

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220422003

板锚在双层黏土中埋深损失的大变形有限元分析*

高鹏, 张雷克, 赵燕兵

(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, 海床土体分层现象对吸力嵌入式板锚(SEPLA)在海床中的旋转调节过程有着不可忽视的影响。基于耦合的欧拉-拉格朗日(CEL)法, 建立起用于分析板锚在双层黏土中埋深损失的有限元模型。通过与已有离心机试验及数值计算结果对比, 验证模型的有效性。在板锚初始埋深不变的情况下, 考察不同系统缆点距上下层土体分界面距离(d)及强度比(s_{u1}/s_{u2})对板锚在双层黏土中埋深损失的影响, 通过分析板锚周围土体的流动机制, 明确了锚在双层黏土中埋深损失增大的原因, 并建立起板锚埋深损失经验公式。结果表明, 在 $s_{u1}/s_{u2} < 1$ 的双层黏土中, 随着 d 的增大, 板锚的埋深损失先增大后减小, 并存在一极大值 ΔZ_{max} , 该极值比板锚在下层均质土中埋深损失大 74.2% ~ 81.1%, 在工程中较为危险; 在 $s_{u1}/s_{u2} > 1$ 的双层黏土中, 随着 d 的增大, 板锚的埋深损失逐渐减小; $d \leq -0.5B$ 与 $d \geq 1B$ 时, 板锚的旋转过程分别仅受上层土体与下层土体的影响。

关键词: 双层黏土; 板锚; 埋深损失; 大变形有限元; 经验公式

中图分类号: P751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0658-08

Large Deformation Finite Element Analysis on Buried Depth Loss of Plate Anchors in Double-layer Clay

GAO Peng, ZHANG Leike, ZHAO Yanbing

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

Abstract: In offshore engineering, the stratification of seabed soil has an important influence on the keying process of suction embedded plate anchor (SEPLA) in the seabed. Based on the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method, the finite element analysis model is established for analyzing the embedment loss of plate anchors. By comparing the results of the centrifuge test and numerical method, the efficiency of the finite element model is verified. With the same initial buried depth, the embedment loss of plate anchors is analyzed considering the influences of the distance between the shackle and the soil boundary (d) and the strengths ratio of the overlying soil to the underlying soil (s_{u1}/s_{u2}). By analyzing the soil flow mechanism around plate anchors, the reason for the increase of embedment loss is identified. In addition, an empirical formula is established for the embedment loss of plate anchors. It concludes that for the double-layer clay of $s_{u1}/s_{u2} < 1$, the buried depth of the anchor increases and then decreases as the value of d increases, and there exists a maximum value of ΔZ_{max} , which is

* 收稿日期:2022-04-22;修回日期:2022-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51741909)、山西省应用基础研究计划项目(201901D211020)资助

作者简介:高鹏(1996—),男,硕士。主要从事新型锚固结构的大变形有限元研究。E-mail:1648207739@qq.com

通讯作者:张雷克(1984—),男,副教授。主要从事水轮机发电机组动力学及水电站厂房结构稳定性分析工作。

E-mail:zhangleike@tyut.edu.cn

74.2%~81.1% larger than the embedment loss of the anchor in the uniform soil, indicating a more dangerous situation in the engineering practice. For the double-layer clay of $s_{u1}/s_{u2}>1$, the buried depth of the anchor decreases as the value of d increases. For $d\leq-0.5B$ and $d\geq 1B$, the keying of plate anchors is only affected by the overlying and underlying soil, respectively.

Keywords: double-layer clay; plate anchor; embedment loss; large deformation finite element; empirical formula

0 引言

随着人类对资源需求的日益增加,资源开发不断向深海甚至超深海发展,大型海洋浮式作业平台的安全生产运行也面临着诸多环境挑战。因此,扎根于海床的锚固结构就显得尤为重要。吸力嵌入式板锚(SEPLA)作为一种深海锚固结构,具有安装成本低、定位准确以及可回收利用等优点,具有广阔的发展前景。

如图1所示,通过将板锚嵌入到吸力锚底部,在自重与压差的共同作用下垂直贯入到海床中目标深度,吸力锚回收,将板锚留在海床中,通过张紧系泊缆绳调整板锚的位置,使之达到与缆绳垂直,实现法向承载,该过程称为板锚的旋转调节过程。

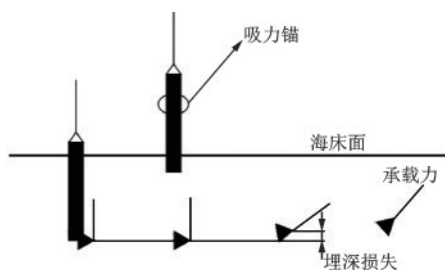


图1 板锚旋转过程

Fig.1 Keying process of the plate anchor

C.Gaudin等^[1]研究了SEPLA的旋转调节过程,结果表明,板锚在上拔过程中,势必会带来锚板中心点埋深的损失,进而影响锚的承载力,因此,研究板锚旋转过程中的埋深损失具有重要的工程意义。目前,针对板锚旋转调节过程的研究主要包括实验研究、理论分析与有限元数值分析。在现场实验方面,B.Wilde等^[2-3]在现场实验的基础上,推导了板锚旋转过程的承载力系数-位移关系,研究了板锚极限承载力与土体扰动和应变率之间的关系,得出了板锚在旋转过程中的埋深损失为 $0.5B\sim 1.7B$ (B 为板锚锚宽);C.O'Loughlin等^[4]利用鼓式离心机进行实验,评估了板锚在高岭土中旋转过程中的埋深损

失,证明了埋深损失与加载偏心率具有很强的关联性,当加载偏心率大于1时,埋深损失均小于 $1B$;当加载偏心率小于1时,埋深损失随着加载偏心率的减小而增大;当加载偏心率为0.17时,埋深损失达到 $1.5B$;Z.Chen等^[5]分析研究表明,锚脘在降低板锚埋深损失方面具有重要意义,埋深损失在板锚旋转结束时相对无锚脘板锚埋深损失减小33%;M.Yang等^[6]和鲁礼慧^[7]基于广义塑性极限分析,预测了SEPLA在不同荷载条件下的埋深损失与抗拔承载力。数值模拟方面,Z.Song等^[8]通过RITSS法^[9]模拟了垂直安装板锚在均质土与正常固结土中的旋转调节过程,埋深损失稳定在 $0.25B\sim 0.5B$;于龙^[10]利用3D-RITSS有限元分析方法探讨了加载偏心率、上拔倾角与板锚几何形状对埋深损失的影响,加载偏心率越大,埋深损失越小,反之,上拔倾角越大,埋深损失越大,但板锚形状对埋深损失的影响并不明显;赵燕兵^[11]与Y.Zhao等^[12]基于耦合的欧拉-拉格朗日(CEL)法,研究了系泊缆绳对板锚埋深损失的影响。

综上所述,目前对板锚旋转过程的研究主要集中在均质土或正常固结土中,然而在实际海洋环境中,海床构造复杂,常常会出现分层的现象,在非洲西海岸、马来西亚近海、澳大利亚的巴斯海峡均发现了层状海床^[13]。T.Feng等^[14-15]通过CEL法,对板锚在三层黏土中的埋深损失与承载力进行了数值分析,探讨了上层土体厚度、板锚初始埋深与层状土抗剪强度对锚固能力的影响,根据板锚在单层土中的承载特性,提出了层状土中板锚抗拔承载力系数的经验公式。T.Feng等^[14-15]的研究表明,海床土体分层的现象会对锚的埋深损失与承载性能造成不可忽视的影响。

鉴于此,基于CEL法,开展板锚在双层黏土中的旋转调节过程的大变形有限元研究。在初始埋深不变的情况下,研究不同锚-土分界线位置、不同土层强度比对板锚埋深损失的影响,并与单层土进行对比,以期获得对工程应用有益的规律及结论。

1 模型验证

1.1 数值建模

SEPLA 旋转调节过程中,将使得海床中的土体发生极大变形,传统的小变形有限元方法已不再适用。为克服传统有限元法中网格畸变造成的数值畸异,将采用 CEL 法进行建模,CEL 法采用了劈裂算子法^[16],将计算分为一个拉格朗日步计算和一个欧拉步计算,建模时土体与结构分别采用欧拉算法与拉格朗日算法,不存在网格畸变与计算不收敛的问题,同时可以通过结构边界追踪土体与结构接触面的变化。劈裂算子法解决了土体网格畸变的问题,但势必带来模型计算时长的增大,少则数小时,多则两周^[11]。

在开展板锚在双层黏土中旋转调节过程的研究之前,将先对模型的有效性进行验证。将选择 Z.Song 等^[8]的离心机实验结果与 D.Wang 等^[17-18]的数值计算结果进行模型验证。模型所采用的板锚及土体参数与 Z.Song 等^[8]和 D.Wang 等^[17]相同,板锚及土体参数分别见表 1 与表 2,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} 为板锚的浮容重; S 、 W 和 H 分别为土体模型的长、宽和高, s_u 为土体强度, E 为杨氏模量, γ'_{soil} 为土体的浮容重;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 $h=3B$ 。考虑到所模拟的问题具有对称性,将建立对称模型,如图 2 所示。由于土体为欧拉体,土体表面由欧拉材料的流动进行捕捉,需在土体表面以上建立一层空气层;在板锚系缆点施加垂直拉拔速度 v ,实现板锚在土体中的旋转过程,最终计算获得板锚的埋深损失。

表 1 板锚模型参数

Table 1 Parameters for anchors in the model

工况	L/m	B/m	t/m	e/B	$\gamma'_{anchor}/(kN \cdot m^{-3})$	锚径
Z.Song 等 ^[8]	4	4	0.2	0.625	67.8	有
D.Wang 等 ^[17]	8	3	0.2	0.5 1	67.0	无

表 2 土体模型参数

Table 2 Parameters for soil in the model

工况	S/m	W/m	H/m	s_u/kPa	泊松比	$\gamma'_{soil}/(kN \cdot m^{-3})$	E/s_u
Z.Song 等 ^[8]	27.2	14	25	18	0.49	9.2	500
D.Wang 等 ^[17]	25.8	4	16	0.7z	0.49	6.5	500

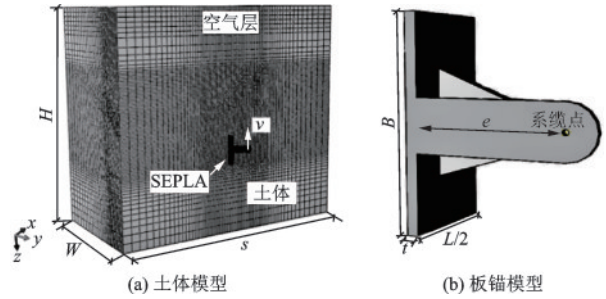


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

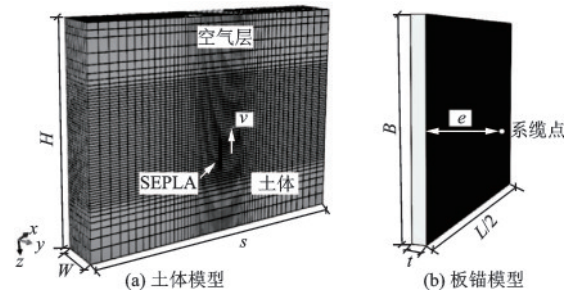


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

1.2 模型考察

在模型验证之前,将先考察网格密度对计算结果的影响;CEL 法为动力分析方法,板锚的旋转过程为准静态过程,因此需考察垂直拉拔速度 v 对计算结果的影响;在 Z.Song 等^[8]与 D.Wang 等^[17]的计算中,锚土接触为完全粗糙,因此需考察摩擦系数 μ 的影响。

针对 Z.Song 等^[8]工况,图 4 为网格密度考察结果,其中, $\Delta Z/B$ 为板锚埋深损失与板锚宽度的比值, β 为板锚旋转过程中的方位角;结合计算精度与计算效率考察,最终选择网格密度为 $B/20$ 。

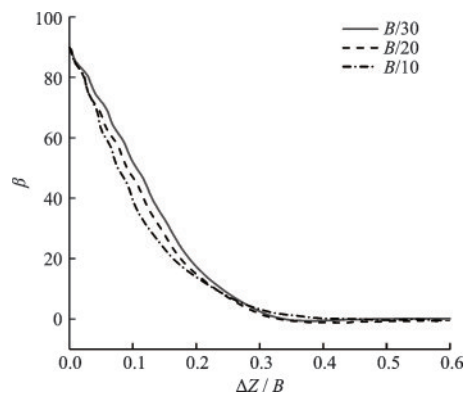


图 4 网格密度对 $\Delta Z/B$ 的影响

Fig.4 Influence of mesh density on $\Delta Z/B$

图5与图6表明,锚的埋深损失随着速度的增大而减小,最终趋于收敛,因此,选择速度为0.25 m/s为准静态模拟;对于摩擦系数来讲,锚的埋深损失随着摩擦系数的减小而增大,最终趋于收敛,在接下来的分析中,速度与摩擦系数分别选择0.25 m/s与0.3。

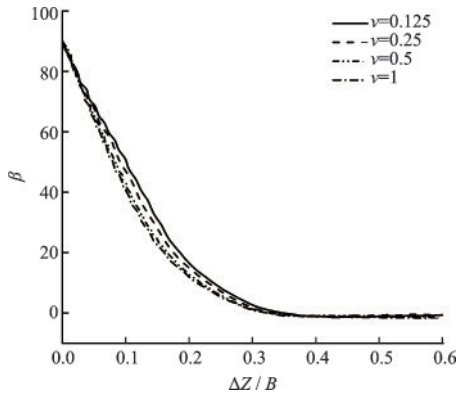


图5 拉拔速度对 $\Delta Z/B$ 的影响
Fig.5 Effect of drag velocity on $\Delta Z/B$

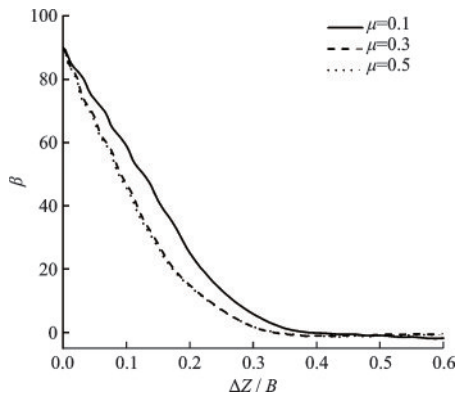


图6 摩擦系数对 $\Delta Z/B$ 的影响
Fig.6 Effect of friction coefficient on $\Delta Z/B$

针对D.Wang等^[17]工况,土体参数及锚板参数均有所不同,为保证精度与效率,有必要对摩擦系数、拉拔速度与网格尺寸重新进行考察。具体考察过程可参考Z.Song等^[8]工况模型考察,这里不再赘述。经过考察,D.Wang等^[17]工况所选摩擦系数为0.3,拉拔速度0.25 m/s以及网格密度0.05B。

1.3 模型验证

图7、图8为采用CEL法求得的板锚的埋深损失与方位角的关系曲线,同时,Z.Song等^[8]和D.Wang等^[17-18]结果也展示于图中。

图7表明,求得板锚的埋深损失与离心机实验结果吻合较好,本文求得的埋深损失 $\Delta Z=0.43B$,最

终方位角 $\beta=-1.6^\circ$;离心机实验测得的埋深损失 $\Delta Z=0.4B$,最终方位角 $\beta=10^\circ$;D.Wang等^[18]计算的埋深损失 $\Delta Z=0.51B$ 。与Z.Song等^[8]的计算结果相比,本文求得的埋深损失较Z.Song等^[8]的大7.5%;但本文求得的最终方位角较Z.Song等^[8]的小11.6°,造成这种差异的主要原因是Z.Song等^[8]的离心机实验室中采用锚链进行加载,由于加载滑轮与系缆点有一定的距离,导致板锚的最终方位角为 10° ,而本文直接在系缆点处加载,导致板锚的最终方位角接近 0° ;而本文计算的埋深损失小于D.Wang等^[18]的计算结果,主要原因在于D.Wang等^[18]未考虑锚脰的影响。

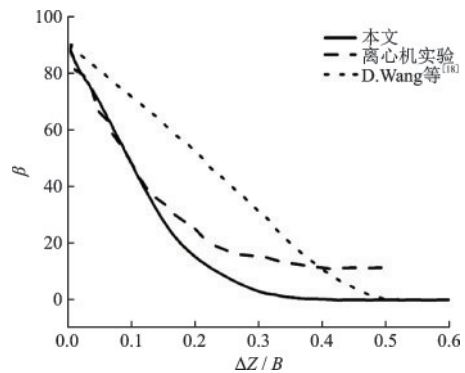


图7 有限元模型验证
Fig.7 Verification of the finite element model

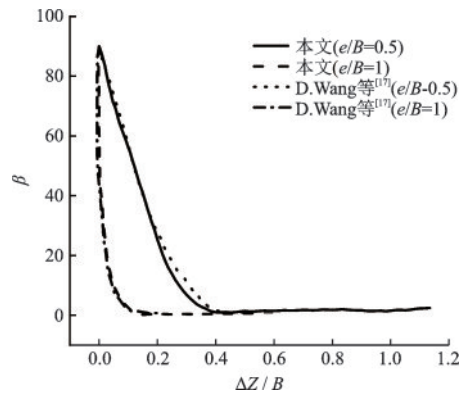


图8 有限元模型验证
Fig.8 Verification of the finite element model

D.Wang等^[17]采用大变形有限元方法RITSS法研究了板锚在饱和黏土中的旋转调节过程,本文针对D.Wang等^[17]的计算工况进行了有限元建模,计算结果如图8所示。图8表明, $e/B=0.5$ 时,本文求得埋深损失 $\Delta Z=0.41B$,RITSS方法所得埋深损失 $\Delta Z=0.40B$,与D.Wang等^[17]的计算结果相比,本文求得的埋深损失较D.Wang等^[17]的大2.5%; $e/B=1$

时, 本文与 D. Wang 等^[17]求得的埋深损失 ΔZ 均为 $0.15B$ 。通过上述两组数据对比, 证明了本文所采用的数值方法的有效性。

2 板锚在双层黏土中旋转过程的数值分析

本节以 Z. Song 等^[8]的工况所建模型为基础, 将土体分为上下两层, 如图 9 所示, 其中, s_{u1} 表示上层土体的不排水抗剪强度; s_{u2} 表示下层土体的不排水抗剪强度; h 表示系缆点的埋深, d 表示系缆点距上下层土体分界线的距离, 系缆点位于分界线上层时, d 为负值, 反之为正。数值考察过程中, 板锚初始埋深保持不变, $h=3B$ 。通过考察上下层土体强度比 s_{u1}/s_{u2} 及系缆点距上下层土体分界线的距离 d , 对板锚在双层土体中的旋转调节目程进行分析, 参数考察工况见表 3。

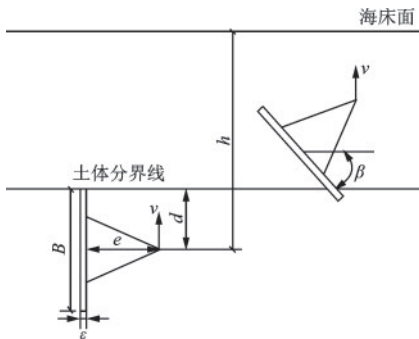


图 9 板锚在双层黏土中旋转过程的示意图

Fig.9 Illustration of the keying of plate anchor in double-layer clay

表 3 参数考察工况

Table 3 Parameters for the parametric study

工况	s_{u1}/s_{u2}	d/B	h/B
$s_{u1}/s_{u2} < 1$ $s_{u2} = 80 \text{ kPa}$	0.125	-1	3
		-0.5	
		0	
	0.25	0.5	
		1	
		1.5	
$s_{u1}/s_{u2} > 1$ $s_{u1} = 80 \text{ kPa}$	2	2	
	4	2.5	
	8	2.5	

2.1 板锚在 $s_{u1}/s_{u2} < 1$ 双层土中的埋深损失分析

图 10 为不同系缆点距土体分界线距离 d 下板

锚对应的埋深损失, 同时板锚在单层均质土体中的结果也展示于图 10 中。如图 10 所示, 与 Z. Song 等^[8]、D. Wang 等^[18]求得的板锚埋深损失随土体强度变化规律相同, 随着土体强度的增大, 板锚在单层均质土体中的埋深损失也相应增加。

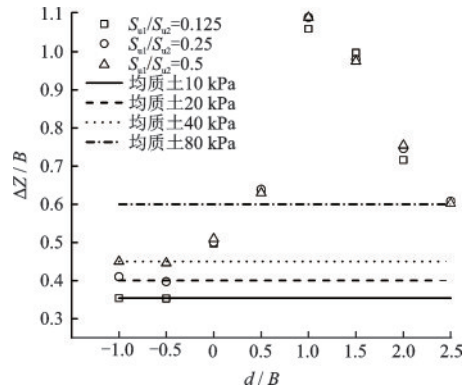


图 10 不同 d 值对应的埋深损失 ($s_{u1}/s_{u2} < 1$)

Fig.10 The embedment loss at different values of d ($s_{u1}/s_{u2} < 1$)

在此工况的双层土体中, 当 $d \leq -0.5B$ 时, 板锚埋深损失随着上下层土体强度比 s_{u1}/s_{u2} 的增大而增大; $0B < d < 2.5B$ 时, 板锚的埋深损失随着 d 的增大, 先增大后减小, 且上下层土体强度比对埋深损失影响较小; 当 $d \leq -0.5B$ 时, 板锚在双层土体中的埋深损失与上层土体强度值 (s_{u1}) 下对应的埋深损失值吻合良好, 最大相差值不超过 0.8%; 同时, 板锚在 $d=2.5B$ 位置的埋深损失与其下层土体强度值 (s_{u2}) 下对应的埋深损失值接近, 相差不超过 0.3%, 可认为 $d \leq -0.5B$ 、 $d \geq 2.5B$ 时, 板锚在双层土体中的埋深损失分别仅受上层、下层土体的影响。板锚在双层土体中 $d=1B$ 位置时, 埋深损失存在一极大值 ΔZ_{max} , 该极大值 ΔZ_{max} 较均质土体 s_{u1} 及 s_{u2} 情况下均大, ΔZ_{max} 与板锚在下层均质土中埋深损失相差 74.2%~81.1%, 在工程中较为危险, 对结构的稳定影响较大。

图 11 为 $s_{u1}/s_{u2} = 0.125$ 双层土中板锚在三个不同位置的土体流动机制, 当 $d = -0.5B$ 时, 板锚周遭土体在整个旋转调节过程中均形成了完整的局部破坏模式, 且在方位角 β 趋于 0° 时, 板锚两侧上方土体分别绕过锚板两端向板下方流动, 形成关于板锚中心对称的土体闭合回流, 破坏并未延伸至海床表面; 当 $d = 2.5B$ 时, 与前者不同的是, 在板锚旋转趋于水平时, 完整的土体闭合回流消失, 取而代之的是锚板与土体分离, 土体在板锚周围形成 A 型土体流动机制^[19], 即土体破坏面延伸至海床表面, 海床

轻微隆起。

如图 11(c) 所示, 当 $d=1B$ 时, 板锚的土体流动与 $d=-0.5B$ 及 $d=2.5B$ 时的土体流动机制不同, $\beta \approx 56^\circ$ 时, 板锚周围土体开始形成 A 型土体流动机制, 在土体内形成一个与海床表面贯通的滑裂面, 且随着 β 的减小, 土体表面滑裂面也不断增大, 导致土抗力增大, 进而板锚旋转速度减慢, 埋深损失增大。

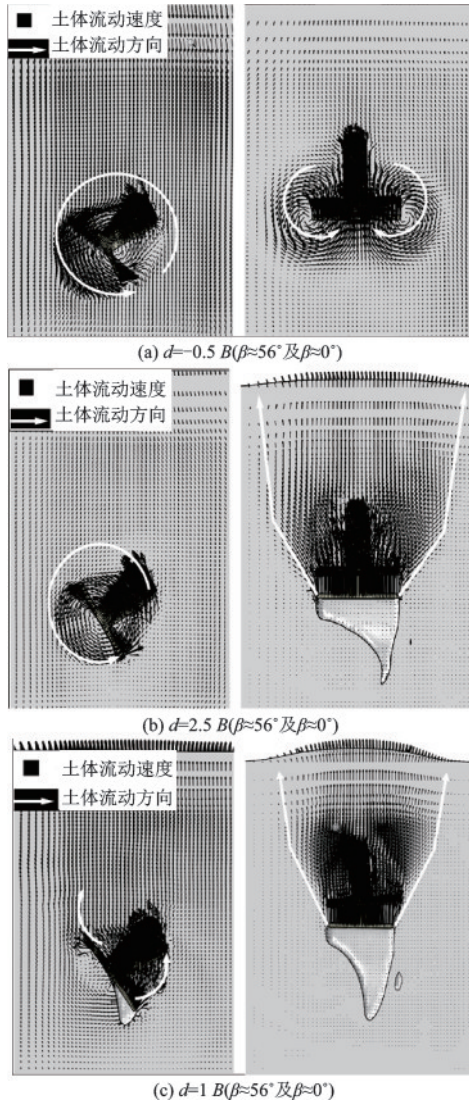


图 11 板锚周围土体流动机制 ($s_{u1}/s_{u2}=0.125$)

Fig.11 The soil flow mechanism around plate anchors ($s_{u1}/s_{u2}=0.125$)

2.2 板锚在 $s_{u1}/s_{u2}>1$ 双层土中的埋深损失分析

图 12 表明, 双层土体中, $-0.5B < d < 1B$ 时, 板锚的埋深损失随着 d 的增大, 呈逐步减小的趋势, 此外, 埋深损失受上下层土体强度比的影响较小; 当 $d \leq -0.5B$ 时, 板锚在双层土体中的埋深损失与上层土体强度值 (s_{u1}) 下对应的埋深损失接近, 相差不超过 0.3%, 可认为当 $d \leq -0.5B$ 时, 板锚在双层土体中的埋深损失仅受上层土体的影响; 当 $d \geq 1B$ 时, 板锚的埋深损失与其下层土体强度值 (s_{u2}) 下对应的埋深损失值接近, 相差不超过 1.2%, 可认为当 $1B \leq d < 3B$ 时, 板锚在双层土体中的埋深损失仅受下层土体的影响。

图 12 不同 d 值对应的埋深损失 ($s_{u1}/s_{u2}>1$)

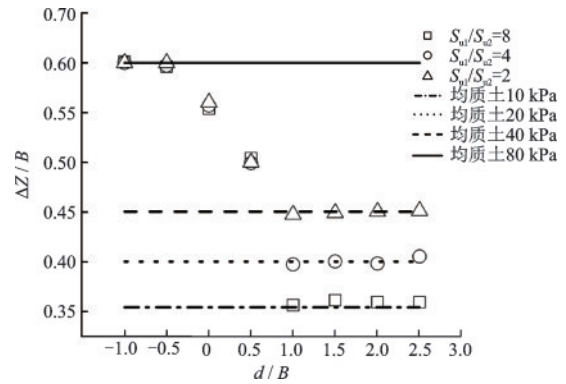


图 12 不同 d 值对应的埋深损失 ($s_{u1}/s_{u2}>1$)

Fig.12 The embedment loss at different values of d ($s_{u1}/s_{u2}>1$)

当 $-0.5B < d < 1B$ 时, 针对该位置板锚埋深损失介于 $d \leq -0.5B$ 与 $d \geq 1B$ 位置的埋深损失之间的情形, 以 $d=0.5B$ 为例, 如图 13 所示, 板锚旋转时, 土体尽管形成完整的局部流动机制, 然而该流动为上下两层土体彼此协作而形成, 当板锚上升到土体分界线周边时, 上层土体已参与到以下层土体流动为主体的土体流动机制中, 并逐渐扩大上层土体流动对整个流动机制的影响, 导致该位置板锚的埋深损失介于 $d \leq -0.5B$ 与 $d \geq 1B$ 位置的埋深损失之间。

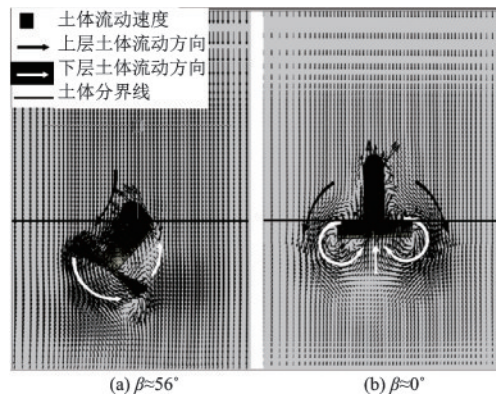


图 13 板锚周围土体流动机制 ($s_{u1}/s_{u2}=8, d=0.5B$)

Fig.13 The soil flow mechanism around plate anchors ($s_{u1}/s_{u2}=8, d=0.5B$)

表4 各强度比中常数项值

Table 4 Constant term in each strength ratio

s_{u1}/s_{u2}	a	b	c	e	f
0.125	0.451	-0.389	0.230	-1.353	0.629
0.25	0.471	-0.514	0.298	-1.463	0.697
0.5	0.493	-0.617	0.331	-1.518	0.708
2	0.562	-0.296	0.392	-0.316	0.768
4	0.564	-0.487	0.315	-0.666	0.619
8	0.572	-0.578	0.304	-0.834	0.616

3 埋深损失经验公式

基于表3中的计算工况,对板锚在双层黏土中旋转调节过程造成的埋深损失进行经验公式拟合,拟合公式如下:

$$\Delta Z/B = \frac{a + b(d/B) + c(d/B)^2}{1 + e(d/B) + f(d/B)^2} \quad (1)$$

式中, d 为系缆点距上下层土体分界线的距离; B 为板锚宽度; a, b, c, e, f 为待拟合常数项。通过数据拟合,各个强度比之下的常数项值见表4。

图14给出了不同强度比中有限元结果与式(1)计算结果的对比图,式(1)求得的 $\Delta Z/B$ 与有限元计

算结果的最大误差为9.26%,最小误差为-8.50%;拟合所得 $\Delta Z/B$ 的相关系数 R^2 最小为0.989,证明拟合效果很好,进而证明了所建立经验公式的有效性。

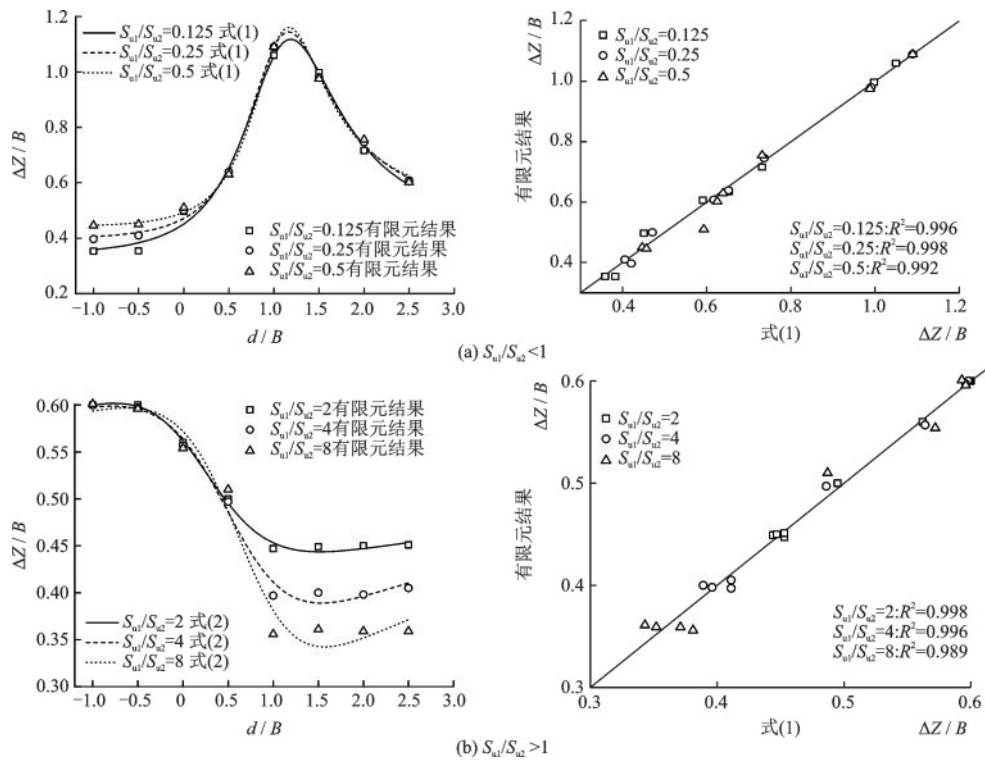


图14 有限元结果与拟合结果对比

Fig.14 Comparison between finite element results and fitting results

式(1)可用于计算不同强度比下板锚在海床中的埋深损失,式(1)中 a, b, c, e, f 常数项值需根据 s_{u1}/s_{u2} 的值,通过表4中的拟合值插值获得,然后带入式(1)计算相应强度比下板锚的埋深损失。为了验证式(1)的有效性,采用有限元计算了 $s_{u1}/s_{u2}=3/10$ 及 $s_{u1}/s_{u2}=10/3$ ($d/B=0.5, h/B=3$)下板锚的埋深损失。通过表4插值获得了常数项的 a, b, c, e, f 值,见表5。表6给出了有限元及式(1)求得的埋深损失

值,计算结果显示, $s_{u1}/s_{u2}=3/10$ 及 $s_{u1}/s_{u2}=10/3$ 条件下,两者的差别分别为1.7%和6.0%,证明式(1)具有一定的有效性。

表5 验证工况常数项值

Table 5 Constant term of verification cases

s_{u1}/s_{u2}	a	b	c	e	f
3/10	0.477	-0.550	0.316	-1.492	0.713
10/3	0.542	-0.413	0.324	-0.538	0.635

表6 验证结果($d=0.5B$)

Table 6 Verification results($d=0.5B$)

s_{u1}/s_{u2}	有限元结果	式(1)
3/10	0.64	0.65
10/3	0.50	0.47

4 结 论

基于大变形有限元分析技术CEL法,研究了双层黏土中板锚在海床中旋转调节过程,具体结论如下:

(1) 基于CEL法建立起用于分析双层黏土中板锚在海床中旋转调节过程的大变形有限元模型;考察了土体网格密度、拉拔速度和摩擦系数对板锚埋深损失的影响,确定了模型计算参数;并通过与离心机实验及数值计算结果对比,验证了模型的有效性。

(2) 针对双层黏土,当 $s_{u1}/s_{u2} < 1$ 时,随着 d 的增大,板锚的埋深损失先增大后减小;当 $d \leq -0.5B$ 时,板锚在双层土体中的埋深损失仅受上层土体的影响;当 $d \geq 2.5B$ 时,板锚在双层土体中的埋深损失仅受下层土体的影响;当 $d = 1B$ 时,板锚的埋深损失存在一极大值 ΔZ_{max} ,在工程中需引起重视。

(3) 针对双层黏土,当 $s_{u1}/s_{u2} > 1$ 时,随着 d 的增大,板锚的埋深损失逐渐减小;与 $s_{u1}/s_{u2} < 1$ 时的结论一致,当 $d \leq -0.5B$ 时,板锚在双层土体中的埋深损失仅受上层土体的影响;当 $d \geq 1B$ 时,板锚在双层土体中的埋深损失仅受下层土体的影响。

(4) 基于表3的计算结果,拟合获得不同强度比下 ΔZ 与 d/B 的关系式,进而建立起用于计算双层黏土中板锚埋深损失的经验公式。

参考文献:

[1] Gaudin C, O'loughlin C, Randolph M F, et al. Influence of the installation process on the performance of suction embedded plate anchors [J]. Géotechnique, 2006, 56(6): 381-391.

[2] Wilde B, Treu H, Fulton T. Field testing of suction embedded plate anchors [C] // The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger: OnePetro, 2001.

[3] Wilde B. Program of centrifuge and field tests on the suction embedded plate anchor [R]. Houston, TX, USA, 2005.

[4] O'Loughlin C, 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. 2006: 659-665.

[5] Chen Z, Tho K K, Leung C F, et al. Large deformation numerical analysis of plate anchor keying process [C] // Frontiers in Offshore Geotechnics III: Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Leiden: Taylor and Francis Books Ltd, 2015: 845-850.

[6] Yang M, Aubeny C P, Murff J D. Behavior of suction embedded plate anchors during keying process[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(2): 174-183.

[7] 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.

Lu L H. Keying behavior of gravity installed plate anchor and suction embeded plate anchor in clay [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)

[8] Song Z, Hu Y, O'Loughlin C, et al. Loss in anchor embedment during plate anchor keying in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1475-1485.

[9] Hu Y, 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] 于龙. 三维RITSS大变形有限元方法及其在基础刺入破坏和锚板承载力问题中的应用[D]. 大连: 大连理工大学. 2008.

Yu L. A 3-Dimensional RITSS large deformation finite element method and its application on the foundation punch-through failure and plate anchor uplift resistance problems [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)

[11] 赵燕兵. 深水锚在海洋黏土中复杂运动行为的数值模拟与理论研究[D]. 天津: 天津大学. 2016.

Zhao Y B. Numerical and theoretical study of complex kinematic behaviors of deepwater anchors in marine clay [D]. Tianjing: Tianjin University, 2016. (in Chinese)

[12] Zhao Y, Liu H. Numerical implementation of the installation/mooring line and application to analyzing comprehensive anchor behaviors [J]. Applied Ocean Research, 2016, 54: 101-114.

(本文编辑:周小潭)

(下转第673页)