

抗滑桩桩位对边坡稳定性影响机理的宏细观分析

刘平¹,王美静¹,张少强¹,张永生²,王登华^{3*},李栋栋⁴

(1.中电建路桥集团有限公司,北京市 100048;2.中国水利水电第四工程局有限公司,青海 西宁 810007;

3.长沙矿山研究院有限责任公司,湖南 长沙 410012;4.北京科技大学 土木与资源工程学院,北京市 100083)

摘要:为了研究抗滑桩桩位对边坡稳定性的影响机理,合理优化抗滑桩支护参数,以西南某高速公路路堑边坡为工程背景,结合有限差分理论和离散元理论,建立边坡三维连续-离散耦合数值模型,从宏细观多角度分析抗滑桩桩位对路堑边坡稳定性的影响机理。研究表明:滑面上下颗粒力链表现为上疏下密,颗粒旋转状态有明显的分层现象,离散域颗粒的接触力链和旋转状态可以从细观层次上表征坡体的稳定状态;抗滑桩桩位影响滑面位置和形态,桩位由下向上移动过程中,边坡最大位移量先减后增;且抗滑桩弯矩曲线呈近似抛物线形,最大值位于抗滑桩嵌岩段顶端,剪力最大值发生在桩的嵌岩端以下。

关键词:边坡;抗滑桩;稳定性;数值模拟;宏细观分析

中图分类号:U416

文献标志码:A

0 引言

随着中国基础建设的快速发展,工程建设中遇到的滑坡也有逐年增多的趋势,尤其是山区建设工程。由于抗滑桩在维护边坡稳定方面具有突出的优点,现已被广泛用于滑坡治理和边坡防护工程中^[1]。

目前在考虑山区高速公路路堑边坡工程中抗滑桩结构优化问题时,普遍选择数值模拟分析的方法进行研究^[2-3]。数值模拟方法又分为连续元和离散元两种。连续元方法是建立在连续介质的假设基础上,有一定的局限性。而有关离散元的数值计算需要占用大量的计算机资源,随着模拟尺寸的增大,计算效率也在大幅降低。兼具连续介质法和离散元法的优势,连续-离散耦合算法成为工程数值模拟分析的新手段。自20世纪80年代耦合算法理论问世以来^[4-5],到现在以算法程序软件为平台,连续-离散耦合技术在地下开挖、滑坡分析及动力分析等多个领域中得到成功应用^[6-8]。

本文基于有限差分法理论和颗粒离散元理论,以FLAC^{3D}有限差分软件为实现平台,建立三维连

续-离散耦合边坡模型,分析桩内力和颗粒的力链及旋转状态随着抗滑桩桩位的变化规律,从宏细观不同尺度分析各方案抗滑桩对于边坡稳定性的影响,为边坡支护结构优化分析提供一种新的方法。

1 耦合原理

1.1 FLAC-PFC耦合原理简述

有限差分法和颗粒离散法的耦合算法常用FLAC-PFC耦合模型。由PFC模拟重点区域细观力学行为,而非关键区域则通过FLAC^{3D}模拟实现。FLAC-PFC耦合模型通过Socket O/I接口进行两者之间的力和位移信息的传输和交换,两者之间的耦合行为在两者的接触界面上发生。

当前,连续-非连续数值模拟有两种耦合方式:以控制颗粒作为接触界面和以控制墙体作为接触界面。本文基于后者建立耦合模型。

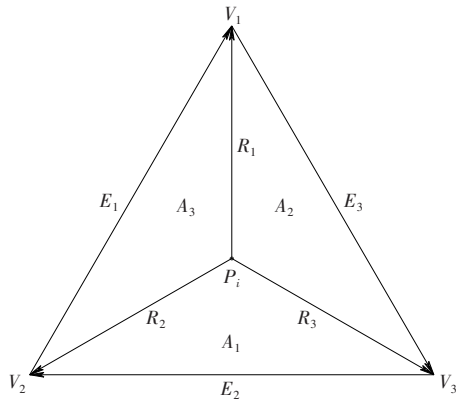
1.2 基于边界墙体控制基本理论^[9]

连续域和离散域之间通过边界墙体实现两者之间的数据交换。PFC墙体及耦合中力的传递示意图1。当颗粒与墙体接触时,离散域通过边界墙体将

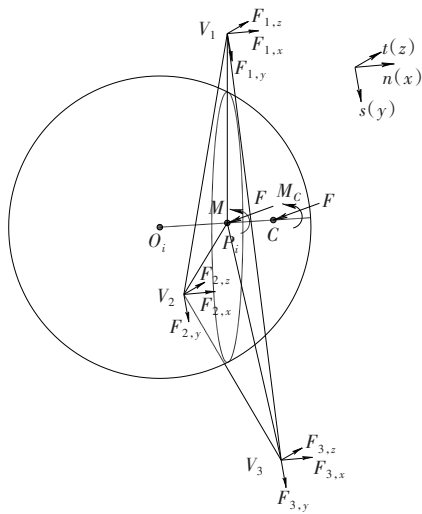
收稿日期:2020-12-14(修改稿)

作者简介:刘平,女,硕士,工程师.E-mail:574142595@qq.com

*通信作者:王登华,男,硕士,工程师.E-mail:1151401021@qq.com



(a) 三角形墙面单元



(b) 颗粒与墙面接触

图1 PFC墙体及耦合中力的传递

力和力矩传递给连续域,在连续域的计算系统中,由运动平衡方程获得速度和位移。连续域再经过边界墙体将速度和位移传递给离散域颗粒,继而重新定义颗粒与墙体的接触位置,做下一时步的循环。

边界墙体可以通过连续域面创建,墙体由三角形单元面组成,三角形顶点依附在连续域的单元节点上。耦合的工作原理是当颗粒与墙面接触且发生重叠后,由于颗粒与墙体的作用,会在接触点C处产生接触力 \vec{F} ,由于接触点C存在黏结又会产生力矩 \vec{M}_C 。因为接触点C有可能不在墙面上,所以接触面的总力矩为:

$$\vec{M} = \vec{M}_C + (C - P) \times \vec{F} \quad (1)$$

式中: C、P 分别为 C、P 点(墙面上距 C 点最近的点)的位置矢量。

当整个计算模式被激活时,则耦合体系会形成统一的等效力系统,即:

$$\sum \vec{F}_i = \vec{F} \quad (2)$$

$$\sum \vec{R}_i \times \vec{F}_i = \vec{M} \quad (3)$$

式中: $F_i (i=1, 2, 3)$ 为施加到每个网格点或节点的力; $\vec{R}_i (i=1, 2, 3)$ 为 P 点到三角形顶点的向量。

以 \vec{n} 作为接触面的单位法向量,则接触面上的剪切力矢量为:

$$\vec{F}^s = \vec{F} - \vec{F} \cdot \vec{n} \quad (4)$$

由此,可得到 \vec{F} 在接触面上的切向单位矢量:

$$\vec{S} = \frac{\vec{F}^s}{\|\vec{F}^s\|} \quad (5)$$

继而可以建立局部坐标系。局部坐标系的 x 轴方向与 \vec{n} 相同, y 轴方向与 \vec{S} 相同。由于 R_i 在 x 方向上分量均为 0, 因此求得局部坐标系中顶点力和力矩在 x、y、z 方向上的分量 $F_{i,x}$ 、 $F_{i,y}$ 、 $F_{i,z}$, 即:

在三角形面上最大接触力方向施加重心加权, 使 $\sum F_{i,y} = w_i F_{y0}$ 。则得到以下方程组(其中含 3 个未知量):

$$\sum \vec{F}_{i,x} = \vec{F}_x \quad (6)$$

$$\sum \vec{F}_{i,y} = \vec{F}_y \quad (7)$$

$$\sum \vec{F}_{i,z} = \vec{F}_z = 0 \quad (8)$$

$$\sum (\vec{R}_{i,y} \times \vec{F}_{i,z} - \vec{R}_{i,z} \times \vec{F}_{i,y}) = \vec{M}_x \quad (9)$$

$$\sum (\vec{R}_{i,z} \times \vec{F}_{i,x} - \vec{R}_{i,x} \times \vec{F}_{i,z}) = \vec{M}_y \quad (10)$$

$$\sum (\vec{R}_{i,x} \times \vec{F}_{i,y} - \vec{R}_{i,y} \times \vec{F}_{i,x}) = \vec{M}_z \quad (11)$$

$$\sum F_{i,z} = 0 \quad (12)$$

$$\sum (\vec{R}_{i,y} \times \vec{F}_{i,z}) = \sum (\vec{R}_{i,z} \times \vec{F}_{i,y}) + \vec{M}_x \quad (13)$$

以上方程组为了获得有限解,需要增加一个附加约束条件:

$$\sum (\vec{R}_{i,z} \times \vec{F}_{i,z}) = 0 \quad (14)$$

如果网格点或单元节点施加局部 z 方向的力,则从 P 指向三角形各顶点的向量点积和为零。计算所得的力被转换到全局坐标系中,并应用在相关的网格点。

合力在连续域网格点上通过运动方程获得位移和速度。区域更新触发时,三角形顶点的位置也会随着网格点的位置变化而变化,继而通过墙面将位移和速度传递给离散颗粒。下一轮回颗粒则会在新的

的位置与墙面发生接触作用。

2 边坡模型

边坡模型取自云南省建(个)元高速公路 TJ3 标段某路堑边坡。模型长 54 m,高 33 m,分两级坡。Ⅰ级坡高 10 m,坡比为 1:1;Ⅱ级坡高 8 m,坡比为 1:1.25,中间平台宽 2 m。边坡主体为碎石土,基底为强风化花岗岩,物理力学参数见表 1。

表 1 结构和土体物理力学参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	弹性模量/ MPa
碎石土	2 200	24	30.0	500
基岩	2 550	30	50.0	4 000
结构单元	2 500	—	—	8 000

约束模型底部 x 、 y 和 z 3 个方向、前后边界 y 方向位移、左右边界 x 方向的位移。耦合计算模型如图 2 所示。

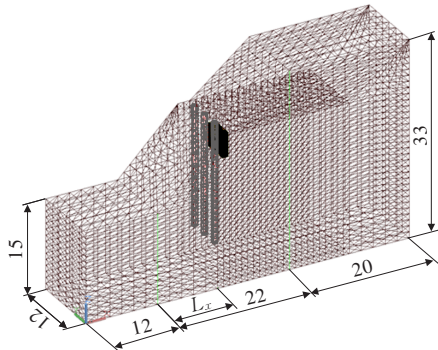


图 2 边坡模型(单位:m)
(注:黑色区域代表离散区域;深灰色线条代表抗滑桩)

连续元部分采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,离散元部分采用平行黏结模型。由于张胤等^[10]在边坡抗滑桩模拟研究中,发现结构单元模拟结果和实体单元计算结果十分接近。而结构单元模拟抗滑桩,方便建模,也容易调整设计参数,因此本文采用 Pile 单元模拟抗滑桩。由前人的研究经验,根据宏观参数得到细观参数初始值,再经过模型的反复调试,得到如表 2 所示的细观参数值。

表 2 离散元计算参数

基本参数						黏结参数		
密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦 系数	刚度 比	弹性 模量/ MPa	最小 粒径/ m	粒径 比	抗拉 强度/ kPa	摩擦 角/ ($^{\circ}$)	接触有 效间 距/m
2 600	0.5	1.0	50	0.1	1.66	70	25	0.01

如图 2 所示,抗滑桩到Ⅰ级坡坡脚的水平距离为 L_x ,斜坡最大水平宽度 L 为 22 m,则可用 L_x/L 表示不同桩位。桩长均为 18 m,桩位 (L_x/L) 分别为 0.20、0.40、0.55、0.70、0.80 时的方案编号分别设置为 F1、F2、F3、F4、F5。

3 结果分析

3.1 稳定性分析

耦合域信息的交换是通过连续域节点和离散颗粒的接触实现的。因此,连续域节点和离散元颗粒在耦合区域的位移和应力分布应该保持一致。

如图 3 所示,在无支护情况下耦合域附近连续域的最大位移值为 0.488 m;离散域最大位移值为 0.483 m。图 4 为边坡模型经过计算后达到新平衡后的应力张量和颗粒接触力分布图。耦合受力主要集中在耦合域下部,连续域上的应力张量大小与颗粒力链的粗细基本相对应,同时最大主应力方向与颗粒力链方向平行。通过观察发现,连续域和离散域在位移的方向和大小及应力方面都基本保持数据的一致性。

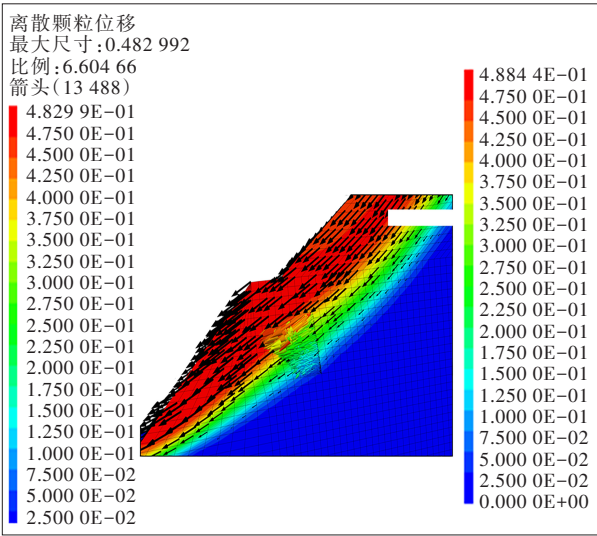


图 3 耦合区域位移矢量图(单位:m)

3.2 不同桩位的滑面形态变化分析

为了明确不同桩位对滑坡体稳定性的影响,应首先了解不同设桩位置滑动面的变化情况(图 5)。

由图 5 可以看出:当 $L_x/L=0.20$,即抗滑桩位于边坡下部时,桩后土体出现塑性剪切带,在抗滑桩上部产生推移式滑动,滑坡体在桩顶上部滑出(即发生

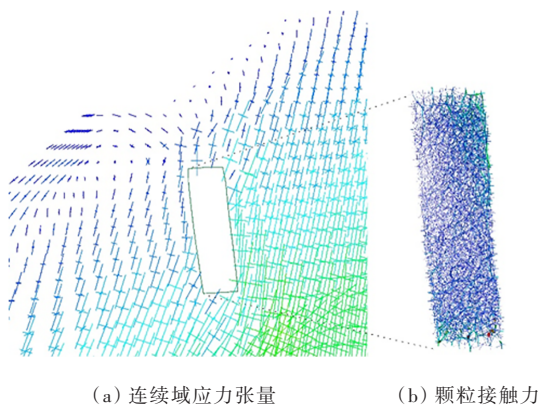


图 4 耦合区域应力分布图

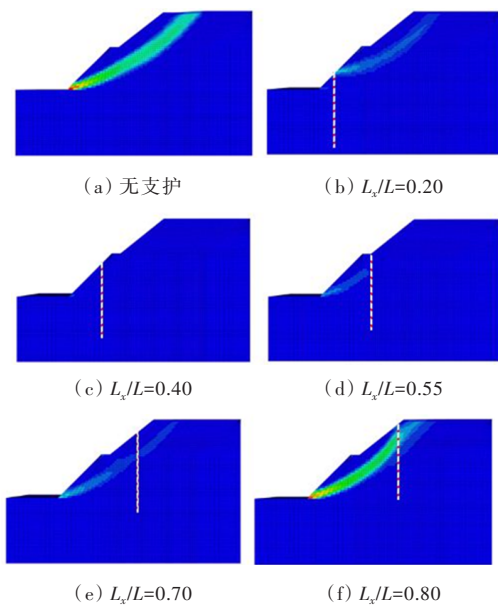


图 5 滑坡面位置与形态

越顶破坏);当抗滑桩位于坡体中偏上($L_x/L=0.55$)时,下部坡体的位移量逐渐增大,I级坡脚处出现应力集中现象,下部滑体逐渐形成,剪切面发展到桩前时中断,坡体处于稳定状态。桩位继续上移至坡顶部附近($L_x/L=0.80$)时,桩前土体位移量继续增大,应力集中现象明显,塑性剪切带最终在桩前贯通,桩前土体脱离抗滑桩,发生牵引式滑动。

由此可见,抗滑桩的桩位设置影响桩前、后土体的稳定性,并改变了坡体滑动面的位置和形态。

3.3 不同桩位的颗粒力链及运动状态分析

作为离散体颗粒位移变化的表征,颗粒接触力与坡体滑动面的形成有密切联系。

耦合区域接触力链图见图6,图中力链的粗细代表大小,从颗粒接触力链的分布状态可以看出:当抗滑桩位于坡体中、下部时,颗粒的接触力链表现为

上、下分布均匀且方向随机;当抗滑桩移动至坡体中、上部时,接触力链上、下分布趋于明显,指向也变得具有规律性。具体表现为接触力链的上部分布稀疏,力链细,下部分布稠密,力链粗。并且随着抗滑桩向坡上移动,耦合域下部土体的接触力链有减少的趋势。

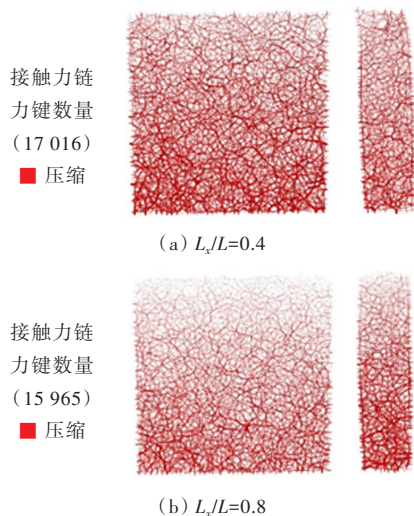


图 6 耦合区域接触力链图

土体的黏结表现在颗粒力链的接触上,当抗滑桩由下向上移动过程中,下部土体的位移量随着致滑力增大而增大,土体趋向失稳,表现为土体黏结失效,力链断裂,力链接触数量减少。滑动面上、下土体的位移量有明显的差异性,代表坡体下部滑面附近土体的离散域颗粒,会呈现出上疏下密的状态,并且力链的指向与土体移动的方向相同。

对比观察离散颗粒的旋转运动情况(图7)发现,当坡体的滑动得到有效控制时,离散颗粒几乎没有旋转运动发生;而当抗滑桩移动后,离散域有滑动面通过时,颗粒出现旋转运动的现象且旋转状态上下有明显差异,旋转颗粒集中分布在滑动带上。这说

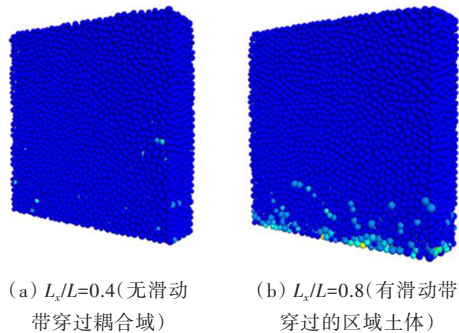


图 7 颗粒旋转运动状态

明滑动带上的土体颗粒多为旋转移动的,而滑动带以上土体颗粒则是平移运动状态。

3.4 不同桩位的桩内力分析

抗滑桩的设计既要确保边坡的稳定,还需要考虑经济的合理性,这就要求桩身尺寸一定时所受的内力要小。不同方案抗滑桩内力对比图如图8所示。

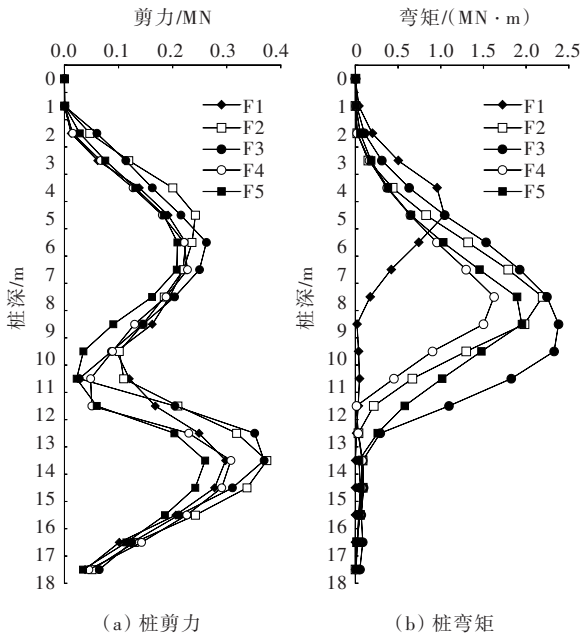


图8 不同方案抗滑桩内力对比

从图8可以看出:

(1) 剪力呈现侧卧的M形。剪力的第一个极值发生在坡体潜在滑动面附近,下一极值则发生在基岩嵌入端以下。随着抗滑桩桩位由下向上移动时,剪力极值先增大后减小。当抗滑桩位于坡中部附近时,剪力值最大。

(2) 桩的弯矩曲线近似呈抛物线形,弯矩最大值发生在抗滑桩中、下部——嵌岩段顶端。桩位从坡下部向上部移动时,桩的弯矩峰值先增大后减小,当抗滑桩位于坡中位置时,弯矩达到最大。

4 结论

(1) 颗粒接触力链是坡体稳定性在细观层面的表征,当离散域有滑动面穿过时,颗粒接触力链和旋转状态有差异性表现。由于滑面上部土体位移量大

于下部土体,因此颗粒力链表现为上疏下密;滑面多为剪切破坏面,附近土体剪应力较大,滑面土体颗粒力链较粗并指向坡体滑移方向,并且滑动面附近的颗粒旋转状态有明显的分层现象。

(2) 抗滑桩承受的弯矩曲线近似呈抛物线形,弯矩最大值位于抗滑桩嵌岩段顶端。剪力出现两个极值,最大值发生在桩的嵌岩端以下。为防止抗滑桩出现拉裂破坏和剪断破坏,需在相应位置适当增加钢筋数量,以增大桩身的抗拉和抗剪强度。

(3) 抗滑桩桩位影响滑坡的位置和滑动面的形态。桩位由边坡下部向上部移动过程中,边坡最大位移量呈先减小后增大的变化趋势。同时考虑安全 and 经济双重指标,将抗滑桩布置在中部偏下的位置(即 $L_x/L=0.4\sim 0.5$)时,加固效果更加理想。

参考文献:

- [1] 宋英杰,陈文强,李长冬.抗滑桩加固后边坡稳定性评价与桩位优化研究进展[J].安全与环境工程,2016,23(5):43-49,54.
- [2] 李建宇,耿文林,潘家奇,等.路堑高边坡稳定性分析与支护参数优化设计研究[J].中外公路,2018,38(5):31-34.
- [3] 王红明,代先尧,罗红明,等.谷竹高速公路某滑坡形成机制数值模拟分析[J].中外公路,2019,39(4):6-10.
- [4] FELIPPA C A, PARK K C. Staggered transient analysis procedures for coupled-field mechanical systems: formulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1980,24(1):61-111.
- [5] PARK K C, FELIPPA C A. Partitioned analysis of coupled systems[M]. North-Holland, 1983.
- [6] 徐国文,何川,汪耀,等.层状软岩隧道围岩破坏的连续-离散耦合分析[J].西南交通大学学报,2018,53(5):966-973.
- [7] 严琼,吴顺川,周喻,等.基于连续-离散耦合的边坡稳定性分析研究[J].岩土力学,2015,36(2):47-56.
- [8] 周健,黄金,张姣,等.基于三维离散-连续耦合方法的分层介质中桩端刺入数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2564-2571.
- [9] 石崇,张强,王盛年.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [10] 张胤,戴妙林,匡义,等.基于FLAC^{3D}结构单元的边坡抗滑桩加固模拟及应用[J].水电能源科学,2010,29(12):95-97.