

DOI: 10.11779/CJGE2024S10013

海上风电筒型基础沉贯阻力计算黏土强度研究

孟祥传, 刘润*, 侯科宇, 刘智敏, 王好, 文峰, 刘淮成

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 沉贯阻力的准确预测对筒型基础成功应用至关重要。单剪 (DSS) 试验测得的不排水抗剪强度 s_u 是沉贯安装设计中的关键土参数, DSS 试验考虑了 K_0 固结下土体的应力状态、主应力旋转以及实际工程平面应变状态, 与吸力式筒型安装过程中土体的受荷状态相符。研究总结了黏土中筒型基础沉贯阻力计算方法, 并分析了各种方法的特点。针对黏土强度取值问题, 采用单剪仪对滨海土进行等体积单剪试验, 探讨了干密度 ρ_d 、法向应力 σ_v' 及超固结比 (OCR) 对 s_u 的影响, 并分析了 s_u 差异产生的原因。最后, 提出了基于临界状态理论、强度指标、SHANSEP 的 3 种预测 s_u 的计算方法。研究成果为黏土中筒型基础沉贯阻力计算时土体参数取值提供了依据。

关键词: 筒型基础; 静单剪试验; 不排水抗剪强度; 滨海土; K_0 固结

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0097-05

作者简介: 孟祥传 (1994—), 男, 博士研究生, 主要从事海洋土力学和海洋新能源相关的研究。E-mail: xcmeng@tju.edu.cn。

Clay strength in calculation of penetration resistance of offshore wind bucket foundation

MENG Xiangchuan, LIU Run, HOU Keyu, LIU Zhimin, WANG Yu, WEN Feng, LIU Huaicheng

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The accurate prediction of penetration resistance is crucial for the successful application of bucket foundations. The undrained shear strength (s_u) obtained from the direct simple shear (DSS) tests is a key soil parameter in bucket installation design. The DSS tests consider the stress state of the soil under K_0 consolidation, the rotation of principal stresses and the actual engineering plane strain state, which corresponds to the loading conditions of the soil during installation of suction bucket. This study summarizes the calculation methods for bucket penetration resistance in clay and analyzes the characteristics of various methods. To address the issue of determination of soil strength, the coastal soil is subjected to consolidated undrained triaxial shear tests using a single shear apparatus. The influences of dry density (ρ_d), effective normal stress (σ_v') and overconsolidation ratio (OCR) on s_u are explored, and the reasons for the differences in values of s_u are analyzed. Finally, three prediction methods for s_u based on the critical state theory, strength index and SHANSEP are proposed. The research findings provide a basis for determining soil parameters in calculation of foundations penetration resistance of bucket in clayey soils.

Key words: bucket foundation; direct simple shear test; undrained shear strength; coastal soil; K_0 consolidation

0 引言

随着海上风电向大型化、多样化和深水化方向发展, 对海洋岩土勘察提出了新的挑战。在海洋黏土中进行施工时, 土体通常处于不排水状态^[1]。以海上安装吸力式筒型基础为例, 在筒型基础沉贯的过程中, 筒内外壁受到纯剪破坏, 由于受到抽水吸力的影响, 筒端会出现拉伸、纯剪和压缩的组合破坏, 见图 1。

在筒型基础设计阶段, 成功安装对其长期运营至关重要, 目前国际规范如 API^[2]、DNV^[3]、ISO^[4]已将不排水抗剪强度 s_u 作为海洋岩土工程设计中关键的力学参数之一。此参数不仅在吸力式筒型基础沉贯阻力

计算中得到应用, 同时也对工程施工安全性能产生重要影响, 并直接影响其在运行期间的稳定性^[5]。

值得注意的是, 在岩土工程领域中, 力学参数测试误差通常比计算方法引起的误差更大^[6]。因此, 在确定岩土工程设计的基础条件时, 通过合理准确的土工试验获得正确的力学参数十分必要。当前, 国内外对常规三轴试验进行了大量研究, 但中国对单剪试验

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2603000); 国家杰出青年科学基金项目 (51825904)

收稿日期: 2024-04-28

***通信作者:** (E-mail: liurun@tju.edu.cn)

的研究相对较少。单剪试验（direct simple shear test, DSS）是一种改进自直剪试验（direct shear test, DS）用于测试土体剪切强度的方法^[7]，单剪试验的应用改善了直剪试验中人为假定剪切面、不均衡的应力分布以及不能实际控制土样排水和由于土样被压缩产生的变截面剪切等不利因素。在不排水情况下，单剪试验施加水平剪切力，使土体体积保持不变并产生剪切变形。单剪试验作为一种高级土工试验，在筒型基础沉贯阻力计算中具有重要作用。然而，国内地勘资料更多地提供等向固结三轴剪切试验的结果，对于纯剪切的 DSS 力学参数试验研究相对较少。

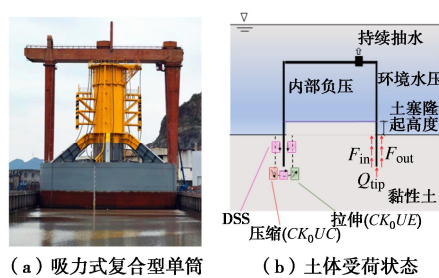


图 1 海上风电吸力式筒型基础及受荷状态

Fig. 1 Bucket foundation for offshore wind power and loading states

为此，本研究使用单剪仪对饱和天津滨海土进行了等体积试验，系统性地研究土样初始干密度 ρ_d 、法向应力 σ'_v 及超固结比 OCR 对 s_u 的影响。同时，分析导致 s_u 产生差异性的原因。基于试验结果及理论分析，提供不同影响因素下土体 s_u 的预测方法，为海上风电筒型基础的设计及安装土体参数的选取提供依据。

1 沉贯阻力计算及土强度测试方案

1.1 筒型基础在黏土中沉贯阻力计算方法

目前，计算筒型基础在黏土中沉贯阻力的方法可分为基于不排水抗剪强度和基于静力触探的两类方法^[1]。静力触探可以获得现场地层连续的地勘结果，通过将锥尖阻力 q_c 与筒型基础内外侧摩阻力和筒端阻力建立联系，从而得到筒型基础的沉贯阻力。然而，经验系数的取值直接影响预测结果的准确性。不排水抗剪强度 s_u 的方法依据筒型基础沉贯时不同位置的受荷状态，进行室内试验，利用三轴和 DSS 试验得到的土体强度计算筒型基础沉贯阻力。然而，受到室内实验室仪器的限制，一种优于直剪的单剪土体强度结果在地勘资料中并不常见。

s_u 的计算方法适用于黏土在不排水条件下筒型基础贯入阻力的计算。基于 s_u 的筒型基础沉贯阻力计算方法见表 1，不筒方法的特点及属性见表 2。

从表 1、2 可以看出，不同沉贯阻力计算方法都用

到了 s_u ，但地勘报告中仅给出了等向固结三轴压缩试验的 s_u ，与筒型基础沉贯过程中筒壁附近土体的受荷状态存在差异，采用 DSS 得到的 s_u 对于沉贯阻力的预测更有意义，准确性更高，为此进行系列 DSS 试验，研究不同影响因素对 s_u 的影响，为筒型基础的设计提供依据。

表 1 基于不排水抗剪强度 s_u 的计算方法

方法分类	计算公式
API-RP-2GEO ^[2]	$R = (A_o + A_i)h\alpha s_{u1} + A_{tip}9s_u$
Houlsby 等 ^[8]	$V' + s_{A_{in}} = A_o h\alpha_o s_{u1} + A_i h\alpha_i s_{u1} + A_{tip}(\gamma' h - s + s_{u2}N_c)$
DNV-RP-E303 ^[3]	$R_b = (A_o + A_i)h\alpha s_{u,D}^{av} + A_{tip}(N_c s_{u,tip}^{av} + \gamma' h)$

注： R 为筒型基础贯入阻力； A_o 、 A_i 、 A_{tip} 、 A_{in} 、 h 分别为筒裙外部周长、筒裙内部周长、筒端部面积、筒内顶盖面积、筒型基础贯入深度； α 为黏合系数， $\alpha = 1/s_l$ ， s_l 为黏土的灵敏度； γ' 为土体有效重度； V' 为有效竖向荷载（考虑基础入水及浮力）； s 为筒型基础贯入所需吸力； s_{u1} 为贯入深度内土体不排水抗剪强度平均值； s_{u2} 为贯入深度处土体不排水抗剪强度； N_c 为承载力系数； $s_{u,D}^{av}$ 为DSS不排水抗剪强度平均值； $s_{u,tip}^{av}$ 为三轴压缩、三轴拉伸、DSS不排水抗剪强度平均值。

表 2 基于 s_u 的沉贯阻力计算方法属性

方法分类	自重沉贯	吸力沉贯	土参数	经验系数
API	✓	×	γ', s_u	α
Houlsby & Byrne	✓	✓	$\gamma', s_{u1}, s_{u1}, s_t$	α_i, α_o, N_c
DNV	✓	✓	$\gamma', s_{u,D}^{av}, s_{u,tip}^{av}, s_t$	α, N_c

1.2 试验设备与试样制备

采用 GDS 生产的 EMDCSS 装置（图 2）进行 DSS 试验。

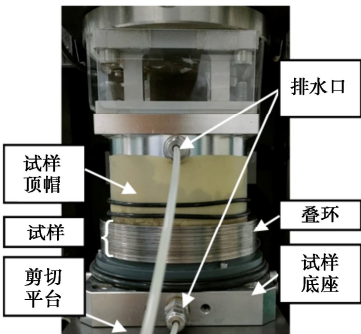


图 2 试样加载示意图和试验设备图

Fig. 2 Loading diagram of sample and test equipments

以滨海土为研究对象，对土样进行风干、碾碎、过筛，过筛后土样的粒径累计曲线如图 3 所示。

采用分层击实法制备单剪（ $D \cdot H = 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ）重塑试样，试样 $\rho_d = 1.1 \text{ g/cm}^3$ ，并用抽气饱和和法

对重塑试样进行饱和。对饱和后的试样进行固结试验, 得到了土体的先期固结压力 p_c 为 28 kPa, 重塑黏土试样详细参数见表 3。

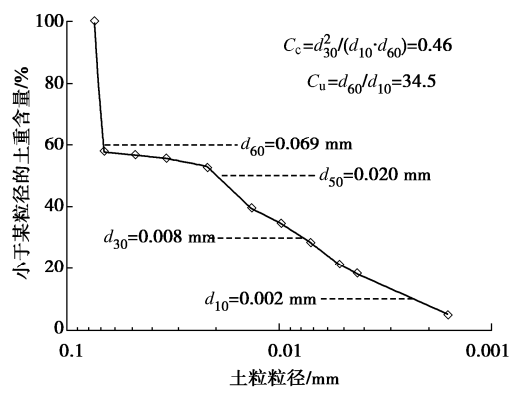


图 3 试验土样颗粒级配曲线

Fig.3 Grain-size distribution curve of test soil

表 3 滨海土物性指标及力学参数

Table 3 Physical parameters and mechanical parameter of coastal clay	
土质	数值
土粒相对质量密度 G_s	2.73
液限 $w_L/\%$	64.00
塑限 $w_p/\%$	27.76
塑性指数 I_p	36.24
饱和密度 $\rho_{sat}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.68
含水率 $w/\%$	52.62
孔隙比 e	1.39

注: 取 76 g 锥入土深度为 10 mm 所对应的含水率为液限。

1.3 试验方案与步骤

为了研究法向应力 σ'_v 、干密度 ρ_d 和超固结比 OCR 对 s_u 的影响, 开展如表 4 所示试验。

表 4 试验方案

Table 4 Test design

$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	σ'_v/kPa	OCR
0.90	100	1
1.25	100	—
1.10	50, 100, 150, 200, 300, 600	1
1.40	100	—
1.10	100	1.5, 2, 3, 6
1.10	50	12

依据 ASTM (D6528-17)规范进行固结不排水 DSS 试验, 即恒定体积试验, 剪切过程中, 试样体积保持不变且轴向无应变产生, 剪切速率为应变的 5%/h。

2 试验结果及土强度选取方法

试验中应变软化情况下 s_u 为水平向剪应力 τ_h 峰值对应的剪切强度, 若没有峰值, 则取剪切应变 $\gamma=15\%$ 对应的剪切强度^[9]。

2.1 干密度对不排水抗剪强度的影响

图 4 为不同 ρ_d 的土体在 $\sigma'_v=100\text{ kPa}$ 固结后剪切

时的应力-应变曲线。

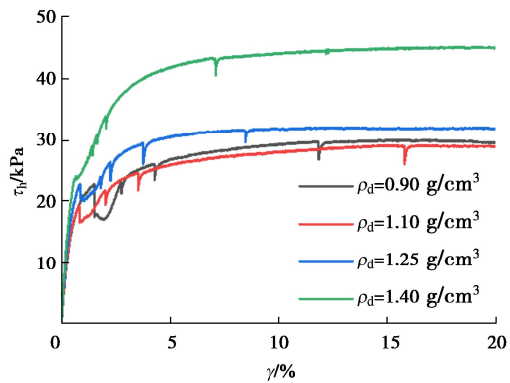


图 4 不同干密度土体的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of soils with different ρ_d

由图 4 可知, 土体在剪切过程中, 应力应变曲线均呈现出应变硬化特性, 当 ρ_d 为 0.90, 1.10 g/cm^3 时, 土体的应力-应变曲线基本相同, 随着 ρ_d 的增加, 土体的刚度和 s_u 逐渐提高。

为了评估不同 ρ_d 对土体 s_u 的影响程度, 将测得的不同 ρ_d 土体的 s_u 进行了汇总, 见图 5。

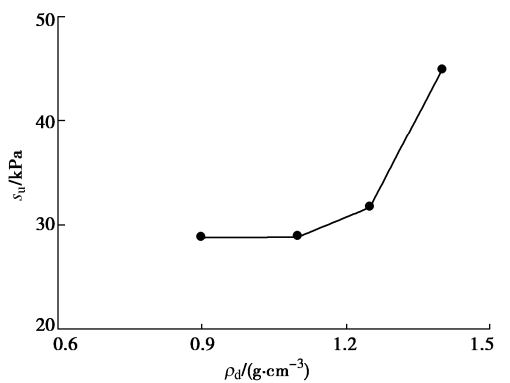


图 5 不排水抗剪强度随干密度的变化曲线

Fig. 5 Curve of undrained shear strength changing with ρ_d

由图 5 可知, 当 ρ_d 为 0.90, 1.10 g/cm^3 时, 土体的 s_u 基本相同。由于 ρ_d 为 1.10 g/cm^3 的先期固结压力 p_c 为 28 kPa, 而 ρ_d 为 0.90 g/cm^3 的土体则具有更小的 p_c , 两种干密度土体的 p_c 均小于 $\sigma'_v=100\text{ kPa}$, 故土体的法向固结压力大于先期固结压力时, ρ_d 对土体的 s_u 没有影响。当 ρ_d 为 1.25 g/cm^3 时, 土体的 s_u 略微增加, 而当 ρ_d 为 1.40 g/cm^3 时, 则土体的 s_u 迅速增大。

不同 ρ_d 的土体具有不同的先期固结压力, 当固结压力超过土体的先期固结压力时, 土体处于正常固结状态。这表明对于正常固结土而言, 随着 ρ_d 的增加, 土体的 s_u 保持不变, 当 ρ_d 超过了土体的先期固结压力时, 土体将进入超固结状态, 并且土体强度会增强。

2.2 法向应力对不排水抗剪强度的影响

图 6 为滨海土在不同 σ'_v 固结条件下的剪切应力应变曲线。

由图 6 可知, 正常固结土在剪切过程中呈现应变硬化型, 随着法向应力的增加, 土体的 s_u 逐渐增大。

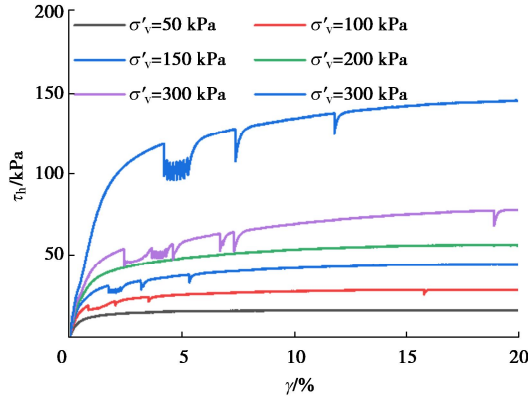


图 6 不同法向应力土体的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of soils with different σ'_v

图 7 为不同 σ'_v 固结条件下剪切土体 s_u 随 σ'_v 的变化曲线。

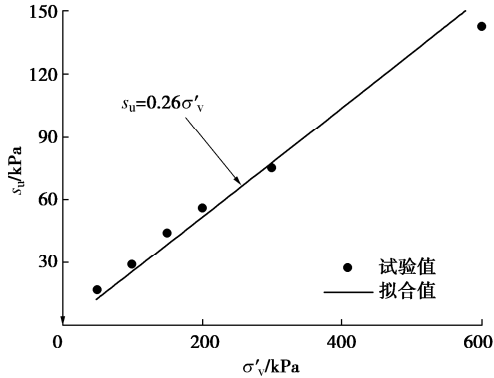


图 7 不排水抗剪强度随法向应力的变化曲线

Fig. 7 Curve of undrained shear strength changing with σ'_v

由图 7 可知, 随着 σ'_v 的增加, s_u 呈线性增加趋势。可采用下式对于不同深度土层进行预测, 得到该土层强度剖面图:

$$s_u = 0.26\sigma'_v \quad (1)$$

2.3 超固结比对不排水抗剪强度的影响

图 8 为不同 OCR 的土体在 $\sigma'_v=100$ kPa 下固结后剪切时的应力应变曲线。

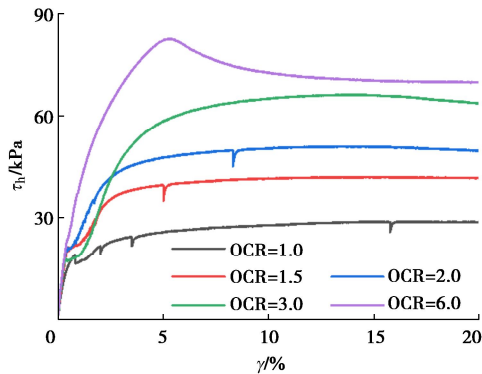


图 8 不同 OCR 土体的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of different OCR soils

由图 8 可知, 当 OCR 小于 3 时, 土体的应力应变呈应变硬化型, 而当 OCR 为 6 时, 则表现出明显的应变软化趋势。

图 9 为不同 OCR 的试样在 $\sigma'_v=100$ kPa 下完成固结后, 剪切时土体 s_u 随 OCR 的变化曲线。

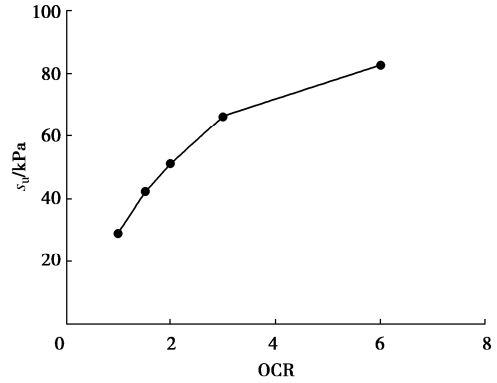


图 9 不排水抗剪强度随 OCR 的变化曲线

Fig. 9 Curve of undrained shear strength changing with OCR

由图 9 可知, 随着 OCR 的增加 s_u 近似呈幂函数增加趋势。

2.4 不排水抗剪强度的选取

对不同 OCR 土体的应力应变曲线采用先期固结压力 σ_0 进行归一化处理, 得到归一化试验土体的应力路径, 见图 10。

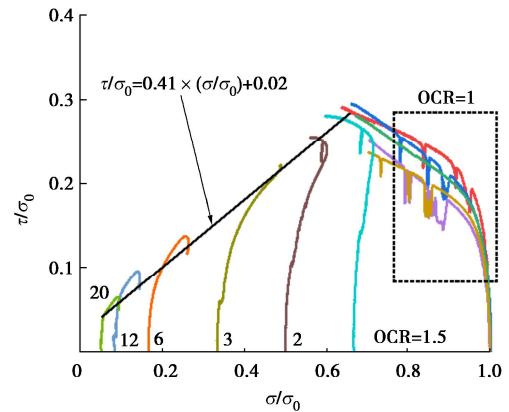


图 10 不同 OCR 土体的归一化应力路径

Fig. 10 Normalized stress paths of different OCR soils

从图 10 可以看出, DSS 试验得到的不同 OCR 土体的试验结果同等向固结三轴压缩试验结果相似, 可构成了完整的临界边界状态面, 可采用临界状态理论进行计算土体 s_u 。

(1) 方法一

当 OCR=1 时, 在不同上覆压力下固结后剪切时, 土体归一化应力路径唯一, 由图 7 可知, DSS 试验得到的滨海土体的 M 值为 0.26。随着 OCR 的增加, 土样归一化峰值强度逐渐减小, 即超固结土的归一化强度线可用下式表示:

$$\tau / \sigma_0 = 0.41(\sigma / \sigma_0) + 0.02 \quad (2)$$

(2) 方法二

已知土体的强度指标时, 可依据土体强度指标 c , φ 与 s_u 的关系计算得到:

$$s_u = c + \gamma' z \tan \varphi \quad (3)$$

(3) 方法三

当场地土质条件均匀, 应力历史情况明确, 采用 SHANSEP 方法^[5]推算不同 OCR 土体的 s_u , 来评价不同的钻孔和不同深度处场地的强度剖面, 降低钻孔取样费用和室内试验工作量^[10]:

$$(s_u / \sigma'_{v0})_{OC} = (s_u / \sigma'_{v0})_{NC} \cdot OCR^m \quad (4)$$

式中: $(s_u / \sigma'_{v0})_{NC}$ 为正常固结土的 s_u 归一化值, 由图 9 可得, $(s_u / \sigma'_{v0})_{NC} = 0.26$; m 为不同超固结比试验拟合值。

采用 SHANSEP 计算公式对实测值进行拟合, 见图 11。

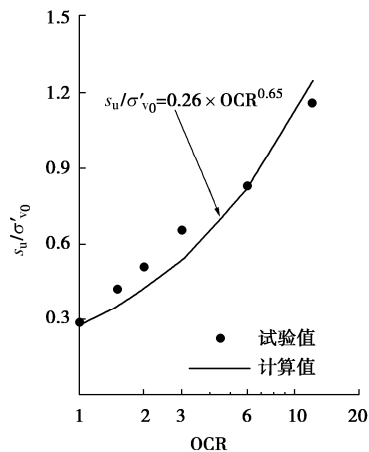


图 11 归一化剪切强度随 OCR 变化曲线

Fig. 11 Curve of normalized shear strength with OCR

由图 11 可知, 随着 OCR 的增加, 归一化土体强度呈幂函数趋势增加, 当 m 值为 0.65 时, SHANSEP 计算方法与实测值拟合较好。

3 结 论

针对海上风电筒型基础黏土中沉贯阻力计算所需土强度选取的问题, 采用饱和滨海土开展了系列 DSS 试验, 研究了初始干密度、法向压力、OCR 对 s_u 的影响, 并给出了 3 种 s_u 选取的方法, 得到 3 点结论。

(1) 当法向固结应力超过土体的先期固结压力, 干密度对 s_u 无影响; 当法向应力小于土体的先期固结

压力时, 随着干密度的增加, s_u 将呈幂函数趋势增加。

(2) 正常固结土随着法向应力的增加, s_u 呈线性增加趋势, 得到该试验土体的 $s_u = 0.26 \sigma'_v$, 随着 OCR 的 s_u 呈幂函数增加趋势。

(3) 依据地勘资料可采用基于临界状态理论、土体强度指标、SHANSEP 方法预测土体的 s_u 。不同 OCR 土体的 s_u 可以组成完整的强度破坏面, 当 OCR=1 时土体强度破坏面为定值, $M=0.26$ 。当 OCR>1 时, 土体强度破坏面可用线性关系表示。随着 OCR 的增加, s_u 呈幂函数增长趋势。采用 SHANSEP 方法能够较好预测不同 OCR 土体的 s_u , 其中滨海土的 $m=0.65$ 。

参考文献:

- [1] MENG X C, YANG X, LIANG C, et al. Research on the calculation method of penetration resistance of bucket foundation for offshore wind turbines[J]. Marine Structures, 2023, **91**: 103474.
- [2] American Petroleum Institute. PR-2GEO Geotechnical and Foundation Design Considerations[S]. 2014.
- [3] Det Norske Veritas. DNVGL-RP-E303 Geotechnical Design and Installation of Suction Anchors in Clay[S]. 2017.
- [4] International Organization for Standardization. ISO/DIS 19901-4 Geotechnical Design Considerations[S]. 2022.
- [5] LADD C C. Stability evaluation during staged construction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(4): 540-615.
- [6] 李作勤. 扭转三轴试验综述[J]. 岩土力学, 1994, **15**(1): 80-93. (LI Zuoqin. Summary of torsional triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, **15**(1): 80-93. (in Chinese))
- [7] HANZAWA H, NUTT N, LUNNE T, et al. A comparative study between the NGI direct simple shear apparatus and the mikasa direct shear apparatus[J]. Soils and Foundations, 2007, **47**(1): 47-58.
- [8] HOULSBY G T, BYRNE B W. Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials[J]. Geotechnical Engineering, 2005, **158**(2): 75-82.
- [9] MAYNE P W. Piezocone profiling of clays for maritime site investigations[C]//Proceedings of the Proceedings of the 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Gdansk, 2008.
- [10] MAYNE P W. Stress anisotropy effects on clay strength[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 356-366.

(编校: 胡海霞)