

文章编号: 1674-599X(2020)02-0098-06

## 湘府路高架桥桩基沉降计算及影响因素分析

胡超

(湖南湘江新区发展集团有限公司, 湖南 长沙 410205)

**摘 要:** 根据竖向荷载作用下的桩-土相互作用机理, 并考虑桩侧土体应力-应变的非线性特征, 建立了基桩沉降的简化计算模型, 计算了基桩沉降的理论值。以湘府路高架桥 ZX49R 墩中的基桩为工程实例, 通过对比分析基桩沉降实测值和计算值, 验证了用荷载传递法计算基桩沉降的合理性, 探讨了桩径和桩长对基桩沉降的影响。研究表明: 当其他条件相同时, 基桩沉降随桩径和桩长的增大均呈非线性减小趋势, 随桩顶竖向荷载的增加呈非线性增大趋势。增大桩径和桩长均能在一定程度上减小基桩竖向受荷沉降, 但当其增大到一定程度后, 桩径和桩长已不再是控制桩顶沉降的关键参数, 以期对桩基工程的设计提供参考。

**关键词:** 桩基; 沉降; 荷载传递法; 双曲线函数; 敏感性分析

**中图分类号:** TU473.1<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.016

### Settlement calculation and influencing factor analysis of pile foundation in Xiangfu viaduct

HU Chao

(Hunan Xiangjiang New Area Development Group Co., Ltd., Changsha 410205, China)

**Abstract:** According to the mechanism of pile-soil interaction under vertical load, a simplified calculation model for foundation pile settlement was established considering the nonlinear characteristics of soil stress and strain on the pile side. The theoretical solution of foundation pile settlement calculation was derived. Taking the foundation pile in ZX49R pier of Xiangfu road viaduct as an engineering example, the calculated settlement value of foundation pile using the load transfer method was verified by measured value, and the influence of pile diameter and pile length on foundation pile settlement was discussed. The results show that the settlement of foundation pile decreases with the increase of pile diameter and pile length, and increases with the increase of vertical load on pile top. The vertical settlement under load can be significantly reduced by increasing the pile diameter and pile length. However, when certain point is reached, the vertical settlement is impacted slightly by pile diameter and length. This study is considered to provide reference for the design of pile foundation engineering.

**Key words:** pile foundation; settlement; load transfer method; hyperbolic function; sensitivity analysis

为了缓解城市交通车辆分流、提高城市交通容量及改善城市交通拥堵, 在城市道路建设中, 合理设置高架桥显得尤为重要。由于越来越多的高架桥修建在软弱土层或岩溶地区地层中, 土层承载力不

足, 将导致桩基沉降增大, 严重地危害了桥梁的安全<sup>[1-3]</sup>。近年来, 已有一些学者对基桩沉降问题进行了相关的试验和理论研究。陈锦剑<sup>[4]</sup>等人根据 300 根单桩荷载试验结果, 研究了软土地区单桩变形特

收稿日期: 2020-03-24

作者简介: 胡超(1985-), 男, 湖南湘江新区发展集团有限公司工程师。

性。张瑞坤<sup>[5]</sup>等人基于现场静荷载和桩身应力测试试验,利用一维杆系结构有限单元法与剪切位移法的耦合,分析了单桩沉降。成滢<sup>[6]</sup>等人建立了基桩受力分析的简化计算模型,得到了基桩内力与位移的挠曲微分方程及其幂级数解答。这些研究通过模型试验结果,从竖向承载角度来分析基桩的沉降变形和承载特性,但未考虑荷载施加过程中桩侧摩阻力和桩端阻力发挥程度。刘红军<sup>[7]</sup>等人基于荷载传递法的土弹簧模型,建立了用于单桩沉降计算的数学规划模型。靳建明<sup>[8]</sup>等人基于成层 Gibson 地基模型,研究了轴向荷载作用下单桩的非线性沉降响应。刘忠<sup>[9]</sup>等人基于荷载传递法,采用描述桩-土相互作用特性的双折线荷载传递函数。已有的基桩承载特性和沉降的研究大多从试验和理论上分析了桩-土相互作用机理,研究嵌岩桩或摩擦桩的沉降特性和竖向承载性能。但现有的研究成果还不够完善,未体现基桩受荷过程中桩侧土非线性特征对基桩沉降的影响。因此,作者拟考虑桩侧土体应力-应变的非线性特征,分析竖向荷载作用下的桩-土相互作用的机理,建立双曲线模型,用荷载传递简化计算方法,推导基桩沉降的幂级数解,探讨桩径和桩长等参数对基桩沉降特性的影响,以期为基础工程的设计提供参考。

## 1 计算基桩沉降的荷载传递法

由于荷载传递法能很好地拟合桩-土相互作用,在基桩沉降计算时被广泛采用。当竖向荷载施加于桩顶、桩身产生压缩与土体发生相对位移时,其位于基桩上部土层的桩侧摩阻力相较于下部土层先发挥出来,而桩侧阻力会比桩端阻力先发挥出来。因此,竖向荷载作用下桩土体系的传递荷载过程可看成是桩身沉降  $s(z)$  和桩身轴力  $Q(z)$  随深度逐渐递减,而桩侧摩阻力  $\tau(z)$  发挥的过程,如图1所示。

取桩身微端  $dz$  作为研究对象,由竖向受力平衡公式可得:

$$\tau(z)udz + Q(z) + dQ(z) = Q(z)。 \quad (1)$$

即:

$$\tau(z) = -\frac{1}{u} \frac{dQ(z)}{dz}。 \quad (2)$$

任一深度  $z$  处桩身截面荷载为:

$$Q(z) = Q_0 - u \int_0^z \tau(z) dz。 \quad (3)$$

可得任一深度  $z$  处桩身位移为:

$$s(z) = s_0 - \frac{1}{EA_p} \int_0^z Q(z) dz。 \quad (4)$$

各微段  $dz$  压缩量与轴力的关系式为:

$$ds(z) = -\frac{Q(z)}{EA_p} dz。 \quad (5)$$

进一步可得桩身轴力表达式为:

$$Q(z) = -EA_p \frac{ds(z)}{dz}。 \quad (6)$$

联立式(2)和(6),可得桩身控制方程为:

$$EA_p \frac{d^2s(z)}{dz^2} - \tau(z)u = 0。 \quad (7)$$

式中:  $z$  为基桩计算点深度;  $A_p$  为桩身截面面积;  $u$  为桩身周长;  $E$  为桩身混凝土弹性模量。

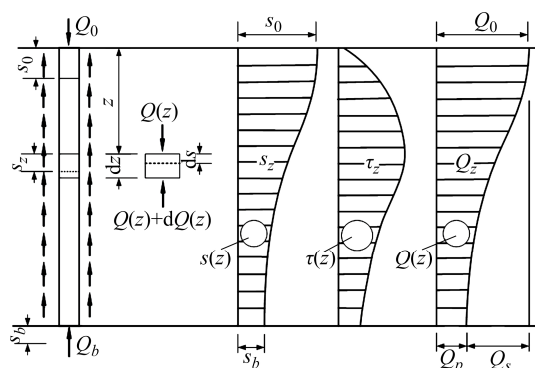


图1 基桩荷载传递模型

Fig. 1 Load transfer model of foundation pile

由于双曲线模型能较好地模拟桩侧土体的应力-应变非线性关系,因此,可采用双曲线模型作为求解基桩荷载传递基本方程。

关于桩侧土体的应力-应变关系, Kraft<sup>[10]</sup>等人考虑土的应力-应变的非线性特征,提出了相应的双曲线模型,其表达式为:

$$\tau(z) = \frac{s(z)}{a + bs(z)}。 \quad (8)$$

式中:  $s$  为桩土相对位移;  $a, b$  均为待定系数,其物理意义如图2所示。

将传递函数双曲线模型式(8)代入式(7),可得:

$$\frac{d^2s(z)}{dz^2} = \frac{u}{EA_p} \frac{s(z)}{a + bs(z)}。 \quad (9)$$

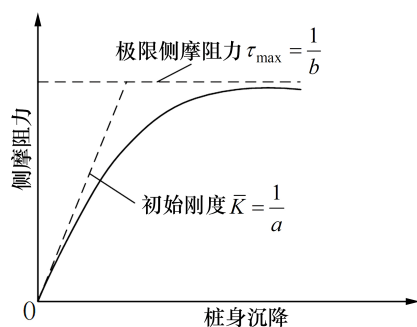


图2 双曲线模型

Fig. 2 Hyperbolic model

令  $\alpha = \frac{u}{EA_p}$ , 则微分方程式(9)可简化为:

$$(a + bs(z)) \frac{d^2 s(z)}{dz^2} - \alpha s(z) = 0. \quad (10)$$

假设桩身沉降函数为:

$$s(z) = \beta_0 + \beta_1 z + \dots + \beta_i z^i + \dots = \sum_{i=0}^n \beta_i z^i. \quad (11)$$

式中:  $\beta_i$  为沉降方程展开系数。

桩顶边界条件为:

$$\begin{cases} s(0) = s_0; \\ s'(0) = -\frac{Q_0}{EA_p}. \end{cases} \quad (12)$$

通过求解, 得到计算系数的递推关系为:

$$\begin{cases} \beta_0 = s_0; \\ \beta_1 = -\frac{Q_0}{EA_p}; \\ \alpha \beta_{i-2} - \sum_{j=1}^{i-2} (i-j)(i-j-1)b\beta_j \beta_{i-j} \\ \beta_i = \frac{\alpha \beta_{i-2} - \sum_{j=1}^{i-2} (i-j)(i-j-1)b\beta_j \beta_{i-j}}{i(i-1)(a+b\beta_0)}; \\ i = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (13)$$

这一求解过程可编制相应的计算程序来实现。

## 2 桥墩基桩沉降的计算

### 2.1 工程概况

在湘府路(河西段)快速化改造工程中, ZX48~ZX51 墩台位于主线高架桥梁落地位置, 东接湘府路大桥西侧路基挡墙段。ZX48~ZX51 联采用变高变宽连续梁, 其中, ZX49R 墩为该联中墩, 上部结构为预应力砼变高变宽连续箱梁。由该墩地质勘查资料显示, ZX49R 墩周覆盖层由填筑土、粉质黏土及圆砾等组成, 其承载力较低, 不宜做基础持力层(各地层参数见表1)。ZX49R 墩存在稳定持力岩层或埋深极深的情况, 局部揭露岩层存在溶洞, 不具备嵌岩桩设计的地质条件, 故将 ZX49R 墩的基桩设计为摩擦桩, 如图3所示。

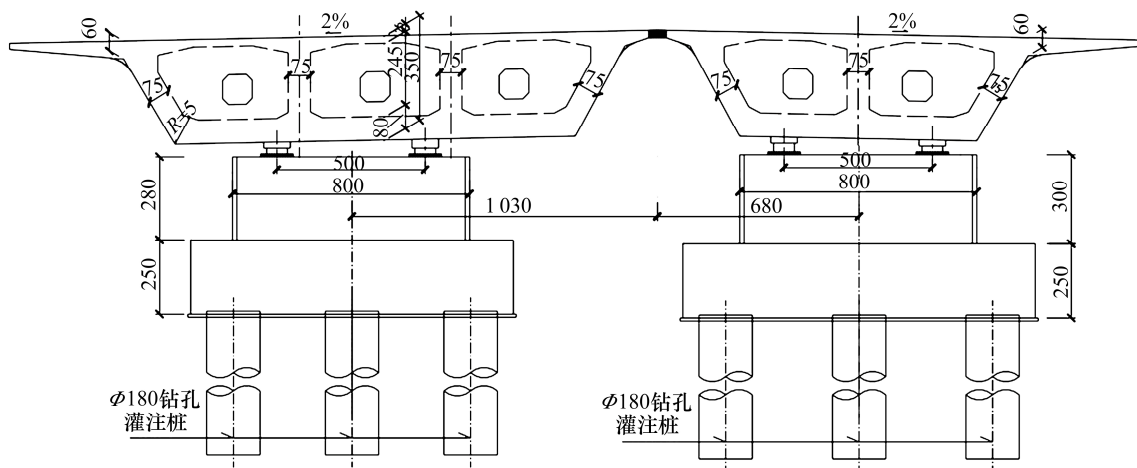


图3 ZX49R 墩桩基布置(单位: cm)

Fig. 3 Layout of the ZX49R pile foundation (unit: cm)

### 2.2 基桩沉降计算

ZX49R 墩基桩为钻孔灌注桩, 桩径  $D=1.8$  m; 基桩总长  $L=44.0$  m。桩侧土层自上而下依次为粉质黏土、圆砾和微风化灰质白云岩, 如图4所示。

基桩参数为: 混凝土的弹性模量  $E_c$  为 30.0 GPa, 抗弯刚度  $EI$  为 15.5 GN·m<sup>2</sup>。粉质黏土含水量  $w$  为 25.0%, 容重  $\gamma_1$  为 18.0 kN/m<sup>3</sup>, 黏聚力  $c$  为 10.0 kPa, 内摩擦角  $\phi$  为 15.0°, 压缩模量  $E_s$  为 6.0 MPa,

表 1 地层力学指标推荐值

Table 1 Recommended values for formation mechanics indexes

地层时代	岩土名称	承载力基本容许值/kPa	桩侧土摩阻力标准值/kPa
Q <sub>4</sub>	①-2 杂填土	—	—
Q <sub>4</sub>	①-3 素填土	80	—
Q <sub>4</sub>	④-4 粉质黏土	250	60
Q <sub>4</sub>	④-12 圆砾	300	100
Ch	12-4 微风化灰质白云岩	500	120

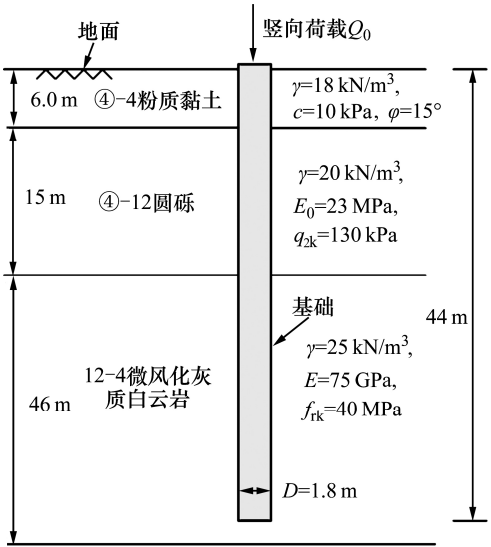


图 4 ZX49 墩基桩计算示意

Fig. 4 Layout diagram of ZX49 pier foundation pile

摩阻力标准值  $q_{1k}$  为 60.0 kPa。圆砾的容重  $\gamma_2$  为 23.0 kN/m<sup>3</sup>，变形模量  $E_0$  为 23.0 MPa，摩阻力标准值  $q_{2k}$  为 130.0 kPa。微风化灰质白云岩单桩抗压强度标准值  $f_{rk}$  为 40.0 MPa。计算得到的桩顶曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出，实测荷载与沉降曲线和计

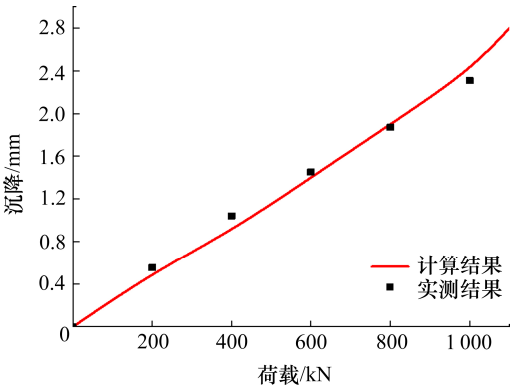


图 5 桩顶荷载与沉降曲线

Fig. 5 The curve of the load and the settlement on the pile top

算荷载与沉降曲线吻合较好，计算误差范围为 -13.5%~3.9%，表明基桩沉降计算的荷载传递法是合理可行。实际工程中，由于基桩荷载不大，基桩荷载与沉降曲线近似呈线性增大趋势。

3 影响因素分析

桩径和桩长是影响竖向荷载作用下基桩沉降的主要因素。在不同桩径和桩长条件下，对桩顶沉降的变化规律展开影响因素及其敏感性分析。敏感性分析方法分为单因素敏感性分析法和多因素敏感性分析法<sup>[11]</sup>。本试验采用单因素敏感性分析法对该墩的基桩进行分析，即在保持其他参数条件不变的情况下，以桩径  $D=1.8$  m 和桩长  $L=39$  m 为基准，分别探讨  $D$  和  $L$  增(减)10%,20%和 30%对基桩沉降的影响程度。

3.1 桩径的影响

以实际工程中  $D=1.8$  m 为基准，桩径分别减(增)10%,20%和 30%，对应的  $D$  分别为 1.2,1.4,1.6,2.0,2.2 和 2.4 m。经计算，得到不同  $D$  下的桩顶荷载与沉降曲线，如图 6 所示。当竖向荷载  $Q=10\ 000$  kN 时，桩顶沉降  $s$  增量与桩径增量  $\Delta D$  之间的敏感性关系见表 2。

从图 6 中可以看出，桩顶沉降随  $D$  的增大呈非线性减小趋势，随桩顶竖向荷载  $Q$  增加而呈非线性增大趋势。以实际  $D=1.8$  m 为例，当  $Q_0$  为 2 000,6 000,10 000,14 000 和 18 000 kN 时， $s$  分别为 5.3,15.1,26.5,41.1 和 59.4 mm，与前一荷载对比，其增幅分别为 184.9%,75.5%,55.1%和 44.5%。从表 2 中可以看出，当  $D$  在  $\pm 30\%$  范围内变化时，桩顶沉降变化

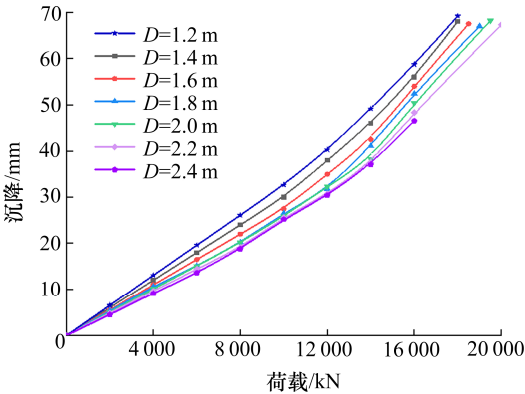


图 6 桩径的影响

Fig. 6 The effects of pile diameter

表 2 桩径的敏感性分析

Table 2 Sensitivity analysis of pile diameter			
桩径/m	桩径增量/%	沉降/mm	沉降增量/%
1.2	-30	32.7	23.40
1.4	-20	30.0	13.21
1.6	-10	27.5	3.77
1.8	0	26.5	0.00
2.0	10	25.9	-2.26
2.2	20	25.6	-3.40
2.4	30	25.2	-4.91

幅度介于-4.91%~ 23.40%之间。可见,增大桩径对于减小基桩沉降具有显著效果,但当其增大到一定程度后,继续增大桩径对改善基桩沉降的效果已不明显。

3.2 桩长的影响

以实际工程中的  $L=39\text{ m}$  为基准,  $L$  分别减(增) 10%,20%和 30%,对应的  $L$  分别为 27,31,35,43,47 和 51 m 经计算,得到不同桩长条件下的桩顶荷载与沉降曲线,如图 7 所示。当  $Q=10\,000\text{ kN}$  时,桩顶沉降  $s$  增量与桩长增量  $\Delta L$  之间的敏感性关系见表 3。

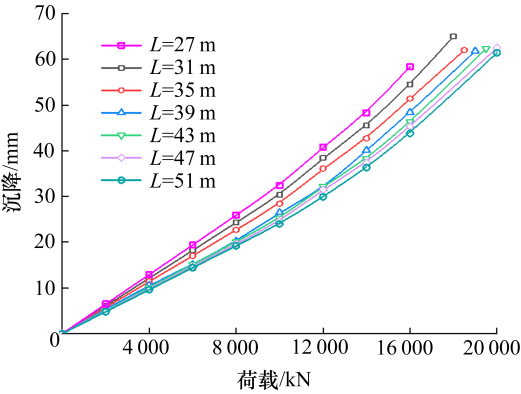


图 7 桩长的影响

Fig. 7 The effects of pile length

表 3 桩长的敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of pile length			
桩长/m	桩长增量/%	沉降/mm	沉降增量/%
27	-30	32.4	22.26
31	-20	30.3	14.34
35	-10	28.4	7.17
39	0	26.5	0.00
43	10	25.3	-4.53
47	20	24.6	-7.17
51	30	24.0	-9.43

从图 7 中可以看出,桩顶沉降随  $L$  的增大呈非线性减小趋势,随  $Q$  增加而呈非线性增大趋势。以桩长  $L=43\text{ m}$  为例,当  $Q_0$  为 2 000, 6 000,10 000,14 000 和 18 000 kN 时,桩顶沉降  $s$  分别为 5.0,15.1,25.2,38.2 和 55.4 mm,与前一荷载对比,其增幅分别为 202.0%,66.9%,51.6%和 45.0%。从表 3 中可以看出,当  $D$  在 $\pm 30\%$ 范围内变化时,桩顶沉降变化幅度介于-9.43%~22.26%之间。以  $Q$  为 10 000 kN 为例,当  $L$  减小 20%时,桩顶沉降约减小 14.34%;而当  $L$  增大 20%时,桩顶沉降约增加 7.17%。表明:增大  $L$  对于减小基桩沉降作用明显。但随着  $L$  增大到一定程度后,桩长已不再是控制桩顶沉降的关键参数。

增大桩径和桩长均能减小基桩沉降,且基桩荷载与沉降曲线变化趋势相近,两者对基桩竖向受荷沉降的敏感性相差不大。

4 结论

- 1) 建立了基桩沉降计算的双曲线简化计算模型,导出了基桩沉降计算的理论解答。对比分析了基桩沉降实测值和计算值,验证了基桩沉降计算的荷载传递法是合理可行。
- 2) 当其他条件相同时,基桩沉降随  $D$  和  $L$  的增大而均呈非线性减小趋势,随桩顶竖向荷载的增加而呈非线性增大趋势。
- 3) 增大  $D$  和  $L$  均能在一定程度上减小基桩竖向受荷沉降。但当其增大到一定程度后,桩径和桩长已不再是控制桩顶沉降的关键参数。

参考文献(References):

[1] 马宾辉,赵明华,尹平保,等.岩溶区某桥梁桩基处治方案分析[J].交通科学与工程,2012,28(2):37-42.(MA Bin-hui,ZHAO Ming-hua,YIN Ping-bao.Analysis of treatment methods for a certain bridge piles case in karst region[J].Journal of Transport Science and Engineering, 2012,28(2):37-42.(in Chinese))

[2] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2014[J].中国公路学报,2014,27(5):1-96.(Editorial Department of China Journal of Highway and Transport, Review on China's bridge engineering research in 2014 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014,

- 27(5):1-96.(in Chinese))
- [3] 张磊,胡志强.桥梁工程设计中的桩基沉降[J].黑龙江交通科技,2017,40(6):129-131.(ZHANG Lei,HU Zhi-qiang. Settlement of pile foundation in bridge engineering design[J].Communications Science and Technology Heilongjiang, 2017,40(6):129-131.(in Chinese))
- [4] 陈锦剑,王建华,朱峰.软土地区单桩沉降的简化计算方法[J].上海交通大学学报,2006(12):2126-2129.(CHEN Jin-jian, WANG Jian-hua, ZHU Feng. A simplified calculation for the settlement of single piles in soft foundation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006(12): 2126-2129.(in Chinese))
- [5] 张瑞坤,石名磊,倪富健,等.黏性土中大直径超长钻孔灌注桩承载性状及单桩沉降分析[J].岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 4190-4198. (ZHANG Rui-kun, SHI Ming-lei, NI Fu-jian,et al.Analysis of bearing properties of large-diameter and super-long bored pile in cohesive soil and single pile settlement[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 4190-4198. (in Chinese))
- [6] 成滢,罗忠涛,尹平保.山区桩柱式桥梁基桩破坏模式和受力分析[J].交通科学与工程,2013,29(3):28-33,71. (CHENG Yin,LUO Zhong-tao,YIN Ping-bao. The force analysis and failure mode of bridge pile- columns in mountain area[J].Journal of Transport Science and Engineering,2013,29(3):28-33,71.(in Chinese))
- [7] 刘红军,上官士青,朴春德,等.基于数学规划算法的单桩沉降计算分析研究[J].岩土工程学报,2012,34(5):868-873. (LIU Hong-jun, SHANGGUAN Shi-qing, PIAO Chun-de,et al.Calculation and analysis of single pile settlement based on mathematical programming algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(5):868-873.(in Chinese))
- [8] 靳建明,梁仕华,成层 Gibson 地基中单桩沉降的非线性分析[J].岩土力学,2012,33(6):1857-1863.(JIN Jian-ming, LIANG Shi-hua. Nonlinear analysis of settlement of axially loaded single pile in Gibson soil[J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(6):1857-1863.(in Chinese))
- [9] 刘忠,唐漾,杜欢欢,等.基于荷载传递法的单桩沉降解析解[J].湘潭大学自然科学学报,2013,35(2):35-40.(LIU Zhong,TANG Yang,DU Huan-huan,et al.Calculation of single pile settlement based on load transfer method[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2012, 35(2):35-40.(in Chinese))
- [10] Kraft L M,Ray R P,Kagawa T.Theoretical t-z curves[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, 1981,107(3):1465-1488.
- [11] 范臻辉,王永和,肖宏彬.大直径桩沉降敏感性的数值分析[J]. 湖南工业大学学报, 2008, 22(3): 12-16. (FAN Zhen-hui, WANG Yong-he, XIAO Hong-bin. Numerical analysis of settlement sensitivity for large diameter piles[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2008,22(3):12-16.(in Chinese))