

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.005

基于 CPTU 的地质参数分析及其在海上风电场的应用

汪明元, 王宽君, 周力沛, 狄圣杰, 徐彬

(中国电力建设集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014)

摘要: [目的]海上工程勘察中钻孔取样的扰动较大,易造成室内土工试验的可靠性不足。孔压静力触探(CPTU)在海上原位测试中具有独特的优势,在国际国内获得了广泛应用。[方法]为此,分析了国内外基于CPTU测试结果的地层划分和土体参数的分析方法,并对土体参数分析公式的适用性进行了评价。在此基础上,将国际上普遍采用的分析方法应用于我国海上风电场工程。[结果]结果表明:国外的经验参数可能高估土体的某些参数,需结合我国海域地层的区域性特征进行进一步研究。[结论]针对江苏、浙江和福建海域等区域性土,通过模型试验和多种手段原位测试的对比,对经验公式进行验证或改进,并对经验参数进行标定是可行的,可为我国海上风电场工程应用提供指导。

关键词: 海上风电场; CPTU; 有效摩擦角; 不排水抗剪强度

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0037-10

Analysis of Geological Parameters Based on CPTU and Its Application in Offshore Wind Farm

WANG Mingyuan, WANG Kuanjun, ZHOU Lipai, DI Shengjie, XU Bin

(PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

Abstract: [Introduction] In the geotechnical investigation of offshore projects, the drilling disturbance of the soil sample may be very large, which may lead to the unreliability of laboratory tests. As one of the most important method of in-situ tests offshore, piezocone penetration (CPTU) test has been more and more used in China and abroad. [Method] Therefore, the strata classification and soil parameters analysis methods based on CPTU are summarized and analyzed. On this basis, the analysis methods are applied to offshore wind farm in China, and the applicability of current soil parameters interpretation methods are further evaluated. [Result] The results show that the experience parameters which adopted in abroad may overestimate the soil parameters. It is recommended to calibrate the experience parameters of interpretation formulae in combination with the characteristic of offshore strata in China. [Conclusion] Based on the experiment test and in-situ test data of regional soil in seabed of Jiangsu, Zhejiang and Fujian, we demonstrate that it is workable to improve and calibrate the parameter of empirical formula. This work can provide some guidances for further study on offshore wind farm design.

Key words: offshore wind farm; CPTU; effective friction angle; undrained shear strength

海上风电场作为近年国家发展的重点,目前江苏、浙江、福建、广东、山东海域呈现大规模推进的形势。海洋环境下钻孔取样的扰动较大,室内试验获得的岩土参数可靠性不足。因此,海上工程地质勘察需采用对土体无扰动或轻微扰动的原位测试技术,而

孔压静力触探试验(CPTU)因其适用于深水、能获得连续的曲线、精确性和可重复性良好等优点在海上工程勘察中得到广泛应用,在欧洲海上风电场工程中积累了较多的经验。据统计约95%的海洋土原位测试采用了CPT/CPTU(Lunne, 2001)^[1]。

海洋静力触探分为海床式(Seabed CPT)、井下式(将探头从钻孔底部压入土中),也可分为固定平台和漂浮平台式。海床式静力触探(图1a)采用勘查船将静探仪沉至海床,依靠自身重力作反力贯

入地层中,适用于深水,但贯入深度受到一定制约。井下静力触探系统(图1b)将钻探和CPT测试相结合,探头从钻孔底部贯入地层中,可在动态定位的大型综合勘探船上实施,也可在海上固定平台上实施,其贯入深度较少受限。海上固定式平台一般采用自升式平台,也可采用简易支架平台,其适用水深受到较大限制。

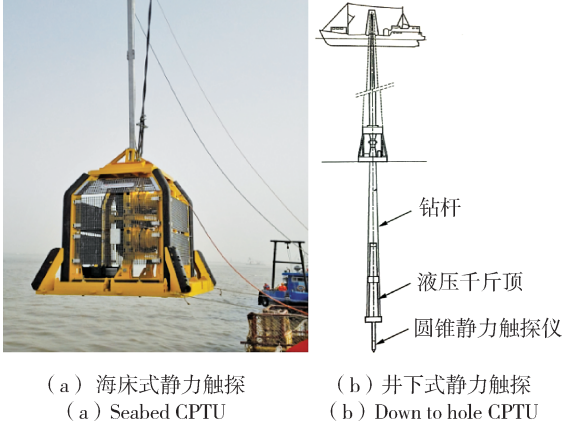


图1 海上CPTU设备

Fig. 1 Piezocone penetration testing device

CPTU测试成果广泛用于海底地层划分、地层状态判别、土体参数分析、地基承载力估算和海底地质灾害评估。通过孔隙水压力对锥尖阻力进行修正,结合锥身侧阻力对地层进行划分并判断黏性土的稠度状态和无黏性土的密实状态,通过经验公式分析土体的重度、侧压力系数、渗透系数,原位状态下的压缩模量、杨氏模量和小应变剪切模量,黏性土的超固结比、不排水抗剪强度、固结系数,无黏性土的相对密实度和有效内摩擦角等参数。

1 CPTU测试的基本原理

CPTU探头在饱和土中贯入时,可测得土中的孔压,包括锥面(u_1)、锥肩(u_2)及摩擦筒尾部(u_3)的孔压(图2)。既可测得贯入引起的超孔压,也可测得其随时间的消散过程。

采用锥肩的孔压 u_2 对实测锥尖阻力 q_c 进行修正,见下式(Lunne等,1997^[2])。

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (1)$$

$$a = A_a/A_c \quad (2)$$

式中: q_t 为修正后的锥尖阻力(kPa); q_c 为实测的锥尖阻力(kPa); u_2 为锥肩的孔隙水压力(图2,kPa); a 为有效面积比,大部分探头为0.55~0.9,

常为0.8; A_a 为顶柱的横截面积(图3, cm^2); A_c 为锥底的横截面积(图3, cm^2)。

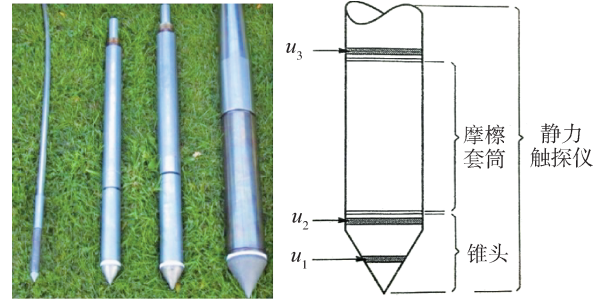


图2 CPTU探头及孔压传感器布置

Fig. 2 Cone and pore pressure transducer of CPTU

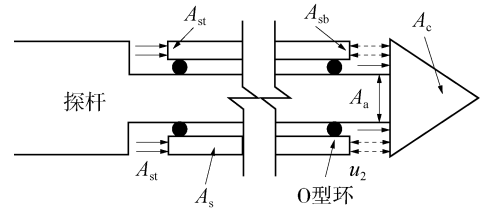


图3 孔压效应示意图

Fig. 3 Pore water pressure effects on measured parameters

也可采用锥尖的孔压 u_1 ,根据经验公式计算 u_2 (Sandven,1990^[3]),见下式:

$$u_2 - u_0 = K(u_1 - u_0) \quad (3)$$

式中: u_1 为锥面的孔压(kPa); u_2 为锥尖的孔压(kPa); u_0 为静水压(kPa); K 为经验系数。

可采用下式对侧壁摩擦力进行修正(图3):

$$f_t = f_s + \frac{(u_3 A_{st} - u_2 A_{sb})}{A_s} \quad (4)$$

式中: f_t 为修正后的侧壁摩擦力(kPa); u_3 为套筒尾部位置的孔隙水压力(kPa); A_{st} 为套筒顶部的横截面积(cm^2); A_{sb} 为套筒底部的横截面积(cm^2); A_s 为侧壁摩擦筒表面积(cm^2)。

一般情况下 $A_{st} = A_{sb}$ 时, f_t 基本与 f_s 相等。

采用下列公式计算摩擦比 R_f 和孔压参数比 B_q :

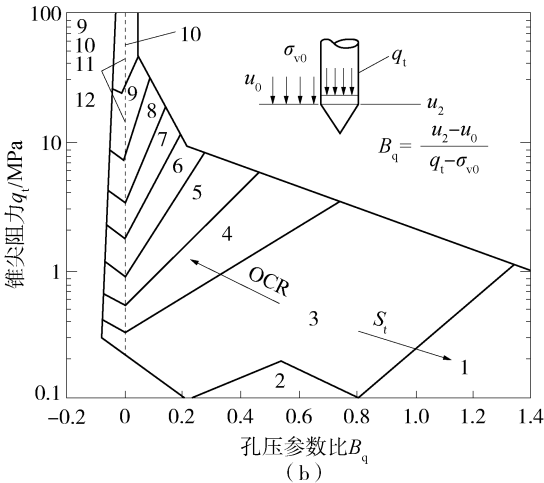
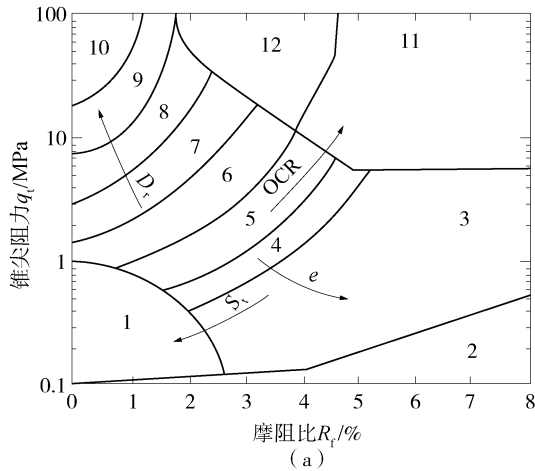
$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100\% \text{ 或 } R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100\% \quad (5)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (6)$$

式中: σ_{v0} 为土的竖向总应力(kPa); u_0 为静水压(kPa); Δu 为超孔压(kPa)。

2 基于 CPTU 的地层划分

在不同土类中贯入的锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 、锥肩孔隙水压力 u_2 的响应不同, 可据此对地层进行辨别与划分。Robertson 等(1986)^[4] 根据 Douglas 与 Olsen(1981)^[5] 的土质分类, 提出了土的分类图(图 4a), 并提出了以 q_t 与 B_q 的分类图(图 4b), 但图 4 对深度大于 30m 的土层分类可能产生偏差。



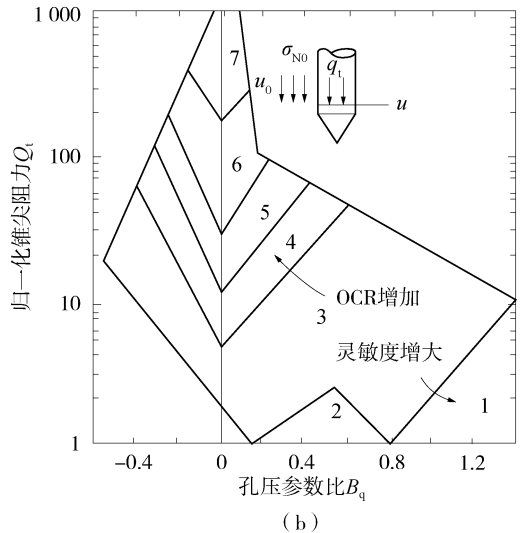
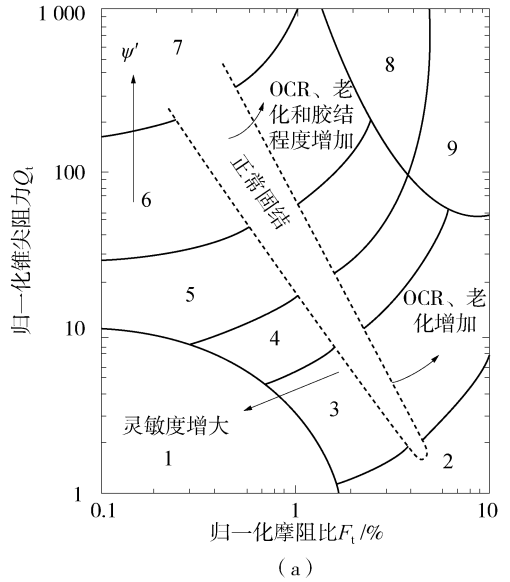
注: 1. 灵敏细粒土; 2. 有机质土、泥炭; 3. 黏土; 4. 粉质黏土-黏土; 5. 黏质粉土-粉质黏土; 6. 砂质粉土-黏质粉土; 7. 粉质砂土-砂质粉土; 8. 砂土-粉质砂土; 9. 砂土; 10. 砾砂-砂土; 11. 非常坚硬的细粒土(超固结或结构性土类); 12. 砂土-黏质砂土(超固结或结构性土类)。

图 4 基于 CPTU 的土分类图 (Robertson 等, 1986)

Fig. 4 Soil behavior type classification system from CPTU data (after Robertson et al., 1986)

Robertson(1990)^[6] 进一步对锥尖阻力 q_t 与摩阻比 R_f 进行了修正, 考虑了上覆压力的影响, 采

用归一化锥尖阻力 Q_t 、归一化摩阻比 F_t 、孔压参数比 B_q 对土进行分类(图 5)。



注: 1. 灵敏细粒土; 2. 有机质土、泥炭; 3. 黏土-粉质黏土; 4. 粉质土黏土混合-粉质黏土; 5. 砂混合: 粉质砂-砂质土; 6. 砂土-粉质砂土; 7. 砾质砂-砂; 8. 极硬砂-黏质砂; 9. 极硬细砂。

图 5 归一化土质分类图 (Robertson, 1990)

Fig. 5 Soil behavior type classification chart based on normalized CPTU data (Robertson, 1990)

Q_t 与 F_t 的计算如下:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (7)$$

$$F_t = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (8)$$

式中: σ'_{v0} 为土的有效自重应力。

Jefferies 与 Davies(1993)^[7]对 Robertson 提出的归一化土质分类图(图5)合并为同心圆形式,并采用土行为分类指数 I_c 对土质分类(表1), I_c 的表达式如下:

$$I_c = \sqrt{\{3 - \lg[Q_t(1 - B_q)]\}^2 + (1.5 + 1.3 \lg F_t)^2} \quad (9)$$

表1 基于土行为分类指数 I_c 的土质分类 (Jefferies & Davies, 1993)

Tab. 1 Soil behavior type classification based on SBT parameter I_c (Jefferies & Davies, 1993)

土类	I_c 值范围
有机质黏土	$I_c > 3.22$
黏土	$2.82 < I_c < 3.22$
粉质混合土	$2.54 < I_c < 2.82$
砂质混合土	$1.90 < I_c < 2.54$
砂土	$1.25 < I_c < 1.90$
砾砂	$I_c < 1.25$

Robertson(2009)^[8]进一步修正了土行为分类指数 I_c , 同时 Mayne(2014)^[9]在 Robertson(2009)的基础上细化了土的分类(表2), 修正的土行为分类指数见下式:

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_t + 1.22)^2} \quad (10)$$

表2 基于修正土行为分类指数 I_c 的土质分类方法 (Robertson, 2010)

Tab. 2 Soil behavior type classification based on the modified I_c (Robertson, 2010)

划分区域	土类	I_c 值范围
1	灵敏性细粒土	N/A
2	有机质黏土	$I_c > 3.60$
3	黏土	$2.95 < I_c < 3.60$
4	粉质混合物	$2.60 < I_c < 2.95$
5	砂质混合物	$2.05 < I_c < 2.60$
6	砂土	$1.31 < I_c < 2.05$
7	密实砂土至砾砂	$I_c < 1.25$
8	非常密实的砂土至黏性砂土	N/A
9	非常坚硬的超固结黏土至粉土	N/A

表2中1、8、9区的计算方法可参照 Mayne(2014)^[9]的划分方法, 灵敏性细粒土采用式(11)判别, 密实砂性土和坚硬黏性土采用式(12)判别。当采用式(12)判定时, $1.5\% < F_t < 4.5\%$ 时为区域8, $F_t > 4.5\%$ 时为区域9。

$$Q_t < 12 \exp(-1.4 F_t) \quad (11)$$

$$Q_t > \frac{1}{0.005(F_t - 1) - 0.0003(F_t - 1)^2 - 0.002} \quad (12)$$

此外, 还有概率分类法(Zhang 与 Tumay, 2003^[10])和聚类分析法(Hegazy, 1998^[11]), 工程上应用较少。

3 基于 CPTU 的地层参数分析

3.1 土的天然重度

Robertson(2009)^[8]基于无量纲化的锥尖阻力 q_t/p_a 和摩阻比 R_f 提出了土的天然重度计算公式: $\gamma/\gamma_w = 0.27[\log R_f] + 0.36[\log(q_t/p_a)] + 1.236$ (13)

式中: p_a 为参考大气压(100kPa); γ 为土的天然重度(kN/m^3); γ_w 为水的重度(kN/m^3)。

Mayne(2001)^[12]提出土的天然重度与剪切波速、深度的经验公式:

$$\gamma = 8.63 \lg V_s - 1.18 \lg z - 0.53 \quad (14)$$

式中: V_s 为剪切波速(m/s); z 为深度(m)。

3.2 砂性土的有效内摩擦角

砂性土的有效内摩擦角主要通过经验或半经验相关关系法(标定罐试验)分析, 建立相对密度与峰值摩擦角的关系。Schmertanan(1978)^[13]提出了有效内摩擦角 ϕ' 与相对密度 D_r 的区间图, 如图6所示。

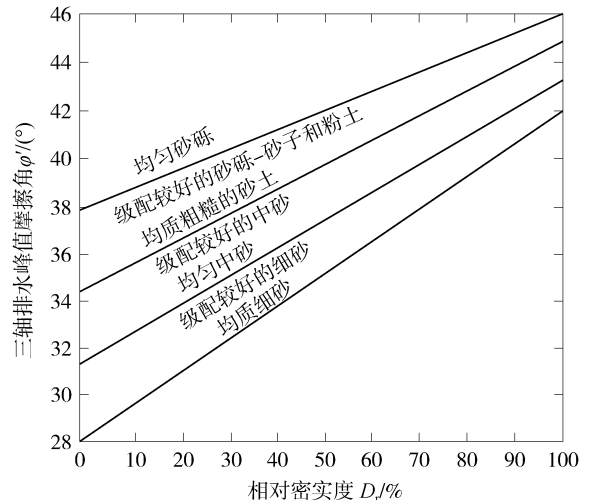


图6 相对密度与有效内摩擦角的关系 (Schmertanan, 1978)

Fig. 6 Relationship between ϕ' and D_r (Schmertanan, 1978)

Baldi 等(1986)^[14] 根据 Ticino 砂土标定罐试验, 建议采用下式分析相对密实度 D_r :

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \frac{q_c}{C_0 (\sigma')^{C_1}} \quad (15)$$

式中: C_0 、 C_1 和 C_2 为土的常数; σ' 为有效应力, 可采用平均有效应力或竖向有效应力。

Jamiolkowski 等(2003)^[15] 在大量标定罐试验的基础上, 采用直剪试验得到干砂和饱和湿砂相对密实度的关系:

$$D_{r(\text{dry})} = \frac{1}{0.0296} \ln \left[\frac{q_c}{2.494} \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{100} \cdot \left(\frac{1+2K_0}{3} \right)^{0.5} \right] \quad (16)$$

$$D_{r(\text{saturated})} = \left[\frac{-1.87 + 2.32 \ln \left[\frac{1000 q_c}{(100 \sigma'_{v0})^{0.5}} \right]}{100} \right] D_{r(\text{dry})} \quad (17)$$

式中: K_0 为侧向土压力系数; $D_{r(\text{dry})}$ 为干砂的相对密实度; $D_{r(\text{saturated})}$ 为饱和湿砂的相对密实度。

Mayne(2006)^[16] 提出了直接采用修正锥尖阻力 q_t 估算有效内摩擦角的经验公式:

$$\varphi' = \arctan \left(0.1 + 0.38 \lg \frac{q_t}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (18)$$

3.3 黏性土的不排水抗剪强度

黏性土不排水抗剪强度 s_u 的计算可采用理论计算法和经验公式法。理论计算法主要有承载力理论法、孔穴扩张理论法、应力路径理论法等。经验公式法包括直接经验公式法与间接经验公式法。

直接经验公式法包括修正锥尖阻力的方法、有效锥尖阻力的方法和超静孔压法, 计算公式分别为:

$$\text{修正锥尖阻力法: } s_u = \frac{q_t - \sigma'_{v0}}{N_{kt}} \quad (19)$$

$$\text{有效锥尖阻力法: } s_u = \frac{q_t - u_2}{N_{ke}} \quad (20)$$

$$\text{超静孔压法: } s_u = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (21)$$

式中: N_{kt} 、 N_{ke} 、 $N_{\Delta u}$ 均为经验系数。

对于修正锥尖阻力的方法, 经验系数 N_{kt} 的取值具有一定的区域性, Robertson(2009)^[8] 建议 N_{kt} 取 10~18。

对于有效锥尖阻力的方法, Senneset 等(1982)^[17] 建议 $N_{ke} = 9 \pm 3$, 但一般认为 N_{ke} 取值较离散。

对于超静孔压法, 从孔穴扩张理论(Vesic,

1972^[18]; Randolph 与 Wroth, 1979^[19]; Campanella 等, 1985^[20]) 得到 $N_{\Delta u}$ 的理论值为 2~20。Lunne 等(1985)^[21] 发现 $N_{\Delta u}$ 与 B_q 有较好的相关性, 根据室内 CU 试验反推的 $N_{\Delta u}$ 范围为 4~10。

刘松玉等(2013)^[22] 对连云港海相黏性土进行了 CPTU 试验, 认为修正锥尖阻力法对 N_{kt} 的拟合效果最好。部分国外学者认为超静孔压法适用于强度较低的黏性土, 而软黏土的修正锥尖阻力会出现一定的不确定性。

间接经验公式法一般先估算黏性土的超固结比 OCR。Mayne(1991)^[23] 采用孔穴扩张理论和临界状态理论提出了计算 OCR 的半经验公式:

$$\text{OCR} = 2 \left[\frac{1}{1.95M + 1} \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'_{v0}} \right) \right]^{1.33} \quad (22)$$

式中: M 为临界状态线的斜率; σ'_{v0} 为土体的有效竖向应力。

Lunne 等(1997)^[24] 提出采用归一化锥尖阻力来估算 OCR:

$$\sigma'_{pc} / \sigma'_{v0} = \text{OCR} = k \left(\frac{q_t - \sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (23)$$

式中: σ'_{pc} 为先期固结压力。 k 一般为 0.2~0.5, 平均值为 0.3。

Mayne 等(2005)^[25] 给出了估算先期固结压力的简化公式:

$$\sigma'_{pc} = 0.33 (q_t - \sigma'_{v0})^m (\sigma_{\text{atm}} / 100)^{1-m} \quad (24)$$

$$m = \frac{0.28}{1 + (I_c / 2.65)^{25}} \quad (25)$$

式中: m 为土类参数, 随细颗粒含量增加而增大; σ_{atm} 为大气压力(kPa)。

Robertson(2009)^[8] 在 Lunne 等(1997)^[24] 的基础上提出了 OCR 的估算公式:

$$\text{OCR} = 0.25 Q_t^{1.25} \quad (26)$$

目前一般采用 Lunne 等(1997)^[24] 的 k 值法估算 OCR, 再采用 SHANSEP 法(Stress History and Normalised Soil Engineering Properties)估算不排水抗剪强度 s_u , 估算公式如下:

$$s_u / \sigma'_{v0} = a \cdot \text{OCR}^b \quad (27)$$

式中: a 为正常固结土不排水抗剪强度与有效竖向应力比值, 一般可取 0.25~0.33; b 为反映超固结比 OCR 对黏土不排水强度影响的经验参数, 一般可取 0.65~1.0。

经验系数 a 与 b 在不同区域有较大差异, 需事

先采用室内模型试验或通过未扰动样的三轴不排水试验标定。

3.4 土的小应变刚度

土的小应变剪切模量 G_0 的估算可分别采用直接法和间接法, 直接法通过 CPTU 的数据估算, 间接法则先计算土的剪切波速 V_s 。

Pincus 等(1993)^[26]认为大多数黏性土的小应变剪切模量 G_0 与孔隙比和锥尖阻力存在以下关系:

$$G_0 = 99.5 p_a^{0.305} \frac{q_t^{0.695}}{e_0^{1.130}} \quad (28)$$

Jamiolkowski 等(1988)^[27]发现土的 D_r 和原位有效应力的变化控制着 q_c 和 G_0 , 对未胶结和未老化的无黏性土, q_c 和 G_0 呈现一定的相关性。基于标定罐试验与现场测试结果, Rix 与 Stokoe (1991)^[28]提出了 $G_0 - q_c - \sigma'_{v0}$ 的关系曲线(图7), 发现归一化 $q_c/(\sigma'_{v0})^{0.5}$ 值越低时, G_0/q_c 变化范围越大, 压缩性越大的砂性土越趋向于更低的 $q_c/(\sigma'_{v0})^{0.5}$ 值, 因此 G_0/q_c 越高。

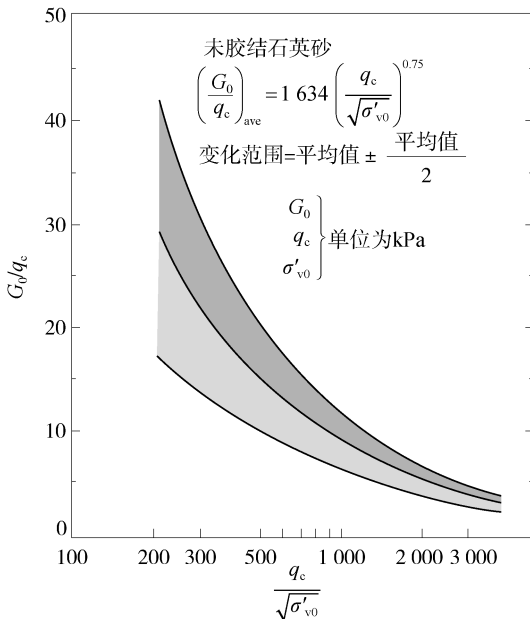


图7 $G_0 - q_c - \sigma'_{v0}$ 关系曲线(Rix & Stokoe, 1991)

Fig. 7 $G_0 - q_c - \sigma'_{v0}$ curve (Rix & Stokoe, 1991)

采用带剪切波速测试的静力触探时, 黏性土和砂性土均可下式估算小应变剪切模量 G_0 :

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (29)$$

式中: ρ 为密度。

Piratheepan(2002)^[29]分别给出了砂性土和黏性

土剪切波速 V_s 的估算公式:

$$\text{砂性土: } V_s = 25.3 q_t^{0.163} f_s^{0.023} D^{0.155} \quad (30)$$

$$\text{黏性土: } V_s = 11.9 q_t^{0.269} f_s^{0.108} D^{0.127} \quad (31)$$

式中: D 为泥面以下土体的深度(m)。

Andrus 等(2007)^[30]对 Piratheepan (2002)^[29]的公式进行了合并, 得到了可用于砂性土和黏性土的剪切波速 V_s 估算公式:

$$V_s = 2.62 q_t^{0.395} I_c^{0.912} D^{0.124} S_f \quad (32)$$

式中: S_f 为尺寸效应参数, 可取 0.92。

4 CPTU 在我国海上风电场的应用

某海上风电场位于海岸线约 22 km 处, 基于 CPTU 测试的数据计算修正锥尖阻力 q_t 与摩阻比 R_f , 得到不同孔位不同深度的土质分类情况如图 8 所示, 其土类分层及描述如表 3 所示。图 8 基于 ISO 标准划分, 而基于我国标准的分类图是今后研究的重点。

基于 CPTU 对土体的物理力学参数进行分析, 并与室内土工试验的结果对比, 结合工程经验提出不同深度的土质参数取值, 如表 4 所示。

根据 CPTU 测试的数据对不同深度土体的浮重度进行计算, 如图 9 所示, 可见对浅部松散的无黏性土层, 基于 CPTU 数据的计算值小于室内试验值, 而对深部密实的无黏性土层, 基于 CPTU 数据的计算值大于室内试验值, 反映了松砂取样振密而密砂取样振松的普遍规律。

对于黏性土的不排水抗剪强度, 也可采用间接法对 CPTU 数据进行分析。采用经验参数估算的先期固结压力如图 10 所示。可见, 估算的先期固结压力数据点较为离散, 如根据建议的经验参数取值, 可能会高估先期固结压力 σ'_{pc} , 以此计算的不排水抗剪强度可能偏高, 因此间接法的经验公式和经验参数取值, 也需结合各海域地层的实际情况进行标定和论证。

基于 CPTU 数据分析的有效内摩擦角和不排水抗剪强度, 与室内试验结果的对比如图 10 所示。对无黏性土, 如图 11a 所示, 基于 CPTU 分析的有效摩擦角与慢剪试验结果基本一致, 采用 CPTU 的经验分析法是可行的。而对于黏性土, 如图 11b 所示, 采用修正锥尖阻力 N_{kt} 法得到的结果普遍比室内不固结不排水试验(UU)结果大, 但小于室内固结快剪强度指标计算的强度值。因钻探取样卸除了

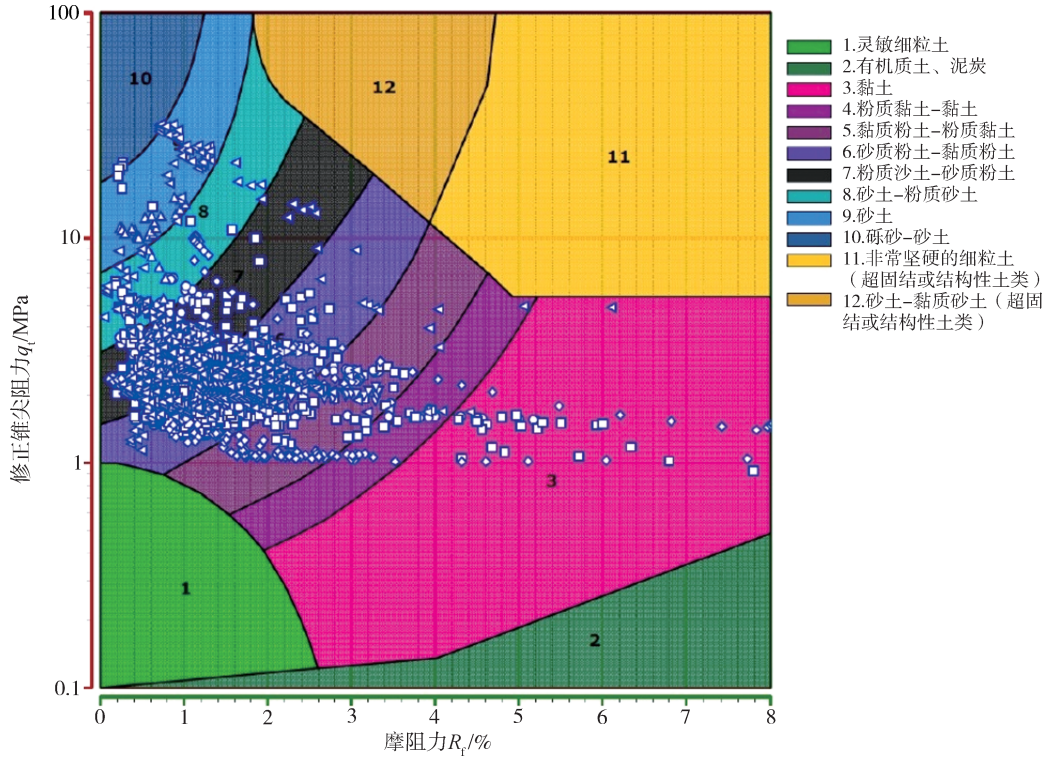


图 8 某海上风电场基于 CPTU 的土质分类

Fig. 8 Soils classification of a offshore wind farm based on CPTU

表 3 某海上风电场土类分层及描述

Tab. 3 Overview of typical soil units and geotechnical characterization

土层	深度(海床以下)	土类	描述
顶部软土层	3 ~ 9 m	有机质黏土	非常软的黏土层, 有机质含量 5% ~ 10%
顶部混合土层	10 ~ 36 m	粉质黏土 粉质黏土混粉砂 黏质粉土 砂质粉土 粉土 粉细砂	含有黏性土与粉性土、砂性土沉积, 沉积物之间存在较多夹层和夹薄层现象, 土强度随着深度增加而增加
粉、黏性土层	37 ~ 48 m	淤泥质粉质黏土 粉质黏土 粉质黏土混粉砂 黏质粉土 粉土 砂质粉土	含有黏性土与粉性土沉积, 沉积物之间存在较多夹层和夹薄层现象, 偶尔存在一定的砂土层
底部软土层	48 ~ 56 m	淤泥质粉质黏土	强度与密度较低的粉质黏土
底部混合土层	56 ~ 77 m	粉质黏土 粉质黏土混粉砂 粉土 细砂 砂质粉土	粉土与黏土过渡层, 随着深度增加粉粒含量增加, 逐渐从黏土过渡至粉土, 粉质黏土较为多见, 常见于砂土层下

原位有效应力,造成试样扰动,使试样进行室内三轴不固结不排水试验获得的不排水抗剪强度偏低,我国某些地基基础设计规范建议对试样进行预固结后再进行室内试验,预固结压力可选择有效自重应力或先期固结压力的一定比例。另一方面,基于CPTU数据估算黏性土的不排水抗剪强度,其经验系数不宜盲目套用国外的经验系数,否则可能高估黏性土的不排水抗剪强度,而应针对本地区的海相黏性土进行专门的标定。在室内采用模型试验,对不同含水率和不同不排水强度的黏性土进行CPTU测试,根据经验公式计算的不排水强度,与十字板、T形贯入仪或球形贯入仪测得的不排水强度进行对比,估算经验参数的范围,是可行的研究方法。

表4 某海上风电场某孔位的土质参数
Tab. 4 Soils parameters of a offshore wind farm

序号	层名	层底埋深 Z/ m	有效重度 γ' / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	有效内摩 擦角 φ' / ($^\circ$)	不排水强度 s_u / kPa
1	粉质粘土	4.7	7.0	—	12
2	粉土夹粉质粘土	5.7	7.4	27	17
3	粉土夹粉砂	6.7	8.3	28	35
4	粉质粘土夹粉土	9.1	8.0	—	30
5	粉砂	17.0	9.2	31	—
6	粉砂	19.6	9.3	32	—
7	粉质粘土	23.2	7.9	—	30
8	粉砂夹粉土	24.5	9.0	31	—
9	粉细砂	25.7	10.0	36	—
10	粉质粘土夹粉土	33.5	8.3	—	40~45
11	粉质粘土夹粉砂	37.8	8.4	—	45~50
12	粉质粘土	49.3	8.3	—	50~55
13	粉质粘土夹粉土	54.3	8.5	—	65
14	粉砂夹粉土	56.2	9.2	34	—
15	粉质粘土夹粉土	59.0	8.8	—	70
16	粉细砂	63.9	10.0	35	—
17	粉质粘土夹粉土	68.6	9.4	—	105
18	粉砂	70.1	9.8	34	—
19	粉质粘土夹粉土	75.0	9.3	—	95

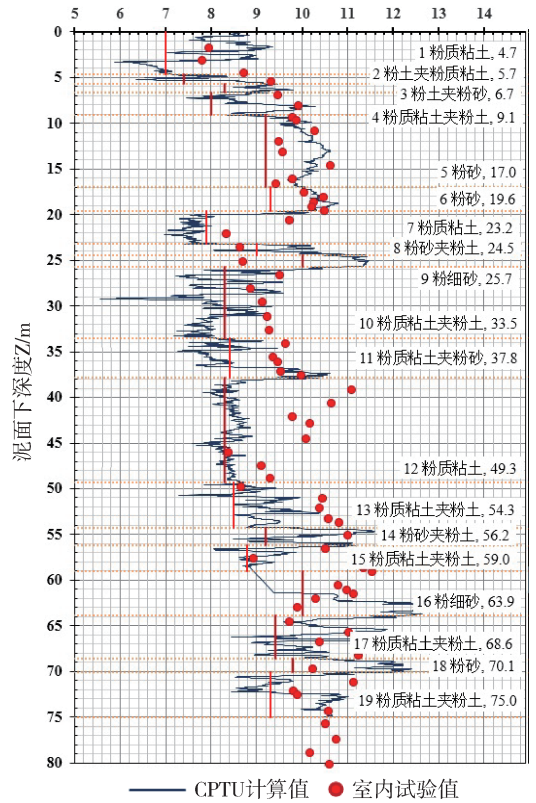


图9 土体浮容重(基于CPTU的计算值与室内试验值)
Fig. 9 Soil unit weight from CPTU data and laboratory test

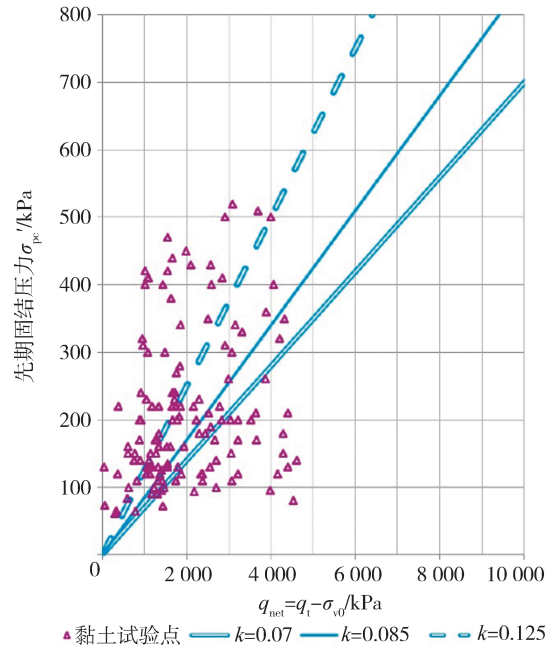


图10 根据CPTU数据估算的先期固结压力

Fig. 10 Preconsolidation pressure based on CPTU data

5 结论

海洋工程勘察中CPTU原位测试技术具有独特

的优点,已在我国东部、南部、北部海上风电场勘察中得到成功的应用。

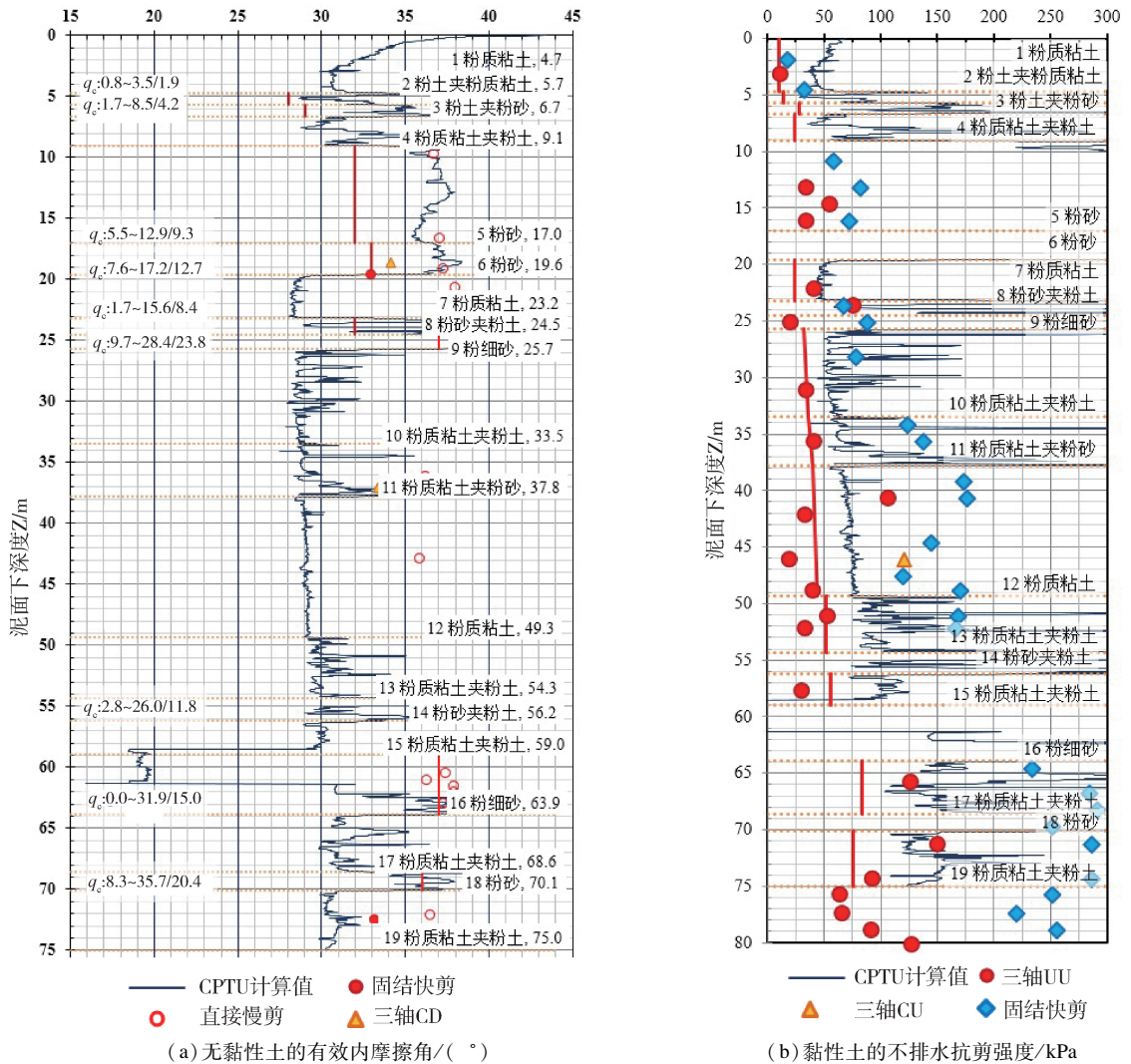


图 11 基于 CPTU 数据估算的有效内摩擦角和不排水抗剪强度与室内试验的对比

Fig. 11 Comparison of effective internal friction angle and undrained shear strength from CPTU data and laboratory test

国际上基于 CPTU 进行地层划分, 判断无黏性土的密实状态和黏性土的稠度状态, 估算土层的有效重度, 分析无黏性土的有效摩擦角和黏性土的不排水抗剪强度等, 均已有较为成熟的方法和经验。但由于各海域土层的区域性特征, 不宜盲目套用国外的经验公式及其参数。

结合我国各海域的区域性地层特征, 针对江苏海域典型的粉土、粉砂, 浙江海域典型的软黏土, 福建海域典型的花岗岩残积土等区域性土, 通过模型试验和多种手段原位测试的对比, 对经验公式进行验证或改进, 并对经验参数进行标定是切实可行的。同时, 基于我国标准的土分类图也需进一步研究。

参考文献:

- [1] LUNNE T. In situ testing in offshore geotechnical investigations [C]//Anon. Proc. Int. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia. [S. l. : s. n.], 2001 : 61-81.
- [2] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J. Cone penetration testing in geotechnical practice [M]. London: E & FN Spon Routledge, 1997.
- [3] SANDVEN R. Strength and deformation properties of fine grained soils obtained from piezocone tests [D]. Ph. D. thesis, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Department of Civil Engineering, Doktor ingenioravhandling, Norway, 1990.
- [4] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G, GILLESPIE D, et al. Use of piezometer cone data [C]//ASCE. In Situ '86, A Specialty Conference: Use of in Situ Tests in Geotechnical Engi-

- neering, ASCE. 1986. USA; ASCE, 1986: 1263-1280.
- [5] DOUGLAS B J, OLSEN R S. Soil classification using electric con penetrometer [C]//ASCE. Proceedings of the ASCE National Convention, St. Louis: ASCE, 1981: 209-227.
- [6] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 984-986.
- [7] JEFFERIES M G, DAVIES M P. Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60 [J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 1993, 16(4): 458-468.
- [8] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests-a unified approach [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(46): 1337-1355.
- [9] MAYNE P W. Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests [C]//CPT14. 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, USA, 2014: 47-73.
- [10] ZHANG Z, TUMAY M T. Non-traditional approaches to soil classification derived from the cone penetration test [J]. Probabilistic Site Characterization at the National Geotechnical Experimentation Sites, 2003(121): 100-149.
- [11] HEGAZY Y A. Delineating geostratigraphy by cluster analysis of piezocone data [D]. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology, 1990.
- [12] MAYNE P. W. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests [C]// Proceedings International Conference on In-situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, 2001: 27-48.
- [13] SCHMERTMANN J H. Guidelines for cone penetration test (Performance and design): FHWATS-78-209 [S]. Washington D. C; Federal Highway Administration. 1978.
- [14] BALDI G, BELLOTTI R, GHIONNA V, et al. Interpretation of CPT's and CPTU's-part II: Drained penetration in sand [C]// Nanyang Technical Institute. In Proceedings of the Fourth International Geotechnical Seminar, Singapore, 1986: 143-156.
- [15] JAMIOLKOWSKI M, PRESTI D C F L, MANASSERO M. Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT [J]. In Soil Behaviour and Soft Ground Construction, ASCE Geotechnical Special Publication, 2003(119), 201-238.
- [16] MAYNE P W. Undisturbed sand strength from seismic cone tests [J]. Geomechanics and Geoengineering, 2006, 1(4): 239-247.
- [17] SENNESET K, JANBU N, SVANO G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests [C]// Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ES-POT-II. Rotterdam; Balkema Publishers, 1982: 863-870.
- [18] VESIC A S, Expansion of cavities in infinite soil mass [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98(3): 265-290.
- [19] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analytical solution for the consolidation around a driven pile [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1979, 3(3): 217-229.
- [20] CAMPANELLA R G, ROBERTSON P K, GILLESPIE D, et al. Recent developments in in-situ testing of soils [C]// Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1985, Rotterdam; Balkema Publishers, 1985: 949-854.
- [21] LUNNE T, CHRISTOPHERSEN H P, TJELTA T I. Engineering use of piezocone data in North Sea clays [C]// Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1985, Rotterdam; Balkema Publishers, 1985: 907-912.
- [22] 刘松玉, 蔡国军, 童立元. 现代多功能 CPTU 技术理论与工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [23] MAYNE P W. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests [C]// Proceedings International Conference on In-situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, 2001: 27-48.
- [24] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J. Cone penetration testing in geotechnical practice [M]. London; E & FN Spon Routledge, 1997.
- [25] MAYNE P W. Integrated ground behavior: In-situ and lab tests [M]. London: Taylor & Francis, 2005.
- [26] PINCUS H J, MAYNE P W, RIX G J. Gmax-qc relationships for clays [J]. Geotech Testing Journal, 1993, 16(1): 55-60.
- [27] JAMIOLKOWSKI M, GHIONNA V N, LANCELLOTTA R. New correlations of penetration tests for design practice [C]// Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISPT-1, Orlando, 1988. Rotterdam; Balkema Publishers, 1988: 263-296.
- [28] RIX G J, STOKOE K H. Correlation of initial tangent modulus and cone resistance [C]// Proceeding of the International Symposium on Calibration Chamber Testing, Potsdam, New York, 1992. New York; Elsevier, 1992: 351-361.
- [29] PIRATHEEPAN P. Estimating shear-wave velocity from SPT and CPT data. M. S. Thesis [D]. Clemson, South Carolina, USA; Clemson University, 2002.
- [30] ANDRUS R D, MONHANAN N P, PIRATHEEPAN P, et al. Predicting shear-wave velocity from cone penetration resistance [C]//Earthquake Geotechnical Engineering, 4th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, June 25-28, 2007. Netherlands; Springer, 2007: 1-12.

作者简介:



WANG M Y

汪明元(通信作者)

1972-, 男, 四川成都人, 教授级高级工程师, 工学博士, 中国电建集团华东勘测设计研究院一级专家, 华东海上风电省级工程技术研究中心副主任, 中国地质学会工程地质专委会海洋工作委员会副主任, 主持了数十个海上风电场的勘察和工程地质特性研究, 主编和参编相关规范 7 部 (e-mail) wmy_90@163.com。