

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231102006

黏土分层特性对吸力嵌入式板锚埋深损失的影响*

赵云轩, 赵燕兵, 高鹏, 闫玮

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西太原 030024)

摘要:海洋工程中,海床土体常伴有分层现象。将均质土、正常固结土在海床土体中的分布情况称之为土体分层特性。基于耦合的欧拉-拉格朗日(CEL)法,建立起用于分析不同土体分层特性的条件下,吸力嵌入式板锚(SEPLA)旋转调节过程的大变形有限元模型。通过与离心机实验及数值模拟结果对比,验证了模型的有效性。以双层黏土为例,研究了不同黏土分层特性下板锚的埋深损失。明确了衡量黏土分层特性的指标 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}$,并考察了不同 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}$ 下,系缆点距土层分界线的距离 d 对板锚埋深损失的影响。研究表明:在 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}>1$ 的双层黏土中,随着 d 值的增大,板锚的埋深损失逐渐减小,当 $d\leq-0.5B$ 与 $d\geq 1B$ 时,板锚的埋深损失分别仅受上层土体与下层土体强度影响;在 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}<1$ 的双层黏土中,随着 d 值的增大,板锚的埋深损失先增大后减小,当 $d=1B$ 时,埋深损失存在一极大值 ΔZ_{max} ,该极大值比板锚在单层土体中的埋深损失大32%~123%。同时,在 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}<1$ 的双层黏土中,板锚的埋深损失与上层土体的平均强度 $s_{u1,ave}$ 和锚埋深处的土体强度 s_{uc} 有关;由于板锚埋深损失存在极大值 ΔZ_{max} ,在工程中较为危险,因此,考察了强度比 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 、埋深处土体强度 s_{uc} 、板锚初始埋深 H 对 ΔZ_{max} 的影响。

关键词:黏土分层特性;吸力嵌入式板锚;埋深损失;有限元分析

中图分类号: TU470/P751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0525-10

Influence of Clay Layering Properties on the Embedment Loss of Suction Embedded Plate Anchors

ZHAO Yunxuan, ZHAO Yanbing, GAO Peng, YAN Wei

(College of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In marine engineering, seabed soils often exhibit layering phenomena. The distribution of homogeneous soil and normally consolidated soils in seabed soils is referred to as soil layering properties. Based on the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method, a large deformation finite element model was established to analyze the rotational adjustment process of the suction embedded plate anchors (SEPLA) under different soil layering properties. The validity of the model was verified through comparison with centrifuge tests and numerical simulations. The embedment loss of plate anchors under different clay layering properties was investigated by using double-layered clay as an example. The index $s_{u1,ave}/s_{u2,0}$ was defined to measure the clay layering properties, and the influence of the distance d from the mooring point to the soil layer interface on embedment loss of plate anchors was examined un-

* 收稿日期:2023-11-02;修回日期:2023-12-18

基金项目:国家自然科学基金(51741909)、山西省应用基础研究计划(202303021211067)资助

作者简介:赵云轩(1999—),男,硕士研究生。主要从事锚固结构灾变机理研究。E-mail:zyx13730019369@163.com

通信作者:赵燕兵(1987—),男,副教授,硕导,博士。主要从事新型锚固结构承载特性及灾害规避机制研究。

E-mail:zhaoyanbing@tyut.edu.cn

der different $s_{u1,ave}/s_{u2,0}$ values. The results showed that in double-layered clay with $s_{u1,ave}/s_{u2,0} > 1$, as d increased, the embedment loss of the plate anchors gradually decreased. When $d \leq -0.5B$ and $d \geq 1B$, the embedment loss was only affected by the strength of the upper and lower soil layers, respectively. In double-layered clay with $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$, as d increased, the embedment loss of the plate anchors initially increased and then decreased, reaching a maximum value ΔZ_{max} at $d=1B$, which was 32% to 123% larger than the embedment loss in the single-layered soil. Additionally, in the double-layered clay with $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$, the embedment loss of the plate anchors was related to the average strength of the upper soil $s_{u1,ave}$ and the soil strength at the anchor embedment depth s_{ue} . Due to the existence of a maximum embedment loss value ΔZ_{max} , which poses a significant risk in engineering, the effects of the strength ratio $s_{u1,ave}/s_{ue}$, the soil strength at the anchor embedment depth s_{ue} , and the initial embedment depth H of plate anchors on ΔZ_{max} were investigated.

Keywords: clay layered property; suction embedded plate anchors; embedment loss; finite element analysis

0 引言

随着海洋资源的开发和利用不断向海洋深处挺进,大型海洋浮式结构物的生产和运行也面临更多挑战,其中,锚固结构是保证浮式结构物能够安全运行的前提。因此,对于锚固结构的研究就显得尤为重要。吸力嵌入式板锚(SEPLA)是一种典型的深海锚固结构,具有建造成本低、定位准确及安装时间短等优点,常用于深海或超深海大型浮式结构物的锚固结构。

图1为吸力嵌入式板锚在负压定点贯入后的旋转调节过程。吸力锚将板锚定点沉贯至相应深度后,吸力锚回收,通过张紧系泊缆绳使板锚实现法向承载,在此过程中,板锚会产生一定的埋深损失。由于海洋土体多为正常固结黏土,土体强度随着深度的增加而线性增大,当板锚的埋深损失较大时,其周围土体强度降低,进而影响其抗拔承载力。因此,研究板锚旋转调节过程中的埋深损失具有重要的意义。

C. Gaudin等^[1]通过一系列的离心机实验,研究了吸力安装、沉箱回收、旋转调节过程对于SEPLA埋深损失的影响并得出结论:拉拔倾角为 90° 时,板锚的埋深损失为 $0.9B \sim 1.5B$ (B 为板锚宽度),当拉拔倾角减小时,板锚的埋深损失也逐渐减少;B. Wilde等^[2-3]在现场试验的基础上指出:板锚埋深损失大约为板锚宽度的 $0.5 \sim 1.7$ 倍。C. D. O'Loughlin等^[4]根据透明土体离心机实验结果指出:板锚埋深损失与加载偏心率 e/B 密切相关(e 为偏心距),当 $e/$

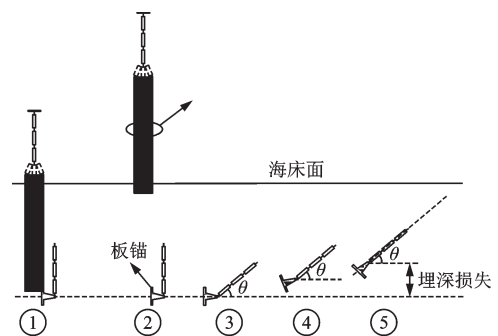


图1 吸力嵌入式板锚旋转调节过程

Fig.1 Rational adjustment process of the suction embedded plate anchors

$B \geq 1$ 时,埋深损失不超过 $0.1B$;当 $e/B < 1$ 时,埋深损失随 e/B 的减小而增大,当 $e/B=0.17$ 时埋深损失达到极值 $1.5B$ 。Z. R. Chen等^[5]研究表明,锚脛的存在对于降低板锚的埋深损失具有重要意义,有锚脛板锚相对于无锚脛板锚的埋深损失减小33%。Q. C. Wei等^[6]基于塑性分析模型,分别模拟了在拉拔倾角为 40° 情况下,有锚脛和无锚脛两种条件下板锚的埋深损失,发现有锚脛SEPLA的埋深损失比无锚脛的小,即锚脛可以有效降低板锚的埋深损失。Z. H. Song等^[7]通过离心机实验和数值模拟研究了板锚在单层均质黏土和单层正常固结黏土中的旋转调节过程,同样发现无锚脛的板锚在拉拔过程中旋转更慢,造成更大的埋深损失。D. Wang等^[8]采用RITSS法^[9]研究了在单层均质黏土及正常固结黏土中,板锚旋转调节过程所得的埋深损失,发现板锚埋深损失只与板锚埋深处的土体强度有关,和土体性质无关。L. Yu等^[10]采用3D-RITSS法

系统地研究了在单层正常固结黏土中,板锚加载偏心率、上拔倾角及板锚几何形状对板锚连续拔出过程的影响并得出结论:板锚埋深损失随着加载偏心率的增大而减小,但随着上拔倾角的增大而增大;板锚形状(条形和方形)对埋深损失的影响并不明显。H. X. Liu等^[11]基于锚的力学机理和运动学特性,结合锚的几何形状、土体特性和荷载施加等条件,通过理论模型和非线性拟合分析,提出了计算黏土中SEPLA最大埋深损失的显式公式。杨德健等^[12]提出了“锚土黏结”条件下,倾斜板锚承载力系数的经验公式,为正常固结黏土中板锚的工程设计提供参考。李培冬^[13]及Y. B. Zhao等^[14]考虑了缆绳对锚在海床中运动行为的影响,将缆绳方程引入到耦合的欧拉-拉格朗日(CEL)法^[15]分析中,对SEPLA旋转调节过程进行模拟,通过与已有实验及数值分析结果对比,验证了该模型的有效性。

以上为单层土体中板锚埋深损失的相关研究,由于海床结构较为复杂,在实际海床土体中,常常会出现土体分层的现象。Y. C. Yang等^[16]采用理论和数值方法分析了OMNI-Max锚在多层海洋黏土中的运动轨迹,研究结果表明:土层厚度、土体强度梯度、土层界面抗剪强度突变均会影响OMNI-Max锚的受力状态及运动轨迹。Y. H. Kim等^[17]通过CEL法,研究了鱼雷锚在双层土体中的动态安装,并考虑了土体的应变软化和应变率效应。通过讨论双层黏土中鱼雷锚的贯入深度,最终提出了相应的经验公式。T. G. Feng等^[18-19]采用CEL法,对板锚在正常固结土-均质土-正常固结土三层黏土中的旋转调节过程进行研究,发现土体分层厚度对板锚埋深损失有较大影响,但忽略了土体分层厚度改变时板锚埋深同样在改变,而初始埋深对板锚埋深损失有很大影响。高鹏等^[20]研究了板锚在双层均质黏土中的埋深损失,得出了在上下层不同土体强度比下,板锚系缆点距土层分界线距离 d 对于板锚埋深损失的影响,拟合出板锚在双层均质土体中埋深

损失的经验公式,但海洋土体多为正常固结土,其并未研究。

鉴于此,本文采用CEL法,考虑正常固结土存在时,明确了衡量黏土分层特性指标 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}$,研究不同黏土分层特性下,板锚系缆点距土层分界线距离 d 、上层土体平均强度 $s_{u1,ave}$ 、板锚埋深处土体强度 s_{ue} 、板锚初始埋深 H 对板锚埋深损失的影响。

1 模型验证

1.1 数值建模

由于SEPLA的旋转调节过程造成土体产生较大变形,传统的小变形有限元计算方法将产生网格畸变、计算误差较大及计算不收敛等问题,因此,本文采用耦合的欧拉-拉格朗日(CEL)法进行建模。在分析土-结构耦合作用时,土体采用欧拉算法,即网格固定不变,土体可以在网格中流动,土体变形通过计算欧拉材料体积分数比(EVF)来确定,EVF=1表示网格被土体填满,EVF=0表示网格无土体,同一网格允许存在多种材料;结构采用拉格朗日算法,通过结构的边界来追踪土与结构接触面的变化,解决了网格畸变导致的计算不收敛等问题。

在开展黏土分层特性对吸力嵌入式板锚埋深损失的影响研究之前,需要验证本文所建立模型的有效性。本文选择与Z. H. Song等^[7]的离心机实验结果及数值模拟结果、L. Yu等^[10]的3D-RITSS计算结果进行对比验证。本文建立的板锚及土体模型所需参数见表1,其中, L 、 B 和 t 分别为板锚的长、宽和厚, e/B 为板锚加载偏心率, γ'_{anchor} 为板锚的浮重度; S 、 W 和 H 分别为土体模型的长、宽和高, s_u 为土体不排水抗剪强度, E 为杨氏模量, γ'_{soil} 为土体的浮重度;土体视为不排水饱和黏土,采用服从Tresca屈服准则的理想弹塑性模型,板锚的初始埋深 $H=3B$ 。由于所研究问题具有对称性,为提高计算效率,将建立对称模型,如图2所示。

表1 土体及板锚参数

Table 1 Soil and plate anchor parameters

工况	L/m	B/m	t/m	e/B	$\gamma'_{anchor}/$ ($kN \cdot m^{-3}$)	锚径	S/m	W/m	H/m	$s_u/$ kPa	泊松 比	$\gamma'_{soil}/$ ($kN \cdot m^{-3}$)	E/s_u
Z. H. Song等 ^[7]	4	4	0.2	0.625	67.8	有	28.2	16	24	18	0.49	9.2	500
				0.25									
L. Yu等 ^[10]	4	4	0.2	0.5	67.0	有	20	4	24	0.7 \approx	0.49	6.5	500

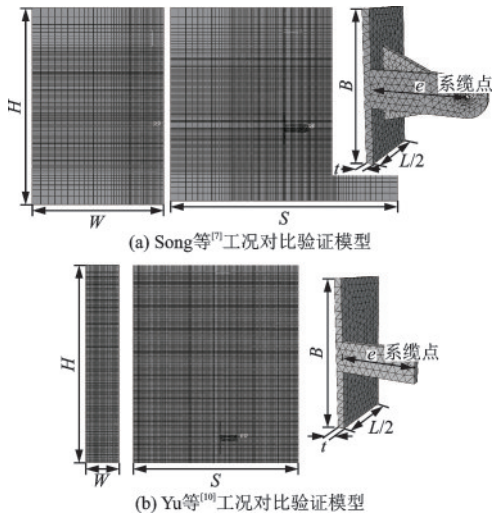


图2 板锚旋转计算有限元模型
Fig.2 Finite element model for plate anchor rotation calculation

1.2 模型考察

在模型验证之前,需要对模型相关参数进行考察。本文主要考察所建模型的网格密度、板锚系缆点处的拉拔速度 v 、锚-土接触摩擦系数 μ 对于计算结果的影响。网格密度对所建模型的计算效率和计算精度有较大影响,选择合适的网格尺寸对数值模拟计算较为重要;板锚的旋转调节过程为准静态过程,需要对板锚系缆点处的拉拔速度 v 进行考察;本文所考虑锚-土接触条件为完全粗糙,需要考察摩擦系数 μ 对于板锚埋深损失的影响。

土体最小网格尺寸 $B/30, B/20, B/10$ 的考察结果如图3(a)所示,当最小网格尺寸等于 $B/20$ 时,板锚的埋深损失趋于稳定,其中, β 为锚的方位角, ΔZ 为锚的埋深损失。结合计算精度和计算效率两方面因素,在接下来的研究中最小网格尺寸选取 $B/20$ 。

拉拔速度 $v=0.125, 0.25, 0.5$ m/s的考察结果如图3(b)所示,随着拉拔速度的减小,埋深损失-方位角曲线形态逐渐趋于稳定,可以认为 $v=0.25$ m/s时为准静态模拟,最终确定拉拔速度 $v=0.25$ m/s。

锚-土接触摩擦系数 $\mu=0.1, 0.3$ 及 0.5 的考察结果如图3(c)所示,板锚的埋深损失随着 μ 的增大而减小,最终趋于收敛,当 $\mu \geq 0.3$ 时,板锚最终的埋深损失趋于稳定,锚-土接触可认为完全粗糙,因此,本文摩擦系数 μ 取 0.3 。

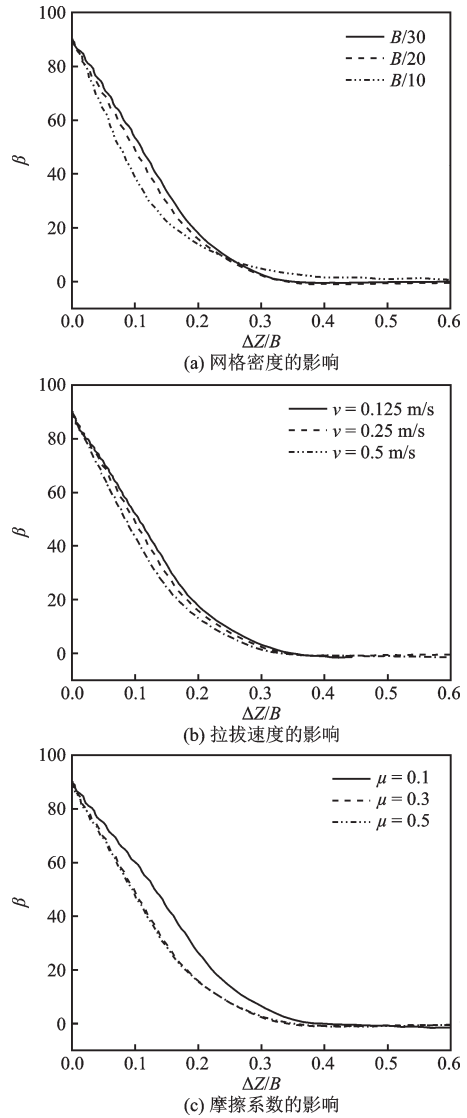


图3 模型参数考察

Fig.3 Examination of model parameters

1.3 模型验证

本文与Z. H. Song等^[7]研究板锚在均质透明土体中的离心机实验及数值模拟结果进行对比,如图4所示,由于本文直接对板锚在系缆点处施加竖直向上的位移,并未考虑Z. H. Song等^[7]离心机实验中滑轮组施加荷载的影响,导致最终板锚达到稳定承载状态时的方位角有一定差异,但本文关注板锚最终的埋深损失,本文所得埋深损失 $\Delta Z=0.41B$,离心机实验所得埋深损失 $\Delta Z=0.4B$,相差 2.5% ,即板锚达到稳定承载状态时所得埋深损失与离心机实验结果吻合良好。同时,本文数值模拟与Z. H. Song等^[7]的数值模拟所得埋深损失均为 $\Delta Z=0.41B$ 。

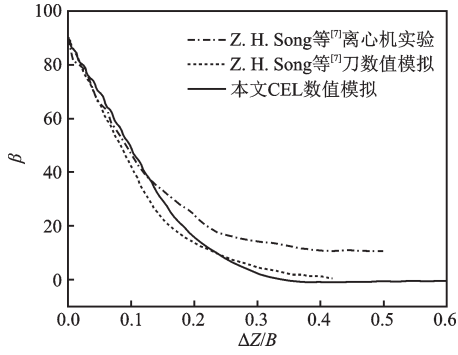


图4 有限元模型验证^[7]

Fig.4 Verification of the finite element model^[7]

L. Yu等^[10]通过3D-RITSS法对板锚在垂直荷载作用下的旋转调节过程进行研究,本文通过CEL法模拟了方形板锚在不同偏心比下的旋转调节过程,如图5所示,方形板锚达到稳定承载形态时的埋深损失随着 e/B 的增大而减小,与L. Yu等^[10]所得结论一致且曲线吻合良好。

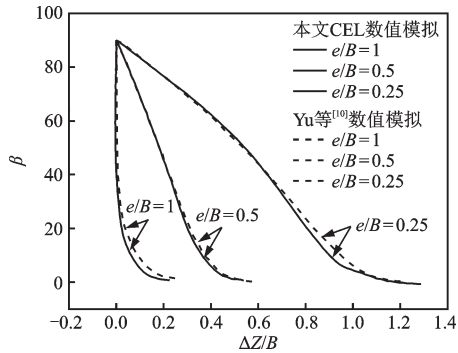


图5 有限元模型验证^[15]

Fig.5 Verification of the finite element model^[15]

通过与Z. H. Song等^[7]的离心机实验结果、数值模拟结果及L. Yu等^[10]的数值模拟结果对比,验证了本文所建CEL模型的有效性。

2 黏土分层特性对于板锚埋深损失的影响

本文所用板锚的模型与模型验证中基于Z. H. Song等^[7]工况所建模型相同,黏土分层特性如图6所示。其中,横坐标为土体强度,纵坐标为土体深度。 $s_{u1,0}$ 和 $s_{u2,0}$ 分别为上层和下层表面土体不排水抗剪强度, k_1 和 k_2 分别为上层和下层不排水抗剪强度梯度, z_1 为上层土体厚度, H 表示板锚的埋深, d 表示板锚系缆点距土层分界线的距离,系缆点位于土层

分界线下方时, d 为正值,板锚埋置在下层土体中;系缆点位于土层分界线上方时, d 为负值,板锚埋置在上层土体中。上层土体为均质土时,不排水抗剪强度表示为 s_{u1} ,上层土体为正常固结土时,不排水抗剪强度表示为 $s_{u1}=s_{u1,0}+k_1z_1$;下层土体为均质土时,不排水抗剪强度表示为 s_{u2} ,下层土体为正常固结土时,不排水抗剪强度表示为 $s_{u2}=s_{u2,0}+k_2(z-z_1)$,上层土体平均不排水抗剪强度表示为 $s_{u1,ave}=s_{u1,0}+k_1z_1/2$,板锚埋深处土体不排水抗剪强度表示为 $s_{ue}=s_{u2,0}+k_2(H-z_1)$ 。

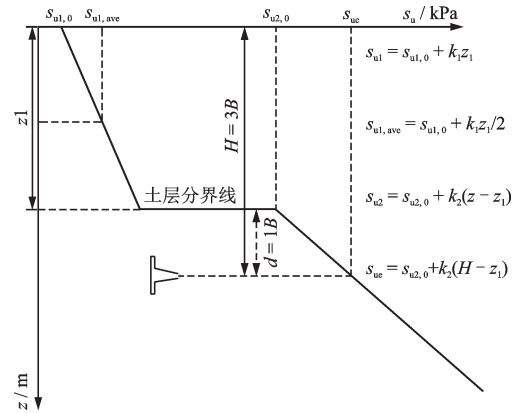


图6 黏土分层特性示意

Fig.6 Schematic diagram of clay layering properties

本节在板锚初始埋深 $H=3B$,上下层土体不同强度下,讨论 d 值对于埋深损失的影响,参数设置见表2。

表2 不同 d 值对于板锚埋深损失的影响

Table 2 Effect of different values of d on the embedment loss of plate anchors

$s_{u1,ave}/s_{u2,0}$	d/B	s_{u1}/kPa	s_{u2}/kPa
>1	-1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2	80	40
			$(28-2d)+2(z-z_1)$
<1	-1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5	20	80
		40	80
		5	$(28-2d)+2(z-z_1)$

2.1 板锚在 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}>1$ 双层土体中的埋深损失分析

当 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}>1$ 时,板锚的埋深损失 ΔZ 与 d 的关系如图7所示,曲线形态均呈“Z”型。随着 d/B 的增加,板锚的埋深损失首先保持不变,随后逐渐减小,最终收敛至一定值。图7中水平线为板锚在相

同理深下单层土体中的埋深损失。当 $d/B \leq -0.5$ 时,即板锚完全埋在上层土体中,板锚的埋深损失和相同埋深下 $s_u=80$ kPa 均质土中的埋深损失相同;当 $d/B \geq 1.0$ 时,板锚的埋深损失分别和相同埋深下 $s_u=40$ kPa、 $(4+2z)$ kPa、 20 kPa 单层土体中的埋深损失仅相差 $1.2\% \sim 1.3\%$,可视为相同,这一结果说明在 $d/B \leq -0.5$ 、 $d/B \geq 1.0$ 时,板锚的埋深损失分别仅受上层土体、下层土体强度的影响。当 $-0.5 < d/B < 1$ 时,板锚的埋深损失介于相同埋深下, s_{u1} 和 s_{u2} 对应单层土体中的埋深损失之间。

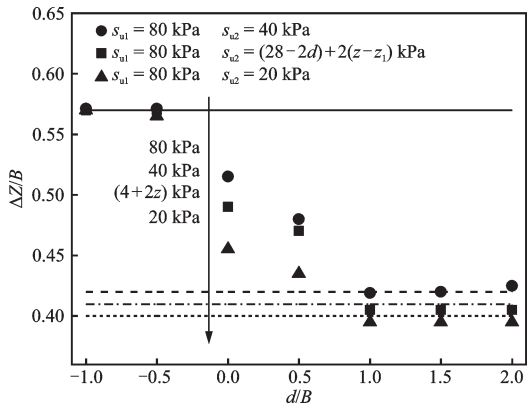


图7 不同 d 值对应的埋深损失 ($s_{u1,ave}/s_{u2,0} > 1$)

Fig.7 Embedment loss at different values of d ($s_{u1,ave}/s_{u2,0} > 1$)

2.2 板锚在 $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$ 双层土体中的埋深损失分析

当 $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$ 时,板锚的埋深损失 ΔZ 与 d 的关系如图8所示,曲线形态均呈倒“V”型。随着 d/B 的增加,板锚的埋深损失由初始值先增加后减小,最终趋于收敛。图8中水平线为板锚在相同埋深下单层土体中的埋深损失。当 $d/B \leq -0.5$ 时,即板锚完全埋置在上层土中,板锚的埋深损失和其在相同埋深下 $s_u=20$ 、 40 、 5 kPa 均质土中的埋深损失相同;当 $d/B=2.5$ 时,板锚的埋深损失与其在相同埋深下 $s_u=80$ kPa、 $(4+2z)$ kPa 单层土体中的埋深损失相同。这一结果说明当 $d/B \leq -0.5$ 、 $d/B \geq 2.5$ 时,板锚的埋深损失分别仅受上层土体、下层土体强度的影响。当 $-0.5 < d/B < 2.5$ 时,板锚的埋深损失均随着 d/B 的增大先增大后减小,在 $d/B=1$ 处,埋深损失存在一极大值 ΔZ_{max} ,比单层土体中的埋深损失大 $32\% \sim 123\%$ 。例如,当 $s_{u1}=5$ kPa、 $s_{u2}=20+2(z-z_1)$ kPa 时,埋深损失比相同埋深处 $s_u=5$ kPa 均质土中的埋深损失大 103% ,比 $s_u=(4+2z)$ kPa 土体中的埋深损失大 48% ,实际安装过程中较为危险,应

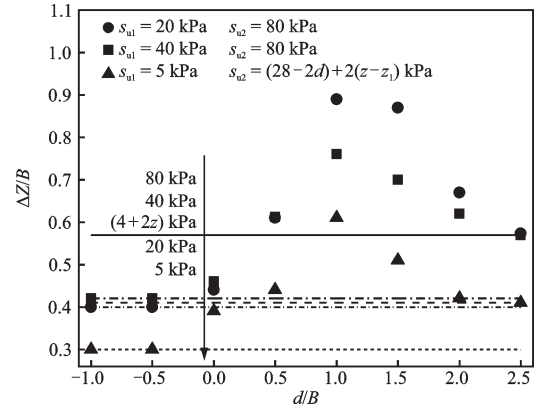


图8 不同 d 值对应的埋深损失 ($s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$)

Fig.8 Embedment loss at different values of d ($s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$)

深入研究。

3 影响埋深损失的关键土体参数

由第2节的结论可知,当 $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$ 时,板锚的埋深损失存在极大值 ΔZ_{max} ,工程中较为危险。本节将在 $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$ 的情况下,研究板锚的埋深损失与上下层土体哪些参数有关,参数考察工况设置如表3所示。

表3中工况 I 和 II 研究了在下层土体 $s_{u2}=(28-2d)+2(z-z_1)$ kPa,上层土体平均强度 $s_{u1,ave}=5$ kPa 条件下,板锚埋深损失随 d 值的变化情况。如图9所示,在不同 d/B 处,板锚在上层均质土、下层正常固结土及上下层均为正常固结土的条件下,相同 d 值下的埋深损失比 $\Delta Z/B$ 相差 $1.6\% \sim 3.3\%$,可近似认为相同。同理,按照表3中工况 III 和 IV 进行计算,改变上层土体强度,但保证 $s_{u1,ave}=10$ kPa。如图10所示,相同 d 值下,板锚埋深损失比 $\Delta Z/B$ 相差 $2.4\% \sim 4.5\%$,可近似认为相同。因此,在不同黏土分层特性的情况下,板锚的埋深损失与上层土体平均强度 $s_{u1,ave}$ 有关,与上层土体是均质土或是正常固结土无关。

表3中工况 I 和 V 研究了在上层土体 $s_{u1}=5$ kPa,下层土体分别为 $s_{u2}=28$ kPa 和 $s_{u2}=(28-2d)+2(z-z_1)$ kPa 的条件下,板锚埋深损失随 d 值的变化情况。如图11所示,当 $d/B < 0$ 时,板锚完全埋置于上层土体中,板锚埋深处的土体强度 $s_{ue}=s_{u1}=5$ kPa,板锚的埋深损失与 $s_u=5$ kPa 均质土中的埋深损失相同;当 $d/B \geq 0$ 时,板锚埋置于下层土体中,埋深处的土体强度 s_{ue} 均为 28 kPa,相同 d 值下的埋深损失相差 $1.6\% \sim 3.3\%$,可近似认为相同。同理,

表3 土体参数对板锚埋深损失的影响

Table 3 Influence of soil parameters on the embedment loss of plate anchors

工况	d/B	$s_{u1,0}/$ kPa	$k_1/$ (kPa·m ⁻¹)	$s_{u2,0}/$ kPa	$k_2/$ (kPa·m ⁻¹)	$s_{u1,ave}/$ kPa	$s_{ue}/$ kPa
I	-1	5	0	36	2	5	5
	-0.5	5	0	32	2	5	5
	0	5	0	28	2	5	28
	0.5	5	0	24	2	5	28
	1	5	0	20	2	5	28
	1.5	5	0	16	2	5	28
	2	5	0	12	2	5	28
II	-1	1	0.5	36	2	5	7
	-0.5	0.8	0.6	32	2	5	8
	0	0.2	0.8	28	2	5	28
	0.5	0	1	24	2	5	28
	1	0.2	1.2	20	2	5	28
	1.5	0.5	1.5	16	2	5	28
	2	1	2	12	2	5	28
III	-1	10	0	36	2	10	10
	-0.5	10	0	32	2	10	10
	0	10	0	28	2	10	28
	0.5	10	0	24	2	10	28
	1	10	0	20	2	10	28
	1.5	10	0	16	2	10	28
	2	10	0	12	2	10	28
IV	-1	2	1	36	2	10	14
	-0.5	3	1	32	2	10	15
	0	4	1	28	2	10	28
	0.5	5	1	24	2	10	28
	1	2	2	20	2	10	28
	1.5	4	2	16	2	10	28
	2	6	2	12	2	10	28
V	-1	5	0	28	0	5	5
	-0.5	5	0	28	0	5	5
	0	5	0	28	0	5	28
	0.5	5	0	28	0	5	28
	1	5	0	28	0	5	28
	1.5	5	0	28	0	5	28
	2	5	0	28	0	5	28
VI	-1	5	0	40	0	5	5
	-0.5	5	0	40	0	5	5
	0	5	0	40	0	5	40
	0.5	5	0	40	0	5	40
	1	5	0	40	0	5	40
	1.5	5	0	40	0	5	40
	2	5	0	40	0	5	40
VII	-1	5	0	48	2	5	5
	-0.5	5	0	44	2	5	5
	0	5	0	40	2	5	40
	0.5	5	0	36	2	5	40
	1	5	0	32	2	5	40
	1.5	5	0	28	2	5	40
	2	5	0	24	2	5	40

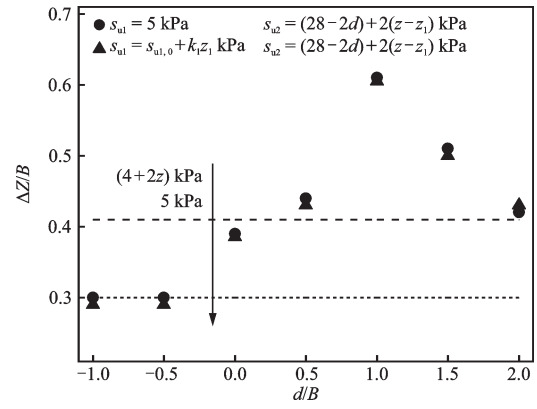


图9 不同 d 值对应的埋深损失 ($s_{u1,ave} = 5$ kPa)
Fig.9 Embedment loss at different values of d ($s_{u1,ave} = 5$ kPa)

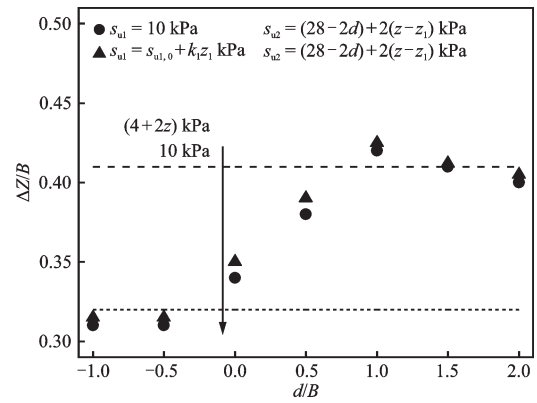


图10 不同 d 值对应的埋深损失 ($s_{u1,ave} = 10$ kPa)
Fig.10 Embedment loss at different values of d ($s_{u1,ave} = 10$ kPa)

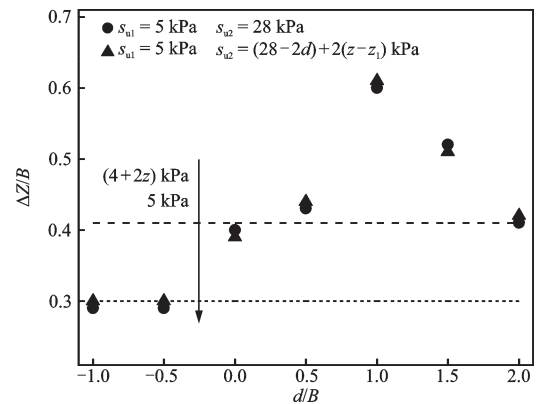


图11 不同 d 值对应的埋深损失 ($s_{ue} = 28$ kPa)
Fig.11 Embedment loss at different values of d ($s_{ue} = 28$ kPa)

按照表3中工况VI和VII进行计算,改变下层土体强度,但保证板锚埋深处的强度 s_{ue} 相同。如图12所示,相同 d 值下的埋深损失相差 1.4%~3.3%,可近似认为相同。因此,在不同黏土分层特性的情况

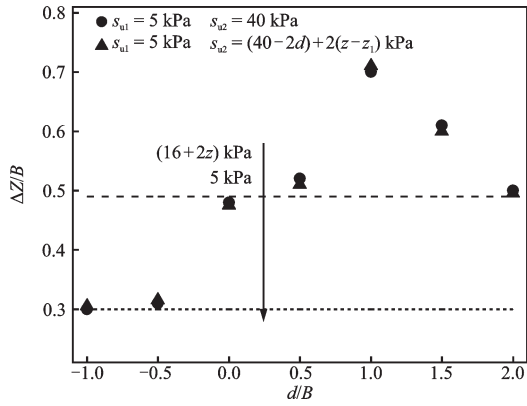


图12 不同 d 值对应的埋深损失($s_{uc}=40$ kPa)
Fig.12 Embedment loss at different values of d
($s_{uc} = 40$ kPa)

下,板锚的埋深损失与其埋深处的土体强度 s_{uc} 有关,与埋深处是均质土或是正常固结土无关。

4 黏土分层特性对 ΔZ_{max} 的影响

由第2节结论可知,当 $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$ 时,由于在 $d/B=1$ 处,板锚的埋深损失存在一极大值 ΔZ_{max} ,对于实际工程有较大危险性,所以本节针对在板锚系缆点距土层分界线 $d=1B$ 处,研究上层土体平均强度 $s_{u1,ave}$,板锚埋深处土体强度 s_{uc} 及板锚初始埋深 H 对于 SEPLA 埋深损失极大值 ΔZ_{max} 的影响,参数考察工况如表4~5所示。

表4 不同 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 下 s_{uc} 对 ΔZ_{max} 的影响
Table 4 Effect of s_{uc} on ΔZ_{max} at different $s_{u1,ave}/s_{uc}$

工况	$s_{uc}/$ kPa	$s_{u1,ave}/s_{uc}$	$s_{u1,0}/$ kPa	$k_1/$ (kPa·m ⁻¹)	$s_{u2,0}/$ kPa	$k_2/$ (kPa·m ⁻¹)
I	28	0.11	3	0	20	2
		0.18	5	0	20	2
		0.25	7	0	20	2
		0.36	10	0	20	2
		0.5	14	0	20	2
II	56	0.11	6	0	40	4
		0.18	10	0	40	4
		0.25	14	0	40	4
		0.36	20	0	40	4
		0.5	28	0	40	4
III	84	0.11	9	0	84	0
		0.18	15	0	84	0
		0.25	21	0	84	0
		0.36	30	0	84	0
		0.5	42	0	84	0

表5 不同 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 下 H 对 ΔZ_{max} 的影响

Table 5 Effect of H on ΔZ_{max} at different $s_{u1,ave}/s_{uc}$

工况	H/m	$s_{u1,ave}/s_{uc}$	$s_{u2,0}/$ kPa	$k_1/$ (kPa·m ⁻¹)	$s_{u2,0}/$ kPa	$k_2/$ (kPa·m ⁻¹)
I	12	0.11	3	0	20	2
		0.18	5	0	20	2
		0.25	7	0	20	2
		0.36	10	0	20	2
		0.5	14	0	20	2
II	16	0.11	3	0	20	2
		0.18	5	0	20	2
		0.25	7	0	20	2
		0.36	10	0	20	2
		0.5	14	0	20	2
III	20	0.11	3	0	20	2
		0.18	5	0	20	2
		0.25	7	0	20	2
		0.36	10	0	20	2
		0.5	14	0	20	2

表4考察了板锚在初始埋深 $H=3B$ 的情况下,当 $s_{u1,ave}/s_{u2,0}$ 不同时, s_{uc} 对埋深损失极大值 ΔZ_{max} 的影响。如图13所示,当 s_{uc} 分别为84、56、28 kPa时,随着 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 的增大, ΔZ_{max} 均逐渐减小。因为随着 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 增大,上下层土体的强度差逐渐减小,黏土分层特性变得不再显著,所以 ΔZ_{max} 逐渐减小,但依然比单层均质土埋深损失大。当 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 为定值, s_{uc} 不同时 ΔZ_{max} 也不相同,即 ΔZ_{max} 不仅和强度比 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 有关,同样受板锚埋深处强度 s_{uc} 的影响。当 $s_{u1,ave}/s_{uc}=0.5$, $s_{uc}=28$ kPa时, ΔZ_{max} 比 $s_{uc}=28$ kPa均质土埋深损失大2.4%,可认为相同。当 ΔZ_{max} 与均质土埋深损失相同时,其他 d 值处埋深损失和单层均质土埋深损失一定相同,因此当 $s_{u1,ave}/s_{uc} \geq 0.5$ 且 $s_{uc} \leq 28$ kPa时,埋深损失不再受黏土分层特性的影响,仅与板锚埋深处强度 s_{uc} 有关。

表5考察了在 $s_{uc}=28$ kPa时,当 H 分别为3B、4B、5B时,埋深损失极大值 ΔZ_{max} 随 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 的变化情况。如图14所示,当 H 为3B、4B时, ΔZ_{max} 均随 $s_{u1,ave}/s_{uc}$ 的增大而减小且减小幅度较大,当 $s_{u1,ave}/s_{uc}=0.11$, H 为3B、4B时, ΔZ_{max} 分别比 $s_{uc}=28$ kPa均质土中的埋深损失大58.5%、19.5%;当 $s_{u1,ave}/s_{uc}=0.5$, H 为3B、4B时, ΔZ_{max} 分别比 $s_{uc}=28$ kPa均质土中的埋深损失大4.9%、2.4%。当 $H=5B$ 时, ΔZ_{max} 比 $s_{uc}=28$ kPa均质土中的埋深损失大0.1%~4.8%,可近似认为相同。当 ΔZ_{max} 和均质土埋深损失相同时,其

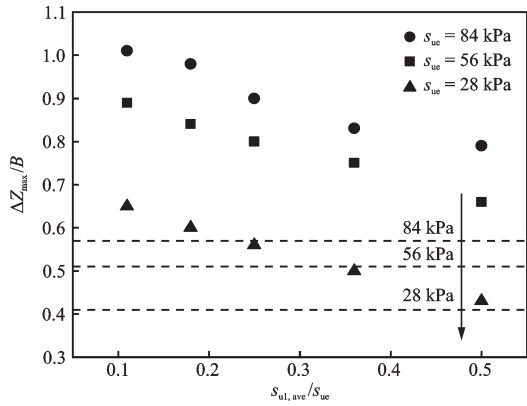


图 13 不同 s_{ue} 下板锚埋深损失极大值

Fig.13 Maximum embedment loss of plate anchors at different values of s_{ue}

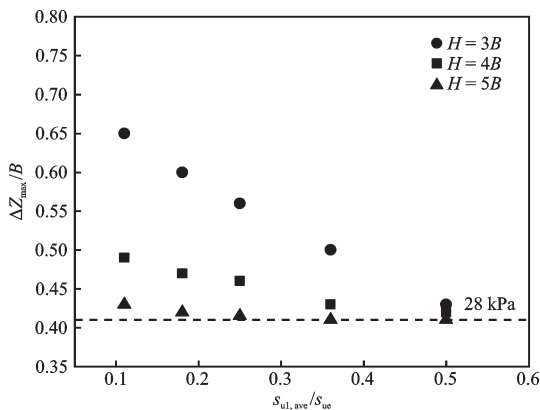


图 14 不同 H 下板锚埋深损失极大值

Fig.14 Maximum embedment loss of plate anchors at different values of H

他 d 值处理深损失和单层均质土埋深损失一定相同。由于板锚初始埋深 $H=5B$ 时,板锚可视为深埋状态,土体上覆有效应力很大,在旋转过程中板锚周围局部土体易达到塑性状态,在不同强度比 $s_{u1,ave}/s_{ue}$ 下,土体破坏模式均为局部破坏。综上,当 $H \geq 5B$ 时,板锚埋深损失不再受黏土分层特性的影响,仅与板锚埋深处强度 s_{ue} 有关。

5 结论

(1) 双层黏土中,当 $s_{u1,ave}/s_{u2,0} > 1$ 时,板锚的埋深损失随 d/B 的变化曲线为“Z”字型; $d/B \leq -0.5$ 、 $d/B \geq 1.0$ 时,板锚的埋深损失分别仅受上层土体、下层土体强度的影响。当 $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$ 时,板锚的埋深损失随 d/B 的变化曲线为倒“V”型,在 $d=1B$ 处存在一极大值 ΔZ_{max} ; $d/B \leq -0.5$ 、 $d/B \geq 2.5$ 时,板锚的埋深损失分别仅受上层土体、下层土体强度的

影响。

(2) 双层黏土中,当 $s_{u1,ave}/s_{u2,0} < 1$ 时,板锚的埋深损失与上层土体平均强度 $s_{u1,ave}$ 及板锚埋深处土体强度 s_{ue} 有关。

(3) 双层黏土中,当 $H=3B$ 时: ΔZ_{max} 随着 $s_{u1,ave}/s_{ue}$ 的增大而减小;埋深损失极大值 ΔZ_{max} 不仅与强度比 $s_{u1,ave}/s_{ue}$ 有关,同样受板锚埋深处强度 s_{ue} 影响;当 $s_{u1,ave}/s_{ue} \geq 0.5$ 且 $s_{ue} \leq 28$ kPa 时,板锚埋深损失不再受黏土分层特性的影响,仅与板锚埋深处强度 s_{ue} 有关。

(4) 双层黏土中,当 $s_{ue}=28$ kPa, H 为 $3B$ 、 $4B$ 时, ΔZ_{max} 均随 $s_{u1,ave}/s_{ue}$ 的增大而减小;随着 H 的增大, ΔZ_{max} 逐渐减小。当 $H \geq 5B$ 时,板锚埋深损失不再受黏土分层特性的影响,仅与板锚埋深处强度 s_{ue} 有关。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wilde B, Treu H, Fulton T. Field testing of suction embedded plate anchors[C]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger: ISOPE, 2001.
- [3] Wilde B. Program of centrifuge and field tests on the suction embedded plate anchor[R]. Houston: Report to SEPLA Joint Industry Project, 2005.
- [4] O'Loughlin C D, Lowmass A, 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. Hong Kong: ICPMG, 2006.
- [5] Chen Z R, Tho K K, Leung C F, et al. Large deformation numerical analysis of plate anchor keying process [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Oslo: ISFOG, 2015.
- [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): 04014080.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Hu Y X, Randolph M F. A practical numerical approach for large deformation problems in soil[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, 22(5): 327-350.
- [10] 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.
- [11] Liu H X, Liang K, Peng J S, et al. A unified explicit formula for calculating the maximum embedment loss of deepwater anchors in clay [J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109454.
- [12] 杨德健, 江自强, 卢力强, 等. 正常固结饱和黏土中倾斜平板锚承载力分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 1113-1120.
Yang D J, Jiang Z Q, Lu L Q, et al. Analysis of pull-out capacity of inclined plate anchors in normally consolidated saturated clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1113-1120. (in Chinese)
- [13] 李培冬. 深水锚在海床中复杂运动行为的大变形数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
Li P D. Large deformation finite element study on the comprehensive kinematic behavior of deepwater anchors in the seabed [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [14] Zhao Y B, Liu H, Li P. An efficient approach to incorporate anchor line effects into the coupled Eulerian-Lagrangian analysis of comprehensive anchor behaviors [J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 201-215.
- [15] 姬海波, 王建华, 范怡飞. 桩靴贯入与拔出引起的邻近桩附加及残余荷载分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 732-740.
Ji H B, Wang J H, Fan Y F. Analysis of additional and residual loads of an adjacent pile induced by spudcan penetration and extraction[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 732-740. (in Chinese)
- [16] Yang Y C, Liu H X. Theoretical and numerical approaches to analyze gravity installed anchors in multi-layered clays[J]. Ocean Engineering, 2022, 264: 112452.
- [17] Kim Y H, Hossain M S, Lee J K. Dynamic installation of a torpedo anchor in two-layered clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(3): 446-454.
- [18] Feng T G, Xu H J, Song J, et al. Finite-element analysis of keying process of plate anchors in three-layer soft-stiff-soft clay deposits[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2: 1-11.
- [19] Feng T G, Zong J Y, Jiang W, et al. Ultimate pullout capacity of a square plate anchor in clay with an interbedded stiff layer [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 15: 1-10.
- [20] 高鹏, 张雷克, 赵燕兵. 板锚在双层黏土中埋深损失的大变形有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 658-665, 673.
Gao P, Zhang L K, Zhao Y B. Large deformation finite element analysis on buried depth loss of plate anchors in double-layer clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 658-665, 673. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)