

# 泉州湾软土分布特征及工程特性

任君梅

(福建省泉州市水电工程勘察院, 泉州, 362011)

**摘 要** 泉州湾软土分布受物源、地形(地貌)和水动力环境影响, 自湾内向湾外厚度逐渐减小, 由河道及航道向海岸厚度逐渐增厚, 具有高含水量、高孔隙度、高压缩性、高灵敏度和渗透性弱、抗剪强度低等工程特性, 在工程建设中一般采用挤淤换填法、预压法和水泥土搅拌法进行加固处理。

**关键词** 软土分布特征 工程特性 泉州湾

泉州湾位于福建东南沿海, 北临湄州湾, 南靠深沪湾, 其周边分布有泉州市中心城区、晋江市、石狮市和惠安县, 区域经济比较发达。泉州湾港区是泉州港中心港区, 早在东汉时期已开展海口运输, 唐代成为我国四大对外贸易港口之一, 宋元时代以“刺桐港”之称闻名于世, 被誉为中世纪“东方第一大港”、“海上丝绸之路”的起点, 未来将建设成为我国沿海重要的内贸集装箱港口、外贸集装箱支线港、福建省的综合性港区。随着海西建设步伐加快和泉州市发展战略实施, 探讨泉州湾软土层的分布特征及工程特性, 对于进一步查清泉州湾工程地质条件, 服务城市建设和港口建设, 促进泉州市社会经济的可持续发展具有重要的实际意义。

## 1 地质概况

泉州湾位于欧亚大陆板块东南边缘的北东向福建滨海断隆带次级构造长乐—诏安断裂带上, 区域上主要分布有第四纪, 零星有澳角群变质岩, 侵入岩主要有志留纪和晚侏罗世花岗岩类<sup>[1]</sup>。

泉州湾覆盖层为海湾和河口沉积层, 属第四系更新统和全新统。岩性有软土、粘性土、砂性土、碎石土和坡、残积土。各土层的物质组成和分布厚度不稳定, 变化较大<sup>[2]</sup>。

泉州湾及其周边分布的侵入岩有晚侏罗世古竹超单元钾长花岗岩、永兴双峰单元花岗闪长岩和志留纪西溪超单元二长花岗岩、光坑单元花岗闪长岩。志留纪二长花岗岩和花岗闪长岩均受不同程度热动力变质, 表现为韧性剪切变形, 片理、片麻理和碎裂结构发育。

泉州湾主要断裂发育有北东向长乐—诏安断裂带次级惠安—晋江断裂、北北西向洛阳江断裂及北西向晋江—永安断裂<sup>[2-3]</sup>。泉州湾的形成及地层岩性分布不可避免地受到断裂的控制和影响。

收稿日期: 2010-02-18

作者简介: 任君梅 (1976-), 女, 工程师, 水文地质与工程地质专业。

泉州湾 1607 年 8 月和 1907 年 10 月分别发生过 5.25 级和 5.0 级 2 次地震，其破坏烈度为 VI~VII 度。邻区历史上发生的地震，对泉州湾影响最大的是 1604 年 12 月泉州外海 7.5 级强震，影响烈度达 VIII 度；其次是 1906 年 3 月厦门外海 6.2 级地震和 1934 年 5 月安溪附近的 5.8 级地震，影响烈度为 VI~VII 度；其余地震的影响烈度均小于 VI 度<sup>[3]</sup>。

根据《中国地震动参数区划图（GB18306-2001）》，泉州湾及其周边的抗震设防烈度为 7 度，部分为 8 度（石狮祥芝、永宁等），地震动峰值加速度 0.10~0.15 g，局部为 0.20 g，区域特征周期 0.40~0.45 s。

## 2 软土分布特征

泉州湾呈近东西向，东面为广阔海域，其余三面为陆地。北部为洛阳江，西部为晋江，是晋江、洛阳江汇合入海的半封闭海湾，属溺谷型海湾。海湾东濒台湾海峡，北起惠安崇武半岛，南至石狮祥芝，岸线长约 140 km（图 1）。

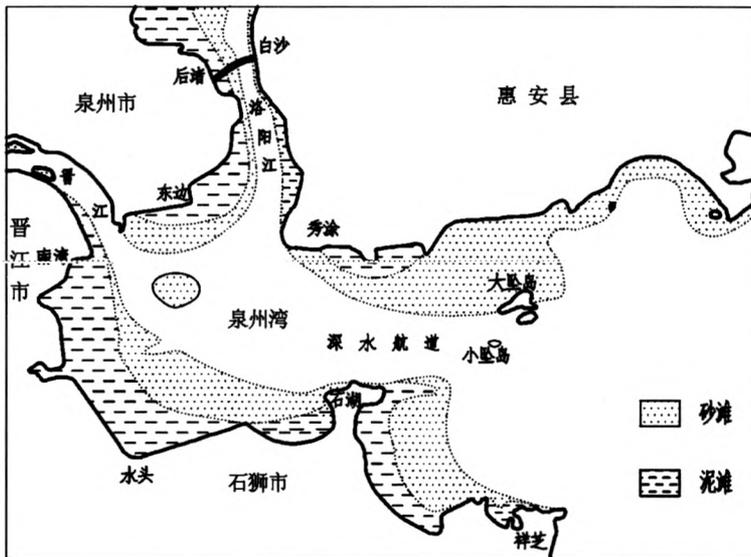


图 1 泉州湾软土分布示意图

Fig. 1 Distribution plan of the soft soil in the Quanzhou Bay

泉州湾的泥砂主要来源于洛阳江和晋江，20 世纪 60~70 年代，洛阳江、晋江下游均修建水闸，泥砂来源明显减小。但因泉州城东围垦、惠安五一围垦及码头工程、沿海大通道的建设，在一定程度上改变了泉州湾的水动力环境，降低了海湾的“自净”能力；加上周边土地开发和厂矿、城乡建设对水土保持的影响，使大量泥砂入海。因此，泉州湾近年淤积严重，软土的分布范围和厚度均有所增加。

一般来说，粉细砂的颗粒起动流速为 20 cm/s<sup>[4]</sup>，软土则在小于 20 cm/s 的水动力条件下产生。受晋江、洛阳江流水和海湾潮流的共同作用，在横向上，砂多数沉积于受江水影响较大，流水较急的河道和深水航道及两侧；软土则淤积于近岸水动力作用较弱的地方。在剖面上，靠近河道或航道两侧，软土多数覆于砂土之上；近岸处多数分布于风化岩土层之上。

泉州湾软土属于浅埋型。厚度一般 2~25 m, 变化较大, 同一地点其厚度大小主要取决于下伏层或地形的起伏及水动力环境。整个海湾, 总的趋势是自湾内向湾外厚度逐渐变小(表 1); 从深水航道或河道两侧分别向海岸方向厚度逐渐变大。一般为航道及河道分布冲积砂土、碎石土, 两侧往岸边依次为砂土、砂夹淤泥或淤泥夹砂(淤泥质土)、淤泥; 软土的厚度随着增大。泉州湾软土的沉积年代为第四纪全新世。目前, 沉积作用仍在进行<sup>[2-3]</sup>。

表 1 泉州湾软土层厚度分布

Table 1 Thickness of the mollisol layers in the Quanzhou bay

地点 厚度	泉州后渚	惠安白沙	晋江南港	泉州东边	石狮石湖	惠安秀涂	石狮祥芝
最大厚度 (m)	21.5	20.2	16.4	14.9	12.8	6.4	4.5
平均厚度 (m)	12.8	13.1	10.9	8.9	7.4	3.5	2.4

### 3 软土的工程特性

泉州湾软土以淤泥为主, 部分为淤泥质土。淤泥常含少量粉砂、细砂、贝屑或夹薄层砂; 淤泥质土包括淤泥质粘土、淤泥质粉质粘土, 常含砂、夹砂。淤泥质土主要分布于淤泥层之下或夹于淤泥层中、下部, 厚度一般不大, 以 1~5 m 居多, 很多地段缺失。

#### 3.1 物理力学性质

泉州湾软土的物理力学性质与砂、贝屑等杂质的含量有关, 与海湾所处的位置关系不大(表 2)。

(1) 天然含水量高, 孔隙比大, 高液限, 低密度。含水量变化范围较大, 且含水量随着液限及天然孔隙比的增加而增大, 密度随着含水量的增加而减少。高含水量和高孔隙性特征是决定其高压缩性和低抗剪强度的重要因素。

(2) 透水性弱, 渗透系数为  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  量级。泉州湾软土属滨海相和三角洲相地层, 常夹有数量不等的薄层或极薄层状的粉砂、细砂、粉土等, 发育层状结构。渗透强度因层状结构而具方向性, 水平方向一般大于垂直方向 1~2 个数量级。由于软土的渗透系数小, 含水量大且处于饱和状态, 这不但延缓其土体的固结过程, 而且在加荷初期, 常易出现较高的孔隙水压力, 对地基强度有较显著的影响。

(3) 灵敏度高, 压缩性大。具较显著的触变性和蠕变性, 压缩系数随着土层的液限和天然含水量的增大而增高。在建筑荷载作用下的变形大而不均匀且变形稳定历时长。

#### 3.2 抗剪强度特征

泉州湾软土室内抗剪强度试验表明(表 3), 淤泥、淤泥质土的抗剪强度均较低, 其强度值大小与加荷速度及排水固结条件密切相关, 排水条件下的抗剪强度随固结程度的增加而增大; 不排水三轴快剪所得的抗剪强度值很小, 且与其侧压力大小无关。现场原位测试, 在天然状态下, 抗剪强度随软土的埋藏深度递增。泉州湾软土的静力触探比贯入阻力值, 淤泥为 0.1~0.7 MPa, 淤泥质土 0.4~1.2 MPa。十字板剪切试验的原状值, 与静力触探值呈正相关, 均随深度递增(图 2)。

表 2 泉州湾软土层一般物理力学性质指标

Table 2 The general physical mechanic property of the mollisol layers in Quanzhou Bay

指标		淤泥		淤泥质土	
		范围值	平均值	范围值	平均值
天然含水量 (%)		48.3~89.8	71.7	37.2~54.8	50.4
天然密度 (g/cm <sup>3</sup> )		1.46~1.69	1.56	1.63~1.84	1.69
比重		2.65~2.71	2.66	2.65~2.68	2.67
孔隙比		1.378~2.480	1.971	1.006~1.479	1.376
液限 (%)		39.1~61.8	49.3	22.8~50.1	40.8
塑限 (%)		19.1~32.1	26.5	14.7~28.8	23.4
塑性指数		9.8~33.1	22.8	8.1~25.2	19.7
液性指数		0.95~3.44	2.09	0.83~2.78	1.89
压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ (MPa <sup>-1</sup> )		0.76~3.15	2.00	0.40~1.50	1.16
压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ (MPa)		0.92~2.68	1.28	1.47~4.95	2.07
渗透系数 (10 <sup>-7</sup> cm/s)	垂直 $K_v$	0.7~4.1	2.4	2.4~4.2	3.7
	水平 $K_h$	1.7~38.0	13.2	5.3~12.8	10.7
固结系数 (10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /s)	$\sigma_c = 50$ kPa	0.18~9.94	1.10	0.20~8.20	1.35
	$\sigma_c = 100$ kPa	0.17~8.01	1.13	0.21~7.10	2.15
	$\sigma_c = 200$ kPa	0.18~8.40	1.14	0.25~6.52	2.31
	$\sigma_c = 400$ kPa	0.20~7.54	1.24	0.35~4.80	3.06
高压固结指数	前期固结压力 (kPa)	80~110	88	95~130	119
	压缩指数	0.448~0.789	0.731	0.682~0.985	0.766
	回弹指数	0.043~0.063	0.060	0.560~0.092	0.072
样品数 (组)		1138		896	

### 3.3 地基与基础处理

#### 3.3.1 天然地基和桩基

(1) 海底电缆、输水管道、排污管道、输油管道等构筑物在满足荷载和变形要求的前提下,可直接利用软土作为基础持力层。根据室内试验和现场测试、检测结果,并结合该地区工程经验,泉州湾软土的地基承载力特征值淤泥为 40~50 kPa,淤泥质土为 60~90 kPa。基础设计时,当软土的承载力特征值在震设防烈度 7 度时 $\leq 80$  kPa, 8 度时 $\leq 100$  kPa, 或

表 3 泉州湾软土层抗剪强度指标

Table 3 The shear strength values of the mollisol layers in the Quanzhou Bay

指 标		淤 泥		淤泥质土		
		范围值	平均值	范围值	平均值	
直接剪切	内聚力 (kPa)	1.0~8.5	3.5	7.0~12.0	10.7	
	内摩擦角	0~10.3	2.4	6.4~14.0	6.9	
固结快剪	内聚力 (kPa)	4.0~12.6	7.0	11.0~21.0	11.2	
	内摩擦角	5.7~19.4	9.0	14.9~17.1	15.1	
三轴	总应力	(kPa)	8.9~26.7	11.1	11.2~33.8	20.5
		(°)	0	0		
三轴	总应力	(kPa)	5.0~20.0	6.11	10.7~28.0	15.8
		(°)	9.0~15.5	14.5	12.4~19.2	17.3
	有效应力	(kPa)	5.0~20.0	11.7	8.0~26.0	14.9
		(°)	7.0~30.0	18.4	22.8~38.2	30.6
袖珍十字板 剪切强度	固结不排水剪 (kPa)	2.0~15.0	7.5	6.0~22.0	12.4	
	不固结不排水剪 (kPa)	3.0~19.0	7.4	8.0~29.0	15.1	
十字板剪切强度 (kPa)	原状	6.2~22.8	12.1	13.5~30.7	14.9	
	扰动	1.6~5.6	4.1	3.9~18.4	11.3	
无侧限抗压强度 (kPa)	原状	7.84~34.61	10.84	18.35~50.12	22.48	
	扰动	2.37~5.39	2.99	3.98~7.29	4.92	
样品数 (组)		52		18		

等效剪切波速在 7 度时  $\leq 90$  m/s, 8 度时  $\leq 140$  m/s, 应考虑震陷的影响<sup>[5]</sup>。在 7 度和 8 度地震力作用下, 对沉降无特殊要求的二级建筑物和对沉降敏感的三级建筑物当无条件进行专门的分析计算时, 可按有关规范确定震陷估算值, 软土厚度  $> 3$  m, 地基承载力标准值  $\leq 70$  kPa 时, 其震陷估算值分别为  $\leq 3$  cm 和  $15$  cm<sup>[6]</sup>。施工时, 应清除表层 (厚度  $0.50 \sim 2.50$  m) 呈流动状态软泥, 至流塑状淤泥层。

(2) 泉州湾很多工程, 诸如码头、桥梁等均采用桩基础, 软土的桩侧摩阻力极限标准值淤泥  $8 \sim 12$  kPa, 淤泥质土  $10 \sim 25$  kPa。桩基设计时, 应考虑桩的负摩阻力系数淤泥为  $0.15 \sim 0.25$ , 淤泥质土为  $0.20 \sim 0.30$ 。由于软土的渗透能力差, 孔隙水压力不易消散, 桩基施工中 (特别是预应力管桩) 常发生浮桩、斜桩等情况, 要合理安排桩的施工顺序或采取其它工程措施以消除不良现象。

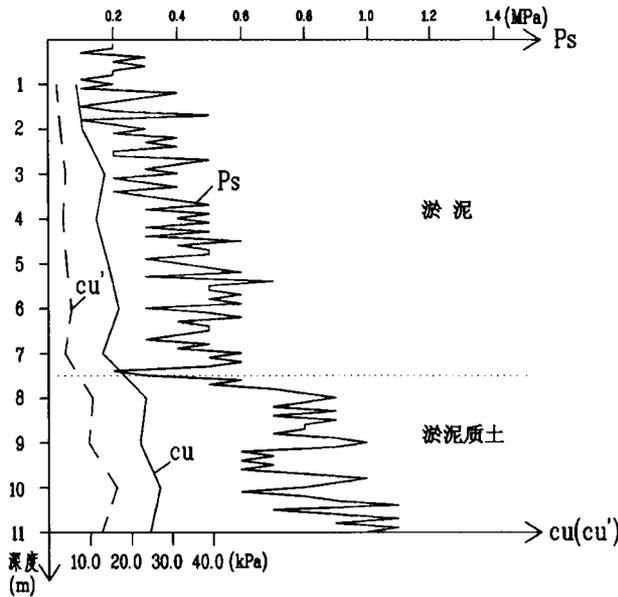


图 2 软土十字板剪切强度和静力触探值随深度变化图

Fig. 2 Diagram showing the curves of the vane-shear strength and static sounding values of the soft soil in depth

3.3.2 软基处理

泉州湾在工程建设中对软土地基加固处理主要采用以下 3 种方法。

(1) 采用排淤换填法。在泉州湾围垦、堤防、码头后场等工程中应用较为普遍的是抛石挤淤法，利用抛石体的自重下沉到相对稳定的土层中，以抛石体护底形成人工地基支撑围堤、堆场等上部结构。在泉州湾部分防波堤和码头后场的修建中采用爆破挤淤填石法。对于一般道路、涵洞等小型工程也采用换填法，挖除部分软土，回填粗砂、碎石砂或素混凝土作为人工地基。

(2) 采用预压法。加固软基，提高淤泥或淤泥质土的地基强度，以满足工程的负载要求，在泉州湾码头堆场和沿岸道路工程用得比较广泛的是采用砂井或塑料排水带对软土进行堆载预压、排水固结。

(3) 水泥土搅拌法。在泉州湾地区用的比较多的是粉体喷搅法（干法），以水泥为固化剂，通过搅拌，与软土形成水泥土桩，桩与桩间土共同作用形成复合地基。

4 结语

泉州湾软土受物源、地形（地貌）和水动力环境综合影响，分布广，厚度变化大。但总体分布在近岸水动力作用较弱的地方，厚度从湾内到湾外逐渐减小。软土具有高含水量、高孔隙度、高压缩性、高灵敏度和渗透性弱、抗剪强度低的工程特性。在工程建设中，根据软土的工程特性，采用排淤换填法、预压法、水泥土搅拌法等地基加固处理技术，改造软土，充分发挥软土作用并取得良好效果。

本文参考和引用了福建省泉州市水电工程勘察院自 1995 年以来对泉州后渚大桥、沿海大通道（惠安百崎—秀涂—青山湾段和晋江仙石—石狮水头段）、泉州湾港区（后渚、秀涂、石湖、祥芝等作业区）及泉州湾深水航道、后渚通海航道等工程的勘察资料，凝聚了集体劳动成果，成文过程中得到我院何耀堂教授级高级工程师的悉心指导，完稿后承蒙福建省闽东南地质大队林绍凑高级工程师审稿并提出宝贵的评审意见，谨此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 地矿部福建地质矿产勘查开发局. 福建省地质图 (1:50 万) 说明书. 福州: 福建省地图出版社, 1998.
- 2 何耀堂. 泉州湾工程地质条件及港口规划建设的探讨. 福建地质, 2005, 24 (4).
- 3 何耀堂, 任君梅, 蒋惠明. 泉州市中心城区区域地壳稳定性分析. 福建地质, 2007, 26 (2).
- 4 尹延鸿, 周青伟. 渤海东部地区沉积物类型特征及其分布规律. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14 (2).
- 5 GB50021-2001 岩土工程勘察规范.
- 6 JGJ83-91 软土地区工程地质勘察规范.
- 7 JGJ79-2002 建筑地基处理技术规范.

## Distributional and Engineering Characteristics of the Soft Soil in the Quanzhou Bay

Ren Junmei

(*Quanzhou Institute of Hydroelectric Engineering Exploration, Quanzhou, 362011*)

### Abstract

The distribution of the soft soil in the Quanzhou Bay is affected by the substance source, landform, physiognomy and hydrodynamic environment. The thickness of the soft soil dwindles away from the inside bay to the outside bay and is thickened inch by inch from the riverway and sea-route to the seashore. The soft soil has the engineering characteristics of the high moisture content, high porosity, high compression, high sensitivity, weak permeability and low shear strength. On the engineering construction, it is often dealt with by the strengthening techniques such as the packing silt and filling method, the preloading method and the soil-cement paddling process.

**Keywords** distributional characteristics of soft soils, engineering characteristics, Quanzhou Bay