坡稳定性的影响

Fig.11 Effects of pile space on slope stability

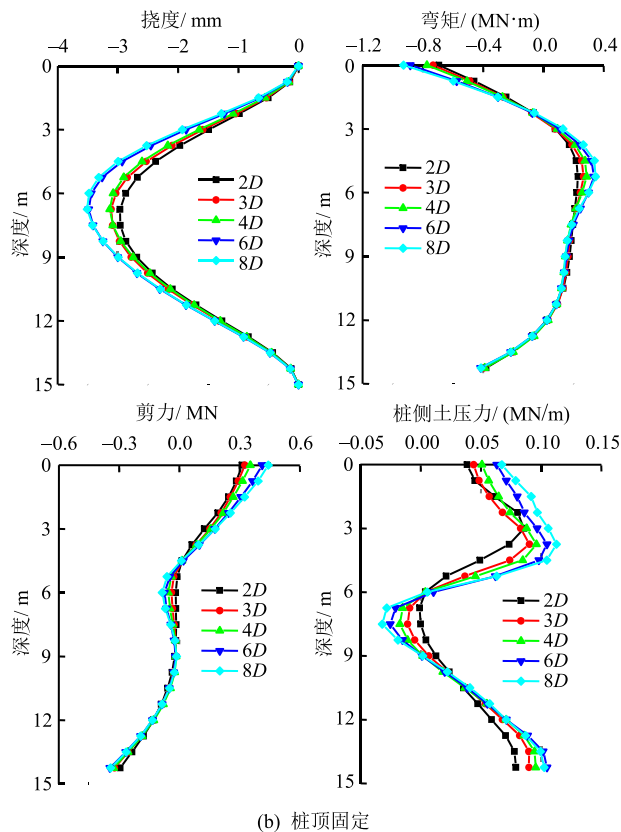
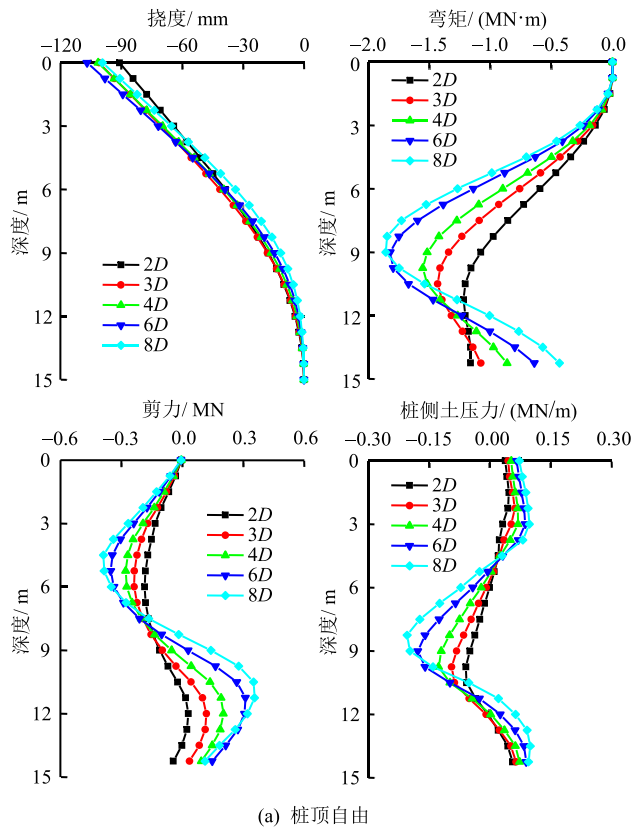


图 12 不同间距抗滑桩受力特性

Fig.12 Mechanical behavior of pile with different spaces

桩身剪力的第一个极值点可以看作是潜在滑面影响深度，见表 3。桩顶自由约束时，影响深度随

着桩间距的增大而减小，最大弯矩位于潜在滑面影响深度以下；桩顶固定约束时，影响深度不变，最大弯矩位于潜在滑面影响深度以上。

表 3 潜在滑面影响深度

Table 3 Depth of potential sliding surface

桩间距	桩顶自由 / m	桩顶固定 / m
2D	6.75	6.75
3D	6.00	6.75
4D	6.00	6.75
6D	6.00	6.75
8D	5.25	6.75

不同桩间距各切面位置的边坡破坏形态如图 13 所示，其中切面 $y=0$ m 通过桩轴线，切面 $y=0.4$ m 是距桩轴线 0.4 m 的位置。当间距 $S=2D$ 、 $3D$ 、 $4D$ 、 $6D$ 、 $8D$ 时，对应切面 $y=0.8$ 、 1.2 、 1.6 、 2.4 、 3.2 m 为桩间土中心位置。

当 $S=2D$ 时，潜在滑面被抗滑桩分割为两个明显独立部分；当 $S=3D$ 时，潜在滑面整体上被抗滑桩分割为两个独立部分，但在桩间中心切面有轻微连通；当 $S=4D$ 和 $6D$ 时，在靠近抗滑桩位置潜在滑面被分割为明显两个部分，但在桩间中心切面的潜在滑面往深部土体发展并逐渐连通；当 $S=8D$ 时，桩间中心切面的潜在滑面完全贯通，和未设置抗滑桩滑面位置基本一致。

抗滑桩加固边坡时，可根据朗肯土压力理论粗略求得最大桩间距 S 与桩径 D 之比^[20]：

$$\frac{S}{D} = \frac{K_p^2}{K_p - K_a} \quad (8)$$

式中：被动朗肯土压力 $K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$ ；

主动朗肯土压力 $K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ 。

通常土体的内摩擦角 $20^\circ < \varphi < 30^\circ$ ，根据公式可以求得 $2.7 < S/D < 3.4$ 。

不同桩顶约束条件和桩间距，抗滑桩 1 m 深的水平方向应力如图 14 所示。当桩间距 $S=2D$ 时，桩间土形成明显的应力拱 ($\sigma_{xx} = -10$ kPa)，应力拱形状为三角形，拱脚位于桩中心连线位置；当桩间距 $S=3D$ 时，桩间土出现微弱反向应力拱，拱脚前移；当桩间距 $S=4D$ 时，桩间土反向应力拱加强，拱脚继续往前移动；当桩间距 $S=6D$ 时，桩间土反向应力拱消失；当桩间距 $S=8D$ 时，桩间土反向应力拱 ($\sigma_{xx} = -10$ kPa) 消失，反向应力拱 ($\sigma_{xx} = -20$ kPa) 形成。

3.5 失效判别

从抗滑桩的受力和强度观点出发, 抗滑桩加固边坡时受到轴向拉力、水平推力和桩-土界面的相互作用力。在多力联合作用下, 抗滑桩可能存在剪切、弯曲和受拉破坏 3 种失效模式。一般来说, 抗滑桩的抗剪强度要远大于抗拉强度, 因此, 当弯曲变形引起的拉应力超过了抗滑桩的抗拉强度时, 抗滑桩发生弯曲破坏。

假设 f_t 为抗滑桩的抗拉强度, 内聚力 c , 内摩擦角 φ , 桩身某点的最大拉应力 σ_t , 最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 , 定义抗滑桩的抗拉安全系数 F_t 为

$$F_t = \frac{f_t}{\sigma_t} \quad (9)$$

抗拉安全系数 F_t 随最大拉应力 σ_t 的增大逐渐减小, 当抗拉安全系数 $F_t > 1$ 时, 则抗滑桩未发生张拉破坏, 否则表示抗滑桩发生张拉破坏。

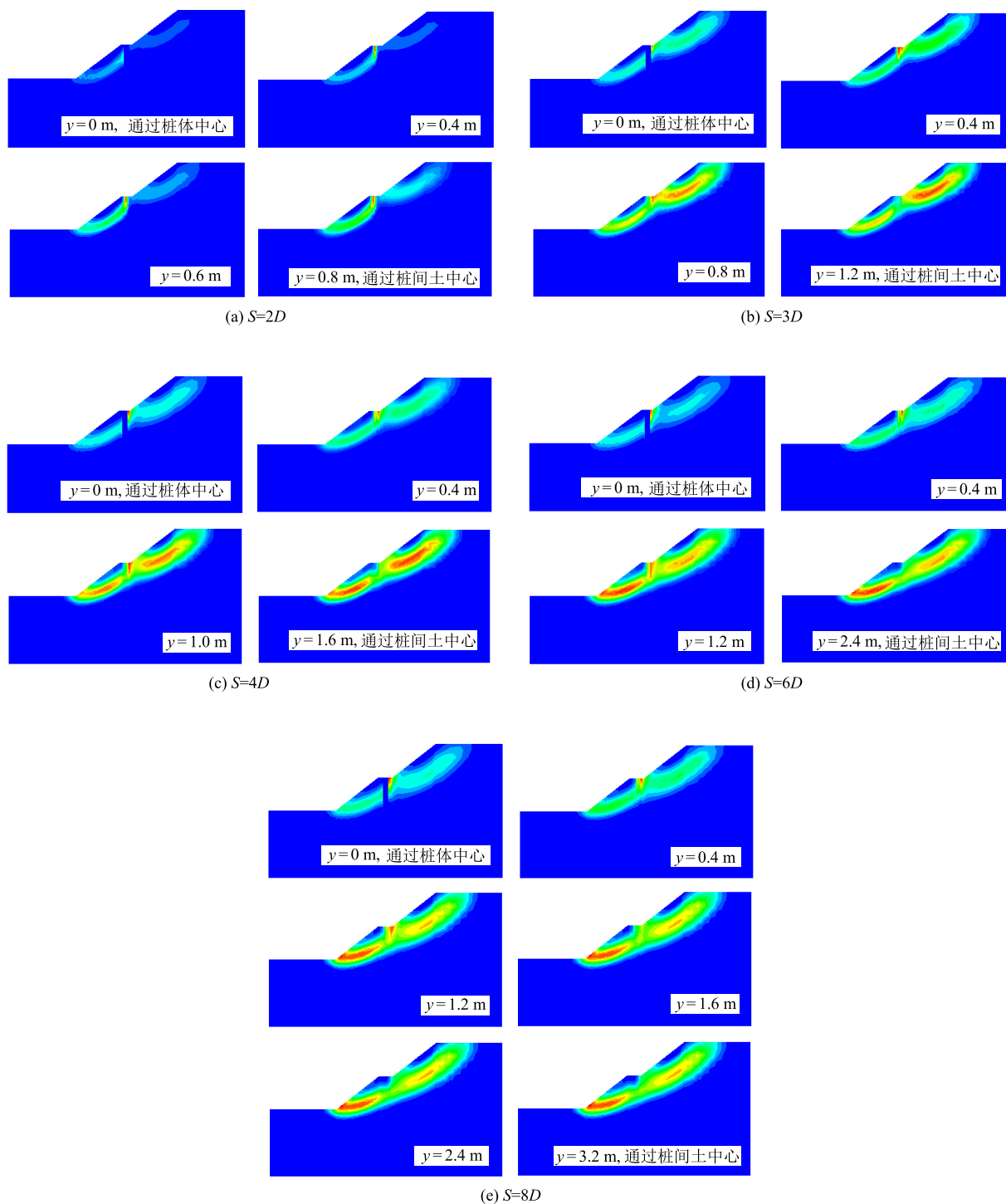
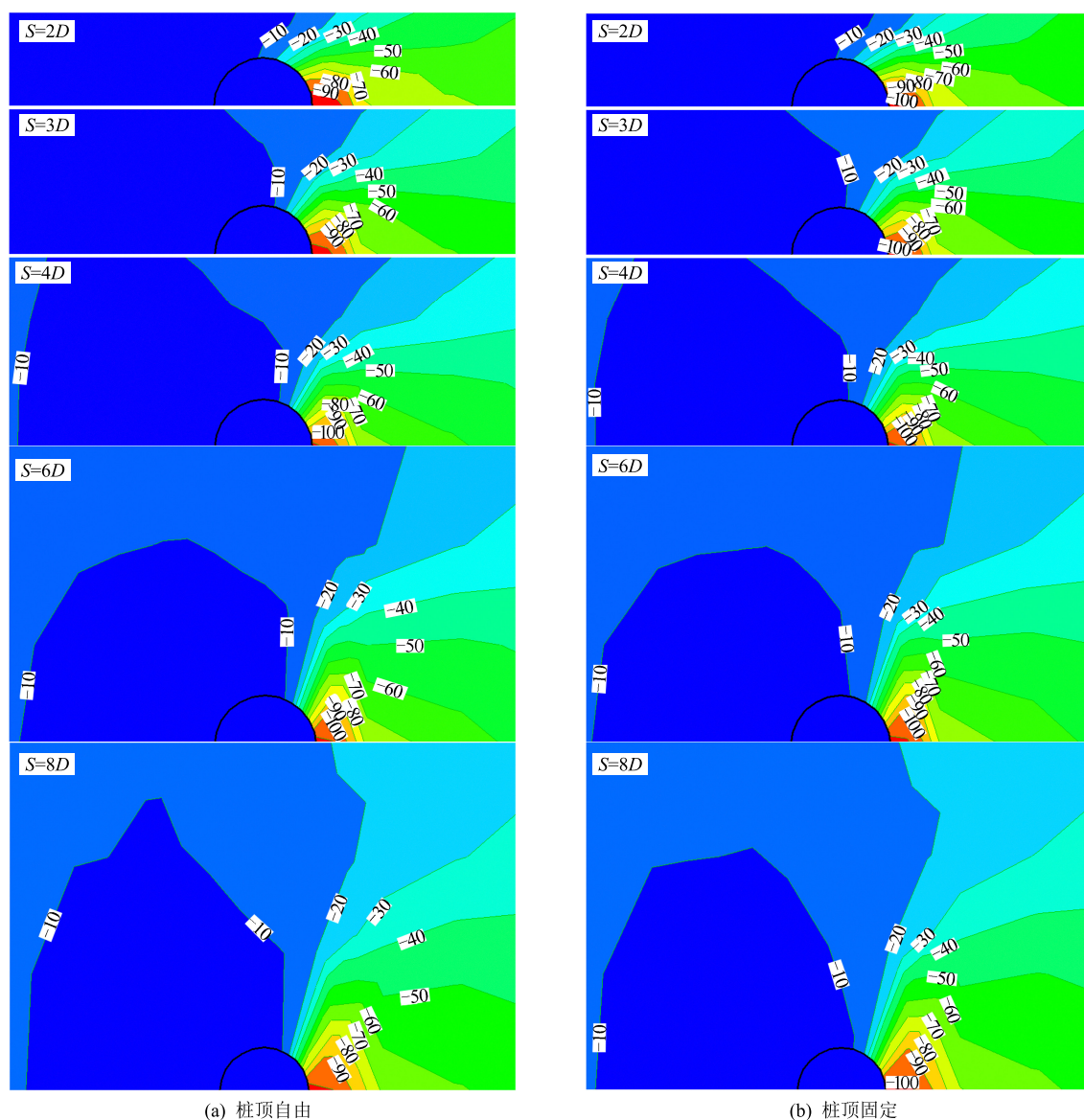


图 13 不同切面边坡破坏形态

Fig.13 Failure modes of slope at different sections



(a) 桩顶自由

(b) 桩顶固定

图 14 不同桩间距水平应力云图

Fig.14 Contours of horizontal stress with different pile spaces

图 15 为抗滑桩某点的应力状态, OQ 的长度与 OP 的长度之比可以定义抗剪安全系数 F_s :

$$F_s = \frac{\sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_3) + 2c \cos \varphi}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{2 \sin \varphi}{\frac{\sigma_1}{\sigma_3} - 1} + \sin \varphi + \frac{2c \cos \varphi}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (10)$$

当主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 越大, 即 σ_1 / σ_3 越大, 则抗剪安全系数 F_s 越小。当抗剪安全系数 $F_s > 1$ 时, 则抗滑桩未发生剪切破坏, 否则表示抗滑桩发生剪切破坏。

抗拉安全系数 F_t 的最小值用 F_{tmin} 表示, 抗剪安全系数 F_s 的最小值用 F_{smin} 表示。一般而言, 抗滑桩上一点的应力状态不会使 F_t 和 F_s 同时取最大值或

最小值, 当抗滑桩弯曲破坏先于剪切破坏, 则抗拉安全系数 F_{tmin} 值要比抗剪安全系数 F_{smin} 值先达到极限状态, 即抗拉安全系数 F_{tmin} 要小于抗剪安全系数 F_{smin} 。因此, 要满足抗滑桩桩弯曲破坏先于剪切破坏这一工程实际现象, 必然有

$$F_t < F_s \quad (11)$$

把式 (9)、(10) 代入式 (11) 中得

$$f_t < \frac{\sigma_t \sigma_o}{r} \sin \varphi + \frac{\sigma_t}{r} c \cos \varphi \quad (12)$$

式中: $\sigma_o = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$, $r = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 。

式 (12) 即为抗滑桩的失效判别公式, 当符合式 (12) 的条件, 抗滑桩弯曲破坏先于剪切破坏, 反之抗滑桩剪切破坏先于弯曲破坏。

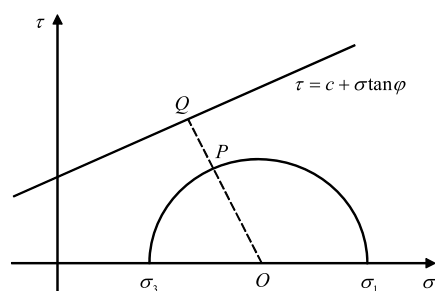


图 15 抗滑桩一点应力状态

Fig.15 Stress state of anti-slide pile at a point

抗滑桩为混凝土桩，桩内有加筋体，加筋体通常为钢筋、钢管以及钢轨等，混凝土结构具有较大抗压强度，但是抗拉强度较低，通常只有抗压强度的十分之一，取抗滑桩的内聚力 $c = 140 \text{ MPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 0^\circ$ 。

抗滑桩的抗拉强度可以通过增加钢筋量提高，当抗滑桩具有不同抗拉强度时，抗滑桩的失效模式不同，通过表 4 和表 5 可以看出：桩顶固定约束较桩顶自由约束更容易满足式 (12)，即抗滑桩易发生弯曲破坏；抗滑桩布置在边坡中下部较布置在中上部更容易满足式 (12)，即抗滑桩易发生弯曲破坏；桩顶自由约束时，抗滑桩布置在边坡中部 ($L_x/L = 0.5$) 较其他位置更容易满足式 (12)，即抗滑桩易发生弯曲破坏。桩顶固定约束时，抗滑桩布置在边坡中下部 ($L_x/L = 0.3$) 较其他位置更容易满足式 (12)，即抗滑桩易发生弯曲破坏。

表 4 桩顶自由约束

Table 4 Free constraints of pile top

桩位	σ_1	σ_3	r	右等式
0.1	0.7	2.3	18.7	5.2
0.3	1.2	6.4	34.7	4.8
0.5	3.2	13.4	38.4	11.7
0.7	1.2	9.3	53.3	3.2
0.9	0.2	6.6	21.8	1.3

表 5 桩顶固定约束

Table 5 Fixed constraints of pile top

桩位	σ_1	σ_3	r	右等式
0.1	1.5	2.7	10.3	20.4
0.3	4.5	3.6	26.9	23.4
0.5	6.7	5.6	60.5	15.5
0.7	6.6	5.4	76.2	12.1
0.9	4.5	4.5	46.5	13.5

4 结 论

(1) 提出了复合单元抗滑桩模型，该模型采用

结构单元和实体单元组合，不仅可以真实地模拟桩的力学性能，而且可以快速提取桩身内力，另外，计算精度较实体单元桩和结构单元桩高，而且计算结果不受单元网格的疏密的影响。

(2) 抗滑桩布置在边坡中部时，加固边坡安全系数最大，越靠近边坡两端，加固边坡安全系数越小。边坡破坏形态和变形模式和抗滑桩布置位置关系密切，当抗滑桩位于边坡中下部时，桩后土体产生越过桩顶的推移式滑动；当抗滑桩布置在边坡中上部时，桩前土体产生脱离抗滑桩的牵引式滑动；当抗滑桩布置在边坡中部时，未加固边坡的贯通剪切塑性带被分割为两个独立的部分，边坡内部未形成贯通塑性剪切带。

(3) 桩间距越小，加固边坡安全系数越大，桩顶固定时较桩顶自由加固边坡安全系数偏大。桩间距越大，桩身弯矩、剪力和桩侧阻力越大。桩顶自由的最大弯矩是桩顶固定的 2 倍，而桩顶固定的最大剪力是桩顶自由的 2 倍。当桩间距 $S \leq 3D$ 时，边坡潜在滑面被分为两个独立部分，桩间土形成明显应力拱，当桩间距 $S \geq 4D$ 时，桩间中心土体塑性剪切带完全贯通，桩间土体形成反向应力拱。

(4) 桩顶自由和固定约束时，抗滑桩分别布置在边坡中部 ($L_x/L = 0.5$) 和边坡中下部 ($L_x/L = 0.3$) 时，抗滑桩容易发生弯曲破坏。

参 考 文 献

- [1] 王恭先. 滑坡防治工程措施的国内外现状[J]. 中国地质灾害与防治学报. 1998, 9(1): 1—9.
WANG Gong-xian. Present situation of engineering measures for preventing and controlling landslide in china and abroad[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(1): 1—9.
- [2] ITO T, MATSUI T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. *Soils and Foundations*, 1975, 15(4): 43—59.
- [3] CHEN C Y, MARTIN G R. Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2002, 29(5): 363—386.
- [4] 周德培, 王建松. 预应力锚索微型抗滑桩内力的一种计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 247—250.
ZHOU De-pei, WANG Jian-song. Design method of retaining pile with prestressed cable[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 247—250.

- [5] 冯君, 周德培, 江南, 等. 微型抗滑桩体系加固顺层岩质边坡的内力计算模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 284—288.
FENG Jun, ZHOU De-pei, JIANG Nan, et al. A model for calculation of internal force of micropile system to reinforce bedding rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(2): 284—288.
- [6] ITO T, MATSUI T, WON P H. Design method for stabilizing piles against landslide-one row of piles[J]. **Soils and Foundations**, 1981, 21(1): 21—37.
- [7] HASSIOTIS S, CHAMEAU L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1999, 125(10): 910—914.
- [8] 丁光文, 王新. 微型桩复合结构在滑坡整治中的应用[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 47—50.
DING Guang-wen, WANG Xin. Application of micropiling compound structure in a landslide treatment engineering[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2004, 18(1): 47—50.
- [9] KOURKOULIS R, GEOLAGOTI F, ANASTASOPOULOS I, et al. Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(7): 663—677.
- [10] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 950—954.
LEI Wen-jie, ZHENG Ying-ren, FENG Xia-ting. Analysis of pile location on landslide control[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 950—954.
- [11] 陈正, 梅岭, 梅国雄. 柔性微型桩水平承载力数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2219—2224.
CHENG Zheng, MEI Ling, MEI Guo-xiong. Numerical simulation of lateral bearing capacity of flexible micropile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 31(7): 2219—2224.
- [12] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles[J]. **Soils and Foundations**, 2000, 40(1): 73—84.
- [13] WON J, YOU K, JEONG S. Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems[J]. **Computers and Geotechnics**, 2005, 32(4): 304—315.
- [14] WEI W B, CHENG Y M. Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(7): 1176—1185.
- [15] 孙书伟, 陈冲, 丁辉, 等. 微型桩群加固土坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2306—2314.
SUN Shu-wei, CHEN Chong, DING Hui, et al. Stability analysis of earth slopes reinforced with micropiles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(12): 2306—2314.
- [16] GRIFFITHS D V, LIN H, CAO P. A comparison of numerical algorithms in the analysis of pile reinforced slopes[J]. **Geotechnical Special Publication**, 2010(199): 175—183.
- [17] ITASCA. Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[M]. [S. l.]: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [18] BANERJEE S, GOH S H, LEE F H. Earthquake-induced bending moment in fixed-head piles in soft clay[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(6): 431—446.
- [19] WANG N, ELGAMAL A, LU J. Three-dimensional finite element modeling of pile and pile group system response[C]//Geo-congress. [S. l.]: [s. n.], 2014.
- [20] LIRER S. Landslide stabilizing piles: experimental evidences and numerical interpretation[J]. **Engineering Geology**, 2012, 149—150: 70—77.