

Super-Long Pile in Soft Soil Area of Load-Settlement Relationship of Load Transfer Method

Fei Zhou^{1,2}, Jianping Jiang², Qiang Li^{2,3}

¹No. 2 Engineering Co., Ltd. of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai

²Ocean Science and Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai

³Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai

Email: zf9212@gmail.com

Received: May 1st, 2017; accepted: May 16th, 2017; published: May 22nd, 2017

Abstract

This research is based on the passed characteristics of the super-long pile load contains in the soft soil district, including softening corresponding of the surface soil. Besides, the research has improved double curve model and has derived out the analytical solutions of the relationship between super-long pile load contains and settlement. What's more, the calculation formula of the super-long pile whose bottom has sediment has been found out, which has improved the accuracy of theoretical derivation. Finally, a numerical example is given to show that the calculated results are consistent with the experimental results, which provides the reference for the practical engineering calculation.

Keywords

Soft Soil, Super-Long Pile, Load-Transfer Functions, Hyperbolic Functions, Sedimentation, Improvement

软土区超长桩荷载 - 沉降关系的荷载传递法解析

周 飞^{1,2}, 蒋建平², 李 强^{2,3}

¹中交三航局第二工程有限公司, 上海

²上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海

³中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海

Email: zf9212@gmail.com

收稿日期：2017年5月1日；录用日期：2017年5月16日；发布日期：2017年5月22日

摘要

基于软土区超长桩荷载传递特性的研究,考虑了表层土的软化效应,并对双曲线模型进行了相应的改进,推导出了超长桩荷载与沉降关系的解析解,并给出了底部有沉渣的超长桩的计算公式,提高了理论推导的精确性,最后通过算例验证本文计算结果与实测结果较为吻合,为实际工程计算提供参考。

关键词

软土, 超长桩, 荷载传递函数, 双曲线函数, 沉降, 改进

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国十三五规划纲要的提出,特别是未来五年中国计划实施的100个重大工程及项目中提到要“大力推进上海、天津、大连、厦门等国际航运中心建设。”这就对港口软土区超长桩的使用建设提出了新的要求,提高港口建设和超高层建筑水平的同时更要符合五大发展理念中“绿色发展”这一重要理念。

在工程实践中,对超长桩的定义尚未作出明确的规定,一般规定为: $L \geq 50$ m为超长桩[1]。

本文同样采用桩长大于50 m的超长桩为研究对象。由于桩基的现场试验得到荷载-沉降关系曲线极为耗费人力、物力,所以,众多国内外学者希望通过理论分析得到桩的承载力(Q)-沉降(S)曲线,来减少上述试验的弊端。许多年来,国内外专家学者对于桩的荷载传递函数的研究得到了丰富的成果,如Seed和Reese 1975年提出的桩身荷载传递函数的双曲线模型,调整双曲线模型[2],指数模型[3],蒋建平用Boltzmann数学模型对大直径桩荷载-位移曲线进行描述[4],以及一些学者提出的简化线性模型三折线[5]等。

2. 荷载传递函数的修正

在轴向荷载作用下,其沉降量由下述三部分组成:(1)桩体本身的弹性压缩量;(2)由于桩侧摩阻力向下传递,引起桩端土体压缩所产生的桩端沉降;(3)由于桩端荷载引起桩端下土体压缩所产生的桩端沉降。荷载传递函数法假定桩身任意点的位移只与该点的摩阻力有关,而与桩身其它点应力无关,即忽略了土的连续性。实际上,荷载传递函数法是以桩身为研究对象,荷载传递函数中的位移是桩身位移,而要发挥桩身某点处的桩侧摩阻力,必须要有该点处产生的桩-土相对位移,即应扣除该点处桩周土的下沉量的位移。这不仅表现在桩端处,还表现在桩顶到桩端的任一截面处。若不扣除,对于超长桩的受力分析会产生较大的误差。为消除此误差,阳吉宝[6]提出了荷载传递函数的修正。本文结合阳吉宝等人的研究和在对大量的超长桩、中长桩和短桩的静载试验结果进行分析及拟合比较后,得出用抛物线方程表示桩周土的沉降量:

$$S_1 = K \left(\frac{z}{L} \right)^m S \quad (1)$$

式中： m 在 1.5~2 之间。 K 为土分层有关的参数($K=0\sim0.8$)，根据钻孔灌注成桩的超长桩静载试验结果分析得出：对非嵌岩因施工滞留相当厚度沉渣的超长桩，桩端下部 K 取高值；对持力层较好且清孔后滞留沉渣少的超长桩，桩端下部 K 取小值， z 为桩身竖向坐标，桩顶处 $z=0$ ， L 为桩长。

令 $\lambda = K \left(\frac{z}{L} \right)^m$ ，从而得到修正后的超长单桩荷载传递函数：

$$\tau = \frac{S(1-\lambda)}{a+bS(1-\lambda)} \quad (2)$$

对于浅层土，由于打入土中时的挤土作用，在地表浅部形成隆起，产生径向裂隙。且打桩会引起侧向振动，桩土之间形成间隙。因此，在地表下 15 m 范围内桩侧摩阻力达到峰值后有所降低，表现为应变软化的性质。故对浅层土，采用改进的模型[7]：

$$\tau = \frac{S(1-\lambda)}{a+bS^2(1-\lambda)} \quad (3)$$

3. 建立修正双曲线模型进行理论推导

在桩顶荷载作用下，桩土共同作用模型如图 1 所示，可由桩上任一单元静力平衡条件得到：

$$\frac{dQ(z)}{dz} = -u\tau(z) \quad (4)$$

微元体产生的弹性压缩量为：

$$dS = -\frac{Q(z)}{EA} dz \quad (5)$$

由 $\frac{dQ}{dz} = \frac{dQ}{dS} \frac{dS}{dz}$ 得出：

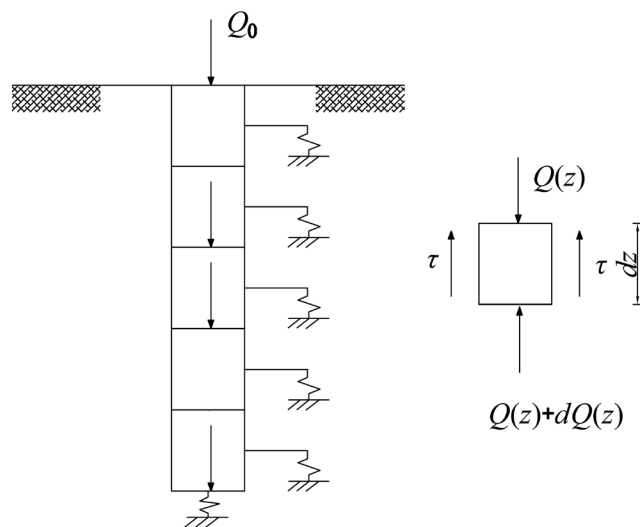


Figure 1. Model of pile-soil interaction

图 1. 桩 - 土共同作用模型

$$\frac{dQ}{dS} = \frac{uEA}{Q} \tau \quad (6)$$

其中, u 为桩周长, E 为桩的弹性模量, A 为桩截面面积。

将修正后的超长单桩荷载传递函数关系式(2)带入式(6)得桩身荷载传递微分方程为:

$$QdQ = uEA \frac{S(1-\lambda)}{a+bS(1-\lambda)} dS \quad (7)$$

积分(8)并考虑初始条件 $Q = 0, S = 0$ 得:

$$Q = \sqrt{2uEA \left[\frac{S}{b} - \frac{a}{(1-\lambda)b^2} \ln \left[1 + \frac{(1-\lambda)bS}{a} \right] \right]} \quad (8)$$

令 $\omega^2 = 2uEA$ 得:

$$Q = \frac{\omega}{b} \sqrt{\left[bS - \frac{a}{(1-\lambda)} \ln \left[1 + \frac{(1-\lambda)bS}{a} \right] \right]} \quad (9)$$

式中: a, b 是与土层有关的参数。对于求解微分方程(7)只考虑了初始条件而未引入边界条件, 上式(8)、(9)并未包括桩身的刚性位移对桩身轴力的影响。所以, 桩身沉降等于桩身弹性压缩位移 S_{ez} 与桩身刚性位移 S_b 之和, 如图 2 所示, 则有:

$$S_z = S_{ez} + S_b \quad (10)$$

在桩顶有:

$$S_0 = S_{ez} + S_b \quad (11)$$

根据荷载传递函数双曲线模型, 在桩端有:

$$\sigma_b = \frac{S_b(1-\lambda)}{a_b + b_b S_b(1-\lambda)} \quad (12)$$

式中: σ_b 为桩端阻力; S_b 为桩端沉降量; a_b, b_b 为桩端土的荷载传递函数。

所以, 桩端总阻力为:

$$Q_b = A\sigma_b = \frac{AS_b(1-\lambda)}{a_b + b_b S_b(1-\lambda)} \quad (13)$$

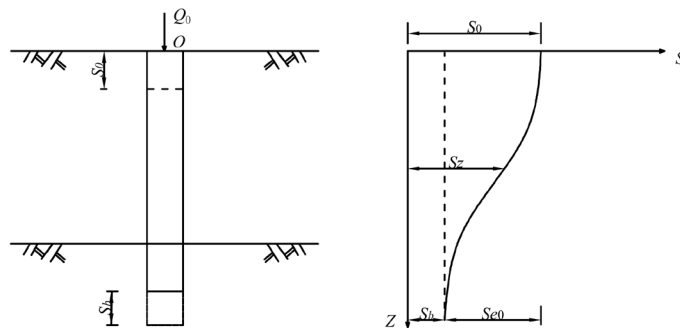


Figure 2. Distribution of subsidence along the pile body
图 2. 沉降沿桩身的分布

对于大直径超长桩, 根据文献[8]考虑桩端直径 D 尺寸效应, 对桩端承载力进行修正, 修正系数 $\xi = 0.8/D$; 对于长桩扩底桩, 先发挥作用的扩底桩侧阻力占主导地位。如果此时桩的扩径比较小, 可不考虑扩底特性, 仅将其当作设计安全储备[9], 故:

$$Q_b = \xi A \sigma_b = \frac{\xi A S_b (1-\lambda)}{a_b + b_b S_b (1-\lambda)} \quad (14)$$

所以, 桩身任意截面处承载力即为该位置侧摩阻力与桩端阻力之和, 即:

$$Q = Q_b + Q_z \quad (15)$$

将(9)、(13)代入(15)式得:

$$Q = \frac{A S_b (1-\lambda)}{a_b + b_b S_b (1-\lambda)} + \frac{\omega}{b} \sqrt{\left[b S - \frac{a}{(1-\lambda)} \ln \left[1 + \frac{(1-\lambda) b S}{a} \right] \right]} \quad (16)$$

在桩顶有: $S_{e_z} = S_0$, 此处, S_0 相当于整个桩身所产生的总弹性位移(压缩量), 桩顶荷载 Q_0 即为:

$$Q_0 = \frac{A S_b (1-\lambda)}{a_b + b_b S_b (1-\lambda)} + \frac{\omega}{b_e} \sqrt{\left[b_e S_0 - \frac{a_e}{(1-\lambda)} \ln \left[1 + \frac{(1-\lambda) b_e S_0}{a_e} \right] \right]} \quad (17)$$

上式即为桩顶荷载与沉降的表达式。

对于桩侧土为多层土时也不难得到:

$$Q_0 = \frac{A S_b (1-\lambda)}{a_b + b_b S_b (1-\lambda)} + \frac{\omega}{b_{ei}} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left[b_{ei} S_{ei} - \frac{a_{ei}}{(1-\lambda)} \ln \left[1 + \frac{(1-\lambda) b_{ei} S_{ei}}{a_{ei}} \right] \right]} \quad (18)$$

式中 a_{ei} , b_{ei} 表示与桩侧第 i 层土的性质有关的荷载传递函数参数; n 为桩深范围内的土层数。

4. 公式的应用方法

对于图 3 所示的桩基础, 设在桩顶荷载 Q_0 作用下桩端产生的沉降为 S_b , 桩顶沉降为 S_0 , 当土分层为两层时, 此时有:

$$\sigma_b = \frac{S_b (1-\lambda)}{a_b + b_b S_b (1-\lambda)} \quad (19a)$$

$$Q_b = \frac{A S_b (1-\lambda)}{a_b + b_b S_b (1-\lambda)} \quad (19b)$$

$$\tau_b = \frac{S_b (1-\lambda)}{a_{ei} + b_{ei} S_b (1-\lambda)} \quad (19c)$$

国内外大量实测资料表明: 在同一土层内桩身轴力沿深度近似成直线分布。因此, 在计算桩的弹性压缩沉降量时, 第二层土桩身的轴力曲线均可近似地以直线代替, 即:

$$Q'_a = Q_b + u l_2 \tau_b \quad (20)$$

在 a~b 段桩身弹性压缩按胡克定律得到:

$$S_{ea} = \frac{(Q_b + Q'_a) l_2}{2EA} \quad (21)$$

代入(9)式得:

$$Q_{ea} = \frac{\omega}{b_2} \sqrt{\left[b_2 S_{ea} - \frac{a_2}{(1-\lambda)} \ln \left[1 + \frac{(1-\lambda) b_2 S_{ea}}{a_2} \right] \right]} \quad (22)$$

$$Q_a = Q_b + Q_{ea} \quad (23)$$

$$S_a = S_b + S_{ea} \quad (24)$$

当地表土层小于 15 m 时, 将 S_a 代入(3)式; 即:

$$\tau_1 = \frac{S_a (1-\lambda)}{a_1 + b_1 S_a^2 (1-\lambda)} \quad (25)$$

$$\tau_2 = \frac{S_a (1-\lambda)}{a_2 + b_2 S_a (1-\lambda)} \quad (26)$$

$$Q'_0 = Q_a + ul_1 \tau_1 \quad (27)$$

对于第一层土 $o-a$ 段桩同样使用胡克定律得到:

$$S_{ea0} = \frac{(Q_a + Q'_0) l_1}{2EA} \quad (28)$$

$$S_{e0} = S_{ea0} + S_{ea} \quad (29)$$

带入(9)式可得:

$$Q_{e0} = \frac{\omega}{b_1} \sqrt{\left[b_1 S_{e0} - \frac{a_1}{(1-\lambda)} \ln \left[1 + \frac{(1-\lambda) b_1 S_{e0}}{a_1} \right] \right]} \quad (30)$$

$$S_0 = S_b + S_{e0} = S_b + S_{ea} + S_{ea0} \quad (31)$$

当土层分为多层时, 计算过程同上, 令 S_b 等于不同的数值代入上述公式(19)~(31)即可得到不同的 Q_0 和 S_0 的值, 并可绘出 $Q_0 \sim S_0$ 关系曲线, 理论计算流程图如图 4 所示。

需要指出的是, 在计算桩的弹性压缩量时, 轴力分布用直线代替曲线分布会有一定误差, 但可以采

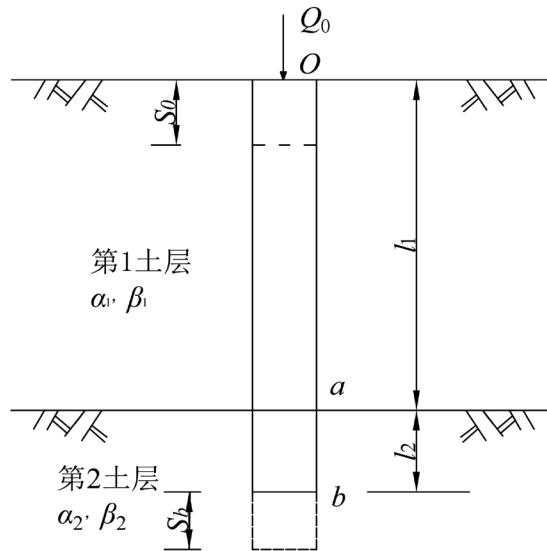


Figure 3. Diagram: Pile going deep into two layers of soil
图 3. 桩深入土层两层示意图

用迭代法提高精度[10]，也可以用 C 语言编制程序来进行计算。

5. 考虑桩端沉渣的影响

对于超长灌注桩，由于施工设备、技术及施工水平的影响，桩端不可避免残余有一定厚度的沉渣，沉渣越厚，桩顶沉降量越大，单桩极限承载力越低。所以，在超长桩的荷载传递分析中不能忽略这一因素的影响。这里，本文将沉渣层视为一个与桩身材料不同的桩端单元来考虑。为此，先设沉渣层厚度为 h_d ，压缩模量为 E_d ，桩端直径为 D ，则当沉渣层底面产生一个沉降为 S_{bd} 时，根据上式(12)、(13)可计算出持力层顶面 Q_{bd} 。此时，沉渣层与桩侧土间的平均摩阻力近似为：

$$\tau_d = \frac{S_{bd}(1-\lambda)}{a_d + b_d S_{bd}(1-\lambda)} \quad (32)$$

式中， a_d ， b_d 为沉渣层的侧阻荷载传递参数。此时，沉渣层顶面的轴力(即桩端阻力)为：

$$Q_b = Q_{bd} + \pi D \cdot h_d \cdot \tau_d \quad (33)$$

沉渣层的平均轴力：

$$\bar{Q} = \frac{Q_b + Q_{bd}}{2} \quad (34)$$

沉渣层产生的压缩变形：

$$S_0 = S_b + S_{e0} = S_b + S_{ea} + S_{ea0} \quad (35)$$

$$\Delta S = \frac{\bar{Q} \cdot h_d}{E_d \cdot A_b} \quad (36)$$

考虑沉渣影响后的桩端沉降量为：

$$S_{bb} = S_{bd} + \Delta S \quad (37)$$

则按上式(32)~(37)计算得到的 Q_b 和 S_{bb} 即被视为桩端阻力与桩端沉降。

6. 参数 a, b 的确定

传递参数 a ， b 是与土层深度有关。 $1/b$ 其实就是桩侧土的摩阻力极限值 τ_u 。对于 τ_u 的确定一般有三

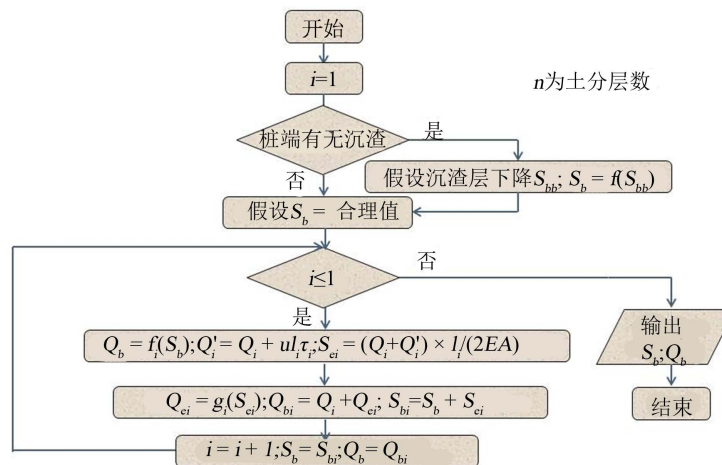


Figure 4. Flow chart: Theoretical calculation
图 4. 理论计算流程图

类方法,即 α, β, λ [11][12]法, α 法属于总应力法, β 法属于有效应力法, λ 法属于混合法。在此不再赘述。 $1/a$ 是与土的剪切模量有关的。Randolph和Wroth(1978)提出了弹性土中的桩可以用以下公式计算:

$$a = \frac{R_0 \ln\left(\frac{R_m}{R_0}\right)}{G_0} \quad (38)$$

其中, G_0 为土的初始剪切模量, R_0 为桩身半径, R_m 为剪切影响半径, 可由 $R_m = 2.5L\rho(1-\nu)$ 求得, 考虑土中剪切模量随深度的变化, 有 $\rho = G(L/2)/G(L)$, 即土中剪切模量在桩长一半处与桩底处的比值, ν 是桩周土的泊松比。 $\ln\left(\frac{R_m}{R_0}\right)$ 的变化不大, 一般在3~5之间, 没有详细数据时可取4。

7. 工程实例分析

工程概况引用文献[13]的内容, 某软土区大厦是一幢68层的超高层建筑, 总建筑面积23万平方米, 建筑总高323 m, 场地上部为20多米的淤泥、淤泥质粘土, 软土总厚度达50多米, 工程性状较差, 属典型的深厚软土地基。基础设计采用钻孔灌注桩, 桩长80-120 m, 桩径1100 mm, 桩身采用C40混凝土, 持力层中风化和强风化基岩, 单桩竖向承载力设计值为13,000 kN, 最大试验荷载25,200 kN。地基土物理力学性质指标见表1, 运用本文理论推导式进行计算与分析。由于本文算例持力层较好且清孔后滞留沉渣少, 故公式中各土层岩土参数 K 均取0, 桩的弹性模量 $E = 3.47 \times 10^7$ kPa, 公式中 m 值取2。

由图5可知, 利用本文的理论推导公式计算与文[13]实测结果较为接近, 说明用本文的理论计算是可行的, 与实测曲线存在差别是由于 a, b, K 的取值不同所决定的。对于 a, b 的取值可以采用黄金分割法进行优选[6]或有详细数据时, 根据土性指标拟合各层的荷载传递函数[7]来达到提高计算的精确度。另外, 上述计算过程也可利用C语言编制程序进行迭代计算。同时, 从图中可以看出, 利用波尔茨曼函数模型拟合相关系数也达到了0.993, 同样说明了波尔茨曼函数能较好拟合实测桩顶沉降。

8. 结论

(1) 基于软土区超长桩荷载传递特性的研究, 考虑了土的连续性, 采用修正双曲线模型进行理论推导,

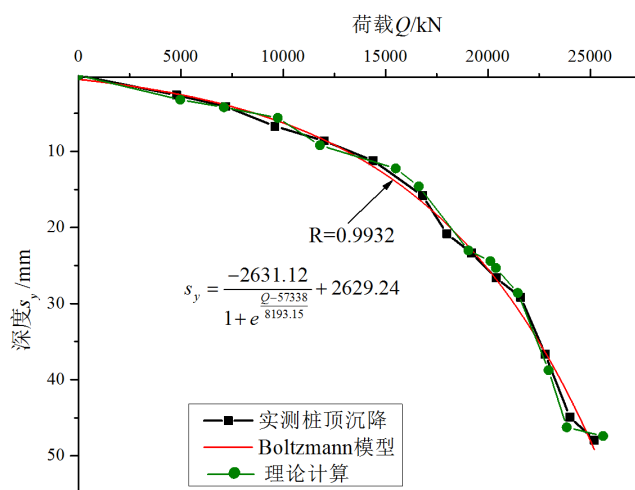


Figure 5. Curves: Measured pile roof subsidence, Boltzmann fitting and theoretical calculation

图5. 实测桩顶沉降, 波尔茨曼拟合和理论计算曲线

Table 1. The physical mechanicals properties of foundation soil
表 1. 地基土物理力学性质指标

层序	岩土名称	层厚/m	$\omega/\%$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	f_k/kPa	E_s/MPa	q_{sa}/kPa	q_{pa}/kPa
1	杂填土	2.4	43.5	17.38	-	-	-	-
3-1	淤泥	12.9	70.1	15.67	42	1.0	5.0	-
3-2	淤泥	8.7	64.7	16.1	52	1.5	8.0	-
3-3	淤泥质粘土	1.5	50.5	17.27	70	2.8	10.0	-
4-1	粘土	3.4	32.9	19.06	150	5.5	22.5	250
4-2	粘土	6.1	40.9	18.2	100	4.5	17.5	200
5-1	粉质粘土夹粘土	3.3	29.9	19.33	160	6.0	23.5	275
5-2	粘土	4.7	37	18.55	130	5.0	20.0	225
6-1	粘土夹粉质粘土	7.5	29.6	19.49	180	6.5	27.5	400
6-2	粘土	0.5	36.8	18.4	130	5.0	20.0	225
8	粉质粘土混碎石	3.0	-	-	170	6.0	25.0	350
9-1-1	全风化基岩	35.7	-	-	190	7.0	27.5	600
9-1-2	全风化基岩	23.1	-	-	250	8.5	35.0	1250
9-2	强风化基岩	6.95	-	-	400	-	45.0	2500
9-3	中风化基岩	-	-	-	2500	-	-	-

并考虑了表层土的软化性质，进行荷载传递函数的改进。

(2) 对于有底部沉渣的超长桩，考虑了底部沉渣的影响，提高了理论计算的精确性。

(3) 通过算例验证了理论推导与实测有较好的吻合性，具有一定的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 郭一斌, 赵广民, 张立明, 徐泽民. 软土地区大直径超长桩承载性状研究[J]. 建筑结构, 2015(21): 74-78.
- [2] 陈卫兵, 王鉴, 许小健. 调整双曲线法在支盘桩极限承载力预估中的应用[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(6): 1563-1565+1575.
- [3] 赵春风, 李尚飞, 鲁嘉, 等. 完整指数函数拟合单桩荷载[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 486-492.
- [4] 蒋建平. 管桩承载性状的数学描述[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 189-195.
- [5] 王智杰. 超长灌注桩单桩沉降特性的试验与理论研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [6] 阳吉宝. 超长桩荷载传递机理与桩箱(筏)基础优化设计研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 1996.
- [7] 张仕励, 李熹, 凌辉. 基于传递函数法的超长单桩沉降计算[J]. 地质与勘探, 2003, 39(s2): 284-287.
- [8] Wei, D.G. and Randolph, M.F. (1998) Rationality of Load Transfer Approach for Pile Analysis. *Computers and Geotechnics*, **34**, 85-112.
- [9] 张蕾, 高广运. 大直径扩底桩尺寸效应的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 83-87.
- [10] 肖宏彬, 钟辉虹, 王永和. 大直径桩荷载-沉降关系的计算方法[J]. 中外公路, 2002, 22(3): 52-55.
- [11] 史旦达, 刘文白, 蒋建平, 邓益兵, 基础工程[M]. 上海: 上海浦江教育出版社, 2013: 99-100.
- [12] Vjayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972) A New Way to Predict the Capacity of Piles in Clay. *Proceedings of the 4th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, 1-3 May 1972, 865-874.
- [13] 陈尚平. 软土地基超长桩荷载传递及负摩阻力研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2008.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org