

# 湛江强结构性黏土的物理力学性质指标及相关性分析\*

张先伟<sup>①</sup> 孔令伟<sup>①</sup> 郭爱国<sup>①</sup> 拓勇飞<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

(<sup>②</sup>中交第二公路勘察设计研究院有限公司 武汉 430056)

**摘要** 湛江黏土具有较强的结构性,结构性对土的力学特性影响不容忽视。对湛江黏土的物理力学指标的相关性和变异性进行统计分析,建立重要指标间的关系经验公式,这可为湛江地区地基基础可靠性设计的参数选取提供依据。结果表明,湛江黏土富含黏粒、黏土矿物含量高、含胶凝状的有机质成分、强胶结特性以及片状颗粒为主的絮凝结构是导致其具有不良物理性质和良好力学特性指标的根本原因。不同区域黏土的力学指标空间变异性较大,但物理指标变异性较小。 $e-\omega$ 、 $\omega_L-\omega$ 、 $\omega_L-e$ 、 $a_{1-2}-e$  关系具有线性相关性,但相互关系明显不同于其他地区黏土特征,因此,工程设计中不能简单借鉴其他地区黏土经验公式。

**关键词** 湛江黏土 强结构性 物理力学指标 相关性

中图分类号: TU411 文献标识码: A

## PHYSICAL AND MECHANICAL INDEXES AND CORRELATION ANALYSIS OF CLAY WITH NOTICEABLE STRUCTURES IN ZHANJIANG AREA

ZHANG Xianwei<sup>①</sup> KONG Lingwei<sup>①</sup> GUO Aiguo<sup>①</sup> TUO Yongfei<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

(<sup>②</sup>CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd Rail and Underground Engineering Branch, Wuhan 430056)

**Abstract** The Zhanjiang clay has noticeable structures of effect to the soil's mechanical characteristics can not be neglected. This paper presents the relevance and correlation analysis on the physical and mechanical indexes of Zhanjiang clay. Furthermore, empirical formula of indexes' relations are established. The results show that the basic reasons for poor physical properties and good mechanical properties of Zhanjiang clay are high clay content, clay minerals, gelatinous organic matter, strong adhesive bonded connection and flocculated structure of flaky grains. The spatial variability of clay mechanical index in different regions is substantial. But, the spatial variability of clay physical index is small. The  $e-\omega$ 、 $\omega_L-\omega$ 、 $\omega_L-e$ 、 $a_{1-2}-e$  relationship are linear correlations that are significantly different with other clays in China. Accordingly it can not use the empirical formula developed from other local clays for engineering design. The results presented in this paper provide the basis of reliable design parameter selection for the Zhanjiang area clay foundation.

**Key words** Zhanjiang area clay, Clay structure, Physical and mechanical indexes, Soil mechanics

\* 收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-05-30.

基金项目: 岩土力学与工程国家重点实验室资助项目(SKLZ0803).

第一作者简介: 张先伟, 主要从事特殊土的力学特性研究. Email: xwzhang@whrsm.ac.cn

## 1 引言

湛江位于广东省西南部,包括雷州半岛全部和半岛以北一部分。湛江主要地层为第四系湛江组海陆交互沉积层( $Q_{12}^{mc}$ )沿海地带上覆第四系全新统海积层( $Q_4^m$ )。湛江黏土上覆地层厚度一般数米至几十米不等<sup>[1]</sup>。

湛江黏土具有罕见的强结构特性,当结构强度遭到破坏后,土的力学性质会产生显著的变化。结构性黏土独特的力学性质与工程问题一直是研究的热点与难点,早在20世纪80年代,谭罗荣<sup>[2]</sup>和李作勤<sup>[3]</sup>等学者对湛江黏土的土质特征与工程特性进行了深入的研究,加深了对这种特殊土的强度变形形状与微观机制的认识。此后,蔡羽根据不同剪应变率条件下的三轴试验结果,发现湛江黏土具有独特的剪切速率力学效应<sup>[4]</sup>;孙吉主考虑土结构性的破损过程,建立了结构性软土的边界界面损伤模

型<sup>[5]</sup>;孔令伟提供了一个将防波堤的下卧层的结构性软土作为持力层的工程实例,验证了工程中充分利用软土结构性潜能的合理性<sup>[6]</sup>。但目前对于湛江黏土的研究仍缺乏深入系统的研究,如如何准确判断因结构性引起土的物理力学性质指标的变化,进而为工程提供可靠的设计参数是一项亟待解决的问题。

本文通过对湛江市典型黏土的物理力学指标间的相关性和变异性进行统计分析,对一些重要指标进行一元线性回归,分析强结构性对湛江黏土特性影响的根本机理,结果可为湛江地区地基基础可靠性设计相关参数选取提供依据。

## 2 湛江黏土的物理力学特性

统计所用数据源自湛江市赤坎区、霞山区以及琼州海峡铁路轮渡工程北港的9个区域,数百个钻孔资料,埋深从1~44m不等(图1)。根据室内试

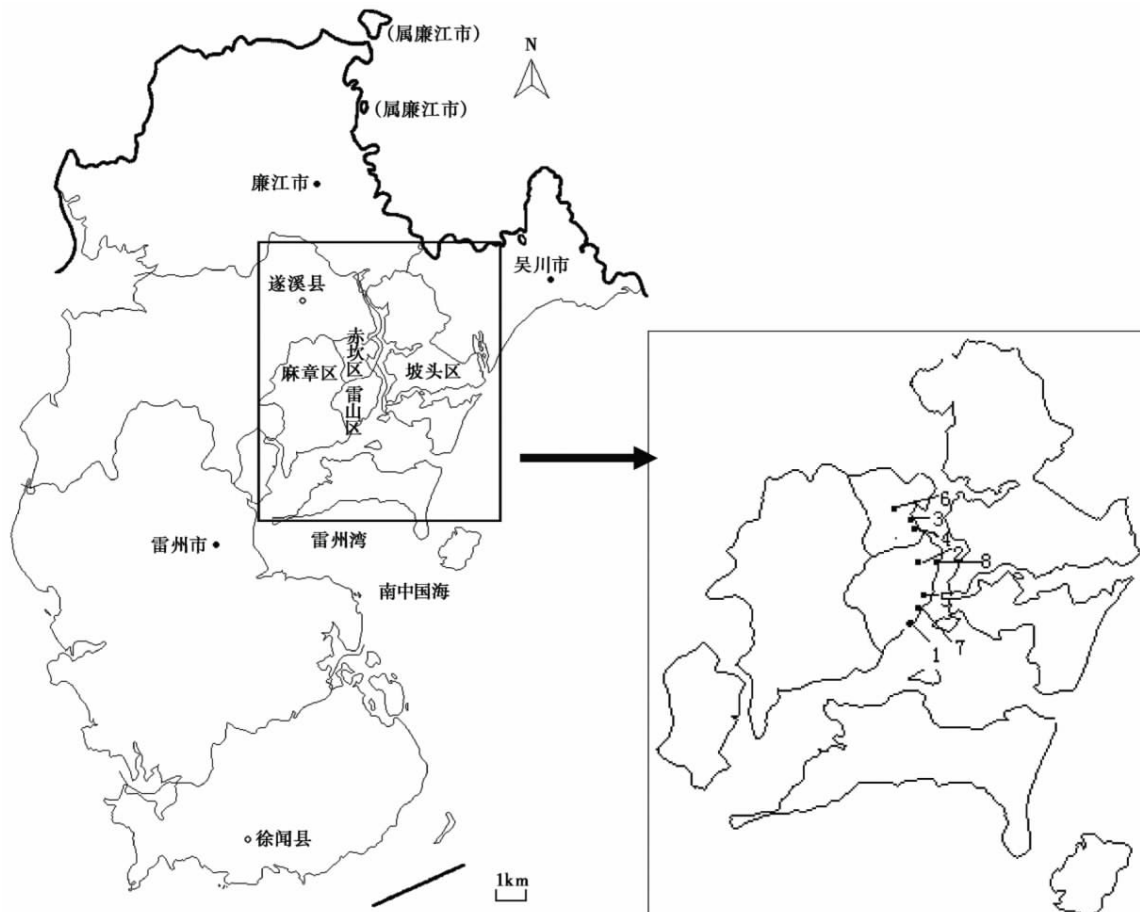


图1 试验区域位置示意图

Fig. 1 Location map of the study area

试验场地: 1-海富大酒店西侧,洪屋路南侧; 2-人民大道西侧,湛江市财政中专学校东侧; 3-海滨大道北,金山花园对面,向阳制药厂厂区北侧; 4-海滨大道与体育北路交叉口南西侧; 5-海景路西北侧,在海滨填海区内; 6-跃进路与921路交口东; 7-友谊路东段; 8-滨海大道中国人民解放军第4804厂生活区幼儿园西院。9-琼州海峡铁路轮渡工程北港(未在图中标出)

表1 湛江黏土的物理力学性质指标统计分析  
Table 1 Physical and mechanical indexes of Zhanjiang area clays and statistical analysis

场地 编号	取土深度/ m	统计内容	含水率 $w$ (%)	密度 $\rho$ / g·cm <sup>-3</sup>	孔隙比 $e$	液限 $w_L$ (%)	塑限 $w_p$ (%)	液性 指数 $I_L$	塑性 指数 $I_p$	压缩系数 $a_{1-2}$ / MPa <sup>-1</sup>	$c$ / kPa	$\varphi$ / (°)
1	5~37	范围值	39.02~53.40	1.72~1.77	1.07~1.44	43.70~53.00	25.20~29.30	0.58~1.45	19.00~23.70	0.21~0.62	4.80~28.50	5.00~13.00
		平均值	46.35	1.75	1.20	48.05	26.95	0.80	21.61	0.44	19.81	9.85
		变异系数	0.14	0.01	0.11	0.07	0.06	0.42	0.07	0.35	0.43	0.29
		统计数量	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2	1~30	范围值	29.90~51.70	1.68~2.00	0.68~1.45	39.40~64.10	20.40~36.00	0.20~0.56	17.00~28.50	0.16~0.47	17.00~44.00	8.00~16.00
		平均值	39.28	1.83	1.07	49.16	27.30	0.42	22.24	0.26	41.20	11.80
		变异系数	0.25	0.07	0.30	0.26	0.28	0.34	0.24	0.48	0.43	0.25
		统计数量	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
3	4~40	范围值	28.70~45.00	1.89~2.01	0.80~1.20	42.00~47.00	24.50~26.40	0.20~0.24	17.50~19.00	0.16~0.23	29.00~45.00	6.00~14.90
		平均值	38.57	1.94	0.99	44.66	25.50	0.22	18.50	0.19	37.33	9.96
		变异系数	0.22	0.03	0.21	0.05	0.03	0.09	0.04	0.17	0.21	0.45
		统计数量	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
4	4.5~11	范围值	33.80~67.90	1.51~1.78	0.98~1.93	41.50~67.00	25.00~30.00	0.43~1.03	17.50~28.50	0.30~0.54	4.00~22.00	4.00~10.00
		平均值	48.47	1.64	1.30	51.16	27.66	0.67	21.26	0.42	14.66	6.33
		变异系数	0.36	0.08	0.31	0.27	0.09	0.46	0.29	0.28	0.64	0.50
		统计数量	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
5	5~34	范围值	33.20~59.80	1.63~1.88	0.89~1.56	36.60~58.50	26.70~33.00	0.30~1.32	19.60~28.50	0.19~0.71	7.00~81.00	2.40~7.70
		平均值	46.15	1.75	1.25	49.18	30.11	0.77	22.76	0.45	41.00	5.61
		变异系数	0.24	0.06	0.22	0.15	0.07	0.52	0.14	0.46	0.75	0.33
		统计数量	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
6	6~30	范围值	26.30~40.17	1.78~1.98	0.80~1.13	34.80~46.42	25.70~29.00	0.30~0.72	15.00~19.70	0.16~0.42	35.7~80.00	10.00~12.80
		平均值	33.26	1.90	0.89	39.88	27.17	0.48	17.53	0.26	56.50	11.75
		变异系数	0.17	0.04	0.19	0.12	0.05	0.41	0.12	0.43	0.39	0.10
		统计数量	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
7	6~44	范围值	35.70~46.70	1.73~1.83	1.04~1.28	36.50~52.00	21.50~30.70	0.45~0.98	14.70~25.00	0.30~0.52	29.00~44.00	5.30~13.00
		平均值	40.72	1.78	1.12	47.08	26.64	0.69	21.78	0.40	36.40	9.52
		变异系数	0.12	0.02	0.10	0.13	0.14	0.29	0.19	0.20	0.17	0.32
		统计数量	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
8	5~24	范围值	50.70~54.00	1.70~1.78	1.20~1.43	57.60~63.80	22.00~26.40	0.71~1.00	32.00~39.80	0.27~0.30	/	/
		平均值	52.48	1.72	1.35	60.00	23.95	0.82	35.05	0.29	/	/
		变异系数	0.12	0.04	0.17	0.05	0.07	0.18	0.12	0.045	/	/
		统计数量	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	5~8	范围值	63.50~69.00	1.56~1.60	1.74~1.85	63.50~69.80	19.90~26.70	0.86~1.19	37.90~48.30	0.27~0.33	14.70~19.80	7.60~9.90
		平均值	66.06	1.57	1.8	65.08	22.48	1.02	42.58	0.30	17.68	8.54
		变异系数	0.32	0.01	0.02	0.07	0.11	0.11	0.08	0.07	0.12	0.14
		统计数量	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

验获得湛江黏土的基本物理力学性质指标,采用数理统计的方法,对其试验结果进行筛选、剔除异常值后进行统计分析(表1)。同时,根据有关文献<sup>[8-13]</sup>,比较我国其他地区黏土(表2)与湛江黏土在力学特性的差异。

表2 对比分析的其他地区黏土  
Table 2 Other areas of soft clay for comparing

土的类型	地区	土的类型	地区	土的类型	地区
淤泥	天津 <sup>[8]</sup>	淤泥质黏土	天津 <sup>[8]</sup>	淤泥质亚黏土	天津 <sup>[8]</sup>
	连云港 <sup>[8]</sup>		连云港 <sup>[8]</sup>		上海 <sup>[8]</sup>
	温岭 <sup>[8]</sup>		上海 <sup>[8]</sup>		杭州 <sup>[8]</sup>
	福州 <sup>[8]</sup>		杭州 <sup>[8]</sup>		舟山 <sup>[8]</sup>
	厦门 <sup>[8]</sup>		舟山 <sup>[8]</sup>		宁波 <sup>[8]</sup>
	深圳 <sup>[8]</sup>		宁波 <sup>[8]</sup>		镇海 <sup>[8]</sup>
	黄石 <sup>[9]</sup>		镇海 <sup>[8]</sup>		汉口 <sup>[12]</sup>
	漳州 <sup>[9]</sup>		温岭 <sup>[8]</sup>		武汉 <sup>[11]</sup>
	福州 <sup>[10]</sup>		福州 <sup>[8]</sup>		昆明 <sup>[13]</sup>
	/		杭州 <sup>[11]</sup>		营口 <sup>[12]</sup>
	/		/		宁波 <sup>[11]</sup>
	/		/		青岛 <sup>[9]</sup>

由表1分析可知,研究区黏土具有下述特征。

(1)天然含水率 $w$ 高,孔隙比 $e$ 较大。研究区内黏土的 $\omega$ 统计平均值为45.71%,最大值达69%。 $e$ 为0.68~1.93,平均值为1.21。

(2)液限 $w_L$ 较高。湛江黏土的 $w_L$ 为39.88%~65.08%,统计平均值为50.47%,明显高于该土类的天然含水率,处于软塑-流塑状态,从这一点判断该土为软弱土。从湛江黏土在塑性图上的位置来看(图2),研究区内的黏土多为高液限土,液限甚至远高于其他地区淤泥。

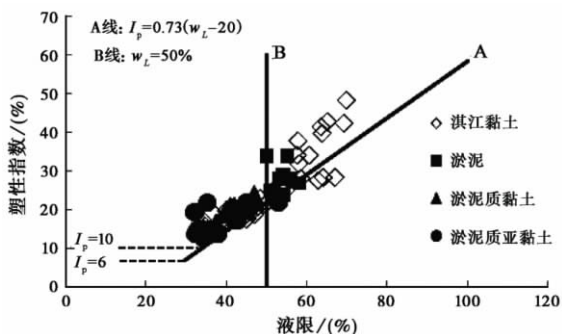


图2 湛江黏土在塑性图上的分布

Fig. 2 Zhanjiang clay distribution on the plasticity chart

(3)灵敏度 $S_l$ 高。8号、9号研究区黏土的 $S_l$ 分别为5~7与7.5,说明湛江黏土应为高灵敏性

土。但与之不相符的是,原状土的无侧限抗压强度 $q_u = 150\text{kPa}$ ,说明该土具有较高灵敏性的同时还具有较强的结构强度。

(4)压缩性小。湛江黏土属低压缩性土,压缩系数 $a_{1-2}$ 平均值仅为 $0.33\text{MPa}^{-1}$ ,最小值仅为 $0.19\text{MPa}^{-1}$ 。

(5)抗剪强度略高。因持有较高的结构强度,湛江黏土的抗剪强度指标普遍略高于其他地区黏土相应值。

从表1分析可知,湛江黏土的物理指标变异性较小, $\mu$ 、 $\rho$ 、 $e$ 、 $w_L$ 、 $w_p$ 的变异系数为0.01~0.31,且普遍小于0.10。因此,可将湛江黏土的物理性质指标视为常量,一般能够满足工程设计精度的要求。但湛江黏土力学指标变异性相对较大,特别是抗剪强度指标,如5号研究区黏土的 $c$ 的变异系数达到了0.75。这也说明不同区域的湛江黏土力学性质指标变异性较大,具有一定离散性,设计时将其作为常量处理计算误差将增加,应作为随机变量来处理,并考虑其空间变异性的影响。

另一方面,从湛江黏土物理力学指标与埋深的关系(图3)图中可以看到,仅部分研究区的 $a_{1-2}$ 随埋深增大而减小, $c$ 值随埋深增大而增大外,湛江黏土的物理力学指标随埋深的增大并无较大变化。利用土样的物理力学指标划分土层时可能存在一定的误差。

### 3 湛江黏土物理力学性质指标相关性分析

土的工程特性是由其物理力学指标反映出来,因此,针对区域特点的土各项指标进行分析总结,对于积累地区经验及工程实践具有重要意义。参考前人经验,土的物理力学性质指标的最佳数学模型是线性关系模型<sup>[15]</sup>。本文采用最小二乘法进行线性拟合,采用一元线性回归模式进行回归分析。湛江黏土物理力学性质指标相关性及其拟合回归方程见图4与表3。

#### 3.1 物理指标间的相关性

分析图4与表3可知,与其他地区黏土相同,湛江黏土的 $e-w$ 具有良好的线性关系,拟合方程可用 $e = 0.025w + 0.048$ 表示。 $\omega_L - w$ 与 $\omega_L - e$ 也具有一定的线性关系(图4b、c),说明土的微观孔隙以及黏粒含量对土的含水率、液限均有较大影响。同时,从

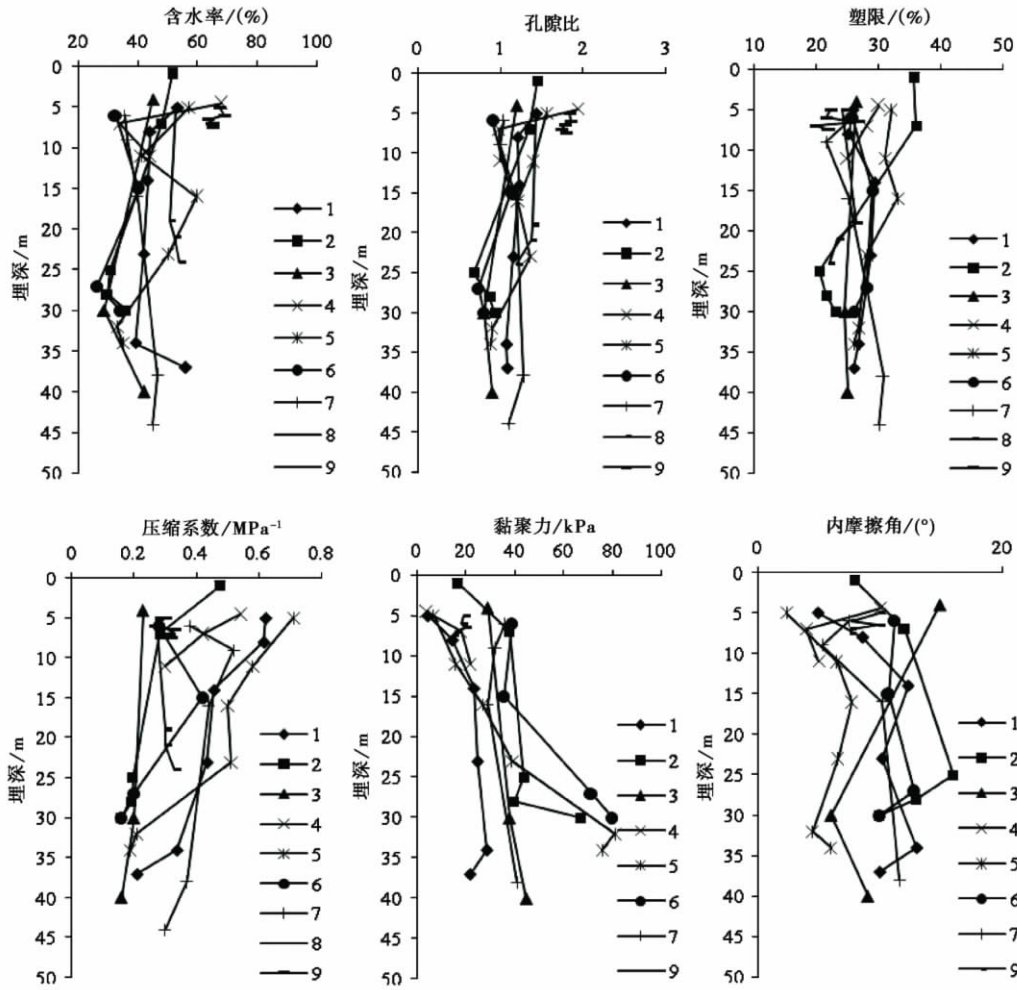


图3 不同埋深的湛江黏土的物理力学性质指标变化

Fig. 3 Physical and mechanical indexes of Zhanjiang area clays and statistical analysis at different buried depths

表3 物理力学指标间的相关性统计分析表  
Table 3 Correlation statistic analysis between physical and mechanical indexes

参数	回归方程	相关系数 $R^2$
$e - \omega$	$e = 0.025\omega + 0.048$	0.943
$\omega_L - \omega$	$\omega_L = 0.684\omega + 19.09$	0.750
$\omega_L - e$	$\omega_L = 24.37e + 20.81$	0.764
$I_p - e$	$I_p = 21.38e - 1.096$	0.664
$\tau - e$	$\tau = -41.41e + 100.7$	0.384
$a_{1-2} - e$	$a_{1-2} = 0.182e + 0.126$	0.896
$e - \omega$	$e = 0.026\omega + 0.057$	0.982
$\omega_L - \omega$	$\omega_L = 0.469\omega + 19.42$	0.717
$\omega_L - e$	$\omega_L = 17.77e + 18.29$	0.739
$I_p - e$	$I_p = 11.53e + 4.904$	0.627
$\tau - e$	$\tau = -12.51e + 48.63$	0.139
$a_{1-2} - e$	$a_{1-2} = 1.139e - 0.530$	0.877

图4b、c中还可以看到湛江黏土的液限明显大于其他地区黏土,且拟合曲线斜率大于其他地区黏土,说明湛江黏土随着 $e$ 与 $\omega$ 的增大 $\omega_L$ 值增幅明显。而 $I_p$ 与 $e$ 的拟合曲线相关系数 $R^2 = 0.664$ ,说明塑性指数与孔隙比没有特别明显的线性关系。

### 3.2 物理指标与力学指标间的相关性

图4e中抗剪强度指标 $\tau$ 按 $\tau = C + \tan\varphi$ 计算得到,从图中可见,湛江黏土的 $\tau - e$ 关系图中数据点发散,并无一定的相关性,表明该土的强度指标受其物理性质影响不大。而图4f所示的 $a_{1-2}$ 与 $e$ 具有良好的线性相关性,但拟合曲线斜率0.182远小于其他地区黏土的 $a_{1-2} - e$ 曲线拟合斜率1.139,且湛江黏土的 $a_{1-2}$ 明显小于其他地区黏土,甚至比含粉粒较多的淤泥质亚黏土还要小,这也说明湛江黏土的随着 $e$ 的增大 $a_{1-2}$ 并无明显的减小趋势。这也表明,当我们需要得到湛江黏土的压缩系数时,可根据直



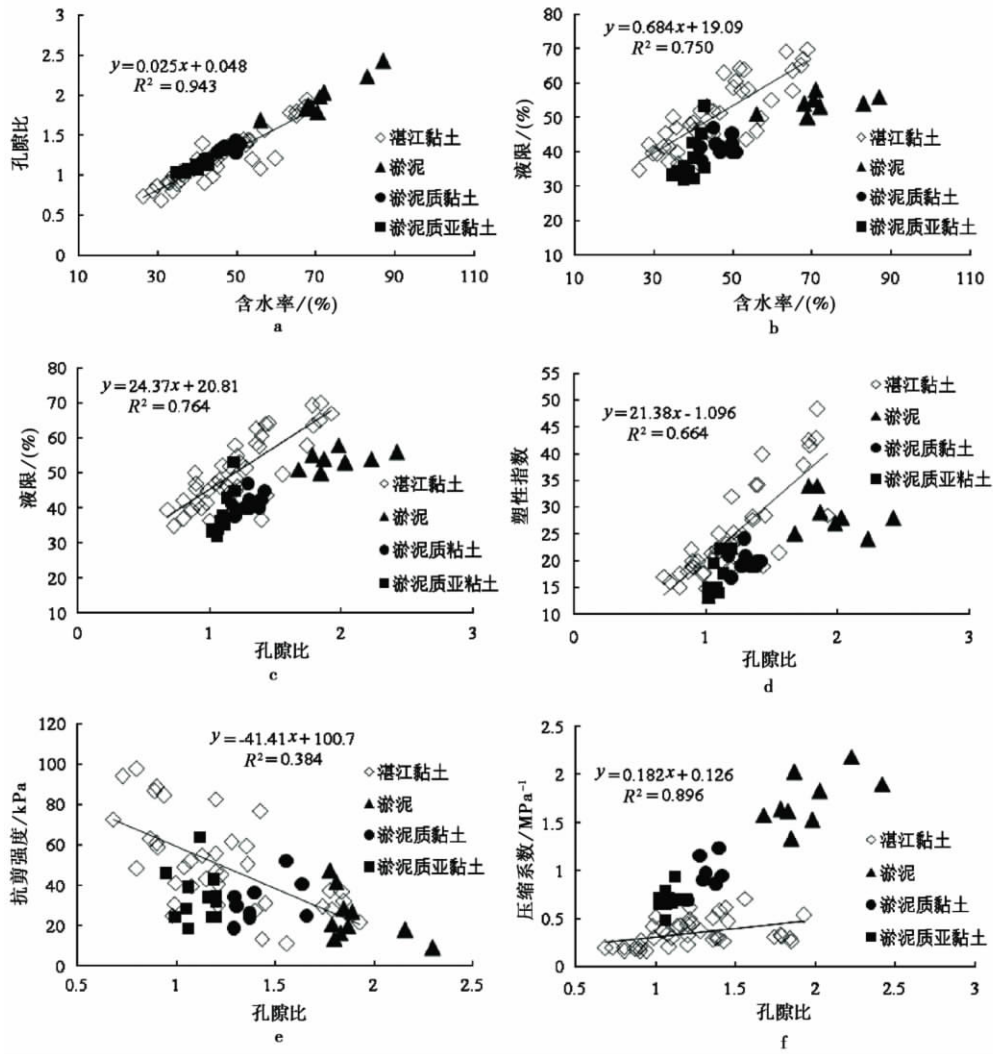


图4 物理力学指标间的相关性统计分析图

Fig. 4 Curves of correlation statistic analysis between physical and mechanical indexes

接测得湛江黏土的  $\omega$  和  $\omega_L$  通过经验公式获得  $e$  进而得到  $a_{1-2}$ 。

#### 4 机理分析

从上述分析可知,湛江黏土具有不良物理性质和良好力学特性指标的异常组合,是一种高灵敏性的强结构性特殊黏土。虽然其物理力学性质指标间具有某种相关性,但是明显不同与其他地区黏土特性,工程设计中不能简单借鉴其他地区黏土经验公式。

土的性质受沉积条件、应力历史、物质组成以及微观结构等多种条件控制。湛江黏土普遍具有高达 400~900kPa 的结构屈服强度  $\sigma_k$ ,  $\sigma_k$  远远大于土层的上覆压力,其物理力学参数与埋深的规律性变化

并不明显,也就是说相对于土层上覆压力,湛江黏土的结构强度对土性的影响更为显著。那么,是什么造成湛江黏土具有如此高的结构强度,它又是如何影响其物理力学特性?

湛江软土的成土演化过程说明,特殊的沉积规律使之兼具一般软土和红土的沉积特征,“红土化”及不完全的“红土退化”作用使这种土具有一般软土不曾具有的强胶结特性。从微观结构来看,冷冻干燥原状土样电子显微镜照片(图5)显示出湛江黏土结构由多单片堆叠成的片堆颗粒、粒状碎屑矿物与少量单片黏土矿物颗粒组成,扁平状的片堆及单片颗粒之间又以边-面、面-面接触形式形成絮凝结构,上述组构特征使得其具有高孔隙比与高灵敏性,另一方面较大比表面积(单元体之间的接触点多)以及胶结连接又使其具有一定的结构强度,在

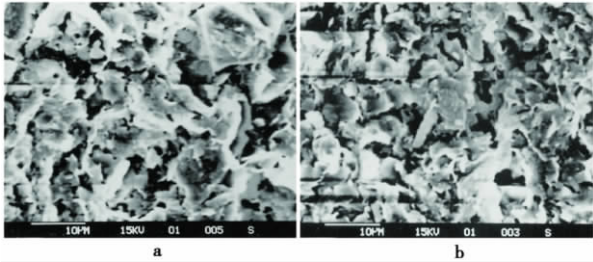


图5 原状土样电子显微镜照片(×2500)

Fig. 5 Electron microscope photograph of intact clay sample (×2500)

低应力水平条件下, 微观结构不会发生太大的变形, 基本能保持稳定状态, 压缩性较小; 在较高的应力

作用下会使孔隙失稳, 颗粒重新排列, 产生不可恢复的突然变形, 呈现出结构性黏土的典型压缩变形特征, 有别于一般性的软土。

从物质组成来看(表4), 湛江软土黏土矿物含量高达60%, 且主要以具有较强亲水性的伊利石和绿泥石为主, 较多黏土矿物也导致该土黏粒成分含量高达49%。由于黏土矿物带有电荷性质, 具有较强的吸水性, 天然状态下土具有较高含水率与液限。有机质含量为1.06%, 一般呈胶凝状, 具有表面活性和黏滞性, 结合水膜较厚, 土颗粒间通过吸附水膜互相接触与连结的面积较大, 这些都使该土类的含水率与塑性指数均较高。

表4 湛江黏土的物理化学指标、矿物组成以及颗粒组成

Table 4 Physicochemical properties and mineral compositions particle composition of Zhanjiang clay

pH 值	易溶盐 总量/(%)	有机质/ (%)	矿物组成/(%)					颗粒组成/(%)			
			绿泥石	高岭石	伊利石	石英	长石	>0.05/mm	0.005~0.05/mm	0.002~0.005/mm	<0.002/mm
5.20	0.504	1.06	25	10	25	35	5	15	36	23	26

## 5 结 论

(1) 湛江黏土物理特性类似于淤泥和淤泥质黏土, 表现为高含水率, 大孔隙比, 高液限, 但力学特性比淤泥质亚黏土还好, 表现为压缩性小, 抗剪强度指标高, 同时还具有强结构性、高灵敏度。

(2) 湛江黏土的物理指标变异性小, 取参数时可作为常量; 力学指标变异性较大, 应作为变量处理, 同时考虑空间变异性影响。

(3) 湛江黏土的  $e-\omega$ 、 $\omega_L-\omega$ 、 $\omega_L-e$ 、 $a_{1-2}-e$  具有良好的线性相关性;  $I_p-e$ 、 $\tau-e$  相关性略差。虽然该土物理力学性质指标间具有某种相关性, 但是明显不同与其他地区黏土特性, 因此, 工程设计中不能简单借鉴其他地区黏土经验公式。

(4) 湛江黏土富含黏粒, 较多黏土矿物和胶凝状的有机质成分使其具有较差的物理特性。湛江黏土是以片状颗粒为主的絮凝结构为主, 加之成土演化过程生成的强胶结连接使其具变形具有强结构性黏土特征, 具有较好的力学指标。

## 参 考 文 献

[1] 张丽. 浅谈第四系湛江组黏土层工程特点[J]. 采矿技术, 2010, 10(1): 24~25.  
Zhang Li. Zhanjiang formation of Quaternary clay engineering

characteristics. Mining Technology, 2010, 10(1): 24~25.  
[2] 谭罗荣, 张梅英. 一种特殊土的微观结构特性的研究[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(2): 26~35.  
Tan Luorong, Zhang Meiyang. The research on microscopic structure properties of a particular soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(2): 26~35.  
[3] 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.  
Li Zuoqin. Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 34~45.  
[4] 蔡羽, 孔令伟, 郭爱国, 等. 剪应变率对湛江强结构性黏土力学性状的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1235~1240.  
Cai Yu, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Effects of shear strain rate on mechanical behavior of Zhanjiang strong structured clay. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1235~1240.  
[5] 孙吉主, 王勇, 孔令伟. 湛江海域结构性软土的界面损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 99~103.  
Sun Jizhu, Wang Yong, Kong Lingwei. Study on bounding surface damage model for structural soft soil in Zhanjiang sea area. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 99~103.  
[6] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 某防波堤下卧层软土的工程特性状态分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 454~458.  
Kong Lingwei, Lv Haibo, Wang Ren, et al. Analysis on engineering property of underlying soft soil stratum of a breakwater. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 454~458.  
[7] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, (9): 82~88.  
Kong Lingwei, Lv Haibo, Wang Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of a structural marine soil in Zhanjiang sea ar-

- ea. Journal of Hydraulic Engineering ,2002 ( 9) : 82 ~ 88.
- [8] 魏汝龙. 软黏土的强度和变形 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.  
Wei Rulong. Strength and Deformation of Soft Clay. Beijing: China Communications Press , 1987.
- [9] 张先伟, 王常明, 李忠生 等. 不同地区结构性软土基本性质的对比研究 [J]. 工程勘察, 2010, 38( 5) : 6 ~ 10.  
Zhang Xianwei, Wang Changming, Li Zhongsheng, et al. Contrasting study on fundamental properties of structural soft clay in different areas. Geotechnical Investigation and Surveying , 2010 38( 5) : 6 ~ 10.
- [10] 林琛. 福州市区软土基本性质的研究 [J]. 福建地质, 2000, 19( 3) : 175 ~ 180.  
Lin Chen. On the basic features of soft soils in Fuzhou city. Geology of Fujian , 2000 19( 3) : 175 ~ 180.
- [11] 刘用海. 宁波软土工程特性及其本构模型应用研究 [博士学位论文] [D]. 杭州: 浙江大学. 2008.  
Liu Yonghai. Study on Engineering Property and Application of Constitutive Model for Ningbo Soft Clay. Hangzhou: Zhejiang University. 2008
- [12] 巩立亮. 辽宁海岸带软土发育规律及土力学模型的研究 [硕士学位论文] [D]. 长春: 吉林大学建设工程学院. 2009.  
Gong Liliang. Study on Development Regularity and Soil Mechanics Model of Soft Soil in Coastal Zone of Liaoning Province. Changchun: Jilin University. 2009.
- [13] 古兴伟. 南市区软土物理力学参数相关性分析与模拟 [硕士学位论文] [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.  
Gu Xingwei. Physical and Mechanical Parameters of Soft Soil in Kunming South Correlation Analysis and Simulation. Kunming: Kunming University of Science and Technology , 2005.
- [14] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册( 第四版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.  
Chang Shibiao Zhang sumin. Engineering Geology Manual( 4th edition) . Beijing: China Architecture & Building Press , 2006.
- [15] 阙金声, 陈剑平, 石丙飞. 广州大学城软土的工程地质性质统计分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2007 35( 1) : 49 ~ 52.  
Que Jinsheng , Chen Jianping , Shi Bingfei. Statistical analysis on engineering geological properties of soft soil in Guangzhou College City. Coal Geology and Exploration , 2007 35( 1) : 49 ~ 52.