

深厚软土区超长桩基压缩变形测试及分析

冷伍明^{1,2}, 陈琛¹, 徐方^{1,2†}, 杨奇^{1,2}, 聂如松^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程试验室, 湖南 长沙 410075)

摘要:提出了一种联合运用沉降计和应变计观测超长桩基桩身压缩变形及桩底土压缩变形的新技术,详细介绍了所涉及元器件的安装方法和施工工艺;实践表明该方法的监测深度可达地表以下100 m,有效完善了深厚软土区超长桩基沉降变形测试技术.基于实测数据和数值仿真,系统研究了上海地区超长桩基的压缩变形规律及特性.主要结论如下:1)桥梁施工过程中,桩基竖向压缩变形随其加载历史呈“阶梯”式增长变化;群桩基础工后沉降约为5.0 mm,小于相关规范规定的20 mm限值;桩基承台的微小变形易导致不同位置基桩的桩顶沉降和桩身轴力存在一定差异.2)桩底以下20~30 m范围内土体的总压缩变形量和单位厚度土层压缩量已很小,可初步判定上海地区高速铁路桥梁超长桩基的桩底土层压缩影响范围约为20 m.3)沉降计法测试所得桩身压缩变形的精度通常高于应变计法;对于超长桩基,桩身压缩变形占桩基总沉降的比例可达30%~40%,在计算桩基沉降时应予以考虑.4)桩身浅层范围内存在负摩阻力,距桩顶向下11 m处出现中性点,且中性点位置随桩基荷载增加有逐步上移的趋势.

关键词:超长桩基;深厚软土区;沉降;现场测试;数值仿真

中图分类号:TU473

文献标志码:A

Measurement and Analysis of Compression Deformation of a Super-long Pile Foundation in Deep Soft Deposit

LENG Wuming^{1,2}, CHEN Chen¹, XU Fang^{1,2†}, YANG Qi^{1,2}, NIE Rusong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: A new method combined with using single-point settlement gauges and strain gauges was developed to monitor the compression deformation of pile foundation, the compressions of pile shafts and soil layers beneath the pile bottom. The measurement depth of the new-developed method can reach more than 100 m below the ground surface, which effectively replenished the settlement monitoring technology of super-long pile foundations in the deep soft soil. The compression deformation behaviors were then systematically analyzed by field experimental and numerical methods. The main conclusions show that the vertical compression deformation of the pile foundation in-

* 收稿日期:2018-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51709284,51678572,51208518),National Natural Science Foundation of China(51709284,51678572,51208518);中南大学研究生科研创新项目(2017zzts159,2019zzts613),Postgraduate Scientific Innovation Project of Central South University(2017zzts159,2019zzts613)

作者简介:冷伍明(1964—),男,湖南益阳人,中南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail:fangxu@csu.edu.cn

creases in a ladder shape during the construction of the bridge, and the post-construction settlement is approximate to 5.0 mm, which is less than the normative limit (20 mm) of a related design code; small deformation of the pile foundation cap may lead to differences in the settlements and axial forces of piles at different positions; then, the total compression deformations as well as the unit compression of the subsoil layers within 20~30 m below the pile bottom are quite small, hence it can be preliminarily determined that the influencing thickness of the compressible layers below the bottom of super-long pile foundations of high-speed railways in this tested area is approximate to 20 m; moreover, the accuracy of pile compression measured by settlement gauges is generally higher than that measured from strain gauges, and the pile compression can take a proportion as large as 30%~40% of the total pile settlement for a super-long pile foundation, hence it should be considered in calculating the pile foundation settlement; in addition, negative friction resistance appears in the shallow depth, and there is a neutral plane at 11 m below the top of the pile; furthermore, the position of the neutral plane gradually moves up with the increase of the pile foundation loads.

Key words: super-long pile foundation; deep soft deposit; settlement; field test; numerical simulation

随着我国经济的快速增长和城市规模的不断扩大,大型桥梁和高层建筑在人口稠密的深厚软土地区迅速发展,这对建(构)筑物基础承载力和变形控制提出了更为严格的要求^[1-3]. 超长桩基以其优良的承载能力及良好的沉降(和不均匀沉降)控制性能,在深厚软土区得以广泛应用(如高速铁路桥梁桩基)^[4-5]. 然而,由于软土压缩性高、含水量大、强度低、透水性差和固结变形持续时间长等特点,使超长桩基础的沉降预测及控制成为深厚软土区建(构)筑物设计和建设中的关键点之一.

国内外学者在桩基沉降变形领域已开展多年研究,并取得丰硕成果. 目前,确定桩基沉降的手段主要分为经验法、理论分析法、数值计算法和现场测试. 经验法大多基于统计和分析现场监测或模型试验的相关数据,采用经验公式估算桩基沉降,往往带有地域性和经验性,适用范围有限^[6-7]. 理论计算法主要包括等代墩基法^[8-9]和弹性解析法^[10-11]. 等代墩基法是一种桩基沉降简化计算方法,通常假定桩基为刚性体,承台荷载以一定扩散角扩散至桩底,计算精度难以保证,且不适用于桩身存在较大压缩变形的超长桩基. 弹性解析法常基于桩土相互作用系数和叠加原理^[12-13],对计算的初始条件和边界条件进行一定简化. 由于实际工程中初始条件和边界条件较为复杂,弹性解析法的计算结果通常需要实测数据进行辅证. 随着计算机技术的快速发展,数值仿真逐渐成为一种有效的桩基沉降分析方法. 然而,由于土体自身本构方程的简化及本构参数选取的不确定性,使得数值计算值通常也需要现场实测值加以

验证.

不同于以上方法,现场测试可提供建(构)筑物基础沉降的第一手资料,直观反映其沉降特性,并为经验法、理论分析法和数值计算法提供校核依据. 现场测试方法主要包括水准测量^[14-15]、分层沉降板法^[16-17]、电磁沉降环法^[18-19]和多点沉降计法^[20-22]等. 水准测量主要用于观测基础表面沉降,无法获得桩身压缩变形和桩底土层压缩变形等关键数据. 分层沉降板法需要逐层埋设沉降板,沉降板在施工中易遭受施工碰撞而发生偏移,影响测试结果精度,且多用于浅基础沉降观测,对于桩基沉降测试适用性不强. 电磁沉降环法和多点沉降计均可测试桩基沉降,但二者都需要钻孔安装,对桩周土扰动大,易导致桩体侧摩阻力降低;另外,钻孔较深时,容易塌孔,致使连接杆弯曲破坏而造成元件失效或观测精度降低. 综上,现有的沉降测试法受到元件埋设和测试精度等多方面影响,对深层土体压缩变形的监测深度和精度有限. 然而,深厚软土区的大型桥梁或高层建筑桩基础往往可达 70 m,桩底以下土层压缩变形的测试成为一个棘手的问题. 因此,开展软土地区超长桩基沉降变形监测方法研究,获得一种安装扰动小、测试精确高且能同时观测超长桩基竖向压缩变形、桩身压缩变形和桩底深层土体压缩变形量的监测方法,具有重要的工程应用价值.

本文以京沪高速铁路典型试验段为背景,提出一种联合运用沉降计和应变计观测超长桩基沉降的新方法,详细介绍了该方法所涉及元器件的安装方法和施工工艺,并开展了深厚软土区超长桩基压缩

变形测试研究. 实践表明该方法的监测深度可达地表以下 100 m, 有效完善了深厚软土区超长桩基沉降变形测试技术. 最后, 基于测试数据和有限元仿真结果, 详细分析了超长桩基的竖向压缩变形、桩身压缩变形和桩底以下土层压缩变形特性, 揭示了桩底以下土层压缩变形随荷载、时间和土层深度的变化规律.

1 工程背景

1.1 工程概况

试验工点位于上海市闵行区华漕镇, 试验桥段为京沪高速铁路正线蕴藻浜特大桥 5~7 号桥墩, 里程为 DK1300+306.530~DK1300+241.130. 5~7 号桥墩分别与沪宁城际动车进段线特大桥的 32~30 号桥墩共基础, 具体结构见图 1(a). 各桥墩桩基础布置形式相同, 以 6 号桥墩为例, 群桩基础包含 21 根单桩, 桩径为 1.0 m, 桩长为 73 m, 单桩竖向容许承载力设计值为 4 533 kN, 承台尺寸为 23.1 m×8.5 m×2 m, 桩基平面布置见图 1(b). 桩底持力层为 9(1)粉砂夹粉土层, 桩基立面图见图 1(c).

1.2 地层条件

试验工点所处地域为滨海平原区, 地势低平, 湖沼洼塘密布, 地表水系发育. 试验区域内地层为第四系松散堆积层, 总厚度超过 100 m, 以第四系全新统及上更新统海积、冲海积黏性土、粉性土及砂类土为主, 具体土层参数见表 1.

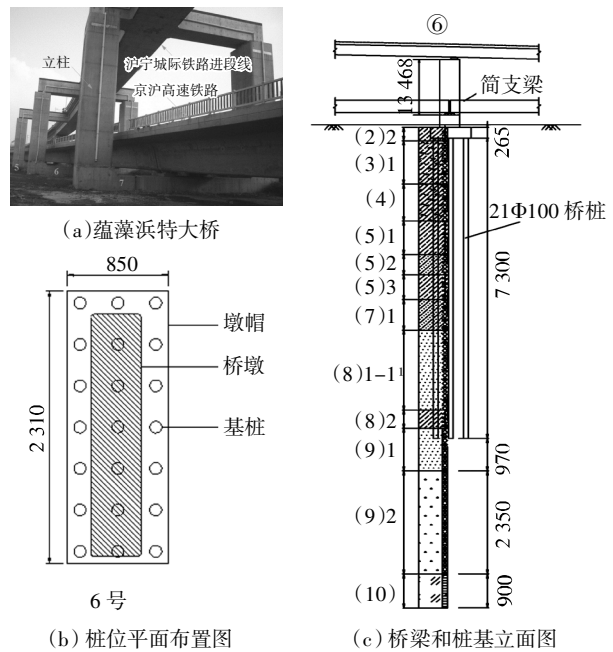


图 1 蕴藻浜特大桥 6 号墩桩基础概况(单位: cm)
Fig.1 General information of pile foundation of pier No.6 of the Wen-Zao-Bang Bridge (unit: cm)

2 桩基沉降监测方法

桩基沉降测试内容主要包括: 桩基竖向压缩变形量 S 、桩身压缩变形量 S_p 和桩底以下 H 深度范围内土层压缩变形量 S_c ; 桩基竖向压缩变形 S 为桩身压缩变形量 S_p 与桩底以下 H 深度范围内土层压缩变形量 S_c 之和^[3]. 其中, 竖向压缩变形 S 可通过在距离桩底 H 深度处埋设沉降计观测获得, 桩身压缩变形量 S_p 可通过桩身安装的应变计或沉降计观测获得, 而桩底 H 深度范围内土层的压缩量 S_c 可表示为:

表 1 土层的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the subsoil layers

地层编号	名称	厚度 h/m	直剪内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-2})$	变形模量 E_s/MPa	压缩指数 C_c	初始孔隙比 e_0
(2)2	粉质黏土	1.7	11.09	21.92	18.8	2.8	0.222	0.85
(3)1	淤泥质粉质黏土	8.0	6.06	8.65	17.7	2.1	0.131	1.11
(4)	淤泥质黏土	11.5	4.81	11.6	17.3	2.8	0.240	1.22
(5)1	粉质黏土	8.2	8.42	11.94	17.4	3.9	0.266	1.19
(5)2	粉土、粉砂	4.8	20.7	15	17.3	12.0	0.109	1.22
(5)3	粉质黏土	6.2	6.36	8.93	17.9	6.0	0.235	1.06
(7)1	粉土	7.4	14.5	4.75	18.1	42.0	0.039	1.01
(8)1-1	粉砂夹粉土	19.3	16.5	—	18.45	57.6	0.036	0.91
(8)2	粉质黏土、粉土	4.4	6.8	9.11	19.1	32.4	0.073	0.79
(9)1	粉砂夹粉土、粉质黏土	12.3	15.24	10.0	19.3	73.2	0.036	0.75
(9)2	粉砂夹中、粗砂	23.5	35	0	20.2	92.4	0.033	0.60
(10)	黏土	9.0	30	14.5	19.5	55	0.072	0.72

$$S_c = S - S_e \quad (1)$$

具体监测时,桩身压缩变形采用沉降计与应变计同步观测,两种方法相互校核;桩底以下土层压缩变形采用沉降计监测.以6号桥墩为例,选取P₁~P₄号桩为监测对象,具体桩位见图2(a).其中,P₂号桩底部和桩身分别埋设沉降计和应变计测试桩身压缩量S_c,P₁、P₃和P₄桩处分别于桩底以下30m、20m和5m深度处埋设沉降计测试变形量,如图2(b)所示.

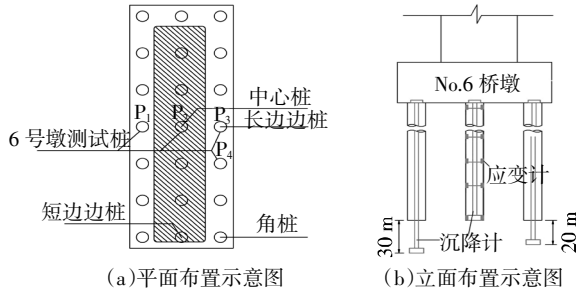


图2 6号墩桩基沉降测试元件布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the test piles and positions of the installed settlement gauges of pier No.6

3 传感器埋设与安装

3.1 传感器

试验所用单点沉降计是一款基于电磁通调频原理设计的智能位移传感器.桩身压缩变形S_c和桩基竖向压缩变形S可分别通过观测锚固于桩底和桩底以下H深度处的沉降计的电磁线圈和导磁体(塞杆)的相对位置变化(即电信号位移传感器)获得,如图2(b)和图3(a)所示.

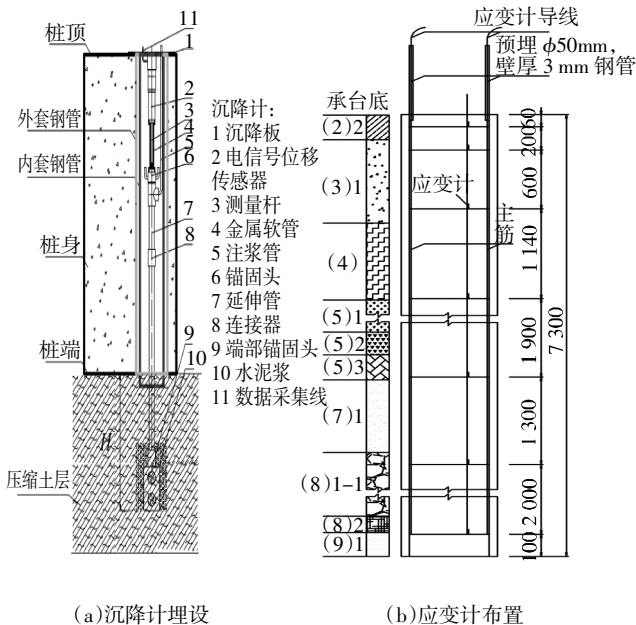


图3 传感器埋设示意图

Fig.3 Schematic diagram of an installed single-point settlement gauge

试验所用应变计是智能弦式数码应变传感器,应变计布设位置如图3(b)所示.应变计通过测量桩身不同截面处的应变值,并结合其埋设间距l_i按式(2)计算桩身的压缩变形量S_c.

$$S_c = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n l_i (\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i) / 2 \quad (2)$$

式中:S_i为第i段桩身的压缩变形量;i和i+1分别为桩身第i和i+1个截面处的应变测试值.单点沉降计和应变计的具体技术指标见表2.

表2 沉降计、应变计技术指标
Tab.2 Technical indicators of the settlement gauge and strain gauge

传感器名称	产品型号	量程/ (mm·μ ε ⁻¹)	测试精度/ (mm·μ ε ⁻¹)	测量误差/ (mm·μ ε ⁻¹)
沉降计	JMDL-4720A	200	0.01	0.5%FS
应变计	JMZX-215AT	1500	1	0.25%FS

3.2 埋设与安装工艺

本文所提出的超长桩基沉降测试方法可同时测量桩基沉降、桩身压缩变形和桩底以下土层压缩变形;其中,桩底以下沉降计的安装和埋设质量决定测试结果的准确性.沉降计的安装主要分以下五步完成:1)外套钢管安装;2)破桩截管与桩底钻孔;3)内套管制作与安装;4)连接钢管的制作与安装;5)沉降计安装与埋设.相关安装环节如图4所示.

具体安装工艺如下:



图4 桩底沉降计埋设过程
Fig.4 Installation procedures of settlement gauges below the pile bottom

1)外套钢管安装:将外套钢管焊接在钢筋笼内,

调整其铅直度,一并下放至桩位孔,相邻阶段外套钢管通过连接套筒连接焊固,随钢筋笼下放至设计高度,最后完成混凝土桩浇筑.第一节与最后一节钢管分别在底部、顶部焊封钢板,防止混凝土浇筑贯入套管内.采用外套钢管在桩身内预留孔位,引导钻头至桩底,可有效避免深长钻孔中的孔壁坍塌问题.

2)破桩截管与桩底钻孔:基桩浇筑完成后,破桩并于桩基承台底面设计标高处截断外套钢管;将钻头沿外套钢管放入桩底,并钻孔至沉降计预设埋置深度.

3)内套管制作与安装:内套钢管起约束连接钢管横向变形、提高沉降测试精度的作用.安装时,起吊内套钢管下放至一定深度处,并用夹具固定以防止其坠入预留孔中;相邻内套钢管采用连接套筒连接,直至内套钢管底部达设计深度.

4)连接钢管的制作与安装:连接钢管起延长沉降计测杆的作用.安装时,起吊连接钢管下放至一定高度处,以夹具固定;相邻节段连接钢管通过螺纹连接套筒连接,往复循环直至孔底.

5)沉降计安装:连接钢管下放至孔底后,起吊连接钢管 1.5 m,以夹具固定;截除顶部 1.23 m,该长度为沉降计原始长度(1.13 m)和沉降计量程的一半(0.1 m)之和;连接钢管与沉降计通过螺纹套筒连接后,下放至孔底;提拉沉降计蛇纹管,调整初始读数以确保读数在沉降计量程的 50%~75%范围;安装沉降计法兰盘,并用水泥砂浆固定.

4 有限元模拟

基于 Plaxis 3D 软件平台,建立群桩基础三维有限元模型,并结合实测数据分析京沪高速铁路正线蕴藻浜特大桥 6 号桥墩沉降变形特性.

4.1 几何模型

6 号桥墩桩基础由 21 根桩径为 1 m 的钻孔灌注桩组成,桩长为 73 m,布桩形式如图 2(a)所示.根据桥桩布设形式和对称性,选取 1/4 群桩基础进行有限元建模.有限元模型的长、宽、高尺寸分别为 80.0 m、16.35 m 和 116.4 m,其中 16.35 m 为各群桩基础中心间距的一半,116.4 m 为土层(10)的底部深度.模型的前、后、左、右四个面设置水平位移约束,底部设置水平和竖向位移约束.土层(10)之下为可透水砂层,故模型底部设置为排水边界,其余各边界为不排水边界.有限元模型采用带有超孔隙水压自由度的十节点四面体单元进行离散,模型网格如图 5 所示.

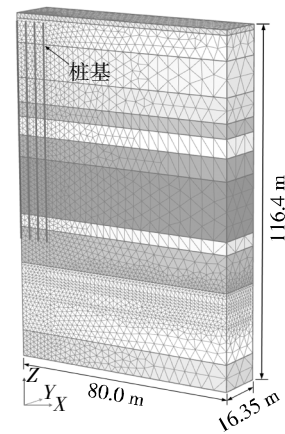


图 5 Plaxis 3D 有限元模型

Fig.5 Finite element mesh of the Plaxis 3D model

4.2 模型参数

土层本构关系采用 Plaxis 3D 内嵌的土体硬化(HS)模型模拟.该模型采用双曲线描述土体的轴向应变-偏应力关系,并基于相关联流动法则,引入塑性屈服面模拟土体的弹塑性变形特性.HS 模型中涉及的土体基本参数包括:黏聚力 c' 、摩擦角 φ' 、压缩指数 C_c 、膨胀指数 C_s 、初始孔隙比 e_0 和反映土体刚度-应力相关性的参数 m .各土层基本参数见表 1;其中, E_s 为与土体初始应力状态相对应的压缩模量,可通过静力触探试验(CPT)或标准贯入试验(SPT)确定^[14];压缩指数 C_c 则根据式(3)反算得到.

$$C_c = \frac{(1 + e_0)\sigma_v' \ln(10)}{E_s} \quad (3)$$

式中: σ_v' 为竖向有效应力.超固结状态下, C_c 由 C_s 代替;此外,各土层的 C_s 值取为 C_c 的 1/10^[24-25].各土层的初始透水系数根据《上海岩土工程勘察规范》^[26] 推荐值确定.

有限元模型中基桩采用带有接触面的梁单元构建,以模拟桩土之间的相互作用;具体建模时需要输入的接触面模型参数为单位长度基桩可提供的最大侧摩阻力 T_{\max} .假定接触面抗剪强度与桩周土体一致,则 $T_{\max} = \pi d \tau_s$,式中: d 为桩径, τ_s 为桩侧土体抗剪强度,可根据莫尔库伦破坏准则计算.将基桩和承台视为弹性体,其杨氏模量和泊松比分别取 3×10^7 kPa 和 0.18.桩基上部结构(桥墩、立柱、梁等)的自重等效为作用于桩基承台上的分布荷载;承台顶面的加载历史按各施工阶段的实际荷载和施工时间确定,桩基具体受荷过程分为以下 5 个加载步:①墩身浇筑,②立柱浇筑,③沪宁城际线连续梁浇筑,④京沪线简支梁浇筑和沪宁城际线铺轨,⑤京沪线铺轨完成.各加载步完成后均伴随有一定的加载间歇期(此时荷载保持不变),对应于各施工阶段后的混凝

土养护期、相关建材的进出场时间和后续施工准备期等.有限元仿真分析全过程均考虑土体的固结效应,以模拟桩基的沉降过程(即沉降时间曲线).桩基础受荷历史可等效为图6所示的阶梯型加载过程.

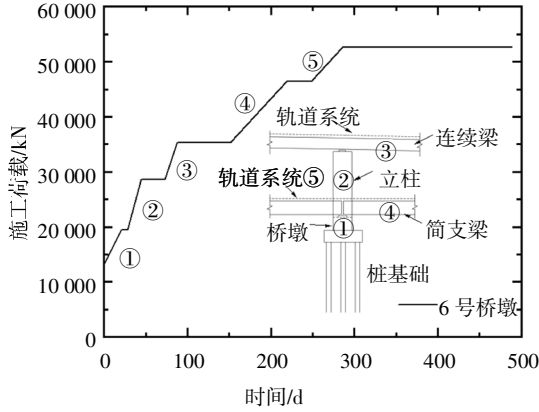


图6 桩基上部加载过程

Fig.6 Loading process of the pile foundation

5 现场测试与计算结果分析

5.1 压缩变形量/沉降-时间关系

6号桥墩桩基竖向压缩变形量 S (桩身压缩量 S_p 及桩底以下30m土层压缩变形量 S_s 之和)的实测值和有限元仿真值随时间变化关系曲线如图7所示.由图7可知,桩基竖向压缩变形量 S 随桩基受荷历史呈“阶梯”式增长变化;京沪高速铁路修建完成后,桩基压缩变形速率逐渐减小并最终趋于稳定.压缩变形量 S 的有限元计算结果与实测值吻合良好,验证了数值仿真的正确性;同时,数值结果表明6号桥墩桩基础的总沉降 S_t (含桩底30m以下土层的变形)在京沪高速铁路修建完成后的30年内由12.3mm增加至了17.3mm,即产生了约5.0mm的工后沉降,小于《高速铁路设计规范》^[2]规定的20mm限值.

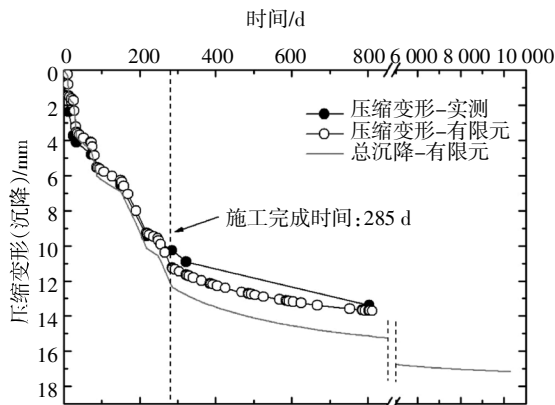


图7 桩基压缩变形(沉降)-时间关系曲线

Fig.7 Compression deformation (settlement)-time curves of the pile foundation

图8所示为数值仿真所得不同位置桩顶压缩变形随时间变化关系曲线.由图8可知,各桩压缩变形规律趋同,但不同位置桩的桩顶压缩变形存在一定的差异,具体大小关系为中心桩>长边边桩>短边边桩>角桩.造成这种差异的主要原因在于:承台虽具备足够的刚度以抵抗弯曲变形,但仍非严格意义上的刚体,实际工程中亦会产生微小弯曲变形,从而导致其他位置处基桩的桩顶压缩变形小于中心桩压缩变形.

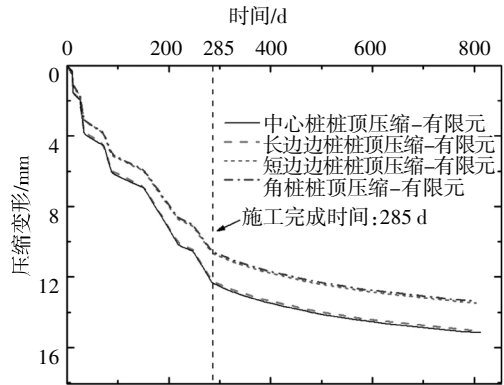


图8 不同位置桩顶压缩变形-时间关系曲线

Fig.8 Compression deformation-time curves at the top of piles in different positions

5.2 桩底以下土的压缩变形

根据式(1),由现场监测获得的桩基竖向压缩变形量 S 和桩身压缩变形量 S_p 可获得桩底以下 H 深度范围内土层的压缩量 S_s .通过本文所提沉降测试方法,成功监测得到地表以下100m深度内土层压缩变形情况.图9为桩底以下土层压缩变形量随土层厚度变化的关系曲线;可见桩底以下土层压缩变形量随土层厚度增加而增大,其中0~5m厚度内压缩变形量增长较快,而20~30m厚度内土层的压缩变形量已很小.此外,桩底土压缩变形量仿真计算值与实测值基本一致,说明有限元模型对桩底土压缩变形量的计算也较为准确.

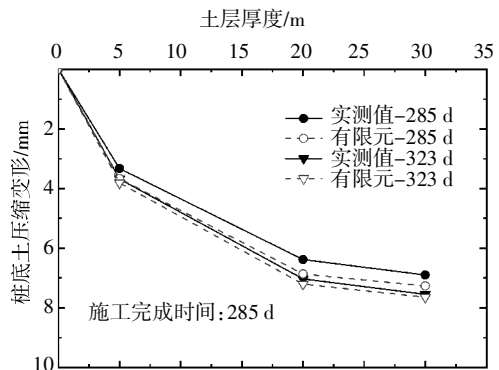


图9 桩底土层压缩变形量-土层厚度关系曲线

Fig.9 Compression deformation-depth curves of subsoil layers below the pile bottom

图 10 所示为桩底以下单位厚度土层压缩量随土层深度变化的关系曲线. 由图可知,单位厚度土层压缩变形量随土体埋深的增加逐渐减小,且当深度增加至 20 m 时,单位厚度土层压缩量已减小至一较小值. 结合图 9 和图 10 可初步判断上海地区高速铁路超长桩基的桩底土层压缩影响范围约为 20 m.

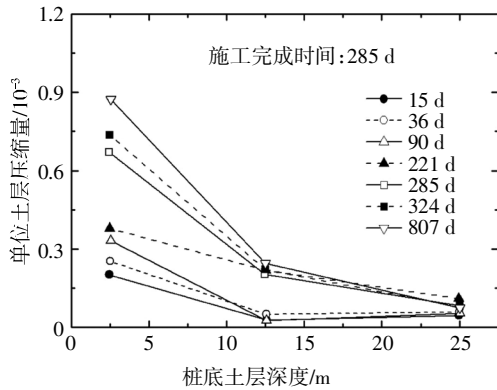


图 10 桩底单位厚度土层压缩量-土层深度关系曲线
Fig.10 Unit compression deformation-depth curves of the soil layers below the pile bottom

5.3 桩身压缩变形

沉降计和应变计分别测得 6 号桥墩中心桩桩身压缩变形随时间变化的关系曲线,如表 3 和图 11 所示.

表 3 桩身压缩变形

Tab.3 Compression deformation of pile shaft

工况编号	时间 /d	桩顶轴力 /kN	桩基压缩变形 S/mm	应变计实测值 /mm	沉降计实测值 /mm	差值 /mm	压缩变形比
1	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0
2	15	607	2.39	1.09	0.69	-0.4	0.289
3	32	1 072	4.12	1.84	1.73	-0.11	0.420
4	89	1 601	5.55	2.94	2.78	-0.16	0.501
5	221	2 123	9.45	4.37	3.48	-0.89	0.368
6	285	2 272	10.26	4.7	3.66	-1.04	0.357
7	324	2 349	10.91	4.86	3.96	-0.9	0.363

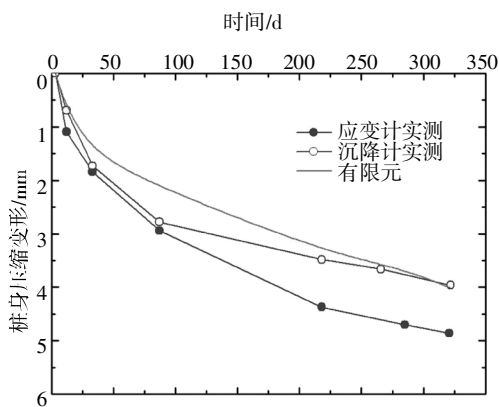


图 11 桩身压缩变形量-时间关系曲线

Fig.11 Compression deformation-time curves of the pile shaft

由表 3 和图 11 可知,沉降计和应变计测试结果变化规律一致,平均差值仅为 0.58 mm,二者互为验证,论证了测试系统的可靠性和有效性,但二者结果仍存在偏差,应变计为非直接测量法,测试过程中需根据应变计测试值和应变计设置间距估算基桩的压缩变形量;另外,安装时,在基桩各测试断面只布置了一个应变计,当基桩发生弯曲变形时,难以准确反映测试断面的平均变形量,致使应变计测试所得基桩压缩变形量往往存在一定偏差.因此,在测试基桩压缩变形量时,推荐使用沉降计法.若使用应变计法,亦应适当减小基桩各测试断面的布置间距,同时在各测试断面至少布置 2~3 个应变计,以提高测试精度.

有限元计算结果与沉降计实测值基本一致,但也存在一定误差.可能的原因有:软土沉积及应力诱导产生的固有各向异性与土体本构模型和桩土接触面模型所描述的横观各向同性土体刚度行为存在差别,造成模型土体参数与实际土层存在一定差异^[27];此外,有限元模型中根据中心桩处土层厚度,将原本高低(即厚度)起伏的地层简化为表面水平的等厚土层.以上因素共同作用,会导致有限元计算结果存在一定误差.

图 12 所示为桩身压缩变形量、桩身压缩变形比(S_e/S)、桩身压缩沉降比(S_e/S_s)随桩顶轴力的变化关系曲线.可见,桩身压缩变形量随桩顶轴力的增大而近似线性增加.沉降计监测结果表明京沪高速铁路施工完成后 6 号墩桩基础竖向压缩变形量 S 为 10.91 mm,此时桩身压缩变形量 S_e 为 3.96 mm,桩身压缩变形比为 36.3%,且在施工过程中,其最大值达到 50.1%.有限元结果表明施工阶段桩身压缩沉降比在 30%~40%范围内.由此可见,深厚软土区超长桩基的桩身压缩量占桩基总沉降的比例较大,计算桩基沉降时应予以考虑.

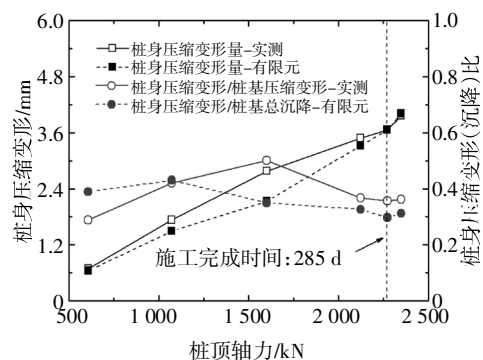


图 12 桩身压缩变形量、桩身压缩变形(沉降)比-桩顶轴力关系曲线

Fig.12 Compression deformation and compression deformation (settlement) ratio-pile top axial force curves

5.4 桩身轴力和侧摩阻力

有限元仿真所得6号墩中心桩不同施工阶段桩身轴力-深度关系曲线和施工结束后不同位置桩桩身轴力-深度关系曲线,分别如图13和图14所示.

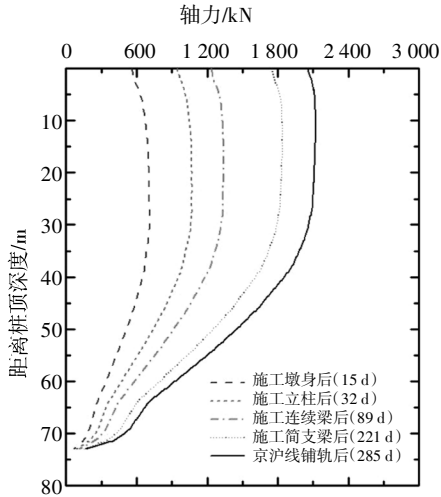


图13 不同施工阶段中心桩桩身轴力

Fig.13 Axial fore of the central pile at different construction step

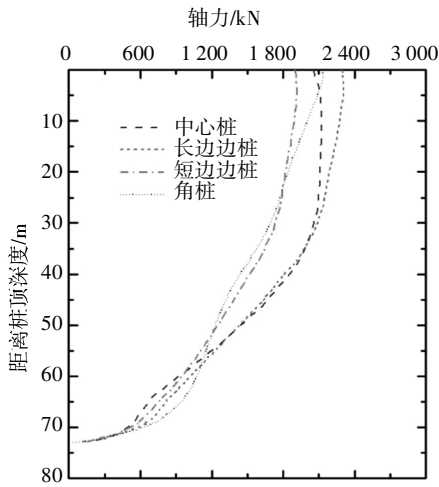


图14 不同位置桩桩身轴力

Fig.14 Axial fore of piles at different positions

由图13可知,中心桩桩身轴力随深度的增加先增大后减小,说明浅层深度桩身存在负摩阻力.当桩顶荷载较小时,近桩底端桩身轴力随深度的衰减速率较小;但随桩顶荷载的增大,桩身轴力的衰减速率逐渐增加,表明桩侧摩阻力随桩基受荷的增加而逐步发挥效用.由图14可知,不同位置桩桩身轴力随深度的变化趋势基本相同,且各桩桩端阻力皆较小,端阻占基桩受荷的比例小于10%;整体而言,中心桩和长边边桩的轴力比角桩和短边边桩大,但四者的差值不大,波动幅度在10%左右.实际上,不同位置

桩的差异沉降与内力分配均受到承台刚度的控制^[28].

图15所示为数值仿真所得中心桩不同阶段侧摩阻力-深度关系曲线.由图可知,中心桩在承台以下约10m范围内存在负摩阻力,且不同施工阶段,负摩阻力的数值变化不大,但中性点之下的正摩阻力随荷载的增加而增大.桩侧产生负摩阻力的主要原因是:桩基承台受载将大部分荷载传递给基桩的同时挤压桩间土,并在承台底面以下一定深度范围内引起超孔隙水压,随着超孔隙水压消散,桩间土产生固结变形,当桩间土固结下沉量大于桩身下沉量时,桩侧土对桩身产生一个与桩基沉降方向相同的下拽力,即在桩侧引起负摩阻力.此外,基桩受荷过程中,距桩顶约11m处出现侧摩阻力为0的中性点,且该中性点位置随荷载增加有逐渐上移的趋势.目前,我国《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)^[29]相关条文认为桩身中性点的位置主要由桩端土层条件确定,且在不考虑桩基具体受荷的前提下,中性点只有一个.但实际上,在不同土层条件和桩顶荷载作用下,桩身的中性点并非一成不变,其位置应由桩土的具体相对位置关系决定.对于超长桩基,桩身正负摩阻力的变化存在时间效应;土体的固结变形、桩身压缩变形及桩端沉降会引起桩土相对位置的变化,并造成中性点逐步上移;最终,桩土相互作用随负、正侧摩阻力的消长达到稳定平衡状态,基桩中性点亦趋于稳定.

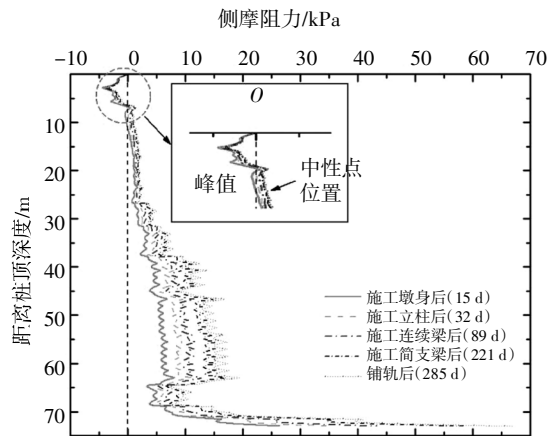


图15 中心桩不同阶段桩身侧摩阻力

Fig.15 Friction resistance of the central pile at different construction step

5.5 桩身位移

京沪高速铁路铺轨完成后,有限元计算所得不同位置桩桩身水平位移-深度关系曲线如图16所示.由图16可知:1)上部位置处,各位置桩水平位移

朝向群桩中心,而在靠近桩底处则逐步过渡至背离群桩中心;2)中心桩基本不产生水平位移,其余各位置桩的水平位移在近桩顶处最大,并沿桩身向下逐渐减小;3)各位置桩最大水平位移小于 4 mm,说明群桩基础具备足够的水平向刚度。

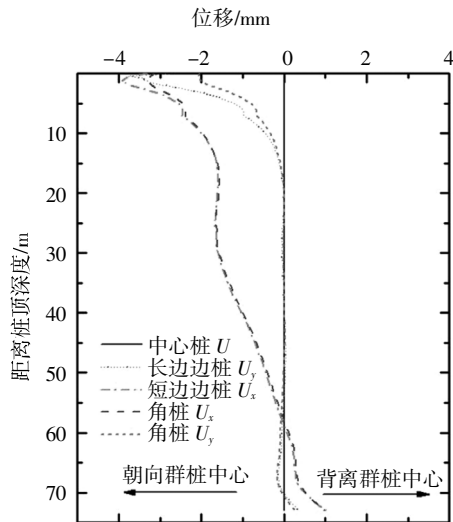


图 16 不同位置桩桩身水平位移

Fig.16 Lateral displacement of piles at different positions

6 结论

本文以京沪高速铁路桥梁桩基典型试验段为背景,提出一种联合运用沉降计和应变计观测超长桩基压缩变形、桩身压缩变形及桩底土压缩变形的新技术,并详细介绍了所涉及元器件的安装方法和施工工艺,有效完善了深厚软土区超长桩基沉降变形测试技术.基于实测数据和数值仿真,具体分析了深厚软土区超长桩基的压缩变形特性.所得主要结论如下:

1)桥梁施工过程中,桩基竖向压缩变形量随其受载历史呈“阶梯”式增长变化;桥梁施工完成后,桩基压缩变形速率逐步减小并最终趋于稳定;桩基工后沉降约为 5.0 mm,小于《高速铁路设计规范》规定的 20 mm 限值.桩基承台的微小弯曲变形易导致不同位置基桩的桩顶压缩变形和桩身轴力存在一定的差异.

2)桩底以下 20~30 m 范围内土体的压缩变形量(或单位厚度土层压缩量)已很小,可初步判定上海地区高速铁路超长桩基的桩底土层压缩影响范围约为 20 m.

3)应变计法测试基桩压缩变形受测试断面布置间距、应变计布设数量和基桩弯曲变形的影响较大;

实际工程中,推荐使用沉降计法测试基桩压缩变形.对于超长桩基,桩身压缩量占桩基总沉降的比例较大,可达 30%~40%,计算桩基沉降时应予以考虑.

4)基桩顶部浅层范围存在负摩阻力;桩基受荷过程中,距桩顶约 11 m 处出现中性点,且其位置随荷载的增加及桩土相对位置的变化逐步上移.

参考文献

- [1] 冷伍明,杨奇,聂如松,等.高速铁路桥梁桩基工后沉降组合预测研究[J].岩土力学,2011,32(11):3341—3348
LENG W M, YANG Q, NIE R S, *et al.* Study of post-construction settlement combination forecast method of high-speed railway bridge pile foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32 (11): 3341—3348. (In Chinese)
- [2] TB 10621—2014 高速铁路设计规范 [S].北京:中国铁道出版社,2014:71—72.
TB 10621—2014 Code for design of high speed railway [S]. Beijing: China Railway Press, 2004: 71—72. (In Chinese)
- [3] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011:43—44.
GB 50007—2011 Code for design of building foundation [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011: 43—44. (In Chinese)
- [4] 律文田,王永和,冷伍明.预制静压桩静动荷载现场试验分析[J].岩土力学,2005,26(2):251—255.
LÜ W T, WANG Y H, LENG W M, *et al.* Analysis of in-situ static and dynamic load tests for precast static pressure pile [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26 (2): 251—255. (In Chinese)
- [5] 陈福江,马建林,朱林,等.考虑压缩模量深度效应的深厚软土桩基沉降计算[J].岩土力学,2012,33(2):167—172.
CHEN F J, MA J L, ZHU L, *et al.* Settlement calculation of pile foundation in deep-soft soil considering depth effect of compression modulus [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (2): 167—172. (In Chinese)
- [6] BUTTERFIELD R, BANERJEE P K. The elastic analysis of compressible piles and pile Group [J]. *Géotechnique*, 1971, 21 (1): 43—60.
- [7] GUO W D. Vertically loaded single piles in Gibson soil [J]. *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ACSE*, 2000, 126 (6): 189—193.
- [8] 董建国,董知真,袁聚云.高层建筑桩箱(筏)基础沉降计算方法[J].岩土工程学报,2013,10(35):1095—1098.
DONG J G, DONG Z Z, YUAN J Y. Settlement calculation method for piled box (raft) foundations of high building [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 10 (35): 1095—1098. (In Chinese)
- [9] 高强,杨龙才,王炳龙.混合法在确定刚性承台群桩基础最终沉降量中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(S1):4586—4589.
GAO Q, YANG L C, WANG B L. Application of mixed method in

- calculating final settlement of rigid pile-group foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4586—4589. (In Chinese)
- [10] BOOKER J R, POULOS H G. Analysis of creep settlement of pile foundation [J]. Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics, ASCE, 1976, 13(5): 1—14.
- [10] 谢新宇, 王忠瑾, 王金昌, 等. 考虑桩土非线性的超长桩沉降计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4665—4671.
XIE X Y, WANG Z J, WANG J C, *et al.* Calculation method for settlement of super-long pile considering nonlinearity of pile and soils [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(11): 4665—4671. (In Chinese)
- [12] 杨明辉, 张小威, 赵明华. 考虑桩土滑移的超长桩沉降非线性算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(9): 18—22.
YANG M H, ZHANG X W, ZHAO M H. Nonlinear analysis of settlement of long pile considering relative slide between pile and soil [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(9): 18—22. (In Chinese)
- [13] 陈仁朋, 凌道盛, 陈云敏. 群桩基础沉降计算中的几个问题[J]. 土木工程学报, 2003, 36(9): 89—84.
CHEN R P, LING D S, CHEN Y M. Some problems in the calculation for settlement of pile-group foundation [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(9): 89—84. (In Chinese)
- [14] 史佩栋, 高大钊, 桂业琨, 等. 桩基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 887—889.
SHI P D, GAO D Z, GUI Y K, *et al.* Pile foundation engineering manual [M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 887—889. (In Chinese)
- [15] 周红波, 陈竹昌. 上海软土地区打入桩基长期沉降性状研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1856—1860.
ZHOU H B, CHEN Z C. Study on long-term settlement behavior of driven pile foundation in Shanghai soft area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1856—1860. (In Chinese)
- [16] 冯研, 马冰. 深厚黏土中分层沉降仪减沉安装试验研究[J]. 工程勘察, 2017(2): 15—18.
FENG Y, MA B. Study on subsidence-reducing method for layered settlement apparatus in deep layered clay [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(2): 15—18. (In Chinese)
- [17] 闫宏业, 蔡德钧, 姚建平. 装配式分层沉降观测装置在路基沉降观测中的应用[J]. 铁道建筑, 2008, 83(6): 83—85.
YAN H Y, CAI D G, YAO J P. Application of assembled layered settlement observation device in the observation of subgrade settlement [J]. Railway Engineering, 2008, 83(6): 83—85. (In Chinese)
- [18] SHENTU N Y, ZHANG H J, LI Q, *et al.* Research on an electromagnetic induction-based deep displacement sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(6): 1504—1515.
- [19] 申屠南瑛. 地下位移测量方法及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学控制科学与工程学院, 2013: 27—28.
SHENTU N Y. Research on methods and theories for measuring underground displacement [J]. Hangzhou: College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, 2013: 27—28. (In Chinese)
- [20] 黄秋香, 汪家林, 邓建辉. 基于多点位移计监测成果的坡体变形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 38(5): 2667—2673.
HUANG Q X, WANG J L, DENG J H. Slope deformation character analysis based on monitoring results of multiple multi-point borehole extensometer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 38(5): 2667—2673. (In Chinese)
- [21] 李伟, 张帆. 毛里求斯巴泰勒大坝多点位移计在坝基沉降监测中的应用[J]. 四川水力发电, 2016, 35(3): 44—45.
LI W, ZHANG F. Application of multi point displacement meter in Mauritius dam to dam foundation settlement monitoring [J]. Sichuan Water Power, 2016, 35(3): 44—45. (In Chinese)
- [22] 张乾兵, 朱维申, 李勇, 等. 洞群模型试验中微型多点位移计的设计及应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 623—628.
ZHANG Q B, ZHU W S, LI Y, *et al.* Design of mini multipoint extensometer in geomechanical model test of cavern group and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 623—628. (In Chinese)
- [23] 秋仁东, 刘金砺, 高文生, 等. 群桩基础沉降计算中的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 15—23.
QIU R D, LIU J L, GAO W S, *et al.* Some problems on settlement calculation of pile group foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 15—23. (In Chinese)
- [24] HEO Y, BAE W. A statistical evaluation of consolidation properties of marine clay in South Korea [J]. Mar Georesour Geotechnol, 2013, 31(3): 209—224.
- [25] 梁发云, 赵鸣一, 陈尚荣. 软土地区深大基坑双环形支撑体系受力变形特性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S0): 173—177.
LIANG F Y, ZHAO M Y, CHEN S R. Analysis on bearing and deforming behavior of a large-scale double annular arched girders structural system in deep excavation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(S0): 173—177. (In Chinese)
- [26] DGJ08-37-2012, J12034-2012 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 28.
DGJ08-37-2012, J12034-2012 Code for investigation of geotechnical engineering [J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 28. (In Chinese)
- [27] JAMIOLKOWSKI M, LANCELLOTTA R, LO PRESTI D C F. Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays [C]// Proceedings of the International Symposium on the Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials. Washington, D C: Transportation Research Board, 1995: 817—836.
- [28] 夏力农, 苗云东, 谈铁强. 带承台群桩负摩阻力性状的三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 887—898.
XIA L N, MIAO Y D, TAN T Q. Three-dimensional finite element analysis of negative skin friction behaviors in pile groups with cap [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 887—898. (In Chinese)
- [29] JGJ94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 192.
JGJ94-2008 Technical code for Building pile foundation [J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 192. (In Chinese)