

文章编号: 0559-9350 (2002) 09-0082-07

湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制

孔令伟¹, 吕海波¹, 汪 稔¹, 单华刚¹

(1 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: 对琼州海峡湛江海域的一种海洋土的基本性质进行了系统的试验研究。该海洋土的物理性质较差, 按土质分类属于淤泥, 但其压缩变形特征与强度指标有别于一般性淤泥或淤泥质土, 表观先期固结压力 p_c 值为 100 ~ 125kPa, 无侧限抗压强度 q_u 达 50kPa 左右, 灵敏度大于 12, 抗剪强度也相对较高, 具有一定的结构强度, 是一种结构性软土。初步从矿物组成、物理化学性质、胶结特性与孔隙结构特征几方面分析了其特殊工程性质的微观机制, 揭示了其影响爆炸挤淤施工的机理。

关键词: 海洋土; 土的结构性; 淤泥; 工程特性; 微观结构

中图分类号: TU441.3

文献标识码: A

琼州海峡铁路轮渡工程北港湛江海域防波堤在进行爆炸挤淤施工中, 出现按通常爆填施工抛石层未能达到原设计标高, 而南港海口海域防波堤能按正常爆填施工的异常现象。原勘察资料表明两海域软土均为淤泥, 究竟是何种原因影响爆炸挤淤处理湛江海域海洋土的效果, 能否用该海域海洋土作为北港防波堤的下卧持力层需要作进一步的论证。为此, 业主粤海铁路有限责任公司邀请国内多方面专家进行了论证工作, 初步认为湛江沿海地区的粘土工程特性独特, 具有较高的结构强度, 可能该海域的海洋土是一种结构性粘土; 由于海上取样易受扰动, 原勘察资料可能未能取得该海域天然软土的高质量土样, 但以往对该海域的海洋土的工程特性认识不多, 其是否具有较高的结构强度尚不可知。而根据国内外相关文献报道, 天然粘土具有不同程度的结构性, 但其结构性是不可逆的, 结构性一旦受到破坏, 短期内将无法恢复, 力学性质受到严重的恶化而很难改善, 某些结构性粘土地基往往会在缺乏预兆情况下产生突然破坏而引起灾害, 在工程设计中, 如何考虑结构性对强度及变形特性的有利影响, 避免土骨架结构不稳定性不利作用都是十分重要的问题^[1~10]。因此, 业主立项开展科研工作, 以期弄清该海洋土影响爆炸挤淤施工的机理, 论证用防波堤下部的软土作为下卧持力层的可行性。

我们结合这一课题, 重新在该海域进行了钻孔取样, 并开展了较为系统的试验研究。限于篇幅, 论文仅对该海洋土是否具有结构性以及引起其工程性质的机制作初步探讨, 为揭示北港下卧软土层影响爆炸挤淤施工的机理提供依据。

1 现场钻孔布置与取样方法

根据在湛江海域防波堤进行爆炸挤淤的施工记录, 为获得该海域未受爆炸挤淤施工影响的土样, 在该海域港池内距防波堤 90m 处布置钻孔 5 个 (N1 ~ N5), 孔间距为 20m。钻孔借助海洋平台完成, 以减小风浪影响, 钻探采用回转岩芯钻探方法, 跟进的套管孔径为 146mm。所有操作严格按《原状土取样技术标准》(JGJ89-92) 要求实施, 采取土样用快速静力连续压入法, 所用取土器为敞口薄壁取土

收稿日期: 2001-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19902018)

作者简介: 孔令伟 (1967—), 男, 湖北通山人, 博士, 研究员, 主要从事特殊土和非饱和土力学特性研究。

器 TB100A 和不锈钢取样管 100×300。

为能取得与防波堤施工后未被挤淤的下卧软土层相符的原状土样，钻探入土深度为 8.0m，取样深度为 4.0~7.0m，土层较为均匀，为灰色淤泥质粘土，软塑，混少量贝壳。

2 基本工程特性

为能弄清该海洋土的基本工程特性，我们从其物理特性、压缩变形特征与抗剪强度几方面开展了试验研究，其物理性质指标如表 1 所示，表 2 为其颗分试验结果，压缩变形特性试验结果汇总于表 3，抗剪强度指标见表 4，典型的压缩曲线如图 1 所示，无侧限轴向应力与轴向应变曲线如图 2，三轴 CU 剪主应力差与轴向应变如图 3 所示。

表 1 湛江海洋土的物理性指标

样号	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	天然含水率 $w (\%)$	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 $K \times 10^{-7} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
湛江 N1	15.6	67.4	2.70	1.84	65.1	22.3	42.8	1.701
湛江 N2	15.7	69.0	2.70	1.85	69.8	21.5	48.3	/
湛江 N3	15.6	63.5	2.70	1.78	69.2	26.7	42.4	1.493
湛江 N4	16.0	65.3	2.70	1.74	57.8	19.9	37.9	1.634
湛江 N5	15.7	65.1	2.70	1.79	63.5	22.0	41.5	/

表 2 湛江海洋土的颗粒大小分布

样号	颗粒组成 (%)				
	<0.002mm	0.002~0.005mm	0.005~0.01mm	0.01~0.05mm	>0.05mm
湛江 N1	4.0	11.0	11.5	65.5	8.0
湛江 N2	6.0	12.0	15.3	58.7	8.0
湛江 N3	6.5	8.5	12.0	64.0	9.0
湛江 N4	4.0	16.0	14.8	57.2	8.0
湛江 N5	5.0	10.0	11.5	65.5	8.0

表 3 湛江海洋土的压缩变形特性

样号	先期固结压力	压缩系数	原状土无侧限抗压	重塑土无侧限抗压	灵敏度 S_r
	p_c / kPa	$\alpha_{v1-2} / \text{MPa}^{-1}$	强度 q_u / kPa	强度 q'_u / kPa	
湛江 N1	100.0	4.075	41.1	2.8	14.7
湛江 N2	100.0	3.497	56.6	3.8	14.9
湛江 N3	125.0	2.296	/	/	/
湛江 N4	100.0	3.371	50.1	3.9	12.9
湛江 N5	100.0	3.886	65.7	5.2	12.6

表 4 湛江海洋土的抗剪强度指标

样号	直接剪切强度				三轴剪切强度			
	C_q / kPa	$\phi_q / ^\circ$	C_{cq} / kPa	$\phi_{cq} / ^\circ$	C_u / kPa	$\phi_u / ^\circ$	C_{cu} / kPa	$\phi_{cu} / ^\circ$
湛江 N1	19.3	9.9	7.2	20.4	/	/	/	/
湛江 N2	18.5	7.7	14.9	21.2	/	/	/	/
湛江 N3	19.8	9.9	8.5	18.9	36.0	5.4	30.0	8.8
湛江 N4	16.1	7.6	6.9	20.1	/	/	/	/
湛江 N5	14.7	7.6	10.5	21.9	/	/	/	/

从上述图表不难看出，该海洋土的工程特性呈如下特征：

(1) 该海洋土的物理特性较差，其天然含水率为 65.0% 左右，与其液限含水率相当，孔隙比接近 1.80，塑性指数高达 37.0~48.0%；从颗分资料看，主要以粉粒和粘粒为主，粘粒超过 15.0%，粉粒超过 80.0%，渗透系数很小，基本属于相对不透水层，按照土的分类标准属于淤泥。

(2) 从固结试验和无侧限抗压强度试验结果看, 其压缩曲线与常见的淤泥不同, 当垂直压力小于 $100 \sim 125 \text{kPa}$ 时, $e \sim p$ 曲线出现上突拐点, 压缩系数随压力增大而增大; 当垂直压力超过 $100 \sim 125 \text{kPa}$ 时, 压缩曲线呈陡降形, 压缩系数显著增大; 只有垂直压力达 200kPa 以后, 土体的压缩曲线规律才与常见的压缩曲线相符。用卡萨格兰法求得的 p_c 值为 $100 \sim 125 \text{kPa}$, 而从取样的深度看, 其天然的上覆层荷重不超过 40kPa ; 且无侧限抗压强度 q_u 达 50kPa 左右, 灵敏度大于 12, 属极高灵敏性粘土。所有这些均表明它与一般性淤泥或淤泥质土有很大的差异, 呈现出典型结构性粘土的特征, 具有一定的结构强度。

(3) 抗剪强度相对比很软的粘土为高, 其快剪 C_q 、 ϕ_q 平均值分别为 17.7kPa 和 8.5° , 相应的固结快剪 C_{cq} 、 ϕ_{cq} 平均值分别为 9.6kPa 和 20.5° ; 三轴 UU、CU 剪的 C_u 、 ϕ_u 分别为 36.0kPa 和 5.4° , C_{cu} 、 ϕ_{cu} 分别为 30.0kPa 和 8.8° ; 且从图 3 的曲线类型也可以看出, 在固结压力较小时, 该土表现出一定的应变软化特性, 这也进一步证实了其具有一定的结构强度。

综上所述, 湛江海域海洋土虽按土质分类为淤泥, 但其力学特性有别于一般性淤泥或淤泥质土, 具有一定结构强度, 是一种结构性软土; 而海口对应海域软土的工程特性则不同, 其物理性质很差, 无侧限抗压强度为 10kPa 左右, 先期固结压力仅为 30kPa , 与其上覆压力相当, 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, 是一般性淤泥^[11]。正因为琼州海峡南北两海域软土的工程特性不同, 导致其工程效应不同, 从而出现湛江海域防波堤在爆炸挤淤施工中按通常爆填施工未能达到原设计标高, 而海口海域防波堤能按正常爆填施工的异常现象。然而, 该海洋土与以往在该海域周边的内陆性粘土相比, 结构性并不强, 如湛江沿海地区某灰色粘土由于存在较强的化学胶结特性, 其物理性质指标也较差, 灵敏度为 10 左右, 但其具有高达 $500 \sim 600 \text{kPa}$ 的无侧限抗压强度和 900kPa 的表观先期固结压力^[6-8], 究竟是何因素使该土的结构性并不强, 需要从微观特性进行探讨。

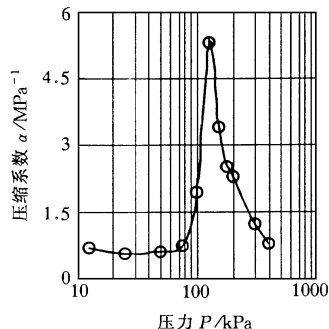
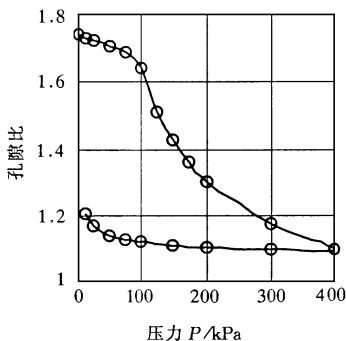
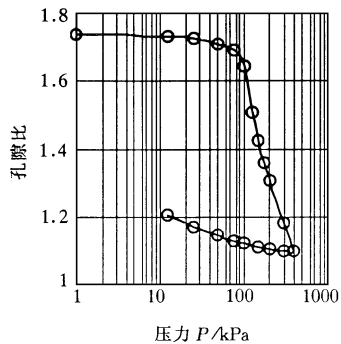


图 1 典型湛江海洋土原状样压缩曲线 (N4)

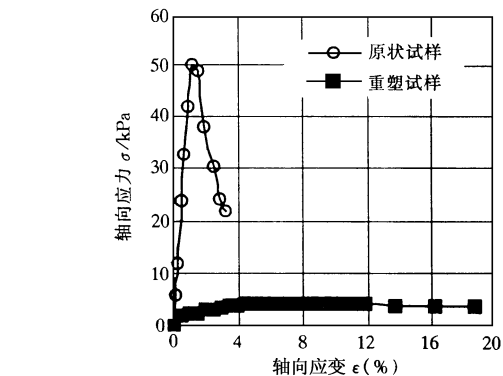


图 2 典型无侧限轴向应力与轴向应变关系曲线 (N4)

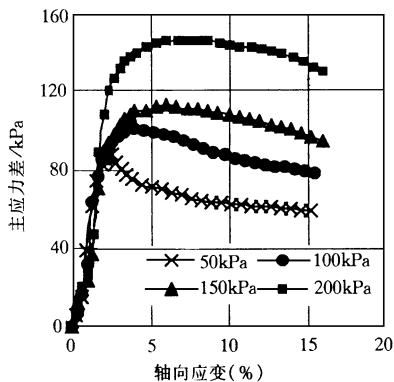


图 3 三轴 CU 剪主应力差与轴向应变关系曲线 (N3)

3 微观特性

由于土的工程性质归根结底是由土的成分和结构决定的, 为揭示该海洋土特殊工程特性的机理,

我们运用几种现代分析测试手段对其微观结构和成分进行了测试, 并分析其工程特性的微观机制。

3.1 试验方法和试验结果 矿物组成以 JCPDS 卡片 (国际粉末衍射标准联合委员会) 为测试依据, 采用 DMAX-3AB X 射线衍射仪确定; 物理化学性质测试包括硅、铝、铁游离氧化物含量、有机质含量、pH 值和易溶盐总量。无定形氧化铝和氧化硅用碱溶解法测定, 用 0.5N 氢氧化钠溶解法测定游离无定形氧化铝和氧化硅的含量, 用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠 (DCB) 选择溶解法测出游离氧化铁的含量, 无定形 (非晶的) 游离氧化铁提取方法用酸性草酸铵 (Tamm 溶液) 缓冲液提取法; 有机质含量、酸碱度 pH 值分别用重铬酸钾容量法和电测法确定。测试结果汇总于表 5。

微观结构研究包括用英国剑桥仪器公司生产的 S-250MK II 型扫描电子显微镜观察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 (压汞测孔仪) 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 $300 \sim 0.006 \mu\text{m}$ 。为测得的微观结构结果能真实反映土样的天然结构形貌, 我们采用冷冻真空升华干燥法进行样品制备, 因如采用风干法和烘干法备样, 土样将产生显著的收缩变形, 用该样品进行微结构试验所得结果将严重失真^[12~13]。为此, 采用的样品制备方法是事先将原状土样切成 1.0cm^3 左右的土块, 将其在液氮 (沸点 -196°C) 中快速冷冻 15min, 使土中液体成为不具膨胀性的非结晶态冰, 然后在 -50°C 状态下用英国爱德华冷干机 (Edwards Freeze Dryer) 抽真空 8h 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^[13]。原状样的微观形态电镜照片和孔隙大小分布曲线分别见图 4 与图 5, 为比较该土样在结构破坏前后孔隙结构的变化, 图 5 同时给出了相同初始状态不同固结压力条件下的孔隙结构试验结果, 以兹对照。为便于分析, 根据图 5 的曲线形状和变化规律, 粗略地将孔隙分为大孔隙 ($> 10.0 \mu\text{m}$)、中孔隙 ($10.0 \sim 1.0 \mu\text{m}$)、小孔隙 ($1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$) 和微孔隙 ($< 0.1 \mu\text{m}$) 4 级, 相应的孔隙结构分析结果见表 6。

表 5 湛江海洋土的物质组成与物理化学性质

样号	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
湛江 N1	40	10		25	25	8.4	1.36	1.37	1.08	0.62	0.88	0.040
湛江 N5	35	15	5	35	10	8.5	1.72	1.19	0.93	0.56	0.57	0.034

表 6 湛江海洋土的孔隙结构分析结果

样号	干密度 ρ (g/cm ³)	可测范围的 孔隙总体积 V_v (mm ³ /g)	体积平均孔径 r_v (μm)	孔隙体积分布 / (mm ³ /g)				备注
				大孔隙 $> 10.0 \mu\text{m}$	中孔隙 $10.0 \sim 1.0 \mu\text{m}$	小孔隙 $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$	微孔隙 $< 0.1 \mu\text{m}$	
湛江 N3-1	1.0405	489.2	2.6683	16.5	285.8	116.7	70.2	原状样
湛江 N3-2	1.0783	460.4	2.9117	13.3	283.5	102.0	61.6	原状样
湛江 N5-1	0.9539	590.5	1.8174	6.7	345.0	159.9	78.9	原状样
湛江 N5-2	0.9897	581.5	1.8179	3.0	346.9	156.4	75.2	原状样
湛江 N5-3	0.9689	585.3	1.2164	13.4	285.3	186.1	100.5	固结压力 100kPa
湛江 N5-4	1.1331	489.0	0.9686	45.2	184.6	164.0	95.2	固结压力 200kPa
湛江 N5-5	1.1864	408.2	0.4369	94.0	66.7	150.7	97.3	固结压力 800kPa

3.2 微观机制分析 由表 5 的结果可知, 该海洋土原生矿物以石英和长石为主, 次生粘土矿物以伊利石和绿泥石为主, 且其矿物成分含量基本各占 50%。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, 具亲水性; 且该土含有 1.1%~1.4% 的有机质, 有机质粒径很小, 一般呈凝胶状, 具有表面活性和粘滞性, 有机质含量对土的性质的影响甚至要比蒙脱石大, 当土中含有 1%~2% 有机质时, 其对土的工程性质影响就较大了, 它会对土的分散性、含水率与干密度等物理性质产生影响^[14]。这就是该土颗粒组成以粉粒和粘粒为主, 含水率大, 干密度小, 渗透系数很小的根本原因, 从而使其呈现淤泥或淤泥质土的物理特性。

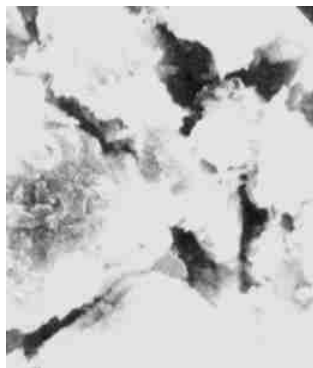
虽然在土业界, 一般认为硅、铝、铁游离氧化物及其水合物虽是土粘粒的次要成分, 但它对土的工程特性所起的作用是不容忽视的, 特别是在土颗粒团聚中起重要的胶结作用, 它能加强土颗粒之间的结构连结, 但所起作用程度与其赋存状态和所处的酸碱度 (pH 值) 等物理化学环境密切相关^[15~16]。表 5 的结果表明, 其游离氧化物虽有一定的含量, 但并不大, 且 pH 值大于 8.0, 该土处于

弱碱性环境中，由于游离氧化物等电 pH 值一般小于 $8.0^{[14]}$ ，游离氧化物带正电荷的可能较小，真正起胶结作用的可能性不大，不会是该土具有结构强度的根本原因；由图 4 的电镜照片可清楚看出，该土除存在成絮凝结构的片状基本单元体以外，还明显存在较大的粒状颗粒，且片状单元体粘贴在粒状颗粒的表面和粒状颗粒之间的触点面上，可起一定的联结作用，虽然其含有如硅藻等生物细隙，孔隙较发育，但基本单元体间接触点较多，相对一般淤泥或淤泥质土较为密实，很大的架空孔隙并不多。压汞试验结果（表 6 和图 5）表明，该土原状样的孔隙结构主要以中、小孔隙为主，微孔隙约占 15.0% 的比例，基本不存在大于 $10^4\mu\text{m}$ 的孔隙，这与扫描电镜观测的微观形态相一致；但该土在结构破坏前，其孔隙结构特征明显不同，当垂直压力小于 p_c 值时，土样的中孔隙体积稍有减小，但总的孔隙结构与原状样相比基本相似；而当垂直压力超过 p_c 值时，所测得孔隙总体积急剧减小，其中中孔隙体积的减少十分显著，小孔隙与微孔隙未发生本质的改变，这表明结构破坏主要是中孔隙压缩变形的贡献。至于表 6 出现大孔隙含量在该土破坏后反而增大的异常现象，我们认为是固结试验卸荷回弹所造成的，因为土体的结构破坏后其性质接近于回弹指数较大的重塑土，应力水平越高，相应卸荷回弹产生的大孔隙就越多。因此，该土的架空孔隙具有一定的相对稳定性，在较低的应力水平条件下孔隙不会发生过大的变形，基本能保持稳定状态，具有一定的结构强度，但由于基本单元体之间缺乏非常稳定的胶结连结，其结构强度并不大，在较高的应力作用下会使中孔隙失稳，颗粒重新排列，产生不可恢复的突然变形，呈现出结构性粘土的典型压缩变形特征，有别于一般性的淤泥或淤泥质土。

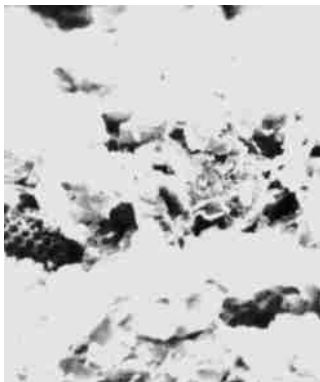
可见，湛江海洋土特殊物理力学特性是由其物质组成、孔隙结构与土颗粒物理联结方式所引起的，游离氧化物所发挥的化学胶结作用不大，不是其具有一定的结构强度的主要原因。



照片 1 湛江 N3 5000×



照片 2 湛江 N3 10000×



照片 3 湛江 N5 2000×



照片 4 湛江 N5 10000×

图 4 湛江海洋土的扫描电镜照片

4 结论

通过试验研究，可得到如下几点认识：（1）严格按照原状土取样技术要求，借助海洋平台减小风

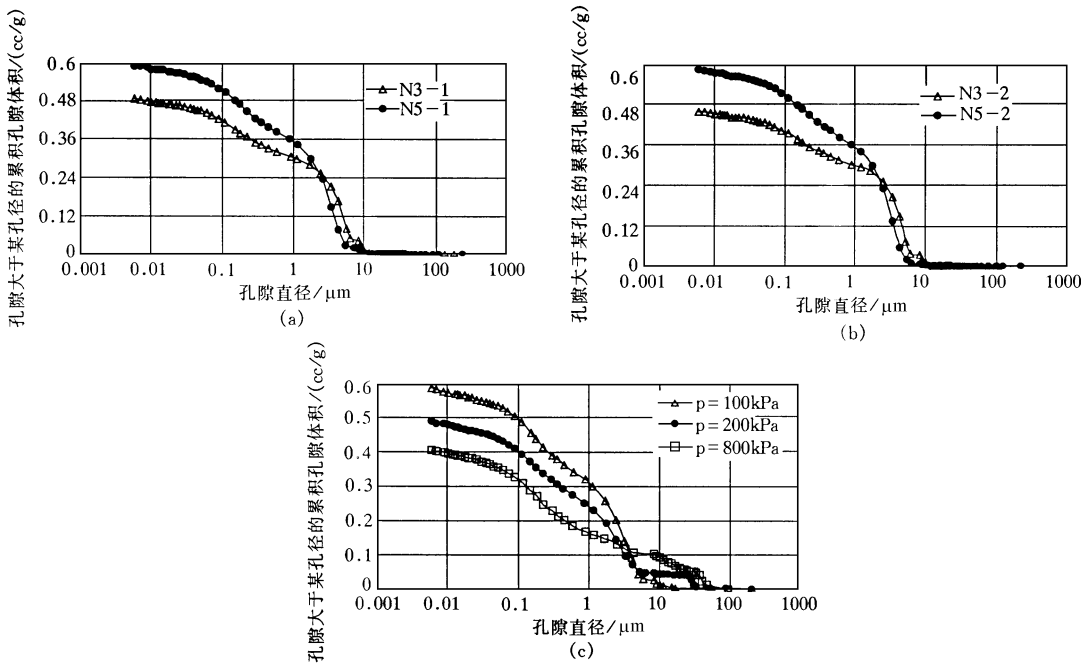


图5 湛江海洋土的孔隙大小分布曲线

波影响, 采用较大尺寸的薄壁取土器取软土原状样, 相对扰动较小, 用该原状样进行试验所得结果才能相对真实地反映天然软土的工程特性, 应引起工程勘察单位的高度重视。(2) 所研究湛江海洋土的灵敏度大于12, 属极高灵敏性粘土。虽其天然含水率高, 孔隙比大, 液塑限高, 颗粒组成主要以粉粒和粘粒为主, 渗透系数小, 物理性质指标很差, 按照土的分类标准属于淤泥; 但其力学特性有别于一般近代沉积的淤泥或淤泥质土, 表观先期固结压力 p_c 值为100~125kPa, 无侧限抗压强度 q_u 达50kPa左右, 其抗剪强度相对较高, 具有一定的结构强度, 是一种结构性软土。这是其对爆炸挤淤施工有影响, 从而出现在该海域进行防波堤爆炸挤淤过程中出现按通常爆填施工未能达到原设计标高异常现象的主要缘由。(3) 湛江海洋土的特殊物理力学性质是由其物质组成、孔隙结构与土颗粒物理联结方式所引起的, 游离氧化物所发挥的化学胶结作用不大, 不是其具有一定的结构强度的主要原因。

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郭爱国、陈守义、张华和陈碧君, 在此一并表示感谢!

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [3] 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.
- [4] 冯铭璋. 软土压缩曲线特征 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14 (5): 95-100.
- [5] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 侯永峰. 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.
- [6] 罗鸿禧, 陈守义. 湛江灰色粘土的工程地质特性 [J]. 水文地质工程地质, 1981 (5): 1-5.
- [7] 谭罗荣, 张梅英. 一种特殊土微观结构特性的研究 [J]. 岩石工程学报, 1982, 4 (2): 26-35.
- [8] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性 [J]. 岩土工程学报, 1982, 4 (1): 34-45.
- [9] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays [J]. Geotechnique, 1990, 40 (3): 327-378.

- [10] Mesri G, Roskhar A, Bohor B F. Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay [J]. *Geotechnique*, 1995, 45 (3): 527–554.
- [11] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 郭爱国. 海口某海域软土工程特性的微观机制浅析 [J]. *岩土力学*, 2002, 23 (1): 36–40.
- [12] Kong L W, Luo H X, Tan L R. Fractal study on pore space distribution of red clay in China [C]. *Proc. 10th ARC-SMFE*, 1995, 1: 139–142.
- [13] Kong L W, Tan L R. A simple method of determining the soil-water characteristic curve indirectly [C]. *Unsaturated Soils For Asia*, 2000, Balkema, Rotterdam.
- [14] 高国瑞. 近代土质学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1990.
- [15] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 红粘土有效胶结特征的初步研究 [J]. *岩土工程学报*, 1995, 17 (5): 42–47.
- [16] 孔令伟, 罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红粘土工程性质的影响 [J]. *岩土力学*, 1993, 14 (3): 25–39.

Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area

KONG Ling-wei¹, LU Hai-bo¹, WANG Ren¹, SHAN Hua-gang¹

(1 Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071, China)

Abstract: The fundamental properties of the structural marine soil in Zhanjiang sea area are studied experimentally. The soil has poor properties and belongs to muck according to the soil classification system, but its compressive deformation characteristics and strength parameters are different from that of muck or muck soil. The pre-consolidation pressure determined by the Cassagrande method is about 100-125kPa, the corresponding unconfined compressive strength reaches 50kPa and sensitivity is more than 12. Moreover, the shear strength is also relatively high. Therefore, this soil is a kind of extra sensitive clay with certain structural strength. The micro-mechanisms of special engineering properties, including mineral composition, physicochemical properties, colloidal behavior are analyzed and their effects on underwater explosion are illustrated.

Key words: marine soil; soil structure; muck; engineering properties; micro-structure