

珠江口内伶仃岛以北水域海底工程地质条件评价

石要红^{1,2}, 曾宁烽², 陈太浩², 夏真²

SHI Yaohong^{1,2}, ZENG Ningfeng², CHEN Taihao², XIA Zhen²

1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266003;

2. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760

1. *China University of Oceanography, Qingdao 266003, Shandong, China;*

2. *Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510760, Guangdong, China*

摘要:珠江口内伶仃岛以北水域海底工程地质调查表明,该海域海底表层土主要为流泥和淤泥。钻孔揭露海底以下36.6 m土层,从上到下依此划分为11层,为流泥、淤泥质土、淤泥、流泥、淤泥、粗砾砂、粉质粘土、中细砂、花岗岩残积土、强风化花岗岩和中风化花岗岩。在综合研究了区域地质、海底地形地貌、地质灾害类型、海底土的物理力学性质、土体稳定性、砂土液化特性的基础上,将研究区划分为工程地质Ⅰ区、工程地质Ⅱ区和工程地质Ⅲ区,进行了工程地质条件和各区的稳定性评价,认为Ⅰ区为次稳定区,Ⅱ区为不稳定区,Ⅲ区为次不稳定区。

关键词:海底土;工程地质分区;稳定性评价;珠江口

中图分类号:P642;P75

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2005)10~11-1052-08

Shi Y H, Zeng N F, Chen T H, Xia Z. Evaluation of submarine engineering-geological conditions in the sea area north of Neilingding Island at the Pearl River Mouth, Guangdong, China. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(10-11):1052-1059

Abstract: Submarine engineering-geological investigations in the sea region north of Neilingding Island at the Pearl River Mouth show that the submarine surface soils in the sea region consist mainly of flowing mud and silt. Drilling has revealed that the soils to a depth of 36.6 m from the sea bottom may be divided from the top downward into 11 layers, which are flowing mud, silty mud, silt, flowing mud, silt, coarse gravelly sand, silty clay, medium-fine sand, granite residual soil, strongly weathered granite and moderately weathered granite. On the basis of an integrated study of the regional geology, submarine topography and geomorphology, geo-hazard types, physical-mechanical properties of submarine soils, soil stability and sandy soil liquefaction, the study region may be divided into three engineering-geological areas: area I (metastable area), area II (less stable area) and area III (unstable area). Stability and engineering-geological conditions of these areas have been evaluated.

Key words: submarine soil; engineering-geological area; stability evaluation; Pearl River Mouth

珠江口北依广州与内陆相接,东靠深圳,西傍中山、珠海,南连香港、澳门,直通大海,是广东省最大的出海口。改革开放以来,珠江三角洲地区凭借优越的地理位置、丰富的自然资源,成为广东省经济社会发展的龙头和主体。由于近岸地区处于海陆交互地带,地质环境复杂。随着海洋资源的开发和海上工程构筑物的增加,进行海底工程地质条件和海底稳定性的研究意义重大。

1 区域地质背景

研究区位于珠江口内伶仃岛以北,坐标范围在113°32′~113°59′E和22°22′~22°38′N之间,面积约1400 km²(图1)。据浅层剖面反射、单道地震反射特征,结合区域地质资料、海底取样和钻孔资料分析,珠江口虎门—内伶仃洋段区域地层可划分出3个地震层序,自上而下为层A、层B和层C。层A地质时代

收稿日期:2005-01-15;修订日期:2005-06-08

地调项目:中国地质调查局《珠江三角洲近岸海洋地质环境与地质灾害调查》项目(编码200311000006)成果。

作者简介:石要红(1966-),女,高级工程师,从事海洋环境工程地质、灾害地质调查研究。E-mail: yaohongshi@21cn.com

为全新世冰后期海侵以来逐渐堆积而成的沉积物,为全新世浅海相沉积,局部受河流影响,有河道沉积,岩性主要为粘土质砂土和粉砂质粘土,含贝壳等生物碎屑;层B为一套粘土质粉砂、细砂—粗砂(含砾)、粉砂质粘土—粘土的以陆相沉积和剥蚀为主的沉积,局部为海陆交互沉积,地质时代为晚更新世;层C主要为基岩风化物 and 基岩,可能有3种类型:花岗岩,主要为燕山三期(γ_5^{2-3})、四期(γ_5^3)的花岗岩类;第三系沉积岩,推测多为第三纪沉积砂岩、白垩纪含砾粗砂岩和硅化角砾岩;震旦纪变质岩和前古生代花岗岩片麻岩等^[1]。

伶仃洋及其周围岩浆活动十分活跃,尤其是燕山运动构成了典型的具花岗结构或斑状结构的岭南花岗岩系^[1]。岩浆活动多沿断裂带发生,在几组断裂的复合、交会带上最为剧烈。本区的下伏基岩多由花岗岩组成,浅埋出露或深潜深藏,构成了不同程度的风化岩带^[2]。

珠江口近海区地处南海地块与华南地块的北东东向拼接线上,属南海北部地壳的不稳定区。研究区位于华南褶皱系的中部——珠江三角洲断陷区。珠江口海区北界为高要—惠来深断裂带,南界为珠外拗陷北缘隆断带,北西以北东东向的紫金—博罗大断裂为界,东南为莲花山断裂带的东断裂束。区内地质构造复杂,岩浆活动频繁,构造形变以断裂构造为主^[3]。

新构造运动基本上继承了燕山运动以来的构造格局和运动特征,在研究区内具有明显的断块垂直差异升降,断陷盆地的发育和成熟与其密切相关。火山活动主要发生在中更新世后期和晚更新世,且多发生在NW向断裂上。地震级数沿海 $M_s > 7.0$ 级,内陆 $M_s < 4.75$ 级,新构造运动在本区内弱外强,向沿海有增强趋势^[3]。珠江口伶仃洋及周围的强震构造主要与NE—NEE、NW、近EW向3组断裂的分布和它们的相互交会地带有关,明显具有条带状或丛状分布特征^[4,5]。根据《广东省地震烈度区划图》(1:80万,2000)^[6],珠江三角洲断陷区及伶仃洋区带的地震基本烈度为Ⅶ度。

1993年,国家地震局地壳应力研究所、广东省地震局对珠江口伶仃洋远场区320 km范围和近场区30 km范围的工程地震安全性进行了专题研究,研究结果认为伶仃洋断裂发育。据资料,这些断裂在晚更新世晚期以来(距今2.5万年以来)未有活动迹象,相对而言,比较稳定。

2 海底地形地貌与地质灾害类型

2.1 海底地形地貌特征

伶仃洋是华南最大的河口湾,地势由湾顶向湾口倾斜,呈漏斗形态向南张开。海底地形在东西方向起伏相间、地形

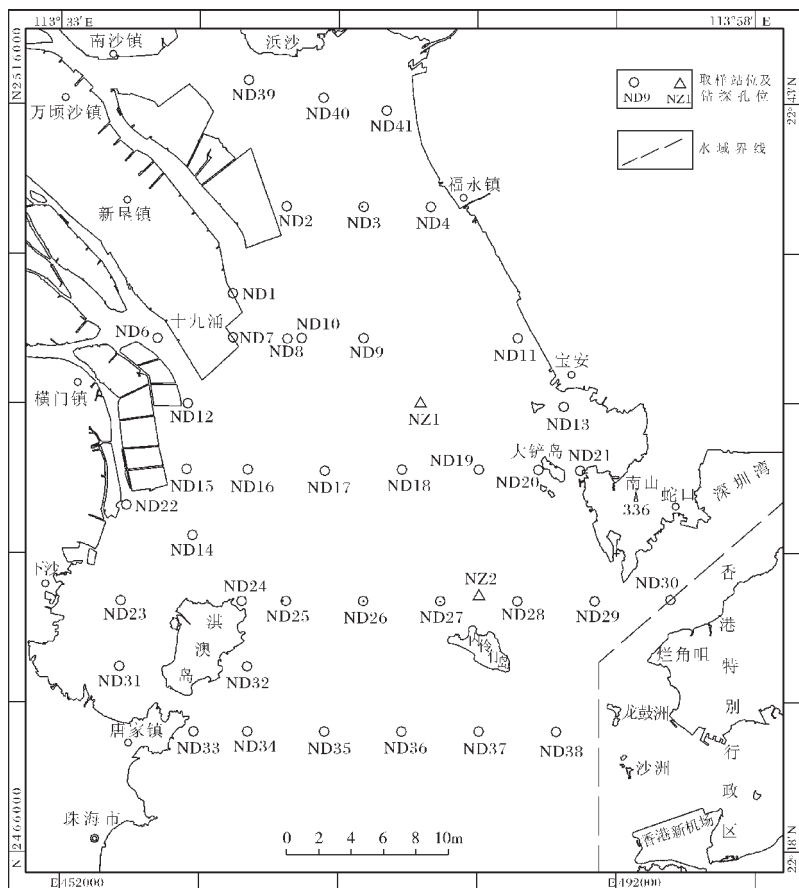


图1 取样站位和NZ1钻孔位置

Fig.1 Locations of sampling and borehole NZ1

变化大。内伶仃洋地形主要受滩槽影响,水下地形水深线大致沿水道呈NNW—NW方向分布。区内地形坡降最大可达 115.68×10^{-3} ,最小为 0.13×10^{-3} 。内伶仃洋水下格局为三滩两槽,从西向东依次为:西滩、东槽(伶仃水道)、中滩(矾石浅滩)、西槽(矾石水道)和东滩。

西滩水深最浅,最大水深近8 m。东槽为主要航道,测量的最大水深为15 m。水道南北向较均匀,水深变化小;东西向则表现为陡坡,坡降较大。该水道在北部与西槽相交,汇合成内伶仃洋最大的川鼻水道。中滩主要为矾石浅滩,水下地形较平缓,水深在4~7 m之间。西槽呈北宽南窄状,水深变化较小,多在7~8 m之间,最大水深可达16 m。东滩沿内伶仃洋东岸分布,水深多小于3 m,地形变化较小。

地貌类型主要包括槽沟、沙波、洼地和浅滩。西滩在淤高的同时将迅速向东南延伸,中滩淤积抬高的速度较为缓慢,东滩淤积也较缓慢。西槽和东槽是伶仃洋的2条深水槽道。西槽受西滩的逼淤威胁,水道严重淤浅萎缩。东槽稳定性较高,但局部有缩窄刷深趋势。

2.2 地质灾害类型及危害

主要地质灾害类型有浅层气、活动断层和沙波,海底地形

表现为不规则浅埋基岩(距海底15 m以内)、槽沟、洼地、浅滩。

由于河流带来大量陆源碎屑,以流泥和淤泥为主的海底土含有丰富的有机质,它们受到细菌的分解逐步转化为气体,一般埋深较浅。浅层气主要分布于研究区西部,其次是北部和东南部。浅层气外泄会引起土层压力降低,造成土层不均匀沉陷,使其上的输油气管线断裂、构筑物倾覆。在进行海上管线铺设和构筑物建设时应避开含气区。

据单道地震剖面资料,一条第四纪以来有过活动的中、浅层正断层位于 114°45′00″~114°50′00″E 与 22°25′30″~22°29′00″N 之间内伶仃岛以北 1.5 km,呈北西向延伸,长 7 km,从基岩断至表层的活动断层,断层距海底 20 m 以内,基岩被切割,其上第四系部分错移。断距 7~25 m,从西北往东南断距变大,倾角 50~80°。

沙波主要沿槽沟分布。沙波波峰线走向以 NE 向为主,与水流方向近正交。由于挖沙,沙波遭受较大破坏,沙波范围均较小。珠江河口区的水动力条件较强,在沙波区铺设管线时,对其潜在的危害应予以重视。

浅埋基岩是指埋深距海底 15 m 以内的不规则基岩。基岩面起伏,不利于海底工程的建设与运营安全。

伶仃洋口门多,槽沟发育,是水路交通通道,但对某些海上工程则具有明显的限制作用,如海底电缆、海底输油管线的铺设等。在这些海洋工程施工前,应查明槽沟的宽度、走向。

洼地的地形起伏变化,且水动力作用较强,对海底电缆和输油气管线铺设等海洋工程有潜在的危害性。

浅滩的迁移、活动和改造,不但直接影响锚泊,而且对其上的插桩和管线等海洋工程设施会造成极大的危害,并对其移动前方的工程空间,亦有掩埋、冲击、拖曳等严重威胁。

3 海底土体物理力学性质及工程地质特征

3.1 研究材料与方法

野外样品采集包括 40 个站位和一个钻孔(图 1),共分析 150 个样品,取样水深 1~20 m。

在海上取样现场,将重力取样器取得的柱状样截成 40 cm 长。在各样品顶、底面进行袖珍十字板剪切和微型贯入阻力试验,测试土样的不排水剪切强度、承载力等指标。现场测试时,首先进行肉眼鉴定描述,然后在削平整的土样表面进行测试,每项试验重复 3 次,取其平均值。样品测试后加盖、蜡封,垂直放置在样品

箱内,尽最大可能减少样品受到的扰动。

小型十字板剪切试验采用 DQZ₁₋₁ 型袖珍十字板剪力仪。微型贯入阻力试验采用 WG-II 型系列电子数显贯入仪。

样品在室内进行常规土工试验分析。试验方法和过程严格按照《土工试验方法标准(GB/T-50123-1999)》、《港口工程地质勘察规范 JTJ240-197》进行。根据样品的类型,分别测量样品的含水率、天然密度、土粒密度、液塑限等参数,进行不排水静三轴剪切试验,获得土的粘聚力和内摩擦角。

3.2 海底表层土的类型及其物理力学性质

海底表层土有流泥、淤泥、淤泥质土和淤泥混砂 4 种类型,主要为流泥、淤泥(图 2)。

海底表层土的天然含水率 27.6%~111%,天然孔隙比 0.701~2.861,压缩系数 0.44~3.380 MPa⁻¹,微型贯入承载力标准值 15.5~52.1 kPa,扭力十字板不排水剪切强度 2.8~11.6 kPa,粘聚力 0.3~18.6 kPa,内摩擦角 2.31°~14.9°。

海底表层土的天然含水率、天然孔隙比、压缩系数、粘聚力和内摩擦角在淇澳岛—内伶仃岛—大铲岛一带变化较大,在其他区域变化较为平缓。天然含水率和天然孔隙比还具有由岸边至江心逐渐减小的变化趋势。

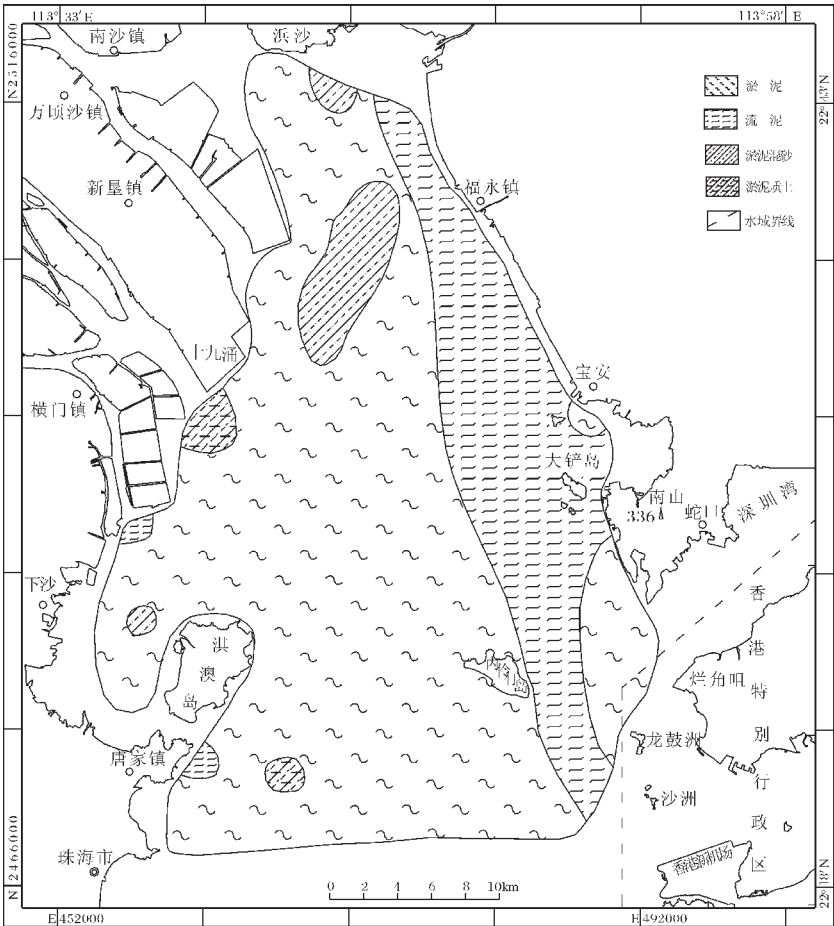


图2 海底土质类型分布图

Fig.2 Distributions of submarine soil types

表1 工程地质层物理力学综合指标

Table 1 Integrated physical-mechanical indices of engineering geological layers

工 程 地质层	天 然 含 水率/%	天然密度 g/cm ³	天 然 孔隙比	塑性指数	液性指数	压缩系数 /MPa ⁻¹	粘聚力 /kPa	内摩擦 角/°	容许承载 力/kPa
1	88.5	1.55	2.211	17.4	3.35	1.70	6.4	5.0	<30
2	42.4	1.67		12.8	2.10	1.25	3.8	11.2	75
3	72.9	1.62	1.801	15.7	3.11	1.93	12.9	12.2	<30
4	90.4	1.48	2.340	16.7	3.56	2.11	6.7	14.0	<30
5	77.3	1.52	2.031	17.7	2.87	2.87	5.0	14.0	<30
6	12.0	2.19							280
7	36.6	1.85	0.921	14.3	0.99	0.58	10.3	17.5	130
8									230
9									300
10									500
11									1000

4 工程地质层及其物理力学性质

根据研究区的钻孔NZ1资料(图3),海底土层自上而下可划分为以下11个工程地质层。第1层:流泥,层厚5.8 m;第2层:淤泥质土,层厚1.0 m;第3层:淤泥,层厚1.4 m;第4层:流泥,层厚4.1 m;第5层:淤泥,层厚5.3 m;第6层:粗砾砂,层厚8.8 m;第7层:粉质粘土,层厚2.0;第8层:中细砂,层厚2.2 m;第9层:花岗岩残积土,层厚1.5 m;第10层:强风化花岗岩,层厚4.0 m;第11层:中风化花岗岩,钻进厚度为0.5 m。

综合分析海底表层土和NZ1钻孔各土层的物理力学性质^[7],将工程地质层土的物理力学指标平均值列于表1。分析结果表明,土的天然含水率、天然孔隙比、压缩系数随深度增加而减小,天然密度、粘聚力和容许承载力随深度增加而增大。

5 讨 论

5.1 土体稳定性

研究区内海底地形较平坦,表层土主要类型为非常软的粘性土,在极端波浪荷载作用下,表层粘性土具有发生局部表层滑移或层间蠕滑之趋势。

根据弹性理论和线性波动理论分析,水平海底受谐振波荷载作用时,土层中的剪力幅值 τ_{xz} ^[3]为:

$$\tau_{xz}=P_0\lambda Ze^{-\lambda Z}$$

据Nataraja海底土层因波浪荷载产生的剪应力值 τ 为:

$$\tau=\frac{\gamma_w\pi HZ}{L\cosh(\lambda Z)}e^{-\lambda Z}$$
$$P_0=\frac{\gamma_w H}{2\cosh(\lambda d)}$$

式中: P_0 为压力波幅(m); γ_w 为海水重度(kN/m³); λ 为波数, $\lambda=\frac{2\pi}{L}$ (m⁻¹); L 为波长(m); H 为波高(m); d 为水深(m); Z 为土层深度(m)。

根据土体的极限平衡理论,表层粘性土稳定的条件是土

的不排水抗剪强度(S_u)大于或等于外力在土体中产生的剪切应力 τ ,即 $S_u\geq\tau$ 。分析计算研究区表层粘性土在50年一遇的特大波浪荷载作用下形成的剪应力(表2),结果表明表层粘性土的不排水剪切强度均大于波浪作用所产生的剪应力值 τ 。故在50年一遇的特大波浪条件作用下大部分表层粘性土处于稳定状态,不会发生局部滑移或层间蠕滑现象;而槽沟和洼地与周围环境相比,地形陡且坡降大,表层粘性土在极限波浪条件作用下有可能存在滑移或层间蠕滑的趋势。

5.2 砂土液化

在地震、波浪等作用影响下,松散的砂土受到震动有变得更紧密的趋势。当砂粒间的孔隙水压力增大到等于或大于上覆土的垂直应力时,砂土呈液体状态即液化。砂土液化可导致海底以下层位掏空、海底管线下沉断裂、海上石油平台倒塌^[8]。

据钻孔样品和表层柱状样分析结果,研究区海底以下20 m以内主要为流泥和淤泥,零星分布有淤泥混砂和粉质粘土,其粘粒含量百分率为15.1%~87.0%,均大于13%。根据国家标准《构筑物抗震设计规范》(GB 50191-93),在地震基本烈度不超过Ⅷ度时,海底土绝大部分不存在液化的可能性。

5.3 工程地质分区和评价

综合归纳研究区工程地质条件的基本特征,根据工程地质条件差异性最突出的因素即地貌类型^[6,9],结合海底土质类型及其物理力学性质等条件综合分析,研究区可划分出3个工程地质区^[10](图4),即工程地质Ⅰ区(西滩,简称Ⅰ区)、工程地质Ⅱ区(中滩、西槽和东槽,简称Ⅱ区)和工程地质Ⅲ区(东滩,简称Ⅲ区)。各工程地质区的特征见表3。

工程地质条件评价是一项综合分析各项因素后进行的系统工程^[11,12],现主要从海洋环境因素、地震活动性、灾害地质条件、海底土体稳定性4方面对各工程地质区进行评价。

(1)海洋环境因素评价:珠江口-伶仃洋受盛行风影响,产生定向波浪和沿岸流。冬季盛行东北—东向浪,夏季盛行南—西南向浪,研究区北窄南宽,东深西浅,海底总体是三滩

西槽的格局。Ⅰ区(西滩)迅速向东南扩淤,Ⅱ区(中滩)和Ⅲ区(东滩)淤积缓慢,西槽严重淤积,东槽相对稳定。泥沙来源为东江、北江和西江。

(2)地震活动性评价:珠江三角洲地处南海北部陆缘地震带的北侧,据南海北部和沿海陆地地震历史记载的不完全统计,自1067—1986年的920年间,曾发生 $M_s \geq 4$ 级地震273

次,其中约1/3的地震发生在北部陆缘地震带中,在担杆岛曾发生过5级以上的地震^[4],说明该带活动性较强,对研究区可能影响较大。据广东省地震局专家预测,珠江口处于地震烈度Ⅶ度的影响范围内,开发建设项目在规划和设计时,要充分考虑地壳不稳定性的影响。

(3)灾害地质条件评价:Ⅰ区为西滩。存在的灾害地质类

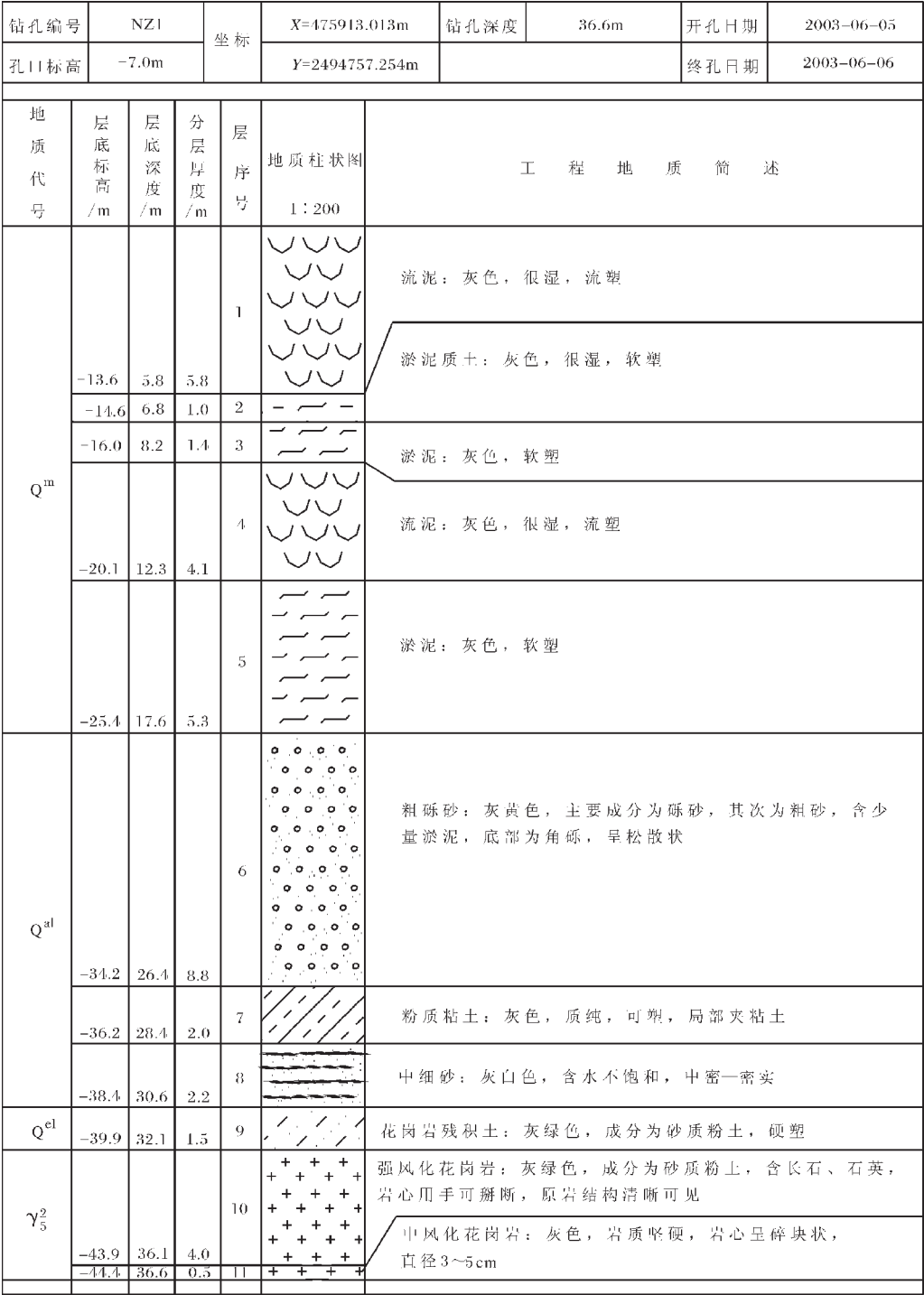


图3 NZ1钻孔柱状图

Fig.3 Column of borehole NZ1

型有不规则浅埋基岩、浅层气、洼地和浅滩。不规则浅埋基岩主要分布于北部和西南角。除西南部外,浅层气广泛存在于本区。北部和西北部分别分布一处洼地。Ⅱ区包括西槽、中滩和东槽。存在的灾害地质类型有不规则浅埋基岩、浅层气、活动断层、沙波、槽沟、洼地和浅滩。不规则浅埋基岩主要分布于北部,零星分布于中部和南部。活动断层位于内伶仃岛以北1.5 km。呈北西向延伸,长7 km。北部分布有多处洼地和沙波。Ⅲ区为东滩。存在的灾害地质类型有不规则浅埋基岩、浅层气、沙波、槽沟、洼地和浅滩。不规则浅埋基岩、槽沟和浅层气分别零星分布于东部、南部。中部分布有多处洼地和

沙波。3个工程地质区对比,Ⅰ区的灾害地质条件简单,Ⅱ区的灾害地质条件较复杂,Ⅲ区的灾害地质条件较简单。

(4)海底稳定性评价:Ⅰ区海底表层土主要为淤泥,局部分布有流泥、淤泥质土、淤泥混砂。Ⅱ区海底表层土主要为流泥和淤泥,局部为淤泥混砂。Ⅲ区海底表层土主要为流泥,西北角分布有淤泥和少量的淤泥混砂。海底表层土为含水量高、孔隙比大、压缩性大、强度低的软土,随深度增加,含水量、孔隙比压缩系数减小,强度增大。Ⅰ区海底表层土的物理力学性质较Ⅱ区、Ⅲ区的稍好,Ⅱ区海底表层的物理力学性质较Ⅲ区的稍好。海底表层土在50年一遇的波浪作用下,绝大部分不会发

表2 波浪作用下土层的剪应力
Table 2 Shear stress of soil layers under wave action

取样站 位编号	水深/m	海水重度 /kN/m ³	波 高 /m,50a	波 长 /m,50a	土层深度/m	剪应力/kPa,50a	不排水抗剪 强度/kPa
ND6	6.13	10.3	2.7	57.0	0.5	0.59	5.8
ND8	3.2	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0	0.68/1.29	5.0/5.8
ND10	3.0	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.98/1.44/1.59	18.6/9.0/7.1
ND1	2.27	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.69/1.31/1.86	4.1/4.1/4.1
ND2	7.5	10.3	2.7	57.0	0.5	0.53	1.6
ND12	0.57	10.3	2.7	57.0	0.5/1.5	0.72/1.37	6.0/6.0
ND15	0.82	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.71/1.35/1.92	6.5/7.0/7.5
ND16	0.36	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.72/1.37/1.95	6.0/6.5/7.3
ND17	3.8	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.67/1.26/1.79	6.8/6.8/7.6
ND22	1.09	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.72/1.36/1.93	4.8/4.8/5.2
ND24	3.5	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.67/1.28/1.81	5.4/5.4/6.0
ND25	4.2	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.65/1.24/1.76	6.4/6.4/9.1
ND26	6.5	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0	0.57/1.08	8.6/8.9
ND31	1.44	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.72/1.36/1.92	7.5/7.5/7.5
ND32	3.3	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5/2.0	0.68/1.29/1.83/2.30	4.8/4.8/4.8/4.8
ND33	3.5	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0	0.67/1.28	5.0/5.0
ND34	3.7	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.67/1.27/1.80	7.9/7.9/7.9
ND35	5.7	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0	0.60/1.14	8.5/8.5
ND36	6.9	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0	0.56/1.50	7.2/7.2
ND9	6.4	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.58/1.09/1.55	6.5/8.0/8.0
ND18	6.0	10.3	2.7	57.0	0.5	0.59	7.3
ND19	5.8	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0	0.60/1.13	3.0/5.0
ND20	11.5	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.38/0.27/1.02	7.2/9.3/9.3
ND27	7.2	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.54/1.03/1.46	7.9/7.9/8.5
ND28	5.1	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5/2.0	0.62/1.18/1.68/2.12	2.5/3.0/4.0/6.5
ND29	8.0	10.3	2.7	57.0	0.5	0.51	5.0
ND37	5.7	10.3	2.7	57.0	0.5	0.60	5.2
ND38	6.0	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.59/1.12/1.59	4.0/6.6/7.3
ND4	2.9	10.3	2.7	57.0	0.5	0.69	3.8
ND11	3.2	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.68/1.29/1.83	5.7/5.7/6.8
ND13	3.4	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.68/1.28/1.82	6.2/6.5/7.8
ND21	5.2	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0	0.62/1.17	4.0/5.0
ND30	4.61	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0/1.5	0.64/1.21/1.72	4.2/4.2/6.0
ND41	2.9	10.3	2.7	57.0	0.5/1.0	0.69/1.31	4.0/4.5

注:土层深度栏数字间的斜线为分隔符,几个数字表示同一取样站位处海底以下不同的深度,后边剪应力、抗剪强度两栏中的数字分别与其对应

表3 工程地质分区

Table 3 Chart of engineering-geological divisions

工程地质区		工程地质Ⅰ区	工程地质Ⅱ区	工程地质Ⅲ区
工 程 地 质 条 件	海底地形地貌	最小水深值为1.4m,最大水深值为25.0m。平均坡降为 1.50×10^{-3} ,最大坡降为 14.37×10^{-3} ,位于研究区北部。地貌类型主要有浅滩、洼地	最小水深值3.1m,最大水深值为27.0m。川鼻水道至龙穴水道段的坡降较矾石浅滩段大,平均坡降达 1.97×10^{-3} 。矾石浅滩的平均坡降为 0.19×10^{-3} 。地貌类型主要有槽沟、沙波、洼地、浅滩	最小水深值2.4m,最大水深值16.0m。平均坡降为 1.19×10^{-3} ,最大值 45.45×10^{-3} ,位于研究区南部。地貌类型主要有浅滩、洼地
	底质	海底表土质类型:流泥、淤泥、淤泥质土、淤泥混砂	海底表层土质类型:流泥、淤泥、淤泥混砂	海底表层土质类型:流泥、淤泥、淤泥混砂
	潜在地质灾害类型	属于活动性地质灾害类型的有浅层气。属于限制性地质条件的有不规则浅埋基岩、洼地、浅滩	属于活动性地质灾害的有浅层气、活动断层和沙波。属限制性地质条件的有不规则浅埋基岩、槽沟、洼地、浅滩	属于活动性地质灾害类型的浅层气和沙波。属于限制性地质条件的有不规则浅埋基岩、洼地、浅滩
	物理力学性质	(1)流泥: $w=85.7\%\sim 98.8\%$, $\rho_d=1.46\sim 1.55\text{g}/\text{cm}^3$, $e=2.153\sim 2.499$, $\text{I}=2.75\sim 3.99$, $a_v=1.56\sim 2.49\text{MPa}^{-1}$, $C=3.6\sim 11.3\text{kPa}$, $S_{ut}=6.6\sim 7.5\text{kPa}$, $f=15.5\sim 32.3\text{kPa}$ (2)淤泥: $w=61.2\%\sim 83.7\%$, $\rho_d=1.48\sim 1.68\text{g}/\text{cm}^3$, $e=1.594\sim 2.299$, $\text{I}=2.48\sim 5.77$, $a_v=0.77\sim 1.84\text{MPa}^{-1}$, $C=1.6\sim 16.5\text{kPa}$, $\Phi=2.42\sim 11.00^\circ$, $S_{ut}=3.7\sim 11.6\text{kPa}$, $f=29.1\sim 45.6\text{kPa}$ (3)淤泥质土: $w=48.3\%\sim 54.1\%$, $\rho_d=1.56\sim 1.72\text{g}/\text{cm}^3$, $e=1.349\sim 1.647$, $\text{I}=2.84\sim 4.64$, $a_v=0.83\sim 1.24\text{MPa}^{-1}$, $C=5.8\sim 13.4\text{kPa}$, $\Phi=2.42\sim 14.90^\circ$, $S_{ut}=8.7\text{kPa}$, $f=42.3\text{kPa}$ (4)淤泥混砂: $w=41.3\%\sim 57.3\%$, $\rho_d=1.68\sim 1.74\text{g}/\text{cm}^3$, $e=1.249\sim 1.528$, $\text{I}=3.3\sim 5.49$, $a_v=0.62\sim 1.03\text{MPa}^{-1}$, $C=5.6\sim 18.6\text{kPa}$, $\Phi=5.06\sim 7.00^\circ$, $S_{ut}=8.8\text{kPa}$, $f=52.1\text{kPa}$	(1)流泥: $w=85.9\%\sim 102.6\%$, $\rho_d=1.41\sim 1.54\text{g}/\text{cm}^3$, $e=1.490\sim 2.736$, $\text{I}=3.26\sim 4.04$, $a_v=1.19\sim 2.80\text{MPa}^{-1}$, $C=0.3\sim 11.3\text{kPa}$, $\Phi=2.45\sim 11.10^\circ$, $S_{ut}=3.0\sim 7.2\text{kPa}$, $f=21.9\sim 25.1\text{kPa}$ (2)淤泥: $w=56.1\%\sim 79.7\%$, $\rho_d=1.52\sim 1.70\text{g}/\text{cm}^3$, $e=1.487\sim 2.216$, $\text{I}=2.50\sim 4.75$, $a_v=1.07\sim 1.82\text{MPa}^{-1}$, $C=3.5\sim 18.6\text{kPa}$, $\Phi=2.42\sim 8.70^\circ$, $S_{ut}=6.5\sim 7.5\text{kPa}$, $f=25.1\sim 32.3\text{kPa}$ (3)淤泥混砂: $w=27.6\%\sim 49.5\%$, $\rho_d=1.74\sim 1.98\text{g}/\text{cm}^3$, $e=0.701\sim 1.303$, $\text{I}=1.52\sim 5.93$, $a_v=0.44\sim 0.77\text{MPa}^{-1}$, $C=0.4\sim 5.6\text{kPa}$, $\Phi=2.55\sim 10.70^\circ$, $f=52.1\text{kPa}$	(1)流泥: $w=85.7\%\sim 111.0\%$, $\rho_d=1.39\sim 1.57\text{g}/\text{cm}^3$, $e=2.117\sim 2.861$, $\text{I}=2.88\sim 6.37$, $a_v=1.39\sim 3.38\text{MPa}^{-1}$, $C=3.6\sim 13.4\text{kPa}$, $\Phi=2.42\sim 6.80^\circ$, $S_{ut}=3.8\sim 5.7\text{kPa}$, $f=15.5\sim 32.3\text{kPa}$ (2)淤泥: $w=78.3\%\sim 82.4\%$, $\rho_d=1.58\sim 1.62\text{g}/\text{cm}^3$, $e=1.945\sim 2.040$, $\text{I}=3.44\sim 4.12$, $a_v=0.86\sim 1.49\text{MPa}^{-1}$, $C=13.4\sim 14.6\text{kPa}$, $\Phi=2.42\sim 5.09^\circ$, $S_{ut}=6.2\sim 8.3\text{kPa}$, $f=25.1\sim 45.6\text{kPa}$ (3)淤泥混砂: $w=51.0\%$, $\rho_d=1.74\text{g}/\text{cm}^3$, $e=1.30$, $\text{I}=5.20$, $a_v=0.83\text{MPa}^{-1}$, $C=7.5\text{kPa}$, $\Phi=6.40^\circ$

注: w —天然含水率(%); ρ_d —天然密度(g/cm^3); e —天然孔隙比; I —液性指数; a_v —压缩系数(MPa^{-1}); C —粘聚力(kPa);
 Φ —内摩擦角($^\circ$); S_{ut} —扭力十字板抗剪强度(kPa); f —微型贯入承载力(kPa)

生局部滑移或层间蠕滑现象。绝大部分淤泥混砂、粉质粘土在
地震基本烈度不超过Ⅷ度时,不存在液化的可能性。
综合分析以上4方面,Ⅰ区的工程地质条件较好,为次稳
定区;Ⅲ区的工程地质条件中等,为次不稳定区;Ⅱ区的工程
地质条件较差,为不稳定区。Ⅰ区的海底稳定性大于Ⅱ区,Ⅱ
区的海底稳定性大于Ⅲ区。今后在该区域建设海上构筑物
和铺设海底输油气管线,建议尽量选在Ⅰ区或Ⅲ区内,且避

开槽沟、沙波、洼地和浅滩。

6 结 语

通过分析地球物理调查、海底取样、海底钻探和实验测
试分析4种技术方法所获得的资料,进行了海底新构造运动、
海底地形地貌、灾害地质类型、海底土物理力学性质、土体稳
定性和砂土液化的综合研究,将研究区划分为次稳定区、次

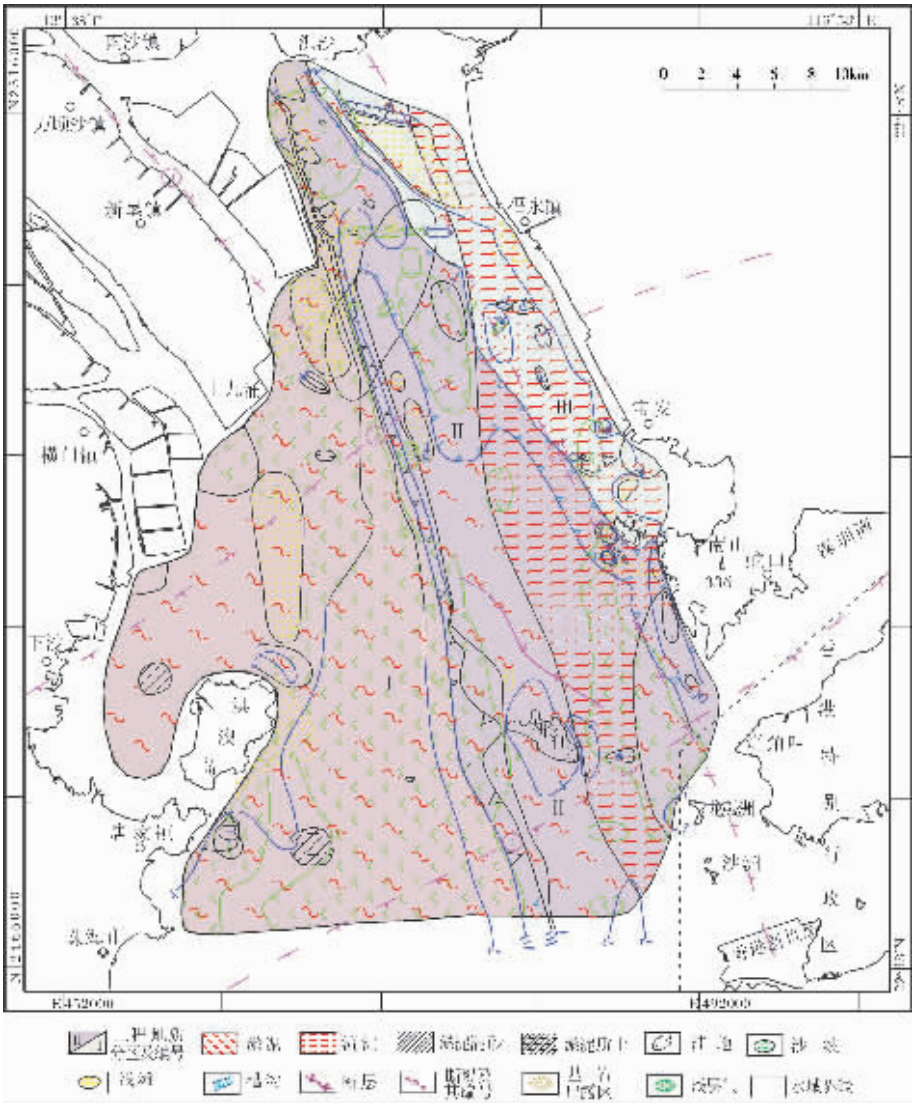


图4 工程地质分区

Fig.4 Chart of engineering-geological divisions

不稳定区和不稳定区。研究成果为未来的海底输油气管线和光缆铺设的总体规划提供了科学的工程地质资料,为大型项目的规划和设计提供了地壳稳定性评价资料。

参考文献:

[1]龙云作,霍春兰,杨胜雄.珠江三角洲现代沉积环境及沉积特征[J].海洋地质与第四纪地质,1989,9(4):25-33.
[2]黄日恒.珠江三角洲地区地震危险性刍议[J].华南地震,1998,18(1):64-69.
[3]丁原章,黄新辉.珠江三角洲地区未来地震危险性预测[J].华南地震,1998,18(1):56-63.
[4]陈伟光,魏柏林,赵红梅,等.珠江三角洲地区新构造运动[J].华南地震,2002,22(1):8-18.
[5]陈伟光.珠江三角洲及临近海域第四纪地质与地震危险性[J].华南地震,1998,18(2):58-62.

[6]冯志强,李学杰,林进清,等.广东大亚湾海洋地质环境综合评价[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.
[7]吴礼年,谢巧勤,方玉友.合肥地区粘性土物理力学指标的相关性分析[J].水文地质工程地质,2002,(4):43-45.
[8]Der-Her Lee, Chih-Sheng Ku, Haiming Yuan. A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin, Taiwan[J]. Engineering Geology, 2003, 49:111-122;71:97-117.
[9]冯志强,冯文科,薛万俊,等.南海北部地质灾害及海底工程地质条件评价[M].广州:河海大学出版社,1996.
[10]Lazaro V Z, Osni J P, Jaime S C. Engineering geological mapping developed in the Fortaleza Metropolitan Region, State of Ceara, Brazil[J]. Engineering Geology, 2004,71:227-253.
[11]孙宗勋,黄鼎成,詹文欢,等.南沙群岛工程地质环境分区与质量评价[J].工程地质学报,2003,11(1):36-43.
[12]贾永刚,孙永福,单红仙.胶州湾工程地质环境质量综合评价区划[J].海洋地质与第四纪地质,1999,19(3):121-126.