

抗浮锚杆锚固界面渐进性失效演化机理

陶瑞, 乔建刚, 李景文

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要 目的 研究不同速度荷载作用下抗浮锚杆与岩土体之间的力学性能,通过渐进性失效演化机理确定拉拔承载力。**方法** 采用 PFC2D 建立了单根抗浮锚杆及群锚在拉拔过程中的颗粒流模型,通过给抗浮锚杆端头处施加拉拔载荷,分析抗浮锚杆侧摩阻力分布,同时监测岩土体结构强度和变形。**结果** 抗浮锚杆在拉拔过程中,得到接触力曲线的峰值为拉拔极限承载力;群锚颗粒流模拟只对中间锚杆不断拉拔,相邻的锚杆接触力达到 300 kN 后迅速减小。**结论** 当中间抗浮锚杆向上拉拔、两侧锚杆不动时,轴向应力与剪向应力同样呈现先增大后减小、最终趋于稳定的变化规律。相邻的锚杆在中间锚杆不断上拔的过程中,接触力循环上升并最终达到最大值,随后迅速减小。

关键词 抗浮锚杆;颗粒流理论;PFC2D;数值模拟

中图分类号 TU470

文献标志码 A

Progressive Failure Evolution Mechanism of Anchorage Interface of Anti-floating Anchor

TAO Rui, QIAO Jiangan, LI Jingwen

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401)

Abstract: The mechanical properties between the anti-floating anchors and the geotechnical body under different velocity loads are studied, and the pullout load capacity is determined by the progressive failure evolution mechanism. The particle flow model of single anti-floating anchors and group anchors during pullout was established by using PFC2D, and the lateral friction resistance distribution of anti-floating anchors was analyzed by applying pullout load at the end of the anti-floating anchors, while monitoring the structural strength and deformation of the geotechnical body. During the pulling process of the anti-floating anchor, the peak value of the contact force curve is obtained as the pulling limit load capacity; the group anchor particle flow simulation only pulls the middle anchor continuously, and the contact force of the adjacent anchor reaches 300kN and then decreases rapidly. When the middle floating anchor rod is pulled upward and both anchor rods are not moving, the axial stress and shear stress also show the same change

收稿日期:2022-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52278342);河北省重点研发计划项目(19211210D)

作者简介:陶瑞(1995—),女,博士研究生,主要从事土木与交通信息技术等方面研究。

pattern of increasing first and then decreasing and finally stabilizing; the contact force of the adjacent anchor rods rises cyclically and finally reaches the maximum value during the process of the middle anchor rod being pulled upward continuously, and then decreases rapidly.

Key words: floating anchors; granular flow theory; PFC2D; numerical simulation

现代城市地下空间资源的开发和利用已成为一种社会发展趋势,是保证城市可持续发展的重要措施。但是,由于缺乏对抗浮技术机理的深入了解,越来越多的建筑物出现抗浮技术失效的问题。这种失效可能会导致建筑物变形、开裂,甚至整体结构破坏,对经济造成不可预测的损失。近年来,随着计算机软件技术的飞速发展,数值模拟方法在不可见的地下工程、岩土工程及采矿工程中的应用越来越广泛,同时也为工程实践提供了指导^[1]。目前的数值模拟方法中主要有有限元法、有限差分法和离散元法^[2-5]。由于岩土体材料本质上可以看成是散体颗粒胶结或架空而成,因此不受变形量限制的离散元法更符合岩土体介质的物理本质^[6-8]。

离散元数值模拟法广泛用来研究工程中破坏机理与细观累积损伤^[9-12],PFC2D 程序因其可以揭示细观层次的机理,受到了国内外学者的青睐。P. A. Cundall^[13]首先在岩石工程领域中提出了离散元法(Discrete Element Method, DEM)。C. Shi 等^[14]利用元胞自动机建立了一种快速有效的岩石微观参数标定方法。W. R. Liu 等^[15]采用颗粒流程序建立了巷道模型,从接触力链、变形位移和微裂纹分布等方面分析了巷道的损伤过程。V. Sarfarazi 等^[16]采用颗粒流程序方法研究了有锚杆的半圆形空间与相邻节理之间的相互作用,并通过巴西试验和单轴压缩试验对 PFC 参数进行了标定。周健等^[17]建立了砂土的颗粒流模型,并对该模型进行了加卸载试验。刘文白等^[18]采用 PFC2D 模拟了桩基础在上拔荷载作用下的颗粒分布和速度。彭国园等^[19]建立了红黏土的颗粒流模型,并对其进行了三轴虚拟试验,探讨了颗粒选择、

颗粒间粘结方式、弹性模量和泊松比等细观参数对试验结果的影响。胡训健等^[20]采用 PFC2D 程序建立了花岗岩颗粒流细观非均质模型,并对三轴压缩试验进行了模拟,发现不同非均质性因子和不同围压下花岗岩模型的应力-应变曲线。

目前对抗浮锚杆的数值模拟研究使用有限元方法很常见,但是针对非连续介质力学问题,尤其是当砂土被用作抗浮锚杆周围的岩土体时,有限元方法难以准确分析其破坏机制。基于此,笔者采用离散元方法对抗浮锚杆受力机理进行模拟研究,分析岩土体轴向应力和孔隙率的变化趋势,对轴线应力应变、孔隙率以及相邻锚杆的位移、接触力等指标进行监测,进一步分析锚杆失效的原因。

1 抗浮锚杆颗粒流模型的建立

1.1 工程概况

某商业广场项目由购物中心、写字楼、住宅、室外步行街等组成,总建筑面积 62.45 万 m²。商业 C 区由三栋写字楼及购物中心组成,建筑面积为 26 万 m²。地下两层主要为车库及设备机房等辅助用房。商业区地上 5 层,塔楼地上 28 层。商业 C 区地下室为地下二层,地下室底板板面相对标高为 -10.90 m,其中地下二层设计净高为 4.90 m。

2018 年 5 月 15 日,施工单位发现商业 C 区地下室南侧中庭位置处填充墙多处裂缝,项目公司工程部安排总包单位进行质量缺陷维修。但 5 月 30 日发现维修后的墙体再次开裂,经仔细观察发现,基础筏板存在不均匀沉降,导致变形。

在商业 C 区附近,增加地下水位观测

点,水位位于 1 107.85 m(相对商业零米为 -3 m)左右,通过观测,近期水位波动每天约 75 mm。上浮导致 7 道梁局部裂缝(见图 1)。



图 1 梁局部裂缝

Fig. 1 Local cracks in the beam

1.2 PFC 颗粒流方法

PFC 法是一种用于模拟刚性颗粒集合体运动及相互作用的方法^[2],该方法旨在建立一个描述颗粒之间相互作用的模型,从而研究颗粒的运动规律和集合体的宏观行为。二维 PFC 中颗粒模型为圆盘,三维 PFC 中颗粒模型为球体。颗粒流模型中有“颗粒-颗粒”与“颗粒-墙”两种接触类型。PFC 通过在一组颗粒单元之间赋予不同接触模型来计算颗粒单元之间的受力、运动特征,进而在宏观层面上模拟出宏观试样的非线性本构关系。PFC 中内嵌接触模型中最常用的三种模型为线性模型、线性黏结模型和平行黏结模型。

表 1 抗浮锚杆拉拔试验颗粒流模型细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters of particle flow model for anti-floating anchor pull-out test

名称	摩擦系数	法向刚度/ MPa	切向刚度/ MPa	颗粒直径/ m	法向粘结强度/ MPa	切向粘结强度/ MPa
墙体	1	100	100	—	—	—
锚杆	10	10 000	10 000	—	10^{24}	10^{24}
试验区土颗粒	6	10	10	0.001 ~ 0.002	10^{-6}	10^{-6}
支撑区土颗粒	6	10	10	0.01	10^{-6}	10^{-6}

2 单根抗浮锚杆拉拔模拟与分析

2.1 抗浮锚杆拉拔极限承载力的确定

为确定抗浮锚杆的极限承载力,通过对抗浮锚杆端头处施加三种不同的速度

传统的有限元软件能够对形状规则、力学性能均匀的介质进行较好的仿真,但是对于离散性的岩土体介质,往往不能得到与真实情况相应的模拟结果,因此笔者选用离散元软件 PFC 进行分析。由于本次研究所建立的模型包含了 3 万多个颗粒,出于计算资源限制的考虑,为了更好地模拟出抗浮锚杆在岩土体中拉拔的真实效果,因此采用 PFC2D 进行仿真分析。

1.3 模型的建立

抗浮锚杆拉拔试验颗粒流模型共分为两部分:一部分为直接与抗浮锚杆相作用的试验岩土体区,另一部分为试验岩土体区的支撑区。由于组成岩土体的球颗粒单元较小,如果采用较小尺寸的球颗粒单元势必造成计算资源的浪费,因此球颗粒单元粒径应采用差异化的方法建立。试验区岩土体模型采用直径 1 ~ 2 mm 的随机粒径建立,试验支撑区岩土体采用直径 1 cm 的颗粒单元,设岩土体的密度为 $2\ 500\text{ kg/m}^3$ 。在 PFC 中有很多接触类型,由于岩土体一般具有一定的粘结性,因此在选择接触模型时,选择线性平行粘结模型来表征岩土体颗粒之间的相互作用和力学行为。适当调整颗粒大小和孔隙率,根据软件自带的参数标定程序,确定的抗浮锚杆拉拔试验颗粒流模型细观参数见表 1。

(0.1 m/s、0.2 m/s、0.5 m/s) 进行拉拔试验,同时监测抗浮锚杆所受到周围岩土体的接触力,并通过仿真计算得出锚杆极限承载力时程曲线(见图 2)。

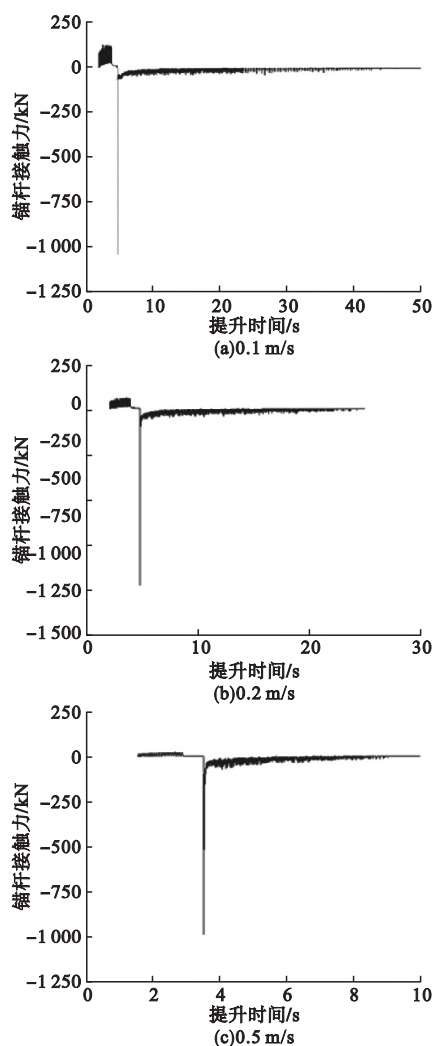


图2 不同拉拔速度下的极限承载力时程曲线

Fig. 2 Time curves of ultimate bearing capacity at different pulling speed

从图2可以看出,抗浮锚杆受到周围岩土体的接触力,即锚固界面上的摩擦力经历了缓慢增大-急剧增大-急剧减小-最终趋近于零的过程。抗浮锚杆在向上移动过程中,受到静摩擦力逐渐增大,该最大静摩擦力值即为抗浮锚杆在拉拔过程中的极限承载力。通过命令流监测模型中抗浮锚杆受到的接触力,在速度为0.1 m/s、0.2 m/s和0.5 m/s时,抗浮锚杆受到的最大摩擦力分别为1 050 kN、1 034 kN、1 068 kN,三个接触力相近。因此不同拉拔速度对锚杆的拉拔极限承载力影响不大,抗浮锚杆拉拔极限承载力取三者的最小值,并向下取整为1 000 kN。达到拉拔极限承

载力时,抗浮锚杆周围岩土体中的颗粒速度云图、位移云图以及力链云图如图3所示。

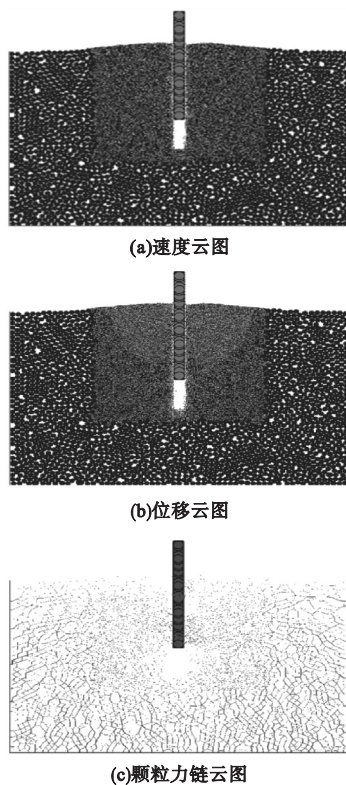


图3 不同拉拔速度下岩土体的颗粒速度、位移和力链云图

Fig. 3 Plots of particle velocity, displacement and force chain of geotechnical body under different pulling speed

由图3可知,在拉拔过程中,当抗浮锚杆达到拉拔极限承载力时,岩土体中的颗粒速度、位移均呈现V字型向上分布,与抗浮锚杆紧密接触的岩土体颗粒速度最大。当锚杆向上速度为0.1 m/s、0.2 m/s以及0.5 m/s时,与抗浮锚杆紧密接触处的颗粒最大速度分别为0.045 m/s、0.14 m/s以及0.38 m/s,最大位移在0.35~0.48 m。通过对岩土体颗粒接触力力链图分析可知,接触主要集中在抗浮锚杆底部的锥形区域,锚杆下部出现空白区说明该区域无接触,岩土体整体接触分布为围绕锚杆呈渐变式分布,由于岩土体重力与抗浮锚杆拉拔荷载的相互作用,使得上部岩土体接触力小,下部岩土体接触力大。

2.2 抗浮锚杆拉拔性能分析

在拉拔试验过程中需要对不同区域进行监测,以得出抗浮锚杆与岩土体颗粒作用的细观过程。通过 PFC2D 中的 Measure 功能建立不同位置的测量圆,测量圆的位置分布如图 4 所示。在靠近抗浮锚杆的一侧放置上、中、下 3 个测量圆,远离抗浮锚杆一侧的中部区域放置一个测量圆。

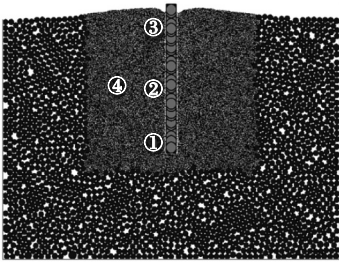
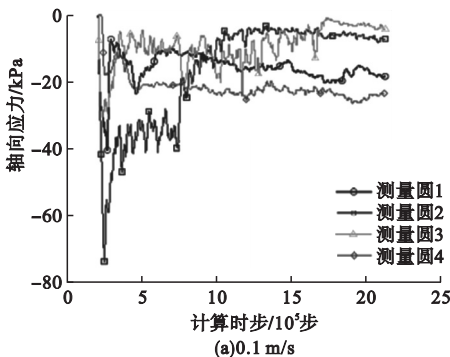


图 4 抗浮锚杆颗粒流模型测量圆分布图

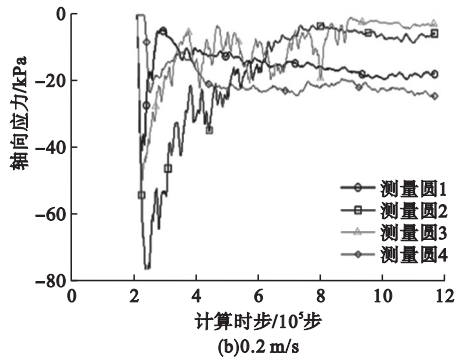
Fig. 4 Particle flow model of float-resistant anchor measuring circle distribution

2.2.1 竖向应力变化规律

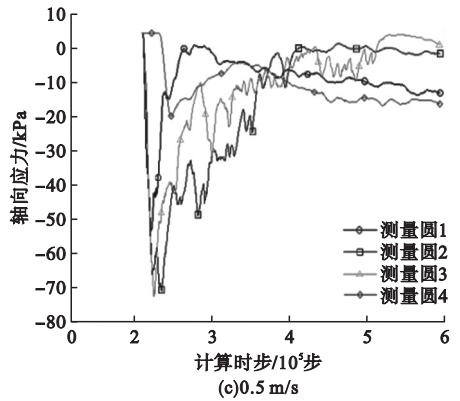
通过对不同监测区域进行研究,得到三种不同速度下抗浮锚杆颗粒流模型轴向应力随计算时步的变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出,在拉拔过程中,4 个测量圆区域的轴向应力呈先增大后减小、最后逐渐趋近一个稳定值的趋势。其中靠近抗浮锚杆中部区域的岩土体颗粒轴向应力增大的最多,远离抗浮锚杆中部区域的岩土体颗粒轴向应力增大的最少。因此在拉拔过程中,靠近抗浮锚杆中部的岩土体受到的应力最大,越远离抗浮锚杆受到应力越小,最终抗浮锚杆全部拉出土体



(a)0.1 m/s



(b)0.2 m/s



(c)0.5 m/s

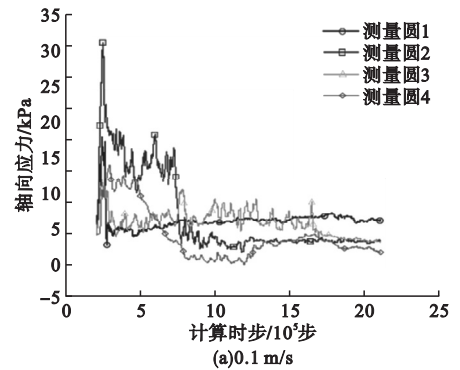
图 5 不同拉拔速度下抗浮锚杆颗粒流模型轴向应力时程曲线

Fig. 5 Time course curves of axial stress in granular flow model of anti-floating anchor with different pulling speed

后,由于产生了一个空白区域,此时轴向应力从小到大顺序:近锚杆上部、近锚杆中部、近锚杆下部以及远锚杆中部。

2.2.2 剪应力变化规律

通过对不同监测区域进行研究,得到三种不同速度下抗浮锚杆颗粒流模型剪应力随计算时步的变化曲线如图 6 所示。



(a)0.1 m/s

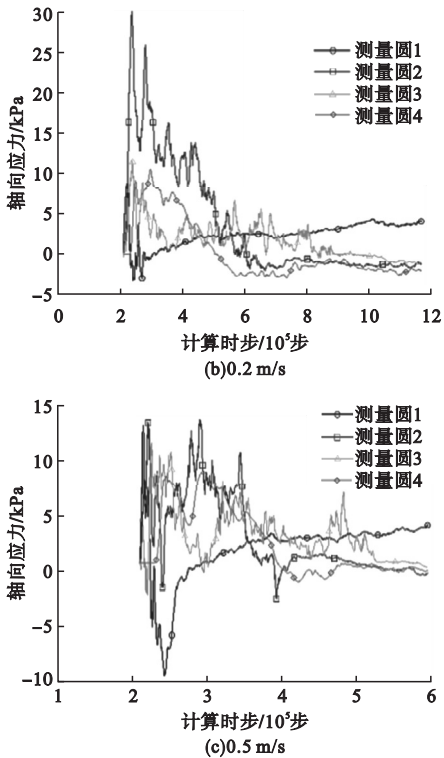


图6 不同拉拔速度下抗浮锚杆颗粒流模型剪向应力时程曲线

Fig. 6 Time course curves of shear stress in granular flow model of floating anchor with different pulling speed

从图6可以看出,在拉拔过程中,4个测量圆区域的剪应力呈先增大后减小,最后逐渐趋近一个稳定值的趋势。其中靠近抗浮锚杆中部区域的岩土体颗粒剪应力增大的最多,远离抗浮锚杆中部区域的岩土体颗粒剪应力增大的最少,因此在拉拔过程中,靠近抗浮锚杆中部的岩土体受到的应力最大,越远离锚杆受到应力越小,最终锚杆全部拉出岩土体后,由于产生了一个空白区域,此时剪应力从小到大顺序:近锚杆下部、近锚杆中部、近锚杆上部以及远锚杆中部。

2.2.3 孔隙率变化规律

通过对不同监测区域进行研究,得到三种不同拉拔速度下抗浮锚杆颗粒流模型的孔隙率随计算时步的变化曲线如图7所示。从图7可以看出,在拉拔过程中,各区域的孔隙

率变化呈先增大后减小,最后趋于一个稳定值的趋势。当抗浮锚杆全部拔出岩土体后,孔隙率计算结果从大到小依次为近锚杆上方、近锚杆下方、近锚杆中部以及远离锚杆中部。分析原因主要是由于岩土体在抗浮锚杆上部和下部受到了扰动破坏,导致孔隙率增大,而近锚杆中部区域颗粒在较大应力下更加紧密,远离锚杆中部受到的扰动较小,变化也较小。

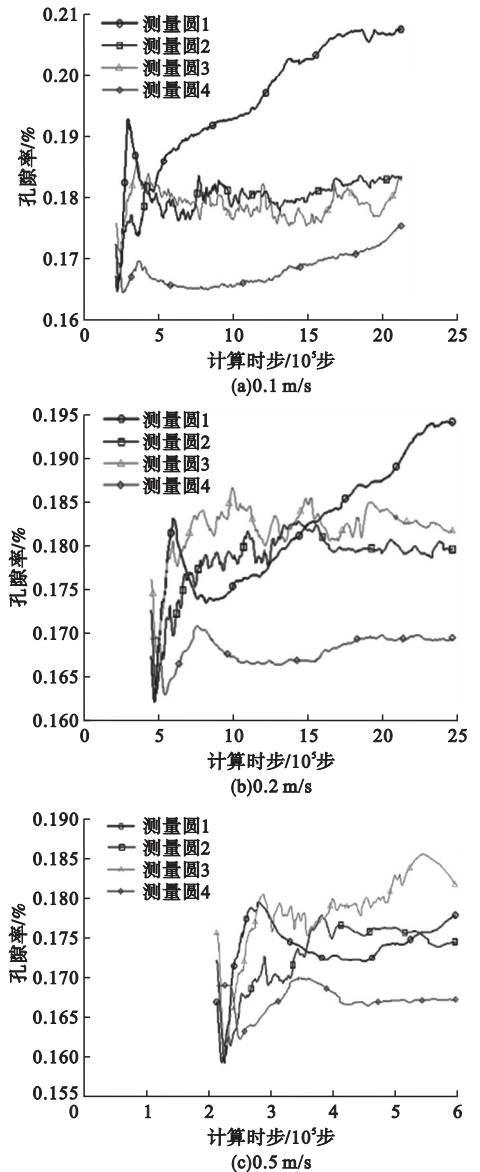


图7 不同拉拔速度下抗浮锚杆颗粒流模型孔隙率时程曲线

Fig. 7 Time course curves of granular flow model porosity of float-resistant anchors under different pulling speeds

3 单根锚杆拉拔时群锚的颗粒流模拟

本模型的打桩方式为隔桩跳打,在群锚颗粒流模拟时只对中间的抗浮锚杆进行拉拔(见图8),以此探究该工况下的岩土力学性质。

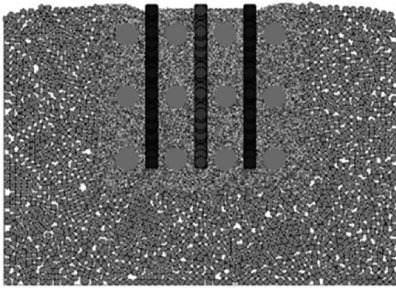


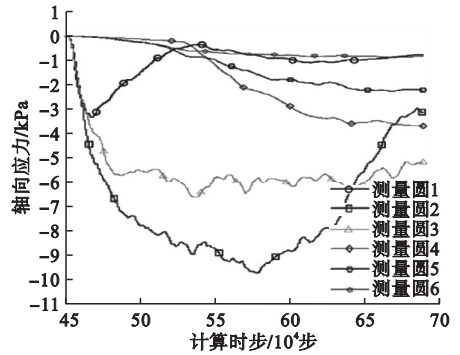
图8 单独拉拔中间抗浮锚杆的群锚颗粒流加载模型

Fig. 8 Group anchor particle flow loading model for individually drawn intermediate anti-floating anchors

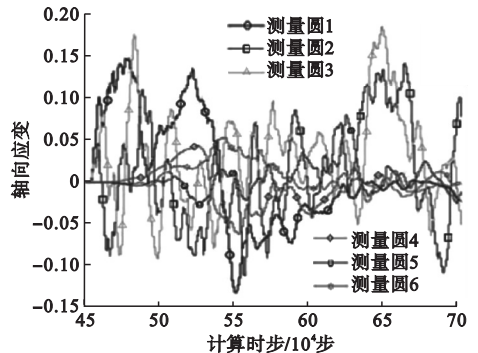
通过 PFC2D 建立只拉拔中间抗浮锚杆的群锚颗粒流模型,对两侧锚杆及附近岩土体进行力学分析,监测拉拔过程中相邻锚杆与不同土体区域的轴向应力、切向应力、轴向应变、切向应变以及孔隙率。以桩距为4倍抗浮锚杆直径为例,确定该种工况下的拉拔极限承载力,同一提升速度(0.5 m/s)下监测的轴向应力、剪向应力。

拉拔过程中需要对相邻抗浮锚杆以及岩土体不同区域进行监测,以得出抗浮锚杆与相邻锚杆以及岩土体颗粒作用机理。通过 PFC2D 中的 Measure 功能建立不同位置的测量圆,设置在靠近中间锚杆的左右两侧,分别布置上、中、下三个测量圆;还有外侧左右两侧中部也同样布置上、中、下三个测量圆。通过对测量圆区域范围内的轴线应力应变、孔隙率以及相邻锚杆的位移以及接触力等指标进行监测,结果如图9所示。

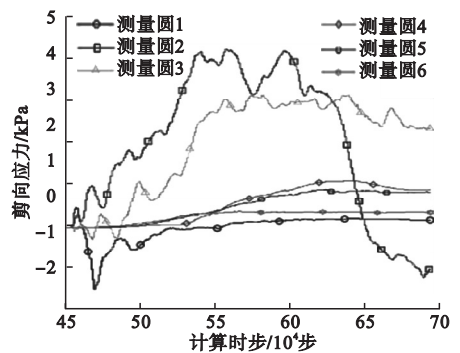
由图9可知,当中间抗浮锚杆向上拉拔、两侧锚杆不动时,轴向应力与剪向应力同样呈现先增大后减小,最终趋于稳定,轴向应变与剪向应变先在零刻度附近波动,随后保持



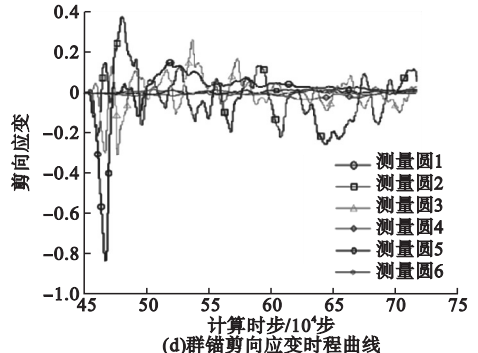
(a)群锚轴向应力时程曲线



(b)群锚轴向应变时程曲线



(c)群锚剪向应力时程曲线



(d)群锚剪向应变时程曲线

图9 单独拉拔中间抗浮锚杆群锚颗粒流模拟结果

Fig. 9 Simulation results of particle flow for group anchors of individually drawn intermediate anti-floating anchors

稳定的趋势。分析原因是在拉拔过后,在中间锚杆下部出现脱空区,出现脱空的区域锚杆与土体之间的相互作用消失,并且两侧锚杆也会对土体产生保护作用,导致剪向应力与轴向应力产生这种现象,并且由下到上土体的轴向应力及剪向应力依次降低,这主要是由于上方土体产生的位移以及速度更大所导致的。

不同区域的孔隙率监测结果如图 10 所示。由图可知,不同位置的孔隙率先逐渐增大最后趋于稳定。对于不同位置的孔隙率,外侧的岩土体孔隙率要比内侧的孔隙率小,分析原因是在拉拔过程中,内侧岩土体在相邻两根锚杆的上拉作用会导致岩土体变得疏松,相比于外侧孔隙率更大;外侧岩土体由于只受到一根锚杆的向上作用,使得原来的岩土体性质变化不大。最大的孔隙率为 0.194,位置为中间上部岩土体,最小的孔隙率为 0.163,位置为边缘下部岩土体。

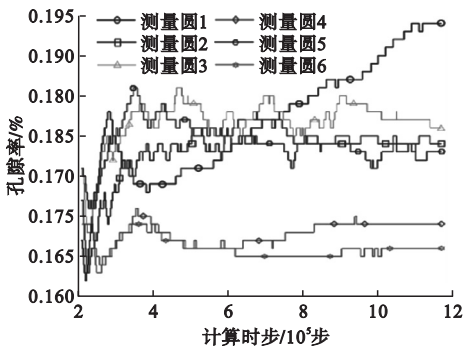


图 10 孔隙率变化时步图

Fig. 10 Time-step diagram of porosity change

为了研究在向上拉拔中间锚杆的过程中对相邻锚杆的影响,使用 PFC2D 软件来实时监测两侧锚杆的接触力,及时获得监测结果以此了解中间锚杆对相邻锚杆产生的影响。

随着中间抗浮锚杆的不断拉拔,其产生的作用力会导致相邻锚杆的接触力逐渐上升,在中间抗浮锚杆达到 300 kN 时,相邻锚杆的接触力达到最大值(见图 11)。随着中间抗浮锚杆的不断向上拉拔,接触力开始迅速减小,最终趋于零,这表明中间锚杆产生的

作用力会随着中间锚杆的移动而消失。

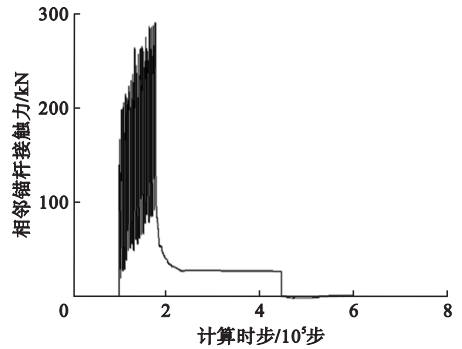


图 11 相邻锚杆接触力变化时步图

Fig. 11 Time step diagram of the change in contact force of adjacent anchor rods

4 结 论

(1)对于轴向应力,靠近抗浮锚杆中部的岩土体受到的应力最大,越远离锚杆受到的应力越小。对于孔隙率,孔隙率从大到小的区域依次为近锚杆下部、近锚杆中部、近锚杆上部以及远锚杆中部。

(2)当中间抗浮锚杆向上拉拔、两侧锚杆不动时,轴向应力与剪向应力同样呈现先增大后减小、最终趋于稳定的变化规律。

(3)相邻的锚杆在中间锚杆不断上拔的过程中,接触力循环上升并最终达到最大值,随后迅速减小。由于锚杆之间的距离较近,因此出现了群锚效应,单锚的抗拔力损失明显。此外,早期少数锚杆变形过大失效后,浮力荷载转移到了临近锚杆导致连锁反应,是引起锚杆失效的原因。

参考文献

- [1] 白晓宇,张明义,朱磊,等.全长黏结 GFRP 抗浮锚杆界面剪切特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1407-1418.
(BAI Xiaoyu,ZHANG Mingyi,ZHU Lei,et al. Experimental study on shear characteristics of interface of full-bonding glass fiber reinforced polymer anti-floating anchors [J]. Journal of rock mechanics and engineering,2018,37(6):1407-1418.)
- [2] 王勇生,刘延金.采用二维颗粒流软件对水泥冷再生混合料间接抗拉强度模拟[J].硅酸盐学报,2019,47(11):1611-1620.
(WANG Yongsheng,LIU Yanjin. Simulation

- on indirect tensile strength of cement cold recycling mixtures using particle flow code of two dimension [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2019, 47(11): 1611 - 1620.)
- [3] 胡训健, 卞康, 谢正勇, 等. 细观结构的非均质性对花岗岩强度及变形影响的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1540 - 1548. (HU Xunjian, BIAN Kang, XIE Zhengyong, et al. Influence of meso-structure heterogeneity on granite strength and deformation with particle flow code [J]. Journal of geotechnical engineering, 2020, 42(8): 1540 - 1548.)
- [4] 李兵, 刘阳, 李卓伦, 等. 锚杆参数对深基坑变形影响的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 404 - 411. (LI Bing, LIU Yang, LI Zhuolun, et al. Finite element analysis of influence of bolt parameters on deformation of deep foundation pit [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 404 - 411.)
- [5] 白晓宇, 张明义, 匡政, 等. 风化岩地基中玻璃纤维增强聚合物抗浮锚杆体系受力特性数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(6): 1466 - 1473. (BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, KUANG Zheng, et al. Numerical simulation on bearing behavior of glass fiber reinforcement polymer anti-floating anchor system in weathered rock foundation [J]. Journal of central south university (natural science edition), 2019, 50(6): 1466 - 1473.)
- [6] 张昕, 乐金朝, 刘汉东. 砂土中群锚锚周土体变形特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 240 - 248. (ZHANG Xin, LE Jinchao, LIU Handong. Experimental study of soil deformation around group anchors in sand [J]. Geotechnical mechanics, 2016, 37(S1): 240 - 248.)
- [7] 陶文斌, 陈铁林, 张群, 等. 考虑非均匀应力场巷道弹塑性分区的锚杆力学分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(6): 2131 - 2140. (TAO Wenbin, CHEN Tielin, ZHANG Qun, et al. Analysis of bolt considering elastic-plastic zoning of surrounding rock with non-uniform stress field [J]. Journal of Jilin university (engineering and technology edition), 2020, 50(6): 2131 - 2140.)
- [8] 靖洪文, 吴疆宇, 尹乾, 等. 动载扰动下深部煤巷冲击冒顶的颗粒流数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊2): 3475 - 3487. (JING Hongwen, WU Jiangyu, YIN Gan, et al. Particle flow simulation of rock burst and roof fall of deep coal roadway under dynamic disturbance [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(S2): 3475 - 3487.)
- [9] HAERI H, SARFARAZI V, ZHU Z M. Effect of normal load on the crack propagation from pre-existing joints using particle flow code (PFC) [J]. Computers and concrete, 2020, 12(3): 449 - 460.
- [10] LIU W R, X WANG, LI C M. Numerical study of damage evolution law of coal mine roadway by particle flow code (PFC) model [J]. Geotechnical and geological engineering, 2019, 37(4): 2883 - 2891.
- [11] SU H, FU Z, GAO A, et al. Particle flow code method-based meso-scale identification for seepage failure of soil levee [J]. Transport in porous media, 2017, 119(2): 1 - 26.
- [12] YANG L, SHE C X, JIAO X L. A new method for simulating rockfill roller compaction using particle flow code [J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(10): 3029 - 3028.
- [13] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 2016, 29(1): 47 - 65.
- [14] SHI C, YANG W, YANG J, et al. Calibration of micro-scaled mechanical parameters of granite based on a bonded-particle model with 2D particle flow code [J]. Granular matter, 2019, 21(2): 1 - 13.
- [15] LIU W R, X WANG, LI C M. Numerical study of damage evolution law of coal mine roadway by particle flow code (PFC) model [J]. Geotechnical and geological engineering, 2019, 37(4): 2883 - 2891.
- [16] SARFARAZI V. Behavior of a tunnel and its neighboring joint with and without presence of rock bolt under biaxial loads; particle flow code approach [J]. Journal of mining and environment, 2020, 11(3): 855 - 864.
- [17] 周健, 池毓蔚, 池永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2020, 22(6): 701 - 704. (ZHOU Jian, CHI Yuwei, CHI Yong, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code [J]. Journal of geotechnical engineering, 2020, 22(6): 701 - 704.)
- [18] 刘文白, 周健. 上拔荷载作用下桩的颗粒流数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2014, 26(4): 516 - 521. (LIU Wenbai, ZHOU Jian. Numerical simulation of particle flow code for pile under uplifting load [J]. Journal of geotechnical engineering, 2014, 26(4): 516 - 521.)
- [19] 彭国园, 周海清, 周淑玲. 红粘土细观力学特性的颗粒流模拟[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(1): 41 - 45. (PENG Guoyuan, ZHOU Haiqing, ZHOU Shuling. Simulation of mesoscopic mechanic properties on red clay by using particle flow code [J]. Journal of Chongqing university of technology (natural sciences), 2017, 31(1): 41 - 45.)
- [20] 胡训健, 卞康, 谢正勇, 等. 细观结构的非均质性对花岗岩强度及变形影响的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1540 - 1548. (HU Xunjian, BIAN Kang, XIE Zhengyong, et al. Influence of meso-structure heterogeneity on granite strength and deformation with particle flow code [J]. Journal of geotechnical engineering, 2020, 42(8): 1540 - 1548.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)