

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0039-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.008

基于 CEL 方法的平板锚旋转安装过程大变形数值分析

许华姣^{1, 2}, 丰土根^{1, 2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用 Abaqus 软件中 CEL 技术对平板锚旋转安装特性及土体流动趋势进行大变形有限元分析。通过比较大变形有限元分析结果与已有的模型试验结果, 取得了较好的一致性。有限元建模研究不同参数下平板锚的旋转安装特性, 得出以下结论: 从局部土体流动趋势, 可以发现平板锚旋转安装过程变化规律; 对于不同锚链-海平面夹角, 仅考虑竖向荷载时, 平板锚在 90° 方向拉出时竖向拉力最大, 同时平板锚的埋深损失也最大; 当锚眼偏心比较小时, 平板锚的埋深损失非常大, 且埋深损失主要集中在平板锚转至 45° 之前; 土-锚摩擦系数 $\alpha > 0.5$ 时, 平板锚的埋深损失变化较小。

关键词: 平板锚; 大变形; CEL; 有限元

中图分类号: TU476

文献标志码: A

Finite element analysis of the plate anchors keying process by using CEL technique

XU Huajiao^{1, 2}, Feng Tugen^{1, 2}

(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resource, Nanjing 210098, China;
2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, a large deformation finite element analysis based on the CEL technique is conducted to simulate the keying process of plate anchors. Prior to parametric study, the large deformation finite element analysis results are validated against with centrifuge model test data, with good agreement obtained. From local soil flow mechanism, it can be found that the keying process of plate anchors is changed. For different chain - sea level angle, the vertical load is the maximum value when the plate anchors are pulling at 90 degrees. At the same time, loss of embedment of plate anchors is also the largest. When the anchor eye eccentricity ratio is relatively small, the loss of embedment of plate anchors is very large, and which is mainly concentrated in the plate anchors rotated to 45 degrees. When the soil-anchors friction coefficient large than 0.5, the loss of embedment of the plate anchors varies little.

Key words: plate anchor; large deformation; CEL technique; finite elements.

海上油气开采平台锚作为深海油气开采平台的重要组成部分, 受到广泛的关注。近年来平板锚基础由于具有定位精确、造价低廉、便于操作和竖向抗拔承载力高等优点而开始受到青睐, 开始应用在各种海洋工程中。由于平板锚基础采用吸力式沉箱进行安装, 完成时的平板锚处于竖直安装状态, 与

一般工程中需要的最终承力状态不同, 因此需要经过一个旋转过程来调整平板锚使其达到合适的角度, 这个旋转过程称为平板锚旋转安装过程。由于旋转安装过程伴随着平板锚埋深的大量损失, 从而极大地降低平板锚的承载性能, 因此平板锚旋转安装过程也是平板锚性能研究的热点问题, 受到了国内外

收稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009054); 教育部科学技术研究重点项目(109077); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2010513)

作者简介: 许华姣(1993-), 女, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 从事海洋岩土方面的研究。

学者的广泛关注^[1-12]。基于对已有研究成果的学习和思考,本文将运用 CEL 技术研究平板锚在海洋土中的旋转安装特性及周围土体流动机制,为工程施工顺利开展提供指导或借鉴,达到确保海洋深海浮动设施安全可靠、经济节约等目的,从而为工程设计提供指导,为资源勘探和开采提供方便。

1 CEL 有限元计算模型及参数

本文采用 ABAQUS 有限元软件进行计算分析,有限元模型具体参数如下:(1)土体假定为弹塑性材料,采用摩尔-库伦模型;(2)由于研究对象为海洋土,土体假定为完全饱和;(3)土体网格划分采用 EC3D8R 单元;(4)模型土层分三层,土层之间竖向位移完全耦合。土层自上而下依次为:①上层土为正常固结土,厚度为 16.0 m, $S_u=(1+kZ)$ kPa, Z 为平板锚埋置深度;②中间土为均质黏土,8.0 m 厚, $S_u=40$ kPa;③下层土为正常固结土, $S_u=(1+kZ)$ kPa, 为平板锚埋置深度。土体强度参考常见软土地基土体抗剪强度取值^[13-19]。

考虑计算方便以及模型的对称性,建立的有限元数值模型如图 1 所示,取土体与平板锚原型的半模型进行研究,即土体模型尺寸为 $10B \times 5B \times 10B$ (B 为平板锚宽度),平板锚模型宽度取 $1/2B$ 。考虑到平板锚埋深较浅时,当旋转运动到接近土体表面,平板锚背面可能会与土体脱离,故本文平板锚取初始埋深 $5B$ 进行计算。

土体边界条件设为底部完全固定,四周分别限制垂直于面的方向的材料流动速度;加载过程对平板锚施加位移荷载,使平板锚向上匀速上拔,从而可以得到平板锚承载力、旋转角度随位移变化的曲线。

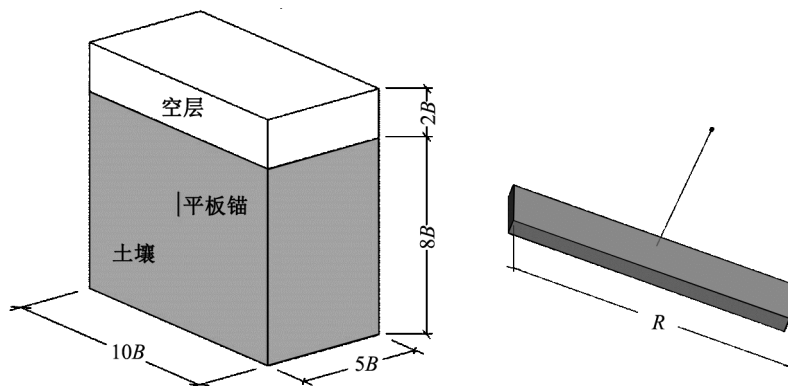


图 1 模型示意图
Fig.1 Schematic of model

2 数值模拟与模型试验对比分析

本文利用 CEL 大变形有限元方法模拟西澳大学离心模型试验,并比较数值模拟计算和模型试验得到的埋深损失及锚链拉力的变化过程,分析平板锚周围局部土体流动趋势,以验证 CEL 方法预测平板锚与土体相互作用的可靠性。

2.1 Song 等的模型试验

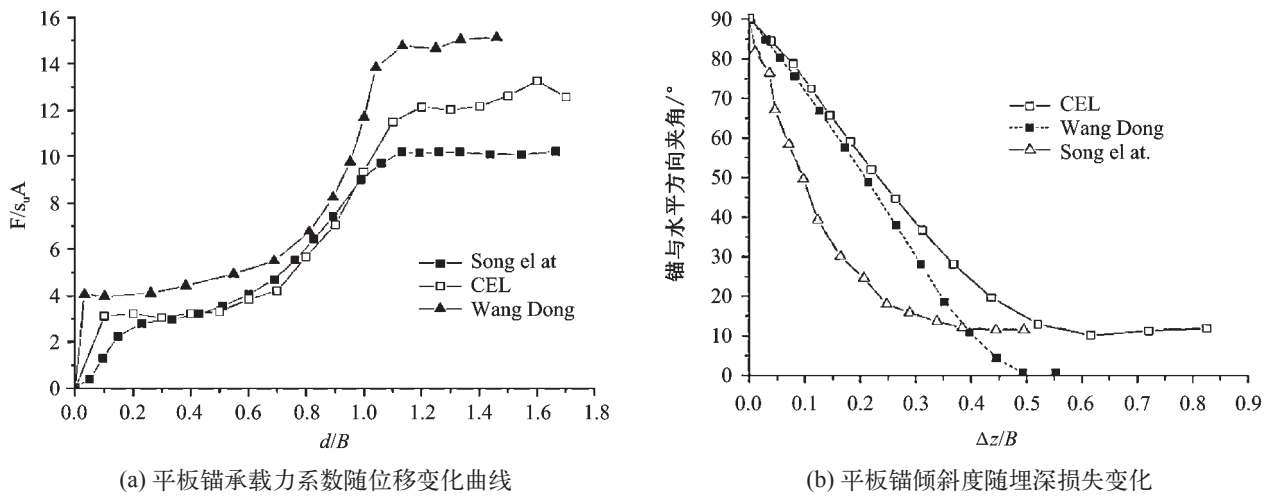
Song 等^[4]采用鼓式离心机考察了拉力偏心比与埋深损失之间的关系。为方便观察记录平板锚运动的详细过程,该模型试验采用的海床土样为透明的均质黏土,不排水强度 $S_u=18$ kPa,土的浮重度 $\gamma_s=9.5$ kN/m³。平板锚的模型宽度 $B=40$ mm,厚度 $t=2$ mm(平板锚原型的实际尺寸为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$,实际厚度为 0.2 m)。模型试验中平板锚预埋在初始埋深 $H_i=3B$ 的位置,平板锚浮重度 $\gamma_a=17.0$ kN/m³。平板锚模型锚眼偏心 e 为 25 mm。CEL 大变形研究根据平板锚的原型尺寸进行建模的数值模拟分析,弥补了常规缩尺模型的不足。此处假定模型试验“锚-土”界面粗糙系数取 0.3 。

平板锚的抗拔承载力系数 N_c :

$$N_c = \frac{Q_u}{S_u A}$$

其中, Q_u 为平板锚的承载力, S_u 表示土体的不排水抗剪强度, A 为平板锚受力面积。图 2 是本文研究与 Song 等结果的比较。

图 2(a) 比较了数值模拟和模型试验得到的旋转过程平板锚抗拔承载力系数和和锚链位移 d/B 之间的关系曲线。由图可知,CEL 方法计算得到的平板锚抗拔承载力系数约为 12 左右,略大于模型试验的



(a) 平板锚承载力系数随位移变化曲线

(b) 平板锚倾斜度随埋深损失变化

图2 本文研究与 Song 等结果的比较

Fig.2 Comparison with test results by this study and Song et al.

结果，误差在 20% 左右，这是因为在模型试验中平板锚的周围土体存在扰动，土体强度有损失。CEL 方法抗拔承载力系数介于王栋等^[10]采用的 RITSS (基于小应变的重新剖分网格和插值技术) 计算结果与模型试验计算结果之间，也验证了采用 CEL 方法建立数值模型计算平板锚旋转安装过程的可靠性。

图 2(b) 比较了不同方法数值和模型试验得到的旋转过程平板锚倾斜度和埋深损失 $\Delta z/B$ 之间的关系曲线。由图可知，对于模型试验及采用 CEL 方法，平板锚旋转结束时平板锚不能达到完全水平，模型试验中平板锚的锚链绕过顶部的滑轮，相当于施加了一个向上的位移荷载，CEL 分析采用对平板锚施加竖向的位移荷载，锚在土中旋转上拔，受到侧向挤压，产生水平位移，从而导致锚链拉力会稍偏离竖直方向，存在微小的倾斜，所以平板锚最终达不到完全水平。而 RITSS 方法计算中采用施加拉力荷载的方式，锚链保持垂直，旋转后的平板锚垂直于锚链拉力总能水平。因此，本文认为 CEL 方法的分析结果能更接近模型试验的结果。

2.2 土体流动分析

图 3 为旋转安装过程平板锚周围土体的流动机制，可以发现平板锚周围产生局部范围内的土体流动机制。土体流动机制随着平板锚所处的位置变化而变化，由于平板锚锚眼存在偏心，平板锚锚眼处拉力会对主体锚施加弯矩，右侧土体受到挤压，部分土体向上流动 (图 3(a))，故此时平板锚单位旋转角度的埋深损失较小。随着角度的增加，当平板锚转至约 45° 时 (图 3(b))，平板锚周围土体流动形成

了一个比较完整的环流，土体流动产生的动能加速了平板锚的转动，平板锚旋转速度开始增加。当平板锚趋于水平时，平板锚上方两侧土体向下回流，填补平板锚背面的空隙，土体流动速度进一步增大，平板锚加速向上移动 (图 3(d))，最终完成旋转安装过程。

3 计算结果分析

平板锚在旋转安装过程受到的影响因素较多，主要包括平板锚的几何尺寸和土体的土质条件以及荷载条件。本文采用控制变量法，主要研究了锚链 - 海平面夹角、锚眼偏心率、土 - 锚摩擦系数对平板锚的埋深损失、转角的影响，情况具体参数见表 1。

3.1 锚链 - 海平面夹角对平板锚旋转安装的影响

图 4 为不同锚链 - 海平面夹角对平板锚旋转安装过程的影响。可以发现，对于深埋为 $5B$ 的平板锚，随着锚链 - 海平面夹角的增加，平板锚所需竖向拉力增大，埋置损失则是随着锚链 - 海平面夹角的增大而增大。从图 4(a) 可以发现，如果仅考虑竖向荷载，将平板锚转至 90° 时对平板锚施加的竖向拉力最大，约为 30° 情况下的 2 倍。从图 4(b) 可以发现，平板锚承受 30° 方向锚链拉力时平板锚的埋深损失最小，而平板锚受到 90° 方向拉力时，平板锚的埋深损失是最大的。且当平板锚达到比较稳定的角度后，若继续对平板锚施加位移荷载，平板锚由于受到侧向的土压力，仍会有比较缓慢的角度旋转变化。

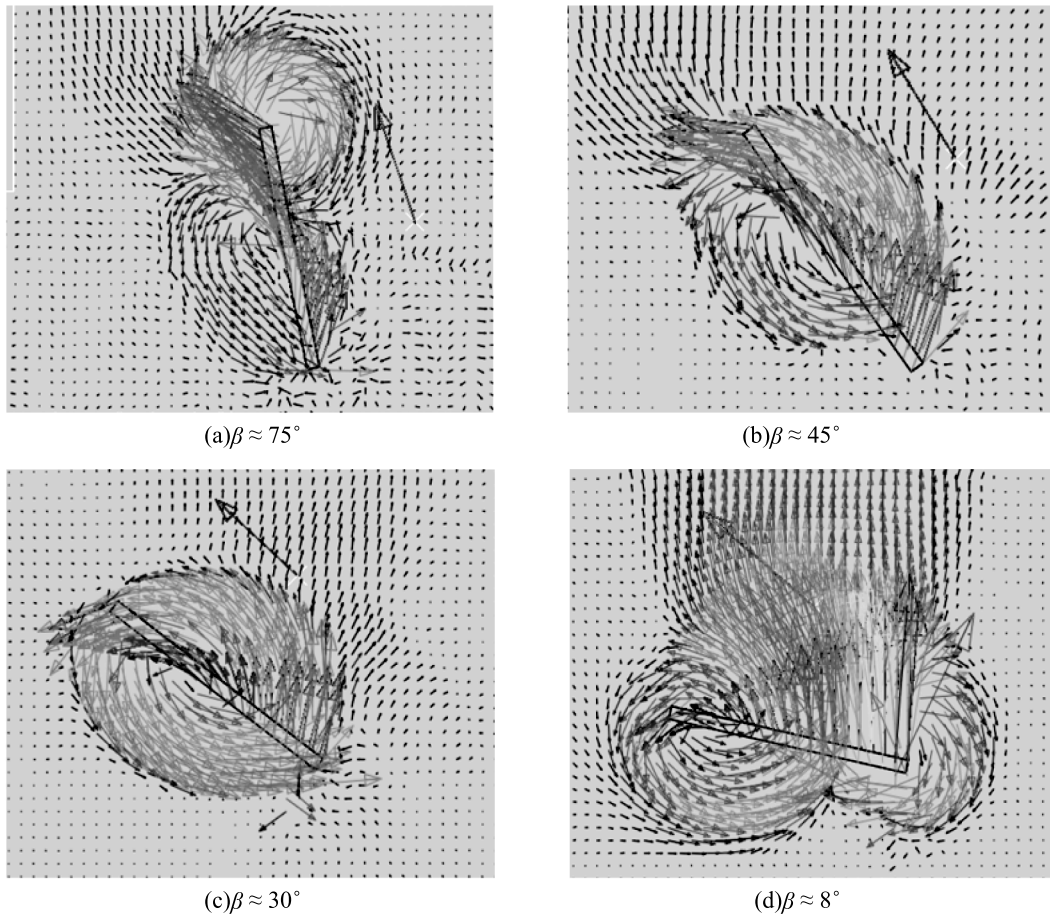


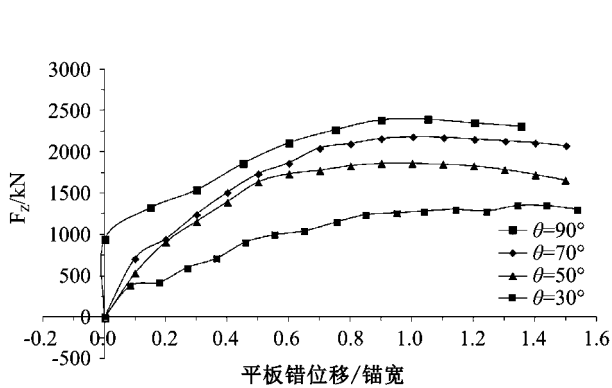
图3 平板锚周围土体流动机制

Fig.3 The soil flow mechanism around the plate anchors

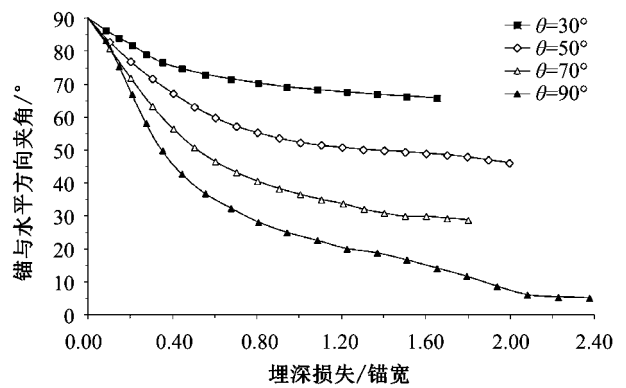
表1 参数分析表

Tab.1 Analysis of parameters

土 - 锚摩擦系数 α	锚链 - 海平面夹角 $\theta/^\circ$	锚眼偏心比 e/B
0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7	90	0.625
0.3	30, 50, 70, 90	0.625
0.3	90	0.2, 0.4, 0.5, 0.625, 1.0, 1.5



(a) 平板锚竖向拉力随位移变化曲线



(b) 平板锚倾斜度和和埋深损失关系曲线

图4 锚链 - 海平面夹角对平板锚旋转安装的影响

Fig.4 The influence of anchor chain - sea level Angle on the keying process of plate anchors

3.2 锚眼偏心比对平板锚旋转安装的影响

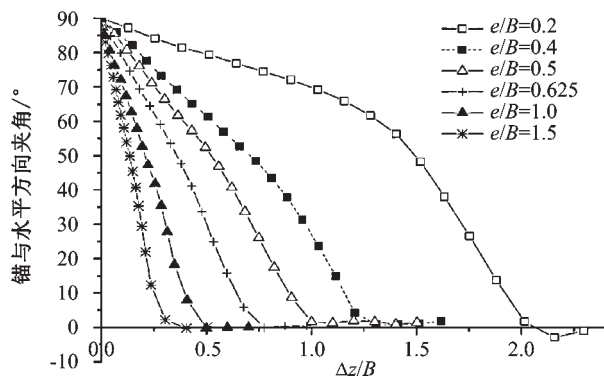
图 5 展示了埋深损失随锚眼偏心比变化曲线，从整体上讲，最终埋深损失随着锚眼偏心比增大而减小，且减小速率随着锚眼偏心比增大而减小，这与 Yu^[8] 等数值模拟计算的结果相似。偏心比 e/B 为 0.2 时相对于 $e/B > 0.2$ 时的运动轨迹相差显著，刚开始旋转时单位旋转角度的埋深损失较大，使其埋深损失也要远大于其他情况。可见当偏心比较小时，平板锚的埋深损失非常大，且埋深损失主要集中在平板锚转至 45° 之前。当锚眼偏心比 $e/B > 1.0$ 时，平板锚埋深损失不足 $0.5B$ ，之后锚眼偏心比对平板锚的埋深损失的影响几乎可以忽略不计。

根据平板锚锚眼偏心比 - 最终埋深损失散点图可以发现，平板锚埋深损失随锚眼偏心比的变化呈现一定的规律性，通过拟合曲线可以得到近似的拟合公式：

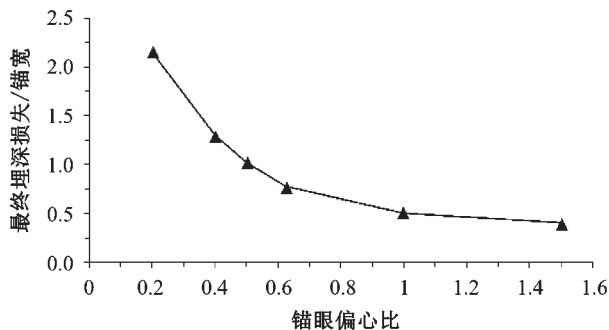
$$\Delta Z_u/B \approx a(e/B)^b$$

其中，该工况下 $a=0.543$ ， $b=-0.874$ 。这与 Wang^[9] 等在正常固结土中模拟得到的拟合公式比较相近。

3.3 土 - 锚摩擦系数对平板锚旋转安装的影响



(a) 平板锚倾斜度和和埋深损失关系曲线



(b) 埋深损失随锚眼偏心比变化曲线

图 5 埋深损失随锚眼偏心比变化曲线

Fig.5 Variations of embedment loss with eccentricity ratios

图 6 给出了平板锚土 - 锚摩擦系数 $a=0.1\sim 0.7$ 时对平板锚最终埋深损失随的影响。从图 6 可以看出，平板锚埋深损失随着 a 的增大而减小。当 $a=0.1$ 时，平板锚的运动轨迹和埋深损失都有显著差异，会严重影响平板锚的抗拔承载力。而当 $a > 0.5$ 时，其对平板锚的埋深损失的影响非常小，几乎可以忽略不计。此时，继续增加平板锚的表面粗糙度对减小平板锚埋深损失的效果并不显著。

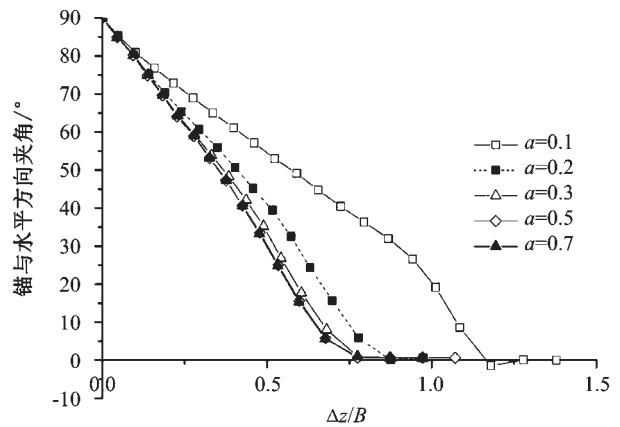


图 6 埋深损失随土 - 锚摩擦系数变化曲线

Fig.6 Variations of embedment loss with eccentricity ratios

4 结论

1) 本文采用 CEL 大变形技术模拟平板锚在分层黏土中的旋转安装过程，并通过与离心模型试验对比，验证数值计算的可靠性。

2) 通过分析不同旋转角度下的平板锚附近局部土体流动趋势，分析了土体流动对平板锚旋转安装过程的影响。

3) 通过参数对比分析发现，随着锚链 - 海平面夹角的增加，平板锚的竖向承载力增大，埋置损失也增大， 90° 时平板锚的竖向承载力最佳，同时埋深损失也最大。当锚眼偏心比当偏心比较小时，平板锚的埋深损失非常大，且埋深损失主要集中在平板锚转至 45° 之前。当土 - 锚摩擦系数 $a > 0.5$ 时，其对平板锚的埋深损失的影响非常小，继续增加平板锚的表面粗糙度对减小平板锚埋深损失的效果非常小。

参考文献:

[1]DAS B M. Procedure for estimation of ultimate uplift capacity of foundations in clay[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(1): 15-15.

- [2]DAS B M, PURI V K. Holding capacity of inclined square plate anchors in clay[J]. *Soils & Foundations*, 1989, 29(3): 138-144.
- [3]GAUDIN C, O'LOUGHLIN C D, RANDOLPH M F, et al. Influence of the installation process on the performance of suction embedded plate anchors[J]. *Geotechnique*, 2006, 56(6): 381-391.
- [4]SONG Z, HU Y, O'LOUGHLIN C D, et al. Loss in anchor embedment during plate anchor keying in clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, ASCE, 2009, 135(10): 1475-1485.
- [5]BLAKE A P. Centrifuge modelling to assess consolidation following keying of directly embedded plate anchors[C] //Proceedings of the 21st European Young Geotechnical Engineers' Conference.2011.
- [6]BLAKE A P, O'LOUGHLIN C D, GAUDIN C. Setup following keying of plate anchors assessed through centrifuge tests in kaolin clay[C]//Frontiers in Offshore Geotechnics II, 2010: 705-710.
- [7]BARRON B. An Investigation into the Keying Behaviour and the Capacity of Plate Anchors in Sand[D]. Institute of Technology, Sligo.2014.
- [8]YU L, LIU J, KONG X, et al. Three-dimensional numerical analysis of the keying of vertically installed plate anchors in clay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(4): 558-567.
- [9]WANG D, HU Y, RANDOLPH M F. Keying of rectangular plate anchors in normally consolidated clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 137(12): 1244-1253.
- [10]王 栋. 非完全粗糙平板锚旋转安装过程中的丢失埋深研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(9): 209-214.
- [11]WANG D, GAUDIN C, RANDOLPH M F. Large deformation finite element analysis investigating the performance of anchor keying flap[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 59(2): 107-116.
- [12]TIAN Y, GAUDIN C, CASSIDY M J. Improving Plate Anchor Design with a Keying Flap[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140 (5): 70-75.
- [13]WEI Q, CASSIDY M J, TIAN Y, et al. Incorporating Shank Resistance into Prediction of the Keying Behavior of Suction Embedded Plate Anchors[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(1): 04014080
- [14]鲁礼慧. 黏土中板形重力安装锚和吸力式安装平板锚的旋转调节过程 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [15]CASSIDY M J, GAUDIN C, RANDOLPH M F, et al. A plasticity model to assess the keying of plate anchors[J]. *Geotechnique*, 2012, 62(9): 825-836.
- [16]ZHOU M, HOSSAIN M S, HU Y, et al. Behaviour of Ball Penetrometers in Uniform and Layered Clays[J]. *Geotechnique*, 2013, 63(8) 682-694 .
- [17]ZHOU M, HOSSAIN M S, HU Y, et al. Installation of stiffened caissons in nonhomogeneous clays[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(2): 04015079.
- [18]ZHOU M, LIU H L, CHEN Y N, et al. First application of cast-in-place concrete large-diameter pipe (PCC) pile-reinforced railway foundation: a field study[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(4): 708-716.
- [19]ZHOU M, LIU H, HOSSAIN M S, et al. Numerical simulation of plug formation during casing installation of cast-in-place concrete pipe (PCC) piles[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(7): 1-17.

(责任编辑 王利君)