

Theoretical Deduction of the Design Load Controlled by Deposition for the Super-Long Single Pile

Yanfen Wang, Yuangang Ma, Yanfeng Liu

Bridge Science Research Institute Ltd., China Railway Major Bridge Engineering Group, Wuhan Hubei
Email: yinying20015@163.com

Received: Jun. 29th, 2015; accepted: Jul. 17th, 2015; published: Jul. 24th, 2015

Copyright © 2015 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

Abstract

There are differences for mechanisms of bearing forces and distortions between super long piles and common short piles. Practical engineering needs to control loads by deposition, which results in its design in the contradiction theory with practice. By the experience of practical engineering, this paper sums up the load transfer formula of the super-long single pile. Then considering the soil influence factors and combining with the existing load transfer formula of pile end, the load theoretical formula of pile head controlled by deposition of pile head is deduced. Subsequently the computing procedures are compiled. The instance result answers to the actual. The results of the paper have reference value for the design and further study of super-long single pile.

Keywords

Super-Long Single Pile, Deposition, Load Transfer Mechanism of Pile Side, Load Transfer Mechanism of Pile End

由沉降控制荷载的超长单桩设计理论推导

王艳芬, 马远刚, 刘彦峰

中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司, 湖北 武汉
Email: yinying20015@163.com

收稿日期：2015年6月29日；录用日期：2015年7月17日；发布日期：2015年7月24日

摘要

超长桩的承载变形机理与普通短桩不同，实际工程中需要通过沉降来控制荷载，导致其设计存在理论与实际的矛盾。本文通过实际工程经验总结出了超长单桩桩侧荷载传递公式，并与现有的桩端荷载传递公式结合，考虑土层影响因素，推导出了由桩顶沉降控制超长单桩桩顶荷载的理论公式，编写了计算程序，实例计算结果符合工程实际。本文的结果对超长单桩的设计及进一步的研究具有参考价值。

关键词

超长单桩，沉降，桩侧荷载传递机理，桩端荷载传递机理

1. 引言

规范中基桩的设计多以承载力为控制指标，但对超长桩而言，桩顶沉降量对结构的安全至关重要，工程中往往需要由桩顶沉降量来控制桩的竖向承载力。本文在荷载传递解析法的基础上，针对桩周土体成层的特点，由实际工程经验推导了超长单桩的竖向侧阻荷载传递模型，并由此建立了桩顶沉降量与竖向承载力之间的关系，提出按桩顶沉降量控制基桩竖向承载力的分析方法。

2. 大直径超长基桩荷载传递机理

2.1. 大直径超长基桩桩侧阻力传递机理

国内外众多研究者对超长桩侧阻力的研究，一般采用荷载传递法，因此提出了多种荷载传递函数。目前，工程上采用比较多的是双折线模型、三折线模型和假设由数个函数组合的传递函数：

$$f(s) = \frac{A_1 s}{B_1 + s} + \frac{A_2 s}{B_2 + s^2} + \frac{A_3 s}{(B_3 + s)^2} + A_4 [1 - \exp(-B_4 s)] + A_5 s \exp(-B_5 s) + A_6 \exp(-B_6 s) \quad (1)$$

式中， $f(s)$ 为桩侧(或桩端)摩阻力； s 为桩身位移或桩端沉降； A_1, A_2, \dots, A_6 及 B_1, B_2, \dots, B_6 为参数。

由于上式各项中的参数很难确定，故实际分析中仅选用某一项作为荷载传递函数来分析实际工程中单桩受力情况。

在众多学者的研究中，阳吉宝[1]在多次研究后，考虑土的连续性，将式(1)中第一项，即双曲线函数修正后作为传递函数

$$\tau(z) = \frac{Au [1 - C(z/L)^{1.5}]}{B + u [1 - C(z/L)^{1.5}]} \quad (2)$$

式中， A, B ——岩土参数； C ——综合参数，按表1取值，可以分层； L ——桩长。

由式(1)传递函数表达式的第一项

$$\tau(z) = \frac{Au}{B + u} = \frac{u}{a + bu} \quad (3)$$

对该式分析，不难发现，当剪切位移 u 无限大时，桩侧摩阻力接近一常数。

$$\lim_{u \rightarrow \infty} \tau = \lim_{u \rightarrow \infty} \frac{u}{a+bu} = \lim_{u \rightarrow \infty} \frac{Au}{B+u} = \frac{1}{b} = A = \tau_m \quad (4)$$

可见 A 的物理意义是描述桩侧极限摩阻力的一个常数。当剪切位移趋于 0 时

$$\lim_{u \rightarrow 0} \frac{\tau}{u} = \lim_{u \rightarrow 0} \frac{u}{a+bu} = \lim_{u \rightarrow 0} \frac{Au}{B+u} = \frac{1}{a} = \frac{1}{B} = \bar{K} \quad (5)$$

趋近于过原点所做的 $\tau \sim u$ 曲线的斜率 \bar{K} ， B 的物理意义为 \bar{K} 的倒数。

对式(2)进行转化可得

$$\tau(z) = \frac{Au}{u+B\sqrt{1-C(z/L)^{1.5}}} \quad (6)$$

可以看出，式(6)是在式(3)的基础上，对系数 B 除以一个小于 1 的系数，也即对 B 进行了放大。而我们在实际工程中，根据工程经验，获得了下式

$$\tau(z) = \frac{Au_1}{u_1+B\left[1+k(z/L)^{0.25}\right]} \quad (7)$$

式中， u_1 的单位取为 mm； $\tau(z)$ 的单位取为 kPa； k 是岩土体综合参数，分层取值，见表 2。

2.2. 实例

南京水利科学研究院在 400 gt 土工离心机上对某大桥桩基进行了模型试验。根据工程地质勘测报告 [2]，可以确定出每层土的 A 和 B 值分别取 15 和 0.6， d 取为 0.5。计算结果和试验测试结果对比如图 1。

从图 1 可以看出，本文总结的超长单桩桩侧传递函数能较好地反映桩顶荷载沿桩体的传递规律。

3. 由桩顶沉降控制超长单桩竖向承载力

取桩端荷载传递函数如下[3]

$$q(u) = \frac{au_2(1-c)}{b \pm u_2(1-c)} \quad (8)$$

式中， a ， b 为岩土参数； c 为综合参数，意义同桩侧阻。

由上文的桩侧和桩端荷载传递函数，借用数学手段，计算桩顶沉降处于不同水平所对应的桩顶荷载值，实现以桩顶沉降量来控制基桩承载力的设想。

在分析桩顶沉降控制值 $[u]$ 所对应的桩顶荷载值 P 时，首先需确定桩身处于承载极限状态下的桩顶荷载 P_{\max} 及对应的桩顶沉降量 u_{\max} 这两个重要的判别参数，其计算步骤如下：

Table 1. C value scope

表 1. C 值取值范围

桩长/m	>45	45~30	30~10	<10
C	0.75~0.30	0.50~0.20	0.35~0.10	<0.1

Table 2. K value scope

表 2. k 值取值范围

桩长/m	>60	60~40	40~10	<10
K	>1	1.0~0.01	0.01~0.002	<0.002

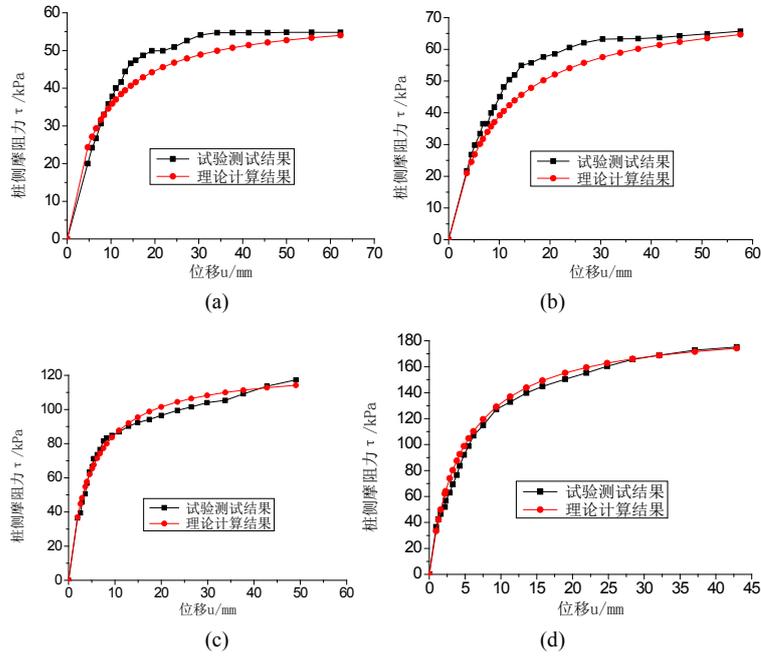


Figure 1. The relationship contrast figure of pile side friction and the relative displacement between of piles and soil by test and calculation; (a) pile 1; (b) pile 2; (c) pile 3; (d) pile 4

图 1. 试验与计算的桩侧摩擦力与桩土相对位移的关系对比图；(a) 桩 1；(b) 桩 2；(c) 桩 3；(d) 桩 4

(1) 按不同土层划分桩身单元，共 n 层，计 $n + 1$ 个截面；

(2) 当桩身处于承载极限状态时，各土层侧阻及端阻均得到充分发挥，侧阻实际变形 u_i^m 均应不小于变形临界值 u_{li} ，桩端土的变形应不小于 u_2 。桩身各截面的轴力和变形计算如式(8)。根据 Bowles [4] 的研究，发挥最大侧阻所需土层滑动量的数量级大约为 5~10 mm，计算时根据岩土的实际情况取值；

(3) 式(8)还可用于计算当桩身处于非极限状态时桩身的荷载分布和沉降。此时，各土层侧阻及端阻尚未充分发挥，侧阻实际变形及桩端土的变形可取较小值 0~5 mm。

$$\begin{aligned}
 u_{\max} &= u_1^m ; \\
 P_{\max} &= P_1^m ; \\
 P_{n+1}^m &= \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{a u_2 (1-c)}{b \pm u_2 (1-c)} ; \\
 P_i^m &= P_{i+1}^m + \frac{A_i u_{li}}{u_{li} + B_i [1 + k_i (z_i/L)^{0.25}]} \cdot \pi d h_i ; \\
 u_n^m &= \begin{cases} u_2 + \frac{P_{n+1}^m + P_n^m}{2EA'} h_n, & \text{取较大值;} \\ u_{1n} \end{cases} \\
 u_i^m &= \begin{cases} u_{i+1}^m + \frac{P_{i+1}^m + P_i^m}{2EA'} h_i, \\ u_{li} + \frac{P_{i+1}^m + P_i^m}{2EA'} h_i \end{cases}, \text{取较大值。}
 \end{aligned}$$

式中, d ——桩径(m); P_i^m ——桩身 i 截面上的轴力值, $i = n, n-1, \dots, 1$, 下同(kN); u_i^m ——桩身 i 截面的竖向变形量(mm); E ——桩身弹性模量(1×10^6 Pa); A' ——桩身截面积(m^2); h_i ——桩身第 i 层土体厚度(m)。

若 u_{\max} 不大于预期沉降控制值 $[u]$, 则桩顶承载力 $P = P_{\max}$, 可结束计算; 否则, 调整综合参数 c 、 k_i 和各土层变形临界值 u_{li} 至计算结果满足 $u_{\max} \leq [u]$ 。如若计算非极限状态时桩身荷载和沉降的关系, u_{li} 系各土层的竖向变形量。

为便于工程应用, 现以上述分析原理和方法, 采用 FORTRAN 语言, 编制了相应的计算程序, 计算的程序框图如图 2 所示。

具体计算时, 应根据现场试桩结果确定岩土参数 A 、 B 及 k 值, 并计算相同岩土环境下的其它超长单桩沉降及桩顶承载力。

4. 计算实例

本节以苏通大桥北岸 N-1 静载荷试桩试验资料为例, 对本课题推导的以沉降控制荷载的方法及开发的程序进行校验。

现场勘查资料显示, 桥位区所处地层主要为粉砂、粉砂与亚粘土互层、粉砂、亚粘土、砾砂。

试桩直径 1.0 m, 桩长 76 m, 桩顶标高+2.2 m, 桩底标高-73.8.0 m。静载试验采用锚桩法, 加载为

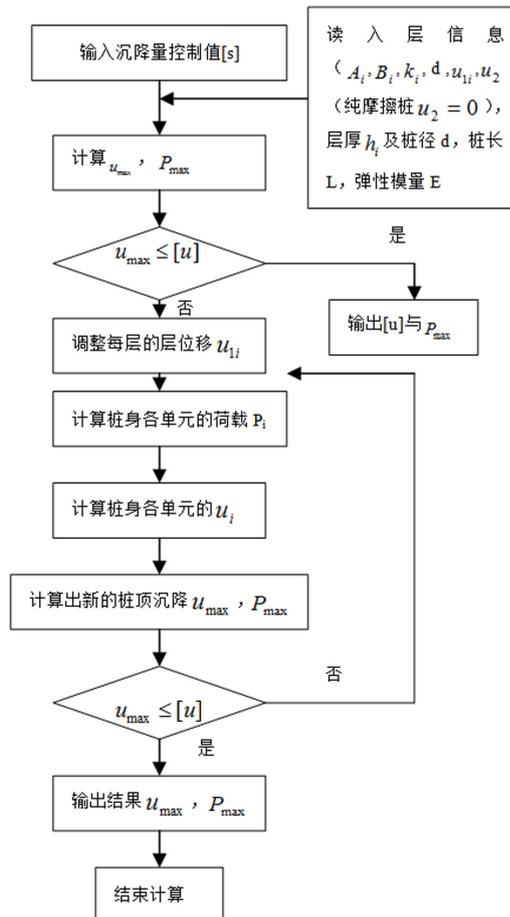


Figure 2. Program calculation diagram

图 2. 程序计算框图

慢速维持荷载法，最大加载量为 11,000 kN，共分 10 级，每级 1000 kN。试验的设计、成桩工艺和加卸载方法均严格按照相关规范进行操作。

实测资料提供的相应数据及各土层岩土参数如表 3。

表中， A_i ， B_i 是根据原始报告数据计算而来， k_i 根据岩土层情况取经验值。 a ， b 及 c 是桩端土层的参数，由底层的 A_i 、 B_i 和 c 计算而来，此处 $a = 0.010$ ， $b = 0.0083$ ， $c = 0.020$ 。本算例的预期沉降控制值 $[u] = 40 \text{ mm}$ ，计算的结果见图 3 和图 4 (公式中有“+”和“-”，本文的计算结果均取“-”时的大值)。桩顶不同外载作用下的位移则是调整每层的层位移 u_{ii} 计算而来。

由图 3 可以看出，在桩顶作用 10,000 kN 时，本文公式的计算结果可以很好的拟合试验测试结果，但数值计算的沿桩身的轴力则要大于实际测试结果。

图 4 中，在相同桩顶荷载的作用下，本文公式计算的桩顶沉降普遍要大于实际测试的结果，即本文公式由沉降控制桩顶荷载时，计算出的荷载普遍要小于测试结果，结果偏于保守。而数值计算的位移要大于测试和本文公式计算的。

桩顶总沉降量大于或等于 40 mm 时，达到破坏标准值，根据本文公式计算可得此时的桩顶荷载为 11,358 kN，即由沉降控制计算而来的桩极限承载力为 10,000~11,000 kN，和实际测试结果相符。

Table 3. The measured soil data
表 3. 实测土层数据

层数	层底标高(m)	极限侧摩阻力(kPa)	相对位移实测值(mm)	A_i	B_i	k_i
1	-7.3	34.09	6.57	34.09	0.150	0.001
2	-13.3	37.42	12.72	37.42	0.140	0.005
3	-21.8	39.71	7.28	39.71	0.055	0.003
4	-29.3	51.25	6.29	51.25	0.030	0.006
5	-40.0	47.68	3.89	47.68	0.020	0.003
6	-50.8	>47.64	1.77	45	0.012	0.015
7	-58.8	>70.03	0.59	60	0.007	0.01
8	-67.9	>23.71	0.15	75	0.006	50.6
9	-97.8	>19.58	0.01	120	0.005	6.9

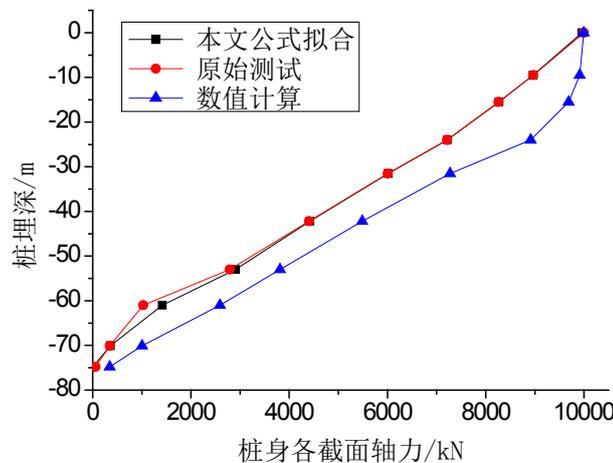


Figure 3. The axial force distribution along the pile shaft when the pile load is 10,000 kN
图 3. 桩加载 10,000 kN 时沿桩身轴力分布图

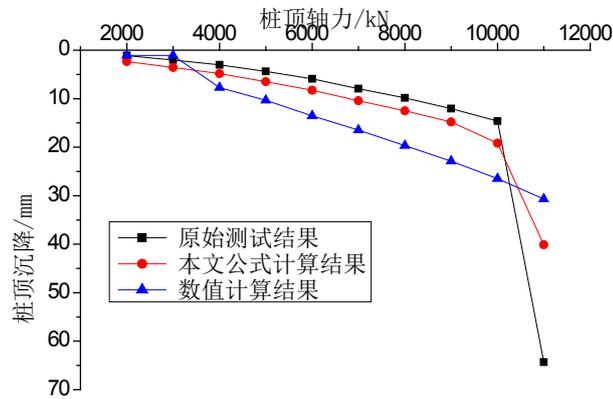


Figure 4. The load-displacement (Q-S) curve
图 4. 桩的荷载 - 位移(Q-S)曲线

5. 小结

本文在荷载传递解析法的基础上由工程实践提出了一种新的基桩桩侧摩阻力传递模型，并推导了全桩荷载分布函数，编写了由沉降控制桩顶荷载的程序，适用于不考虑深度效应的灌注桩。

计算实例表明该方程可以很好地模拟基桩的桩身荷载分布，并能由桩顶沉降控制值计算出桩的极限承载力，对超长单桩的设计具有优化作用。

参考文献 (References)

- [1] 阳吉宝 (1996) 确定超长桩有效长度方法. *建筑科学*, **1**, 37-38.
- [2] 南京水里科学研究所 (2004) 苏通长江公路大桥主桥索塔群桩基础与土体共同作用离心模型试验研究报告. 2004, 4.
- [3] 阳吉宝 (1998) 超长桩的荷载传递机理. *岩土工程学报*, **20**, 108-112.
- [4] Bowles, J.E. (1987) 基础工程分析与设计. 唐念慈译, 中国建筑工业出版社, 北京.