

海床式静力触探在黄河口海底土工程特性研究中的应用

楚立鹏¹, 孙永福¹, 宋玉鹏¹, 董立峰¹, 周其坤¹, 马彬彬², 张伟朋^{1,3}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;
3. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:海床式静力触探设备工作效率高, 能够实现从垂向上对地层的连续探测, 数据分辨率较好。通过对黄河口海域 3 个静力触探孔和 1 个地质钻孔的分析, 将研究区 20 m 以浅地层自上而下划分为粉土、粉质黏土、粉土夹粉砂或粉砂、粉质黏土、粉土五层, 静力触探曲线对粉土层中的硬壳层和粉质黏土层中的贝壳夹层等特殊地质现象有很好的反映。对粉质黏土的静力触探参数与物理力学参数进行相关性分析, 得到适合该区域的回归方程。采用基于 CPT 数据的液化判别法, 对研究区表层粉土液化可能性进行评判, 通过 Seed 简化法计算的周期应力比(CSR)与 Olsen 法计算的周期阻力比(CRR)的大小比较, 得出当抗震设防烈度为 7 度时, 研究区表层粉土不会液化, 当抗震设防烈度为 8 度时, 粉土层将发生液化, 计算最大液化深度 3.7 m。

关键词:黄河口海域; 静力触探; 液化评判; 周期应力比; 周期阻力比

中图分类号:P753

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2017)01-0022-12

doi:doi:10.3969/j.issn.1002-3682. 2017.01.003

随着海洋开发力度的增大, 关于海洋的调查研究和海上工程设施越来越多。无论开展海洋工程地质调查还是海底灾害地质评价, 海底土物理、力学指标的获取都至关重要。目前我国普遍采用钻探取样和实验室分析的方法获取海底土物理、力学参数, 但海底沉积物具有松散、高含水率、高灵敏度的特点, 导致传统取样方法不可避免的造成土体扰动, 且此方法成本费用较高, 操作比较麻烦^[1]。静力触探试验(Cone Penetration Test)作为一种快速、数据连续、再现性好、操作省力的原位测试方法, 在海洋工程地质调查和岩土工程勘察中的使用越来越多, 正成为进行工程地质条件定量评价及海底地质灾害调查与评价的重要手段^[2-3]。静力触探测试结果既可用于土类判别、土层划分, 也可用于估算地基承载力、单桩承载力及砂土和粉土液化判别等^[4]。静力触探技术目前在陆地工程勘察中的应用和发展已趋于成熟, 但在海洋工程勘察中才刚刚起步^[5]。通过分析重型海床式静力触探设备在黄河口海域实测数据, 结合地质钻孔资料, 对研究区海底土类判别、土层划分、静探参数与土体物理力学参数相关性、液化判别等方面进行探索研究。

1 概 况

1.1 研究区概况

本次研究区位于黄河水下三角洲埕岛油田海域(图 1), 该区域为黄河多次尾间改道形成的现代黄河三角洲, 工程地质条件极为复杂。由于黄河尾间的频繁改动造成海底沉积物分布不均, 且工程地质特征在不同

收稿日期: 2016-12-27

资助项目: 海洋公益性行业科研专项——近海海底地质灾害预测评价及防控关键技术研究(201005005); 青岛海洋科学与技术国家实验室
鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ03)

作者简介: 楚立鹏(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地质、工程地质方面研究. E-mail: chulipeng@fio. org. cn

(陈 靖 编辑)

区段差异较大。近几十年,由于黄河改道和径流量急剧下降,泥沙来源趋于断绝,在波浪、潮流、风暴潮及地震等外荷载作用下,在河口地区,尤其是在 1976 年以前老河口地区海底遭受快速侵蚀,发育多种灾害地质现象,对工程设施的安全稳定构成威胁^[6]。研究区水深为 10.0~11.5 m,从海底地形分类来说,属于水下岸坡部分,总体地形趋于平缓,发育侵蚀残留体、冲刷坑和冲刷沟槽等侵蚀微地貌,底质类型以粉土为主。

1.2 数据资料获取

2016 年中石化胜利油田分公司海洋采油厂委托国家海洋局第一海洋研究所对渤海某平台进行地质勘察,在平台附近完成了 3 个静力触探勘察孔和 1 个工程地质钻孔,分别编号为 C1、C2、C3 和 K3,其中,C3 与 K3 距离较近,两者相距 20 m,便于将静力触探数据与钻孔数据做对比研究。

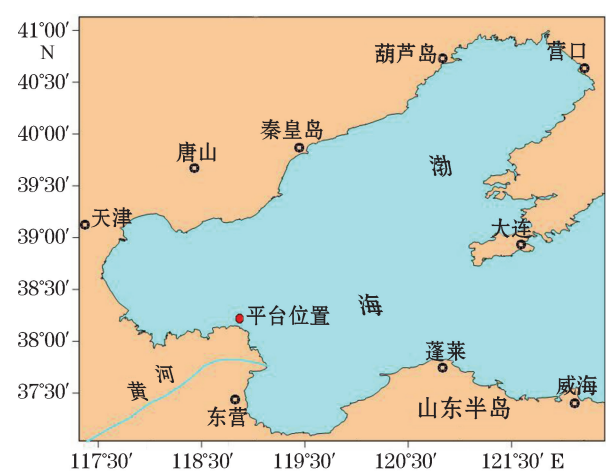


图 1 研究平台位置

Fig. 1 Location of study area and the boreholes



图 2 ROSON 100 重型海床式静力触探设备

Fig. 2 ROSON 100 heavy seabed CPT instrument

本次静力触探试验采用的是胜利油田设计院的重型海床式静力触探设备 ROSON 100(图 2),主要技术指标见表 1,设计孔深 20 m,获取的主要参数是锥尖阻力 q_c 和侧摩阻力 f_s 。钻孔柱状样经现场和室内试验分析,获取的物理力学指标主要包括含水率 ω 、湿密度 ρ 、孔隙比 e 、塑性指数 I_p 、液性指数 I_L 、黏聚力 c 、内摩擦角 Φ 、压缩系数 a 和压缩模量 E_s 等。

表 1 ROSON 100 主要技术指标

Table 1 Major technical indices of ROSON 100

项 目	参 数
最大触探深度/m	50(水深<20)
	15(水深>20)
锥尖阻力/MPa	≥50 MPa,最大误差 0.25%
侧摩阻力/MPa	0~0.75 MPa,最大误差 0.5%
分辨率/cm	2

2 静探曲线综合解译

使用上述海洋静力触探设备,严格按照《海上平台场址工程地质勘察规范》^[7]进行静力触探试验,得到锥尖阻力与侧摩阻力随深度变化的数据,并计算摩阻比,分别绘制 C1、C2 和 C3 的锥尖阻力、侧摩阻力和摩阻

比随深度变化的静力触探曲线(图 3~图 5),并根据曲线特征^[8]判定土质类型,划分地层,对特殊地质现象进行分析研究。

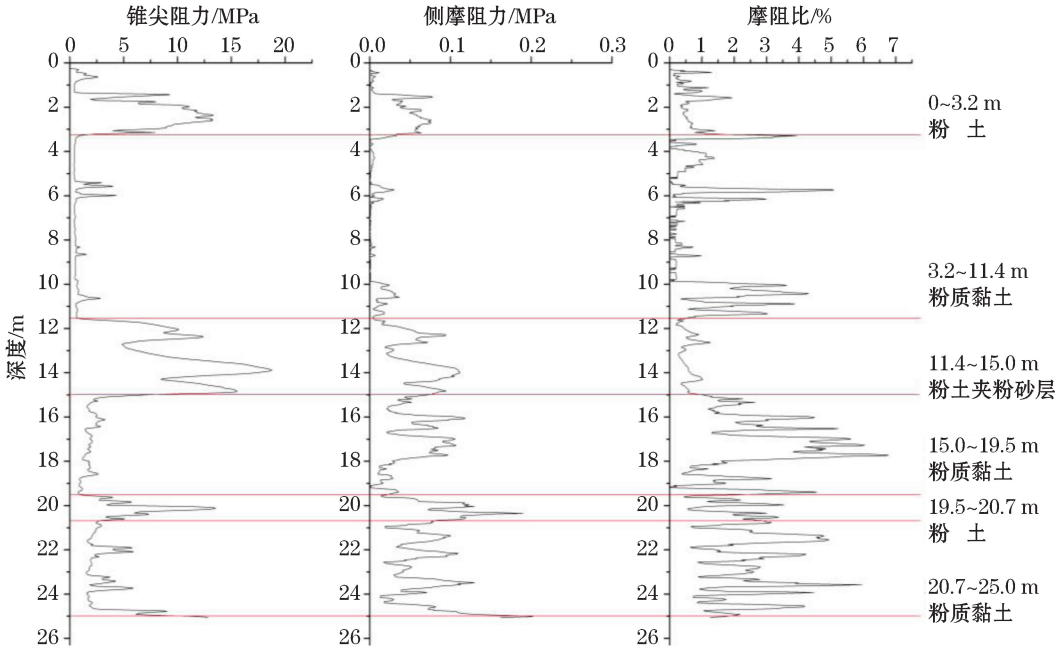


图 3 C1 静力触探曲线
Fig. 3 CPT curve C1

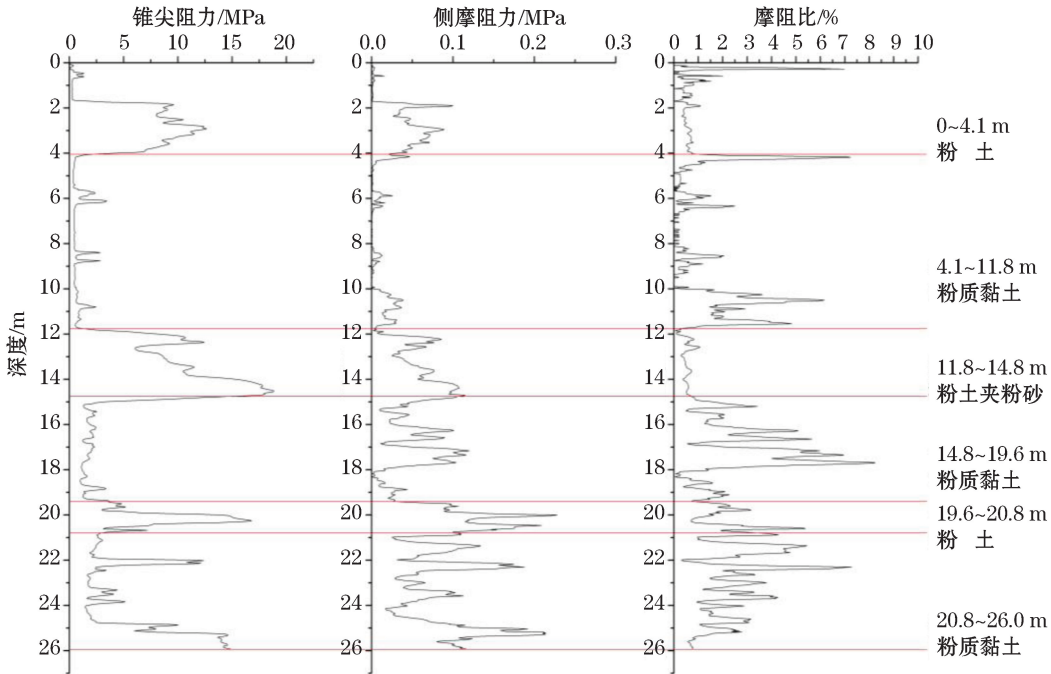


图 4 C2 静力触探曲线
Fig. 4 CPT curve C2

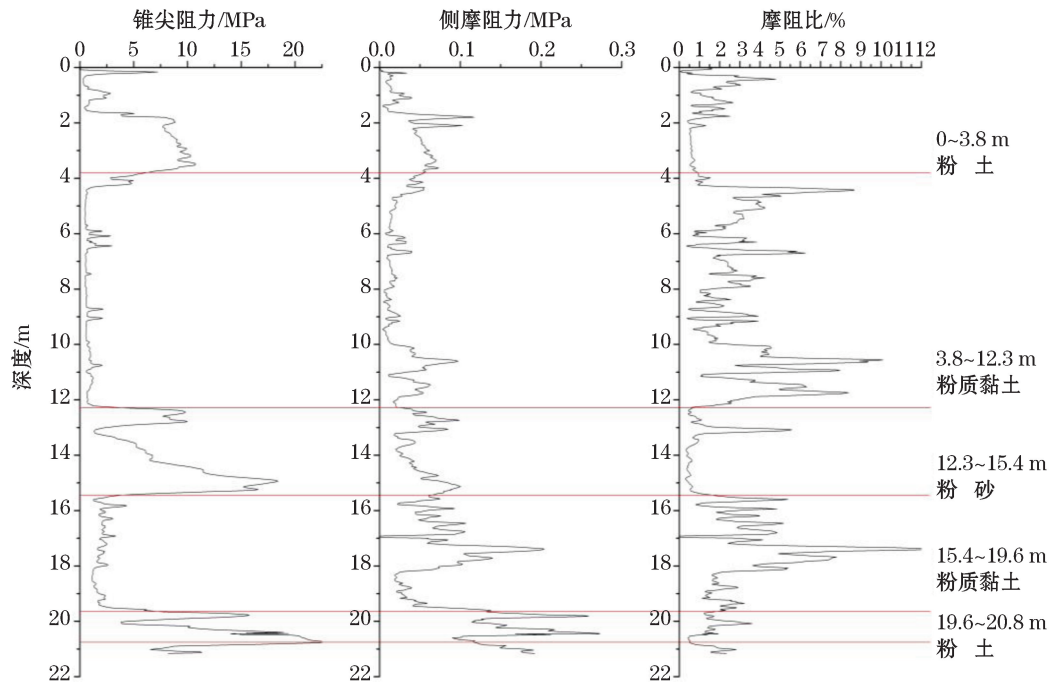


图 5 C3 静力触探曲线
Fig. 5 CPT curve C3

2.1 土类判别、土层划分

根据锥尖阻力、侧摩阻力和摩阻比随深度的变化关系,3 个触探孔 20 m 以浅土体可划分为 5 层,自上而下分别是:粉土、粉质黏土、粉土夹粉砂/粉砂、粉质黏土、粉土,各静探点 q_c , f_s 值分层统计见表 2。

表 2 C1,C2,C3 测点锥尖阻力和侧摩阻力分层统计表
Table 2 Tip resistance and side friction of different layers in CPT curves C1,C2 and C3

土 层	底界埋深/m	C1		C2		C3	
		q_c /MPa	f_s /kPa	q_c /MPa	f_s /kPa	q_c /MPa	f_s /kPa
粉 土	3.2~4.1	7.70~13.22	26~78	8.02~12.65	41~89	7.75~10.70	41~120
粉质黏土	11.4~12.3	0.41~4.35	1~30	0.46~2.87	2~39	0.49~3.0	13~78
粉土夹粉砂/粉砂	14.8~15.4	8.46~18.74	22~112	8.66~18.83	31~108	7.80~18.40	26~97
粉质黏土	19.5~19.6	1.42~3.21	54~107	1.22~2.45	51~116	1.26~4.34	60~192
粉 土	20.7~20.8	4.16~13.53	79~120	5.11~16.80	89~224	5.65~20.98	132~246

从图 3~图 5 可以看出,在锥尖阻力、侧摩阻力和摩阻比三个静探参数中,锥尖阻力随土体变化的响应较为显著,当土体由粉土变为粉质黏土时,锥尖阻力由 10 MPa 左右迅速减小到约 0.4 MPa,当到达粉土夹粉砂或砂土层时,其值又快速增大到 10 MPa 以上,超前效应和滞后效应均不明显,有利于土层分界面的确定。侧摩阻力和摩阻比相对于锥尖阻力,滞后效应较明显,可作为土层划分的辅助参考。

对 K3 柱状样做粒度分析,得到研究区内土质中值粒径 d_{50} 随深度变化曲线(图 6)。通过对比静探曲线

和中值粒径曲线发现,锥尖阻力 q_c 与中值粒径 d_{50} 在变化态势上具有很好的一致性, q_c 大的土层, d_{50} 也较大,反之亦然,说明 q_c 与土体颗粒粗细密切相关。

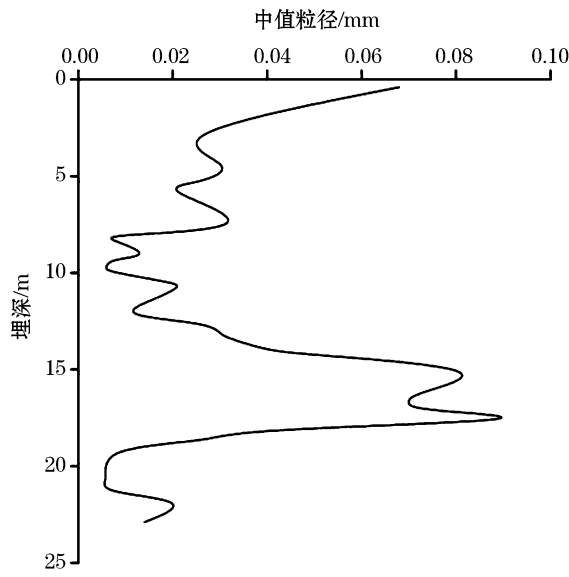


图 6 中值粒径随深度变化曲线
Fig. 6 Change of the median diameter with the soil depth

2.2 硬壳层

同一土层中,贯入阻力随深度增加应略有增加,但在第一层粉土中,埋深 1.5~4.0 m 左右土体实测锥尖阻力和侧摩阻力急剧增加,锥尖阻力最大值为 13.22 MPa,侧摩阻力最大值为 120 kPa,厚约 2.5 m 土体形成密实的硬壳层。经钻探取样和室内试验分析,表层粉土和下伏粉质黏土层主要物理力学参数统计见表 3。

表 3 硬壳层粉土与下伏粉质黏土主要物理力学参数对比
Table 3 Comparison of main physical-mechanical parameters between the silt in the hard crust layer and the silty clay in the underlying layer difference percentages

土 层	含水率 /%	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	压缩系数 / MPa^{-1}	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / $^{\circ}$
粉 土	23.2	2.0	0.67	27.3	20.0	0.09	18.3	19.6	23.8
粉质黏土	42.0	1.8	1.14	46.5	30.9	0.59	3.9	14.9	10.0

根据表 3 可知,硬壳层工程地质特征表现为低含水率,低孔隙比,低液限、塑限,压缩性小,密实度高,抗剪强度大。结合土质类型和所在区域的水动力条件,孙永福等^[9]认为风暴潮作用下粉土发生液化形成较密实的扰动层,是硬壳层的主要成因。

2.3 静探曲线“突变”解译

第二层粉质黏土中,C1,C2 和 C3 静探曲线在 6,8.4 和 11 m 埋深处均有“突变”,锥尖阻力和侧摩阻力异常增大,锥尖阻力由 0.4 MPa 左右增加至 3~4.35 MPa,侧摩阻力由 2 kPa 左右增加至 30 kPa,甚至

70 kPa。3 个触探点曲线变化特征在不同埋深处高度一致,排除了偶然因素的影响,通过对 K3 钻孔柱状样做室内分析,判定曲线突变现象与土质成分变化有关。埋深 6 m 处粉质黏土中含极多有机质,有腥臭味,发现较多贝壳碎片,且静探曲线表现为锥尖阻力和侧摩阻力曲线跳变形态基本一致,多为单峰、尖形跳变,与徐钰等^[10]测试含贝壳层的静探曲线形态基本一致,因此推断埋深 6 m 处曲线的突变是由贝壳导致的锥尖阻力和侧摩阻力异常增大。通过对岩芯室内试验分析发现,埋深 8.2~8.4 m 为粉土夹层,因此 8.4 m 处曲线突变是由粉质黏土中夹有粉土导致的。埋深 11 m 处既未发现贝壳,也无粉土夹层,该处粉质黏土粉粒含量较高,密实度较大,导致土体稍硬,造成锥尖阻力和侧摩阻力增大。

2.4 土层划分精准度分析

研究区内 20 m 以浅地层自上而下为粉土、粉质黏土、粉土夹粉砂或粉砂、粉质黏土和粉土,构成独特的沉积旋回。在粒级上,粗粒、细粒相间分布,从锥尖阻力和侧摩阻力变化特征来看,软弱层和硬层交替出现。

利用静力触探曲线进行土层划分,具有速度快、剖面连续等优点,为检验其精度,C3 与 K3 地层划分对比见图 7。

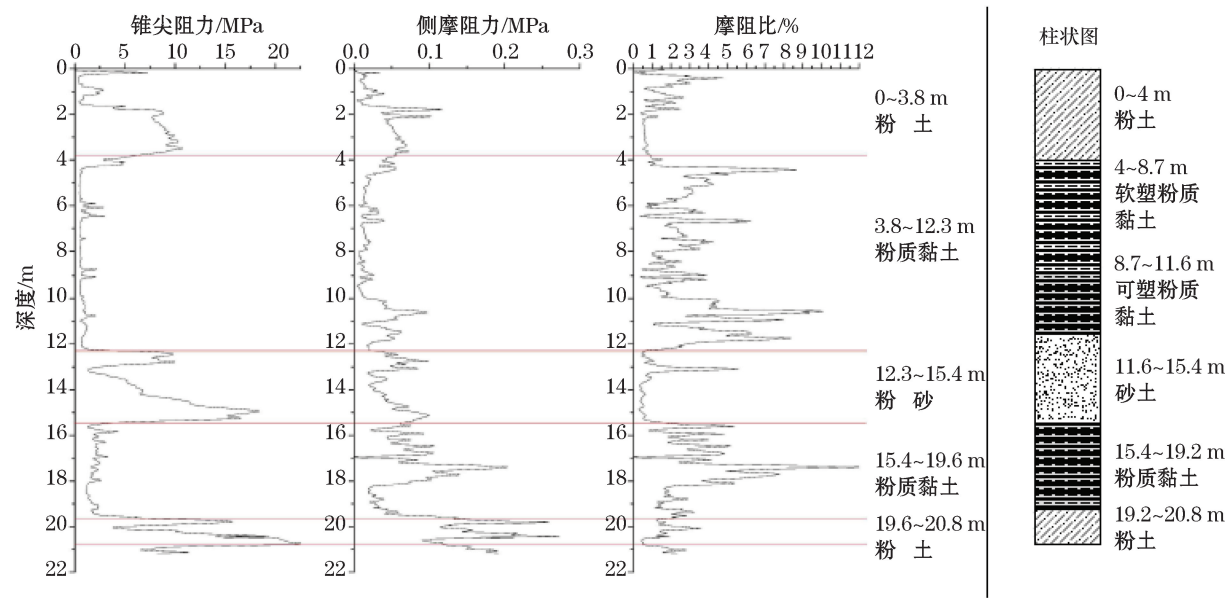


图 7 静力触探与地质钻孔划分地层剖面对比
Fig.7 Contrast of stratigraphic divisions between CPT and geological drilling

静力触探 C3 与地质钻孔 K3 自上而下划分地层底界深度及差值、百分比见表 4。

表 4 C3 与 K3 划分地层底界面埋深及差值百分比

土 层	地层底界面埋深/m		C3 与 K3 差值	百分比(差值/K3)
	C3	K3		
粉 土	3. 8	4. 0	0. 2	5%
粉质黏土	12. 3	11. 6	0. 7	6%
粉 砂	15. 4	15. 4	0	0
粉质黏土	19. 6	19. 2	0. 4	2%
粉 土	20. 8	20. 8	0	0

从表 4 和图 7 可知,静力触探与地质钻孔在标定地层底界深度上具有很好的一致性,最大差值 0.7 m,最大误差 6%,表明静力触探数据可以很好地反映地层分界面。但就第二层厚达 8.5 m 的粉质黏土层而言,地质钻孔可细分为软塑和可塑两亚层,分界面在静力触探曲线上表现的并不明显,因此同一土质类型层内精细划分有待进一步研究。

3 粉质黏土的静探参数与物理力学参数相关性分析

静力触探反映了地层在垂直方向上的物理力学性质变化规律,能查明钻探和取样分析所不易分辨的力学性质的微小变化^[11]。将 K3 所测静探数据与 C3 钻孔土样样品的物理力学参数按粉质黏土、粉土、粉砂进行分析,发现两者之间具有很好的相关性。将粉质黏土的静力触探参数与物理力学参数进行拟合回归分析,得到适合该区域的回归方程。

此次试验中,C3 样品长度为 20 cm,K3 静探数据采样间隔为 2 cm,取与样品取样深度对应的 10 个锥尖阻力数据的平均值进行回归分析,共获得 14 组统计样本,经分析拟合,得到粉质黏土的孔隙比 e 、液性指数 I_L 、黏聚力 C 、内摩擦角 Φ 、压缩系数 a 、压缩模量 E_s 、抗剪强度 τ 与锥尖阻力的相关关系(图 8),回归方程见表 5。

表 5 粉质黏土静力触探参数与物理力学指标经验公式

Table 5 Empirical formulas for CPT parameters and physical-mechanical indexes in the silty clay

物理力学参数	回归方程	相关性 R^2	静探参数与物理力学参数取值范围 ($0.335 \leq q_c \leq 2.023$ MPa)
e	$e = 1.155\ 5 \exp^{-0.351q_c}$	0.846 7	0.505~1.099
I_L	$I_L = -0.438\ln(q_c) + 0.487\ 6$	0.813 6	0.12~0.97
C	$C = 14.051\ln(q_c) + 24.349$	0.825 5	9~38
Φ	$\Phi = 4.130\ 7\ln(q_c) + 11.988$	0.829 7	6.5~16.3
a	$a = 0.559\ 3 \exp^{-0.579q_c}$	0.884 1	0.14~0.47
E_s	$E_s = 3.795\ 5q_c + 1.938$	0.859 5	2.44~12.17
τ	$\tau = 40.346\ln(q_c) + 51.301$	0.964 9	10.10~87.24

从图 8、表 5 中可见,随着锥尖阻力 q_c 增加,粉质黏土的孔隙比 e 、液性指数 I_L 、压缩系数 a 减小,它们之间呈负相关关系,其中孔隙比 e 和压缩系数 a 以指数形式减小,液性指数 I_L 以对数形式减小。而粉质黏土的黏聚力 C 和内摩擦角 Φ 以及压缩模量 E_s 、抗剪强度 τ 随锥尖阻力的增加而增大,它们之间呈正相关关系,其中黏聚力 C 、内摩擦角 Φ 和抗剪强度 τ 以对数形式增大,压缩模量 E_s 以线性形式增大。根据获得的经验公式可以利用静力触探参数推算研究区内粉质黏土的物理力学性质指标,进一步了解土的工程地质性质。

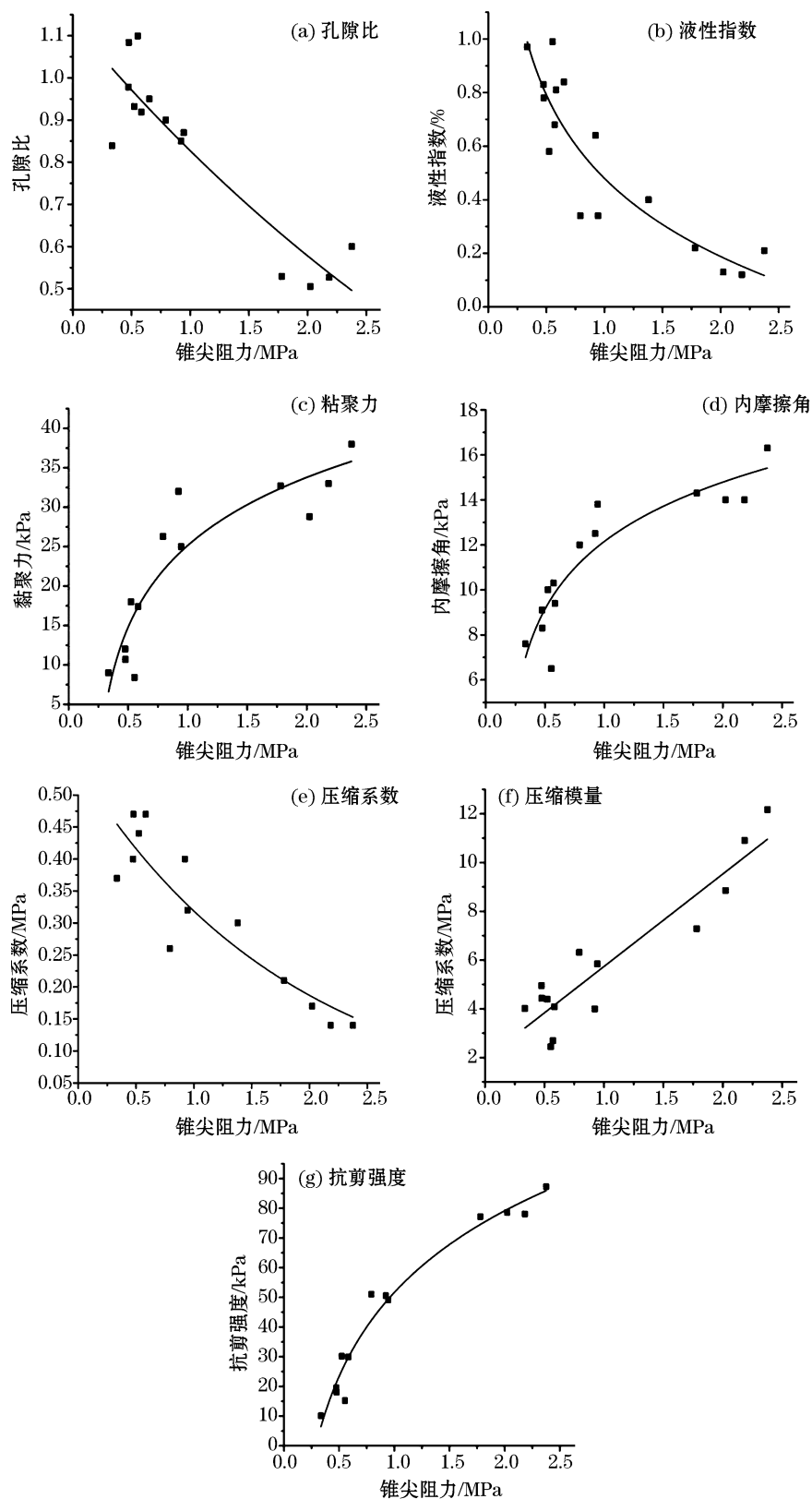


图 8 粉质黏土锥尖阻力与物理力学参数相关性

Fig. 8 Correlation between the tip resistance and the physical-mechanical parameters of the silty clay

4 表层粉土液化评判

研究区海底表层为 3~4 m 厚的饱和粉土层,在地震作用下存在液化的可能性。目前,基于 CPT 测试资料,国外较多采用 Seed 简化法^[12],其实质是将砂土和粉土中由振动作用产生的剪应力与产生液化所需的剪应力进行比较。经 SEED H B 修正后简化成等效周期应力比 CSR 与地基土的周期阻力比 CRR 的比较。如果 $CRR > CSR$,则判别为不液化;如果 $CRR < CSR$,则判别为液化。它属于试验一分析法,也是最早提出的可判别具有水平地面自由场地液化的方法,许多影响液化的因素均得到适当考虑^[13]。

4.1 周期应力比(CSR)的计算

周期应力比是根据场地的地震基本设计参数计算的,目前 Seed 等^[12]和 Youd 等^[14]提出的计算公式被普遍接受,公式如下:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v_0}} = 0.65 \frac{\sigma_{v_0}}{\sigma'_{v_0}} \frac{a_{\max}}{g} r_d \cdot MSF^{-1}, \quad (1)$$

式中, τ_{av} 为地震产生的平均剪应力(kPa), σ_{v_0} 为土体计算深度处竖向总应力(kPa), σ'_{v_0} 为土体相同深度处竖向有效应力(kPa), $a_{\max}$ 为地震动峰值加速度(m/s^2), g 为重力加速度(m/s^2), r_d 为应力折减系数, MSF 为震级比例系数。

K3 表层粉土基本物理力学参数见表 6。

表 6 表层粉土物理力学参数
Table 6 Physical-mechanical parameters of the surface silt

编 号	埋深/m	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	G_s	$w/\%$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	I_p	I_L	a_{1-2}/MPa^{-1}
K3-1	1.9	1.90	2.69	24.1	27.4	20.3	7.1	0.54	0.11
K3-2	2.6	2.04	2.69	23	27.7	20.5	7.2	0.35	0.08
K3-3	2.9	2.00	2.69	22.8	26.7	19.4	7.3	0.47	0.1
K3-4	3.8	2.02	2.69	22.9	27.2	19.7	7.5	0.43	0.08

地震动峰值加速度 $a_{\max}$ 取值参照《建筑抗震设计规范》^[15],抗震设防烈度为 7 度、8 度时分别取 0.15 和 0.30 g。应力折减系数 r_d ^[16]按下式计算:

$$r_d = \begin{cases} 1.000 - 0.00765z & z \leq 9.15 \text{ m} \\ 1.174 - 0.00267z & 9.15 < z \leq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

4.2 周期阻力比(CRR)的计算

周期阻力比的计算方法,国外常用的有两种,分别是 Robertson 法^[17]和 Olsen 法^[18-19],本文选择 Olsen 简化法法计算粉土的周期阻力比,其研究成果可参考相关文献^[20],CRR 的计算公式如下:

$$CRR = 0.00128q_{c1} - 0.025 + 0.17R_f - 0.028R_f^2 + 0.0016R_f^3, \quad (3)$$

式中, $q_{c1} = \frac{q_c}{(\sigma'_{v_0})^{0.7}}$, q_c 为锥尖阻力(kPa); R_f 为摩阻比, $R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100\%$, f_s 为侧摩阻力(kPa)。

运用上述 CSR 和 CRR 计算公式,对 C1,C2,C3 静力触探点在 7 度、8 度地震作用下不同深度处粉土液化可能性进行评判,计算分析结果见表 7 和表 8。

表 7 度地震烈度作用下静力触探液化判别结果

Table 7 Evaluation of CPT liquefaction under the action of 7 degree seismic fortification intensity

孔 号	深度/m	CSR	CRR	液化判别结果
C1	1.9	0.720	1.389	不液化
	2.9	0.540	1.040	不液化
C2	2.1	0.694	1.312	不液化
	3.7	0.471	0.829	不液化
C3	2.6	0.576	0.980	不液化
	3.8	0.463	0.968	不液化

表 8 度地震烈度作用下静力触探液化判别结果

Table 8 Evaluation of CPT liquefaction under the action of 8 degree seismic fortification intensity

孔 号	深度/m	CSR	CRR	液化判别结果
C1	1.9	1.440	1.389	液化
	2.9	1.080	1.040	液化
C2	2.1	1.388	1.312	液化
	3.7	0.942	0.829	液化
C3	2.6	1.152	0.980	液化
	3.8	0.926	0.968	不液化

通过计算分析发现,研究区表层粉土在抗震设防烈度为 7 度时不会发生液化,而当抗震设防烈度为 8 度时,除 C3 孔 3.9 m 埋深处未液化外,其余测试点均发生液化,且液化深度几乎达到粉土层埋深底界,因此可以推断在 8 度地震烈度作用下,研究区表层粉土均会发生液化。

5 结 论

本文应用海床式静力触探设备与技术,获得了黄河口海底土的锥尖阻力、侧摩阻力和摩阻比等静探参数值,通过对静探曲线、静探参数值的综合分析与计算,得到以下结论:

- 1)通过海床式静力触探技术获得的静力触探曲线能够很好地反映地层的垂向变化,精确度较高,对硬壳层、贝壳夹层等特殊地质现象有很好地反映。
- 2)本文所建立的粉质黏土静力触探参数与物理力学指标指标之间的相关方程可以用于通过 CPT 原位测试来计算海底粉质黏土的物理力学参数,更全面的掌握海底土的工程特性。
- 3)研究区表层粉土按抗震设防烈度为 7 度设计时,不会发生液化;8 度时,最大液化深度为 3.7 m,设计海洋工程构筑物时应予以重视。

参考文献(References):

[1] 陈培雄,潘国富,许建灵,等.东海陆架海底浅表层土静力触探参数与物理力学指标相关分析[J].工程勘察.2009,37(6):34-37.
[2] DE P J, BERIGEN F L.Pile foundation for large North Sea structures[J].Marine Geotechnology, 1979,3(3):267-314.
[3] ROBERTSON P K.Soil classification using the cone penetration test[J].Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27 (1): 151-158.
[4] LUNNET, ROBERTSON P K, POWELL J J M.Conepenetration Testing in Geotechnical Practice[M].Oxford: Chapman & Hall, 1997.
[5] 陆凤慈,曲延大,廖明辉.海上静力触探(CPT)测试技术的发展现状和应用[J].海洋技术,2004,23(4):32-36.

- [6] 宋玉鹏,孙永福,李淑玲.轻型海洋静力触探系统在黄河水下三角洲的应用[J].海洋开发与管理,2012,29(1):61-66.
- [7] 中华人民共和国国家标准编写组.海上平台场址工程地质勘察规范:GB/T 17503—2009[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [8] 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,1997:6-8.
- [9] 孙永福,董立峰,宋玉鹏.黄河水下三角洲粉质土扰动土层特征及成因探析[J].岩土力学,2008,29(6):1494-1499.
- [10] 徐钰,韩文功,张光德,等.黄河三角洲近地表岩土参数分析方法探讨[J].地球物理学进展,2015,30(4):1952-1958.
- [11] 简文彬,吴振祥,刘慧明,等.闽东南沿海地区软土静力触探参数相关分析[J].岩土力学,2005,26(5):733-738.
- [12] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [13] 蔡国军,刘松玉,董立元,等.基于静力触探测试的国内外砂土液化判别方法[J].岩石力学与工程学报,2008,28(5):1019-1027.
- [14] YOUD T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(4): 297-313.
- [15] 中华人民共和国国家标准编写组.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [16] LIAO S C C, VENEZIANO D, WHITMAN R V. Regression models for evaluating liquefaction probability[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1988, 114(4): 389-411.
- [17] ROBERTSON P K, WRIE C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442-459.
- [18] OLSEN R S. Liquefaction analysis using the cone penetrometer test[C]// Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, 1984: 247-254.
- [19] OLSEN R S. Using the CPT for dynamic site response characterization[C]// Proceedings of Earthquake and Soil Dynamic 2th Conference. New York, 1988: 374-388.
- [20] OLSEN R S, KOESTER J P. Prediction of liquefaction resistance using the CPT[C]// Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing. Linköping, 1995: 251-256.

Application of Seabed Cone Penetration Test in Research on the Seafloor Geotechnical Engineering Characteristics in the Yellow River Estuary

CHU Li-peng¹, SUN Yong-fu¹, SONG Yu-peng¹, DONG Li-feng¹, ZHOU Qi-kun¹,
MA Bin-bin², ZHANG Wei-peng^{1,3}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *East China Normal University, State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Shanghai 200062, China;*

3. *Lanzhou University, School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The equipment for seabed cone penetration test (CPT) has a high working efficiency and can detect the strata continuously and vertically with a better data resolution. By analyzing 3 CPT boreholes and 1 geological borehole taken in the Yellow River Estuary, the strata of 20 meters below the seabed are divided into 5 layers. From top to bottom, they are silt, silty clay, silt interbedded with silty sand or silty sand, silty clay and silt, respectively. The CPT curves can give better reflections of special geological phenomena such as the hard crust layers in the silt and the shell interlayers in the silty clay. A regression equation suitable for the study area is obtained through the correlation analysis carried out between the CPT parameters and the physical-mechanical parameters of the silty clay. For evaluating the liquefaction potential of the surface silt in the study area, the methods for liquefaction evaluation based on CPT data are adopted, of which the Seed method and the Olsen method are considered to be accurate in predicting liquefaction resistance of sandy soils. By comparing the cyclic stress ratio (CSR) calculated by the Seed method with the cyclic resistance ratio (CRR) worked out by the Olsen method, it can be concluded that the surface silt in the study area won't be liquefied if the seismic fortification intensity is designed as 7 degree. If the seismic fortification intensity reaches 8 degree, however, the silt layer will be liquefied, with the calculated maximum liquefaction depth being 3.7 meters.

Key words: Yellow River Estuary; Cone Penetration Test (CPT); liquefaction evaluation; Cyclic Stress Ratio (CSR); Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Received: December 27, 2016