

· 地基与基础 ·



基于海床式静力触探的长江口 近岸水域黏性土强度解译

秦 皎

(上海山南勘测设计有限公司, 上海 201206)

摘要: 长江口近岸水域普遍分布较厚的软弱黏性土层, 其工程特性对重大工程的建设产生直接影响。孔压静力触探试验(piezcone penetration test, CPTU)为有效的原位测试手段, 通过解译测试数据, 可实现土类判别、土层划分、土体参数获取等目的。由于土体具有变异性、区域性等特点, 建立工程场区 CPTU 指标与土性的关系公式是非常必要的。依托长江口近岸水域某整治工程, 开展了海床式静力触探试验以及室内土工试验, 建立了经优化修正的锥尖阻力 q_{t1} 与土体重力密度 γ 的关系公式; 采用室内固剪快剪、直剪快剪、三轴 UU 指标, 标定得到了适用于长江口黏性土的 CPTU 圆锥经验系数 N_{kt} 的范围值与总平均值。在缺少场地标定结果及土工试验成果时, 采用场区标定得到的 N_{kt} 、 q_{t1} 与 γ 的关系公式, 可以较好地解译场区黏性土的不排水抗剪强度, 并为长江口沿海水域物理性质相近的黏性土提供一定的解译依据。

关键词: 海床式静力触探; 孔压静力触探 (CPTU); 圆锥经验系数; 不排水抗剪强度

中图分类号: U65; TU46

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0195-08

Interpretation parameter of clayey soil strength in nearshore waters of the Yangtze River Estuary based on seabed mode cone penetration test

QIN Jiao

(Shanghai Shannan Investigation & Design Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: The soft and thick clayey soil layers are commonly distributed in the nearshore waters of the Yangtze River Estuary, and their engineering characteristics have a direct impact on the construction of major projects. Piezocone penetration test (CPTU) is an effective in-situ testing method. By interpreting the test data, it can achieve the purpose of soil classification, soil layer division, and obtaining soil parameters. Due to the variability and regional characteristics of soil, it is necessary to establish a formula for the relationship between CPTU index and soil properties in an engineering site. Based on a regulation project in the nearshore waters of the Yangtze River Estuary, this paper carries out seabed mode cone penetration test and laboratory soil test, and establishes a formula for the relationship between modified cone resistance q_{t1} and soil gravity density γ . The range value and total average value of calibrated CPTU cone factor N_{kt} for clayey soil in the Yangtze River Estuary are calibrated based on consolidated quick direct shear, quick direct shear and unconsolidated-undrained triaxial tests. When there is a lack of site calibration results and geotechnical test results, using cone factor N_{kt} and the formula for the relationship between q_{t1} and γ can effectively solve the undrained shear strength of clayey soil in the engineering site, and provide a certain interpretation basis for clayey soil with similar physical properties in the coastal area of the Yangtze River Estuary.

Keywords: seabed mode cone penetration test; piezocone penetration test (CPTU); cone factor; undrained shear strength

收稿日期: 2025-01-20

作者简介: 秦皎(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 研究方向为岩土工程勘察及原位测试技术。

随着“一带一路”建设、长江三角洲区域一体化发展、长江经济带高质量发展等国家重大战略的推进,长江口作为长江的“咽喉”,成为了长江经济带发展的龙头,在区域总体发展布局和规划中具有极为重要的战略地位。由于长江口所处的位置特殊,场地普遍分布较厚的软弱黏性土层,具有强度低、压缩性高、灵敏度高特性,对工程建设产生不利影响,尤其是近岸水域,若处理不当甚至可能造成巨大的财产损失及人员伤亡。因此,查明长江口水域软土的分布及物理力学性质,合理确定岩土工程参数,尤其是黏性土的不排水抗剪强度,是保证工程建设质量安全、缩短工期、降低造价、提高经济效益和社会效益的关键。

孔压静力触探试验(piezcone penetration test, CPTU)是一种测试参数多、功能齐全、参数准确、精度高、稳定性好的原位测试技术,既可准确划分土层、进行土类判别,又可求取土原位渗透系数、压缩系数、固结系数等^[1-2],还可弥补室内土工试验的不足,在陆域被广泛应用,但受工况、成本等限制,在水上使用较少。借助海床式静探平台,CPTU已逐步在填海造岛、江海通道、海上风电等水上工程勘察中成功使用,取得了较好的应用效果。

黏性土的不排水抗剪强度 S_u 作为分析土体强度特性及评价地基稳定性的重要指标,虽无法利用CPTU直接测量,但可通过解译测试数据获取,而解译方法包括理论方法与经验公式法。由于CPTU探头贯入过程复杂,理论方法尚不成熟,因此在实际应用中常采用经验公式法,该方法主要利用锥尖阻力、有效锥尖阻力、超孔隙水压力等指标估算 S_u 。刘松玉等^[3]、童立元等^[4]研究认为采用修正锥尖阻力法估算 S_u 的效果最好。

土具有很强的地域性与时域性^[5],各地土体的工程特性有所不同。研究学者^[6-11]分别对江苏、浙江、广东等沿海地区的黏性土进行CPTU经验圆锥系数 N_{kt} 的标定,结果表明各地区的 N_{kt} 标定值存在较大差异,若直接套用经验公式解译黏性

土强度会带来较大偏差,难以真实、准确地反映当地黏性土强度,可能导致土体参数评价不合理,带来工程事故风险。因此,本文针对长江口近岸水域某整治工程,开展海床式静力触探试验和室内土工试验,建立了锥尖阻力与土体重力密度的关系公式,以期降低对水上取土进行室内土工试验的依赖,并提出合适的长江口水域黏性土强度解译参数范围,旨在为我国长江口沿海近岸水域的工程建设提供依据和技术支撑。

1 工程条件

1.1 工程场地位置

工程场地位于长江口的横沙浅滩,即长江口北槽深水航道N23潜堤以东至外侧约-6.0~-5.0 m等高线一带的滩涂,其南侧为长江口北槽深水航道,北侧为长江口北港下段,西靠横沙岛横沙东滩,面临东海,水域开阔。横沙浅滩总面积约300 km²,东西向长度约26 km,南北向宽度约8~13 km,场地中心点距岸线约40 km,最低高程约-12.6 m,最高处高程0.9 m,整个滩面平均高程约-3.7 m,局部滩地低潮期间出露。工程场地位置见图1。

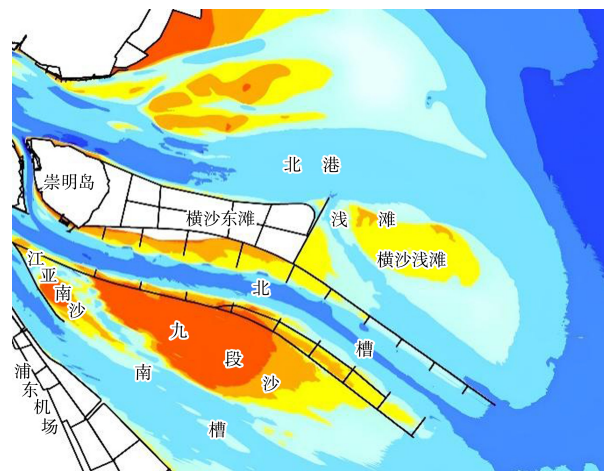


图1 工程场地位置

Fig. 1 Location of the engineering site

1.2 工程地质条件

根据勘察资料表明,在40.0 m深度范围内的地基土属第四纪全新世 Q_4^3 ~晚更新世 Q_3^2 的沉积层,主要由淤泥质土、黏性土、粉性土、砂性土等组成。根据地基土的成因、时代、结构特征及

物理力学性质指标等综合分析,工程区域地基土划分为 5 个主要土层及若干亚层,具体见表 1。

表 1 长江口某近岸场地工程地质条件
Tab. 1 Geological conditions of a nearshore site
in the Yangtze River Estuary

层序	土层名称	层顶埋深/m	层厚/m	状态/密实度
② _{3.1}	砂质粉土	0	2.0~6.0	松散~稍密
② _{3.2}	粉砂	2.0~6.0	3.2~5.9	稍密~中密
③	淤泥质粉质黏土	6.7~11.9	2.9~9.1	流塑
④	淤泥质黏土	12.0~17.6	3.1~11.0	流塑
⑤ ₁	黏土	18.5~26.0	12.1~21.0	流塑~软塑
⑤ ₂	砂质粉土	35.1~39.5	0.5~4.9(未钻穿)	稍密~中密

表 2 长江口某近岸场地黏性土物理力学指标

Tab. 2 Physical parameters of clayer soil of a nearshore site in the Yangtze River Estuary

层序	土层名称	含水量	孔隙比	重力密度 γ	塑性	液性	固结快剪强度(峰值均值)		直剪快剪强度(峰值均值)		三轴 UU(峰值均值)	
		$\omega/\%$	e	($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	指数 I_p	指数 I_L	C/kPa	$\varphi/(\circ)$	C_q/kPa	$\varphi_q/(\circ)$	C_U/kPa	$\varphi_U/(\circ)$
③	淤泥质粉质黏土	44.4	1.248	17.3	16.7	1.32	11	14.5	14	8.5	22	0.7
④	淤泥质黏土	50.1	1.413	16.7	19.1	1.35	12	11.5	14	4.0	18	0.4
⑤ ₁	黏土	41.9	1.191	17.4	19.1	0.91	17	13.0	19	5.0	26	0.4

2 测试方法综述

2.1 静力触探设备

水上静力触探按测试载体与贯入系统可分为海床式、固定式、井下式及浮动式等。海床式静力触探是将贯入设备稳定支撑于海床面上,将探头直接连续地贯入海底,其优点在于能够在空间上保证触探路径的完整性,一般利用工程船搭建操作平台,实施静力触探作业,工程船需自带满足起吊贯入系统工作能力的起重机,具有锚固或动态定位能力,适用于水深 3~300 m 的水域。

根据场地条件和测试要求,本次选用 PeneVetor-III 型海床式静力触探系统,设备质量 16 t,最大贯入力 200 kN,贯入速度为 2.0 ± 0.5 cm/s,贯入深度约 40~75 m,适水深度 100 m。该系统采用反馈控制原理,可实现变频控制和电液比例控制,确保贯入速度恒定,测点间距为 2.0 cm。

2.2 探头指标

静力触探探头采用孔压式多桥探头,锥底截面积为 15 cm^2 ,侧摩筒面积 300 cm^2 ,锥角 60° ,锥底直径 43.7 mm,孔压过滤环位于锥肩位置(u_2 位置),可测锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_2 等参数。

黏性土分类采用 JTS 133—2013《水运工程岩土勘察规范》^[13] 的分类方法,黏性土的塑性指数 I_p 大于 17 时,定名为黏土;塑性指数大于 10,且小于或等于 17 时,定名为粉质黏土。其中:塑性指数 I_p 计算时,液限以 76 g 圆锥仪入土深度 10 mm 为准。天然含水量大于或等于 36% 且液限、天然孔隙比大于或等于 1.0 的黏性土定名为淤泥类土,可进一步划分为淤泥质土、淤泥及流泥。

本场地黏性土主要为第③层淤泥质粉质黏土、④层淤泥质黏土及⑤₁ 层黏土,对土样数据进行统计分析,其物理力学指标见表 2。

2.3 测试数据处理

根据摩尔-库伦理论,黏性土的不排水抗剪强度 S_u 与土的黏聚力及内摩擦角有关,可按式计算:

$$S_u = C + \sigma_{v0} \tan \varphi \quad (1)$$

式中: S_u 为不同试验条件下黏性土的不排水抗剪强度, kPa; σ_{v0} 为土体测试处的上覆应力, kPa; C 为土的黏聚力, kPa; φ 为土的内摩擦角, $(^\circ)$ 。

根据 JTS/T 242—2020《水运工程静力触探技术规程》^[14],采用孔压静力触探触探测试时,黏性土的不排水抗剪强度可按式计算:

$$S_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{kt} \quad (2)$$

$$q_t = q_c + (1 - \alpha) u_2 \quad (3)$$

式中: q_t 为经孔压修正的锥尖阻力, kPa; N_{kt} 为圆锥经验系数; q_c 为实测锥尖阻力, kPa; u_2 为锥肩部位测试的孔隙水压力, kPa; α 为有效面积比,即圆锥头顶柱的横截面积与锥底的横截面积之比,本文试验可取 0.8。

由于圆锥经验系数 N_{kt} 为经验常数,其大小取决于土的超固结比(OCR)、灵敏度和刚度,且无法由试验直接测出,因此通常根据式(2)变换求得:

$$N_{kt} = (q_t - \sigma_{v0}) / S_u \tag{4}$$

当黏性土的不排水抗剪强度 S_u 按室内土工试验指标计算后, 可利用测试锥尖阻力, 求出圆锥经验系数 N_{kt} 。通过求取的圆锥经验系数, 实现利用孔压静力触探参数对区域内的黏性土强度进行解译。

由于土的黏聚力 C 与内摩擦角 φ 可通过直剪快剪、固结快剪、三轴不固结不排水、三轴固结不排水等试验方法换算求出, 不同的试验方法模拟了不同的土样压力条件。为了与室内不同试验方法的试验结果进行对比, 土体测试处的上覆应力 σ_{v0} 需采用不同的压力条件, 即采用直剪快剪或 UU(不固结不排水, unconsolidated-undrained) 指标时为总上覆压力; 采用固结快剪或 CU(固结不排水剪切 consolidated-undrained) 指标时为有效上覆压力。

3 黏性土强度解译

3.1 原位 CPTU 测试成果

本次共实施 8 个孔压静力触探孔(JK₁~JK₈), 基本均匀分布于整个工程场区。根据临近钻孔成果, 各孔均揭露或部分揭露淤泥质粉质黏土、淤泥

质黏土及黏土等黏性土层, 共采取原状土样 172 件, 进行室内物理力学试验, 可较好地反映场地的工程地质条件。各孔压静力触探孔位置见图 2。

各孔压静力触探孔的测点间距为 2 cm, 孔深均为 40 m, 得到锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_2 随深度 z 变化的数据, 并计算摩阻比 R_f , 绘制锥尖阻力 q_c - z 、侧壁摩阻力 f_s - z 、孔隙水压力 u_2 - z 、摩阻比 R_f - z 等静力触探曲线。典型静力触探曲线见图 3。

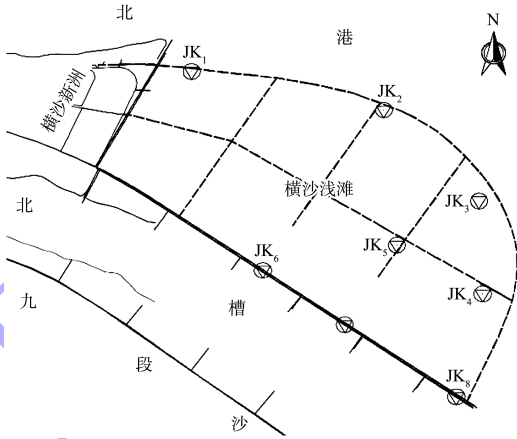


图 2 静力触探孔位置
Fig. 2 Borehole location of CPTU

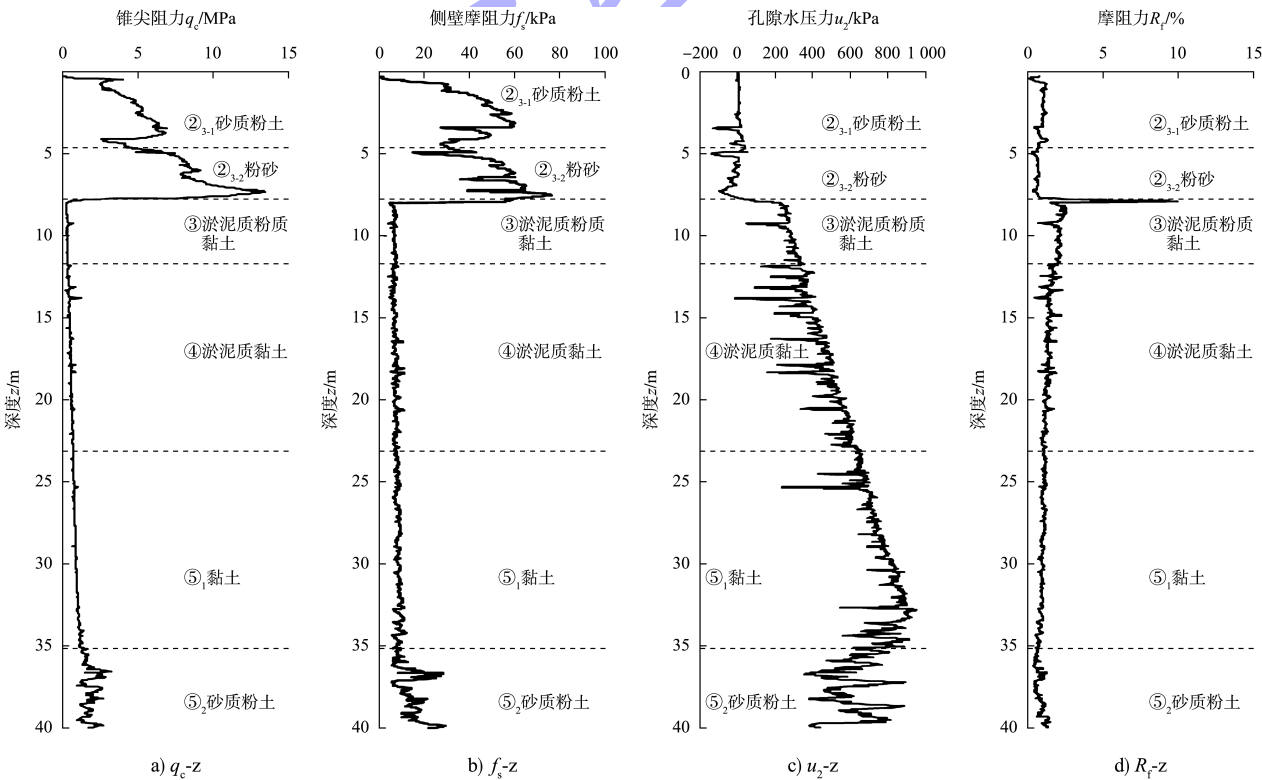


图 3 JK₄ 孔静力触探曲线
Fig. 3 CPTU curve at JK₄

3.2 上覆压力 σ_{v0} 的确定

根据式(1)、(2)，黏性土的不排水抗剪强度 S_u 与土上层上覆压力 σ_{v0} 的大小有线性关系，而上覆压力 σ_{v0} 取决于各土层的重力密度、厚度、地下水埋深等因素。土层的厚度可按钻孔编录、静力触探曲线确定；土层的重力密度一般需取土进行室内土工试验获取，当有工程经验时，也可根据原位测试参数换算确定。上覆压力 σ_{v0} 计算公式为：

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \quad (5)$$

式中： γ_i 为第 i 层土的平均天然重力密度， kN/m^3 ； h_i 为第 i 层土的厚度， m 。

根据 JTS/T 242—2020《水运工程静力触探技术规程》^[14] 可知，土体饱和重力密度与经孔压 u_2 修正的锥尖阻力 q_t 呈幂指数关系。本次利用临近的取土试验孔与孔压静力触探孔成果，将 172 件土样的 γ 与同深度范围内经孔压修正的 q_t 进行分析，土样包括淤泥质土、黏土、粉质黏土、粉土、砂土等场地内揭示的主要土层。经过合适的数学函数拟合，获取了经孔压 u_2 修正的 q_t 与 γ 的关系式，即 $\gamma = 17.39q_t^{0.046}$ ，判别系数 R^2 为 0.729，拟合程度一般，见图 4。

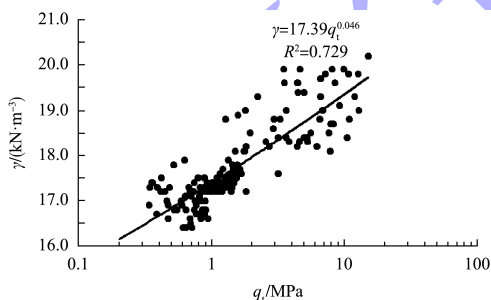


图 4 γ 与 q_t 的关系

Fig. 4 Relationship between γ and q_t

由式(3)可知，经孔压 u_2 修正的锥尖阻力 $q_t = q_c + 0.8u_2$ ，因此 γ 与实测锥尖阻力 q_c 以及锥肩部测试的孔隙水压力 u_2 等两个参数相关。为提供 q_c 、 u_2 与 γ 的关系曲线拟合度，假定经优化后的锥尖阻力满足下式：

$$q_{t1} = Aq_c + Bu_2 \quad (6)$$

式中： A 、 B 为常数系数。

通过试算，当 $A = 1$ 、 $B = -0.88$ 时，即 $\gamma = 18.04(q_c - 0.88u_2)^{0.030}$ ，判别系数 R^2 为 0.814，其值显著提高，表明曲线拟合程度较好，见图 5。

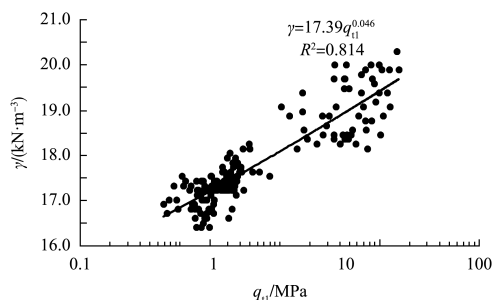


图 5 γ 与 q_{t1} 的关系

Fig. 5 Relationship between γ and q_{t1}

以 JK₄ 为例，先按获取的关系公式计算各测点处的 γ ，再按式(4)计算与临近钻孔内各土样中点同深度处的上覆压力 σ_{v0} ，记为 $\sigma_{v0, Ji}$ 。然后，利用临近钻孔室内土工试验获取土的重力密度，按式(5)计算各土样中点处的上覆压力 σ_{v0} ，记为 $\sigma_{v0, Zi}$ 。最后，以 $\sigma_{v0, Zi}$ 为基准，获取各点处 $\sigma_{v0, Ji}$ 与 $\sigma_{v0, Zi}$ 的偏差值，用于验证获取的关系公式的准确性。通过静力触探与室内土工试验获取的上覆压力比对见图 6。

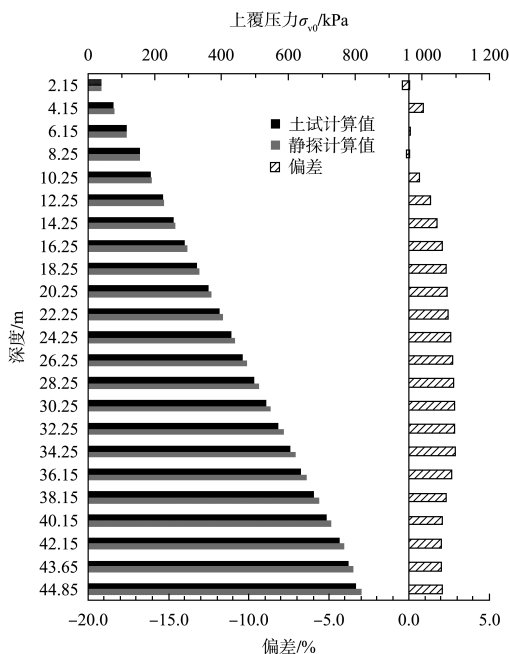


图 6 场地不同深度处的上覆压力 σ_{v0}

Fig. 6 Overburden pressure σ_{v0} at different depths

根据图 6 可知,按两种方法计算的场地不同深度处的上覆压力 σ_{v0} 值基本一致,大部分深度处静探计算值 $\sigma_{v0,ji}$ 略大于土试计算值 $\sigma_{v0,Zi}$,偏差在 2.8%以内,而浅部个别深度处静探计算值 $\sigma_{v0,ji}$ 略小于土试计算值 $\sigma_{v0,Zi}$,其中 2.15 m 深度处,最大偏差约-0.4%。结合实测静探曲线分析可知,浅部 0.30 m 内锥尖阻力值基本为 0,造成静探计算的上覆压力值偏小,原因可能为海床式静探设备坐滩带来的土体扰动及探头入土时测试数据采集失真;中部淤泥质土土质不均,局部夹有较多薄层粉土,造成室内土试成果指标可能偏小,而静探计算的上覆压力值相对更符合实际情况。根据比较结果,按建

立的经优化修正的 q_{li} 与 γ 的关系式,可精确描述土体各处的上覆压力,解决水上钻探取样间距大、指标选用代表性不足等问题。

3.3 圆锥经验系数 N_{kt} 的确定

基于室内土工试验获取的土样固结快剪、直剪快剪、三轴 UU 指标与静探指标换算的有效上覆压力,先按式(1)计算黏性土的不排水抗剪强度 S_u ,再按式(4)求取圆锥经验系数 N_{kt} ,其中 $\sigma_{v0}=\sum [18.04(q_{ci}-0.88u_{2i})^{0.030}-\gamma_w]h_i$ 。采用固结快剪、直剪快剪、三轴 UU 指标作为标定方法时,场地内各黏性土层的圆锥经验系数 N_{kt} 标定结果分别见表 3~5。

表 3 基于固结快剪标定的 N_{kt}
Tab. 3 N_{kt} of clayer soil based on consolidated quick direct shear test

层序	N_{kt}								平均值
	JK ₁	JK ₂	JK ₃	JK ₄	JK ₅	JK ₆	JK ₇	JK ₈	
③	-	13.31	-	-	-	-	11.91	-	12.61
④	-	-	13.52	12.63	16.86	13.56	16.50	15.36	14.74
⑤ ₁	15.39	12.69	11.55	12.71	14.17	13.93	12.23	12.33	13.13

根据表 3 可知,采用固结快剪指标时,对于第③层淤泥质粉质黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 11.91~13.31,平均值为 12.61;对于第④层淤泥质黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 12.63~16.86,平均值为 14.74;对于第⑤₁层黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 11.55~15.39,平均值为 13.13。由于第③层与第④层为流塑状淤泥质土,第⑤₁层黏土为流塑~软塑状,土性相近,当按同一层考虑时,标定得到的 N_{kt} 总平均值为 13.66,变异系数为 0.12。

表 4 基于直剪快剪标定的 N_{kt}
Tab. 4 N_{kt} of clayer soil based on quick direct shear test

层序	N_{kt}						平均值
	JK ₁	JK ₄	JK ₅	JK ₆	JK ₇	JK ₈	
③	-	-	-	13.29	15.49	7.06	11.95
④	-	8.00	-	14.31	-	11.73	11.35
⑤ ₁	10.53	11.27	10.97	11.19	7.10	8.32	9.90

根据表 4 可知,基于直剪快剪指标时,对于第③层淤泥质粉质黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 7.06~15.49,平均值为 11.95;对于第④层淤泥质黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 8.00~14.31,

平均值为 11.35;对于第⑤₁层黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 7.10~11.27,平均值为 9.90。当第③层、第④层为流塑状淤泥质土与第⑤₁层流塑~软塑状黏土按同一层考虑时,标定得到的 N_{kt} 总平均值为 10.77,变异系数为 0.26。

表 5 基于三轴 UU 标定的 N_{kt}
Tab. 5 N_{kt} of clayer soil based on unconsolidated-undrained triaxial test

层序	N_{kt}							平均值
	JK ₁	JK ₃	JK ₄	JK ₅	JK ₆	JK ₇	JK ₈	
③	-	13.40	-	-	-	12.23	-	12.82
④	-	-	14.74	-	18.61	-	19.24	17.53
⑤ ₁	25.03	18.80	21.36	20.25	19.31	16.67	-	19.91

根据表 5 可知,基于三轴 UU 指标时,对于第③层淤泥质粉质黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 12.23~13.40,平均值为 12.82;对于第④层淤泥质黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 14.74~19.24,平均值为 17.53;对于第⑤₁层黏土,每个孔标定得到的 N_{kt} 为 16.67~25.03,平均值为 19.91。当第③层、第④层为流塑状淤泥质土与第⑤₁层流

塑~软塑状黏土按同一层考虑时, 标定得到的 N_{kt} 总平均值为 18.97, 变异系数为 0.18。

JTS/T 242—2020《水运工程静力触探技术规范》提供了 N_{kt} 的推荐取值范围, 采用固结快剪试验指标作为标定方法时, N_{kt} 的取值为 12.0~25.0, 平均值为 17.9; 采用直剪快剪试验指标作为标定方法时, N_{kt} 的取值为 10.0~25.0, 平均值为 20.0; 采用三轴 UU 试验指标作为标定方法时, N_{kt} 的取值为 18.0~35.0, 平均值为 23.8。本场地采用固结快剪标定得到的 N_{kt} 范围值均位于行业规范推荐取值区间, 但最大值小于规范中平均值, 平均值约为规范推荐值的 75%; 采用直剪快剪及三轴 UU 标定得到的 N_{kt} 范围值基本小于规范中平均值, 平均值分别约为规范推荐值的 55%、80%。与广东近海海域、江苏盐城市海域及浙江杭州湾嘉兴黏性土相比可知^[9-12], 本次采用三轴 UU 标定得到的 N_{kt} 基本相同, 而采用固结快剪标定得到的 N_{kt} 略小, 其主要原因与场地软土的土性不同有关, 标定值较合理。因此, 该类场地软土的圆锥经验系数宜取小值, 否则将低估土的抗剪强度, 而增大工程投入, 造成资源浪费。

3.4 基于静力触探的黏性土强度解释

由于采用固结快剪标定得到的 N_{kt} 变异系数最小, 解译孔压静力触探测试数据的准确性将更高。根据本次采用固结快剪标定得到的 N_{kt} 平均值及孔压静力触探成果, 按式(2)计算得到黏性土的不排水抗剪强度 S_u , 以实现 JK₂、JK₄ 孔处的原位测试数据进行解译, 得到孔内各深度处黏性土的不排水抗剪强度剖面, 并将其与室内土工试验结果进行对比, 结果见图 7。

根据图 7 可知, 以本文建立的经修正的锥尖阻力 q_{ti} 与土体重力密度 γ 的关系公式获取测点的上覆压力 σ_{v0} , 并按标定的圆锥经验系数 $N_{kt} = 13.66$, 解译得到黏性土的不排水抗剪强度剖面, 除局部深度处由于受夹薄层粉土粉砂的影响, 产生数值突变外, 与临近孔及场地内其余孔室内固结快剪试验计算结果具有较高的一致性, 数值吻合性较好。

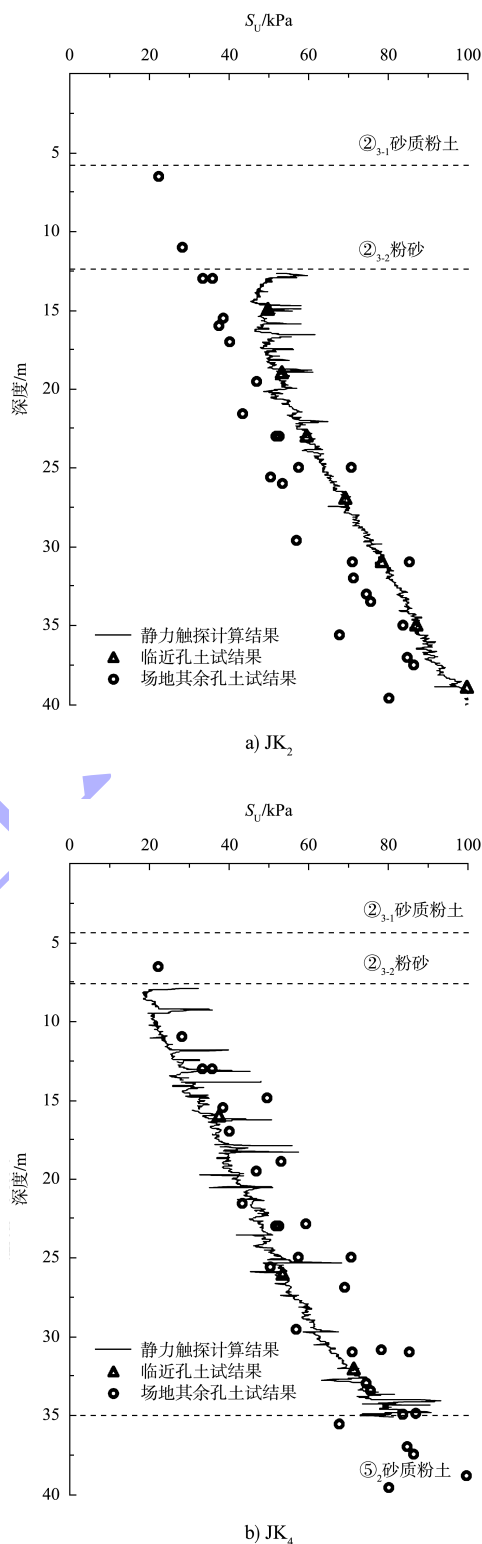


图 7 黏性土的不排水抗剪强度 CPTU 解译结果

Fig. 7 Interpretation of clayer soil undrained shear strength of CPTU

综上, 采用场区标定得到的 CPTU 圆锥经验系数 N_{kt} 平均值, 并利用 q_{ti} 与 γ 的关系公式测算土体上覆压力 σ_{v0} , 可以较好地解译本场区黏性土

的不排水抗剪强度,同时为长江口其他水域物理性质相近的黏性土提供一定的解译依据。在缺少场地标定结果及土工试验成果时,可以采用本文给出的 N_{kt} 总平均值以及 q_{tl} 与 γ 的关系式对孔压静力触探测试结果进行解译。

4 结论

1) 基于室内土工试验结果,建立了经优化修正的 q_{tl} 与 γ 的关系公式,即 $\gamma = 18.04q_{tl}^{0.030}$,判别系数 R^2 为0.814,拟合程度较好。在长江口水域工程中,利用该关系式可精确反映土体各处的上覆压力 σ_{v0} 。

2) 基于室内固结快剪、直剪快剪、三轴UU试验结果,标定得到了适用于长江口黏性土的CPTU圆锥经验系数 N_{kt} ,其范围值/平均值分别为11.55~16.86/13.66, 7.06~15.49/10.77, 14.74~25.03/18.97。在长江口水域工程中,可以采用圆锥经验系数 N_{kt} 的总平均值对孔压静力触探数据进行解译,得到黏性土的不排水抗剪强度。

3) 目前基于CPTU对黏性土的强度进行解译,大多依赖经验关系,并显现出典型的地域性,因此,宜根据当地的土工试验与原位测试数据对各关系式进行必要的修正,积累工程经验。

4) 在缺少场地标定结果及土工试验成果时,采用场区标定得到的CPTU圆锥经验系数 N_{kt} 总平均值,并利用 q_{tl} 与 γ 的关系公式测算土体上覆压力 σ_{v0} ,可以较好地解译本场区黏性土的不排水抗剪强度,同时为长江口其他水域物理性质相近的黏性土提供一定的解译依据。

参考文献:

- [1] 刘松玉,邹海峰,蔡国军,等.基于CPTU的土分类方法在港珠澳大桥中的应用[J].岩土工程学报,2017,39(S2):1-4.
LIU S Y, ZOU H F, CAI G J, et al. Application of CPTU-based soil classification methods in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(S2): 1-4.
- [2] 邓煜晨,陈志波,郑有强,等.基于孔压静力触探的修正土类指数土体分类方法与实例应用[J].岩土力学,2022,43(1):227-234.
- [3] DENG Y C, CHEN Z B, ZHENG Y Q, et al. CPTU-based modified soil behavior type index classification method and its application [J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43(1): 227-234.
- [4] 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.
LIU S Y, CAI G J, TONG L Y. Theory and engineering application of modern multifunctional CPTU technology [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [5] 童立元,蔡国军,刘松玉,等.多功能孔压静力触探(CPTU)测试技术在软土工程性质评价中的应用[J].工程地质学报,2008,16(S1):334-339.
TONG L Y, CAI G J, LIU S Y, et al. Evaluation of soft soil engineering properties from piezocone test (CPTU) [J]. Journal of engineering geology, 2008, 16(S1): 334-339.
- [6] 李广信.浅议土的复杂性[J].岩土工程学报,2024,46(5):1085-1093.
LI G X. On complexity of soil [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(5): 1085-1093.
- [7] 郑晓国,周翔,汪春平.CPTU技术在黏性土不排水抗剪强度计算中的应用研究[J].路基工程,2019(1):1-6.
ZHENG X G, ZHOU X, WANG C P. Study on application of CPTU technology in undrained shear strength calculation of clayey soil [J]. Subgrade engineering, 2019(1): 1-6.
- [8] 杨溢军,童立元,朱宁,等.基坑中基于CPTU软土不排水强度确定及应用[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):1095-1101.
YANG Y J, TONG L Y, ZHU N, et al. Evaluation and application of undrained shear strength in excavation from piezocone tests (CPTU) [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2016, 12(4): 1095-1101.
- [9] 彭鹏,蔡国军,刘松玉,等.基于CPTU的三亚新机场海洋软土工程特性评价[J].岩土工程学报,2017,39(S2):140-144.
PENG P, CAI G J, LIU S Y, et al. Evaluation of soft soil engineering characteristics of Sanya New Airport from CPTU data [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(S2): 140-144.