

文章编号:1000-7598-(2002)01-0036-05

海口某海域软土工程特性的微观机制浅析

孔令伟, 吕海波, 汪 稔, 郭爱国

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 湖北 武汉, 430071)

摘 要: 对琼州海峡海口海域一种软土的基本特性进行了室内试验研究。初步从矿物成分、有机质含量、物理化学性质、孔隙结构以及土颗粒间的排列方式等方面阐述了其不良工程特性的微观机制, 加深了对海洋软土基本性质的认识。

关 键 词: 软土 ; 微结构 ; 基本特性

中图分类号: TU 44 **文献标识码:** A

Preliminary analysis of micro-mechanism of engineering properties for soft soil in a sea area of Haikou

KONG Ling-wei, LU Hai-bo, WANG Ren, GUO Ai-guo

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The experiment research on fundamental properties of a type of soft soil from a Haikou sea area, Qiongzhou Straits, is carried out. The micro-mechanism of the poor engineering properties for the soft soil is preliminarily analyzed from the aspects of mineral composition, organic content, physicochemical properties and microstructure fabric characteristics, which provides a help to understand the fundamental properties for marine soft soil further.

Key words: soft soil ; microstructure ; fundamental property

1 前 言

海洋土是长期处在含有大量盐分的海水下面的沉积物。由于海洋土所处的特定环境使海底土层的成因历史与陆地上有很大的不同, 致使其物理力学性质和物理化学性质等与内陆性土有诸多差异, 不能简单地套用陆地土的评价方法及处理措施去解决海洋土工程方面提出的许多新问题。国内外对海洋土的性质研究, 主要侧重于孔隙液体的含盐量对其强度和变形性质的影响、估计土样扰动程度及先期固结压力的确定方法、波浪荷载作用下海洋土的动力特性、原位测试资料的分析和应用以及地球物理勘查海底土层的声学参数和海洋土的物理-力学性质的相关性等^[1]。我国对海洋土性质的研究始自 70 年代中后期, 已就南海西部海区、南海北部湾几个石油区块、南海东部部份海区、南黄海海区及渤海湾部分地区开展了卓有成效的科研工作, 积累了我国近海海洋土性质的基础资

料, 但和陆地土的研究进展相比较, 仍然还有较大差距, 有待于进一步发展、积累和提高。

我国沿海地区分布有大量的软土, 特别是对湛江、上海、福建、杭州、宁波、连云港、温州、广州、天津等地的软土进行了大量的科研工作, 积累了较为丰富的工程经验, 提出了一些有效的处理措施^[2-6], 并在相关手册中获得其基本特性的经验值^[7]。以往对琼州海峡近海海洋土的工程特性研究积累不多, 相关文献资料尚不多见, 而随着琼州海峡周边经济的发展, 在琼州海峡两岸近海海域内软土上修建各种构筑物也相应增多, 目前对海洋土的物理力学特性与其微观特性的联系研究还不充分, 且没有得到应有的重视, 对如何考虑近海海洋土的结构性来选择地基处理措施就相对较为薄弱。针对这一现状, 本文对海口某近海海域一种海洋软土的工程特性进行了室内试验研究, 并初步从微观角度解释了其工程性质的原因, 以深入对海洋软土基本特性的认识。

收稿日期 2001-03-21

作者简介: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 主要从事特殊土与非饱和土方面的研究工作。

2 海洋软土的基本特性

本研究所用土样取自琼州海峡铁路轮渡工程海口海域南港港池内,距海岸线 500 m 左右离北防波堤 90 m 处的 5 个钻孔(S1~S5),孔间距为 20 m。由于海上取样易受扰动,为能获得高质量的原状土样,我们严格按照《原状土取样技术标准》(JGJ89-92)要求,在海上安装了专门的海洋钻孔平台以减小风浪影响,并采用敞口薄壁取土器 TB100A 和不锈钢取样管 100 mm × 300 mm 进行软土原状土取样。取样期间,水深在 7.0 m 左右,钻探入土深度为 8.0 m,取原状土样深度为 4.2~7.5 m,与南港海口防波堤完全爆炸挤淤的软土层厚度相一致,土样也较为均匀,为灰色淤泥质粘土,流塑~软塑,含少量贝壳。

所取原状土样的物理性质、颗粒大小分布、力学性质和矿物组成与物理化学性质分别见表 1、表 2、表 3 和表 4;典型的压缩曲线和三轴 CU 剪试验主应力差与轴向应变关系分别见图 1 和图 2。

由表 1 和表 2 可见,海口海洋软土天然含水量为 73.0%左右,比其液限含水率高约 10.0%,塑性指数为 31.0~38.0,孔隙比高达 2.0;颗粒组成主要为粘粒和粉粒,粘粒含量达 30.0%,粉粒含量接近 60.0%,渗透

表 1 海口海洋软土的物理性质

Table 1 Physical properties of marine soft soil from Hai-kou

土样 编号	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	天然含水 量 $w/\%$	比重 G_s	孔隙比 e	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	渗透系数 $K/10^{-7}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
S1	15.4	73.3	2.71	1.98	59.8	25.3	34.5	1.571
S2	15.5	69.4	2.71	1.91	56.8	25.0	31.8	
S3	15.4	72.4	2.71	1.97	57.7	23.5	34.2	1.488
S4	15.0	76.5	2.70	2.11	65.9	28.0	37.9	
S5	15.0	74.9	2.70	2.08	61.3	25.8	35.5	1.500

表 3 海口海洋软土的力学性质

Table 3 Mechanical properties of marine soft soil from Hai-kou

土样 编号	先期固结压 力 p_c/kPa	压缩系数 $\alpha_{v1-2}/\text{MPa}^{-1}$	无侧限抗压 强度 q_u/kPa	粘聚力 c/kPa				内摩擦角 $\phi/(\circ)$			
				快剪	固结快剪	三轴 UU 剪	三轴 CU 剪	快剪	固结快剪	三轴 UU 剪	三轴 CU 剪
S1	30.0	2.496	11.1	9.2	8.5			5.5	14.9		
S2	30.0	2.438	8.1	8.4	3.9			5.5	18.9		
S3	30.0	2.391	15.7	4.4	4.4	5.6	0.6	3.8	19.7	5.9	13.1
S5	30.0	2.556	13.3	9.9	5.1			5.9	17.2		

表 4 海口海洋软土的物质组成与物理化学性质

Table 4 Substance composition and physico-chemical properties of marine soft soil from Hai-kou

土样 编号	矿物组成/ $\%$					pH 值	易溶盐总量 / $\%$	有机质 / $\%$	游离氧化物/ $\%$			
	石英	长石	高岭石	伊利石	绿泥石				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	无定形 Fe ₂ O ₃
S1	30		15	25	30	8.7	1.13	2.60	1.95	0.56	0.64	0.044
S4	25	10	10	35	20	9.2	1.32	2.33	2.00	0.63	0.63	0.042

表 2 海口海洋软土的颗粒大小分布
Table 2 Grain size distribution of marine soft soil from Hai-kou

土样 编号	颗粒组成/ $\%$				
	< 0.002 mm	0.002~0.005 mm	0.005~0.01 mm	0.01~0.05 mm	> 0.05 mm
S1	19.2	11.3	19.5	43.0	7.0
S2	16.0	12.0	17.0	46.0	9.0
S3	16.0	12.0	19.0	43.0	10.0
S4	20.0	13.5	17.5	41.0	8.0
S5	18.0	13.0	18.0	43.0	8.0

系数很小,基本属于相对不透水层,按土质分类属于淤泥的范畴。

从力学性质看,海口海洋软土在低压力下就有大的压缩性,但 $e-p$ 曲线在压力为 30.0 kPa 时,可见一定的上突拐点,压缩系数随压力增大而增大;当垂直压力超过 30.0 kPa 时,压缩系数显著增大;垂直压力在 50 kPa 以后,压缩系数才随压力增大而减小,表现出重塑土的压缩变形特征。用卡萨格兰法求得的 p_c 值均为 30.0 kPa,而从取土的深度看, p_c 值与其上覆压力相当,无侧限抗压强度仅为 10 kPa 左右,说明海口海域软土为正常固结粘土。抗剪强度指标表明,海口海洋软土快剪 c_q, ϕ_q 平均值分别为 8.0 kPa 和 5.2°;相应的固结快剪 c_{cq}, ϕ_{cq} 平均值分别为 5.5 kPa 和 17.7°,三轴 UU, CU 剪的 c_u, ϕ_u 分别为 5.6 kPa 和 0.6°,及 c_{cu}, ϕ_{cu} 分别为 5.9 kPa 和 13.1°。直剪指标内摩擦角偏大一方面是由于该软土夹杂有少量贝壳,另一方面则是由直剪试验方法的局限性所导致的,但从整体看,其强度特性与一般近代沉积的淤泥相一致。从图 2 的曲线形状所反映出的强度变化规律与图 1 基本吻合,证实该软土结构性很弱,或者说基本无结构强度。这和

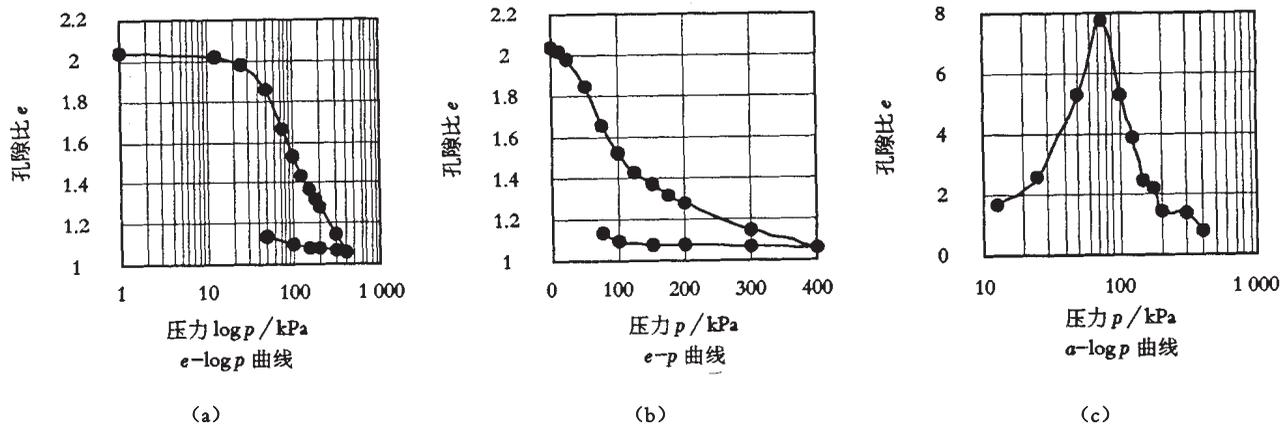


图1 典型压缩曲线
Fig.1 Typical compression curve

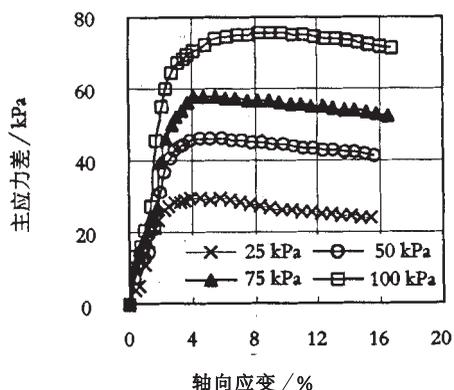


图2 三轴 CU 剪主应力差与轴向应变关系曲线
Fig.2 The $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ relation curve of triaxial consolidated-undrained test

以往天然软土的固结试验和三轴试验成果相比较^[2-6],基本反映了天然软土的工程特性,说明取样质量是较好的。

上述结果均证实该海洋软土的工程特性很差,这种不良工程性质是与其物质组成与物理化学性质密切相关的。从表4可以看出,海口海洋软土的原生矿物含量占30~35%,次生粘土矿物含量高达65~70%,易溶盐总量高达1.2%,有机质含量较高,为2.5%左右。由于原生矿物如石英一般是粉粒组的主要成分,粘土矿物则是粘粒组的主要矿物成分,吸附性较强。以往的研究表明,有机质粒径很小,一般呈凝胶状,具有表面活性,其对土的工程性质的影响甚大,它不仅会对土的分散性、含水量与干密度等物理性质产生影响,而且会使土的压缩性、强度等力学特性恶化,当土中含有1%~2%有机质时,其对土的工程性质影响就较大^[8]。游离氧化物虽有一定的含量,但pH值均超过8.5,处于弱碱性环境中,而游离氧化物等电

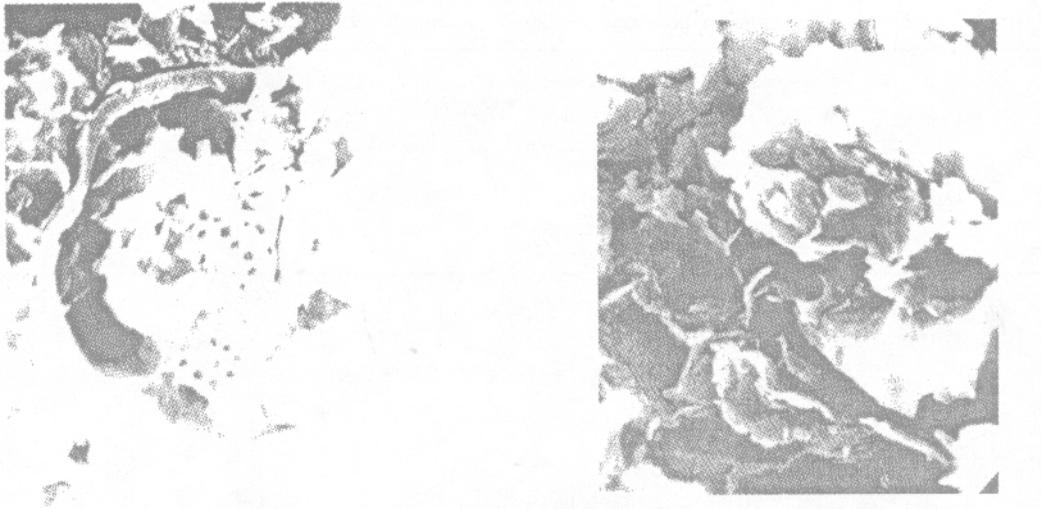
pH值一般小于8.0^[8],游离氧化物不可能带正电荷而与粘土矿物产生胶结作用。这就使得该软土的土粒表面易形成较扩展的扩散双电层,使其趋于分散状态,塑性较大,含水量大,干密度小和抗剪强度小;且由于粘粒的亲水性和有机质对孔隙溶液的粘滞性,使其渗透性基本为相对不透水层。因此,海口海洋软土的物质组成、有机质含量与物理化学性质是导致其不良工程性质的主要原因之一。

3 海洋软土的微观结构

微观结构研究包括用英国剑桥仪器公司生产的S-250MK III型扫描电子显微镜观察海口海洋软土的微观形态和用美国麦克公司生产的9310型微孔结构分析仪测其孔径分布特征两部分,该压汞仪测定的孔径尺寸范围为300~0.006 μm。

为了能使测得的微观结构结果能真实地反映所研究软土的天然结构形貌,我们采用冷冻真空升华干燥法进行样品制备。样品制备方法是先将原状土样切成1.0 cm³左右的土块,将其在液氮(沸点-196℃)中快速冷冻15 min,使土中液体成为不具膨胀性的非结晶态冰,然后在-50℃状态下用英国爱德华冷干机(Edwards Freeze Dryer)抽真空8 h以上使土中非结晶的冰升华,通过蒸汽抽走,从而达到土样既干燥又不变形的目的^[9-10]。因此,我们所测得的结果能真实反映该软土层的微结构特征。

用扫描电镜观测海口海洋软土的微观形态的电镜照片如图3所示,用压汞仪测得的孔隙大小分布曲线见图4。为了便于说明,我们根据图4的曲线形状和变化规律,粗略地将孔隙分为大孔隙(>10.0 μm)、中孔隙(10.0~1.0 μm)、小孔隙(1.0~0.1 μm)和微孔隙(<



照片 1 海口 S3 4 000 ×

照片 2 海口 S5 5 000 ×



照片 3 海口 S5 6 000 ×



照片 4 海口 S5 8 000 ×

图 3 海口海洋软土的扫描电镜照片

Fig.3 SEM photo of of marine soft soil from Hai-kou

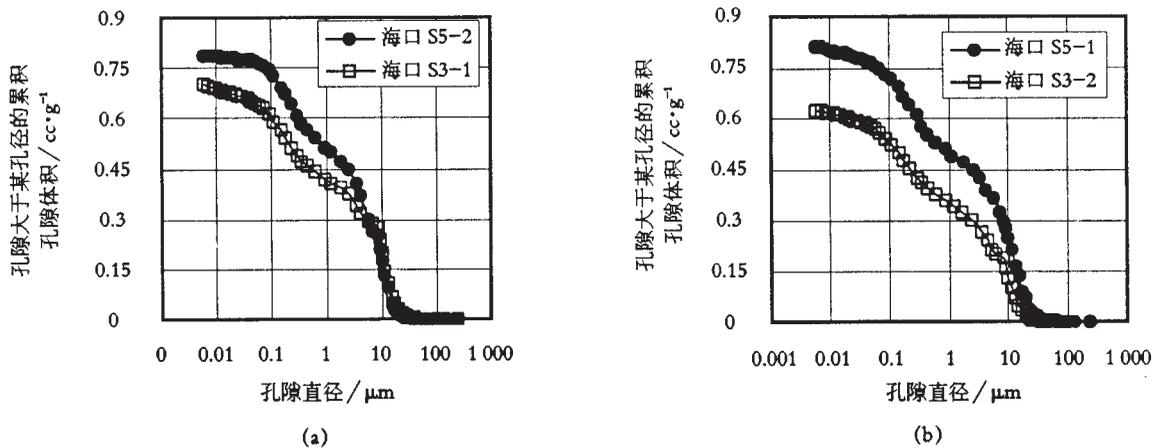


图 4 海口海洋软土的孔隙大小分布曲线

Fig.4 Pore size distribution curve of marine soft soil from Hai-kou

表 5 海口海洋软土的孔隙大小分布分析结果
Table 5 The results of pore size distribution analysis of marine soft soil from Hai-kou

土样 编号	干密度 /g·cm ⁻³	可测范围的孔隙 总体积/mm ³ ·g ⁻¹	体积平均 孔径/μm	孔隙体积分布/mm ³ ·g ⁻¹			
				大孔隙/μm > 10.0	中孔隙/μm 10.0~1.0	小孔隙/μm 1.0~0.1	微孔隙/μm < 0.1
S3-1	0.817 5	701.1	3.168 9	194.4	214.6	194.9	97.2
S3-2	0.866 6	626.2	2.084 8	129.9	220.7	183.7	91.9
S5-1	0.777 6	810.2	2.991 4	244.4	242.0	229.5	85.3
S5-2	0.717 0	788.3	3.659 7	170.9	330.2	224.4	62.8

0.1 μm)四级,相应的孔隙大小分布分析结果见表 5。

从电镜照片 1~4 可以清晰地看出,海口海洋软土含有如硅藻等生物碎屑,基本单元体成絮凝结构的片状,絮凝体间由粗细不均,长短不一的链条拉结,形成絮状链接结构,基本单元体之间架空,接触点数目较少,孔隙发育且孔隙尺寸较大,构成十分松散的骨架,未见有明显的粒状颗粒;从孔径分布规律看(见图 4 和表 5),该软土的孔隙以大孔隙、中孔隙和小孔隙为主,尤其是大孔隙占有较大比例,这与扫描电镜观测到的微观形态相一致。由此可见,由于海口海洋软土的基本单元体成片状絮凝结构,基本单元体之间架空,接触点数目不多,架空孔隙尺寸大,大于 10 μm 的大孔隙占有较大比例,构成十分松散的柔性骨架,且因有机质含量多,又不存在一定的胶结连接,使其架空孔隙不稳定,在一定的应力作用下就失去稳定,压缩性大,强度低,表现出淤泥的力学特性。

4 结 语

海口海域软土的物理性质很差,按土质分类为淤泥;从力学性质看,无侧限抗压强度为 10 kPa 左右,先期固结压力仅为 30 kPa,属正常固结粘土,压缩变形特征和抗剪强度与一般的淤泥特性相一致,基本无结构强度。上述不良工程特性是由其矿物成分、有机质含量、物理化学性质、微观形态、孔隙结构以及土颗粒间的排列方式所决定的。本文采用宏观与微观相结合的研究方法论证海口海洋软土的不良工程特性,加深了对海洋软土基本性质的认识。

致 谢

本项研究承蒙粤海铁路有限责任公司、中国科学院力学研

究所、中交第四航务工程勘察设计院有关专家的大力支持,参加研究工作的还有陈守义研究员、张华博士和陈碧君女士,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 何广讷. 海洋工程中岩土工程的若干问题[A]. 区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集[C]. 北京:原子能出版社,1996.19-23.
- [2] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):100-111.
- [3] 魏汝龙著. 软粘土的强度和变形[M]. 北京:人民交通出版社,1987.
- [4] 张诚厚,袁文明,戴济群. 软粘土的结构性及其对路基沉降的影响[J]. 岩土工程学报,1995,17(5):25-32.
- [5] 冯铭璋. 软土压缩曲线特征[J]. 岩土工程学报,1992,14(5):95-100.
- [6] 龚晓南,熊传祥,项可祥等. 粘土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. 水利学报,2000,22(10):43-47.
- [7] 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1995,844-846.
- [8] 钱家欢,殷宗泽主编. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996,2-12.
- [9] Kong L W, Luo H X, Tan L R. Fractal study on pore space distribution of red clay in China [A]. In: **Proc.10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering** [C]. Beijing: International Academic publishers, 1995.139-142.
- [10] Kong L W, Tan L R. A simple method of determining the soil-water characteristic curve indirectly[A]. In: **Unsaturated Soils for Asia** [C]. Singapore: Rotterdam: Balkema A A, 2000. 341-345.