

乔建刚,李娟,张勇,等.基于PFC的抗浮锚杆上拔群锚效应研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):93-101.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240072

QIAO Jiangang,LI Juan,ZHANG Yong,et al.Research on the group anchor effect of anti floating anchor rod pull-out based on PFC [J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(1):93-101.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240072

## 基于PFC的抗浮锚杆上拔群锚效应研究

乔建刚<sup>1</sup>,李娟<sup>2\*</sup>,张勇<sup>3</sup>,李景文<sup>1</sup>

(1.河北工业大学 土木与交通学院,天津 300401;2.沧州交通学院 土木建筑工程学院,河北 沧州 061199;  
3.河北省高速公路延崇筹建处,河北 张家口 075400)

**摘要:**为探究抗浮锚杆上拔群锚效应机理,提高抗浮锚杆的抗拔承载力,借助接触力学方法建立了抗浮锚杆抗拔承载力的细观力学模型,并利用颗粒流理论建立离散元模型,分析不同工况条件下抗浮锚杆与岩土体之间的力学性能。研究表明:基于颗粒流模型的分析方法,能有效分析抗浮锚杆的群锚效应;当锚杆桩距为 $4D$ 、 $6D$ 和 $8D$ 时,轴向应力与剪应力均表现为先增大后减小,最后趋于稳定的趋势;随着桩距不断增加,抗浮锚杆之间的轴向应力呈现先增加后减少的趋势;随着计算时步增加,不同位置处孔隙率呈现先增大后稳定的趋势。研究结论为地下结构工程建设及安全管理提供技术手段。

**关键词:**抗浮锚杆;群锚效应;颗粒流;应力分布;孔隙率

中图分类号:TU476

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)01-0093-09

### Research on the group anchor effect of anti-floating anchor rod pull-out based on PFC

QIAO Jiangang<sup>1</sup>, LI Juan<sup>2\*</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup>, LI Jingwen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of civil engineering, Cangzhou Jiaotong College, Cangzhou 061199, China; 3. Hebei Expressway Group Limited Yanchong Preparation Department, Zhangjiakou 075400, China)

**Abstract:** To explore the mechanism of pull-out group anchor effect of anti-floating anchor rods and improve the anti-lifting bearing capacity of anti-floating anchor rods. A micromechanical model for the pull-out bearing capacity of anti-floating anchor rods was established using contact mechanics methods, and a discrete element model was established using particle flow theory to analyze the mechanical properties between anti-floating anchor rods and rock and soil under different working conditions. The results show that when the distance between anchor piles is  $4D$ ,  $6D$ , and  $8D$ , both axial stress and shear stress show an initial increase followed by a decrease, and finally tend to stabilize. As the pile spacing increases, the axial stress between the anti-floating anchor rods shows a trend of first increasing and then decreasing. As variation time step increases, the porosity at different positions shows a trend of first increasing and then stabilizing. The analysis method based on particle size model can effectively analyze the group anchoring effect of anti-floating anchor rods, providing technical means for underground structural engineering construction and safety management.

**Key words:** anti-floating anchor rod; group anchor effect; particle flow; stress distribution; porosity

## 0 引言

随着城市化进程的加快,土地资源紧缺的问

题日益严重,地下空间的开发和利用在拓宽人类生存空间的同时,已然成为岩石工程发展的核心内容之一<sup>[1]</sup>。锚杆作为土木工程中常见的加固手

收稿日期:2024-03-26 修回日期:2024-05-22 接受日期:2024-06-03 责任编辑:朱含露

基金项目:国家重点研发项目(2017YFC0805404);国家自然科学基金项目(52278342)

作者简介:乔建刚(1963-),男,山西晋中人,博士,教授,主要从事地下结构安全稳定性方面的研究。E-mail:845059811@qq.com

通信作者:李娟(1986-),女,河北沧州人,硕士,工程师,主要从事地下结构安全稳定性方面的研究。E-mail:juanli@czjtu.edu.cn

段,被广泛应用于地下工程、边坡稳定等基础设施中。但受复杂的工程技术问题、地质环境以及抗浮设防水位设置、建筑施工质量、支护材质或参数选定等因素的影响,抗浮锚杆失效普遍存在。这不仅导致建筑物结构被破坏,还会造成较为严重的经济损失,严重威胁人身安全。抗浮锚杆系统主要由抗浮锚杆、基础底板和岩土体三部分组成。抗浮锚杆是一种常用的抗浮手段,通常由外裹水泥砂浆的普通钢筋制成,一端利用水泥砂浆锚固在岩土体中,另一端则通过垫板和螺母固定在底板中。抗浮锚杆锚固机理是:当地下室底板受到向上的地下水浮力作用时,地下室底板在抗浮锚杆端头处施加拉拔载荷,这一载荷通过锚杆的钢筋杆体与锚固体之间的作用,以及锚固体与周边岩土体之间的摩擦作用进行传递,从而使抗浮锚杆具有一定的抗拉承载能力<sup>[2]</sup>。当主要承险体结构被破坏时,抗浮锚杆系统发生危险。抗浮设防水位较低时,会引起大量地表水入渗,导致地下建筑物在水浮力极限情况下发生失稳问题,引发结构安全隐患事故<sup>[3]</sup>。地下结构的抗浮措施主要通过两种方式实现:一是提高抗力,如采用压载加固或增加底板刚度等方法;二是降低地下水位,如通过降排地下水和截水法等。《给水排水工程管道结构设计规范》(GB 50332—2002)<sup>[4]</sup>规定,抗浮稳定性抗力系数应大于1.05,《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002)<sup>[5]</sup>规定:抗浮稳定性系数应大于1.05。

学者们在抗浮锚杆载荷的传递机理、受力分布规律、渐进性失效机理方面开展了大量研究。靖洪文等<sup>[6]</sup>采用颗粒流软件(particle flow code in 2 dimensions, PFC2D)对锚杆索巷道围岩进行试验模拟,并对岩层和锚杆的细观力学特性进行参数标定,得到锚固失效的破坏机理。LIU等<sup>[7]</sup>借助颗粒流理论构建煤矿巷道损伤演化模型,通过接触力链、变形位移及微裂纹分布特征分析了巷道破坏过程。王建明等<sup>[8]</sup>借助非接触摄影测量系统获取岩体裂隙基本参数,利用PFC数值计算软件对不同高度边坡进行模拟,分析不同开采水平下坡体位移场和裂隙发展的时空演化规律。李力等<sup>[9]</sup>基于离散元理论,对深海沉积物进行颗粒流模拟试验,分析了深海沉积物的剪切特性和破坏机理。刘晓

明等<sup>[10]</sup>基于三折线本构模型,对锚杆锚头荷载进行抗拔承载力分析,分析了基坑防护结构中锚固界面的破坏机理。上述研究表明,PFC数值模拟方法能通过模型计算和数值求解来揭示单元空间内颗粒流动的行为特征、力学结构和现象规律。

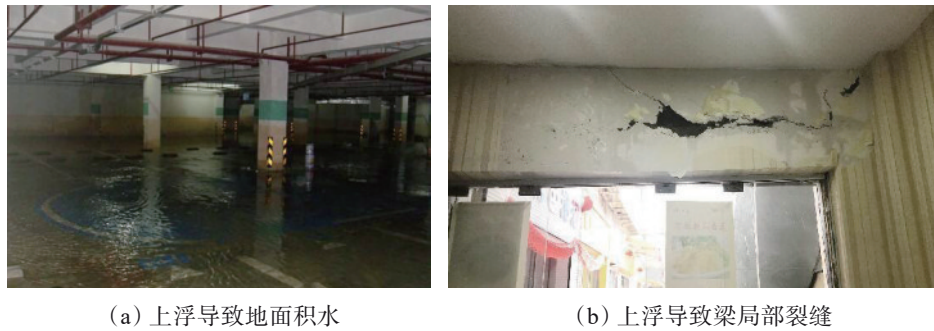
但已有研究主要从宏观层面上基于连续介质力学理论对抗浮锚杆的锚固机理进行试验分析,如何利用有限元方法对抗浮锚杆进行数值模拟,并将颗粒流理论应用到抗浮锚杆群锚效应机理的研究还需进一步完善。同时常规有限元分析难以对抗浮锚杆周围岩土体为砂土时的破坏机理进行分析。基于此,为探究抗浮锚杆上拔群锚效应机理,从细观层面利用PFC数值计算软件开展抗浮锚杆群锚效应的研究。

## 1 抗浮锚杆颗粒流模型构建

### 1.1 工程概况

某会所北侧和东侧分别为电子厂和建设大道,总建筑面积为 $0.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,地上部分共三层,地下室共两层。地下室呈矩形,南北长和东西宽均超过60 m,主要为车库及设备辅助用房。会所地下室底板高程为2.5 m。该场地地基土层主要包括杂填土(平均厚度为2.55 m)、素填土(平均厚度为2.56 m)、细砂(层顶埋深为0.5~6.3 m),且该场区地下水为潜水类型,平水期下的地下水静水位埋深为2~4.3 m。在后期建设管理过程中,会所的地下室结构存在一定程度的损伤,填充墙存在多处裂缝且地面有积水,见图1。根据已有观测资料可知,该地下室结构损伤情况频有发生,其原因可能与基础筏板在施工时未考虑到高程差有关,进而导致不均匀沉降隐患问题突出。

防水地板隆起和梁体变形可能是由于锚杆间距设置不当,导致群锚效应明显,致使单个锚杆的承载力受到影响,抗拔力损失。地下室中庭位置部分整体抗浮能力不足,当发生单根锚杆失效时,可能引起其周围锚杆跟随失效的不良连锁反应。锚杆被拔断、拔出或者外锚头损坏等都会引起抗浮锚杆结构发生危险。因此,加强对抗浮锚杆失效机理的研究,对保证锚杆系统和建筑结构的安全具有重要的意义<sup>[11]</sup>。



(a) 上浮导致地面积水 (b) 上浮导致梁局部裂缝

图 1 地下结构上浮情况

Fig.1 underground structure uplift situation

1.2 PFC 颗粒流计算模型构建

PFC 颗粒流方法是以分子动力学为理论支撑, 借助圆盘或圆球颗粒单元接触的方式来体现结构的宏观力学特性<sup>[12]</sup>。PFC 颗粒流在计算过程中遵循“循环序列”操作。由于时间步长太大会引起模拟结果失真、颗粒溢出等问题<sup>[13]</sup>, 在循环的起始计算时, 系统会基于离散元法设定步长, 以确保模型的数值具有稳定性。按照该思路, 系统会自动累加不同时间的步长值, 以获得不同时间下的累加步长。累加步长可用以更新接触模型和获取每个接触点颗粒的实时状态, 进而确定力与位移之间的作用关系, 见图 2。

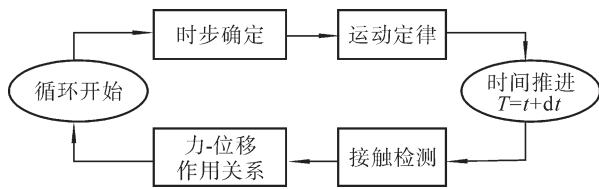


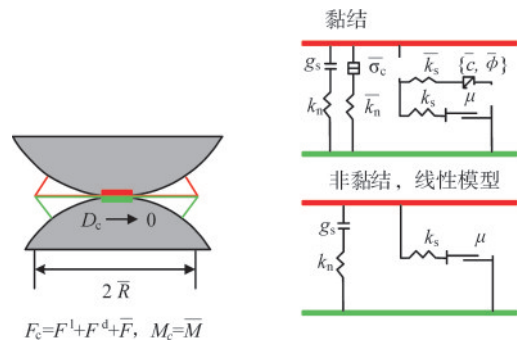
图 2 颗粒流程序计算流程

Fig.2 particle flow program calculation process

采用 PFC 颗粒流模拟方法进行计算时, 可进行以下假设: ①将模型中颗粒看作刚性小球体; ②颗粒之间接触视为柔性接触, 允许柔性颗粒在接触位置存在一定的重叠距离, 该值远小于颗粒单元直径; ③重叠距离与接触力存在一定联系, 通过重叠量、模型对应的接触参数, 可以计算两颗粒之间的作用力; ④颗粒之间在接触部位具有黏结强度。

PFC 借助离散单元的接触形式实现圆形颗粒介质在不同接触模型下的力学作用和运动行为分析, 将细观力学响应问题抽象为数学意义下的颗粒单元运动问题, 本质为接触本构关系<sup>[14-15]</sup>。在颗粒流模型中, 按照颗粒流是否与抗浮锚杆相互作用, 将模型划分为试验区和支撑区进行构建。岩土体由大量不规则颗粒构成, 单个颗粒的形状和单元直径会影

响到岩土体的力学性质。因此, 建模时需要考虑颗粒直径的选取, 颗粒单元过大或过小都会造成计算资源的浪费<sup>[16-17]</sup>。此外, 岩土体的颗粒之间不是单一点接触关系, 具有一定的黏结性, 因此可利用平行黏结模型来描述岩土体颗粒之间的力学特性和物理作用<sup>[18-19]</sup>, 平行黏结模型见图 3。



$$F_c = F^l + F^d + \bar{F}, M_c = \bar{M}$$

图 3 平行黏结模型类型

Fig.3 parallel bonding model types

图 3 左边部分图示中的上下两个部分所受到的接触力  $F_c$  包括线性力  $F^l$ 、阻尼力  $F^d$ 、黏结力  $\bar{F}$ , 接触力矩  $M_c$  等于黏结力矩。

在指定区域生成颗粒模型之后, 采用显示时间积分法, 通过 PFC 中的“set timestep scale”命令流, 让模型迅速达到稳态, 并在计算过程中不断删除溢出模型区域的颗粒, 最终得到不平衡力比在 1/1 000 以下的稳态模型。

设置岩土体模型在试验区和支撑区的单元粒径分别为 0.1~0.3 cm 和 0.5~1 mm, 岩土体的密度参数为 2 800 kg/m<sup>3</sup>。以建立的抗浮锚杆与岩土体模型为基础, 进行抗浮锚杆拉拔过程的模拟试验。以一定速度推动抗浮锚杆端头沿锚杆轴向运动, 实现对抗浮锚杆施加拉拔载荷。抗浮锚杆在拉拔载荷的作用下不断向上运动, 逐步脱离岩土体, 在拉拔试验过程中, 锚杆顶部的周围岩土体产生了鼓胀现象<sup>[20]</sup>。监测抗浮锚杆与周围岩土体之间的接

触力，其峰值即为拉拔极限承载力。在抗浮锚杆拉拔出一定长度后，且模型通过了稳态计算，立

即停止载荷施加，此时得到最终的稳态模型。群锚模拟状态见图4。

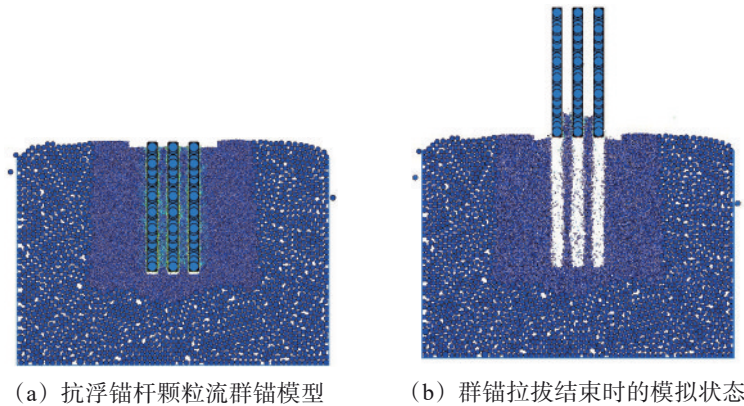


图4 群锚模拟状态

Fig.4 group anchor simulation status

在模型构建过程中，还需依据颗粒数量和孔隙率情况进行实验设定，并借助软件程序实现参数的自动标定。当岩土体模型达到稳态之后，通过 geometry 命令流来限定模型中锚杆的形状大小，

并通过 Clump template 命令流实现真实锚杆的表征。在拉拔试验中，可监测抗浮锚杆与周围岩土体之间的接触力。岩土体物理力学的参数情况见表1。

表1 岩土体物理力学参数

Tab.1 physical and mechanical parameters of rock and soil

名称	摩擦系数	法向刚度/MPa	切向刚度/MPa	法向黏结强度/MPa	切向黏结强度/MPa	颗粒直径/cm
墙体	1	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>			
锚杆	10	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>24</sup>	10 <sup>24</sup>	
试验区土颗粒	6	10 <sup>1</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	0.1 ~ 0.2
支撑区土颗粒	6	10 <sup>1</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	1.0

注：墙体和锚杆的参数依据勘察资料获取，试验区和支撑区的颗粒参数由软件中的参数标定程序设计得到。

## 2 抗浮锚杆上拔群锚效应颗粒流模拟

指标进行分析，抗浮拉杆与周围岩土体的拉拔极限承载力直接关系到结构的抗浮能力和结构稳定性。在不同拉拔速度下，抗浮锚杆的极限承载力仿真结果见图5。

### 2.1 极限承载力变化规律

从细观层面对颗粒流模型下抗浮锚杆的力学

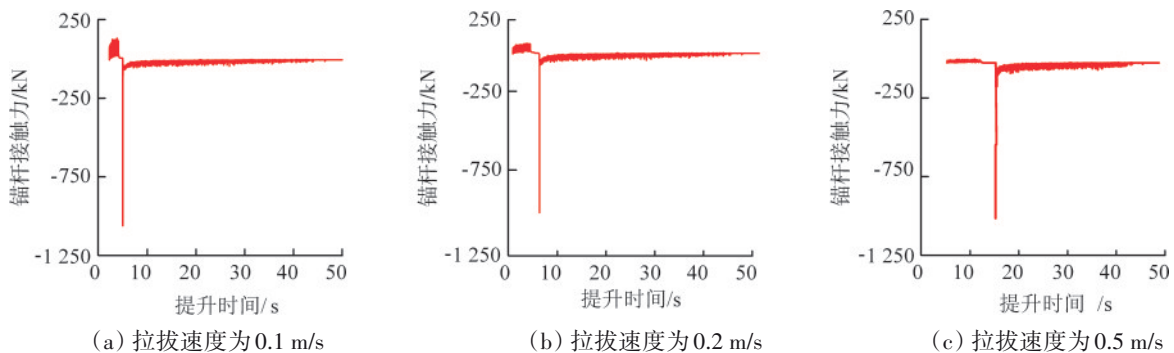


图5 不同拉拔速度载荷下的极限承载力

Fig.5 ultimate bearing capacity under different pulling speeds and loads

由图5可见，当处于不同拉拔速度时，极限承载力的变化存在差异，但总体是呈先增大后减小，最后趋于0的趋势。这是因为锚杆向上移动时的摩

擦力逐渐增大，达到最大值后，静摩擦力转变为滑动摩擦力。最大静摩擦力为拉拔过程中的极限承载力。锚杆拉拔速度分别为0.1 m/s、0.2 m/s和

0.5 m/s 时的最大摩擦力分别为 1 050 kN、1 034 kN 和 1 068 kN。当抗浮锚杆未受拉拔载荷作用时, 锚固体与岩土体之间的粗糙界面上, 部分微凸体并未发生接触。而当抗浮锚杆受到拉拔载荷作用时, 随着拉拔载荷的逐渐增大, 微凸体发生弹性变形, 拉拔速度增加带来的载荷变化较小。借助命令流 clump history contactforce 监测抗浮锚杆在不同拉

拔速度下的极限承载力, 发现抗浮锚杆的摩擦力变化相对较小。取锚杆极限承载力的平均值为 1 050.7 kN, 对锚杆岩土体的颗粒运动情况进行进一步分析。为更好地模拟抗浮锚杆在岩土体中的真实受力情况, 将模型过程分为抗浮锚杆的打入与拔出。在拉拔极限承载力下, 得到抗浮锚杆周围岩土体中的颗粒速度、位移和力链, 见图 6。

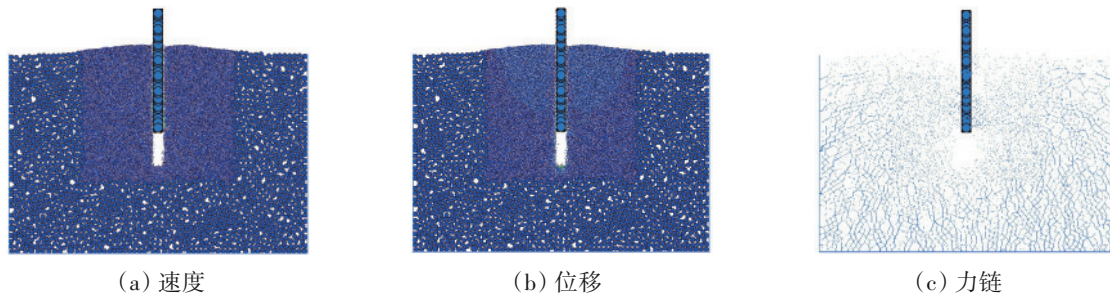


图 6 极限承载力速度载荷下的岩土体颗粒的状态参数

Fig.6 state parameters in geotechnical bodies particles under ultimate bearing capacity velocity loading

由图 6 (a)、图 6 (b) 可知, 极限承载力条件下, 颗粒速度和位移表现出明显的向上分布态势, 且内侧与抗浮锚杆接触部分的颗粒速度明显大于外侧, 当锚杆速度小于 0.5 m/s 时, 颗粒最大速度小于等于 0.4 m/s, 最大位移变化量小于等于 0.49 m/s。由图 6 (c) 可知, 岩石体颗粒的分布区域呈现由锚杆底部分散开来的渐变式态势, 并在其下部出现空白无接触区域。导致该结果的原因为岩土体自身重力与锚杆拉拔之间的相互对抗力使得岩土体的下部与锚杆接触较多, 进而使上部岩土体接触力小, 下部岩土体接触力大。

借助 PFC2D 中的 Measure 功能建立不同位置的测量圆, 对 3 根抗浮锚杆的不同位置受力情况进行分析。抗浮群锚颗粒流模型见图 7。该群锚模型包含左、中、右共 3 根抗浮锚杆, 在不同位置设置适应锚杆间距的测量圆, 共布置 12 个测量圆, 依次由上到下排列。

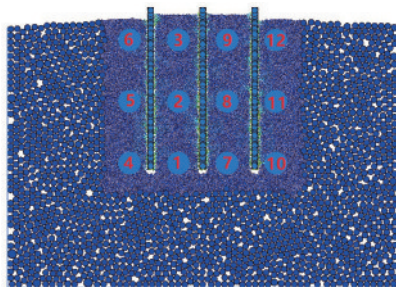


图 7 抗浮锚杆群锚颗粒流模型

Fig.7 particle flow model of anti floating anchor rod group anchor

抗浮锚杆群锚颗粒流模型包含 5 种工况, 依次为锚杆桩距取抗浮锚杆直径的 2 倍、4 倍、6 倍、8 倍、10 倍, 在同一提升速度 (0.5 m/s) 下, 监测 5 种工况下的轴向应力和剪应力变化, 确定每种工况的上拔极限承载力。

## 2.2 应力变化规律

对不同桩距下的群锚应力变化情况进行分析, 其中桩距为  $2D$ 、 $4D$  时的群锚颗粒流模拟结果见图 8 (其中  $D$  表示抗浮锚杆的直径)。

由图 8 可见, 随着计算时步的不断增加, 群锚结构经历了从初始状态到稳定状态的过渡过程。在此过程中剪应力可能受到时间响应和动态响应的影响, 从而出现峰值变化。在图 8 (b) 和图 8 (d) 中, 剪应力呈现先增大后减小的趋势, 原因在于在拉拔过程中, 下部出现采空区, 使采空区的区域抗浮锚杆与岩土体之间的相互作用消失, 从而使得出现峰值的区域有所不同。出现剪应力峰值的区域先是下部, 再到中间和上部。当锚杆桩距为  $2D$  时, 不同测量区域的群锚轴向应力和剪应力不同, 内侧岩土体的应力变化在计算时步大于  $6 \times 10^5$  时趋于平稳。拉拔过程中, 抗浮锚杆靠近中部的颗粒应力值大于远离中部的应力值。当锚杆被完全拔出时, 颗粒的轴向应力与其拉拔过程中的应力结果存在差异 (近锚杆下部以及远锚杆中部的轴向应力 > 近锚杆中部的轴向应力 > 近锚杆上部的轴

向应力)。其原因在于,当下部出现采空区时,此时的速度载荷为0,锚杆与岩土体之间不存在相互作用力。由下到上,锚杆的轴向应力及剪应力依次降低,主要是由于上方岩土体产生的位移以及速度比下方岩土体大得多,进而导致剪应力与轴向应力呈现出先增大后减小最终趋于稳定的趋势<sup>[21]</sup>。锚固体与周

围岩土体粗糙表面间的接触,在微观上是微凸体与微凸体的接触。在剪应力作用下,界面会产生微小的相对滑动,故在剪切过程中,前期界面处的应变较小,随着剪切力的不断增大,微凸体被整体剪断,剪切强度会有所增加,但后期变化会相对稳定。桩距越大,则其锚杆下部受重力及锚杆拉力作用越明显<sup>[22]</sup>。桩距6D~10D时的群锚颗粒模拟结果见图9。

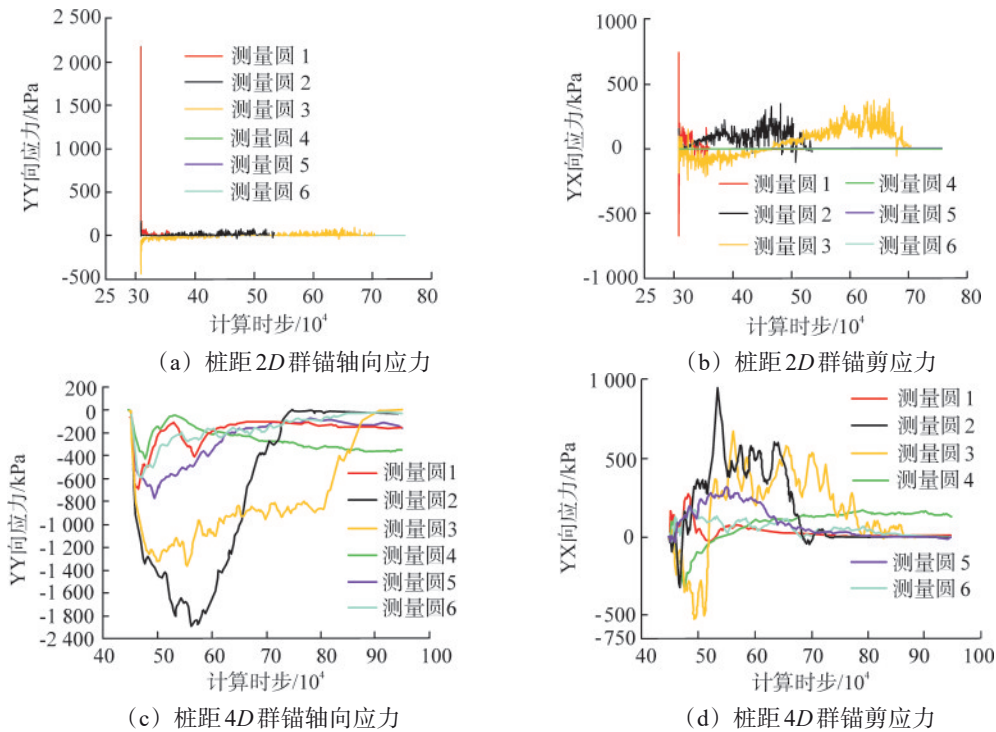


图8 桩距2D和4D群锚颗粒流模拟结果

Fig.8 simulation results of particle flow for 2D and 4D group anchor piles

由图9可见,锚杆桩距分别为6D、8D、10D时,随着计算时步不断增加,剪应力、轴向应力都呈现先增加后减小,最后趋于稳定。产生上述情况的原因是在拉拔过程中,下部出现采空区,此范围内抗浮锚杆与岩土体之间的相互作用力消失。桩距为6D时,内侧岩土体的轴向应力及剪应力曲线变化较大,负值较多。上方岩土体的应力情况大于下方,且随着土体深度的增加,其轴向应力和剪应力的数值下降情况更为明显。这是由于上下岩土体的压力差致使上方岩土体的位移和速度变化大于下方,剪应力最大峰值为980 kPa,轴向应力最大峰值为890 kPa。桩距为8D时,剪应力最大峰值为965 kPa,轴向应力最大峰值为1 350 kPa。桩距为10D时,随着计算时步的不断加,轴向应力与剪应力呈现的规律不是特别明显。原因是当抗浮锚杆之间的间距过大时,锚杆在拉拔过程中对周围岩土体的作用有限,轴向应力及剪应力

不会出现较大的变化,但是可以看出上方的岩土体轴向应力和剪应力还是大于下方岩土体的轴向应力和剪应力。整理不同桩距的轴向应力、剪应力,拟合得到不同桩距条件下的轴向应力、剪应力变化曲线,见图10。

如图10所示,随着桩距的不断加,抗浮锚杆之间的轴向应力呈现出先增加后减少的趋势,其中,桩距为4D时,抗浮锚杆的轴向应力达到最大值1 627 kPa,拟合曲线为

$$y = 152.42x^3 - 1\ 612.6x^2 + 4\ 952x - 3\ 068.6 \quad (R^2 = 0.790\ 5), \quad (1)$$

式中:  $y$  为抗浮锚杆的轴向应力, kPa;  $x$  为锚杆桩距, m。

剪应力同样呈现先增加后减少的趋势,桩距为7D时,抗浮锚杆的剪应力达到最大值,为1 249 kPa,拟合曲线为

$$y' = -88.572x^3 + 580.41x^2 - 802.46x + 751.15$$

$$(R^2 = 0.8292), \quad (2)$$

式中,  $y'$  为抗浮锚杆的剪应力, kPa。

由于抗浮锚杆在拉拔过程中主要考虑轴向应力,

当桩距为  $4D$  时, 轴向应力为  $1\,627\text{ kPa}$ , 符合《建筑地基基础设计规范》(GB 50021—2001) 规定, 因此, 当桩距为  $4D$  时, 抗浮锚杆的群锚效应最佳。

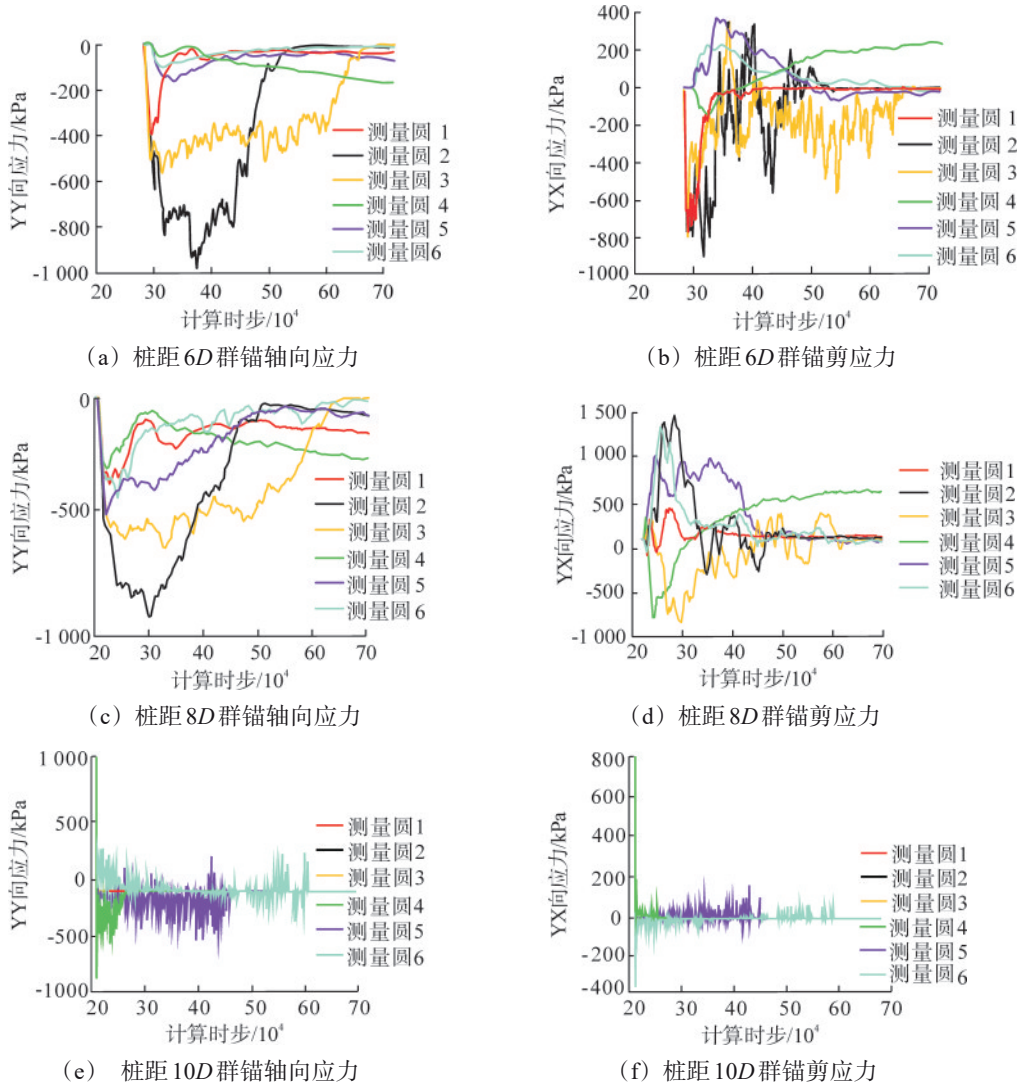


图 9 桩距  $6D$ 、 $8D$ 、 $10D$  群锚颗粒流模拟结果

Fig.9 particle flow simulation results of group anchors with pile spacing of  $6D$ ,  $8D$ , and  $10D$

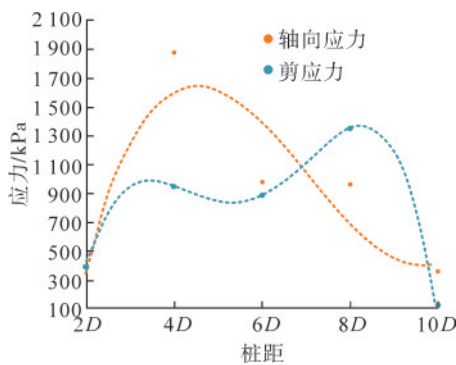


图 10 不同桩距下抗浮锚杆的剪应力、轴向应力  
Fig.10 shear stress and axial stress of anti floating anchor rods under different pile spacing

### 2.3 不同桩距条件下的孔隙率变化规律

土体密实度、锚杆受力状态都会影响到锚杆周围土体的孔隙率, 孔隙率过大, 会导致锚杆与周围土体的接触面积减小, 从而降低锚杆的承载能力。锚杆桩距过小, 会使测量圆区域覆盖变小, 导致孔隙率结果失真, 因此只监测锚杆桩距为锚杆直径 6 倍、8 倍、10 倍模型的孔隙率变化, 监测结果见图 11。

由图 11 可见, 当桩距不同时, 不同位置测量圆的孔隙率变化存在差异。其中外侧 (测量圆 4~测量圆 6) 岩土体 6 的孔隙率在桩距分别为  $6D$ 、 $8D$  和

10D时,其数值基本低于0.18。位于内侧的测量圆3在6D、8D、10D三种桩距条件下,孔隙率呈现出上升趋势,当计算时步大于 $6 \times 10^5$ 时,最大孔隙率分别达到了0.225、0.204、0.205。导致内外侧岩土体孔隙差异的原因,可能是在拉拔过程中,作用于外侧岩土体的抗浮锚杆数量少于内侧,从而导致土体受到的拉扯作用不大。当锚杆桩距为6D时,位于中间位置的岩土体(测量圆2)孔隙率最大,为0.236;

边缘下部岩土体(测量圆4)的孔隙率最小,为0.156。当锚杆桩距为8D时,中间上部岩土体(测量圆3)的孔隙率最大,为0.205;边缘下部岩土体(测量圆5)的孔隙率最小,为0.138。当锚杆桩距为10D时,中间上部岩土体(测量圆3)的孔隙率最大,为0.208;边缘下部岩土体(测量圆5)的孔隙率最小,为0.149。当桩距为8D时,最大孔隙率、最小孔隙率均最小,效果最优。

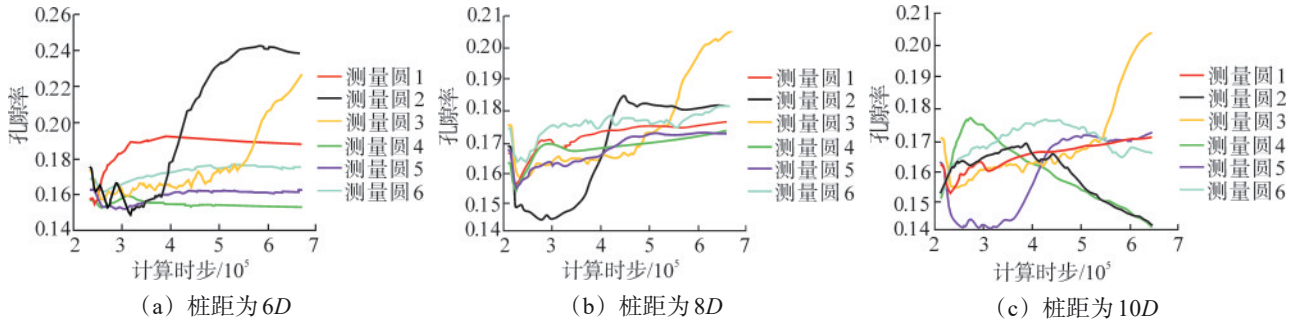


图 11 不同桩距测量圆的群锚孔隙率时程变化曲线

Fig.11 time-history variation curves of the porosity of the group anchors of the circle measured at different pile spacing

为了验证抗浮锚杆不同桩距下的群锚效应,以 上述工程为例,对区域结构上浮部分进行检测。锚杆间距大于10倍桩径,锚杆极限抗拔承载力为640kN,锚杆安全系数为2,锚杆锚固长度为12 m,整体抗浮稳定安全系数取1.05,设计锚杆数2 311根。设置

工程沉降监测点为70个,将检测结果与模拟结果进行比较,比较结果见图12。由图12可见,基于PFC抗浮锚杆上拔群锚效应构建的模型模拟结果与检测结果模拟基本一致,表明模型具有很高的精度。

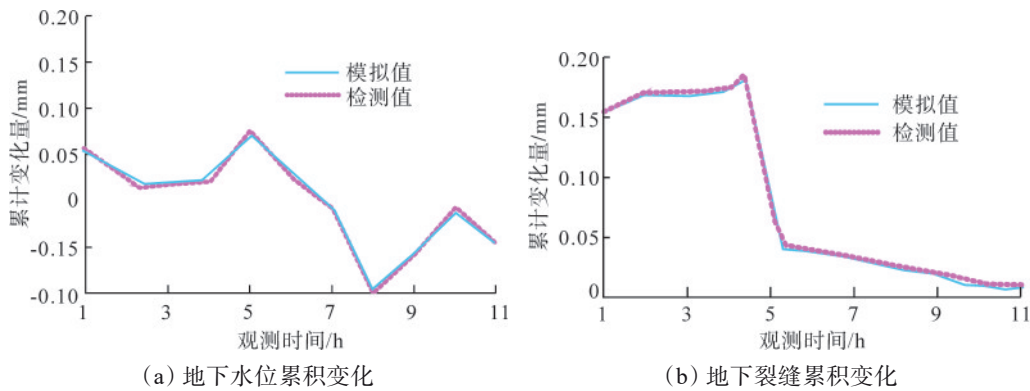


图 12 基于PFC抗浮效应分析的安全设计检验结果

Fig.12 safety design inspection results based on PFC anti floating effect analysis

### 3 结论

(1) 群锚效应与桩距存在显著相关性。当桩距为4D时,群锚协同作用最佳,应力分布更均匀,表明该间距下抗浮锚杆体系的荷载传递效率最高;当桩距为6D时和8D时,剪应力和轴向应力基本趋于最大;当桩距扩大至10D时,轴向应力与剪应力变化幅度明显减弱,说明此时群锚体系

已趋近于独立单锚的力学响应状态,桩间土体应力叠加效应基本消失。

(2) 土体孔隙率在达到临界时步后趋于稳定,表明土体结构完成应力重分布并形成新的平衡状态。桩距为8D时,岩土体的孔隙结构达到了最优配置,整体稳定性表现最为突出。桩距为10D时,孔隙率极值上升,表明过大桩距会导致群桩间土体约束效应减弱,孔隙结构发展重回无序状态。

(3) 基于 PFC 抗浮锚杆上拔群锚效应分析地下工程具有较好的应用性,对于计算锚杆负载性能、优化锚杆布局、长度、直径和间距,保障地下结构稳定性,评估锚固系统对周围环境的影响以及优化设计方案具有重要意义。

### 参考文献(References):

- [1] 龚晓南. 21 世纪岩土工程发展展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 238-242.  
GONG Xiaonan. Prospects for the development of geotechnical engineering in the 21st century [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 238-242.
- [2] 白晓宇, 苏悦, 闫楠, 等. 抗浮锚杆受力特性试验研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6290-6302.  
BAI Xiaoyu, SU Yue, YAN Nan, et al. Experimental research progress on bearing characteristics of anti-floating anchors[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6290-6302.
- [3] 王军辉, 陶连金, 韩焯, 等. 我国结构抗浮水位研究现状与展望[J]. 水利水运工程学报, 2017, (3): 124-132.  
WANG Junhui, TAO Lianjin, HAN Xuan, et al. Research status and progress of groundwater level against floating of structures in China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017, (3): 124-132.
- [4] 中华人民共和国建设部. 给水排水工程管道结构设计规范: GB 50332—2002[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002: 13.
- [5] 中华人民共和国建设部. 给水排水工程构筑物结构设计规范: GB 50069—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 18.
- [6] 靖洪文, 吴疆宇, 孟波, 等. 深部矩形底煤巷围岩破坏失稳全过程宏观演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 82-93.  
JING Hongwen, WU Jiangyu, MENG Bo, et al. Macroscopic and mesoscopic evolution characteristics of surrounding rock of rectangular bottom coal roadway in deep during failure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 82-93.
- [7] LIU W R, WANG X, 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.
- [8] 王建明, 岳星彤, 李天龙, 等. 露天矿边坡岩体裂隙测量与卸荷破坏的数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(8): 98-105.  
WANG Jianming, YUE Xingtong, LI Tianlong, et al. Numerical simulation study on fracture measurement and unloading failure of slope rock mass in open-pit mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(8): 98-105.
- [9] 李力, 孟艺敏. 基于颗粒流理论的深海沉积物土力学特性[J]. 船舶工程, 2020, 42(6): 119-125.  
LI Li, MENG Yimin. Mechanical properties of deep sea sediment soil based on particle flow theory[J]. Ship Engineering, 2020, 42(6): 119-125.
- [10] 刘晓明, 刘舒, 杨康. 红层地区基坑锚杆抗拔承载力及计算参数时变特性[J]. 中国科技论文, 2023, 18(4): 366-371.  
LIU Xiaoming, LIU Shu, YANG Kang. Time-varying characteristics of pullout bearing capacity and calculation parameters of excavation anchors in the red bed area[J]. China Sciencepaper, 2023, 18(4): 366-371.
- [11] YANG Z, CAI H B, DAI M, et al. Mechanical behavior and rock breaking mechanism of shield hob based on particle flow code (PFC) method[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41(1): 353-370.
- [12] LI J M, HUANG Y L, LI W, et al. The 3D reconstruction of a digital model for irregular gangue blocks and its application in PFC numerical simulation[J]. Engineering with Computers, 2022, 38 (Suppl.5): 4617-4627.
- [13] HAERI H, SARFARAZI V, MARJI M F. Numerical simulation of the effect of confining pressure and tunnel depth on the vertical settlement using particle flow code (with direct tensile strength calibration in PFC Modeling) [J]. Smart Structures and Systems, 2020, 25(4): 433-446.
- [14] MOHAJERANI S, WANG G. "Touch-aware" contact model for peridynamics modeling of granular systems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2022, 123(17): 3850-3878.
- [15] NIKRAVESH P E, POURSIINA M. Determination of effective mass for continuous contact models in multibody dynamics[J]. Multibody System Dynamics, 2023, 58(3): 253-273.
- [16] SUZUKI A, MARUOKA N, OISHI Y, et al. Simulation of powder motion with particle contact model including intervening liquid[J]. ISIJ International, 2020, 60(7): 1538-1544.
- [17] WANG X, YUAN W, YAN Y T, et al. Scale effect of mechanical properties of jointed rock mass: a numerical study based on particle flow code[J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 21(3): 259-268.
- [18] 黎引, 彭冉, 宋磊, 等. 一种抗浮锚杆施工工艺优化探讨[J]. 四川建筑, 2023, 43(6): 188-189, 193.  
LI Yin, PENG Ran, SONG Lei, et al. Discussion on optimisation of construction process of a kind of anti-floating anchor[J]. Sichuan Construction, 2023, 43(6): 188-189, 193.
- [19] 林卓钦. 地下室抗浮设计中抗浮锚杆的设计与应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (33): 103-105.  
LIN Zhuoqin. Design and application of anti-floating anchors in basement anti-floating design[J]. Urban Construction Theory Research(Electronic Edition), 2023, (33): 103-105.
- [20] 王雷, 祝磊, 查安敏, 等. 扩大头抗浮锚杆抗拔承载力试验及数值模拟分析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2023, 24(3): 6-11.  
WANG Lei, ZHU Lei, ZHA Anmin, et al. Test and numerical simulation analysis on uplift bearing capacity of anti floating anchor rod with enlarged head[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2023, 24(3): 6-11.
- [21] 曾未名, 熊柱红. 抗浮锚杆设计规范对比及工程应用分析[J]. 城市建筑, 2023, 20(10): 173-175.  
ZENG Weiming, XIONG Zhuhong. The comparison of the design specifications of anti-floating anchor rod and its engineering application[J]. Urbanism and Architecture, 2023, 20(10): 173-175.
- [22] 陶瑞, 乔建刚, 李景文. 抗浮锚杆锚固界面渐进性失效演化机理[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(3): 402-410.  
TAO Rui, QIAO Jiangang, LI Jingwen. Progressive failure evolution mechanism of anchorage interface of anti-floating anchor [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2023, 39(3): 402-410.