

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.012

支桩沉降的非线性组合算法*

陈 新^{1,2}, 李光范¹, 丁庆磊³, 邓方圆³, 张仰福⁴, 符羽佳¹

(1. 海南大学土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 3. 海南鲁鄂基础工程有限公司, 海南 海口 570228; 4. 海口经济学院, 海南 海口 570228)

摘要: 提出一种适用于支桩沉降分析的非线性组合算法。基于荷载传递法, 对桩侧摩阻力计算采用三折线模型, 对桩端阻力采用双曲线模型, 提出符合支桩结构力学构造的支端阻力与位移的非线性表达。为验证支桩沉降的组合计算方式, 建立了模型试验, 试验数据与计算数据较为吻合, 具有较好的适用性及操作性。

关键词: 桩基础; 多支桩; 沉降; 荷载传递法

中图分类号: TU473.1^{†1} **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0086-06

A Simplified Nonlinear Settlement Method for Multi-branch Pile

CHEN Xin^{1,2}, LI Guangfan¹, DING Qinglei³, DENG Fangyuan³,
ZHANG Yangfu⁴, FU Yujia¹

(1. Hainan University Department of Civil Engineering, Haikou 570228, China;
2. Shandong University, Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Jinan 250061, China;
3. Hainan Luyun Limited Company, Haikou 570228, China;
4. Haikou College of Economics, Haikou 570228, China)

Abstract: A nonlinear combination algorithm for settlement analysis of pile is proposed. Based on the load transfer method and the characteristics of pile lateral friction, the load transfer function of the three-fold line model is adopted. At the same time, according to the characteristics of pile tip resistance and branch end resistance, using the load transfer function of the hyperbolic model, the nonlinear expression of branch end resistance and displacement in conformity with the mechanical structure of the branch structure is proposed. It has good applicability and operability to set up the combined calculation method of pile settlement.

Keywords: pile foundation; multi-branch pile; settlement; load transfer method

引 言

推挤式支桩(以下简称支桩)是一种借鉴仿生学中固土植被根系力学特点的新型变截面桩,利用

油压推挤装置产生外伸的支桩空间,再灌注混凝土形成支桩结构,从而提高竖向承载力、减小沉降。支桩作为力学构造较独特,桩土作用复杂的变截面桩,缺乏较为有效的沉降计算方法。目前学界对支桩及其他变截面桩的研究已有部分成果:高笑娟

* 收稿日期:2019-02-15;修回日期:2020-01-02

基金项目:海南省高等学校科学研究项目(Hnky2018)、海南省普通高等学校研究生创新科研课题(Hys2017-21)资助

作者简介:陈 新(1992-),男,博士研究生。主要从事桩基工程研究。Email:sinnreich@163.com

等^[1]将双曲线模型引入对挤扩支盘桩的受力性状预测,拟合双曲线与实测 $P-s$ 曲线比较吻合;李连祥等^[2]利用双曲线型荷载传递函数,得出一种计算支盘桩沉降及承载性状的简化分析方法,亦有较好适用性;而对于一般单桩,双曲线模型虽然可以应用于沉降分析中,但考虑到桩侧摩阻力软化及端阻硬化,亦采用线性模型,张乾青等^[3-4]基于这种考虑,结合现场试验,采用侧阻软化模型与桩端双折线荷载传递模型,提出一种简便易行的算法;钱德玲^[5]通过模型试验,研究了支盘桩的受压承载机制,给出了影响因素的分析,为深入计算提供理论依据。根据相近的桩型分析,荷载传递法是一种适用性良好的沉降计算方法,可以运用到支桩的沉降分析中。

支桩的情况具有一定的独特性。一方面,其相对于传统的等截面桩在受力上有特殊性,等截面桩的桩顶荷载 P_t 主要由桩侧摩阻力 P_s (侧阻) 与桩端阻力 P_b (端阻) 承担,侧阻一般先于端阻发挥作用。而支桩桩顶荷载由侧阻、端阻以及支盘结构产生的支盘端阻 P_r (支阻) 共同承担,侧阻首先发挥作用,期间支盘端阻与桩端端阻相继产生作用(图1)。

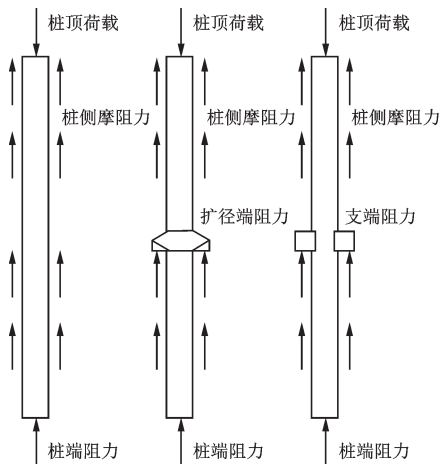


图1 支桩与支盘桩、等截面桩的受力对比

Fig.1 Force digram comparison among multi-branch pile, squeezed branch pile and straight-shaft pile

另一方面,支桩相对于挤扩支盘桩有结构上的特殊性,受压情况下的 $P-s$ 沉降曲线多为缓变型^[2],这充分考虑了支盘端阻力的发挥^[5]和受压过程中水平内压力^[6]的影响,即支盘端阻力的发挥,减弱了在桩顶荷载水平较大时侧阻的软化特性,且有效阻止了桩端承载力不足时的桩端刺入破坏。支桩同样设置了外伸结构,产生与支盘端阻相同性质的支盘端阻,不同之处在于支盘结构的几何构造以

及它在平面内非连续性的支-土受力界面,使其受压过程的分析中不考虑水平内压力值的影响,与此同时,在分段计算侧阻时,设置支盘结构的区段不应考虑同支盘桩计算时一样完全忽略桩侧摩阻^[2]。因此有必要针对支桩的力学特点讨论其计算方法,本文提出一种支桩沉降的非线性组合算法,以荷载传递法为基础,针对桩侧摩阻不确定的情况采用三折线模型,针对端阻加工硬化的特点采用双曲线模型,针对支阻与端阻力学情况相似的情况同样采用双曲线模型,结合支桩力学特点计算桩侧、桩端及支盘的荷载传递函数。

1 支桩荷载传递分析

荷载传递法概念明确,能反映桩土体系的荷载与沉降的主要工作机理,同时具有计算简单、实用性强的特点^[7-9]。其基本思路是将桩体视为由诸多弹性单元组成,单元与土体间用弹簧联系,以此模拟桩-土间的荷载传递关系。本文以此为基础,根据支桩的力学构造和受力特点对支桩沉降进行分析。

1.1 桩侧荷载传递函数

由于传统的双曲线模型及双折线模型无法较好地体现桩侧摩阻软化,为体现较高水平的桩顶荷载导致的摩阻软化,桩侧荷载传递函数采用三折线模型表达:

$$\begin{cases} \tau_s = \lambda_1 S & S \leq S_{u1} \\ \tau_s = \lambda_1 S_{u1} + \lambda_2 (S - S_{u1}) & S_{u1} < S \leq S_{u2} \\ \tau_s = \beta \lambda_1 S_{u1} + \lambda_3 (S - S_{u2}) & S > S_{u2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, τ_s 为桩侧摩阻力 P_s 与相邻的土结点的位移; d , S 为桩身位移; λ_1 为土体弹性阶段的剪切刚度系数 (P_s/d); λ_2 为侧阻硬化阶段的剪切刚度系数 (P_s/d); λ_3 为侧阻软化阶段的剪切刚度系数 (P_s/d); S_{u1} 为弹性阶段及塑性阶段的界限位移; S_{u2} 为塑性阶段与塑性残余段的界限位移; β 为强度系数。

λ_1 可根据 M.F.Randolph 等^[10]关于剪切位移法的推导进行类比计算:

$$\lambda_1 = \frac{G_s}{\zeta r} \quad (2)$$

式中, G_s 为桩周土的剪切模量, MPa; r 为桩身半径, m; $\zeta = \ln(r_m/r)$, 其中 $r_m = 2.5l/(1-\nu)$, m。

λ_2, λ_3 可根据静载试验获得。

采用三折线法可以极大程度的近似体现桩侧摩阻在上部荷载施加过程中,桩侧摩阻软化或者硬化的各种情况,统一计算各种情况,具有较好适用性。

此外,一方面支部结构的总高度相对于桩长较小,另一方面支部结构使桩土接触面积少量增加,本文以端阻力为切入点,对支部力学特性进行研究,故计算中假定支部结构所处的桩分段无摩阻力变化,其增加的承载力由 1.3 节中的计算模型直接计算。

1.2 桩端荷载传递函数

桩端荷载传递函数采用双曲线模型^[8]更符合桩土间非线性表现,可表达为:

$$P_b = \frac{s_b}{f + g s_b} \quad (3)$$

式中, f 为初始斜率 k_{b0} 的倒数; g 为极限端阻力 P_{bu} 的倒数。

根据 M.F.Randolph 等^[10]的研究,将桩端视为圆形刚性墩,由弹性力学原理给出桩端的沉降位移 $P-s$ 关系表达式:

$$s_b = \frac{P_b(1 - \nu_b)}{4G_b r} \quad (4)$$

式中, G_b 为桩端土剪切模量; ν_b 为桩端土泊松比; r 为桩身半径。

则桩端初始刚度即初始斜率:

$$k_{b0} = \frac{P_b}{s_b} \quad (5)$$

参数 f 为:

$$f = \frac{1}{k_{b0}} = \frac{s_b}{P_b} = \frac{1 - \nu_b}{4G_b r} \quad (6)$$

根据 N. Janbu^[11]的研究,桩端极限端阻力 P_{bu} 为:

$$P_{bu} = (c_b N_c + q_m N_q) A_b \quad (7)$$

式中,相关参数计算方法如下:

$$N_q = (\tan \delta + \sqrt{1 + \tan^2 \delta})^2 e^{2 \tan \delta} \quad (8)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \delta \quad (9)$$

$$A_b = \pi r^2 \quad (10)$$

$$q_m = (1 + 2k_0) \gamma L / 3 \quad (11)$$

式中, c_b 为桩端土黏聚力; N_c 和 N_q 为承载力系数; A_b 为桩端作用面积; γ 为桩侧土重度均值。

参数 g 为:

$$g = \frac{1}{P_{bu}} = \frac{1}{(c_b N_c + q_m N_q) A_b} \quad (12)$$

1.3 支部荷载传递函数

支部产生的支端阻力与桩端阻力性质类似,其荷载传递函数采用双曲线模型表达:

$$P_r = \frac{s_r}{f' + g' s_r} \quad (13)$$

支部端阻受力面积投影为近似多个长方形,直接根据 M.F.Randolph 等^[10]的弹性力学原理进行整合是不适用的,孙晓立等^[12]给出了关于扩抵抗拔桩的 $P-s$ 关系:

$$s_b = \frac{P_r(1 - \nu_r)}{4G_b(r_r + r_0)} \quad (14)$$

式中, r_r 为扩径体半径; r_0 为桩径半径。

参考式(14),根据支部设置情况,作出关于支部受力投影面积的近似,即将支部结构的底部视为多个部分圆环,以同平面四支部结构为例,如图2所示,其中A所示阴影部分为支部结构原投影面积,B所示阴影部分为其近似面积。根据弹性半空间体表面作用圆形均布荷载的理论^[13],推导计算圆形中心处位移 s_h :

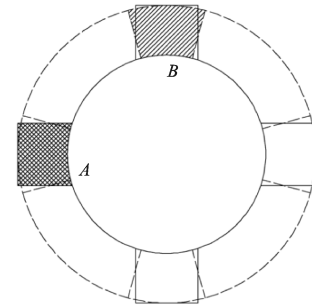


图2 支部结构底部近似模型

Fig.2 Approximate model of branch bottom

$$s_c = \frac{2(1 - \nu_r^2) q r_0}{E_r} \quad (15)$$

推导得圆环的中心处位移:

$$s_h = \frac{2(1 - \nu_r^2) q}{E_r} \cdot (r_r - r_0) \quad (16)$$

采用近似假设的支部结构投影面积情况下,根据最小二乘法的原理,其中心处位移:

$$s_r = s_c - (s_c - s_h) \eta \quad (17)$$

即:

$$s_r = \frac{2(1 - \nu_r^2) q}{E_r} \cdot [\eta r_r + (1 - 2\eta) r_0] \quad (18)$$

其中,近似系数 η :

$$\eta = \frac{n_r A_r}{\pi(r_r^2 - r_0^2)} \quad (19)$$

式中, n_r 为同平面支部分设置数量; A_r 为单个支部分结构底面积。

支端均布荷载 q 与集中荷载 P 的关系可表示为:

$$q = \frac{P_r}{n_r A_r} \quad (20)$$

则得到:

$$s_r = \frac{2(1 - \nu_r^2) P_r}{n_r A_r E_r} \cdot [\eta r_r + (1 - 2\eta) r_0] \quad (21)$$

即:

$$s_r = \frac{(1 - \nu_r) P_r}{n_r A_r G_r} \cdot [\eta r_r + (1 - 2\eta) r_0] \quad (22)$$

为估计支部分结构刚性的影响, 用系数 $\pi/4$ 乘以中心位移^[12]来近似, 可得:

$$s_r = \frac{\pi(1 - \nu_r) P_r}{4n_r A_r G_r} \cdot [\eta r_r + (1 - 2\eta) r_0] \quad (23)$$

通过推导, 得到支端阻力与位移的非线性表达:

$$P_r = \frac{4n_r A_r G_r s_r}{\pi(1 - \nu_r)[\eta r_r + (1 - 2\eta) r_0]} \quad (23)$$

1.4 组合算法

在上文针对侧阻、端阻、支阻构筑模型的基础上, 结合迭代算法^[2]可分析支桩受力性状。计算步骤如下:

(1) 将单桩分为 n 段, 支部分设置处独立分段;

(2) 假定桩端(第 n 段底部)产生一个较小的位移 s_{nb} ;

(3) 根据式(3)及式(13)计算桩端力 P_{nb} ;

(4) 第 n 段下半段压缩量 s_{nz} , 进而求出第 n 段中点处位移 s_{nm} :

$$s_{nm} = s_{nz} + s_{nb} \quad (24)$$

(5) 利用 s_{nm} 代入式(1)求第 n 段侧阻, 含有支部分结构的分段亦计算侧阻, 计算桩段总侧阻 P_{ns} , 可得第 n 段桩段顶部力:

$$P_{nt} = P_{nb} + P_{ns} \quad (25)$$

(6) 假定桩段的桩身轴力线性变化, 该桩段中点处弹性压缩量可表示为^[3]:

$$s_{nm} = \frac{(P_{nt} + 3P_{nb})L_n}{8E_p A_p} \quad (26)$$

(7) 有桩段 n 中点的修正位移为:

$$s'_{nm} = s_{nb} + s_{nm} \quad (27)$$

(8) 计算收敛系数 $\omega = s_{nm} - s'_{nm}$, 若 $\omega \leq 1 \times 10^{-6}$ m, 则将 s'_{nm} 代入式(1)求得侧阻力, 代入式(3)求桩端阻力, 代入式(25)求支端阻力。若 $\omega > 1 \times$

10^{-6} m, 则重复步骤(5)~(7);

(9) 根据上式, 计算出桩顶位移及桩顶荷载。并根据对桩端荷载的假定, 求得多个桩顶位移及荷载值, 最终确定桩顶 $P-s$ 沉降曲线。

2 算例

因暂无支桩较为完善的实测数据, 故设计缩尺模型试验推导支桩的受力性状。

模型试验以课题组专利《一种油压水平推挤装置》^[14]作为技术依据, 采用铝合金管作为桩体, 模型桩桩径 32 mm、内径 28 mm, 桩长 1 000 mm, 埋置深度 960 mm, 支部分结构(支块)与桩身通过密封胶粘合, 粘合 24 h 以上确认牢固后投入试验, 支桩结构如图 3 所示。在每个支部分结构下部分别嵌入直径约 10 mm, 厚 7 mm 的微型土压力盒, 桩底嵌入并粘合直径约 28 mm, 厚 11 mm 的土压力盒, 以此获得桩端及支部分结构下的土压力信息, 观测桩底及支底压力的变化。

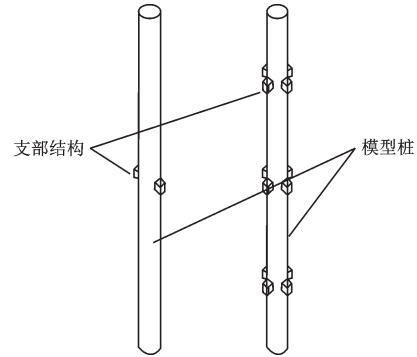


图3 模型桩示意

Fig.3 Sketch of the pile model

以砂性土地基作为试验环境, 其物理力学指标见表 1, 试验砂箱(图 4)为尺寸 2 000 mm × 2 000 mm × 1 500 mm(长 × 宽 × 高)的多功能试验砂箱, 砂箱顶部设置可移动杠杆加载装置, 设置反力架用于放置位移计。

支桩模型成桩后放置于试验箱预挖砂土中, 填埋并压实, 在支部分结构附近用铁丝穿插捣实, 以契合支部分结构在实际施工过程中与周围砂土的挤压作用, 同时, 为减少边界效应的影响, 模型桩设置于试验砂箱中部, 距砂箱侧壁 900 mm 以上。试验加载采用桩顶杠杆加载, 荷载采用等重砝码。桩顶设置固定的两个位移百分表量测桩顶沉降, 每级加载

表1 试验用砂物理参数

Table 1 Physical properties of sand used in tests

物理参数	数值
有效粒径 d_{50}/mm	0.53
最大干密度 $\rho_{\max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.643
最小干密度 $\rho_{\min}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.402
相对密度 D_r	0.50
干重度 $\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	15.13
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	35
不均匀系数 C_u	1.396
曲率系数 C_c	0.98

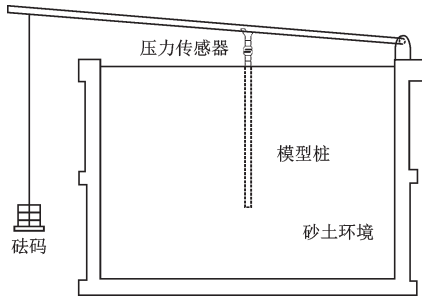


图4 试验砂箱示意

Fig.4 Schematic diagram of the test devices

均为 24.970 N。满足试验终止条件后停止进行加载,之后逐级卸载直至试验结束,挖取模型桩并检查确认模型桩完整性。根据《建筑桩基检测技术规范》^[15]结合模型比例情况,确定出现下列情况之一时,视为满足试验终止条件:(1)当载荷沉降曲线上有可判定极限承载力的陡降段,沉降量达到上一级荷载最终沉降的两倍;(2)当载荷沉降曲线呈缓变型时,桩顶总沉降大于 4 mm;(3)桩身发生断裂。

分别对等截面桩、单层四支桩及四层四支桩进行试验,并按照前述方法进行比较计算。计算采用的物理参数见表 2,通过物理参数得到的计算参数见表 3。选取桩身弹性模量 $E_p=70 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.35$;取土的弹性模量 $E=21 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu=$

0.30,剪切模量 $G=E/(2+2\nu)$ 。对比计算方法和试验结果,得到 $P-s$ 曲线对比(图 5)。

表2 模型物理参数

Table 2 Physical parameters of the calculation model

物理参数	数值
桩身弹性模量 E_p/GPa	70
桩身泊松比 ν	0.35
土弹性模量 E_b/MPa	21
围土泊松比 ν_b	0.30
土剪切模量 G_s/MPa	80.77
内摩擦角 $\delta/(\text{°})$	35
承载力系数 N_c	48.04
承载力系数 N_p	67.18

表3 模型试验计算参数

Table 3 Parameters of test calculation model

物理参数	数值
参数 ζ	230.77
参数 f	5.17
桩端极限端阻力 P_{bu}/kN	0.43
参数 g	2.326

由图 5 可见,计算方法所得曲线与试验结果有较高的吻合度。对比加载中后期,计算结果比试验数据略小,其中图 5(b)所示单层四支桩的对比较为明显,一方面是桩土界面的咬实程度没有得到较好的体现;另一方面,由于模型桩尺寸缩小,但砂土颗粒没有成比例缩小,模型桩中支底与围土的作用,和桩底与围土的作用方式仍有所不同,但计算过程将端阻与支阻的此作用近似,因而在模型试验中体现出计算沉降比试验沉降偏大的结果。

3 结论

利用荷载传递法,针对支桩力学构造及受力特

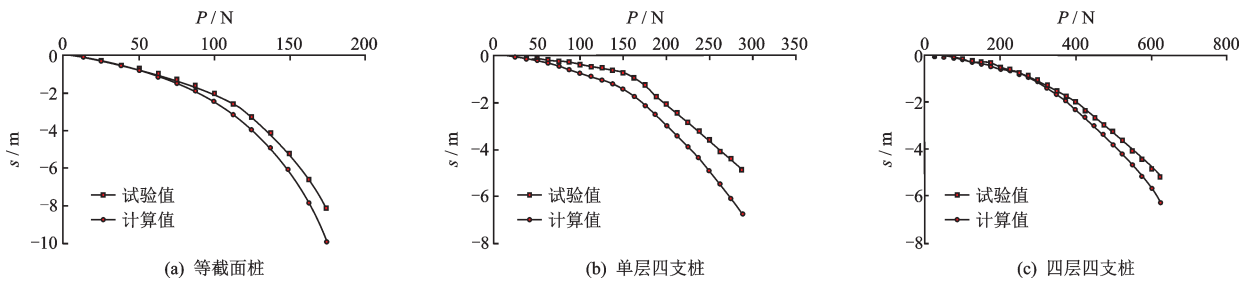


图5 试验与计算数据对比

Fig.5 Comparison of test data and calculation data

点,提出桩侧摩阻力采用三折线模型的荷载传递函数,桩端阻力及支端阻力采用双曲线模型的荷载传递函数。

(1)提出符合支端结构力学构造的支端阻力与位移的非线性表达。结合桩侧摩阻力采用三折线模型的荷载传递函数,桩端阻力采用双曲线模型的荷载传递函数,建立一种针对支桩沉降分析的组合计算方式。

(2)通过模型试验,对试验数据与组合算法的计算数据进行比较,表明该算法具有良好的适用性及可操作性。

参考文献:

[1] 高笑娟,朱向荣.用双曲线法预测挤扩支盘桩的极限承载力[J].岩土力学,2006,27(9):1596-1600.
Gao X J, Zhu X R. Forecasting ultimate bearing capacity of single squeezed branch pile by hyperbola method [J]. Rock and Soil Mechanics 2006, 27(9): 1596-1600. (in Chinese)

[2] 李连祥,李先军,刘兵.竖向受压支盘桩沉降非线性简化分析方法[J].地下空间与工程学报,2018,14(4):904-911.
Li L X, Li X J, Liu B. A simplified nonlinear settlement analysis method for axial loaded squeezed and branch piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 904-911. (in Chinese)

[3] 张乾青,李术才,李利平,等.考虑侧阻软化和端阻硬化的群桩沉降简化算法[J].岩石力学与工程学报,2013,32(3):615-624.
Zhang Q Q, Li Sh C, Li L P, et al. Simplified method for settlement prediction of pile groups considering skin friction softening and end resistance hardening [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 615-624. (in Chinese)

[4] 张乾青.软土地基桩基受力性状和沉降特性试验与理论研究[D].杭州:浙江大学,2012.
Zhang Q Q. Test and theoretical study on bearing capacity behavior and settlement of pile in soft soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)

[5] 钱德玲.挤扩支盘桩受力性状的研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(3):494-499.
Qian D L. Study on bearing behavior of squeezed branch pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 494-499. (in Chinese)

[6] 李连祥,李先军,成晓阳,等.考虑圆孔扩张理论的支盘桩荷载传递法[J].中国公路学报,2018,31(8):

20-29.
Li L X, Li X J, Cheng X Y, et al. Load transfer method for squeezed and branch piles considering cavity expansion theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 20-29. (in Chinese)

[7] Zhang Q Q, Zhang Z M. A simplified nonlinear approach for single pile settlement analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(11): 1256-1266.

[8] Zhang Q Q, Li S C, Liang F Y, et al. Simplified method for settlement prediction of single pile and pile group using a hyperbolic model [J]. International Journal of Civil Engineering, 2014, 12(2): 146-159.

[9] 杨桦,杨敏.荷载传递法研究单桩荷载-沉降关系进展综述[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):155-159,165.
Yang H, Yang M. Development of load-transfer method for settlement calculation of single pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 155-159,165. (in Chinese)

[10] Randolph M F, Wroth C P. An analysis of the vertical deformation of piles groups [J]. Geotechnique, 1979, 29(4): 423-439.

[11] Janbu N. Static bearing capacity of friction piles [C]// Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vienna, Austria: [s.n.], 1976: 479-488.

[12] 孙晓立,杨敏,莫海鸿.利用荷载传递法计算扩底抗拔桩的位移[J].岩土工程学报,2008,30(12):1815-1820.
Sun X L, Yang M, Mo H H. Displacement of base-enlarged tension piles calculates by load transfer method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1815-1820. (in Chinese)

[13] 吴家龙.弹性力学[M].上海:同济大学出版社,1986.
Wu J L. Elastic mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1986. (in Chinese)

[14] 李光范,陈新,丁庆磊,等.一种油压水平推挤装置:中国, CN206829138U [P]. 2017-9-25.
Li G F, Chen X, Ding Q L, et al. The utility model relates to a horizontal thrusting device by means of oil pressure: China, CN206829138U [P]. 2017-9-25. (in Chinese)

[15] 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014 [S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014 [S]. Beijing: China Architecture Publishing, 2014. (in Chinese)

(本文责编:池营营)