

DOI: 10.11779/CJGE2019S1045

# 考虑颗粒破碎影响的吸力贯入式平板锚安装过程研究

谭慧明<sup>1,2</sup>, 于淙洋<sup>1,2</sup>, 王 中<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 吸力贯入式平板锚是一种适用于深海结构的锚泊基础, 基于离散单元法对吸力贯入式平板锚在颗粒可破碎地基中的安装过程进行了模拟, 探究土颗粒破碎对锚体运动特征、埋深减少等的影响。研究表明, 土颗粒破碎导致锚板安装受荷旋转过程中发生斜向上的贯穿运动, 影响锚的埋深减少。贯穿运动的产生与吸力贯入式平板锚的几何尺寸偏心比大小有关, 偏心比很小时, 不发生贯穿运动, 随偏心比的增大, 贯穿运动的程度先提高后下降; 与未考虑土颗粒破碎情况比较, 土颗粒破碎导致锚体在安装过程中产生的埋深减少远大于在土颗粒不破碎时的埋深减少。同时在土颗粒可破碎地基中, 受贯穿运动的影响, 吸力贯入式平板锚偏心比达到 0.3 后, 埋深减少不再随锚链拉力倾角增大而线性增加, 锚链拉力倾角超过 45° 后, 埋深减少随着锚链拉力倾角增大而增加的速度变快。

**关键词:** 吸力贯入式平板锚; 颗粒破碎; 离散元; 埋深减少

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)S1 - 0177 - 04

**作者简介:** 谭慧明(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事地震岩土工程及灾害防护等方向的教学和科研工作。E-mail: thming2008@163.com。

## Simulation on installation process of suction embedded plate anchor considering effect of particle breakage

TAN Hui-ming<sup>1,2</sup>, YU Cong-yang<sup>1,2</sup>, WANG Zhong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. College of Harbour Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The suction embedded plate anchor is a kind of anchor foundation applicable to deep-sea structures. Based on the discrete element method, the installation process of the suction embedded plate anchor in particle breakable foundation is simulated, and the influences of soil particle breakage on motion characteristics of anchor body and loss of embedment are investigated. The results show that the soil particle breakage results in the inclined upward penetrating motion of the anchor plate during the load-rotating process, which affects the embedment loss of the anchor. The penetration motion is related to the eccentricity ratio of geometrical dimensions of suction embedded plate anchor. When the eccentricity ratio is very small, the penetrating motion does not occur. With the increase of eccentricity ratio, the degree of penetration motion first increases and then decreases. Compared with the situation without considering the soil particle breakage, the embedment loss caused by soil particle breakage during the installation of anchor body is much more than that caused by unbroken soil particle. At the same time in particle breakable foundation, under the influences of penetrating motion, when the eccentricity ratio of suction embedded plate anchor reaches 0.3, the loss of embedment no longer increases linearly with the increase of inclination angle of the anchor chain tension. When the inclination angle of the anchor chain tension exceeds 45°, as the inclination angle of the anchor chain tension increases, the loss of embedment is at higher speed.

**Key words:** suction embedded plate anchor; particle breakage; discrete element method; embedment loss

## 0 引 言

吸力贯入式平板锚 (suction embedded plate anchors, SEPLA) 是海洋工程中常用的一种锚固基础, 既综合了传统的吸力式沉箱和法向承力锚的优点, 又克服了它们的局限性: 在安装阶段采用吸力式安装, 可以准确地知道安装完成后平板锚的位置与埋深, 安装完成后在运营阶段又作为法向承力锚进行工作, 具

有很高的抗拔承载力。O'Loughlin<sup>[1]</sup>、曹可达等<sup>[2]</sup>研究了偏心比 (锚孔距离锚板平面距离与锚宽的比值) 对锚的埋深减少的影响。Gaudin 等<sup>[3]</sup>研究了偏心比和锚链拉力倾角 (锚链拉力方向与水平面的夹角) 对埋深

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51878247, 51639002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2018B13414)

**收稿日期:** 2019 - 04 - 30

表 1 颗粒模型参数

Table 1 Parameters of particle model

颗粒类型	$r_{max}$ /mm	$r_{min}$ /mm	$\rho$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$K_n$ /( $10^7\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$K_s$ /( $10^7\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$f_c$	$\phi_n/\text{N}$	$\phi_s/\text{N}$
可破碎颗粒	4.8	1.5	2000	5.0	5.0	0.1	$2\times 10^2$	$1\times 10^2$
不可破碎颗粒	4.8	1.5	2000	5.0	5.0	0.1	$2\times 10^{30}$	$1\times 10^{30}$

表 2 数值模拟土颗粒微观参数

Table 2 Numerical simulation of microscopic parameters of soil particles

$r_{max}$ /mm	$r_{min}$ /mm	$\rho$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$K_n$ /( $10^7\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$K_s$ /( $10^7\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$f_c$	$\phi_n/\text{N}$	$\phi_s/\text{N}$	$n$
1.6	0.5	2000	5.0	5.0	0.06	0	0	0.2

减少的影响。Song 等<sup>[4]</sup>、Wang 等<sup>[5]</sup>认为锚板长宽比和土体刚度对埋深减少没有影响。Wei 等<sup>[6]</sup>则考虑了吸力贯入式平板锚的长柄部分，通过二维有限元分析，预测了锚旋转的物理过程，明显要优于不考虑长柄部分的预测。王腾等<sup>[7]</sup>采用包络面塑性极限分析方法，研究了切向偏心等参数对埋深减少的影响。钙质砂是海洋环境下一种特殊的砂土，在我国南海等地分布广泛，具有颗粒易破碎等特点。

总结前人对吸力贯入式平板锚安装过程中的埋深减少研究，主要的影响因素在于偏心比以及锚链拉力倾角，对吸力贯入式平板锚在颗粒破碎的条件下安装是否影响其埋深减少的考虑较少，而离岸锚泊基础可能会在钙质砂地层中工作。因此本文将主要研究颗粒破碎对吸力贯入式平板锚的埋深减少的影响，为实际工程提供建议。

### 1 数值模拟实验

基于离散单元法利用颗粒流 (PFC) 程序对该实验进行二维数值模拟。用 PFC 内置的 FISH 语言编程将圆形颗粒拼装成刚性体来模拟锚体。数值模拟试样的尺寸及数值模拟试验过程与离心机试验<sup>[1]</sup>保持一致。

#### 1.1 建立颗粒模型

不考虑颗粒形状的影响，采用 7 个单位厚度的圆盘按正六边形的形状，对原始土颗粒进行替换，并用具有一定强度的 12 个黏结键将 7 个圆盘连接起来形成一个颗粒集合体，对颗粒集合体内部的黏结力使用接触黏结模型进行模拟，颗粒集合体受力并传到黏结键，超过黏结键强度，则黏结键发生断裂，颗粒集合体散开，颗粒发生破碎<sup>[8]</sup>。颗粒形状及替换示意图如图 1。

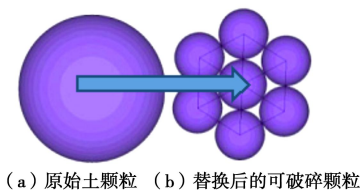


图 1 颗粒替换

Fig. 1 Replacement of particles

可破碎颗粒的黏结键强度参考张家铭等<sup>[9]</sup>的研究，作为对比，建立另一种相同形状的颗粒集合体模型，为保证其在受力时不发生破碎，设置法向黏结力为  $2\times 10^{30}\text{N}$ ，切向黏结力为  $1\times 10^{30}\text{N}$ 。颗粒间接触产生力的间隙 (gap) 为默认值 0，颗粒的微观参数包括颗粒半径  $r$ 、颗粒密度  $\rho$ 、法向刚度  $K_n$ 、切向刚度  $K_s$ 、颗粒摩擦系数  $f_c$ 、法向黏结力  $\phi_n$  和切向黏结力  $\phi_s$ 。详细的颗粒模型参数见表 1。

#### 1.2 制备地基土样本

在四面刚性墙体围成的二维空间内生成级配服从均匀分布的圆形颗粒，模拟离心机试验中的试样土，设定二维孔隙率  $n=0.2$ ，然后去掉顶部墙体。不断调整颗粒参数，直到建立起强度参数较为合理的数值土样模型。详细的微观参数见表 2。

原始土颗粒生成后，进行颗粒替换，完成对比地基土的数值模拟。

#### 1.3 建立锚体模型

数值模型锚体结构中， $B$  表示锚板宽度， $t$  表示锚板厚度， $e$  表示锚索孔到锚板的垂直距离。锚索孔和锚索接头保持可滑动的黏接，模拟出锚索接头可以绕锚索孔自由滑动的效果，设定其法向黏接强度为  $1.0\times 10^{30}\text{N/m}$ ，并将锚索孔与锚板永久连接。锚体颗粒密度取近似钢铁的密度  $7900\text{kg/m}^3$ ，颗粒摩擦系数取 0.1，法向和切向刚度  $K_n$  和  $K_s$  都取为  $5\times 10^{11}\text{N/m}$ ，保证模型锚是刚性体。将锚放入数值模拟的地基土，完成数值模型的建立。

#### 1.4 数值模型的验证

与 O'Loughlin 的离心机试验保持一致，建立具有相同参数的数值模型锚体，锚体参数详见表 3。

表 3 数值模型锚体结构尺寸参数

Table 3 Anchor sizes used in numerical model

锚型	$t/\text{mm}$	$e/\text{mm}$	$B/\text{mm}$	$e/B$
A	2	5.1	30	0.17
B	2	15.0	30	0.50
C	2	30.0	30	1.00

### (1) 数值模拟离心机试验步骤

①用刚性墙模拟试验箱壁, 建立宽 258 mm, 高 150 mm 的模型试验箱; ②建立数值模型锚体; ③在试验箱中生成原始土颗粒, 用可破碎颗粒替换, 赋予土颗粒摩擦系数和重力, 静置一段时间, 让土体最终达到平衡稳定状态; ④将模型锚放入距离地基土表面 4 倍于锚宽的深度处; ⑤加载, 给予锚索接头恒定的 0.1 mm/s 的竖直速度, 拉动锚体发生位移和旋转; ⑥记录数据, 用颗粒流命令编写程序记录下锚体埋深减少, 竖向位移以及旋转角度等数据, 以作后续分析; ⑦使用偏心比不同的下一种平板锚, 重复步骤④到⑥; ⑧用不可破碎颗粒对原始土颗粒进行替换, 完成对比地基土的数值模型建立, 然后重复步骤④到⑦。

### (2) 数值模拟结果与离心机试验结果对比

以埋深减少绝对值和锚板宽度的比值  $\Delta Z/B$  来表示埋深减少, 做出离散元数值模拟得到的锚板和水平面夹角与埋深减少  $\Delta Z/B$  的关系曲线, 并与离心机试验及 Song 等<sup>[4]</sup>使用大变形有限元计算得到的结果进行对比, 结果如图 2。

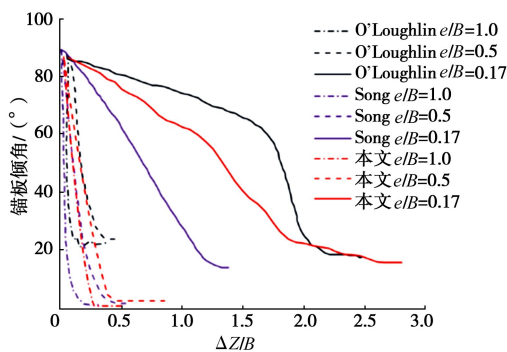


图 2 不同方法所得锚体埋深减少量计算结果对比

Fig. 2 Reduction of anchor depth under different methods

由图 2 可见在偏心比为 1.0 和 0.5 时, 离散元数值模拟、大变形有限元分析和 O'Loughlin 的离心机试验的最终结果相近。在偏心比 ( $e/B$ ) 为 0.17 时, 大变形有限元分析得到的结果偏差相对于离散元数值模拟计算得到的结果明显大。由此可知在土体发生大变形破坏时, 使用离散元方法数值模拟土体得到的结果比大变形有限元方法模拟土体得到的结果更好。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 土颗粒破碎对吸力贯入式平板锚埋深减少影响

作出偏心比为 0.6 的吸力贯入式平板锚在旋转过程中的中心点轨迹线如图 3 所示。从图 3 中可以明显地看到锚板在安装阶段的受荷旋转过程中存在一段斜向上的贯穿土体运动。

选用偏心比分别为 0.17, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2 的模型锚, 锚板厚度均为 2 mm,

锚板宽度均为 30 mm。用锚的实际埋深减少量  $\Delta Z$  与锚板宽度  $B$  的比值  $\Delta Z/B$  来度量锚的埋深减少, 数值模拟计算出埋深减少与偏心比的关系曲线如图 4。

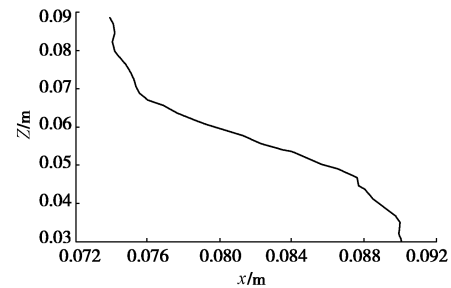


图 3 锚板中心点轨迹线

Fig. 3 Trajectory line of center point of anchor plate

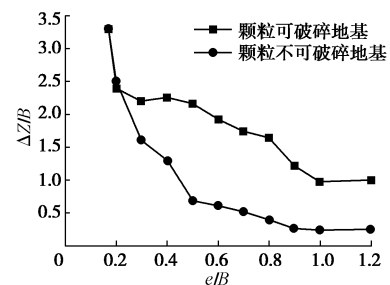


图 4 颗粒破碎对 SEPLA 埋深减少影响

Fig. 4 Effects of particle breakage on burial depth of SEPLA

从图 4 可以看到在偏心比只有 0.17 和 0.2 时, 由于偏心比非常小, 锚板旋转启动时的力矩较小, 因此土体受力较小, 土颗粒破碎不严重, 不会造成局部土体强度升高, 则阻碍锚板旋转的力矩不增加, 不会导致促使锚板旋转的动力力矩与阻碍锚板旋转的阻力力矩相互抵消, 所以锚体不发生贯穿运动, 两种地基中吸力贯入式平板锚的埋深减少基本一致。偏心比从 0.3 增大至 0.8 时, 促使锚板旋转的动力力矩增大, 颗粒破碎程度逐渐严重, 局部土体强度随之升高, 阻碍锚板旋转的阻力力矩也会增大, 贯穿运动的程度下降较少, 一直处于较高水平, 相应的埋深减少变化较小且处于较高水平, 所以吸力贯入式平板锚在土颗粒可破碎地基中的埋深减少要明显多于其在颗粒不可破碎的对比地基中的埋深减少。偏心比从 0.8 变化到 1.0 时, 促使锚板旋转的动力力矩随偏心比的增加而持续增大, 但颗粒已经完全破碎, 无法使局部土体强度继续升高, 则阻碍锚板旋转的阻力力矩不再增大, 因此贯穿运动的程度会明显下降, 表现为随偏心比增大, 埋深减少的下降速度也随之增加。

### 2.2 土颗粒破碎条件下锚链拉力倾角对吸力贯入式平板锚埋深减少影响

图 5 为土颗粒破碎对不同锚链拉力倾角吸力贯入式平板锚埋深减少影响的结果。从图中可以看出, 在颗粒不可破碎的对比地基中, 当偏心比一定时, 随着锚链拉力倾角的增大, 吸力贯入式平板锚的埋深减少

也增加。各种偏心比的吸力贯入式平板锚埋深减少与锚链拉力倾角之间均呈线性关系,并且偏心比越大,埋深减少随锚链拉力倾角增大就增加得越快。分析该现象产生的原因,在土颗粒可破碎地基中,吸力贯入式平板锚偏心比较小时,锚板旋转启动的力矩较小,土体受力小,破碎不严重,锚板不发生贯穿运动,因此偏心比为0.2时,埋深减少随锚链拉力倾角变化的规律与土颗粒不可破碎的对比地基相同,都呈线性增长关系。当偏心比继续增大,该偏心比下锚链拉力倾角低于 $45^\circ$ 时,由系缆力提供锚板旋转力矩的力臂较小,因此锚板旋转启动时的力矩较小,土体受力小,破碎不严重,锚板不发生贯穿运动,当锚链拉力倾角达到 $45^\circ$ 时,力臂增大,此时锚板旋转启动的力矩已经足够大,土体受力增加,破碎程度加剧,土体强度升高,阻碍锚板旋转的力矩增大,于是锚板发生贯穿运动,因此锚链拉力倾角达到 $45^\circ$ 后,随着锚链拉力倾角进一步增大,锚板的埋深减少增长的速度随锚链拉力倾角增加而逐渐加快。

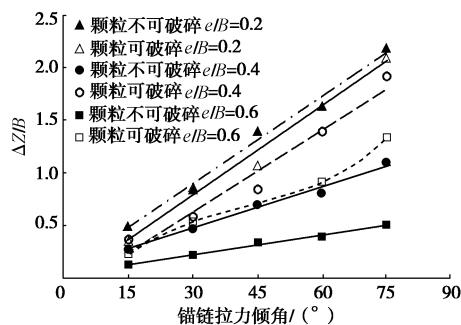


图5 土颗粒破碎对不同锚链拉力倾角 SEPLA 埋深减少影响  
Fig. 5 Influences of soil particle breakage on embedment loss of SEPLA with different inclination angles of anchor chain tension

### 3 结 论

(1) 吸力贯入式平板锚在钙质砂地基中安装时,土颗粒破碎导致锚板受荷旋转过程中会发生斜向上的贯穿运动,造成其在安装过程中产生的埋深减少远大于在土颗粒不可破碎的对比地基中的埋深减少。贯穿运动的产生与吸力贯入式平板锚的偏心比大小有关,偏心比很小时,不发生贯穿运动,当偏心比增大到0.3时,产生贯穿运动,当偏心比处于0.3到0.8范围内时,贯穿运动的程度相近并处于较高水平,当偏心比增大到0.9之后,贯穿运动的程度开始下降。

(2) 吸力贯入式平板锚在钙质砂地基中安装时,贯穿运动的产生会改变锚链拉力倾角对埋深减少的影响。吸力贯入式平板锚的偏心比达到0.3后,产生贯穿运动,使得埋深减少不再随锚链拉力倾角增大而线

性增加,锚链拉力倾角超过 $45^\circ$ 后,贯穿运动导致埋深减少随着锚链拉力倾角增大而增加的速度变快。

### 参考文献:

- [1] O'LOUGHLIN C D, LOWMASS A C, GAUDIN C, et al. Physical modelling to assess keying characteristics of plate anchors[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, 2006: 659 - 665.
- [2] 曹可达, 谭慧明, 王娇娇, 等. 吸力贯入式平板锚旋转特性的离散元数值模拟[J]. 中国科技论文, 2015, 10(7): 829 - 833. (CAO Ke-da, TAN Hui-ming, WANG Jiao-jiao, et al. DEM numerical simulation on keying characteristics of suction embedded plate anchors[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(7): 829 - 833. (in Chinese))
- [3] GAUDIN C, THAM K H, OUAHSINE S. Plate anchor failure mechanism during keying process[C]// Proceedings of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference. 2008: 613 - 620.
- [4] SONG Z H, HU Y X, O' LOUGHLIN C D, et al. Loss in anchor embedment during plate anchor keying in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1475 - 1485.
- [5] WANG D, HU Y X, RANDOLPH M F. Keying of rectangular plate anchors in normally consolidated clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(12): 1244 - 1253.
- [6] WEI Q C, CASSIDY M J, TIAN Y H, et al. Incorporating shank resistance into prediction of the keying behavior of suction embedded plate anchors[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(1): 334 - 342.
- [7] 王 腾, 严 梦. 吸力式贯入板锚转动上拔过程的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 118 - 123. (WANG Teng, YAN Meng. Numerical study on keying of suction embedded plate anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 118 - 123. (in Chinese))
- [8] CHENG Y P, NAKATA Y, BOLTON M D. Discrete element simulation of crushable soil[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 633 - 641.
- [9] 张家铭, 邵晓泉, 王霄龙, 等. 沉桩过程中钙质砂颗粒破碎特性模拟研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 272 - 278. (ZHANG Jia-ming, SHAO Xiao-quan, WANG Xiao-long, et al. Discrete element simulation of crushing behavior of calcareous sands during pile jacking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 272 - 278. (in Chinese))