

# 厦门港湾软土的工程地质性质的研究

王海鹏 陈 峰

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门, 361005)

**摘 要** 厦门港湾除深槽主航道水动力较强地段、基岩出露地段、礁石区及基岩岸段外, 表层普遍覆盖了一层对工程不利的厚约1~20m、高含水量、高压缩性、中-高灵敏度的第四纪滨海沉积相的软土。本文探讨了研究区软土的成因和一般工程特征, 应用线性回归分析得出天然含水量 $W$ 对液性指数 $I_L$ 、孔隙比 $e$ 及压缩模量 $E_s$ 的回归方程。并分析了该软土的震动触变性和对桩可能产生负摩阻力问题及防治。

**关键词** 软土, 工程地质性质, 震动触变性, 桩负摩阻力

**中国图书分类号** P642.13

软土一般是指第四纪形成的滨海相、泻湖相、三角洲相、溺谷相和湖沼相等的静水或缓慢流水沉积的细粒土层。它包含土分类中的粘土、亚粘土和粉土(包括淤泥质粘土、淤泥甚至泥炭)。其特点是高含水量、大孔隙比、高压缩性和低强度。软土在我国沿海一带分布很广, 如渤海湾及天津塘沽、长江三角洲、浙江、珠江三角洲以及福建的沿海地区(研究区属之)都存在海相或湖相沉积的软土。此外, 贵州、云南省的某些地区还存在山地型的软土, 沉积类型以坡-洪积、湖积和冲积为主<sup>[1,2]</sup>。

厦门港是我国南方的一个主要深水良港, 对特区经济发展起到极大的促进作用, 是厦门市发展经济的重要依托条件之一。厦门港湾除深槽主航道水动力较强地段、基岩出露区、礁石区及基岩岸段外, 表层普遍覆盖了高含水量、高压缩性、中-高灵敏度的第四纪滨海沉积相的软土, 厚度约1~20m, 变化较大。

随着港口建设和建造海上构筑物的发展, 探讨厦门港湾软土的工程地质性质不仅具有较大的工程实践意义, 而且具有一定的理论价值。

工程钻取样点位置如图1所示, 取样点分布范围较广且位置具代表性, 包括: 浯江集美东海滩、厦门西港石湖山海域、厦鼓海峡、九龙江口海门岛南侧海域、厦门外港屿仔尾北侧海域、浯屿一岛美海域及五通道海域, 基本上可反映研究区软土的分布及工程地质概况。取样点的钻孔柱状对比见图2、表1。

## 1 软土的成因

晚更新世以来, 厦门港湾的沉积历史先后经历了山溪性河流、淡水湖泊、河口海湾三个明显不同的沉积环境。基底层是以中生代燕山花岗岩为母岩的风化层或基岩; 上覆一层不等厚的河流冲积砂, 部分地段则为残积粘土、亚粘土; 河砂之上为淡水湖泥; 最上层才是海相砂泥层,

• 王海鹏, 女, 1973年8月出生, 硕士。

本文于1997年7月31日收到。

为冰后期海进沉积层,其中海相淤泥、淤泥质粘土构成了研究区表层软土的主体,多为近现代回淤产物。

其物源主要是九龙江入海泥沙,年均约 250 万 t 和流入浔江湾的东、西溪及周边小溪流携沙,年均 38.37 万 t 组成(不包括推移质)<sup>[3]</sup>。

由于九龙江口、上游森林和地表植被受到破坏,水土流失日渐严重。近 40a 来,九龙江河口三角洲以平均 150m/a 速度向海推进。九龙江入海泥沙中的粗颗粒物大部分沉积在河口沙岛浅滩区,小于  $6\Phi$  的悬移质(细粉砂和粘粒)则随潮进入厦门港湾,洪水期可达小金门一大担、二担岛一线甚至更远的海域。湾内悬沙浓度  $>500\text{mg}/\text{dm}^3$ ,悬浮泥沙在流速减缓的平静海湾发生沉淀。同时,在朔望潮时,潮流亦能带动海湾中央部位的细粒泥沙,以  $<500\text{mg}/\text{dm}^3$  的浓度进入厦门西港并在流速减弱区开始沉淀,经过一段时间的平潮憩流,沉积作用便在各个湾顶弱流区进行<sup>①</sup>。浔江湾也是如此。

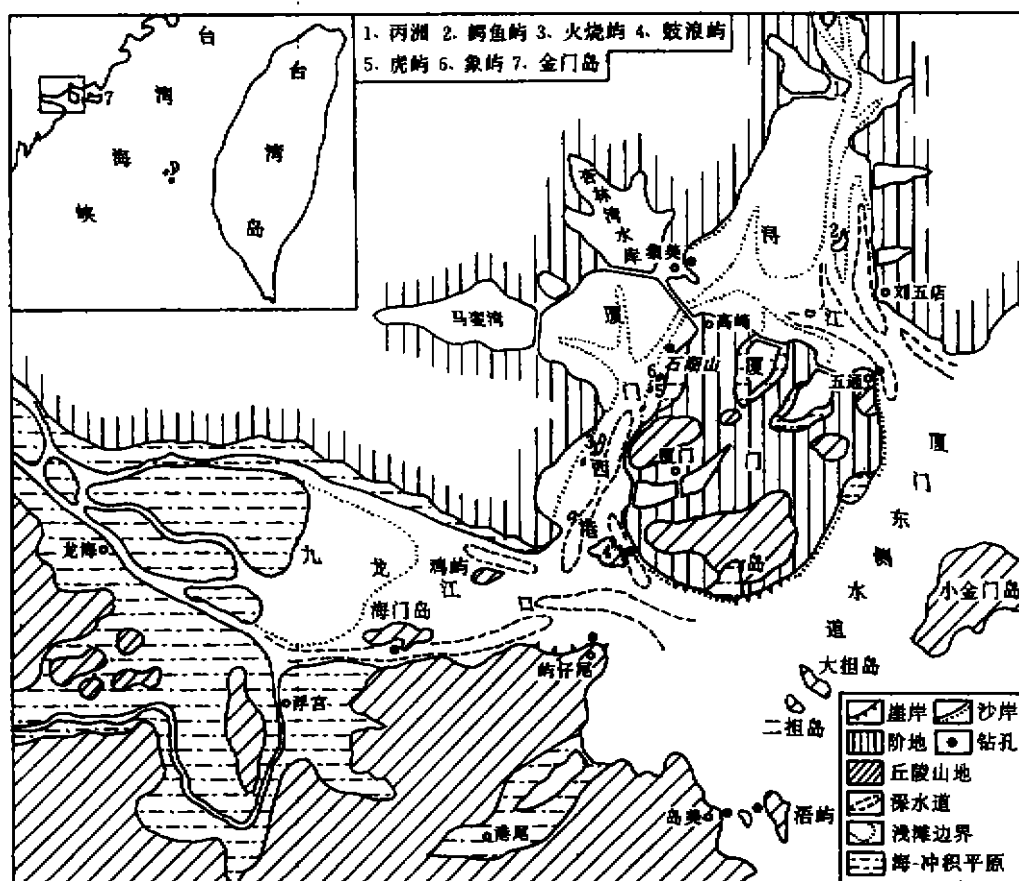


图 1 厦门港湾的位置、地貌概况和工程钻孔分布

Fig. 1 Location and geomorphological outline of Xiamen Harbour and distribution of engineering cores

① 蔡月娥,陈雄杰,蔡爱智. 厦门湾的沉积环境. 1984.

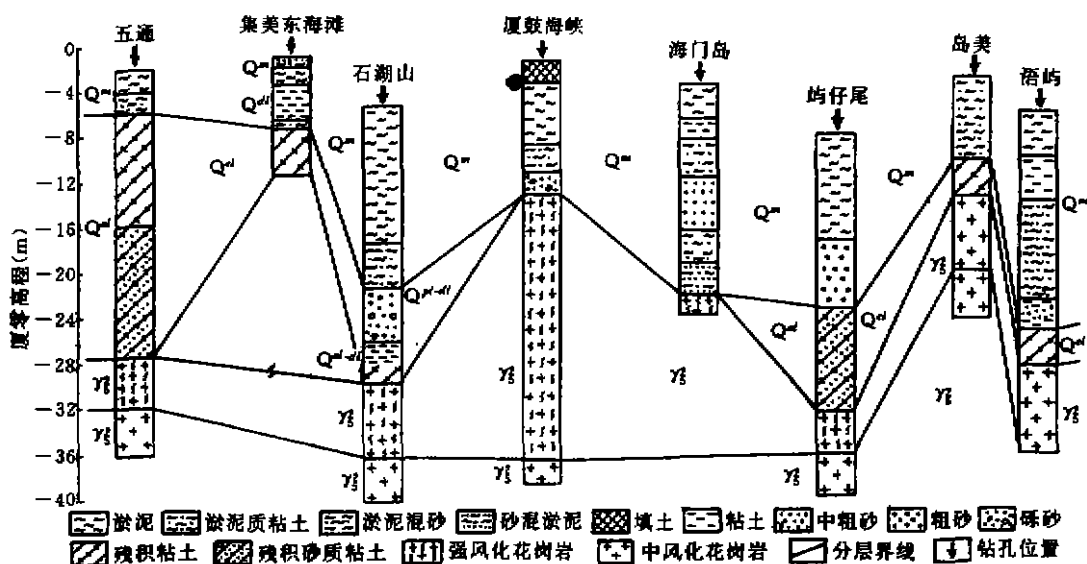


图 2 取样柱状剖面的对比

Fig. 2 Columnar comparison of sampling cores

表 1 厦门港湾软土的物理力学性质指标

Tab. 1 Physical mechanical properties index of soft soil in Xiamen Harbour

| 取 样 点 位 置                           | 五通①             | 集美东海岸②  | 石湖山③   | 厦鼓海峡④    | 海门岛⑤    | 屿仔尾⑥     | 岛美⑦   | 梧屿⑧    |
|-------------------------------------|-----------------|---------|--------|----------|---------|----------|-------|--------|
| 土 类 名 称                             | 淤泥              | 淤泥质粘土   | 淤泥质粘土  | 淤泥质粘土    | 淤泥质粘土   | 淤泥质粘土    | 淤泥质粘土 | 淤泥质粘土  |
| 厚 度 (cm)                            | 70~200          | 100~430 | 80~90  | 100~2000 | 100~700 | 100~1000 | 250   | 60~530 |
| 天然含水量 $w$ (%)                       | 70.1            | 62.6    | 53.4   | 69.1     | 52.4    | 85.9     | 47.9  | 95.4   |
| 天然容重 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )  | 1.59            | 1.60    | 1.69   | 1.59     | 1.72    | 1.51     | 1.75  | —      |
| 比 重 $G_s$                           | 2.68            | 2.67    | 2.67   | 2.74     | 2.73    | —        | —     | —      |
| 孔 隙 比 $e$                           | 1.882           | 1.67    | 1.427  | 1.913    | 1.465   | 2.371    | 1.316 | —      |
| 饱和度 $S_r$ (%)                       | 99.8            | 99.4    | 99.9   | 98.5     | 96.1    | —        | —     | —      |
| 液 限 $w_L$ (%)                       | 53.1            | —       | —      | 51.6     | 45.9    | —        | —     | —      |
| 塑 限 $w_p$ (%)                       | 31.9            | —       | —      | 28.1     | 23.6    | —        | —     | —      |
| 塑性指数 $I_p$                          | 21.2            | 21.4    | 19.9   | 23.6     | 22.4    | —        | —     | —      |
| 液性指数 $I_L$                          | 1.80            | 1.81    | 1.35   | 1.86     | 1.38    | 2.15     | 1.38  | 2.74   |
| 压缩系数 $a_{1-2}$ (MPa <sup>-1</sup> ) | 1.85            | 1.65    | 0.73   | 2.18     | 1.52    | 2.13     | 1.16  | 1.366  |
| 压缩模量 $E_s$ (MPa)                    | 1.56            | 1.67    | 3.02   | —        | —       | —        | —     | 2.733  |
| 抗剪强度                                | 内聚力 $C$ (kPa)   | 8       | 12     | 14       | 14.9    | —        | —     | 3      |
|                                     | 内摩擦角 $\phi$ (°) | 3°26'   | 10°29' | 14°34'   | 7°30'   | —        | —     | 3°     |
| 固结强度                                | 内聚力 $C$ (kPa)   | —       | —      | 12.9     | 9.7     | —        | —     | —      |
|                                     | 内摩擦角 $\phi$ (°) | —       | —      | 10°21'   | 17°06'  | —        | —     | —      |
| 无侧限抗压强度                             | 原状 $q_u$        | —       | —      | 24.1     | 33.3    | —        | —     | —      |
| (kPa)                               | 重塑 $q_u'$       | —       | —      | 7.5      | 8.97    | —        | —     | —      |
| 十字板强度                               | 原状 $C_u$        | —       | 12.7   | —        | —       | —        | —     | 4~9    |
| (kPa)                               | 扰动 $C_u'$       | —       | 3.5    | —        | —       | —        | —     | —      |
| 灵敏度 $S_r$                           | —               | 3.67    | —      | 3.21     | 3.71    | —        | —     | —      |

表 1(完)

| 取 样 点 位 置          | 五通① | 集美东港② |       | 石湖山③ |       | 厦鼓海峡④ |       | 海门岛⑤ |       | 屿仔尾⑥ | 岛美⑦  | 梧 屿⑧ |       |
|--------------------|-----|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|-------|
| 土 类 名 称            | 淤泥  | 淤泥    | 淤泥质粘土 | 淤泥   | 淤泥质粘土 | 淤泥    | 淤泥质粘土 | 淤泥   | 淤泥质粘土 | 淤泥   | 淤泥质砂 | 淤泥   | 淤泥质粘土 |
| 标准击数 $N_{63.5}$    | —   | <1    | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     | —    | —    | —    | 3~5   |
| 地基参数               |     |       |       |      |       |       |       |      |       |      |      |      |       |
| 承载力(kPa)           | —   | —     | —     | —    | —     | —     | —     | —    | —     | —    | —    | —    | 100   |
| 侧摩阻力(kPa)          | —   | —     | —     | 6    | 15    | 10    | —     | 7    | 12    | —    | 5    | 5    | 10    |
| 地基容许承载力 $R(t/m^2)$ | —   | 5     | 8     | 4.5  | —     | —     | —     | —    | —     | —    | —    | —    | 9     |

注:①国家海洋局厦门海洋工程勘察设计院中心地质工程部, 厦门五通民间对台贸易码头地质勘察报告, 1996。②交通部第三航务工程勘察设计院厦门分院(郭自良, 张新俊, 刘启明), 厦门集美东港围海造地工程地质勘察报告, 1993。③交通部第三航务工程勘察设计院厦门分院: 厦门东渡港二期工程石湖山填海工程地质勘察说明, 1986。④交通部第三航务工程勘察设计院厦门分院, 厦门东渡港二期工程石湖山填海及堆场工程地质勘察报告, 1990。⑤交通部第三航务工程勘察设计院厦门分院, 海军厦门水警区驳岸工程, 1991。⑥中国地质科学院厦门环境地质开发研究中心, 海门陆岛交通码头工程地质勘察报告, 1990。⑦交通部第三航务工程勘察设计院厦门分院, 翔鹭涤纶纺纤(厦门)有限公司码头及高压容器厂工程地质勘察报告, 1990。⑧中国地质科学院工程勘察院厦门分院, 招商局中报漳州经济开发区 3.5 万吨多用码头报告, 1993。⑨中国地质科学院工程勘察院厦门分院, 梧屿、岛美陆岛交通码头工程地质勘察报告, 1992。⑩中国地质科学院工程勘察院厦门分院, 岛美交通码头补充勘察报告, 1992。

此外, 由于近期陆续修建了许多条拦湾海堤——筲箕、马銮、集杏、高集等海堤, 使得湾内水域面积骤减, 纳潮量相应大幅度地减少, 同时使各小海湾失去了承纳厦门西港淤泥的作用, 加速了厦门西港部分地段的淤浅。

上述各因素综合作用, 造成了近现代研究区软土层的分布格局。

## 2 软土的一般工程特征

研究区软土的主要类型为淤泥和淤泥质粘土, 其物理力学性质指标见表 1, 主要特征如下:

(1) 淤泥: 灰色-灰黑色, 饱和, 流塑-软塑。除水动力较强的五通道海域外, 顶部大多含腐植质和贝壳碎片。质纯, 局部地段夹粉细砂薄层、透镜体及中细砂、中粗砂透镜体, 为研究区表层沉积物, 分布稳定, 除局部基岩岸段、礁石出露区及水动力较强的深槽主航道外, 均有分布, 基本呈由岸向海厚度增大, 厚度 0.4~20.0m, 变化大。属于高压缩性、中-高灵敏土, 工程地质性质很差。

(2) 淤泥质粘土: 灰色, 饱和, 软塑-可塑, 土质较匀, 夹粉细砂薄层(几毫米—厘米)、砂团、贝壳等。分布零星, 一般位于淤泥层底部或呈透镜状分布或局部存在于更新世砂性土冲刷槽中。属高压缩性土。厚度 0.8~14.02m, 变化大。局部地段为淤泥质亚粘土, 常混含大量贝壳的粗砂, 厚 1.0~7.0m。

从我国沿海软土的特点来看, 淤泥主要分布在浙江南部、福建和广东沿海一带, 成分为粘土, 其粘粒含量很高, 液限大多  $>55\%$ , 承载力低于  $0.6\text{kg/cm}^2 (=6\text{t/m}^2)$ , 压缩模量  $E_c$  一般  $<20\text{kg/cm}^2 (=2\text{MPa})$ ; 而淤泥质土主要分布在钱塘江两岸及其以北各省(市)沿海地区, 其性质比淤泥略好, 但与一般粘性土相比, 则软弱得多<sup>[2]</sup>。

研究区软土的一般工程性质表现为: ①以高含水量及高孔隙比为特征, 天然含水量的变化范围较大(36.3%~95.4%); 孔隙比  $e$  为 1.316~2.371; 其含水量和孔隙比均随液限增加而增大。液性指数  $I_L$  为 1.01~2.74; 饱和度  $S_r$  均  $>95\%$ , 变化范围为 96.1%~99.9%。原状土呈饱和-过饱和, 处于流塑-软塑状态, 有些地段的标贯击数  $N_{63.5} < 1$ , 钻具自沉; ②透水性极弱,

渗透系数为  $10^{-7}$  cm/s 量级。因层状结构而具方向性,水平向  $k_h$  略大于竖向  $k_v$ ;③高压缩性,压缩系数  $a_{1-2}$  为  $0.73 \sim 2.39 \text{ MPa}^{-1}$ ,且随含水量的增加而增大;压缩模量  $E_c$  为  $1.09 \sim 3.49 \text{ MPa}$ ,随着含水量的增大而减小;④抗剪强度很低,快剪内聚力  $C \approx 3 \sim 21 \text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\Phi \approx 3^\circ \sim 14^\circ$ ,原位十字板强度  $C_u = 3 \sim 14 \text{ kPa}$ ;⑤中-高灵敏度,  $S_r \approx 3 \sim 4$ ;⑥淤泥的地基容许承载力极低,  $R$  为  $4 \sim 5 \text{ t/m}^2$ ;淤泥质粘土的承载力则相对较高,  $R$  可达  $8 \sim 9 \text{ t/m}^2$ 。从上述可见,本区软土层属于软弱不良地基土。

### 3 软土的物理力学性质指标间的相关关系

#### 3.1 天然含水量与液性指数

研究区软土的天然含水量  $W$  一般均大于液限  $W_L$  且与  $W_L$  呈正相关,故液性指数  $[I_L = (W - W_p) / (W_L - W_p)]$  一般均  $> 1.0$ ,表现为流塑-软塑。含水量  $W$  与液性指数  $I_L$  之间呈线性正相关(图 3)。对其进行回归分析,得到本区软土  $I_L$  对  $W$  的回归方程为:

$$I_L = 0.027W + 0.040 \quad \dots\dots\dots (1)$$

标准差  $\sigma = 0.176$ 。

对方程(1)进行线性显著性检验,取显著性水平  $\alpha = 0.01$ ,计算出  $F$  比:  $F = 77.3 > F_{0.99}(1, 10) = 10.0$ 。因此,在  $\alpha = 0.01$  水平下,即以置信度  $1 - \alpha = 99\%$  认为液性指数  $I_L$  对天然含水量  $W$  的回归方程有显著性意义。

#### 3.2 天然含水量与孔隙比

研究区软土为淤泥类土,淤泥类土是指在水流缓慢的环境中沉积,有微生物参与作用的条件下,含较多有机质、疏松软弱,天然含水量  $W > \text{液限 } W_L$ ,天然孔隙比  $e > 1.0$  的粉质粘性土。其中  $e > 1.5$  的土称为淤泥,  $1.0 < e < 1.5$  的土称为淤泥质土。由此可见,  $W$  和  $e$  是软土的两项基本物理性质指标。本区软土的  $W$  与  $e$  之间的关系见图 4。由图中可见,两者呈线性正相关。同样,对其进行线性回归,得回归方程为:

$$W = 36.444e + 0.482 \quad \dots\dots\dots (2)$$

标准差  $\sigma = 1.221$ 。

亦对方程(2)在显著性水平  $\alpha = 0.01$  下进行显著性检验,计算出  $F$  比:  $F = 887.9 \gg F_{0.99}(1, 6) = 13.7$ 。因此,以 99% 的置信度认为天然含水量  $W$  对孔隙比  $e$  的回归方程有显著性意义。

比较方程(2)与现代黄河水下三角洲软土的天然含水量对天然孔隙比的回归方程<sup>[4]</sup>:

$$W = 36.68e - 0.983$$

发现二者具有极大的相似性,反映  $W$  和  $e$  这两项物理指标的确与软土的基本性质具有明显关系。

#### 3.3 压缩模量与含水量

压缩模量  $E_c$  与含水量  $W$  呈负相关(图 5),对其进行线性回归,得回归方程为:

$$E_c = 5.388 - 0.055W \quad \dots\dots\dots (3)$$

标准差  $\sigma = 0.307$ 。

对方程(3)在显著性水平  $\alpha = 0.01$  用  $t$  检验法进行线性显著性检验,计算出  $|t| = 7.087 > t_{0.005}(6) = 3.707$ 。因此,以 99% 的置信度认为  $E_c$  与  $W$  的回归效果是显著的。

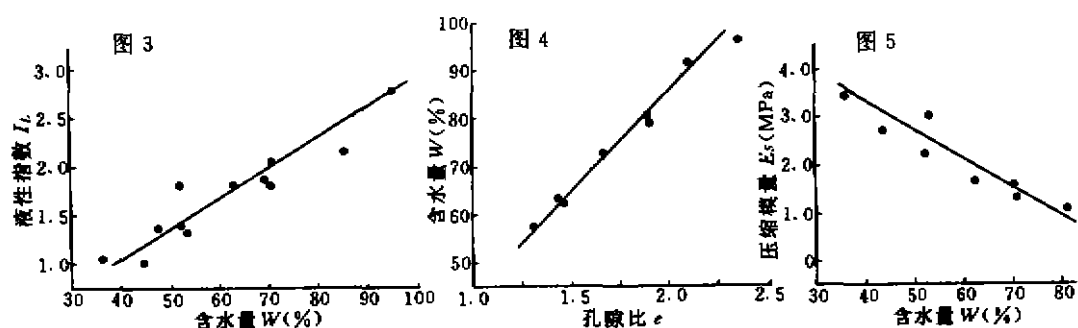


图 3 软土含水量与液性指数关系

Fig. 3 Relation between  
water content and liquidity  
index of soft soil

图 4 软土含水量与孔隙比关系

Fig. 4 Relation between  
water content and void  
ratio of soft soil

图 5 软土压缩模量与含水量关系

Fig. 5 Relation between modulus  
of compression and water  
content of soft soil

## 4 软土的工程地质问题及防治

### 4.1 震动触变性

饱和软粘土在受外来扰动下,结构受破坏,土的强度剧烈降低,甚至发生流动;静置后,随着时间增长而逐渐恢复其强度的现象称为触变。研究区在区域地壳稳定性分区上位于滨海平原、沟谷不稳定区,地震基本烈度为 7°。研究区软土的标贯数  $N_{63.5} < 1$  或 3~5 击且灵敏度高,  $S_r = 3 \sim 4$  (表 1)。对于  $N_{63.5} < 5$  且灵敏度高的软土沉积物,在地震时内聚力将减少 70%,因此,根据标贯击数判断,在 7°地震烈度下,本区软土将产生震动触变,丧失结构强度,须进行处理方能作为地基。目前解决海域软土地基问题的根本方法就是避开,即对薄层者( $< 5\text{m}$ )给予挖除、换砂垫层(结合使用土工织物),采用重力式基础;对于厚层者( $> 5\text{m}$ ),则采用各类桩基穿过软土层,以下伏坚实土层作为持力层;或者视具体情况进行相应的海域软基加固处理。

### 4.2 桩的负摩阻力

在固结稳定的土层中,桩受荷向下位移,土对桩周表面产生向上的摩阻力,称为正摩阻力。有时与上述情况相反,发生土层相对桩截面向下的位移,因而土对桩产生方向向下的摩阻力,即负摩阻力。总负摩阻力形成施加在桩上的下拉荷载,将引起桩的过大的附加沉降和不均匀沉降或者甚至使桩体破裂从而引起上部结构物的倾斜、开裂,危害上部结构物的工程安全。

产生负摩阻力的条件有:(1)桩穿过不完全固结的软粘土或新填土,而支承于较坚硬的土层(硬粘性土、中-密砂土、砾卵石层或岩层)时,由于不完全固结软粘土或新填土的自重固结;(2)在桩周软土的表面有大面积地面堆载或新填土时使桩周土层沉降;(3)由于从软弱粘性土下面的透水层中抽水或其它原因,使地下水位大幅度下降,土中的有效应力增大而引起桩周土层沉降;(4)在饱和粘性土地基中,群桩施工结束后,孔隙水压力消散,隆起的土体逐渐固结下沉,若桩尖持力层较硬,则会引起负摩阻力。

工程中遇到的负摩阻力问题,通常是在桩已承受外荷的情况下出现的。此时桩截面的位移、土层的固结沉降互相影响并与时间有关。负摩阻力的极限值近似地等于土的不排水抗剪强度。以往的试验研究表明:实际的负摩阻力远小于其极限值,在桩端可能继续沉降的情况下,负摩阻力可能减小甚至消失。因而我国沿海软土地区过去并未考虑负摩阻力问题,也很少发现由

于负摩阻力引起的工程事故<sup>[5]</sup>。如上海地区的有些专家认为上海软土对桩的负摩阻力较小,不足以造成工程危害<sup>[6]</sup>;而鲁裴扬等人 1996 年在南京召开的第二届软土工程国际会议上则就珠江三角洲地区因软土对桩的负摩阻力而引起的四例工程事故进行了论述<sup>[7]</sup>,此外,施健勇、赵维炳等对香港地区的钢桩进行了负摩擦分析<sup>[8]</sup>。由上述可见,是否考虑软土对桩的负摩阻力是与软土工程地质性质的区域性差别有关。

研究区软土层厚度较大,淤泥层厚 0.4~20.0m,淤泥质粘土层厚 0.8~14.02m,且大多处于不完全固结状态,随着固结度的增加,将发生沉降。在软土层较厚地段,将对桩产生负摩阻力。因此,在进行桩基设计时应考虑其影响。

负摩阻力的计算方法在一些国家(如丹麦、日本、波兰等)的设计规范已列入具体规定。单桩负摩阻力的计算有下述两种传统方法<sup>[5,6]</sup>:

(1)根据土的竖向有效应力计算:

$$\tau_n = \sigma'_v \cdot K_0 \tan \phi' = \beta \sigma'_v \quad (4)$$

式中, $\tau_n$  为负摩阻力,kPa; $\sigma'_v$  为竖向有效应力,kPa; $K_0$  为静止土压力系数; $\phi'$  为有效内摩擦角,“°”。 $\beta = K_0 \cdot \tan \phi'$  (对淤泥、淤泥质土(粘土): $\beta \approx 0.15 \sim 0.25$ )。

(2)按负摩阻力等于土的不排水抗剪强度计算:

$$\tau_n = q_u / 2 \quad (5)$$

式中, $q_u$  为无侧限抗压强度,kPa。

研究区以屿仔尾北侧海域为例,该区在第四纪新构造运动分区上属于九龙江港尾下沉亚区,软土为淤泥,层厚较大,5.0~13.5m,处于不完全固结状态。其不排水抗剪强度值取原位十字板强度 4~9kPa,采用式(5)算得相应的负摩阻力为:

$$\tau_n = 4 \sim 9 \text{ kPa}$$

与正摩阻力为同一量级(表 1)。

负摩阻力的防治:设计时可把由总负摩阻力产生的下拉荷载当作作用在桩上的外荷参加单桩承载力验算。总负摩阻力形成的施加在桩上的下拉荷载按下式验算<sup>[9]</sup>:

$$Q_n = u_p \sum_{i=1}^n \tau_{ni} h_i \quad (6)$$

式中, $Q_n$  为桩所受的下拉荷载,kN; $\tau_{ni}$  为第  $i$  层土的平均负摩阻力,kPa; $h_i$  为产生沉降的第  $i$  层土的厚度,m; $u_p$  为桩的周长,m。

$$u_p = \pi D \quad (D \text{ 为桩径})$$

然后按下式验算单桩承载力:

$$Q + Q_n \leq aR \quad (7)$$

式中, $Q$  为作用在桩顶面的外荷,kN; $Q_n$  为总负摩阻力产生的下拉荷载,kN,由式(6)算得; $R$  为单桩轴向承载力设计值,kN; $a$  为安全系数,一般取  $a=1.4$  或视具体情况取值。

按上述方法,取工程上普通桩径  $D=1.0 \sim 1.2\text{m}$ ,仍以屿仔尾北侧海域为例,算得该区软土的总负摩阻力量值为:

$$Q_n = 62.84 \sim 458.04 \text{ kN} \approx 6 \sim 46 \text{ t}$$

可见,本区软土对桩的负摩擦的影响不容忽视。因此,若使用预制桩则应适当减小上部结构物的荷重。或在桩身表面涂上沥青,利用沥青的粘弹性,使其在桩表面与桩周地基土之间形成一

个滑动夹层;若使用灌注桩,在施工中可在淤泥段采用薄膜隔离层工艺降低负摩擦作用。或者适当扩大桩尖面积,如采用扩底桩。此外,对预制桩和灌注桩,尚可采用反力千斤顶法(即设置反力千斤顶,产生一上举力以抵抗负摩擦的下拉力)、预压法(在打桩前先对软基进行预压处理以减小打桩后地基土的沉降量从而减小负摩阻力)等。

## 5 结论

(1)厦门港湾软土的主要类型为淤泥和淤泥质粘土,其天然含水量  $W$  对液性指数  $I_L$ 、孔隙比  $e$  和压缩模量  $E_s$  的回归方程分别为:

$$I_L = 0.027W + 0.040 \quad (\text{标准差 } \sigma = 0.176)$$

$$W = 36.444e + 0.482 \quad (\text{标准差 } \sigma = 1.221)$$

$$E_s = 5.388 - 0.055W \quad (\text{标准差 } \sigma = 0.307)$$

可用于研究区软土物理力学性质指标的预测和控制。

(2)研究区软土的强度极低且灵敏度较高,标贯击数  $N_{63.5} < 1$  或  $3 \sim 5$  击,  $S_r = 3 \sim 4$ 。在本区 7°地震基本烈度下将产生震动触变,丧失结构强度,须进行处理方能作为地基。

(3)研究区软土大多处于不完全固结状态,厚度变化大,在厚度较大地段进行桩基设计时须考虑负摩阻力对桩的影响。本区以屿仔尾北侧海域为例,对于一般工程常用桩,桩径  $D = 1.0 \sim 1.2\text{m}$ ,总负摩阻力量值可达约  $6 \sim 46\text{t}$ 。

## 参考文献

- 1 顾晓鲁,钱鸿缙,刘惠珊等主编.地基与基础.北京:中国建筑工业出版社,1993,716~724
- 2 《工程地质手册》编写组.工程地质手册.北京:中国建筑工业出版社,1982,601~614
- 3 《中国海湾志》编纂委员会.中国海湾志(第八分册 福建省南部海湾).北京:海洋出版社,1993,147~148,200~202
- 4 冯秀丽,沈渭铨,杨荣民等.现代黄河水下三角洲软土沉积物工程地质特性.青岛:青岛海洋大学学报,1994,24(增刊):36~41
- 5 陈希哲编著.土力学地基基础.北京:清华大学出版社,1990,201~204
- 6 孙更生,郑大同主编.软土地基地下工程.北京:中国建筑工业出版社,1984,17~18,521~526
- 7 Lu Peiyang. Four cases of negative skin friction of pile. *PROCEEDINGS OF SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFT SOIL ENGINEER*. Vol. 2, Nanjing: Hohai University Press, 1996, 786~791
- 8 施健勇,赵维炳,周春儿.钢桩负摩擦分析.岩土工程学报,1996,17(2):53~59

## Study of engineering geological properties of soft soil in Xiamen Harbour

Wang Haipeng and Chen Feng

(Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen, 361005)

### Abstract

There generally covers on the surface of Xiamen Harbour a layer of Quaternary littoral facies soft soil with high water content, high compressibility and medium to high degree of sensibility except the areas such as main deep channels of strong water dynamics, bed rock exposed area, reef rock area and rock coast districts. The layer, roughly 1~20m thick, is harmful to coastal engineering construction. This paper discusses the causes of formation and general engineering characteristics of soft soil in the study area, and has constructed three regression equations of water content versus liquidity index, void ratio and modulus of compression using linear regression analysis. It also analyses the engineering geological problems of the soft soil concerning the vibration thixotropy and the negative friction to pile recommends the preventive strategies.

**KEYWORDS** Soft soil, engineering geological property, vibration thixotropy, negative friction of pile