

文章编号: 1000-7598-(2004)12-1879-06

湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性

拓勇飞, 孔令伟, 郭爱国, 谭罗荣

(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: 立足于土体演化的地质背景, 以湛江地区第四系下更新统湛江组强结构性软土地层为依托, 开展了宏观与微观土工试验研究, 探求该区软土赋存规律与其强结构性的内在联系。研究表明, 湛江软土是以陆相沉积为主的河控三角洲相(即海陆交互相)沉积层, 由于受该区构造运动的强烈影响, 该土集多种地质营力的复杂耦合作用而呈现出特殊的沉积特征; 胶结作用是该土具有较高的结构强度的根本原因, 其强结构性形成机理与当地广泛发育的红土极为相似。

关 键 词: 结构性; 软土; 赋存规律; 工程特性

中图分类号: TU 411 文献标识码: A

Occurrence and engineering properties of structural soft clay in Zhanjiang area

TUO Yong-fei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, TAN Luo-rong

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

Abstract: Based upon geologic background of solum evolvement, aimed to strong structural soft clay strata Zhanjiang Formation lower Pleistocene series the Quaternary system in Zhanjiang area, the research on soil properties, which combines macroscopical mechanics test and microanalysis, has been made, so as to disclose internal relations between occurrence and strong structural characteristic of soft clay in this area. It is shown that Zhanjiang Formation is the deltaic-facies strata controlled by river(interactive marine & continental sedimentation); and its special sedimentation characteristic result from multi-geologic-agent coupling action with strong tectonic movement working on. Fundamentally, agglutination among particles result in the characteristic strong structural strength of this soft clay, and its pedogenic mechanism is extraordinarily similar to that of indigenous laterite.

Key words: structural characteristic; soft clay; occurrence; engineering properties

1 引言

土是自然和历史的产物, 构成土的最基本的物质成分经过搬运、迁移、沉积等地质演化过程, 产生了与周围环境相适应的结构。土的结构性是指土体颗粒和孔隙的性状和排列形式及颗粒间的相互作用。天然土体都具有结构性^[1], 形成结构性强弱的物理化学过程十分复杂, 与土体本身的赋存规律密切相关。作为土的一种固有特性, 结构性通过自身的强弱变化, 隐性地影响着土的诸多工程特性。

土体结构性强弱具有显著的时空变异性 and 区域性。以强结构性著称的我国湛江软土以其独特的力学性质与工程问题, 引起了学术界和工程界的广泛关注。20 世纪 80 年代前后, 罗鸿禧^[2]、李作勤^[3]、

谭罗荣^[4]、张诚厚^[5]等学者对湛江粘土的微观结构、物质组成和物理化学特性等的研究取得了较大的进展, 发现其不良的物理性质与良好的力学特性指标的“异常”组合, 它由土体亚稳态的絮凝结构以及颗粒间很强的胶结作用所致^[4]; 从力学特性来看, 结构性增大了土骨架的刚度^[6-7]。

近年来, 有关土体结构性这一岩土工程问题的研究大体集中在以下 2 个层面: (1) 试图应用现代数学、力学方法概化研究, 找寻土体统一的结构模型; (2) 试图由微观结构的综合指标定量化表征土体的宏观力学特性。然而, 土体赋存条件的复杂性、土体生成环境与沉积模式的特殊性使诸多结构性模型等研究成果在工程实践中尚难以直接应用。

工程地质学的成长和成熟, 使它由一个以定性

收稿日期: 2003-11-13

修改稿收到日期: 2004-03-08

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所知识新工程项目(批准号: Q110201)

作者简介: 拓勇飞, 男, 1976 年生, 硕士生, 主要从事特殊土土力学研究。E-mail: yftuo@yahoo.com.cn

描述为主的地质学科更深入地参与工程。工程和地质的理想耦合,能从宏观综合评价深入到土体的微观分析,又从微观拓展到宏观的力学特性^[8]。本文在整理前人研究成果和大量地质调查的基础上,立足于土体赋存的地质背景,以湛江地区第四系下更新统湛江组强结构性软土(下文均称湛江软土)地层为依托,开展了土的工程特性试验研究,探讨了该区软土的赋存规律及其工程特性的内在联系,揭示了其强结构性的形成机理。

2 区域地质概况

2.1 现今地理地貌格局

湛江市位于中国大陆的南端,广东省的西南部,包括整个雷州半岛及半岛以北一部分。东濒南海,南隔琼州海峡与海南省相望,西临北部湾,背靠大西南。大部分陆地由半岛和岛屿组成,地势北高南低。地貌以微丘、台地、海岸、崩岗、泻湖、港湾等发育为特征。该区地处新生代雷琼断陷的东北部,遂溪大断裂南侧。新构造运动强烈,断块升降明显^[9]。

2.2 早更新世以来地质环境演变轨迹

第四纪以来,该地区几经沧桑巨变。早更新世早期,由于太平洋板块的俯冲作用有所加强,中国东南沿海地壳抬升,再加上极地冰盖扩大引起的全球冰川型海退的发生,雷琼沉降带相对上升,该区南部、北部沉积了海陆交互相湛江组的中、下部。早更新世晚期,全球气候进一步变冷,海平面进一步降低,区内以陆相为主的海陆交互相环境向中部雷南发展,后期海水退出,形成的湛江组上部地层^[10]。此期间火山活动强烈,火山碎屑岩分布较广,火山堆积为陆相环境的发展创造了条件。

3 湛江软土的赋存规律

3.1 分布形态特征

据笔者对该区域工程地质的调查,湛江组地层分布于整个雷州半岛,厚度大于 50 m,最厚达 250 m 左右,岩性主要为白、灰白或杂色的卵、砾石,砾砂、砂及粘性土,自下而上、由粗至细构成三套不完整的沉积韵律,下部夹有一、二层玄武质火山岩,顶部被火山岩和北海组掩盖,在海岸、河谷和冲沟均有出露。该组大致分为上下两部分,下部为灰白、青灰、棕黄或灰绿砂砾石层,夹软粘土薄层,上部以杂色粘土为主,呈红、灰白、褐黄等色。该组顶层为花斑杂色、富含铁质,具有起伏不

平的剥蚀顶板,即所称的风化壳或铁盘;韵律清楚,交错层理发育。

本次重点研究与工程建设密切相关的湛江软土层,该层连续分布于该地区海岸一带,广泛发育于湛江组的中上部,一般埋深为 5~20 m 左右,新鲜时为灰白或杂色,与大气接触后,迅速变为黄褐色。

3.2 软土的结构与构造

软土结构系指土的矿物颗粒相互排列和相互联结的方式。据扫描电子显微镜下观察,该区软土为单片堆叠成的片堆颗粒单元、粒状碎屑矿物和少量单片粘土矿物颗粒所构成的开放絮凝状结构。扁平状的片堆及单片颗粒之间多以边-面、边-边为主要接触形式。

据钻孔岩芯及出露剖面观察,湛江软土表现为以下几种构造形态:(1) 水平层理——该类型以软土层中发育有一近水平微薄层理特征层(俗称“千层饼”),层面之间可见少量粉细砂,具有良好含水微结构。(2) 砂团构造——软土层内局部含有封闭的砂团,软土工程特性受其含量多少差异而变化。(3) 砂粒混杂构造——该类型以软土混杂粉细砂颗粒为特征,往往出现于砂层与软土层过渡段。

该区软土赋存特征表现为多韵律沉积,水平层理发育,层间组合多为软土与砂互层,垂直方向砂层粒度由细至粗向上递变,软土层与上覆、下伏层无明显的宏观分界,软土的各向异性特征明显。

3.3 沉积规律

1955年,李树勋^[10]认识湛江组地层以来,有关湛江组的沉积相问题众说纷坛,湛江组软土为海积、冲积还是湖积相,尚无统一定论。20世纪80年代以来,诸多地质学者通过各种理论、测试研究方法,认同湛江软土是第四纪早更新世以陆相沉积为主的河控三角洲相(即海陆交互相)沉积层,但由于受该区构造运动的强烈影响,湛江软土集多种地质营力的复杂耦合作用而呈现出特殊的沉积特征。

湛江海岸属于封闭的港湾区类型,当满载陆源碎屑物的水流注入海域水体时,水动力条件迅速降低,沉积物下沉的速度使其粒度在注入口呈现扇状减小,沉积物围绕注入口堆积,沉积体呈扇状、叶状向海域推进,并展开。地貌明显呈现出软粘土发育的底积层、前积层与粗粒度颗粒富集的顶集层。

同期,由于全球大规模的海退使沉积体的环境和相随河流、潮汐和海浪的相互作用变化颇大,出现冲积层陆相与海相交融相间。其间,断裂带的动

荡会使三角洲沉积出现后撤退的覆体，海退与海侵的交替形成一系列不完全的沉积韵律。潮汐的局部作用力使部分地段软土层的微层理极其发育。

沧桑巨变，该期太平洋板块的俯冲加强，使东南沿海地壳抬升，湛江组沉积层海陆变迁，历经复杂的陆相化学风化及淋漓溶蚀作用。当雷琼沉降带的再次下降后，湛江软土层随之被新地层所覆盖。

4 软土工程特性

为了探求湛江软土赋存规律与其强结构性的内在联系，进一步全面认识软土的工程特性，分别从其物理力学性质、化学特性、矿物组成、压缩变形特征与抗剪强度等方面开展了试验研究，土样取自湛江市某地海岸边湛江软土沉积层，埋深约为 7.0~10.0 m，其物理性质指标如表 1 所示、力学性质指标见表 2，物理化学分析结果与矿物组成汇总于表 3，图 1~3 分别为典型压缩曲线、灵敏度与触变性试验曲线及三轴压缩试验结果。

表 1 湛江软土的物理性质指标
Table 1 Physical indexes of Zhanjiang soft clay

含水率 w/%	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	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 $K/10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	不同粒径(mm)的颗粒组成/%			
								>0.05	0.005~0.05	0.002~0.005	<0.002
50.00	17.2	2.71	1.40	60.0	23.0	38.0	1.64	15	36	23	26

表 2 湛江软土的力学性质指标
Table 2 Mechanical indexes of Zhanjiang soft clay

结构屈服应力 p_c/kPa	压缩系数 $a_{v1.2}/\text{MPa}^{-1}$	原状土无侧限抗压强度 q_u/kPa	重塑土无侧限抗压强度 q'_u/kPa	灵敏度 S_t	直接剪切强度				三轴剪切强度			
					c_d /kPa	Φ_d /(°)	c_r /kPa	Φ_r /(°)	c_{cu} /kPa	Φ_{cu} /(°)	c'_{cu} /kPa	Φ'_{cu} /(°)
600	0.30	150.0	34.5	5~7	61	9	7	7	102	5	90	10

表 3 湛江软土的物理化学分析结果与矿物组成
Table 3 Physicochemical analysis and mineral compositions of Zhanjiang soft clay

pH值	易溶盐总量 /%	有机质 /%	游离氧化物/%				矿物组成/%				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	无定形 Fe ₂ O ₃	绿泥石	高岭石	伊利石	石英	长石
5.20	0.50	1.06	2.23	0.33	3.05	2.33	25±	10±	25±	35±	5±

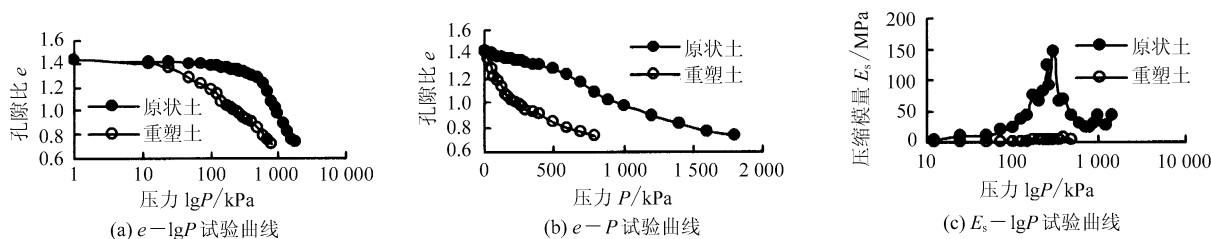


图 1 湛江软土压缩曲线

Fig.1 Compression curves of Zhanjiang soft clay

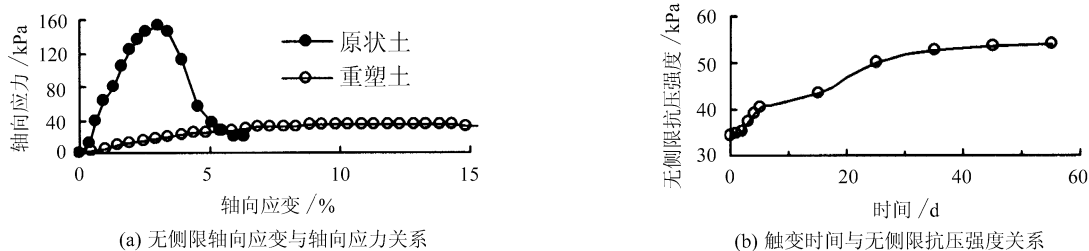
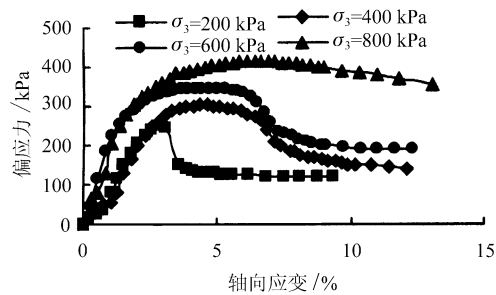
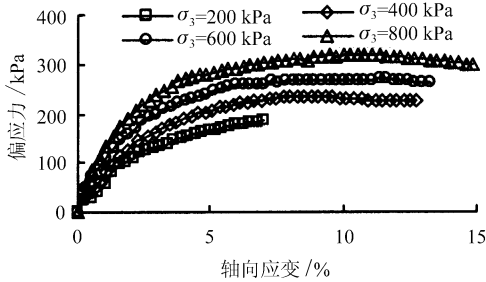


图 2 湛江软土灵敏度与触变性试验曲线

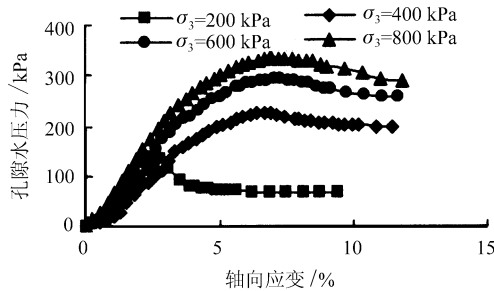
Fig.2 Testing curves of sensitivity and thixotropic property test of Zhanjiang soft clay



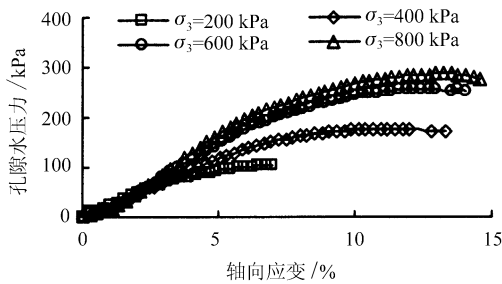
(a) 原状土轴向应变-偏应力关系



(b) 重塑土轴向应变-偏应力关系



(c) 原状土轴向应变-偏应力关系



(d) 重塑土轴向应变-偏应力关系

图3 湛江软土三轴压缩试验曲线
Fig.3 Curves of triaxial compression test of Zhanjiang soft clay

由上述图表可以看出, 湛江软土呈现如下工程特性:

(1) 从物理性质来看, 该土天然含水率为 50 % 左右, 孔隙比高达 1.40, 液限为 60 % 左右, 塑性指数达 38 %, 竖直方向上渗透系数很小。但同时较高的无侧限抗压强度与抗剪强度指标反映了其具有良

好的力学特性, 这种物理、力学性质指标的特殊组合, 与其它地区软土相比, 表现出不同的个性与规律。

(2) 对该土进行的矿物成份及物理化学性质测试结果表明, 湛江软土主要由次生粘土矿物组成, 其含量达 60 %, 主要以绿泥石、伊利石为主, 含一定量的高岭石。原生矿物含石英为 35 % 左右, 长石含量占 5 % 左右。原生矿物一般为粉粒组的主要成分, 粘土矿物为粘粒组的主要成分, 吸附性较强, 且有亲水性。该土的有机质含量为 1.06 %, 一般呈现凝胶状。有机质及其矿物组成结果表明, 其具有不良土质学特征的物质基础。该土的 pH 为 5.20, 在此条件下, 游离氧化铁凝胶带正电荷^[11,12], 与带负电的粘土胶体相互吸引, 提高了土的胶结强度。酸性介质溶液中, 不仅土粒扩散双电层受到压抑有利于凝聚, 而且土粒可以利用其带正电的边、角与带负电的基面的静电吸引而相互牢固连接, 有利于提高结构强度。

(3) 研究典型压缩曲线特征表明, 原状土样的 $e-\lg P$ 曲线呈现明显的平缓型与陡降型分段特征(图 1(a)), 根据卡萨格兰法求得的 P_c 值为 550~600 kPa, 据地质资料表明, 该值远大于先期固结压力, 该 P_c 值应由结构强度引起的结构屈服应力。由 $e-P$ 曲线形态看, 在 P_c 值附近, 曲线出现突拐点, 拐点后的压缩系数“倒大”^[13], P_c 点后原状土压缩曲线形态与重塑土趋于一致。这些结果均表明, 湛江软土为一种典型结构性土, 且具有较高的结构强度。

(4) 为了评价软土的结构强弱, 作者对原状土及相应的重塑土分别进行强度试验。原状土无侧限抗压强度 q_u 达 150 kPa, 灵敏度多为 5~7 左右, 属高灵敏性土。本次研究还对平行的重塑土试样测定其触变时间与无侧限抗压强度的关系, 结果发现(见图 2(b)), 60 d 后重塑土触变强度不足 20 kPa, 进一步表明, 湛江软土结构强度具有不可逆性。

(5) 该土抗剪强度较高, 其慢剪强度 c_d, Φ_d 分别为 61 kPa, 9°; 慢剪残余强度 c_r, Φ_r 分别为 7kPa, 7°, 原状土样三轴 CU 剪的 c_{cu}, Φ_{cu} 达 102kPa, 5°; 而重塑样的 c_{cu}, Φ_{cu} 分别为 22 kPa、15°。由图 3 可以看出, 当围压为 600 kPa 以下时, 土应力-应变曲线表现为应变软化, 且破坏应变较小, 随着 σ_3 的增加, 导致结构在固结时产生破损, 应变软化逐渐减弱; 而相应重塑土则未表现出上述特性, 应力-应变关系曲线为应变硬化型。同样, 软土孔压-应变关系方面, 原状土与重塑土分别与应力-应变关系曲线具

有“相似性”，表现为与应力水平相关关系明显。在固结应力较低条件下，原状土孔隙压力会出现峰值，之后逐渐降低，当固结应力较高时，孔压随应变增大而升高，最后，趋于稳定值。另外，原状土在结构破坏之前，土的刚度及固结系数较大，孔隙水压力消散快，而重塑土则反之，且在不同固结压力下，变化趋势基本相当^[6]。

综上所述，湛江软土具有较高的结构强度，虽按土质学分类，可将其划归为软土范畴，但其力学性质远比一般软土好得多，究竟何种因素使该土沉积为具有明显的强结构性，需要对其成因分析及机理探讨。

5 湛江软土强结构性的形成机理

笔者认为，湛江软土特殊的工程特性不同于其它地区同类软土，而其物理化学特征、工程力学性质却与该地区广泛发育的红土极为相似。有关红土的成因机理、力学特性与结构特性，前人已进行了深入细致的研究^[14-17]，经对比分析二者的微结构特性、应力-应变关系、沉积规律，发现湛江软土典型的强结构性与红土化作用密切相联。

土结构性的形成及发育实质上是在地质演化的过程中完成的。针对湛江软土，从工程地质观点出发，结合该土的沉积规律，追溯其强结构性形成的渊源。

首先，在低能量的水动力条件下，大量火山碎屑物通过河流搬运在河口分选沉积，软土层由粘土和有机质形成了具有大孔隙的絮凝体，在该区湿热的气候条件下，沉积矿物不断经历脱盐基、脱硅和富集铁、铝的红土化过程，从而不断地生成次生粘土矿物和大量游离氧化物。硅的溶解使介质溶液呈酸性，酸性环境下极易生成高岭石等粘土矿物，这些粘土矿物继续形成大量的絮凝体和叠聚体在胶体的氧化铁的充填下构成片状体系的基质结构。游离氧化铁、铝除了分布在颗粒表面外，大部分悬浮在孔隙液中呈凝胶赋存。

随着造陆构造运动，地壳抬升，胶体氧化铁、铝在风化和干热条件下浓缩、脱水、陈化，转变为微晶态或晶态氧化铁，将土颗粒牢牢连接起来，该过程即为红土化作用的陈化晶态阶段。

当雷琼断陷使该区再度下降，湛江土重返封闭的浅水港湾，温湿的还原环境使其发生活化，部分转变为胶态氧化铁，三价铁还原为二价铁，随地下水淋漓脱铁，发生红土退化过程。湛江软土的杂色、红褐色条纹及斑状反映了红土退化作用的不完全

现象，灰色新鲜软土与空气接触后迅速变为黄褐色，表明还原环境下土中仍有大量氧化铁凝胶的存在。

湛江软土的成土演化过程表明，由于特殊的赋存规律使其兼具一般软土与红土的沉积特征及工程特性，胶结作用是该土具有较高结构强度的根本原因。

6 结 论

(1) 湛江软土是第四纪早更新世以陆相沉积为主的河控三角洲相(即海陆交互相)沉积层，由于受该区构造运动的强烈影响，湛江软土集多种地质营力的复杂耦合作用而呈现出特殊的沉积特征。

(2) 按土质学分类，本文所研究的湛江土可划归为软土范畴，但其较好的力学性质显著异于其它地区同类软土。其结构屈服应力达 550~600 kPa，原状土与相应重塑土力学性状呈现出很大差异，属高灵敏性、弱触变性土，为一种典型的结构性土，且具有较高的结构强度。

(3) 湛江软土多为大量粘土矿物形成的絮凝体和叠聚体在铁质胶结下构成片状体系的基质结构，胶结作用使该土具有较高的结构强度。

(4) 湛江软土的成土演化过程表明，其兼具一般软土与红土的土性特征。从沉积环境及强结构胶结特性来看，该土与当地广泛发育的红土相类似；同时，其地貌特征、土质学指标等方面又表现了软土的常见性质。

诚然，控制结构性软土工程特性的因素是非常复杂的。本文只是对该区软土强结构性发育演化的一个初探，以期进一步揭示该类土的力学本质与微观机制，相关的结构性模型还有待于深入研究。

参 考 文 献

- [1] Burland J B. on the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Geotechnique*, 1990,40(3): 327-378.
- [2] 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, 1985 (1): 1-5.
LUO Hong-xi, CHEN Shou-yi. Engineering geological characteristics of gray clay in the region of Zhanjiang[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1985 (1): 1-5.
- [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 Zuo-qin. Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1982, 4(1): 34-45.

- [4] 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 Luo-rong,ZHANG Mei-ying.The research on microscopic structure properties of a particular soil [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(2): 26—35.
- [5] 张诚厚. 两种结构性粘土的土工特性[J]. 水利水运科学研究所, 1983,(4): 65—71.
ZHANG Cheng-hou. Geotechnical characteristics of two structure clays[J]. **Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute**, 1983,(4): 65—71.
- [6] 沈珠江. 软土工程和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100—111.
SHEN Zhu-Jiang. Engineering properties of soft soils and design soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**. 1998, 20(1): 100—111.
- [7] 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其形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, (10): 43—47.
GONG Xiao-nan, XIONG Chuan-xiang, Xiang Ke-xiang, HOU Yong-feng. The formation of clay and its influence on mechanical characteristics of clay[J].**Journal of Hydraulic Engineering**, 2000,(10): 43—47.
- [8] 王思敬. 略论工程地质思维[J]. 工程地质学报,1997,5 (4): 289—291.
WANG Si-jing. Scientific thinking of engineering geology[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1997,5 (4): 289—291.
- [9] 梁俊平. 广东省湛江地区第四纪更新世地层[J]. 广东地质, 1992 ,7(4): 21—34.
LIANG Jun-ping.Quaternary pleistocene strata in Zhanjiang area of Guangdong province [J]. **Guangdong Geology**, 1992 ,7(4): 21—34.
- [10] 广东省地质矿产局.广东省区域地质志[M]. 广州:地质出版社,1988.
- [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.
KONG Ling-wei, LU Hai-bo, WANG Ren, GUO Ai-guo. Preliminary analysis on micro-mechanism of engineering property for soft soil in a sea area of Hai-kou[J]. **Rock and Soil Mechanics**,2002,23(1):36—40.
- [12] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 单华刚, 郭爱国. 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 Ling-wei, LU Hai-bo, WANG Ren, SHAN Hua-gang, GUO Ai-guo. Engineering properties and micro-mechanism of a structural marine soil in Zhan-jing sea area[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (9): 82—88.
- [13] 冯铭璋. 软土压缩曲线特征[J]. 岩土工程学报, 1992, 14 (9): 95—100.
FENG Ming-zhang. Compression curve of soft cohesive soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14 (9): 95—100.
- [14] 孔令伟, 郭爱国, 吕海波, 赵颖文. 典型红粘土的基本特性与微观结构特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (增 1): 973—977.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, LU Hai-bo, ZHAO Ying-wen. Fundamental properties and microstructure characteristics of typical red clay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**,2001,20(Supp.1): 973—977.
- [15] 余培厚,郭沛, 郑玉元, 姜其岩, 廖义玲. 红粘土的微观结构模型与力学特征[A]. 第二届全国红土工程地质研讨会论文集[C]. 贵阳: 贵州科技出版社,1991:94—104.
- [16] 黄英, 屈智炯. 红土的结构分析及应力应变特性的研究[J]. 成都科技大学学报, 1989, 43 (1): 31—36.
HUANG Ying, QU Zhi-jiong. Structure analysis and research of stress-strain behaviour of laterite[J]. **Journal of Chengdu University of Science and Technology**, 1989, 43 (1): 31—36.
- [17] 王清, 唐大雄, 张庆云, 李宝华. 雷琼玄武岩地区残积红土的工程地质研究[A]. 第二届全国红土工程地质研讨会论文集[C]. 贵阳: 贵州科技出版社,1991:124—132.