

文章编号:1006-2467(2020)03-0221-06

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.03.001

上海第⑧层黏土沉积环境及超固结特性

刘丽斌, 兰立信, 李明广, 叶冠林

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘要: 随着地下空间设施的日益拥挤, 地下结构的建设深度不断增大, 对深层土体的研究显得越发重要. 通过研究末次冰期以来中国东海海平面和大气温度的变化, 分析上海深层土(⑥~⑨层)的沉积环境, 发现⑥~⑨层土沉积环境依次为: 湖泊、河流-滨海、湖泊和河流-滨海、河流. 通过运用 Becker 能量法分析高压固结试验结果得出⑧层土超固结比在 3.0 左右; 通过全自动控制静力三轴仪三轴固结不排水试验发现土样破坏时的孔压力系数为负值, 且呈现出强超固结土的性状. 分别从应力和非应力的角度分析⑧层土产生超固结的原因: 应力原因包括地下水位下降、土体孔隙水消散, 导致土体中的有效应力有所增加; 非应力原因包括长时间的次固结作用和土体的胶结作用.

关键词: 深层土; 沉积环境; 超固结; 高压固结

中图分类号: TU 433

文献标志码: A

Depositional Environment and Over-Consolidation of the 8th Layer Clay in Shanghai

LIU Libin, LAN Lixin, LI Mingguang, YE Guanlin

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the increasing congestion of underground space facilities, the depths of underground structures are increasing. And the study of deep soils is becoming more and more important. The sedimentary environment of deep soil (the 6th—9th layer clays) in Shanghai was analyzed by studying the sea level and atmospheric temperature changes in the East China Sea since the late Pleistocene. The sedimentary environments of the 6th to the 9th layer clays were found to be lakes, rivers-marinas, lakes and rivers-marinas, rivers. By using the Becker energy method to analyze the results of the high-pressure consolidation test, the over-consolidation ratio of the 8th layer clay was about 3.0. Through the triaxial consolidated undrain test, it was found that the pore pressure coefficient while soil sample failure was negative, showing the characteristics of strong over-consolidated soil. From the perspective of stress and non-stress, the causes of over-consolidation of the 8th layer clay were analyzed. With the groundwater level decreasing, the pore water in the soil dissipated. And the increase of effective stress in the soil was the cause of stress. The long-term secondary consolidation and cementation were the reasons of non-stress.

Key words: deep soil; depositional environment; over-consolidation; high-pressure consolidation

收稿日期: 2018-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(41630633, 41727802)资助项目

作者简介: 刘丽斌(1993-), 男, 硕士生, 江西省南昌市人, 研究方向为上海深部土体沉积历史以及力学特性.

通信作者: 叶冠林, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 13611934473; E-mail: ygl@sjtu.edu.cn.

近几十年来,随着我国城市化进程的不断深入,城市地表资源逐渐稀缺,地下空间开发成为城市建设的发展趋势和主流方向,但随着地下空间设施的日益拥挤,对土体的工程性质要求越来越高^[1]. 地下结构建设高速发展的上海,其地下结构面积虽然仅为全国土地面积的 0.066%,但由于其举足轻重的经济地位,对上海深层土体的研究显得尤为重要.

目前,从国内外的工程实践来看,研究的土体深度主要集中于 30 m 以内的浅层土,有关土体的沉积环境影响的研究却比较少. 在已有的关于黏土沉积环境与物理力学性质相关性的研究中,大部分系针对分布于欧洲西北部以及加拿大东部地区的冰川型海相沉积黏土^[2-3],沉积后经历了一些物理化学作用形成了工程性质极差的超灵敏土. 对于在东南亚各国广泛分布的冲积型海相黏土,仅有少量研究. Ohtsubo 等^[4]先后对日本有明和泰国曼谷黏土的沉积过程进行了分析,并指出了沉积环境对物理性质的影响. 在国内,邵光辉等^[5]和 Liu 等^[6]对连云港的黏土进行了相关研究. 关于上海的黏土,虽然有地质领域相关学者对全新世长江三角洲的发育过程进行了系统研究,但关注的往往是广域问题以及厚达上百米的地层,与岩土工程少有交集. 近几十年来,魏道堃等^[7-8]对上海浅部土层的应力历史、原状土和重塑土等基本物理力学性质进行了研究,分析了应力历史、各向异性等不同因素对上海软黏土变形和强度特性的影响. 武朝军等^[9]通过大量试验,研究了上海浅部土层(②~⑥层土)沉积环境、物理化学性质和力学特性,分析了沉积环境对浅层土工程性质的影响. 超固结成因方面,一般来说可以分为两类:应力和非应力. 应力类原因有土层剥蚀、地下水位的变动及动荷载的作用;非应力类原因有次固结和胶结作用等.

迄今为止,还没有文献对上海深层(⑥~⑨层)软黏土的沉积环境和工程性质进行过研究. 本文结合末次冰期以来中国东海海平面及大气温度变化,分析了上海深层土的沉积环境;通过高压固结和超固结比(OCR)三轴不排水剪切(CU)试验,研究了上海第⑧层土的超固结特性,并分析了其产生超固结的原因,为进一步展开相关研究工作及工程设计、施工人员提供了一定的参考.

1 上海深层土沉积环境

根据上海市区第四纪综合地层柱状图^[10-11],本文所研究的上海深层土为第一硬土层、第二砂层、第二硬土层、第三砂层,即⑥~⑨层土,地层年代属于

第四系的上更新统. ⑥~⑨层土沉积环境依次为:湖泊、河流-滨海、湖泊和河流-滨海、河流. 文献[12]中拟定的海平面、大气温度变化曲线以及对应的土层沉积年代如图 1 所示. 其中,时间采用 ka B. P.,表示距今多少千年;土层沉积年代信息来源于上海市区第四纪综合地层柱状图. 晚更新世末次冰期(下文简称为末次冰期)以来,中国东部平原发生了 3 次海侵,根据江苏第一水文地质队依次命名为:太湖海侵、滬湖海侵和镇江海侵.

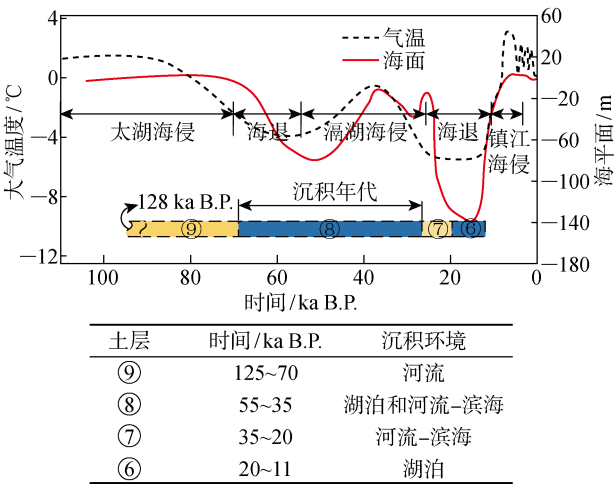


图 1 末次冰期以来上海地区海平面、大气温度变化与深部土层沉积历史^[12]

Fig. 1 Sea level, atmospheric temperature changes and deep soil sedimentary history in Shanghai since the late Pleistocene^[12]

太湖海侵的形成年代约为 70~128 ka B. P.,在该时间段内,上海境内的沉积通常为河流沉积,间或为受到海水影响的三角洲河流,偶尔在局部可达到三角洲前缘的河口环境. 河流-三角洲相砂层构成了分布广泛、厚度较大的川沙组地层,上海工程地质界称之为第⑨工程地质层. 虽然此次海侵在上海境内分布广泛,但根据研究资料^[13]显示,长江三角洲东部地区在该时间段内的沉积物以含砾砂为主、普遍发育溺谷相,并且海侵层较薄,厚约 10 m. 海水主要沿古河谷入侵,此次海侵层属于海相性较弱的海侵层.

海退发生的时间约在 7 万年前,海退历时约 1.5 万年左右. 从古气候分期,得出这段时间是“第六寒冷期”,大气温度的降低将引起冰川的凝聚,伴随的是海平面下降约 80 m. 全区沉积环境由泛滥平原环境演化为泛滥湖泊环境,堆积了暗绿、灰绿粉质黏土,为可塑性硬土状,夹有砂质粉土或粉细砂纹层,厚约 2~4 m,为上海第⑧层土下部.

漏湖海侵的形成年代约在 20~55 ka B. P., 这次海侵遍及上海全区, 海侵的强度为长江三角洲区域第四纪期间历次海侵之最. 此次海侵层期间形成了两个海侵亚层及其间的陆相灰绿色硬土层(第二硬土层). 其中, 下亚层约形成于 45~55 ka B. P.; 硬土层形成于 35~45 ka B. P.; 上亚层约形成于 20~35 ka B. P.. 在 23~35 ka B. P. 期间, 海面回升, 堆积了灰色粉质黏土与粉砂纹层交互的“千层饼”和上覆的灰色砂层, 即工程地质界对应的⑧层上部和⑦₂层下部. 约在 20~23 ka B. P. 期间, 此时海平面已下降, 位于三角洲平原的河流-滨海环境堆积了岩性特征为普遍呈褐黄、锈黄色的砂质粉土和粉砂、粉细砂, 即上海工程地质所划的⑦₁层和⑦₂层. 在约为 11~20 ka B. P. 的末次冰期最盛时, 从图 1 可以看出, 海平面下降幅度比现今约低 140 m, 上海西北部发育的泛滥平原-湖泊扩展到除现河口区外的上海整个陆域, 在本区广泛沉积了褐黄色粉质黏土和暗绿色黏土层, 即上海工程地质所划的⑥层土.

综上所述, ⑨层土沉积环境为河流沉积, 由于太湖海侵的原因, ⑨层属于海相性较弱的海侵层; ⑧层土主要以湖泊沉积为主, 但⑧层的上部和⑦层有着相同的沉积环境, 都是河流-滨海环境, 整体呈现出两端海相性高于中部的特点; ⑥层则是湖泊沉积环境.

2 试验分析

本次试验取土地区第⑧层深度 47~70 m, 试验对象为灰绿色硬土(第二硬土层), 属于典型的上海⑧层土. 试验方案: 对深度分别为 54.0~54.5 m、57.0~57.5 m、60.0~60.5 m 的上海⑧层原状土进行三轴不排水剪切试验(K_0 固结实验)和高压固结试验, 通过分析试验结果来研究⑧层土的超固结性. 考虑到土层埋深较深, 普通常规固结仪加载的压力不能使土体发生足量的压缩变形. 本次固结试验采用自行设计的气动式高压固结仪, 可对土样施加 8 MPa 的固结压力. 三轴剪切试验采用的是全自动控制静力三轴仪, 简称为 GDS. 试验饱和和阶段反压取 200 kPa, 围压取 210 kPa; 试验仪器的反压饱和系统, 使土样达到 95% 以上的饱和度; 剪切和固结围压取原位有效自重应力. 为了保证孔隙水压力在加载过程中能及时消散, 剪切速率为 6.6 m/min, 换算成每分钟应变为 0.008 5% (土工试验规范要求 在 0.003%~0.012%).

2.1 高压固结试验确定先期固结压力

土层受到其生成环境和地质历史变迁等因素影

响, 就会在土层中产生一种“记忆”, 土的工程性质就表现为与这种“记忆”有关. 而土的先期固结压力值反映了地质历史的影响, 是用来判断土层固结状态的重要参数. 因此可以推测, 沉积环境类似的土层, 其土层固结状态可能相似.

上海第⑧层土的孔隙比-竖向应力曲线(e - $\lg p$) 如图 2 所示, 其相关试验结果如表 1 所示. 其中, e_0 为初始孔隙比; w_n 为土的天然含水质量分数; C_c 为压缩指数; C_s 为回弹指数; p_0 为原位应力, 地下水位(-1 m)以下的土层采用有效重度计算; p_c 为先期固结压力; $OCR = p_c/p_0$, 为超固结比. 由图 2 可知, 曲线没有明显的弯曲点, 因此, 无法采用传统的 Casagrande 经验作图法从压缩曲线中获得较为准确的先期固结压力. 此次先期固结压力的计算采用的是 Becker 等^[14] 提出的能量法, 该方法可以从光滑的压缩曲线中准确得到屈服应力, 即 p_c . 以 54.0~54.5 m 土样为例, 其总能量 E 与 p 的关系曲线如图 3 所示. 曲线由 3 段直线组成: 屈服前、屈服后和中间段. 屈服前与中间段的交点即原位应力 p_0 ($p_0 = 493.1$ kPa), 与根据实际土层深度计算所得的 447.0 kPa 相差 46.1 kPa, 此处 在 计算 超固结比时取实际计算得出的 p_0 . 屈服前与屈服后交点为屈服点的竖向应力 p_y , 即先期固结压力 ($p_c = 1\,332.8$ kPa).

试验结果显示, 3 组试验得出的 OCR 均在 3.0 左右, 说明上海第⑧层土为超固结土. 由前文的分析

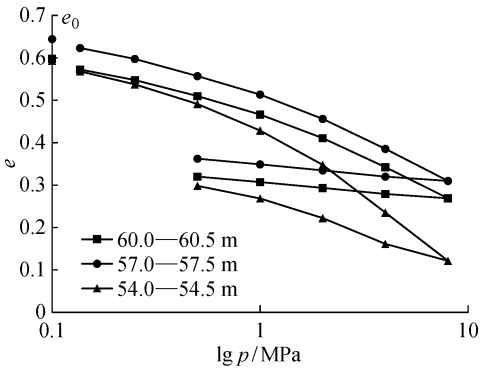


图 2 上海第⑧层土高压固结压缩曲线
Fig. 2 High pressure consolidation compression curves of the 8th layer clay in Shanghai

表 1 固结试验参数						
Tab. 1 Parameters of consolidation test						
深度/m	w_n /%	C_c	C_s	p_0 /kPa	p_c /kPa	OCR
54.0~54.5	26.7	0.376	0.163	447	1332.8	2.98
57.0~57.5	30.4	0.243	0.043	471	1446.3	3.07
60.0~60.5	26.4	0.236	0.042	495	1404.3	2.84

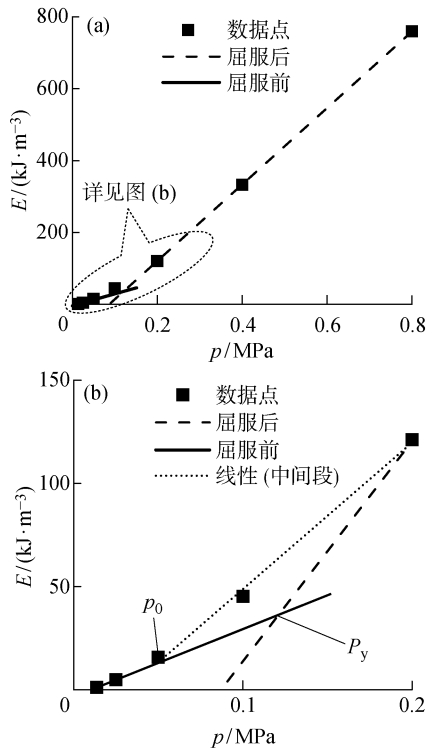


图 3 由能量法确定的先期固结压力(54.0~54.5 m)
Fig. 3 Preconsolidation pressure determined by energy method (54.0~54.5 m)

可知,⑧层土的沉积环境与⑥层土的沉积环境相似,而已有试验验证:⑥层土为超固结土,OCR 在 2.0 左右.

2.2 超固结在三轴试验中的表现

将 54.0~54.5 m 试样 K_0 固结到原位应力后再进行剪切的有效应力路径($p_q \sim p'$),应力应变曲线($p_q \sim \epsilon$)和超孔压应变曲线($u \sim \epsilon$)如图 4 所示.取最大应力 p_{qmax} 为剪切过程中的屈服应力 p_{qf} ,获得的相应不排水剪切试验结果如表 2 所示.其中: σ 为试验围压; $M_f = p_q/p'$ 为破坏时的强度比, p_q/p' 为该直线的斜率; Δu 为剪切后的超孔压累计值; A_f 为剪切破坏时的孔隙压力系数,数值上等于超静孔压 Δu_f 与对应的 p_{qf} 的比值,即 $\Delta u_f/p_{qf}$.

图 4 中的有效应力路径斜向上走的趋势和负超孔压的出现说明了该土层是超固结土;另一方面,3 组试样剪切破坏时的孔压力系数都是负值,数值在

表 2 不排水剪切试验结果

Tab. 2 Test results of CU

深度/m	σ /kPa	M_f	Δu /kPa	A_f
54.0~54.5	500	1.29	-50.4	-0.09
57.0~57.5	500	1.37	-124.5	-0.11
60.0~60.5	500	1.32	-107.6	-0.08

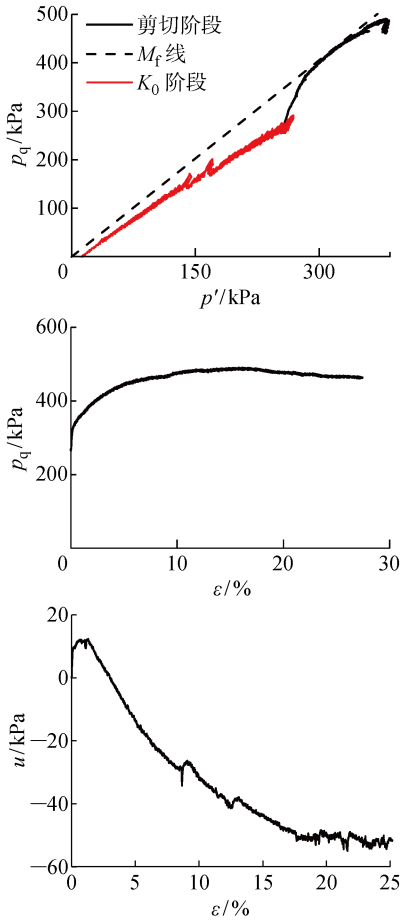


图 4 不排水剪切试验结果(54.0~54.5 m)
Fig. 4 Test results of CU (54.0~54.5 m)

-0.1 左右. 饱和黏性土破坏时的 A_f 值^[15]如表 3 所示.对比表 3 中饱和黏性土破坏时的 A_f 值,可判断该土层表现出强超固结性.

表 3 饱和黏性土破坏时的 A_f 值^[15]

Tab. 3 Values of A_f in triaxial test with different radial stresses^[15]

土样(饱和)黏土	A_f
高灵敏度	0.75~1.50
正常固结	0.50~1.00
弱超固结	0.25~0.50
一般超固结	0~0.25
强超固结	-0.50~0

2.3 超固结原因分析

对于超固结产生的原因,总体来说可以分为两类:应力类和非应力类.应力类原因有层剥蚀、地下水位变动和动荷载作用;非应力类原因有次固结和胶结作用等.

从应力角度分析,考虑到⑧层土经历了 2 次海退,在海退过程中,地下水位下降、土体孔隙水消散,

伴随着土体中有效应力的增加,进而产生超固结。

以 60.0~60.5 m 的试样为例,假设地下水位与海平面一样,地下水位取 -1.5 m,土的平均重度 $\gamma=18$ kN/m³, $p_0=1.5 \times 18 + (60-1.5) \times 8=495$ kPa,对不同海退时期的有效自重应力估算如下:

(1) 时间在 50 ka B. P. 时,海平面约为 -80 m,⑧层土沉积完成,此时 $p_c=18 \times (60-47)=234$ kPa,OCR=234/495=0.47;

(2) 时间在 18 ka B. P. 时,海平面约为 -140 m,⑥层土沉积完成,此时 $p_c=18 \times (60-29.8)=543.6$ kPa,OCR=543.6/495=1.1;

(3) 时间在 8 ka B. P. 时,海平面约为 -60 m,⑤层土沉积完成,此时 $p_c=18 \times (60-18)=756$ kPa,OCR=756/495=1.53。之后海平面逐渐上升, P_0 接近现在值。

此外,抽地下水也会引起先期固结应力的增加。第⑧层土下卧层为第⑨层砂质土,以粉砂和含砾中砂为主,为上海市的第二承压含水层。该含水层富水性和水质均较好,20 世纪 80 年代以前,作为主要的开采水层为上海市提供了大量水源。第二压含水层水位历时曲线可以参考文献[16]。由文献[16]中的第⑨层的水位记录可知,在 20 世纪 60 年代由于抽水引起地下水位下降了约 30 m。假设第⑨层的水位下降有足够时间引起第⑧层的孔压减少并达到平衡,则水位下降 30 m 引起的孔压减少量为: $\Delta p=300$ kPa,此时 $p_c=18 \times 1.5 + 8 \times (65-1.5) + \Delta p=835$ kPa,OCR=835/495=1.69。

由上述计算可见,海退或抽地下水引起的有效应力变化,所产生的 OCR 均小于 2.0,与试验所得值 2.84~3.07 有一定的差异,因此应力变化并不能完全解释此超固结成因。

从非应力角度考虑,根据 Bjerrum^[17] 提出的等时压缩曲线模型,在原位应力 p_0 作用下,随着作用时间的增长,伴着次固结量不断增加,从而导致 p_c 也有所增加,土体显示出超固结性状,这种现象区别于应力原因引起的超固结,称为“似超固结”^[18],也称为 Age effect。第⑧层土沉积时间距今约 5 万年,似超固结是导致超固结的另外一个原因。综上所述,超固结是水位下降引起的应力历史和似超固结的综合结果。

另外,土体的胶结作用也是导致土体产生“似超固结”的原因。上海⑧层土经历了海相沉积环境,根据前人的研究成果^[19],海相黏土等由于土体中存在一些特定的物质成分,如碳酸盐、铁铝氧化物和有机质等,可以沉积在土粒间或包裹颗粒,或者孔隙溶液

与土颗粒表面发生离子交换,使土体具有一定的结构,并赋予一定的力学性质,使土体显现出某些超固结特征。

3 结论

通过研究末次冰期以来中国东海海平面和大气温度变化,分析了上海深层土(⑧层土为主)的沉积环境,结合高压固结和 GDS 三轴不排水剪切试验,研究了上海第⑧层土的超固结性,并分析了其产生超固结的原因,得出以下结论。

(1) 上海深层土地层年代属于第四系的上更新统,沉积时间在距今两万年以前,⑥~⑨层土沉积环境依次为湖泊、河流-滨海、湖泊和河流-滨海、河流。

(2) 运用 Becker 能量法分析高压固结试验结果得出⑧层土的 OCR 在 3.0 左右。在 GDS 三轴不排水剪切试验中,土样破坏时的 A_f 为负值,呈现出强超固结土的性状。

(3) 从应力和非应力的角度分析了⑧层土产生超固结的原因。从应力角度分析得出,地下水位下降、土体孔隙水消散,导致土体中有效应力的增加,约在 8 ka B. P. 时,通过估算得出 OCR 为 1.53。从非应力角度考虑得出,长时间的次固结作用和土体的胶结作用都是上海⑧层土呈现出超固结性状的重要原因。

参考文献:

- [1] 刘映晶,陈锦剑,王建华,等. 逆作土方通道式施工工艺对基坑变形的影响[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1): 89-93.
LIU Yingjing, CHEN Jinjian, WANG Jianhua, et al. Effect of channel-type transport technology of earthwork on the deformation of top-down deep foundation pit [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(1): 89-93.
- [2] TORRANCE J K. On the role of chemistry in the development and behavior of the sensitive marine clays of Canada and Scandinavia[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1975, 12(3): 326-335.
- [3] CHUNG C K, FINNO R J. Influence of depositional processes on the geotechnical parameters of Chicago glacial clays[J]. Engineering Geology, 1992, 32(4): 225-242.
- [4] OHTSUBO M, EGASHIRA K, KASHIMA K. Depositional and post-depositional geochemistry, and its correlation with the geotechnical properties of marine clays in Ariake Bay, Japan[J]. Geotechnique, 1995, 45(3): 509-523.

- [5] 邵光辉, 刘松玉. 连云港海相粘土的沉积化学及其对土基本性质的影响[J]. **工程地质学报**, 2006, 14(Sup): 86-91.
SHAO Guanghui, LIU Songyu. The influence of depositional chemistry on geotechnical properties of Lianyungang marine clays[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2006, 14(Sup): 86-91.
- [6] LIU S Y, SHAO G H, DU Y J, *et al.* Depositional and geotechnical properties of marine clays in Lianyungang, China[J]. **Engineering Geology**, 2011, 121(1/2): 66-74.
- [7] 魏道垛, 胡中雄. 上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 1980, 2(4): 13-22.
WEI Daoduo, HU Zhongxiong. Experimental study of preconsolidation pressure and compressibility parameters of Shanghai subsoil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1980, 2(4): 13-22.
- [8] 魏道垛, 杨熙章. 上海软土的静止侧压力系数 K_0 的分布和变化规律的研究[J]. **大坝观测与土工测试**, 1988(3): 36-43.
WEI Daoduo, YANG Xizhang. Variation of K_0 -values of Shanghai soft soils[J]. **Dam Observation and Geotechnical Testing**, 1988(3): 36-43.
- [9] 武朝军, 叶冠林, 王建华. 上海莲花路浅部土层超固结特性试验研究[J]. **上海交通大学学报**, 2016, 50(3): 331-335.
WU Chaojun, YE Guanlin, WANG Jianhua. Experimental study of overconsolidation behavior of the upper Shanghai clays in Lianhua road[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2016, 50(3): 331-335.
- [10] 严学新, 史玉金. 上海市工程地质结构特征[J]. **上海地质**, 2006(4): 19-24.
YAN Xuexin, SHI Yujing. Structure characteristic of engineering geology in Shanghai[J]. **Shanghai Geology**, 2006(4): 19-24.
- [11] 邱金波, 李晓. 上海市第四纪地质与沉积环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2007: 124-125.
QIU Jinbo, LI Xiao. Shanghai quaternary geology and sedimentary environment [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2007: 124-125.
- [12] 王靖泰, 汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系[J]. **地理学报**, 1980, 35(4): 299-312.
WANG Jingtai, WANG Pinxian. Relationship between sea-level changes and climatic fluctuations in East China since late Pleistocene[J]. **Acta Geographica Sinica**, 1980, 35(4): 299-312.
- [13] 王张华, 丘金波, 冉莉华, 等. 长江三角洲南部地区晚更新世年代地层和海水进退[J]. **海洋地质与第四纪地质**, 2004, 24(4): 1-8.
WANG Zhanghua, QIU Jinbo, RAN Lihua, *et al.* Chronostratigraphy and transgression/regression during late Pleistocene in the southern Changjiang (Yangtze) River delta plain[J]. **Marine Geology & Quaternary Geology**, 2004, 24(4): 1-8.
- [14] BECKER D E, CROOKS J H A, BEEN K, *et al.* Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1987, 24(4): 549-564.
- [15] 王建华, 张璐璐, 陈锦剑. 土力学与地基基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 136-137.
WANG Jianhua, ZHANG Lulu, CHEN Jinjian. Soil mechanics and foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 136-137.
- [16] 张阿根, 魏子新. 上海地面沉降研究的过去、现在与未来[J]. **水文地质工程地质**, 2002, 29(5): 72-75.
ZHANG Agen, WEI Zixin. Past, present and future research on land subsidence in Shanghai city [J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2002, 29(5): 72-75.
- [17] BJERRUM L. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings[J]. **Geotechnique**, 1967, 17(2): 83-118.
- [18] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 269-285.
QIAN Jiahuan, YIN Zongze. The earthwork principle and calculation [M]. 2nd ed. Beijing: China Water and Power Press, 1996: 269-285.
- [19] 王冠英, 肖树芳, 习春飞. 海积软土先期固结压力与结构强度的关系及成因分析[J]. **世界地质**, 2004, 23(1): 69-74.
WANG Guanying, XIAO Shufang, XI Chunfei. Relationship between preconsolidation pressure and structural strength of marine soft clay and the cause analysis [J]. **Global Geology**, 2004, 23(1): 69-74.

(本文编辑:石易文)