

海陆交互相黏性土工程特性及微结构特征

张宏¹, 柳艳华², 石名磊³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201084;

2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 东南大学交通学院, 南京 210096)

摘要:长江口北侧分布有海陆交互相黏性土, 其物理性质较差, 天然含水率接近或大于液限, 孔隙比接近或大于1, 与一般海相软粘土物性相似, 但压缩变形特征与强度指标有别于一般海相软粘土, 是一种结构性黏性土。采取自由活塞薄壁取样技术与真空冷冻干燥法, 制得不同固结应力水平下的原状样和重塑样, 系统地分析了固结试验中原状样与重塑样在不同固结应力下的微观结构及参数的变化规律。研究结果体现了微观结构变化与宏观力学性质的一致性, 揭示了结构性黏性土不良物理性质与良好力学特性指标“异常”组合的微观机制。

关键词:黏性土; 海陆交互相; 微观结构; 固结应力

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2009)06-0047-06

Engineering Properties and Micro-structural Characteristics of Cohesive Soil in the Interactive marine & Terrestrial Deposit

ZHANG Hong¹, LIU Yan-hua², SHI Ming-lei³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China; 2. Department of Geotechnical Engineering College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, P. R. China; 3. Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: Cohesive soil of the interactive marine & terrestrial deposit along the north side of the Yangtze River estuary has poor physical properties in which water content ratio is approximate or excessive to liquid limit and void ratio is approximate or excessive to one. With free piston thin wall sampling technique and vacuum freeze drying method, undisturbed and remolded samples in different consolidation stress were made. And the micro-structural and parameters were analyzed. It was found that the micro-structure change and macro-mechanic properties were in good agreement. And micro-mechanism of the abnormal correspondence was found between the poor physical properties and good mechanic characteristic indexes of structural cohesive soil.

Key words: clay; interactive marine & terrestrial deposit; micro-structural; consolidation stress

长江口北侧南通—启东段高速公路沿线分布有数十米厚的黏性土, 其物理性质差, 天然含水量大于或接近液限, 孔隙比大于或接近1, 与一般海相软粘土物性相似, 但压缩变形特征与强度指标有别于一般海相软粘土。原勘察资料表明沿线黏性土绝大部

分为软土, 据此, 进行了路堤相关设计, 然而工程实践表明试验段采用“软土”的设计思路不甚合理, 究竟何种原因导致了设计方法的不尽合理, 沿线黏性土是否可作“软土”来加以处理需要做进一步的论证。为此, 张宏等^[1]、柳艳华^[2]从地质成因、赋存环

收稿日期: 2009-06-16

基金项目: 江苏省交通科学研究计划项目(02Y015)

作者简介: 张宏(1978-), 男, 博士生, 主要从事岩土力学及路基工程研究, (E-mail) zhanghong3537@126.com.

境等方面分析了沿线黏性土不良物理性质与良好力学特性指标“异常”组合的原因。

长江口北侧黏性土的沉积环境与典型的河流相沉积或海相沉积环境均不同,其受长江径流水体和海水水位能差交互作用,形成了以长江陆源物质输出为主的海陆交互土层。研究表明,沿线黏性土具有很强的结构性。不同地区黏性土由于赋存环境、沉积条件的差异性,致使其呈现出不同程度的结构性,且对土工特性的影响也有所差别。不同的学者针对不同地区的黏性土进行了相关研究。Mesri 等^[3]对 Mexico City 黏土,张诚厚^[4]对湛江黏土及上海黏土,龚晓南^[5]、王国欣^[6]对杭州黏土,雷华阳^[7]、柳艳华^[8]对天津软土,孙吉主和孔令伟^[9-10]对湛江海域的海洋土,陈晓平^[11]对广州南沙地区软土,彭立才、蒋明镜^[12]对珠海地区软土以及其他学者通过不同方法对对不同地区黏性土的结构进行了研究。

为了进一步研究长江口北侧黏性土物理性质与力学特性不相吻合的问题,重新在南通一启东段高速公路沿线采取自由活塞薄壁取样技术钻孔取样,并利用真空冷冻干燥法,制得不同固结应力水平下的原状和扰动微结构试样,对固结试验中原状样与扰动样在不同固结应力下的微观结构特征及参数的变化规律进行了系统的分析,揭示沿线结构性黏性土不良物理性质与良好力学特性指标“异常”组合的微观机制。

1 取样技术与微结构试样制备法

采用自由活塞薄壁取样器获取通启高速公路代表性断面地基的原状土样,薄壁取样器尺寸如图 1 所示,内径 80 mm、高 500 mm,先用钻机钻到既定的取样深度,然后再取样筒装入薄壁管,通过人工压入的方法将土压入管内,提起钻杆,取出薄壁样。

目前制备微结构试样常用方法有干燥法、风干或烘干法、临界点干燥法与冷冻干燥法。上述方法中临界点干燥法和冷冻干燥法对设备要求高、操作比较复杂,但其对土样扰动程度小^[13],更能反映代表性土样微观结构的真实形态。因此该研究的土样均采用冷冻干燥法进行制备,所用仪器为中国科学院广州地球化学研究所研制的“土微结构真空冷冻制样仪”。事先将测试土样用细钢丝锯切成 4 mm×4 mm×10 mm 的土条,将其放入沸点为-140℃的异戊烷中,再将装有样品的异戊烷容器放入液氮(沸

点为-196℃)中进行冷冻,使土中的液体成为不具膨胀性的非结晶态冰,然后在-50℃的状态下对其进行抽真空 15 h 以上,使土中非结晶的冰直接升华,从而达到土样既干燥又不变形的目的,所制备样品用于扫描电子显微镜对土组构的观察。

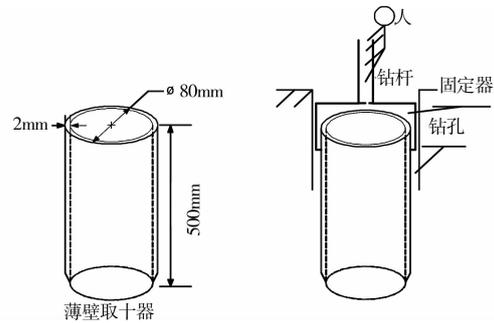


图 1 自由活塞薄壁取样器及取样示意图

2 基本工程特性

为进一步研究海陆交互相下长江口北侧黏性土的基本工程特性,在场地典型断面用薄壁取土器和厚壁敞口对开式取土器分别取样并进行有关试验,试验结果详见图 2 与表 1。

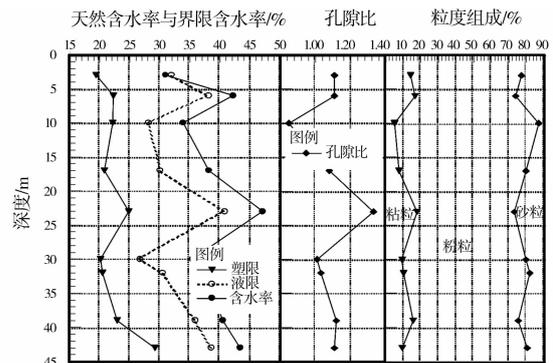


图 2 断面黏性土物理指标与埋深关系曲线图

从试验结果不难看出,断面黏性土沿埋深物理特性比较差,湿密度 1.6~2.0 g/cm³ 属正常范围,而干密度在 1.2~1.5 g/cm³ 间相对偏低,孔隙比绝大部分都大于 1 或接近 1,属低密度黏性土^[14];天然含水量为 40% 左右,一般大于或接近液限含水率,受外界环境影响,浅表土层的天然含水率较深处的含水率小,导致与液限含水率相当,塑性指数 6~15 为低塑性土,稠度状态大部分为软塑或流塑,液限一般低于 50,属低液限范畴;粒度成分主要以粉粒为主,按土的工程分类属于软粘土。

薄壁样由于受扰动影响比较小,较好地保持了土样组构的原始形态,无无限抗压强度高,灵敏度高

达10左右,为高灵敏性土;而厚壁样受扰动比较大,无侧限抗压强度结果比较小,灵敏度在4~6之间,为一般灵敏性土,见表1。薄壁取样试验结果有力地证明了海陆交互相下长江口北侧黏性土是一种强结构性土。应该指出,取样质量的高低对正确评价

土的工程性质是至关重要的,特别是强结构性土对取样过程中的应力释放及机械扰动比较敏感^[15],样品质量不高将导致室内试验结果严重失真,得出错误的结论。

表1 断面黏性土物理性质与压缩变形特性

土样编号	取样方式	深度/m	湿密度 $\rho_w / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	压缩系数 $a_{v100-200} / \text{Mpa}^{-1}$	压缩模量 E_s / Mpa	无侧限抗压强度 q_u / kPa		灵敏度 s_t
									原状	重塑	
No. 1	薄壁	3.0	1.68	1.28	12.60	0.92	0.74	2.74	46.4	4.64	10.0
No. 2	厚壁	6.0	1.83	1.29	15.90	1.26	0.65	3.05	26.0	5.20	5.0
No. 3	厚壁	10.0	1.98	1.48	6.00	1.97	0.72	2.48	25.3	5.50	4.6
No. 4	薄壁	17.0	1.82	1.32	9.30	1.87	0.08	24.96	65.0	5.28	12.3
No. 5	厚壁	23.0	1.74	1.18	16.00	1.39	0.76	2.61	21.3	5.92	3.6
No. 6	厚壁	30.0	1.83	1.35	6.60	2.32	0.54	3.45	29.2	6.21	4.7
No. 7	厚壁	32.0	1.85	1.35	10.00	1.69	0.66	2.81	19.5	5.57	3.5
No. 8	厚壁	39.0	1.80	1.28	13.00	1.35	0.46	4.20	31.9	5.91	5.4
No. 9	厚壁	43.0	1.84	1.30	9.40	1.52	0.51	3.85	32.0	5.71	5.6

薄壁(No. 1 和 No. 4)原状样与重塑样的单向压缩曲线如图3和图4所示。需要特别说明的是为了能在图上表示出固结压力为0 kPa时,原状样和重塑样的孔隙比,在图3、图4中以0.1 kPa对应的纵坐标孔隙比表征固结压力为0 kPa时的孔隙比。由图可见,薄壁原状样的固结压缩曲线与重塑土明显不同。原状样固结压缩曲线具有明显的拐点,拐点前后黏性土的压缩性具有很大的差别。根据前人研究成果及野外调查,取样地点的黏性土自沉积以来,其上覆地层并未发生剥蚀和人工堆载^[16],为正常固结土,先期固结压力与现上覆有效自重应力相等, No. 1 试样上覆有效自重应力约为23 kPa左右, No. 4上覆有效自重应力约为140 kPa。而拐点对应的固结压力值则分别为 No. 1 约60 kPa, No. 4 约400 kPa,皆大于对应上覆自重应力,此时对应拐点的固结应力为固结屈服应力^[17-18],固结屈服压力大于有效上覆压力是天然沉积土受到土结构性影响的主要特征之一。屈服破坏前后结构性土的压缩特性具有显著的差别,固结压力未达到结构屈服应力时,主要是初始结构性的自我调整,孔隙比变化量小;固结压力达到结构屈服应力临界状态时,土的初始结构大部分被破坏,力的微小增量即会导致孔隙比的较大变化;当固结压力达到结构屈服应力而继续增大时,随着孔隙比的继续减小,土的初始结构最后被完全破坏,与重塑土的结构趋于一致。Burland^[18]将

固结屈服应力与前期固结压力的比值称为“屈服应力比”,龚晓南^[5]把此值称为“结构应力比”,以表征结构性的强弱。本试验中 No. 1 样品的屈服应力比约为2.61, No. 4 样品约为2.86,属于强结构性土。由于结构性对土压缩特性存在显著影响,在固结屈服应力前后压缩性发生突变,使得以单一压缩系数 $a_{v100-200}$ 来评价土的压缩性显得不尽合理,产生所谓的“倒大”现象^[19]。薄壁 No. 1 样品因100~200 kPa大于其固结屈服应力60 kPa,得出的压缩系数 $a_{v100-200}$ 为0.74 Mpa^{-1} ,属高压缩性土,结果严重失真,导致对土工程特性的不合理评判。因此,在实际应用中应重视结构性对压缩的影响,重视结构强度破坏前后土力学性质的变化,根据工程施加的载荷区间来评价其压缩性。

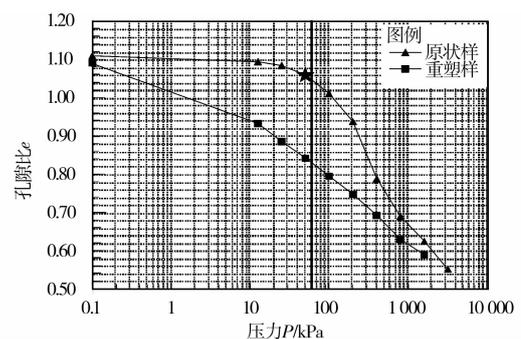


图3 No. 1 黏性土原状样与重塑样 e - $\lg P$ 曲线

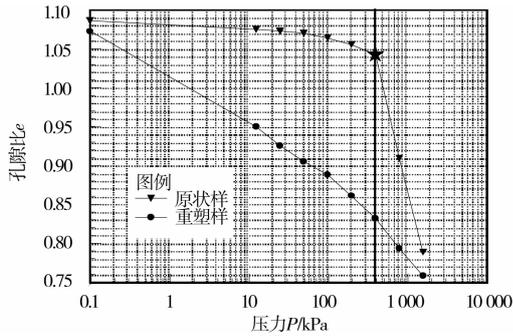


图 4 No. 4 黏性土原状样与重塑样 e-lg P 曲线

3 微观特性

长江口北侧黏性土的工程特性有异于一般海相黏性土的性质,为了进一步研究其“特殊性”的原因所在,采用能保证试样原始组构状态的薄壁采样技术及冷冻干燥法进行取样与试样制备,并用扫描电子显微镜对试样进行观察。采用德国 LeicaQwin5000 偏光图像处理系统对 SEM 拍摄的照片进行处理和分析,提取代表性土样微结构参数,分析其工程特性的微观特征。

图 5 为海陆交互相下黏性土原状样的典型电镜照片,由照片可清楚看到,该土样结构单元体呈团粒—絮凝状结构,片状单元体多粘贴在粒状颗粒的表面和粒状颗粒之间的接触点上,可起到一定的胶结作用,单元体之间接触点的数目较多,架空孔隙并不十分发育。

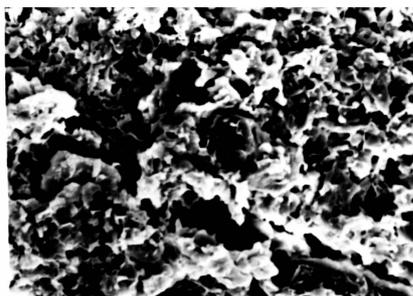


图 5 原状样 SEM 照片/×2000

在用扫描电子显微镜对样品进行观察的过程中,发现土样中具有一定的硅藻残骸的沉积物,如图 6 所示。



图 6 硅藻遗骸/×2000

硅藻是单细胞、真核的微生物,它的细胞壁充满硅胶(SiO₂·nH₂O);Day^[20]曾研究了分布在美国南加州含有硅藻残骸的沉积物,发现硅藻细胞壁能吸水,具有很高的含水率,一般为 50% 左右;Tateishi^[21]研究了分布在日本的含有大量天然硅藻残骸的沉积物,同样发现沉积物的天然含水率很高,强度和刚度却很大,属于强结构性土。长江口北侧黏性土的天然含水率一般为 40% 左右,物性指标比较差,而力学特性指标相对较好,与上述学者研究的沉积物所表现出的工程特性具有相似性。这也进一步证明长江口北侧的黏性土具有显著的结构性特征。

土中孔隙的存在是结构发生变形、破坏的根本原因,故在对 SEM 图片进行处理时,主要提取了与孔隙密切相关的微观量化参数。No. 1 与 No. 4 样品在相同初始状态不同固结压力条件下的孔径分布范围见表 2,图 7 及图 8 则同时给出了 No. 1 和 No. 4 样品原状样与重塑样孔隙面积比(所测孔隙面积占总图像面积的百分比,也称平面孔隙率)与固结压力的关系曲线。

表 2 海陆交互相下黏性土原状样及不同固结压力下孔径分布成果表

土样编号	固结压力 P/kPa	<1 μm	1~2 μm	2~5 μm	5~10 μm	>10 μm
No. 1	0	29	41	23	7	0
	12.5	32	40	22	6	0
	50	58	29	12	1	0
	100	67	24	6	3	0
	400	74	15	6	5	0
No. 4	0	37	33	24	6	0
	12.5	40	34	21	5	0
	50	43	30	22	5	0
	200	60	28	10	2	0
	800	74	17	2	7	0

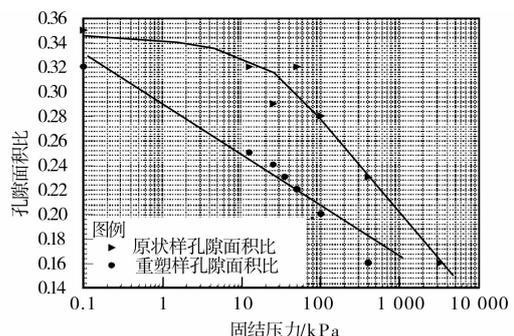


图 7 No. 1 样品孔隙面积比与固结压力关系曲线

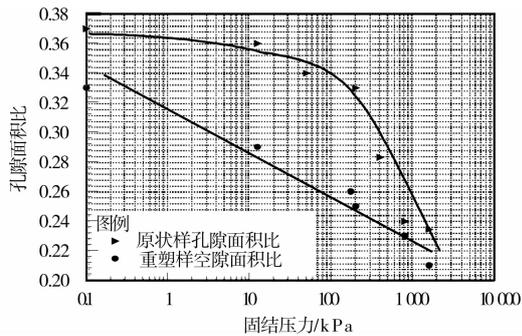


图8 No. 4样品孔隙面积比与固结压力关系曲线

表2给出了海陆交互相下软黏土原状样及不同压力作用下土中孔隙在各孔径区间上的百分含量。由表可见,该黏性土原状样在小于 $5\mu\text{m}$ 的孔径组中占较大比例,不存在 $>10\mu\text{m}$ 的大孔隙,这与扫描电镜观察到的微观形态相一致。在荷载作用初期,各个孔径组的孔隙百分含量的变化均较小,可以认为在荷载小于土结构屈服压力时,土中孔隙组成的变化很小;随着荷载的增加,当其值超过了土的结构屈服压力后, $5\sim 10\mu\text{m}$ 和 $2\sim 5\mu\text{m}$ 2个相对较大的孔径组的孔隙含量不断减小,而 $1\sim 2\mu\text{m}$ 及 $<1\mu\text{m}$ 2个较小孔径组的孔隙含量逐渐增加。说明荷载的作用使得土中大孔隙逐渐被压缩。但是相对其结构屈服应力(No. 1为 60 kPa , No. 4为 400 kPa)而言,当固结应力水平较高时,大孔隙含量出现了略微增大的反常现象,初步分析为固结试验卸荷回弹所致。在荷载作用下,随着结构性的逐渐破损,天然土体的力学性质逐渐趋近于重塑土,且重塑土具有回弹指数相对较大的特点,因此致使在较高应力水平作用下,相应卸荷回弹产生的大孔隙增多,但总体上而言,随荷载的增加,孔隙呈压密趋势。

由图7及图8可见,原状样微结构参数孔隙面积比随固结压力的增加呈减小趋势,且二者之间关系曲线具有明显的拐点特征,在拐点之前孔隙面积比随固结压力对数值变化相对比较小时,而在拐点后孔隙面积比与固结压力参数值变化规律发生突变,变化值相对较大,成线性关系;重塑土样孔隙面积比与固结压力之间的变化规律与原状样不尽相同,虽总体上仍呈降低趋势,但不具有明显的拐点特征,孔隙面积比随固结压力对数值变化几乎成线性关系,具有很好的相关性,相关系数 R 皆在 0.90 以上。

对比试样宏观参数孔隙比与固结压力关系曲线及微观参数孔隙面积比与固结压力关系曲线图,不难发现,二者随固结压力的变化规律具有相似性,间接地从微观角度证明了长江口北侧黏性土具有明显

结构性。但是孔隙面积比与固结压力关系曲线图中拐点对应的固结压力值略小于孔隙比与固结压力关系中拐点对应的固结压力值,这主要是因为固结试验之后制取微结构试样的过程中,对试验样品进行了又一次的扰动造成的,即相对固结试样而言,微结构试样所受扰动的程度较大,结构性遭到破坏的程度相对较高,致使拐点对应固结压力值较小。不难相信,如果具有足够的技术条件保证试样不被扰动,则从微结构参数与固结压力关系曲线图中得到的固结屈服应力值应与固结试验中求得的固结屈服应力具有良好的一致性。

4 结论

通过对长江口北侧黏性土物性指标、固结试验及微结构试验结果的研究分析,可得到如下结论:

- 1)由固结试验及微结构试验研究分析的成果可知,长江口北侧黏性土是一种较强结构性土。
- 2)长江口北侧黏性土的结构性是其物性指标与力学性质指标不相吻合、导致原设计方法不尽合理的缘由之一。
- 3)在结构破坏前后,土的强度和压缩等表现出不同的变化规律。因此,要重视土的结构性对其物理力学性质的影响。
- 4)微结构参数与固结压力间的变化规律体现了微观结构变化与宏观力学性质的一致性,宏观性质是微观机制的外在表现。
- 5)要注意土样扰动对工程性质的影响,用薄壁取土器取样,扰动较小,用原状样进行试验所得结果能相对真实地反映土的工程特性。

参考文献:

- [1]张宏,柳艳华,石名磊,等.海陆交互相下黏性土的性质研究[J].岩土力学,2005,26(9):1491-1494.
ZHANG HONG, LIU YAN-HUA, SHI MING-LEI, et al. Research of characteristics of the sedimentary clay in the alternate marine and terrigenous environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9):1491-1494.
- [2]柳艳华,石名磊.海陆交互相下黏性土性状辨析及评价研究[J].岩土力学,2008,29(2):523-528.
LIU YAN-HUA, SHI MING-LEI. Evaluation research and distinguishing of cohesive soil properties in the interactive marine & terrestrial deposit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2):523-528.
- [3]MESRI G, ROSKHSAR A, BOHOR B F. Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay

- [J]. *Geotechnique*, 1975, 25 (3): 527-554.
- [4] 张诚厚. 两种结构性黏土的土工特性[J]. *水利水运科学学报*, 1983(4): 65-71.
ZHANG CHENG-HOU. Geotechnical characteristics of two structure clays[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1983(4): 65-71.
- [5] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 黏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, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000 (10): 43-47.
- [6] 王国欣, 肖树芳, 黄宏伟. 杭州海积软土应力-应变特征与结构强度损伤规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1555-1560.
WANG GUO-XIN, XIAO SHU-FANG, HUANG HONG-WEI. Study on stress-strain characteristics and damage rule of structural strength for marine soft soil in Hangzhou [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1555-1560.
- [7] 雷华阳, 肖树芳. 软土结构性的试验研究及其对工程特性的影响[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2004, 34(1): 106-109.
LEI HUA-YANG, XIAO SHU-FANG. Experimental study on soft soil structural property and its influences on engineering characteristics [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2004, 34(1): 106-109.
- [8] 柳艳华. 天津滨海海积软土结构性及其对力学性质的影响研究[D]. 天津: 天津城市建设学院, 2005.
- [9] 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 LING-WEI, LU HAI-BO, WANG REN, et al. Engineering properties and micro-mechanism of a structural marine soil in Zhan-jiang sea area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (9): 82-88.
- [10] 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): 99-106.
SUN JI-ZHU, WANG YONG, KONG LING-WEI. Study on bounding surface damage model for structural soft soil in Zhanjiang sea area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 99-106.
- [11] 陈晓平, 曾玲玲, 吕晶, 等. 结构性软土力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29 (12): 3223-3228.
CHEN XIAO-PING, ZENG LING-LING, LÜ JING, et al. Experimental study of mechanical behavior of structured clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29 (12): 3223-3228.
- [12] 彭立才, 蒋明镜, 朱合华, 等. 珠海地区软土微观结构类型及定量分析研究[J]. *水利学报*, 2007 (10): 687-690.
PENG LI-CAI, JIANG MING-JING, ZHU HE-HUA, et al. Microstructure classification and quantitative study on soft clay in Zhuhai[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007 (10): 687-690.
- [13] KONG L W, TAN L R. A simple method of determining the soil-water characteristic curve indirectly [C]//*Unsaturated Soil For Asia*, 2000, Balkema, Rotterdam.
- [14] 蒋国澄. 黏性土的结构稳定性及某些特殊土的性状[J]. *岩土工程学报*, 1986, 8(4): 71-73.
JIANG GUO-CHENG. Structural stability of clayey soil and characteristics of some special soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 8(4): 71-73.
- [15] NAGARAJ M, CHUNG S G. Analysis and assessment of sampling disturbance of soft sensitive clays [J]. *Geotechnique*, 2003, 53(7): 679-683.
- [16] 黄慧珍, 唐保根, 杨文达. 长江三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [17] HONG Z, TSUCHIDA T. On compression characteristics of ariake clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 36 (5): 807-814.
- [18] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Géotechnique*, 1990, 40: 329-378
- [19] 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.
- [20] DAY R B. Engineering properties of diatomaceous fill [J]. *Journal of Geotechnical Engineers Division, American Society of Civil Engineers*, 1995, 121(12): 908-910.
- [21] TATEISHI Y. Geotechnical properties of diatom earth and stability of surface layer for the cut slope[D]. Saga University, 1997.

(编辑 胡英奎)