

动力贯入圆板锚贯入深度的试验研究

魏云飞

河北天山实业集团，河北 石家庄 050000

摘要：动力贯入圆板锚是一种新型重力安装锚，贯入深度是关键设计参数。利用自制模型锚和试验装置开展了贯入试验，研究了泥面冲击速度、模型锚质量对贯入深度的影响，提出了动力贯入圆板锚贯入深度计算公式。利用该公式预测了本试验的贯入深度和现场动力贯入圆板锚的贯入深度，与试验结果比较，结果表明：冲击速度越大，贯入深度越大；锚的质量越大，贯入深度越大；本文贯入深度计算公式能较准确的计算动力贯入圆板锚的贯入深度。

关键词：动力贯入圆板锚；贯入深度；冲击速度；质量；计算公式

中图分类号：TU 443

Experimental Study on Penetration Depth of Dynamically Embedded Plate Anchor

WEI Yunfei

Hebei Tianshan Industrial Group, Ltd., HeBei Shijiazhuang 050000

Abstract: Dynamically embedded plate anchor is a new gravity installation anchor, and penetration depth is the key design parameter. The penetration test was carried out by using the self-made model anchor and the test device. The influence of the mud surface impact velocity and model anchor mass on the penetration depth was studied.,and the calculation formula for the penetration depth of the dynamically embedded plate anchor was put forward. This formula is used to predict the penetration depth of the test and the penetration depth of the field driven circular plate anchor. Compared with the experimental results, the results show that the greater the impact velocity is, the greater the penetration depth is, the greater the quality of the anchor, the greater the penetration depth; the penetration depth calculation formula in this paper can accurately calculate the penetration depth of the dynamic embedded plate anchor.

Key words: dynamically embedded plate anchor; penetration depth; Impact velocity; quality; Calculation formula

0 引言

动力贯入板锚（DEPLA）是一种基于鱼雷锚发展起来的新型重力安装锚^[1]，其安装过程为：安装船运行到指定位置，将其在一定的安装高度释放，贯入海床，回收链将配重杆拔出，锚板在锚链拖曳下旋转至设计角度，完成安装，开始承受工程载荷。DEPLA 结合板锚法向承载荷载^[2-5]与动力安装锚安装方便^[6-9]的优势相比于拖曳锚（DEA）和法向承载锚（VLA），DEPLA 具有安装方便、造价低、不需拖曳距离等优势，已得到一

些学者的关注。O’ Loughlin 等^[10]采用离心模型试验模拟 DEPLA 的安装和拔出过程，研究锚的质量、冲击速度及土的抗剪强度对锚的承载力的影响。A. P. Blake , C.D. O’ Loughlin 等^[11]对 DEPLA 的动力安装进行了现场实验，在实验过程中用惯性测量机器测试了锚的加速度数据，研究了安装过程中冲击速度及阻力的分布。D. Wang 等^[12]采用三维大变形有限元方法，考虑锚土相互作用，分析了板锚埋深、板锚尺寸、锚板厚度等对 DEPLA 承载力的影响。赵燕兵^[13]采用大变形有限元分析技术耦合的欧拉-拉格朗日法，分析了缆

绳在海床中的输力和变形规律,模拟了重力贯入锚的旋转、嵌入行为,提出了考虑缆绳影响的深水锚运动行为的高效数值分析模型。鲁礼慧^[14]通过小变形有限元分析结合最小二乘拟合建立了塑性模型,用塑性分析方法对重力板锚的旋转调节过程进行了研究,采用塑性分析方法研究了荷载倾角、锚眼偏移量以及土体强度特性等参数对承载力和埋深损失的影响规律。刘君和张雪琪^[15]采用 FLUENT 模型理论,对动力锚水中自由下落过程进行了动力分析,推导了基本的运动微分方程,确定了模拟计算所需要的模型,并通过模拟钢球的水中自由下落运动验证所用模型、方法的正确性。

然而,总体上作为一种新型锚,DEPLA 的设计计算方法还不成熟。饱和粘土海床土体的承载力随深度增加,因此,DEPLA 的贯入深度对承载力有极大影响,是 DEPLA 设计中的关键参数。目前,国内外对 DEPLA 贯入深度的试验研究尚很鲜见,本文自制贯入试验装置和动力贯入圆板锚,开展贯入试验研究,分析泥面冲击速度、锚重等对贯入深度的影响规律。

1 动力贯入锚贯入试验

1.1 试验装置

本试验采用自制试验装置,主要包括:宽度为 1.8m,高度为 3.5m 的铁制门架、焊接于门架横杆中心位置的定滑轮、调整锚模型释放高度的尼龙绳、置于门架正下方直径为 60cm,高度为 90cm 的不锈钢圆柱桶。试验装置如图 1 所示。

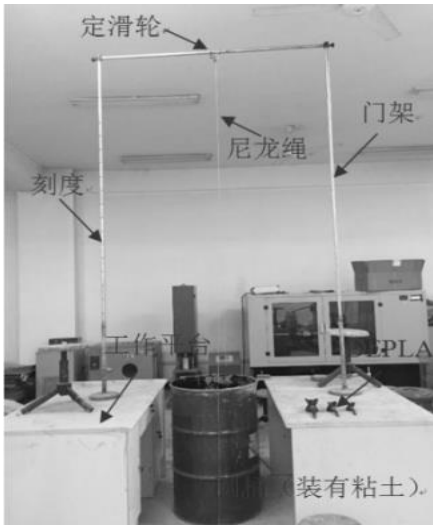


图 1 实验装置图

1.2 模型锚

试验采用缩尺比例为 1: 69 的三种不同尺寸的模型锚,如图 3 所示。模型锚由不锈钢制作,每个模型

锚包括一个可拆卸的配重杆和垂直对称焊接于联接套筒上的直径为 D_t 的锚板,其上有锚眼,锚板中心到锚眼的水平距离为锚眼偏心距 e 。配重杆顶部有吊孔,用来连接配重杆回收链,锚体下端为 30° 的锥体。模型锚的尺寸示意图如图 2 所示。模型锚的具体几何参数见表 1。

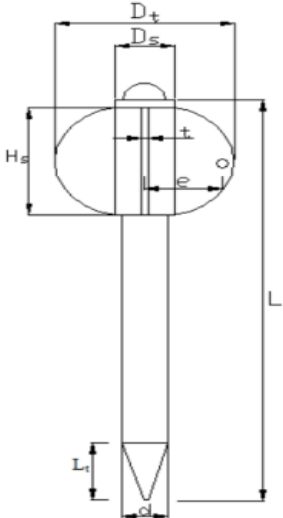


图 2 几何尺寸示意



图 3 DEPLA 模型

表 1 锚模型具体几何参数

	A1	A2	A3
总质量 m (g)	181.8	347.2	633.8
长度 L (cm)	15.2	19	22.8
锚板直径 D_t (cm)	6	7.5	9
套筒直径 D_s (cm)	1.5	1.875	2.25
套筒高度 H_s (cm)	5.794	7.249	8.691
锚眼偏心距 e (cm)	2.7	3.37	4.05
偏心系数 e/D_t	0.45	0.44	0.45
配重杆直径 d (cm)	1.2	1.5	1.8
锚尖长度 L_f (cm)	2.28	2.85	3.42
端部表面积 A_F (cm ²)	1.13	1.77	2.54
外侧表面积 A_s (cm ²)	155.47	243.01	349.53

1.3 试验用土

本试验采用普通粘土，试验通过改变土体的含水率来改变土体强度，试验用土具体参数见表 2。

表 2 试验用土参数

	N_c	$w(\%)$	S_u (Pa)
普通粘土	12.9	35.12	1964
		33.50	2100
		33.13	2371
		31.23	3658
		34.60	2050
		35.70	1863

表中 N_c 为承载力系数，由太沙基承载力系数表^[16]查得， w 为含水率， S_u 为土体的不排水抗剪强度平均值。

1.4 试验方案

利用自制模型锚和试验装置共进行 30 组贯入试验，研究泥面冲击速度、模型锚质量对贯入深度的影响，提出动力贯入圆板锚贯入深度计算公式，利用该公式预测本试验的贯入深度和现场动力贯入试验的贯入深度，并与试验数据进行比较，验证计算公式的准确性。

1.5 试验步骤

试验前将土体搅拌均匀，将锚从指定的高度自由下落贯入土体，下落过程中忽略尼龙绳和滑轮的摩擦力，测出贯入深度。具体步骤如下：

(1) 首先采用便携式十字板剪切仪测试试验用土的不排水抗剪强度。

(2) 将质量为 181.8g, 347.2g, 633.8g 的 DEPLA 模型，分别将其从 0.5m、1m、1.5m、2m、2.5m 的高度释放，贯入到同种强度的土体中，并测出模型锚的贯入深度。

(3) 改变土体强度，重复贯入试验，并记并整理录试验数据。

1.6 试验结果及分析

室内动力贯入试验在试验过程中忽略了空气阻力、水的浮力、拖曳阻力、滑轮摩擦力等因素的影响，根据牛顿第二定律： $M \frac{dv}{dt} = G$ ， $v_i = \sqrt{2gh}$ ，求得室内模型锚在不同高度时的冲击速度 v_i 。30 组锚贯入试验所得数据见表 3。

实验通过选取三种不同的 DEPLA 模型，将其以不同的冲击速度贯入到同种强度的土体中，结果如图 4 所示。

表 3 DEPLA 贯入试验数据

序列	锚	N_c	v_i (m/s)	S_u (Pa)	D (cm)
1	A1	12.9	3.13	1964	12.8
2		12.9	4.43	1964	15.5
3		12.9	5.42	1964	17.7
4		12.9	6.26	1964	19.8
5		12.9	7	1964	22.1
6		12.9	5.42	2100	16.3
7		12.9	5.42	2371	15.2
8		12.9	5.42	3658	14.9
9		12.9	5.42	2050	17
10		12.9	5.42	1863	18.8
11	A2	12.9	3.13	1964	16.95
12		12.9	4.43	1964	18.9
13		12.9	5.42	1964	22.4
14		12.9	6.26	1964	25.5
15		12.9	7	1964	27.5

续表 3

序列	锚	N_c	v_i (m/s)	S_u (Pa)	D (cm)
16	A3	12.9	5.42	2100	21.4
17		12.9	5.42	2371	20.2
18		12.9	5.42	3658	19.9
19		12.9	5.42	2050	22
20		12.9	5.42	1863	23.8
21		12.9	3.13	1964	20
22		12.9	4.43	1964	23.8
23		12.9	5.42	1964	28.1
24		12.9	6.26	1964	32
25		12.9	7	1964	34.6
26		12.9	5.42	2100	26
27		12.9	5.42	2371	25.3
28		12.9	5.42	3658	24.9
29		12.9	5.42	2050	27.2
30		12.9	5.42	1863	29.3

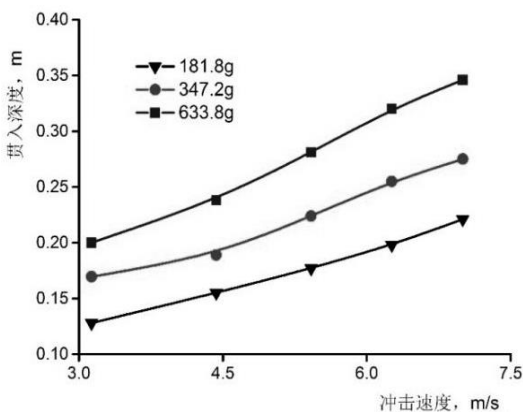


图 4 不同冲击速度及锚重下的贯入深度

由图 4 可知，当锚重相同时，冲击速度越大，DEPLA 的贯入深度越深，由此可知，安装释放高度对动力贯

入深度的影响很大。此外，当冲击速度相同时，随着锚质量的增加，体积也会增大，锚在下落贯入到海床上过程中的动能和入土阻力也相应增大，但从图 4 可以看出，贯入深度随锚重的增大而加深，说明增加的阻力所做的功小于增大的动能，因此增加锚重可以提高锚固能力。

试验通过改变土体含水率来改变土体强度，将 DEPLA 的释放高度取 1.5m，在不同强度的土体中进行贯入试验，结果如图 5 所示。

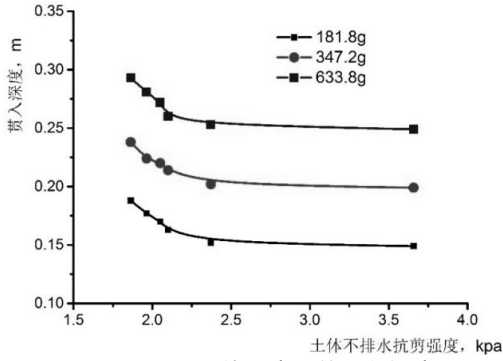


图 5 不同土体强度下的贯入深度

由图 5 可知，相同质量的 DEPLA 在相同的冲击速度下，贯入深度随土体强度的增大而减小，当土体强度增加到 2.371KPa 后，模型锚的贯入深度趋于稳定。

1.7 贯入深度预测公式

Terzaghi 等[17]和 True 等[18]认为锚在贯入过程中受到的端阻力和摩阻力公式可以表示为：

$$F_{BE} = N_c S_{ut} A_F \quad (1)$$

$$F_{AD} = \alpha S_{ut} A_s \quad (2)$$

式中：FBE 为端阻力，FAD 为摩阻力，Nc 为承载力系数，Sut 为土体不排水抗剪强度，AF 为锚端部与土垂直接触面积，AS 为锚与土侧面接触面积，α 为摩擦系数，取 1。

在锚贯入海床的过程中，土体的不排水抗剪强度随深度线性增加，为简化端阻力和摩阻力计算，引入平均不排水强度。式（1）、（2）可简化为：

$$F_{BE} = \frac{1}{D} \int_0^D N_c S_{ut} A_F dx = S_u N_c A_F \quad (3)$$

$$F_{AD} = \frac{1}{D} \int_0^D N_c S_{ut} A_s dx = \alpha S_u A_s \quad (4)$$

根据能量守恒原则，锚经过自由落体贯入到海床土体过程中的动能和势能与锚的端阻力和侧摩阻力所做的功平衡，可得到：

$$0.5mv_i^2 + mgD = (F_{AD} + F_{BE})D \quad (5)$$

将式（3）、（4）代入式（5）并进行化简：

$$\frac{v_i^2}{gD} + 2 = 2S_u \frac{A_s + N_c A_F}{mg} \quad (6)$$

式（6）左右两侧均为无量纲量，考虑到土体的不均匀性和 DEPLA 贯入速率的不同，用无量纲参数 v_i/v_0 来表示， v_0 为参考速度，取 $v_0=1\text{m/s}$ ，因此式（6）右边可以回归到四个相关的无量纲参数，为 N_c 、 $\frac{S_u A_F}{mg}$ 、 $\frac{S_u A_s}{mg}$ 、 $\frac{v_i}{v_0}$ 。所以无量纲方程可以表示为：

$$\frac{v_i^2}{gD} + 2 = f(N_c, \frac{S_u A_F}{mg}, \frac{S_u A_s}{mg}, \frac{v_i}{v_0}) \quad (7)$$

对式（7）进行拟合并进行多元回归分析，可表示为：

$$\frac{v_i^2}{gD} + 2 = a(N_c)^{x_1} (\frac{S_u A_F}{mg})^{x_2} (\frac{S_u A_s}{mg})^{x_3} (\frac{v_i}{v_0})^{x_4} \quad (8)$$

$$\text{令 } A=N_c, B=\frac{S_u A_F}{mg}, Q=\frac{S_u A_s}{mg}, P=\frac{v_i}{v_0}, \text{ 将式 (8)}$$

两边取对数，可得

$$\ln(\frac{v_i^2}{gD} + 2) = \ln a + x_1 \ln(A) + x_2 \ln(B) + x_3 \ln(Q) + x_4 \ln(P) \quad (9)$$

根据室内试验数据可求得式（9）中的 $\ln a$ 、 A 、 B 、 Q 、 P ，然后进行多元回归分析，可以求得参数 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 。因此，求得贯入深度预测公式为：

$$D_c = \frac{v_i^2}{(e^{47.063} A^{0.105} B^{9.423} Q^{10.065} P^{1.156} 2)g} \quad (10)$$

2 DEPLA 贯入深度计算公式的验证

2.1 本试验贯入深度与计算公式计算贯入深度的对比

根据拟合的贯入深度预测公式（10），将试验相关数据代入式（10）中，求出不同冲击速度下的计算贯入深度 D_c ，并与试验贯入深度 D 进行比较，结果如图 6、图 7 所示。

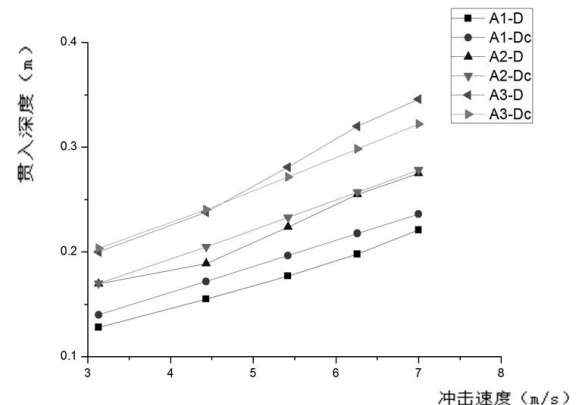


图 6 不同冲击速度下试验贯入深度与计算贯入深度

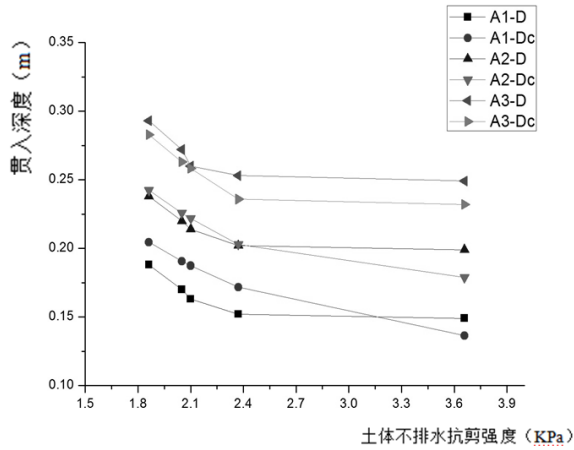


图 7 不同土体强度下试验贯入深度与计算贯入深度

从图 6、图 7 中可以看出，利用预测公式计算的贯入深度 Dc 与试验贯入深度 D 相差不大，基本吻合。

2.2 贯入深度计算公式的现场试验验证

Blake 等人[11] 在北爱尔兰的厄尔恩湖下游地区进行了 DEPLA 现场贯入试验，试验采用了三种不同的模型锚，模型锚质量、端部表面积、侧表面积、冲击速度、土体强度等参数及试验结果见表 4。将 Blake 等人的试验数据代入式（10）计算贯入深度 Dc，结果见表 4。

表 4 Blake 等人的实验贯入深度与计算贯入深度

	锚 1	锚 2	锚 3
m(g)	20300	96000	388600
N _c	12	12	12
A _F (cm ²)	28.26	78.5	200.96
A _S (cm ²)	3622.46	9995.88	23942.54
v _i (m/s)	5.6	7.5	9.7
S _u (Pa)	2400	2970	6210
D(cm)	176	280	694
D _c (cm)	173	271	689

通过 3.1、3.2 两节中试验贯入深度 D 与利用预测公式得到的计算贯入深度 Dc 的比较，可以发现计算贯入深度 Dc 与试验贯入深度 D 基本吻合，证明贯入深度预测公式可靠。

3 对室内冲击速度的修正

以上分析是通过室内试验得到的，而实际中锚的安装是在海水中进行的，假设锚的安装是在静水状态下

进行，可对锚下落贯入到土体这一过程中锚的受力进行简化，认为在这一过程中锚只受竖向载荷作用，因此 DEPLA 在入水过程中主要受到自重、浮力、拖曳阻力以及锚链拉力。试验证明，锚链拉力并不会显著减小 DEPLA 自由下落速度[16]，所以可不计锚链拉力的影响。

根据牛顿第二定律及上述分析，可得

$$M \frac{dv}{dt} = G' - F_D \quad (11)$$

式中，M 为锚的质量，G' 为锚的浮重， $G' = (\rho - \rho_w)gV$ ，F_D 为拖曳阻力， $F_D = 0.5\rho_w C_D A_F v^2$ ，C_D 为拖曳阻力系数，依据 True^[19] 和 Øye^[20] 的研究及 A. P. Blake 等人^[3] 现场实验的经验，取拖曳阻力系数 C_D 等于 0.7，A_F 为锚的端部表面积，令 $\eta = G'$ ， $\beta = 0.5\rho_w C_D A_F v^2$ ，式（11）可化简为：

$$M \frac{dv}{dt} = \eta \beta v^2 \quad (12)$$

应用 MATLAB 求解式（12），可得到锚在实际安装过程中的冲击速度 v：

$$v = \sqrt{\frac{\eta}{\beta}} * \tanh\left(\frac{\sqrt{\eta\beta}}{M} t\right) \quad (13)$$

4 结论

（1）通过室内贯入试验分析可知，DEPLA 在较大的冲击速度下可获得较大的贯入深度；当土体强度和冲击速度一定时，DEPLA 在土中的贯入深度随着锚重的增加而增加；当 DEPLA 安装释放高度和锚重一定时，DEPLA 在粘土中的贯入深度随着土体强度的增加贯入深度减小，并且当强度增加到一定的值后，贯入深度的变化趋于稳定。

（2）推导了贯入深度预测公式，通过公式计算得到的贯入深度与试验测得的贯入深度进行对比，发现两者基本吻合，认为贯入深度公式可靠。

（3）对实际安装过程中锚的受力进行简化，根据牛顿第二定律进行分析，得到了锚在实际安装过程中的冲击速度 v。

参考文献

[1] 国振，王立忠，李玲玲. 新型深水系泊基础研究进

展[J]. 岩土工程学报. 2011, 32(2): 118-123.

[2] Murff, J. D., Randolph, M. F., Elkhatab, S., Kolk, H. J., Ruinen, R. M., Strom, P. J., and Thorne,

- C.P. 2005. Vertically loaded plate anchors for deepwater applications. In Proceedings of the 1st International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia, 19 - 21 September 2005. pp. 313 - 348.
- [3]Gaudin, C., O' loughlin, C.D., Randolph, M.F., and Lowmass, A.C. 2006. Influence of the installation process on the performance of suction embedded plate anchors. *Géotechnique*, 56(6): 381 - 391.
- [4]Wong, P., Gaudin, C., Randolph, M.F., Cassidy, M.J., and Tian, Y. 2012. Performance of suction embedded plate anchors in permanent mooring applications. In Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, 17 - 23 June 2012. pp. 640 - 645.
- [5]Morton, J.P., and O' Loughlin, C.D. 2012. Dynamic penetration of a sphere in clay. In Proceedings of the 7th International Conference in Offshore Site Investigation and Geotechnics, London, UK, 12 - 14 September 2012. pp. 223 - 230.
- [6]Zimmerman, E.H., Smith, M.W., and Shelton, J.T. 2009. Efficient gravity installed anchor for deepwater mooring. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Tex., 2 - 5 May 2011. OTC 20117.
- [7]Lieng, J.T., Tjelta, T.I., and Skaugset, K. 2010. Installation of two prototype deep penetrating anchors at the Gjøa field in the North Sea. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Tex., 3 - 6 May 2010. OTC 20758.
- [8]张娜. 法向承力锚几类锚板承载力的比较研究. [河北工业大学硕士学位论文]. 河北: 河北工业大学, 2010
- [9]盛志刚, 张炜, 刘海笑. 深水系泊新型拖曳锚研发关键技术 [J]. 海洋工程, 2009,02:1-7
- [10]O' LOUGHLIN C D, RICHARDSON M D, RANDOLPH M F. Centrifuge tests on dynamically installed anchors[C]//Proceedings of 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Honolulu: American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [11]A.P. Blake and C.D. O' Loughlin. Installation of dynamically embedded plate anchors as assessed through field tests[J]. *Can. Geotech*, 2015, 52:1270-1282.
- [12]Wang D, O' Loughlin C. D. Numerical study of pull-out capacities of dynamically embedded plate anchors [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(11).1263-1272.
- [13]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.
- [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]刘君, 张雪琪. 板翼动力锚水中自由下落过程数值模拟[J]. *海洋工程*. 2017, 35(3):29-36.
- [16]高大钊. 土力学与基础工程. 中国建筑工业出版社, 1998.
- [17]Terzaghi, K., Peck, R.B., 1968. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, second edition. John Wiley & Sons, New York, USA.
- [18]Terzaghi, K., Peck, R.B., 1968. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, second edition. John Wiley & Sons, New York, USA.
- [19]True, D.G. 1976. Undrained vertical penetration into ocean bottom soils. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, Calif.
- [20]Øye, I. 2000. Simulation of trajectories for a deep penetrating anchor. CFD Norway Report 250:2000. CFD Norway AS, Trondheim, Norway.
- 作者简介:** 魏云飞 (1991—), 男, 河北省定州市, 河北天山实业集团, 硕士学位, 岩土方向。