

海底管线区浅表层土孔压静力触探参数特征及应用

陈小玲, 陈培雄, 陈锡土, 吕小飞

(国家海洋局 第二海洋研究所 工程海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 利用东海陆架海底输油管道路由调查获得的孔压静力触探数据和钻探资料等, 采用统计分析的方法, 对管道路由区 5 m 以浅土体的孔压静力触探曲线特征、土的分类方法鉴别作了探讨, 结果表明: 研究区 5 m 以浅黏性土的锥尖阻力(q_c), 侧摩阻力(f_s)值较小, 且随深度呈线性增加, 粉质土的 q_c, f_s 值增大, 但随深度线性增加规律不明显, 砂类土的 q_c 值急剧增大, 但 f_s 值变化不大; Robertson 法和 Eslami-Fellenius 法两种土类划分方法均适用于研究区浅表层软土土类划分, 但 Robertson 法在判别粉质土时受到一定限制, Eslami-Fellenius 法判别较为准确, 应用简单。本研究可为我国在海底管线工程路由勘察中直接利用孔压静力触探(CPTU)参数划分土层和判别土类作铺垫。

关键词: 海底管线区; 浅表层土; 孔压静力触探试验; 土分类

中图分类号: P75

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)03-0008-05

静力触探作为一种速度快、扰动小、精度高、数据连续的原位测试技术, 自 1932 年研制成功以来, 在工程勘察中得到了广泛应用^[1-2]。在我国, 静力触探在陆域岩土工程应用较广, 建立了许多地区性经验公式^[3-4], 在海洋工程中尚属起步, 目前仅在海洋石油开发、海底电缆、管道等大型工程中得到应用。作为一种用于第四纪土的经验性定量或半定量测试手段, 静力触探的应用一般不是靠理论分析其力学机理求解析解, 而是靠具体的经验积累建立起来的经验关系。我国以前所得出的经验公式大多是建立在“单桥”或“双桥”静力触探测试成果基础上, 且多适用于陆相沉积物, 对于具有不同沉积相、物质成分和结构特征的海洋土, 这些经验公式存在是否适用、需要作哪些方面的改进等一系列问题。另外, 国外已建立的一些应用于海洋工程的经验公式, 由于多为地区性经验, 并不一定适用于我国东海海域。据此, 本文收集东海陆架管线区 52 个孔压静力触探、150 个振动取样和 28 个钻孔资料, 对研究区 5 m 以浅土体的孔压静力触探曲线特征、土分类方法的鉴别等方面作了研究, 总结出触探参数在该地区的区域性经验值, 为孔压静力触探技术(CPTU)在我国海底管线工程领域的应用研究作铺垫。

1 研究区工程地质条件

研究区位于浙江岸外东海陆架海域(图 1), 浅表

层土表现出与沉积环境相适应的内细外粗的规律, 即近岸区为细粒土, 陆架中部为粗粒土。根据 ASTM 规范土的分类定名, 研究区管道所经海域的海底浅层(0~5 m)土可分为黏土、粉砂质黏土、砂质黏土、黏土质粉砂、黏土质细砂、粉砂、砂-粉砂-黏土、砂质粉砂、粉砂质细砂、细砂等 10 种类型, 按工程地质评价要求, 可归并为黏性土、粉质土、砂类土三类。

黏性土: 主要分布在象山港口门及近海水深 45 m 以浅区段, 为浅海相沉积。包括黏土、粉砂质黏土、砂质黏土。该类土含水量较高, 多为 40%~55%, 中到高塑性, 液限 40%~55%, 塑限 20~25, 土中含较多粉砂或砂微细层。

粉质土: 呈带状分布于现代浅海黏土沉积和陆架残留砂沉积区之间的混合沉积区。包括黏土质粉砂、砂-粉砂-黏土、砂质粉砂、粉砂。该类土呈松散至中密实状态, 粒级混杂, 分选差, 黏土质量分数 12%~25%, 砂质量分数 22%~35%。天然密度 1.75~1.90 g/cm³, 含水量 30%~40%。

砂类土: 主要分布在研究区东部的残留砂区, 为晚更新世以来形成的滨海沉积。包括分选好到极好的细砂、粉砂质细砂。该类土呈中等密实到密实

收稿日期: 2010-05-10; 修回日期: 2011-12-19

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y5100027); 国家海洋第二海洋研究所专项资金资助项目(JG200805)

作者简介: 陈小玲(1972-), 女, 浙江诸暨人, 高级工程师, 主要从事海洋工程、海洋岩土方面的研究, E-mail: chenxl@sio.org.cn

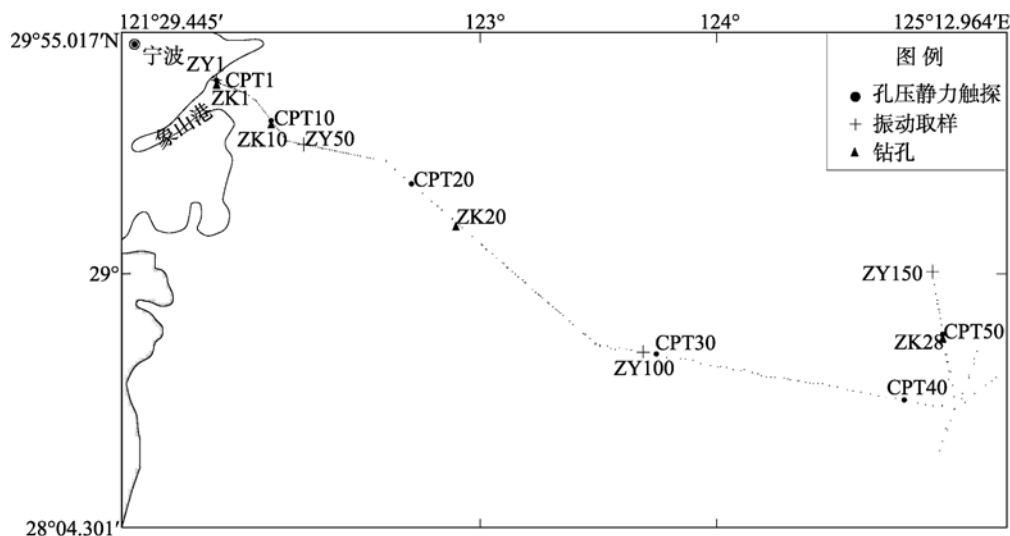


图 1 研究区及孔压静力触探试验、振动取样、钻孔位置图

Fig. 1 Study area and locations of pore pressure static cone penetration test (CPTU), vibrocore sampling, drilling stations

状态，局部含黏土微细层。黏粒质量分数不足 15%，细砂质量分数大于 70%，天然密度 1.9~2.1 g/cm³，含水量 25%~35%。

2 孔压静力触探参数曲线特征及特征值

土体性质是影响锥尖阻力、侧摩阻力等静力触探参数值大小的主要因素，砂类土的粒径较粉质土、黏性土的粒径大，砂类土饱和时，粒间没有联结，呈松散状态，无可塑性及胀缩性，压缩性极弱，且强度较高；而粉质土具有一定的压缩性、强度较低；黏性土具有较高的压缩性，强度低。当探头贯入时，土体受横向“挤压”，砂类土压缩性低，锥尖受到阻力较大；粉质土和黏性土由于具有一定的压缩性，锥尖所受阻力减小。同时颗粒粒径较大时，探头侧壁所受到的阻力较大。当土体中黏粒含量较高时，锥尖阻力趋向低值。因此，不同土类表现出不同的曲线特征。图 2 为实际测试得到的研究区黏性土、粉质土、砂类土典型的孔压静力触探成果曲线。表 1 为 3 种类型土的锥尖阻力 q_c 、侧摩阻力 f_s 、摩阻比 R_f 、孔隙水压力 u_2 、孔压比 B_q 随土层深度变化的曲线特征及孔压静力触探参数特征值。其中 R_f 、 B_q 用下列公式计算：

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100\%$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}}$$

式中： R_f ：摩阻比，%； f_s ：侧摩阻力，kPa； q_c ：实测锥尖阻力，kPa； B_q ：超孔隙压力系数； u_2 ：锥头后实测孔隙水压力，kPa； u_0 ：静止孔隙水压力，kPa； σ_{v0} ：总上覆土层压力，kPa； q_t ：修正锥尖阻力，kPa， $q_t = q_c + (1 - \alpha)u_2$ ， α 为锥头修正面积比，文中取 $\alpha = 0.840$ 。

比较 3 类土的触探曲线(图 2、表 1)可以看出：(1)黏性土： q_c 、 f_s 值较小， q_c 一般小于 250 kPa， f_s 则小于 15 kPa，但两者随深度呈线性增加的规律明显，这与孟高头^[3]在均质海相黏性土中的研究结果一致； u_2 值多小于 150 kPa，总体上随深度呈线性增加，当黏性土中夹有粉砂或细砂微层时， u_2 值急剧降低； R_f 、 B_q 值变化范围较大，随深度变化不明显。(2)粉质土： q_c 、 f_s 值增大， q_c 最大可达 8.0 MPa， f_s 最大可达 150 kPa，由于粉质土中常含黏土、细砂等夹层， q_c 、 f_s 值随深度线性增加规律不明显， u_2 值在砂夹层中常出现负值，变化范围增大，多在 -300~250kPa 之间变动。(3)砂类土(细砂)：与黏性土及粉质土相比， q_c 值急剧增大，最大可达 10.0 MPa， f_s 值变化不大， B_q 值明显减小，多在 0 值附近变动， u_2 值随深度的增加变化极小，几乎为常值，估计与锥头贯入过程中孔隙水压力消散过快有关。

3 两种土分类法的适用性分析

1965 年 Begemann 首先提出利用锥尖阻力、侧摩阻力划分土类，随后 Robertson 等^[5-6]、Eslami 和 Fellenius^[7]、张诚厚等^[8]基于各种假设提出了不同的

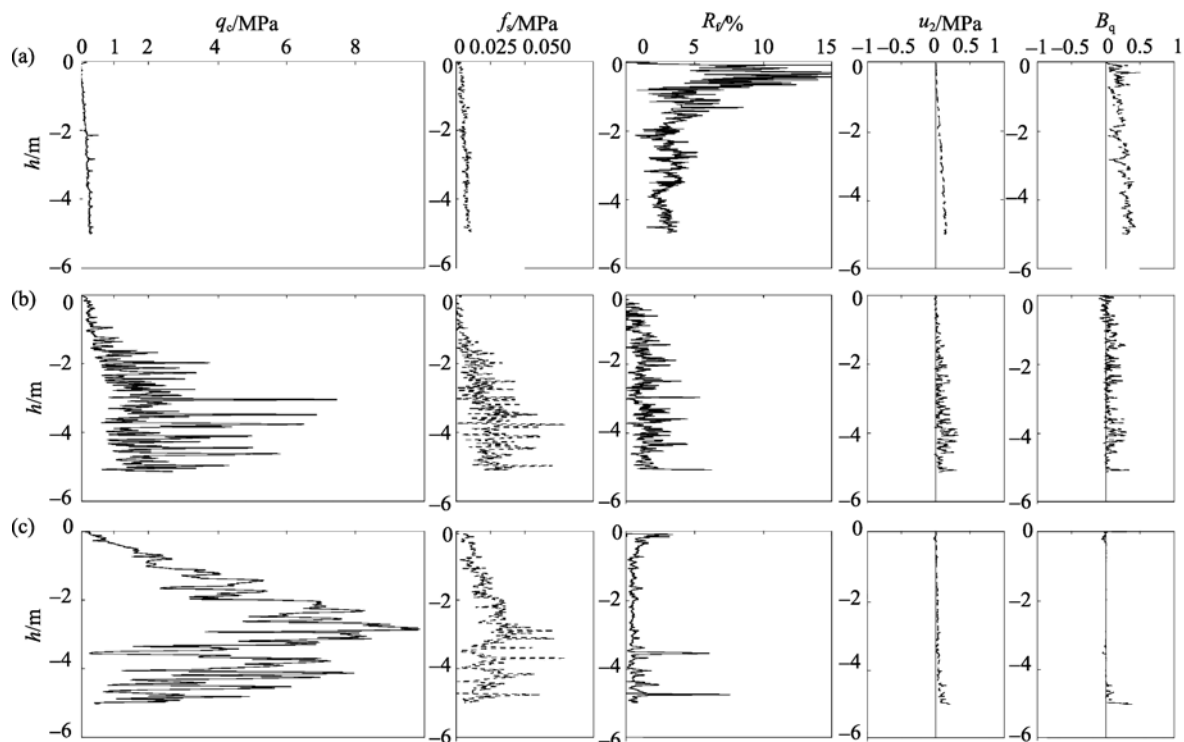


图 2 实测不同土类典型的孔压静力触探成果曲线

Fig. 2 The typical CPTU curves of three soil types

(a) 黏性土; (b) 粉质土; (c) 砂性土
(a) clay soil; (b) silty soil; (c) sandy soil

表 1 不同类型土的孔压静力触探曲线特征及参数特征值

Tab. 1 The CPTU characteristic curves and values of three soil types

曲线类型	曲线特征		
	黏性土	粉质土	砂类土
q_c-h	曲线较平缓, 有波状起伏, 随深度逐渐增大, 由于含砂微细层, 局部有突起现象。 q_c 值低, <250 kPa	曲线呈锯齿状起伏, 随深度增大趋势不明显。 q_c 值较大, 最大可达 8.0 MPa	曲线呈锯齿状起伏, 波峰和波谷呈尖形, q_c 值大, 最大可达 10.0 MPa
f_s-h	曲线呈波形起伏, 随深度逐渐增大。 f_s 值低, <15 kPa	曲线呈锯齿状, 随深度变化不明显, f_s 值较大, <150 kPa	曲线呈锯齿状, f_s 值较大
R_f-h	曲线起伏较大, 波峰和波谷呈尖形, 随深度变化不明显, R_f 值变化较大, 多 <15%	曲线呈锯齿状, 随深度变化不明显, R_f 值变化相对减小, <10%	曲线呈锯齿状, 起伏较小。 R_f 值较小, <5%
u_2-h	曲线平缓, 随深度逐渐增大, 当黏土中含砂微细层时, u_2 值急剧降低, 甚至出现负值。 u_2 值低, <150 kPa	曲线呈波状起伏, 随深度变化不明显, u_2 值变化较大, 多在 -300~250 kPa 之间变动	曲线平缓, 随深度基本不变, u_2 值较小
B_q-h	曲线呈锯齿状起伏。 B_q 值变化较大, 变化范围: -1.0~1.0, 多为正值	曲线呈锯齿状, 随深度变化不明显。 B_q 值变化幅度减小, 变化范围: -0.5< B_q <0.7	曲线呈锯齿状, B_q 值较小, 多在 0 值附近变动

土分类图。本文利用 CPTU 数据对 Robertson^[6]和 Eslami-Fellenius^[7]两种分类法在划分研究区浅表层土类的适用性进行了探讨。

3.1 两种土分类法

3.1.1 Robertson 法^[6]

由于土层上覆应力对 CPT 锥尖阻力、侧摩阻力

有较大影响, 相同性质的土层在不同的深度, 其 CPT 探头阻力是不同的, Robertson 等^[6]对其 1986 年提出的土分类图进行了改进, 提出用归一化锥尖阻力、归一化摩阻比和孔隙水压力系数划分土类, 得到了适用于软土的土分类图(图 3)。其中:

归一化锥尖阻力 Q_t 用下式计算:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}$$

归一化摩阻比 F_r 用下式计算:

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}}$$

式中: σ_{v0} 为有效上覆土压力, kPa。

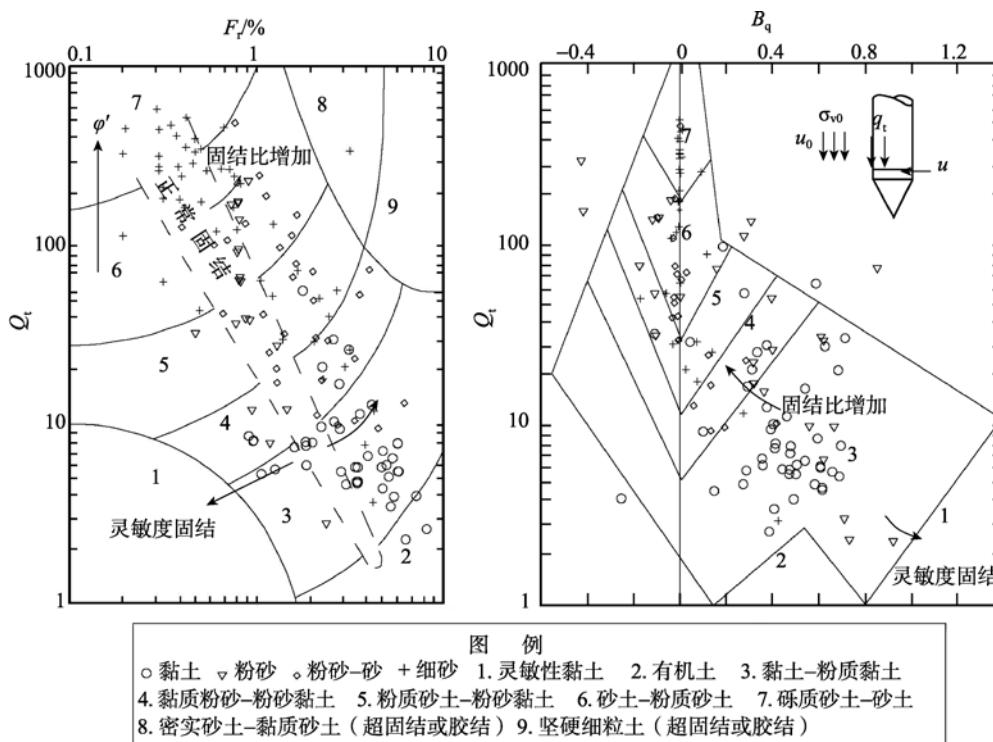


图 3 不同类土在 Robertson 分类图中的分布
Fig. 3 Distributions of different soil types in Robertson chart

3.1.2 Eslami-Fellenius 法^[7]

Eslami-Fellenius 法提出了利用有效锥尖阻力和侧摩阻力划分土类的分类图(图 4), 图中有效锥尖阻力 q_e 用下式计算得到:

$$q_e = q_c - 0.84u_2$$

3.2 两种分类法在研究区土类划分中的对比分析

图 3 是研究区不同类土的孔压静力触探数据在 Robertson 分类图中的分布情况, 可以看出, 浅表层黏土及粉砂质黏土基本落于区域 3 中, 细砂多落于区域 5, 6, 7 中, 表明黏性土和砂类土在 Robertson 分类法中能得到准确的反映, 但粉质土分布较为分散, 分布区域遍及 3, 4, 5, 6, 7 等多个区域, 出现这种情况与粉质土的结构特征有关, 研究区粉质土中夹有

粉砂、细砂、黏土等微层或夹层, 导致静力触探参数, 尤其是孔隙水压力值变化较大, 使得粉质土在 Robertson 分类图中不能得到准确的区分。另外, 在使用 Robertson 法划分土类时需要详细的用于计算上覆压力的容重值, 如果缺乏相应的室内试验, 用该法划分土类仍是一个困难。

图 4 为研究区不同类土孔压静力触探数据在 Eslami-Fellenius 分类图中的分布, 可以看出, 黏土、粉质土、细砂多落于相应的区域, 表明该法能较好地地区分研究区浅表层土类。而且在应用该法时, 仅需要有效锥尖阻力和侧摩阻力就可进行土类划分, 无需其他测试参数, 是一种简单而且能较准确地判别土类的方法。但该法中黏土多落于湿陷性黏土-粉质黏土的区域中, 与研究区的黏土定名存在差距, 在具体使用时, 需考虑该区土类的定名。

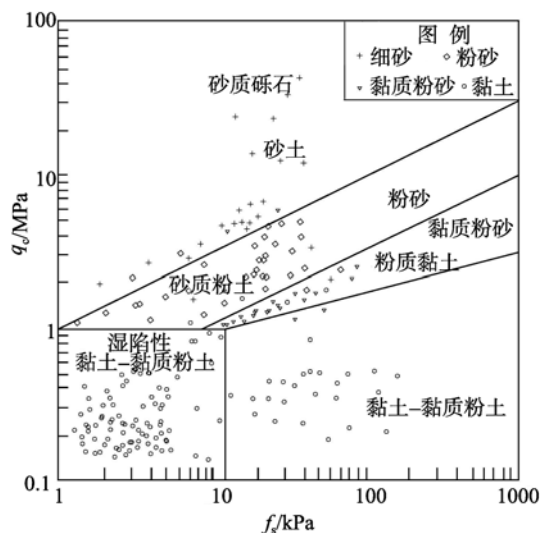


图 4 不同类土在 Eslami-Fellenius 分类图中的分布
Fig. 4 Distributions of different soil types in Eslami-Fellenius chart

4 结论

(1)研究区 5 m 以浅黏性土、粉质土、砂类土的孔压静力触探曲线表现出明显的差异性，黏性土的 q_c 、 f_s 值较小， q_c 、 f_s 、 u_2 随深度呈线性增加， R_f 、 B_q 值变化范围较大；粉质土的 q_c 、 f_s 值增大，但随深度线性增加规律不明显， u_2 值变化范围增大，常出现负值；砂类土的 q_c 值急剧增大，但 f_s 值变化不大， u_2 值几乎保持常值。

(2)在用孔压静力触探测试数据进行土类判别时，应综合参考多个分类图并结合钻探资料得出可靠的土

类判别。Robertson 法和 Eslami-Fellenius 法均适用于研究区浅表层软土的土类划分，但 Robertson 法在判别粉质土时较离散，且需要详细的土容重数据，应用受到一定限制，而 Eslami-Fellenius 法仅利用锥尖阻力和侧摩阻力，判别较为准确，应用简单。

参考文献:

- [1] Vreugdenhil R, Davis R, Berrill J R. Interpretation of cone penetration results in multilayered soils[J]. Int J Numer Analyt Meth Geomech, 1994, 18: 585-599.
- [2] Mitchell J K, Lunne T A. Cone resistance as a measure of sand strength[J]. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1978, 104(GT7): 995-1012.
- [3] 孟高头.土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 6-102.
- [4] 常士骠, 张苏民, 项勃, 等. 工程地质手册[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 253-275.
- [5] Robertson P K, Campanella R G, Gillespie D, et al. Use of piezometer cone data[C]. The American Society of Civil Engineers. Proceeding of American Society of Civil Engineers, In-Situ 86 Specialty Conference. Clemence, Blacksburg: Geotechnical Special Publication, 1986: 1263-1280.
- [6] Robertson P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 151-158.
- [7] Eslami A, Fellenius B H. Pile capacity by direct CPT and CPTU methods applied to 102 case histories[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 880-898.
- [8] 张诚厚, 施健, 戴济群. 孔压静力触探试验的应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 50-57.

Characteristics of pore pressure static cone penetration test parameters and its application of surface soil in pipeline laying areas

CHEN Xiao-ling, CHEN Pei-xiong, CHEN Xi-tu, LÜ Xiao-fei

(Key Laboratory of Engineering Oceanography, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Received: May,10,2010

Key words: pipeline laying area; surface soil; pore pressure static cone penetration test(CPTU); soil classification

Abstract: Based on the pipeline route survey data in the East China Sea, using statistical analysis technique, the characteristics of pore pressure static cone penetration test (CPTU) curves and soil classification in 5 m shallow soil are discussed. It was found that the characteristics of CPTU curves and parameters were different for clay, silty and sandy soils in pipeline area. The value of q_c or f_s in clay was small and increasing with depth linearly, but the value for the silt or sand was not so. The soil classification methods of Eslami-Fellenius is simpler and more accurate than Robert's. The results of this paper can be applied in layers discriminating and soil classification using CPTU in pipeline route survey in China.

(本文编辑: 刘珊珊)