

基于抗滑桩土拱效应形成的细观数值模拟

彭 帅, 汪华斌, 周 博, 李纪伟

PENG Shuai, WANG Hua-bin, ZHOU Bo, LI Ji-wei

华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074

School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:通过 PFC^{2D} 数值模拟软件模拟边坡抗滑桩, 研究不同桩型、桩间距及不同土体孔隙率对抗滑桩土拱承载能力的影响, 利用颗粒位移不同对颗粒进行染色, 进而观察土拱效应的形成、发展和破坏的过程。通过一系列数值模拟的比较, 揭示出方形抗滑桩的土拱效应比圆形桩承载能力更强, 且当桩间距 $S=4.6D$ 时, 土拱达到极限承载能力, 之后土拱效应逐渐破坏。根据砂土孔隙率越大土拱效应越明显, 但是超过一定区间抗滑桩将失去作用, 指出桩的嵌入深度和滑动面以下土层同时影响土拱的承载能力。在观察抗滑桩土拱效应的形成发展及破坏的过程中, 从细观角度分析桩间土体的位移与桩的边长之比 ρ 在 (0.2, 0.8) 时, 才能产生有效的土拱效应。

关键词:土拱效应; 颗粒流; 位移染色; 细观分析

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2013)12-1993-08

Peng S, Wang H B, Zhou B, Li J W. Microscopic numerical modeling research based on the formation of soil arching effect. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12):1993-2000

Abstract: This paper tries to model different pile types, different pile spacing and different soil porosities in the simulation to analyze different bearing capacities of soil arching and reveals the formation, development and destruction of the soil arching by staining particles of different displacements in the model. Through a comparison of a series of numerical simulations, the authors have found that the rectangle pile creates much more bearing capacity than the circle pile and when the pile spacing is $4.6D$, the bearing capacity of soil arching will attain the limitation. After that, the soil arching effect will gradually disappear. Within a certain range, the higher the porosity is, the more obvious the soil arching effect in the sand will show, and the embedding depth of the pile with the soil below the sliding surface affects the bearing capacity of soil arching simultaneously. From the micro-analysis the authors have reached the conclusion that only when the displacement and length of pile ratio are in the range of 0.2-0.8 can the soil arching play a role.

Key words: soil arching; particle flow; stain particle; Micro-analysis

英国科学家 Roberts 在 1884 年发现了粮仓效应, 这是最早提出的拱效应^[1]。Terzaghi 于 1943 年通过活动门试验证实了土力学领域也存在拱效应, 并将这种由屈服土体转移到临近刚性边界的应力传递现象称为土拱效应。Wang 等^[2]1974 年研究了边坡抗滑桩的土拱效应, 总结出在砂土和粘性土边坡中存在一个产生土拱效应的临界桩间距。Kourkoulis^[3]在 2010 年研究了边坡抗滑桩在设计中需要考虑的主要影响因素, 从理论角度出发, 认为抗滑桩土拱效应

的影响因素主要包括桩间距、桩的形态、土质的不同 (即颗粒形态的变化及桩的嵌入深度), 并认为桩间土体变形与桩头变形比 r 存在一个适当区间 (1, 2), 当 r 不在这个区间时不能产生有效土拱效应, 同时, 总结当桩间距 $S \geq 5D$ 时, 桩间土拱效应不能发挥作用, 只能视为单桩承载能力。向先超等^[4]在 2011 年基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究中运用 PFC^{2D} 的数值模拟方法, 采用颗粒分层的手段研究了不同桩间距下土拱现象的形成发展和破坏的过程, 定性描述

收稿日期: 2013-09-09; 修订日期: 2013-10-23

资助项目: 国家科技支撑计划项目 (编号: 2012BAK0B020)、国家自然科学基金项目 (批准号: 41372296)

作者简介: 彭帅 (1990-), 男, 在读硕士生, 从事岩土数值模拟研究。E-mail: 270731818@qq.com

了抗滑桩土拱的极限承载能力与桩间距、颗粒粒度等因素的关系,但是没有直接反应土拱效应的形态。可以通过分析极限承载力研究有效土拱效应,不能通过直观的土拱形态来定量研究。杨明等^[5]基于离心试验模型和显式有限差分法模拟研究了抗滑桩桩直径与桩间净距对桩间土拱的影响,指出与桩直径相比,桩间净距起到控制土拱承载能力的作用。但是他没有指出这个比值能够产生有效土拱的范围,以及土拱承载能力达到最大时的桩间净距取值。

为了分析岩土散体介质材料与抗滑桩相互作用的机理,本文采用颗粒流数值模拟方法探讨土拱效应的主要影响因素分析桩型、颗粒孔隙率、桩的嵌入深度对土拱效应的影响程度,并进一步研究达到土拱极限承载能力的最优桩间距。

1 PFC 数值模拟

1.1 合理桩间距桩型的数值模拟分析

在确定合理桩间距时,模型主要参数见表 1。首先以方形桩作为初始模型桩,对墙体②施加一个水平向下的均布荷载,使墙体匀速向下移动。然后通过监测不同时步下滑坡推力 F 的范围值,确定初始抗滑桩产生有效土拱效应时对应的合理桩间距范围。在进行数值模拟时,通过相关文献的研究数据,首先从桩间距 $S=3D$ (D 为桩体直径)、 $S=4D$ 和 $S=5D$ 进行数值模拟,通过产生的力链图的 4 个区域进行观察和分析,判断形成有效土拱的合理桩间距大致在哪个区间,然后在产生有效土拱时的合理桩间距的范围内,通过细化桩间距来进一步进行数值模拟分析,最终得出较为精确的最优桩间距,使得土拱效应承载能力达到极限。

(1)桩间距 $S=3m$ 或 $S=3D$ 时数值模拟的模型图及力链图如图 1。在模型图(图 1-a)中,①表示整体颗粒的均匀度;②表示模型顶部的墙体;③表示桩型。图 1-b 中,A 区是拱脚形成的区域;B 区是拱矢形成的区域,也是判断拱形成范围的区域;C 区为桩间

土区域;D 区为下滑力与拱作用之间的掠夺区域。通过力链图(图 1-b)的 B 区域局部放大图可以看出,由于桩间距太小,整个力链比较集中,土拱效应不明显,并且监测到的滑坡推力不断增加,滑坡推力在时步时 $t \in (2.801 \times 10^4, 4.800 \times 10^4)$, $F \in (1.824 \times 10^5, 4.371 \times 10^5)$ 。

(2)桩间距 $S=4m$ 或 $S=4D$ 时数值模拟的力链图如图 2。在图 2 中 a 表示墙体②向下移动 10cm 时的力链图,b 表示②向下移动 20cm 时模型的力链图。可以看出桩间距 $S=4D$ 时土拱效应非常明显,对比图上 a 图和 b 图的 A、B 区域可以看出,随着墙体②的继续向下移动,桩正截面以支挡承载为主,拱脚 A 区域应力集中,B 区域范围变大,拱矢以下水平向的法向接触应力较为显著,拱矢以上的区域土颗粒的法向应力多表现为树冠形态。2 个图的 C 区域和 D 区域较为稳定,并且监测到的边坡顶部推力逐渐趋于稳定。在观测了 2 个滑坡推力与时步的曲线关系图之后,可以看出滑坡推力范围值分别为 $F \in (1.646 \times 10^5, 4.280 \times 10^5)$ 和 $F \in (1.646 \times 10^5, 5.845 \times 10^5)$ 。

(3)桩间距 $S=5m$ 或 $S=5D$ 时数值模拟的力链图如图 3。同样,当桩间距 $S=5D$ 时,同等时步下图 3-a 和图 3-b 图的滑坡推力范围值分别为 $F \in (1.593 \times 10^5, 5.139 \times 10^5)$ 、 $F \in (1.593 \times 10^5, 6.29 \times 10^5)$ 。对比图 3 中 a 图和 b 图,可以看出,在 b 图中,A 区域的左右两侧力链集中程度不一致,左侧桩力链明显更集中,推断左侧桩的承载力大于右侧桩,左侧桩附近的土体颗粒位移没有右侧拱脚处大,可能是桩间距太大,导致土拱形态已经被破坏,左侧桩为单桩受力,没有发挥土拱效应。这点从力链图中只能从理论推测,在后面的位移变形图中可以进一步验证实际情况。

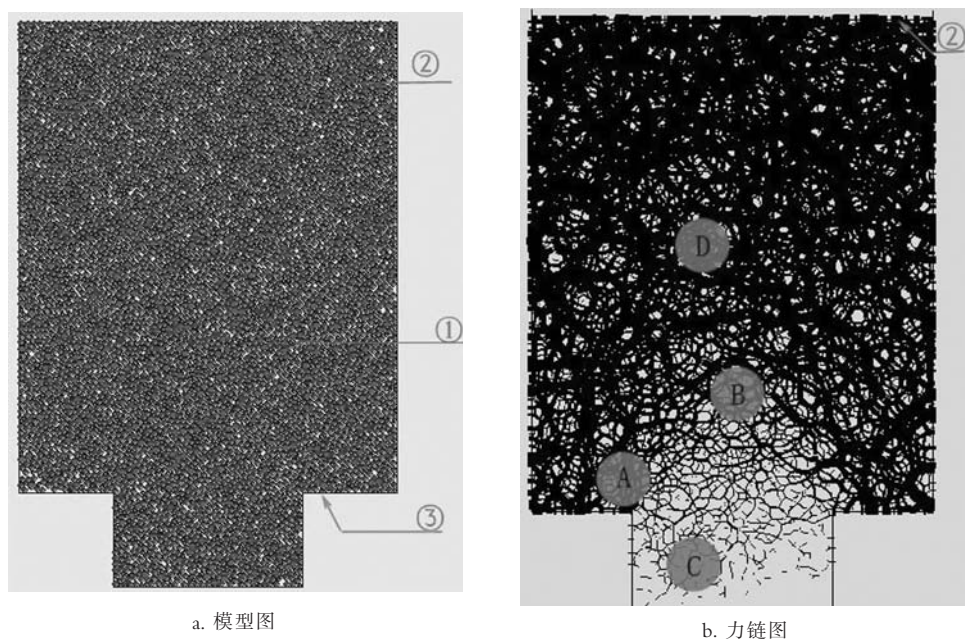
在确定了合理桩间距 $S=4D$ 能够产生有效的土拱效应后,对圆形桩做类似的数值模拟,可以进一步分析桩型对土拱效应的影响程度。

(4)桩间距 $S=4m$ 或 $S=4D$ 时数值模拟的模型图及力链图如图 4。在图 4-a 中③为半径为 1 的圆

表 1 桩间距分析数值模型的主要参数

Table 1 Parameters of pile for interval analysis in numerical modeling

土体 主要参数	法向刚度 $5 \times 10^7 N/m^2$	切向刚度 $5 \times 10^7 N/m^2$	颗粒半径 (Min,max)=(0.02,0.04)	孔隙率 k 0.16
方形桩 或圆形桩	法向刚度 $10^8 N/m^2$	切向刚度 $10^8 N/m^2$	边长(或半径) 1m	摩擦系数 1.0

图 1 桩间距 $S=3D$ 时的模型图、力链图Fig 1 Diagram and force chains at pile spacing of $3D$

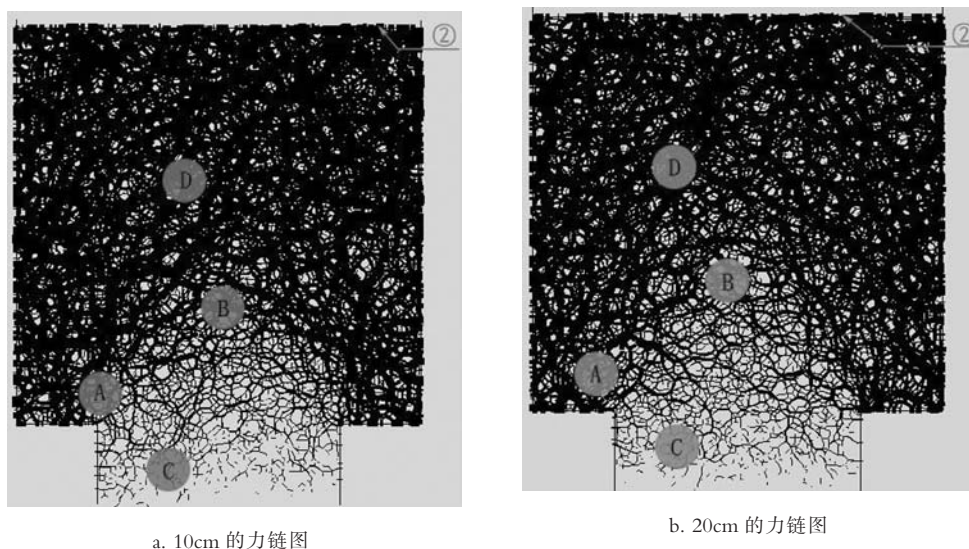
形桩,图 4-b 表示②向下移动 20cm 时模型的力链图。图 4-b 中与方形桩同条件下滑坡推力的范围值为 $F \in (1.266 \times 10^5, 5.139 \times 10^5)$,与桩间距相同的方形桩图 2-b 相比,方形桩在相同条件下的滑坡推力最大值和最小值都要更大,说明方形桩的土拱承载能力更强。因此,在实际工程中,采用方形抗滑桩进行滑坡支护应用比圆形桩更广,主要是由于方形桩

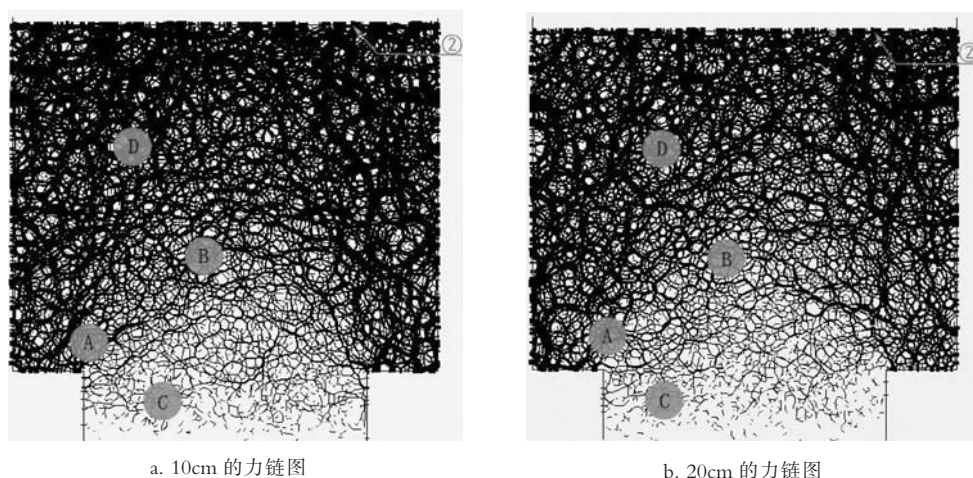
在同等条件下土拱效应能够发挥更大的作用。

通过上述数值模拟可以看出,当桩间距 $S=4D$ 时,方形抗滑桩的土拱效应最明显,当 $S \geq 5D$ 时,土拱被破坏,桩只能视为单桩承载,不能有效利用抗滑桩的土拱效应节约成本。

1.2 孔隙率的数值模拟分析

抗滑桩的合理桩间距是影响边坡抗滑桩抗滑能

图 2 桩间距 $S=4D$ 时的力链图Fig. 2 The force chain at pile spacing of $4D$

图 3 桩间距 $S=5D$ 时的力链图Fig. 3 The force chain at pile spacing of $5D$

力最主要的因素。研究表明,土体孔隙率的大小也是影响抗滑桩抗滑能力的主要因素之一,本文在平面上通过改变土体颗粒粒径和孔隙率来观察滑坡推力的受力情况,以此来分析孔隙率对抗滑桩土拱效应的影响。

其它条件与 $S=4D$ 的方桩模拟情况相同时,3种试验的模型参数见表 2。

当孔隙率为 0.12 时(图 5-a),监测到的滑坡推力范围值明显比孔隙率为 0.16(图 2-b)时大得多,说明孔隙率减小时,由于土质变密,土体更加稳定,

需要更大的推力才能造成破坏。观察 B 区域和 D 区域可以发现,孔隙率减小时 B 区域的拱形态不明显,D 区域的力链稀松,没有孔隙率大时集中,这是由于颗粒之间力的传递减弱,对抗滑桩产生的推力减小了。但是当孔隙率为 0.18(图 5-b)时,情况正好相反,监测的滑坡推力 $F \in (4.769 \times 10^4, 4.146 \times 10^5)$,明显比孔隙率为 0.16 和 0.12 时的情况小,D 区域力链更集中,B 区域的土拱形态也更加清晰。说明对砂土而言,孔隙率与土拱效应成正比,孔隙率越大,土拱效果越好,但是超过一定值时,土拱将不能形成。

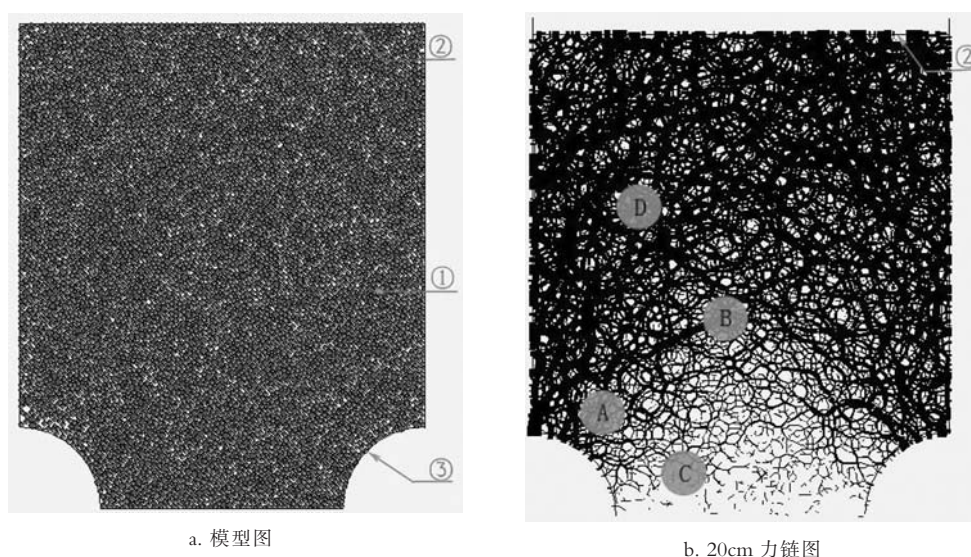
图 4 桩间距 $S=4D$ 的圆形桩模型图和 20cm 力链图Fig. 4 the circular pile mode at pile spacing of $4D$ and force chains at the movement of 20cm

表 2 不同孔隙率的参数

Table 2 different parameters of porosity

试验分组	I	II	III
孔隙率	0.12	0.16	0.18

这是由于孔隙率太大,土质太松散,土体颗粒之间不能形成力的传递,抗滑桩也就失去了作用。

1.3 最优桩间距探讨

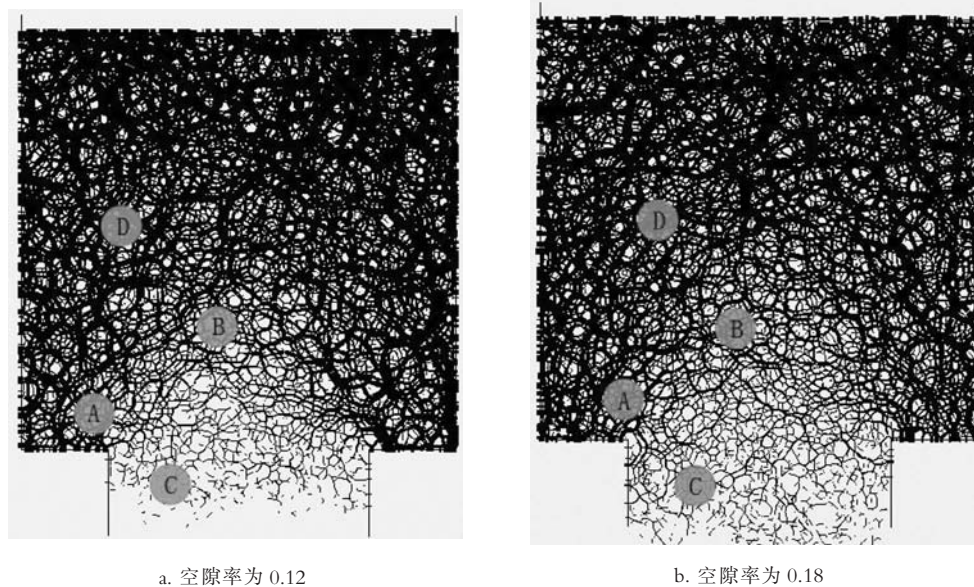
国外学者 Kourkoulis R^[9]指出,当桩体直径 $D=1.2\text{m}$ 时,桩的极限抗弯矩能力 RF 在 $S=4D$ 时达到最大,形成有效土拱效应,并且 $S>5D$ 时,桩只能视为单桩抗滑。因此,本文为进一步分析桩的最合理桩间距,做了 3 组试验: $S=4.2D$, $S=4.6D$ 和 $S=4.8D$, 如图 6。从图 6 中可以清楚地看到,3 组试验均产生了土拱效应,但是左侧桩 A 区域拱脚的力链集中程度不一样。随着桩间距的增大,桩正截面承担的力逐渐减小,土拱的形态逐渐清晰。说明在桩间距逐渐增大的过程中土拱效应逐渐发挥作用,并分担了部分桩正截面的荷载。但在 $S=4.8D$ 时 B 区域拱矢左侧附近力链又开始集中,说明桩间距的进一步增大可能导致土拱形态的破坏。因此,通过这种细观角度的分析推断,当土拱效应的最优桩间距 S 在 $4.6D$ 附近时,土拱承载能力达到极限。当 $S>4.8D$ 时,左

侧桩开始破坏,土拱效应开始消失,可能与间隔桩形成跨拱^[7]。

2 抗滑桩土拱效应的影响因素分析

土拱效应的形成受到多种因素的影响,主要包括桩间距、桩的形态、软弱土层的不均匀性、土体孔隙率、桩的嵌入深度等。目前的抗滑桩土拱效应研究主要集中于以下 2 个方面:①从理论推导的角度分析抗滑桩的合理桩间距^[8-10];②从模型试验或数值模拟的角度对抗滑桩土拱效应产生的机制、条件及合理桩间距等进行研究^[11-13]。

在土拱效应的所有影响因素中,桩间距是影响最大的因素。本文主要针对桩间距、桩型和土体孔隙率做了大量的数值模拟。但是土层的不均匀性、桩的嵌入深度等其它因素同样对土拱效应的作用范围产生很大的影响。Kourkoulis R^[9]充分考虑了软弱土层的不均匀性、硬质土层强度及桩的嵌入深度对抗滑桩土拱效应的影响,指出桩间土体变形与桩头变形比在区间(1,2)时才能产生有效的土拱效应,否则不能有效利用土拱效应节约抗滑桩的设计成本;并且运用理论计算确定了充分利用土拱效应承载能力的最优桩间距 $S=4D$ 。同时在桩间距 $S=4D$ 的前提下,将滑动面以下的土体分为松软砂土、密实砂土、软质岩土 3 种情况进行了研究。在考虑桩的嵌入深度时,

图 5 桩间距 $S=4D$, 孔隙率为 0.12 和 0.18 的数值模拟力链图Fig. 5 Force chains when pile spacing is $4D$ and porosity is 0.12 and 0.18, respectively

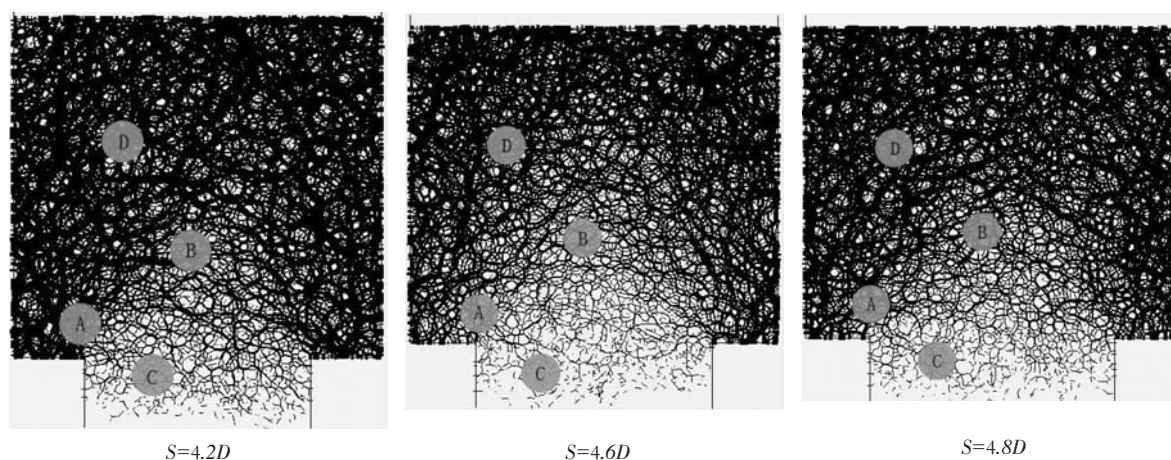


图 6 不同桩间距下的力链图
Fig. 6 the force chain figure at different pile spacing

将桩体嵌入深度分为 $L_c=(0.7, 1, 1.2, 1.5)H_u$ 这 4 种情况下产生的抗滑弯矩进行了分析(其中 H_u 为桩体滑动面以上高度)。他认为下层土体为松软砂土时,桩体嵌入深度越大,抗弯矩能力越强,下层土体为密实砂土和软质岩土时,桩的嵌入深度在这 4 种情况下基本相同,说明桩的嵌入深度对土拱效应的影响与滑动面以下土体的性质有关。

在考虑土体不均匀性和桩的嵌入深度对土拱效应的影响时,必须将二者同时进行考虑。由于本文只进行了 PFC^{2D} 的数值模拟,在考虑这两方面因素时必须用 PFC^{3D} 进行数值模拟来说明,因此,抗滑桩土拱效应的数值模拟情况还有待进一步深入研究。目前国内利用 PFC^{3D} 来分析桩的嵌入深度和土层不均匀性的影响还只是起步阶段,这些影响因素数值模拟的结果与实际情况也需要进行进一步验证。

3 数值模拟土拱效应的形成演化过程

分别对方形桩和圆形桩的数值模拟进行着色,通过对 y 方向的变形来直观观测土拱的形成和破坏。经过反复推测位移的数据和调试程序,找出颗粒在 y 方向位移的大致范围,并将范围划分为 3 个区间,对应 3 种不同的颜色,待数值模拟稳定后给模型染色,观察每一区域的颗粒位移情况。颜色代表的位移参数见表 3。

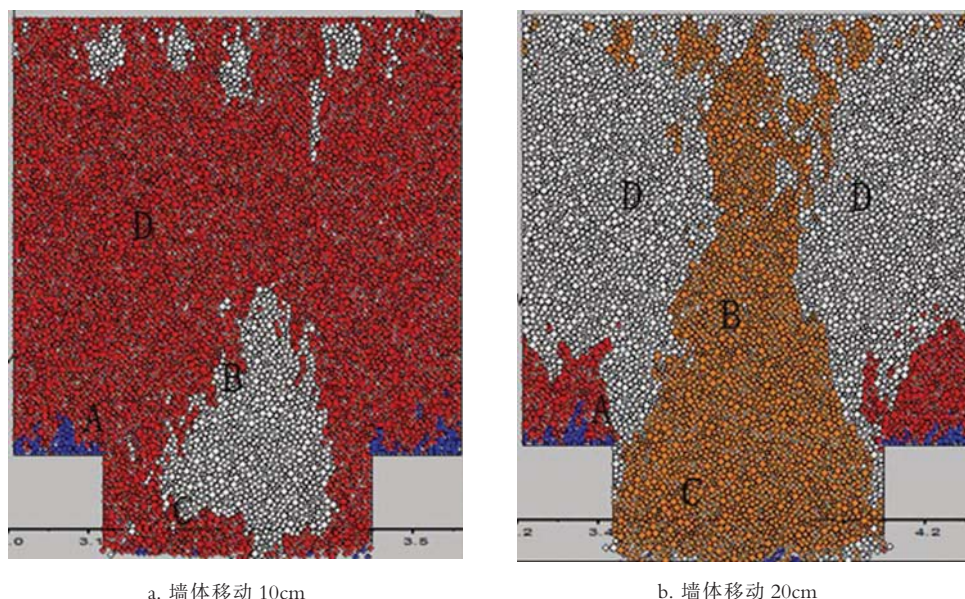
(1)桩间距 $S=4D$,墙体②从 10cm 向下移动至 20cm,模型的位移染色数值模拟情况如图 7。在图 7-a 中,墙体向下移动 10cm 时,颗粒以红色和白色

为主,两桩之间的 B 区域内存在少量白色颗粒,但还不能构成拱形态。但当墙体继续向下移动至 20cm 时,如图 7-b 显示,模型出现了明显的“拱形态”,B 区域位移最大,以橙色颗粒为主,但是分布形态呈现拱形。此时,A 区域拱脚处颗粒位移最小,说明桩的正截面承担荷载减小,土拱承载能力增强,土拱效应发挥作用。当墙体②继续向下推移,对整个模型继续加载直至破坏时,颗粒的位移必然随之增大,颗粒的位移范围如表 3,模型的变化如图 8-a 所示。此时,桩体之间的橙色颗粒位移主要集中在 0.6~0.8m 之间,并且白色颗粒几乎占据整个模型,桩产生的“拱形态”几乎消失。在土拱形态逐渐消失时,B 区域的位移发生了很大变化,从 0.2~0.3m 增加到 0.6~0.8m,并且当位移达到 0.8m 时,土拱效应消失,因此产生土拱效应的土体最大位移与桩的直径之比 $0.2 \leq \rho \leq \frac{\Delta}{D} \leq 0.8$ 。 ρ 可以作为衡量土拱开始形成至破坏的临界值,也是土拱效应发挥作用的有效值。

为了进一步验证颗粒染色对土拱效应的正确性,本文对桩间距 $S=5D$ 的方形桩和桩间距 $S=4D$ 的圆形状数值模型也进行了染色,其中颗粒颜色代

表 3 土拱效应时颗粒位移区间值
Table 3 the ranges of particle displacement during soil arching at vertical direction

	m		
颜色分类	红色 I	白色 II	橙色 III
y 方向位移区间	0.01~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3

图 7 桩间距 $S=4D$ 的颗粒位移染色图Fig. 7 Staining particles of different displacement at pile spacing of $4D$

表的位移区间为表 4。可以看出,图 8-b 中方形抗滑桩产生的土拱效应已经破坏,左侧桩附近有一小块白色颗粒,说明桩间距超过产生土拱效应的极限桩间距时,视为单桩承载。

颗粒染色可以直观反应土拱效应的形态和承载能力,因此,对圆形桩进行染色同样可以证明圆形桩所产生的土拱效应的承载能力远远不及方形桩明显,如图 9。在图 9 中桩间土体最下层的橙色颗粒位

移最大,白色颗粒在中间,红色颗粒位移最小,分布在最上层,在拱矢附近集中了大量橙色颗粒,没有非常明显的“拱形态”出现,但从颗粒位移的分布可以看出土拱效应的作用。进一步证明了方形桩所产生的土拱效应远远优于圆形桩。

4 结 论

(1)通过对 3 组桩间距 $3D$ 、 $4D$ 和 $5D$ 的数值模

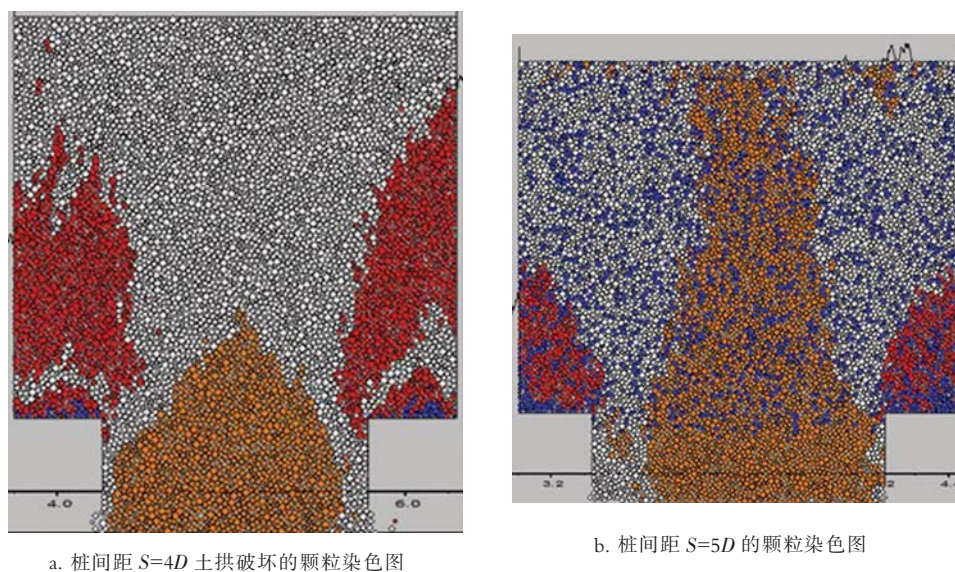


图 8 土拱效应破坏时的颗粒染色模型图

Fig. 8 Staining particle of different displacement when soil arching is broken

表 4 土拱破坏时颗粒的位移范围
Table 4 Displacement ranges of particles
when soil arching is broken

颜色分类	红色 I	白色 II	橙色 III
y 方向位移区间	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8

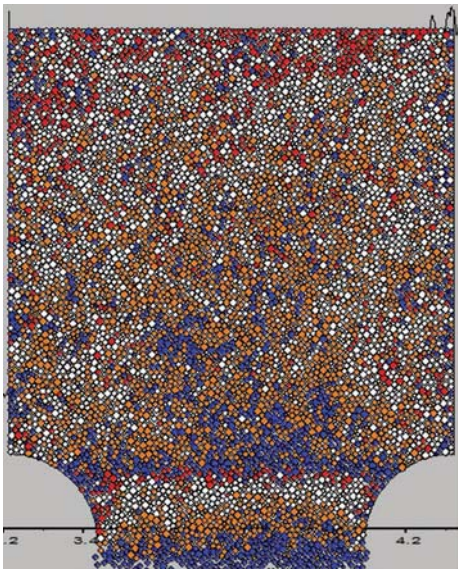


图 9 土拱效应被破坏的模型染色图

Fig. 9 Staining particles when soil arching is broken

拟和拱脚 A、拱矢 B、拱下 C、拱上方 D 四个位置的颗粒位移和承载能力分析,大致确定出产生有效土拱效应的合理桩间距 S 在 $4D$ 左右,桩间距较小时,土拱形态还不明显,说明土拱效应只是开始形成。进一步通过 3 组试验 $S=4.2D$ 、 $S=4.6D$ 和 $S=4.8D$ 研究了土拱效应达到极限承载能力时所对应的桩间距,得出 S 在 $4.6D$ 附近能够产生最大的土拱承载能力,超过这个值时,土拱承载能力开始下降,最终变成单桩承载。

(2)通过另外 2 组数值模拟试验得出,孔隙率与土拱效应成正比,孔隙率越大,土拱效果越好,但是超过一定值时,土拱将不能形成。在对桩的嵌入深度进行模拟时发现,平面的模拟不能满足研究的需要,

需要进一步进行 3D 大型数值模拟的分析。

(3)从 PFC^{2D} 模拟中土体颗粒的染色行为,可以直观观测到土拱的形成发展及破坏的整个过程,颗粒的位移量与桩直径的比值在 0.2~0.8 时,才能产生有效的土拱效应,超过这个区间,土拱没有形成或者承载能力逐渐下降直至消失。同时,通过颗粒染色行为也可以证明,圆形桩所产生的土拱形态远远没有方形桩的土拱效应明显。

致谢:文中部分研究得到了中国地质科学院地质力学所吴树仁研究员和石菊松博士的启发,在此表示衷心的感谢。

参考文献

[1]Terzaghi K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Son, 1943.

[2]Wang W L, Yen B C. Soil arching in slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineering, 1974, 100 (GT1): 61-78.

[3]KourKoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, et al. Slope stabilizing pile and pile-Group: parametric study and Ddesign insights[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Eng, 2011, 137: 663-667.

[4]向先超, 张华, 蒋国盛, 等. 基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 387-391.

[5]杨明, 姚令侃. 桩间土拱效应离心模拟试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 818-822.

[6]KourKoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, et al. Hybrid method for analysis and design of slope stabilizing piles[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Eng, 2012, 138: 1-14.

[7]李晶, 王荣鲁, 贺可强, 等. 堆积层滑坡防治工程中抗滑桩合理桩间距探讨[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(2): 22-25.

[8]吕庆, 孙红月, 尚岳全. 抗滑桩桩后土拱效应的作用机理及发育规律[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 471-476.

[9]Liang R, Zeng S.Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization[J]. Soil and Foundation, 2002, 42(2): 83-92.

[10]Guo P J, Zhou S H. Arch in granular materials as a free surface problem[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geo-mechanics, 2012, DOI: 10.1002/nag, 1137.

[11]周德培, 肖世国, 夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 132-135.

[12]魏作安, 周永昆, 万玲, 等. 抗滑桩与滑体之间土拱效应的理论分析[J]. 力学与实践, 2010, 32: 57-61.