



孔压静力触探试验 (PCPT) 在非均质土勘察中的应用

段存俊, 吴朝东, 赵 欣

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 为了获得非均质土的力学指标, 进行了非均质土中孔压静力触探试验(PCPT)研究。通过引入钻机引孔配合施工工艺与采用多重护管的施工手段, 解决了在非均质土层中孔压静力触探试验无法满足设计深度的问题, 从而实测得非均质土的锥尖阻力(q_c)、侧壁阻力(f_s)、探头倾角(l)及动孔隙水压力(u_2)。通过对上述指标分层统计分析与计算, 获得非均质土的不排水剪切强度与内摩擦角指标, 为建设工程提供地基基础设计重要的岩土参数。

关键词: 非均质土; 孔压静力触探试验; 勘察

中图分类号: U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0186-05

Application of piezocone penetration test in investigation of non-homogeneous soil

DUAN Cun-jun, WU Chao-dong, ZHAO Xin

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To obtain mechanical indexes of non-homogeneous soils, a study of piezocone penetration test (PCPT) in non-homogeneous soils is conducted. The problem that the PCPT test can not satisfy the design depth is solved by introducing the construction technique of rig-led hole with multiple pipe guards, so that the cone tip resistance (q_c), sidewall resistance (f_s), probe inclination (l) and dynamic pore water pressure (u_2) of non-homogeneous soil can be measured. With the layering statistical analysis and calculation of the above indicators, we calculate the undrained shear strength and internal friction angle indicators of the non-homogeneous soil, which provide critical geotechnical parameters for the foundation design of construction projects.

Keywords: non-homogeneous soil; piezocone penetration test (PCPT); investigation

非洲东北部亚丁湾西岸近海岸及海岸(吉布提共和国阿尔塔地区)普遍分布较大厚度的含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂及含珊瑚礁砂质黏土, 厚度大于 60 m, 层底高程小于 -75 m。该类土的特征为土颗粒(黏粒、粉粒及少量砂粒)局部胶结成块状, 呈现非均质性。

在岩土工程勘察时含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂很难采取到原状土样, 即使采用双管取样器采取到土样, 由于含胶结碎块、珊瑚礁, 室内试验时环刀无法切取试样, 因此无法进行力学试验,

仅能进行含水量、液塑限及颗粒分析试验。在该类土的岩土工程勘察中, 一般常用的原位测试方法为标准贯入试验。孔压静力触探试验(piezocone penetration test, 简称 PCPT)可测得锥尖阻力(q_c)、侧壁阻力(f_s)、探头倾角(l)及动孔隙水压力(u_2)。研究表明: 土层中探头附近孔压的改变是由探头挤土引起的八面体正应力和探头刺入剪切引起的八面体剪应力共同作用的结果^[1]。野外采集的 PCPT 原始数据通过 CPT 数据处理软件^[2]可计算出非均质土的内摩擦角(φ)、不排水抗剪强度

收稿日期: 2021-04-04

作者简介: 段存俊(1969—), 男, 高级工程师, 从事岩土工程勘察与设计。

(S_u)等力学指标及生成 PCPT 成果图。另外, 实测的探头倾角可用于对试验深度进行校正。特别是针对境外执行美标或欧标的同类工程项目的岩土工程勘察^[3-5], PCPT 原位测试相比标准贯入试验具有更广泛的应用。本文通过吉布提 LNG 工厂建设工程岩土勘察项目阐述 PCPT 在非均质土勘察中的应用, 希望能为同类工程的勘察提供参考。

1 场地非均质土分布与特征

采用的 CONE GS10 型孔压静力触探探头各传感器位置见图 1。

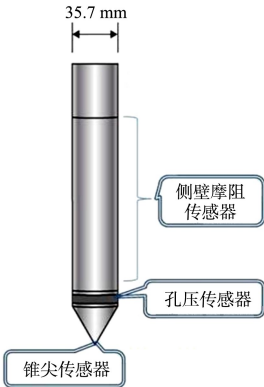


图 1 探头各传感器位置

吉布提 LNG 工厂建设工程项目场地非均质土分布与特征见表 1。

表 1 场地非均质土分布与特征

土层编号	岩土名称	顶板高程/m	土层厚度/m	标准贯入击数/击	土性特征
④ ₂	含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂	-21.10~-19.80	20.8~26.9	15~50	灰黄-灰白色,湿,局部饱和,密实,局部中密,土质不均匀,以砂粒为主,局部呈胶结状,胶结致密,岩芯呈碎块状,含珊瑚礁,胶结碎块主要成分为砂粒胶结物
④ ₃	含珊瑚礁砂质低液限黏土	-52.30~-26.70	6.6~12.0	15~38	黄-褐黄色,湿,硬塑-坚硬,土质不均匀,含珊瑚礁碎屑,含量 20%~30%,粒径 0.5~20 mm
⑤ ₃	含珊瑚礁砂质低液限黏土	-62.61~-52.09	4.8~10.3	15~38	灰黄-褐黄色,湿,硬塑-坚硬,土质不均匀,含珊瑚礁碎屑

2 非均质土孔压静力触探试验方法

2.1 多重护管法

工程场地为近海岸,水深 16~19 m,水底泥面高程为-17.1~-16.2 m,工程 PCPT 测试孔深度要求为 50 m,需使用 70 m 长的探杆。由于深度较大,探杆没有横向的边界约束力,上部贯入推力极易对探杆造成不可逆转的弯曲变形甚至折断,导致 PCPT 测试无法到达设计终孔深度,故采用多重护管的施工方法(图 2)。

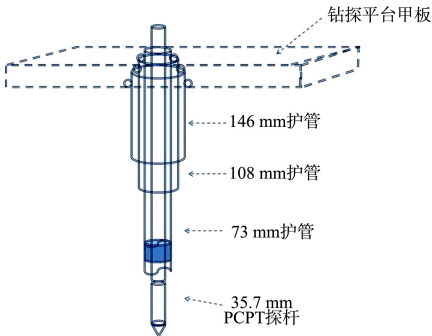


图 2 多重护管

以保护 35.7 mm PCPT 探杆、减少上部土层对探杆的摩阻力及导向为目的,为 PCPT 杆配置多重钢护管(规格为 $\phi 146$ 、 $\phi 108$ 、 $\phi 73$ mm),其中 $\phi 73$ mm 护管底部配有合金钻头或复合片钻头(兼有钻具功

能);钢护管最上端设置卡扣将所有护管悬挂固定在钻探平台甲板上,以防止护管自沉扰动土层。

现场实施精确控制多重护管入泥深度,一般情况下,控制 $\phi 146$ mm 和 $\phi 108$ mm 护管嵌入软土层至硬土层层顶为止, $\phi 73$ mm 护管与 PCPT 探杆交替贯入,对于探杆严重反弹的情况,根据现场情况加大 $\phi 146$ mm 和 $\phi 108$ mm 护管嵌入深度。

2.2 钻机引孔配合施工工艺

从表 1 可知,场地分布的非均质土主要为④₂层含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂,以密实黏土质砂为主,局部含有胶结碎块与珊瑚礁,特别是当探头贯入至珊瑚礁时,孔压静力触探探头很难连续贯入,因此引入钻机引孔施工工艺。

鉴于钻机对含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂钻进适应性较强,兼顾施工效率,引入 GXY-1C 型钻机配合 PCPT 设备实施贯入,将配有滑道的钻机设备装载在钻探平台上,与 PCPT 设备相配合。

对于海底上部覆盖软层,使用 PCPT 探头直接贯入,探头进入含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂后,当锥尖阻力(q_c)超过 30 MPa 或探头倾角大于 15° 时,为防止探杆发生不可恢复的弯曲变形或探

杆折断，暂停试验，并记录中止深度；然后起拔 PCPT 探杆，移开 PCPT 贯入设备，通过滑道移动钻机至井口，钻机直接对接 $\phi 73\text{ mm}$ 钻具实施钻进；根据土层的密实情况，采用 $\phi 73\text{ mm}$ 钻具钻进至探头贯入深度以上 0.5 m 处或穿透局部珊瑚礁与胶结碎块含量较多的层位，并记录钻探的深度，再下置探头与探杆进行孔压静力触探试验，为了减少因钻头对试验土层扰动影响 PCPT 数据，从本次钻探引孔深度以下 0.5 m 开始记录；PCPT 按每贯入 1 cm 采集 1 次数据，通过多次交替试验与钻探引孔的方法，达到满足 PCPT 试验深度的要求；由于孔压静力触探探头遇珊瑚礁或胶结碎块时无法穿透需钻探配合，导致孔压静力触探的非连续性，因此在该类地层条件下，孔压静力触探孔需布设在钻探孔边(影响范围外)，与钻探孔进行对比。

3 孔压静力触探试验成果的应用

3.1 实例工程 PCPT 孔成果图与其相邻钻孔地质剖面图对比分析

图 3 为工程 P8 孔(PCPT)成果图。P8 孔位于

钻孔 B105 孔北侧 16 m ，根据 P8 孔成果图与 B105~B2地质剖面图(图 4)对比，对④₂、④₃层 PCPT 指标评价如下：

1) P8 孔第④₂层含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂的锥尖阻力 q_c 最小值为 2.22 MPa ，最大值达 49.8 MPa ；侧壁阻力 f_s 最小值为 0.05 MPa ；最大值达 0.94 MPa ；摩阻比 R_f 最小值为 0.12% ，最大值为 5.32% ；动孔隙水压力 u_2 在 20 m 以内(高程 -37 m)基本接近 0 或为负压， 22 m (高程 -39 m)以下反复振荡， u_2 曲线呈锯齿状，局部接近 0 或为负压，充分表明土体以密实砂含致密胶结物为主，局部夹薄层黏性土，密实的胶结砂经探头刺入剪切破坏有剪胀效应。

2) 第④₃层含珊瑚礁砂质低液限黏土的锥尖阻力 q_c 最小值为 3.01 MPa ，最大值达 30.96 MPa ；侧壁阻力 f_s 最小值为 0.053 MPa ；最大值达 0.91 MPa ；摩阻比 R_f 最小值为 0.24% ，最大值为 6.99% ；动孔隙水压力 u_2 最大值为 1.35 MPa ，局部段基本接近 0 或为负压，平均值为 0.07 MPa 。

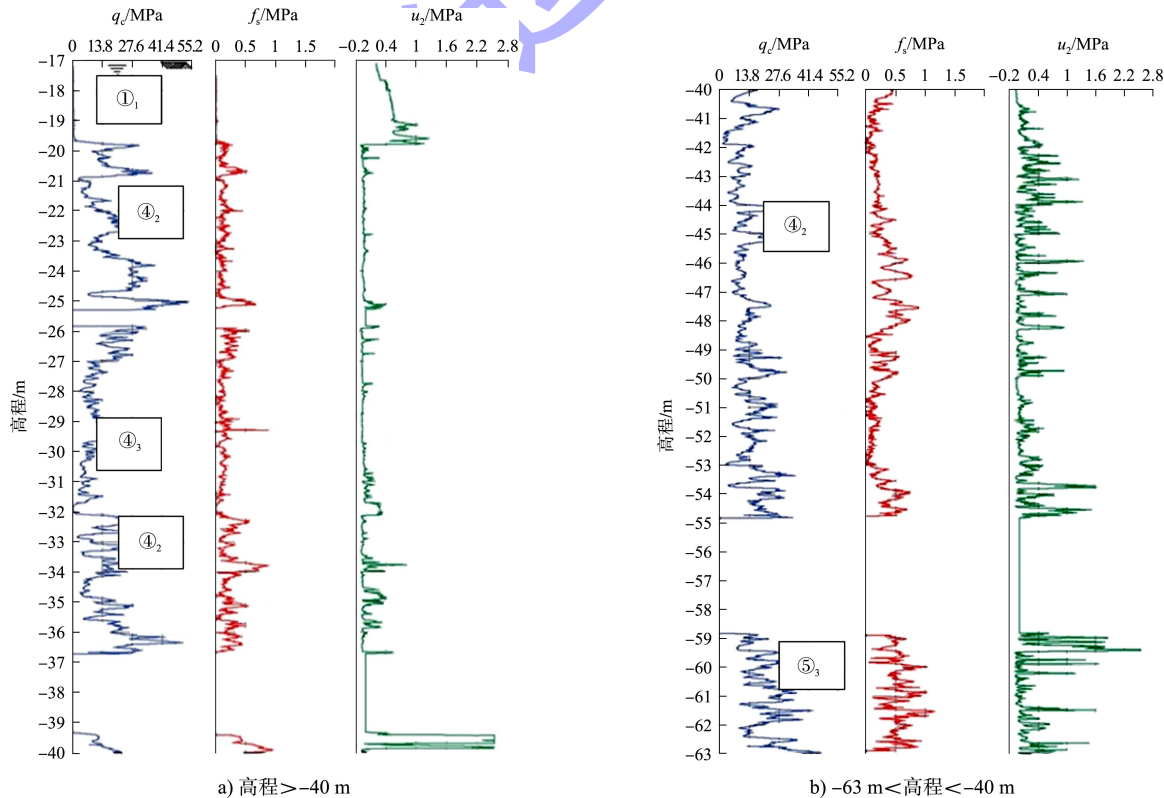


图 3 q_c 、 f_s 与 u_2 成果图

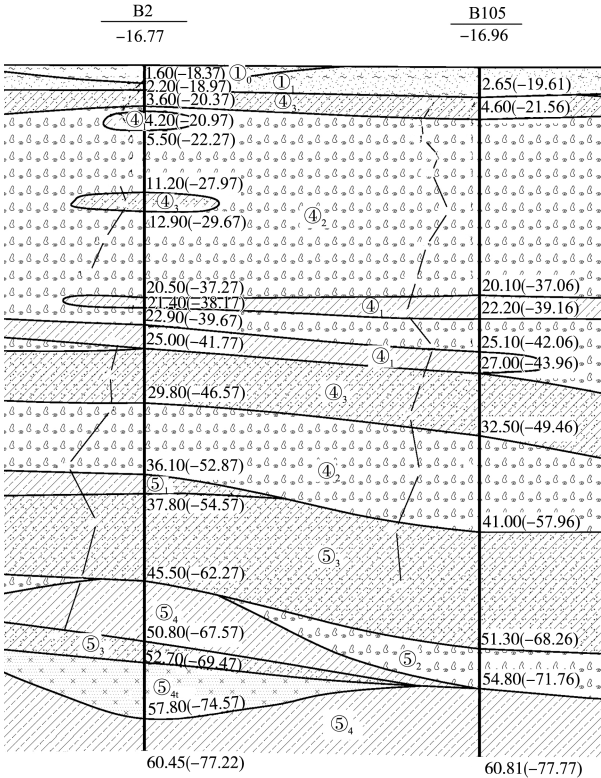


图 4 B2、B105 孔地质剖面 (单位: m)

实例工程 B105 孔第④₂层含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂、④₃层含珊瑚礁砂质低液限黏土及⑤₃层含珊瑚礁砂质低液限黏土代表性芯样见图 5。

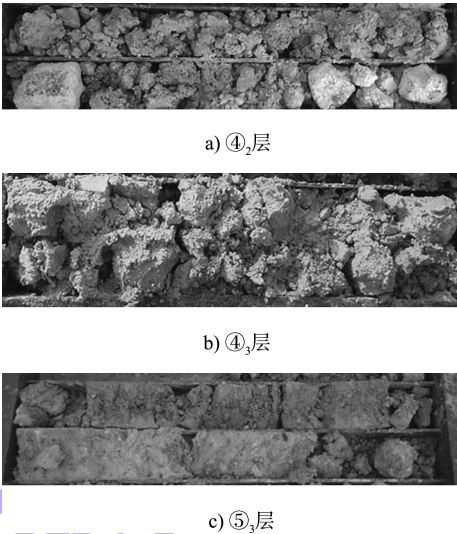


图 5 各层代表性岩芯

3.2 工程场地非均质土 PCPT 指标
选取工程场地 6 个 PCPT 孔，对非均质土 PCPT 指标进行统计，结果见表 2。

表 2 场地非均质土 PCPT 指标

土层编号	统计项目	锥尖阻力 q_c /MPa	侧壁阻力 f_s /MPa	动孔隙水压力 u_2 /MPa	摩阻比 R_f /%	静止孔隙水压力 u_0 /MPa	总竖向应力 σ_{vz} /kPa	有效竖向应力 σ'_{vz} /kPa
④ ₂	最大值	22.240	0.308	0.221	1.844	0.221	429.700	208.700
	最小值	14.292	0.221	-0.005	1.382	0.126	254.300	128.700
	平均值	18.104	0.261	0.078	1.601	0.178	351.400	173.500
	标准差	2.529	0.041	—	0.195	0.040	75.309	35.687
	变异系数	0.140	0.156	—	0.122	0.223	0.214	0.206
	统计修正系数	0.885	0.871	—	0.900	0.816	0.823	0.830
	标准值	16.016	0.228	—	1.440	0.145	289.200	144.100
④ ₃	最大值	12.234	0.388	1.470	3.528	0.377	740.400	363.500
	最小值	8.125	0.184	0.070	2.094	0.153	303.400	150.200
	平均值	10.029	0.271	0.336	2.745	0.233	461.300	228.600
	标准差	1.507	0.075	—	0.527	0.079	155.163	76.343
	变异系数	0.150	0.278	—	0.192	0.339	0.336	0.334
	统计修正系数	0.876	0.770	—	0.841	0.720	0.722	0.724
	标准值	8.784	0.209	—	2.310	0.168	333.200	165.600
⑤ ₃	最大值	15.056	0.608	0.888	4.654	0.478	935.877	457.527
	最小值	12.903	0.229	0.418	1.786	0.386	769.870	383.181
	平均值	13.646	0.397	0.659	3.099	0.423	834.712	411.988
	标准差	0.965	0.145	—	1.107	0.035	61.778	27.175
	变异系数	0.071	0.366	—	0.357	0.083	0.074	0.066
	统计修正系数	0.942	0.698	—	0.705	0.932	0.939	0.946
	标准值	12.850	0.277	—	2.185	0.394	783.708	389.553

注：样本数为 6 个。 q_c 、 f_s 、 u_2 为实测 PCPT 指标， R_f 、 u_0 、 σ_{vz} 、 σ'_{vz} 为应用 CPT 数据处理软件(CPTask-Software version 1.40)计算指标。

3.3 非均质土力学指标评价

3.3.1 非均质土的内摩擦角 φ

采用的理论公式为：

$$\varphi = \arctan [a + b \ln (q_c / \sigma'_{vz})] \tag{1}$$

式中： a 、 b 为经验系数， $a = 0.105$ ， $b = 0.16$ ； σ'_{vz} 为有效竖向应力，分别取表 2 中各土层统计标准值；经计算各层内摩擦角见表 3。

表 3 利用 PCPT 成果计算的内摩擦角结果

土层编号	土层名称	内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$
④ ₂	含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂	40
④ ₃	含珊瑚礁砂质低液限黏土	36
⑤ ₃	含珊瑚礁砾质低液限黏土	33

3.3.2 非均质土的不排水抗剪强度 S_u

采用的理论公式为：

$$S_u = (q_c - \sigma_{vz}) / N_k \tag{2}$$

式中： N_k 为孔压圆锥系数， $N_{k_{\min}} = 12$ ， $N_{k_{\max}} = 20$ ； σ_{vz} 为总竖向应力，分别取表 2 中各土层统计标准值；经计算各层不排水剪切强度，结果见表 4。

表 4 利用 PCPT 成果计算的不排水剪切强度结果

土层编号	土层名称	不排水剪切强度 S_u/kPa
④ ₂	含胶结碎块、珊瑚礁黏土质砂	785~1 300
④ ₃	含珊瑚礁砂质低液限黏土	420~700
⑤ ₃	含珊瑚礁砂质低液限黏土	600~1 000

由于 N_k 是一个经验系数，并仅有最大、最小经验值，因此在利用 PCPT 评价土的不排水剪切强度时，仅能评价一个范围值，所以需要在借鉴国外已有成果的基础上积累地区经验。

根据国内外研究成果，利用 PCPT 成果还可评价土的密度 ρ 及土的应力历史如超固结比 (OCR) 等。

4 结语

1) PCPT 探头在测定锥尖阻力 q_c 、侧壁阻力 f_s 的同时测定了探头周围土体的动孔隙水压力 u_2 及

探头倾斜角，特别是针对含有胶结碎块与珊瑚礁的非均质土，探头易产生倾斜，通过实测的探头倾角可对试验深度进行校正，另外可对探头贯入可行性进行判断，防止探杆产生永久弯曲变形甚至折断。

2) 含有珊瑚礁、胶结碎块等的黏性、砂性非均质土往往分布于近海岸、海岸区，由于该类土质坚硬或非常密实，PCPT 探头无法实现连续贯入。采用下置多重钢套管结合 $\phi 73\text{ mm}$ 钻具分段贯入钻探的施工工艺，解决了该类土层 PCPT 无法满足设计深度要求的问题，并获得该非均质土的锥尖阻力 q_c 、侧壁阻力 f_s 及动孔隙水压力 u_2 。

3) 含胶结碎块、珊瑚礁非均质土很难采取到原状土样，因此通过钻探取样手段难以获得该类非均质土的力学指标，而利用 PCPT 成果计算可得该类非均质土的重要力学性质指标内摩擦角 φ 与不排水抗剪强度 S_u 。

参考文献：

[1] 徐超,赵鸿钧,汤竞.孔压静力触探及其在工程勘察中的应用[C]// 中国建筑学会工程勘察分会.中国建筑学会工程勘察分会年会论文集.北京: 中国建筑学会工程勘察分会,2004: 222-228.

[2] 汤明礼,俞炯奇,姚永新.SMP+CPTU 孔压静力触探试验简述[J].浙江水利科技,2018,46(1): 52-54.

[3] Geomil Equipement B.V.CPTask-Software version 1.40[S]. Moordrecht: Geomil Equipement B.V., 2013.

[4] ASTM International.Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils: ASTM D5778-12[S].Pennsylvania: ASTM International, 2012.

[5] ASTM International.Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System): ASTM D2487 [S].Pennsylvania: ASTM International, 2011.

(本文编辑 郭雪珍)