

DOI: 10.11779/CJGE2015S2019

长江口海陆交互相沉积土复合地基孔压响应特性

刘志彬^{1, 2}, 刘松玉^{1, 2}, 经 绯^{1, 2}, 居 俊¹, 李 维¹, 姬付全¹

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对长江口北岸典型海陆交互相沉积土 PHC 管桩复合地基的孔压响应特性, 在崇启大桥北接线工程选择现场试验段, 对路堤填筑过程桩间土不同深度的孔压变化规律开展了现场试验研究, 并对该地区的气象和水文地质条件进行了同步调查。结果表明, 长江口海陆交互相沉积土地区地下水位受当地降雨和季节性波动影响剧烈, 同一年内变化幅度可达 1.6 m, 在分析地基土超孔压时必须加以考虑。浅层土体渗透性较好, 超孔压反应灵敏, 受填筑过程影响呈锯齿状波动。深层软土渗透性差, 超孔压随路堤填筑有累积上升的趋势。管桩复合地基加固区超孔压较小且消散快, 下卧层超孔压较高且消散缓慢。因此, 长江口海陆交互相沉积土地区复合地基下卧层软土固结特性需重点关注。

关键词: 长江口; 海陆交互相沉积土; 复合地基; 孔隙水压力; 现场试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0091-05

作者简介: 刘志彬(1976-), 男, 副教授, 主要从事环境岩土与地质工程等方面教学和科研。E-mail: seulzb@seu.edu.cn。

Pore pressure response of composite foundation in interactive marine and terrestrial deposit of Yangtze River Estuary

LIU Zhi-bin^{1, 2}, LIU Song-yu^{1, 2}, JING Fei^{1, 2}, JU Jun¹, LI Wei¹, JI Fu-quan¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Nanjing 210096, China)

Abstract: To learn the pore pressure response characteristics of PHC pipe pile composite foundation in interactive marine and terrestrial deposit of Yangtze River Estuary, a test site is selected at the northern connection project of Chongming—Qidong Bridge, and then field tests are conducted to study the variation of pore pressure at different depths during embankment loading. At the same time, the meteorology and hydrogeology of the local area are investigated. The test results indicate that the water table is greatly influenced by local precipitation and seasonal fluctuations of groundwater. The variation of the water table in one year may reach 1.6 m, which must be considered in the pore pressure analysis of foundation soils. The excessive pore pressure of shallow soils fluctuates sharply and dissipates quickly due to their good permeability. While the excessive pore pressure of deep soils may be accumulated and gradually increase owing to their low permeability and embankment loading. The excessive pore pressure in the reinforced zone of the pipe pile composite foundation is low and dissipates quickly, but that in the underlying soft layer is relatively high and dissipates slowly. Therefore, the consolidation property of the underlying soft layer in the interactive marine and terrestrial deposit of Yangtze River Estuary should be paid attention to.

Key words: Yangtze River Estuary; interactive marine and terrestrial deposit; composite foundation; pore pressure; field test

0 引言

由于特殊的地质环境, 在中国江河入海口附近形成了一类特殊的海陆交互相沉积土层, 此类沉积土在渤海湾^[1]、长江口^[2]、珠江口^[3]等地区均有不同范围的分布。江河入海口地区历史上曾发生过多次规模不等的海侵海退事件, 此类地区全新世沉积层即受此过程影响和控制^[2-3]。在海进海退过程及沿岸砂坝并陆事件综合作用下, 构成典型的海陆交互相沉积环境, 由此形成的第四纪沉积物中往往表现为黏性土或薄层黏土与粉、细砂互层、多韵律特征(如图 1)。沉积环境与

土体的物理力学性质密切相关^[4], 由于软土中的普遍夹砂现象, 与一般的海相、湖相沉积软土不同, 海陆交互相沉积软土常表现出一些独特的工程性质。其中, 陈晓平^[5]基于渗透、剪切、固结、蠕变试验, 对珠江三角洲海陆交互相沉积软土的固结效应进行了系统研究。张宏等^[6]通过对采自现场的原状及重塑土样进行固结试验和扫描电镜分析, 探讨了长江口北侧海陆交

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272311); 江苏省交通科学研究院项目(09Y33)

收稿日期: 2015-03-26

互相黏土的结构性与微观结构特征。苗永红等^[7]将多样本动态聚类分析技术应用于典型海陆交互相沉积土体，实现对此类土中夹层、透镜体和过渡层的识别。刘志彬等^[8]为阐明长江口北岸海陆交互相沉积软土土性复杂、非均质特点，对其成因进行了分析，并基于孔压静力触探试验结果对软土层的空间变异性进行了定量评价。

本文通过在长江口北岸崇启大桥接线工程沿线典型海陆交互相沉积土 PHC 管桩复合地基中布设孔压监测元件，在路堤填筑过程对孔隙水压力的上升消散过程进行连续观测，探讨了在近海口附近此类特殊软土地层中孔隙水压力响应的特殊性、原因及分析方法，为类似地层条件下现场监测工作提供参考。



图 1 海陆交互相沉积软土中“夹砂”现象

Fig. 1 Characteristics of sand inclusion in interactive marine and terrestrial soft deposit

1 场地地质条件

为研究海陆交互相沉积土层孔压随路堤填筑过程上升与下降的响应特性，现场试验依托崇启大桥北接线工程，该工程沿线即为典型的海陆交互相沉积土层。对于沿线桥头过渡段、箱涵等重要构筑物重要路段地基处理方式选择 PHC 管桩复合地基。不同区间管桩设计桩长（打穿软土层或仅打穿上部软土层）和桩帽尺寸不同，且兼有静压和锤击两种施工工艺。综合考虑后，选择南引河桥北桥头至大兴东互通主线桥南桥头（K38+183.8—K38+465.5）为 PHC 管桩加固海路交互相新近沉积深厚软基科研监测现场试验段，试验段的地质剖面图如图 2 所示。PHC 管桩监测段 3 个场地的地质剖面相似，以 K38+210 断面为例：地表 0~0.44 m 为①2 层（粉质）黏土；0.44~3.14 m 为②1 层淤泥质粉质黏土夹粉砂、粉质黏土夹粉砂，局部为淤泥质粉质黏土与粉砂互层；3.14~18.24 m 为②2 层粉砂、粉土；18.24~27.64 m 为③1 层淤泥质（粉质）黏土、

淤泥质（粉质）黏土夹粉砂；27.64~33.14 m 为③2 层粉质黏土夹粉砂、粉质黏土与粉砂互层；33.14 m 以下为③1 层淤泥质（粉质）黏土、淤泥质（粉质）黏土夹粉砂。

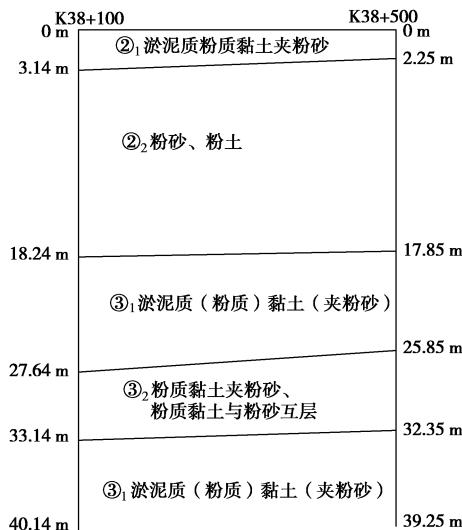


图 2 PHC 管桩科研监测段地质剖面示意图

Fig. 2 Geological profile of test site of PHC pipe piles

2 试验段孔压监测方案

试验段 PHC 管桩复合地基的设计资料如表 1 所示。在 PHC 管桩施工结束后，分别在三个场地上沿路基中心线桩侧不同深度处桩间土中埋设孔压计，仪器埋设位置见表 2。孔压计在埋设前做预饱和处理，埋设完成后，连续监测孔压计读数直至孔压数据降至最低值，作为初始读数，之后对路堤填筑过程中路基内部孔压上升与消散情况进行了长期监测。孔压计埋设后监测起始日期为 2009-05-28，监测至 2011-10-23。为明确起见，特别指出文中“孔压”是指孔隙水压力的绝对值，“超孔压”指超静孔隙水压力值。

表 1 PHC 管桩现场试验段基本情况

Table 1 Basic conditions of field test sites of PHC pipe piles

试验段桩号	施工 工艺	填土高 度/m	桩长/ 桩间距/m	桩帽 类型
K38+183.8— K38+213.8	静压	6.770	40/3.5	B 型
K38+391.5— K38+415.5	锤击	7.398	31/3.5	B 型
K38+415.5— K38+465.5	锤击	7.621	31/3.0	A 型

注：A 型为 140 cm×140 cm×30 cm，B 型为 160 cm×160 cm×40 cm。

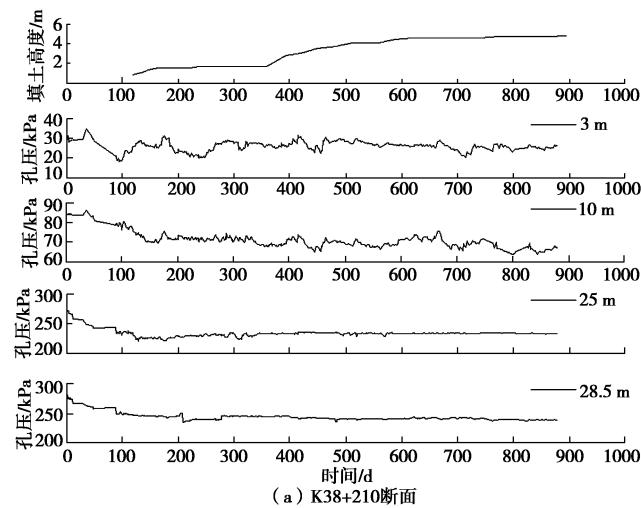
表 2 试验段孔压计埋设情况

Table 2 Deployment of pore pressure gauges at test site

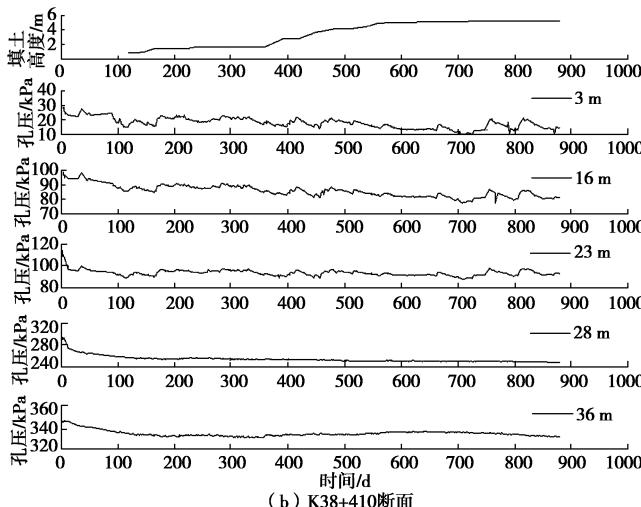
测试断面	深度/m	场地情况
K38+210	3.0, 10.0, 19.0, 25.0, 28.5	静压法施工, 桩长 $L=40$ m, 桩间距=3.5 m
K38+410	3.0, 16.0, 23.0, 28.0, 36.0	锤击法施工, 桩长 $L=31$ m, 桩间距=3.5 m
K38+430	3.0, 8.0, 23.0, 30.0, 36.0	锤击法施工, 桩长 $L=31$ m, 桩间距=3.0 m

3 路堤填筑过程孔压响应特性分析

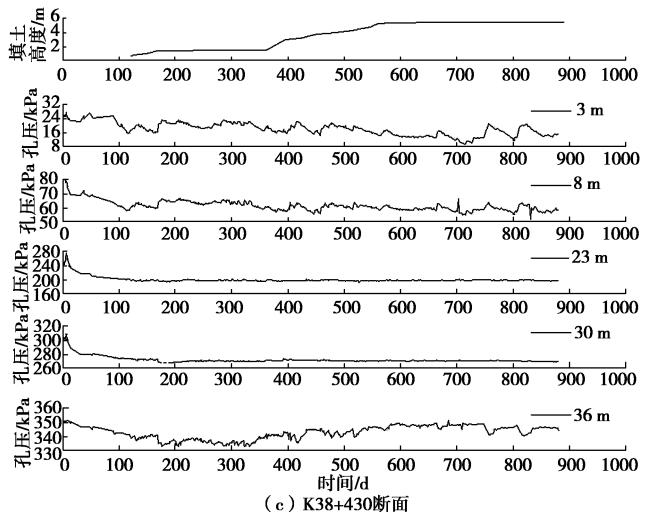
图 3 为 PHC 管桩 3 个科研监测断面不同深度孔压随路堤填筑过程的变化曲线。从 3 个断面孔压监测图中可将孔压变化规律按深度分为两组, 第一组为浅层孔压, 埋设于浅部的②1 层和②2 层。从孔压变化曲线上可以看出, 该组孔压计读数在路堤填筑期间变化剧烈, 即便是停止填筑期间仍有明显的上升和下降。第二组为深层孔压, 埋设于下部的③2 层和③1 层。该组孔压计的数值较高, 但随路堤填筑过程孔压变化不明显, 总体比较稳定。这种现象给现场复合地基固结过程分析造成了较大困难。



(a) K38+210断面



(b) K38+410断面



(c) K38+430断面

图 3 3 个试验断面不同深度孔压随填土高度变化

Fig. 3 Variation of pore pressure of 3 test cross-sections with embankment height

为查明海陆交互沉积土中孔压响应特殊性的原因, 对长江口附近南通地区气象和水文地质条件进行了调查分析。研究发现, 上述现象主要源于两方面因素: ①接线工程临近长江入海口, 该地区雨水充沛, 工程所在地如东市年平均降雨量 1042 mm, 并且降雨量年内分配不均, 汛期(6月—9月)雨量相对集中, 约占年总降雨量的 55%~80%, 频繁降雨常导致地下水位在短时间内即有显著的升降; ②南通地区多年地下水位监测数据表明, 该地区地下水位存在明显的季节性波动。据地调部门监测资料, 图 4 为 2009 年南通市周边 3 个水位监测点观测到的一年中地下水位变化情况, 地下水位升幅达 0.4~1.5 m, 如此高的地下水位变幅势必对孔压监测结果有较大影响。为验证上述影响的存在, 本工程选择试验段路侧两口水井的地下水位进行了为期 10 个月的观测。A 水井靠近 K38+210 断面, B 水井在 K38+420 附近, 平均 1~2 d 监测一次。图 5 为 2011-01-01 至 2011-10-23 期间两口水井地下水位与地表间距离随时间变化曲线, 并与 3 个监测断面 3 m 深处的孔压监测值进行比较。从 2009 年 9 月路堤填筑开始到 2011 年 1 月, 经历 500 多天后由路堤填土引起的超静孔压基本已经完全消散, 因此 3 m 处测得的孔压值应是由静水压力引起的。从图 5 可以看出, 3 个监测断面的孔压变化与两口水井测得的地下水位升降规律完全一致, 证明地下水位波动与孔压监测结果有密切关系。实测的地下水位变化幅度为 0.8~2.4 m, 平均为 1.6 m, 相当于 16 kPa。如此大的静水压力波动, 在进行路堤填筑过程引起的超孔压分析时不容忽视, 必须加以考虑。由于 3 个监测断面 3 m 深位置均靠近地表, 且该深度超孔压消散迅速, 因此该深度孔压变化可以反映该处静水压力的变化。

综上，在考虑3 m深度以下各位置超孔压变化时，用该处的实测孔压值减去3 m处孔压，再减去两个深度的静水压力差，即可得到该深度处超孔压值。

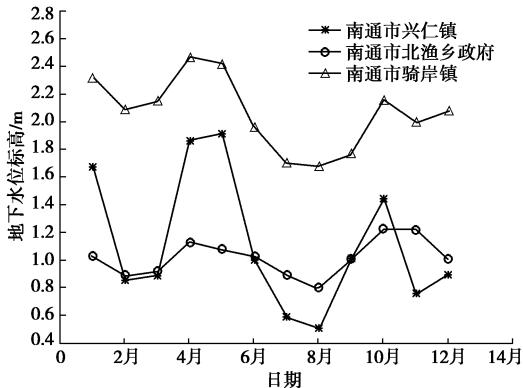


图4 2009年南通附近3个观测点地下水位变化曲线

Fig. 4 Variation of water table at 3 sites around Nantong in 2009

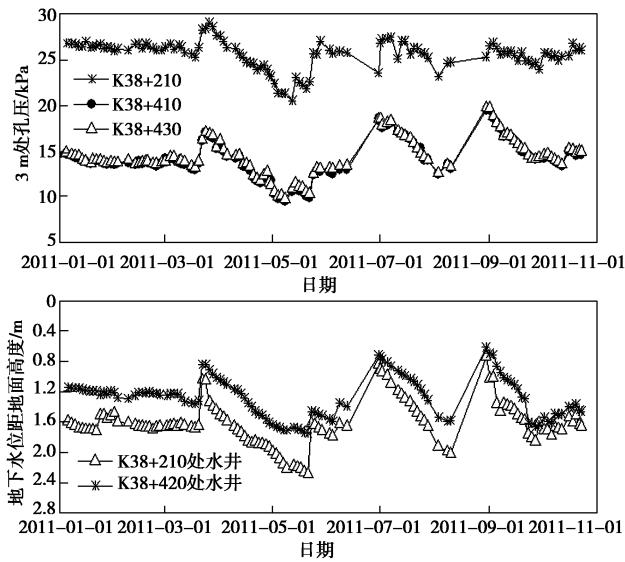


图5 各断面3 m处孔压随地下水位变化

Fig. 5 Variation of pore pressure at 3 m with water table

基于上述分析方法，图6为3个监测断面不同深度处超孔压随填土高度变化曲线。从图中可见路堤填筑过程超孔压上升消散基本规律：每次填土阶段开始，超孔压上升，停止填土后，超孔压随即呈下降趋势。浅层土体渗透性好，又临近地表，由填土引起的超孔压上升与消散快，超孔压呈锯齿状波动，总体趋势平缓。K38+210断面10 m深度、K38+410断面16 m深度以及K38+430断面8 m深度皆表现为这类特征。由于下部淤泥质黏土渗透性差，排水路径长，孔压消散较慢，填土引起的超孔压易形成累积，所以下部淤泥质黏土层中超孔压呈上升趋势。K38+410断面28, 36 m深度以及K38+430断面23, 30, 36 m皆呈现这个特征。PHC管桩加固区的孔压与下卧层超孔压也表现不一样的特征，K38+210断面管桩处理深度为45 m，所测的超孔压皆为加固区桩间土的超孔压，由于加固区桩体分担了大部分的荷载，桩间土中超孔压较小，

复合地基加固区压缩模量高，固结系数也较大，超孔压消散快，所以K38+210断面各深度超孔压都消散较快，总体趋势平缓。此外，由于管桩复合地基影响，上覆荷载通过复合地基加固区传至下卧层，导致下卧层附加应力增大，加之深处为透水性较差的淤泥质黏土，在桩端土层中产生较大的超孔压，并且消散缓慢，

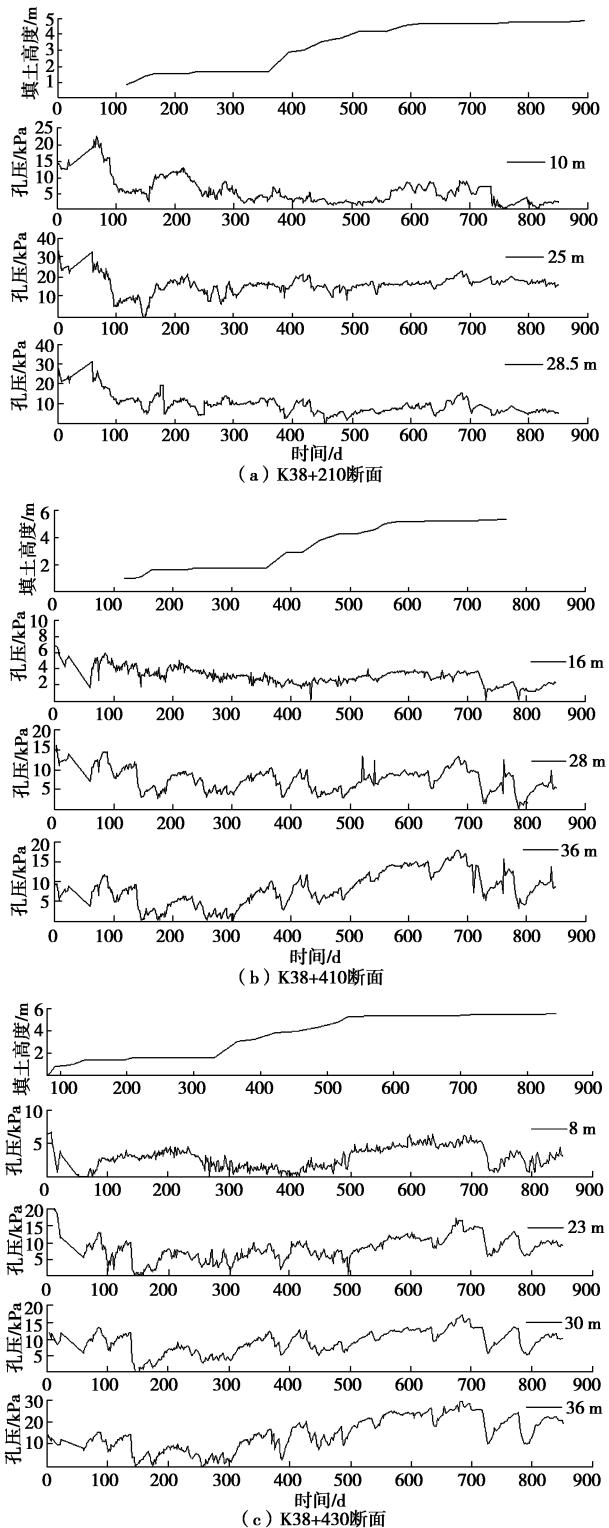


图6 3个试验断面不同深度超孔压随填土高度变化

Fig. 6 Variation of excessive pore pressure of 3 test cross-sections with embankment height

如 K38+410 断面 36 m 深度、K38+430 断面 30 m、36 m 深度超孔压曲线所示, 上部路堤填土在最下方淤泥质黏土层产生的超孔压约为 1~20 kPa。基于以上对现场孔压监测数据的分析可见, 崇启接线工程 PHC 管桩复合地基的固结问题主要表现为复合地基加固区下方深厚软土层的固结。

4 结 论

本文通过长江口北岸崇启大桥接线工程现场试验监测, 研究了典型海陆交互相沉积土中 PHC 管桩复合地基随路堤填筑过程地基土孔压响应特性, 并对其影响因素进行了调查分析。得到如下结论:

(1) 长江口北岸海陆交互相沉积土地区气象与水文地质条件的独特性导致地下水位在一年中变化剧烈, 甚至可达 16 kPa, 进而影响到路堤填筑过程中地基土体的孔压响应特性。传统的超孔压分析方法不适用于该地区应用。

(2) 地表浅层地基土由于排水特性较好, 路堤填筑过程引起的超孔压消散迅速, 因此孔压响应基本上仅受地下水位上下波动引起的静水压力变化控制。深部地基土中的超孔压可根据孔压计实测读数减去浅层 3 m 深处孔压计读数以及两个深度的静水压力差获得。

(4) PHC 管桩复合地基内, 浅层土体渗透性好, 对路堤填筑过程反应灵敏, 超孔压呈锯齿状波动, 但总体趋于平缓。下部淤泥质黏土层渗透性差, 超孔压随路堤填筑过程有累积上升的趋势。

(5) PHC 管桩复合地基加固区桩间土超孔压较小, 且消散迅速; 加固区下卧层中超孔压较大, 且消散缓慢。因此, 下卧层软土固结问题是海陆交互相沉积土地区软基处理需关注的重点。

参考文献:

- [1] 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾海陆交互相沉积的磁性地层学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 9~15. (YAO Zheng-quan, GUO Zheng-tang, CHEN Yu-kun, et al. Magnetostratigraphy of marine-terrigenous facies deposits in Bohai bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(1): 9~15. (in Chinese))
- [2] 孙顺才. 长江三角洲全新世沉积特征[J]. 海洋学报, 1981, 3(1): 97~113. (SUN Shun-cai. Delta sediments of the changing delta and its characteristics[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1981, 3(1): 97~113. (in Chinese))
- [3] 乔纪纲, 黄镇国, 黄光庆. 珠江三角洲软土层 DTM 的初步研究[J]. 佛山科学技术学院学报, 2002, 20(4): 47~52. (QIAO Ji-gang, HUANG Zhen-guo, HUANG Guang-qing. The mollisol layers digital terrain model of the Pearl River delta[J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2002, 20(4): 47~52. (in Chinese))
- [4] 吴燕开, 刘松玉, 洪振舜. 苏北与长江三角洲沉积环境及其土体物理性质关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2005(2): 49~52. (WU Yan-kai, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun. Relation between physical properties and deposit environment of stratum in North of Jiangsu Pronvince and Changjiang River delta[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005(2): 49~52. (in Chinese))
- [5] 陈晓平. 海陆交互相沉积软土固结效应[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 520~528. (CHEN Xiao-ping. Consolidation effect of soft soil in interactive marine and terrestrial deposit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 520~528. (in Chinese))
- [6] 张宏, 柳艳华, 石名磊. 海陆交互相黏性土工程特性及微观结构特征[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(6): 47~52. (ZHANG Hong, LIU Yan-hua, SHI Ming-lei. Engineering properties and micro-structural characteristics of cohesive soil in the interactive marine & terrestrial deposit[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 31(6): 47~52. (in Chinese))
- [7] 苗永红, 陆建飞. 多样本动态聚类分析海陆交互相软土分层的 CPTU 试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(增刊 1): 91~95. (MIAO Yong-hong, LU Jian-fei. The dynamic cluster analysis based on the interactive marine and terrestrial deposit soil of CPTU tests[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(S1): 91~95. (in Chinese))
- [8] 刘志彬, 刘松玉, 周伯明, 等. 长江口海陆交互相沉积土成因及其空间特征[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 102~108. (LIU Zhi-bin, LIU Song-yu, ZHOU Bo-ming, et al. Geological genesis and spatial variability characteristic of the interactive marine and terrestrial deposit in Yangtze River Estuary[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 102~108. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)