



顶拉抗拔桩轴向荷载-位移曲线的解析拟合方法

杨碧莲, 马海龙

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 针对顶拉抗拔桩试验的数据处理问题, 采用荷载传递解析法和实测数据拟合, 提出一种顶拉抗拔桩轴向荷载-位移曲线的解析拟合方法。该方法首先假定桩侧土符合双折线硬化模型, 推导出一组顶拉抗拔桩在轴向荷载作用下荷载-位移曲线的解析解; 然后通过实测数据, 对桩侧土的传递函数曲线进行拟合, 得到抗剪刚度系数、弹性极限位移等计算参数; 最后利用解析解得到完整的顶拉抗拔桩荷载-位移曲线。将该解析拟合方法的计算荷载-位移曲线与实测曲线比较, 两者的吻合度较高。该方法能够准确地反映顶拉抗拔桩在轴向荷载作用下的荷载-位移特性, 也可用于计算层状地基中顶拉抗拔桩的荷载-位移曲线; 与荷载传递位移协调法相比, 无须实测各土层的传递函数, 计算更加简单快捷。该方法为预测同场地不同桩径、桩长的桩基性状提供了一种理论计算手段。

关键词: 顶拉抗拔桩; 极限承载力; 荷载-位移曲线; 荷载传递解析法; 荷载传递位移协调法

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)01-0103-06

Analytical fitting method for axial load-displacement curve of top-uplift piles

YANG Bilian, MA Hailong

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: For the test data processing problem of top-uplift piles, the load transfer analytical method and measured data fitting were adopted, and an analytical fitting method for axial load-displacement curve of top-uplift piles was proposed. Firstly, it was assumed that the pile side soil conformed to bilinear hardening load-transfer function, and a set of analytical solutions to the load-displacement curve under axial load of top-uplift piles was deduced. Then, the transfer function curve of pile side soil was fitted through the measured data to get calculating parameters such as shear stiffness coefficient and elastic limit displacement. Finally, the complete load-displacement curve of top-uplift piles was obtained by the above analytical solutions. The calculated load-displacement curve of this method was compared with the measured curve, and the goodness of fit of both was high. This analytical fitting method can accurately reflect the load-displacement characteristics of top-uplift piles under axial load and it can also be used to calculate the load-displacement curve of top-uplift piles in layered foundations. Different from the load transfer displacement coordination method, this method does not need to measure the transfer function of each soil layer, so the process of calculation is simpler and faster. In addition, it provides a theoretical calculation method for predicting the properties of pile foundation with different pile diameters and length on the same site.

Key words: top-uplift piles; ultimate bearing capacity; load-displacement curve; load transfer analytical method; load transfer displacement coordination method

收稿日期: 2020-09-08 网络出版日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878618)

作者简介: 杨碧莲(1994—), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事桩的承载力及变形方面的研究。

通信作者: 马海龙, E-mail: ma-hailong@163.com

0 引言

桩基是国内外建构筑物中应用最广泛的基础形式之一。根据使用功能,桩主要有竖向抗压桩和竖向抗拔桩。竖向抗压桩作为最原始、最基础的桩型,其承载特性体系的研究日益完善。随着输电线路杆塔、高耸建构筑物(如超高层楼房、塔桅结构等)、水闸、悬索桥和斜拉桥的建设,竖向抗拔桩的需求逐渐增加^[1-3]。为使桩的承载力在工程中得到充分发挥,桩基设计的首要工作是准确确定桩的极限承载力。桩的荷载-位移曲线是研究桩的承载力的主要指标。为得到完整的荷载-位移曲线,现场破坏性试桩试验必不可少。但对于一些超长桩、大直径桩,由于加载条件和场地的受限,试桩试验难度颇大。因此,探索一种适宜的理论方法,用于模拟计算单桩荷载-位移曲线很有必要。

在理论分析领域,关于单桩在轴向荷载作用下工作特性的研究方法主要有荷载传递法、弹性理论法^[4]、剪切位移法、有限单元法^[5]、边界单元法^[6]和混合法等。其中,荷载传递法具有计算简便、结果直观,能模拟桩-土间真实的荷载传递关系,很好地反映桩-土间非线性特性等优点,在目前研究中应用最为广泛。荷载传递法最早由 Seed 等^[7]提出。Coyle 等^[8]在荷载传递法的基础上提出了荷载传递位移协调法,它是将桩身划分为有限个单元体,找到每个桩身单元中内力与位移间的协调关系,从而求解出单桩在受荷时的荷载和位移。龚维明等^[9]根据自平衡试桩与传统静载试桩对比的试验结果,利用精确转换法(即荷载传递位移协调法),将自平衡试桩上、下段桩的试验结果转换为等效的桩顶荷载-位移曲线。张绍斌等^[10]采用荷载传递位移协调法,不考虑桩周土软化现象,用双曲线模型模拟桩侧摩阻力,建立荷载增量与变形增量之间的迭代关系,推导出了考虑桩身自重的抗拔桩基本微分方程。荷载传递位移协调法已被相关学者用于多种桩型的承载力研究,但由于该法需要实测各个土层的传递函数,仍存在实际操作不够简便、土层传递函数获取困难等问题。

目前,关于单桩承载力最常用的研究方法为荷载传递解析法^[11-12]。荷载传递解析法是将特定的荷载传递函数和边界条件应用于桩土,列出解析解公式并求解单桩的荷载-位移曲线^[13]。桩-土实际的荷载传递函数较为复杂,一般需将其简化,简化后的函数模型主要有双折线硬化模型、三折线模型、线弹性-全塑性模型、指数函数模型和双曲线模型

等^[14-15]。陈龙珠等^[16]采用双折线硬化模型,推导出了单桩在轴向顶压荷载作用下的荷载-沉降曲线的解析表达式,并借此分析了桩侧及桩端土的特性对荷载-沉降曲线形状的影响,以及桩承载力与其加载初始刚度间的关系。奚笑舟等^[17]在考虑桩身重力作用的前提下,假定桩侧土荷载传递函数符合三折线模型,推导出了底托抗拔桩荷载-位移曲线的解析算式。熊巨华等^[18]采用双折线模型和三折线模型,分别模拟桩侧土和桩端土的荷载传递函数,得出了自平衡试桩上、下段桩的荷载-沉降曲线的解析解,并利用解析解将自平衡试桩结果转换为传统静载试验曲线。然而,现有的研究均以传统顶压桩和底托抗拔桩为研究对象,对于顶拉抗拔桩的研究较少。底托抗拔桩和顶拉抗拔桩的受力特性因荷载作用点不同而存在区别。前者在桩端处受荷,荷载表现为压力,桩身产生压缩;后者在桩顶处受荷,荷载表现为拉力,桩身产生拉伸。因此底托抗拔桩和顶拉抗拔桩的基本微分方程不同,最终的荷载-位移曲线解析表达式也不相同。

本文以顶拉抗拔桩为研究对象,采用荷载传递解析法,通过双折线硬化模型模拟桩侧摩阻力的传递特性,推导顶拉抗拔桩荷载-位移曲线的解析解,用实测数据拟合桩侧土的荷载传递函数参数,最后将解析拟合方法所得的荷载-位移曲线与工程实测曲线对比来验证本方法的准确性。研究结果对预测相似场地,不同桩径、桩长的桩基传递性状具有实际应用价值。

1 基本微分方程和荷载传递函数模型

1.1 基本微分方程

根据桩身材料特性和静力平衡原理^[19],可知桩身位移 W 、桩身轴力 Q 和桩侧摩阻力 q_s 的关系式。取桩身任意处 Z 的微小桩段 dZ ,微小桩段受力模型见图 1。

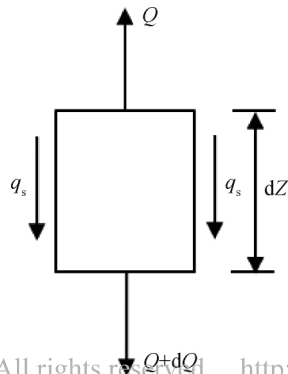


图1 微小桩段受力模型

由静力平衡关系可得:

$$Q = Q + dQ + U \cdot q_s \cdot dZ$$

即:

$$q_s = -\frac{1}{U} \cdot \frac{dQ}{dZ} \quad (1)$$

又根据桩身拉伸变形 dW 与轴力 Q 之间的关系 $dW = Q \cdot dZ/EA$, 可以得到 Z 断面轴力 $Q = EA \cdot dW/dZ$, 将 Z 断面轴力 Q 的表达式两边对 Z 求导后代入式(1), 整理后可得:

$$\frac{d^2 W}{dZ^2} = -\frac{U \cdot q_s}{EA} \quad (2)$$

其中: U 为桩身周长; E 为桩身弹性模量; A 为桩身横截面面积。式(2)就是顶拉抗拔桩的基本微分方程。

1.2 荷载传递函数模型

荷载传递函数模型主要分为分段线性模型和非线性模型两类。桩在受荷时, 存在两个传递特性^[19]: 一是随着荷载的增大, 桩土间会出现相对滑移现象; 二是桩周土体会经历由浅到深逐渐进入塑性硬化阶段直至破坏的过程。一般的荷载传递函数均可完整描述以上两个传递特性。

在分段线性模型中, 用双折线硬化模型得到的荷载-位移解析解具有较高的精度, 且相较三折线模型, 计算更加方便快捷。而对于指数函数模型和双曲线模型, 它们虽能更好地表达桩土间荷载传递关系, 但由于模型是非线性的, 它们难以得到完备的荷载-位移解析解。

故综合考虑精确度、计算量、可行性三方面, 本文桩侧土的荷载传递函数模型采用双折线硬化模型, 该模型的传递函数曲线如图 2 所示。图中折线斜率 $\lambda_i (i=1, 2)$ 为桩侧土的抗剪刚度系数; W_1 为桩侧土的弹性极限位移。

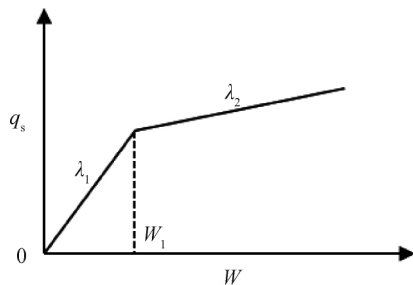


图 2 双折线硬化模型的桩侧土荷载传递函数曲线

由图 2 可知, 桩侧土的荷载传递函数表达式为:

$$\begin{cases} \lambda_1 W, & 0 \leq W < W_1 \\ \lambda_1 W_1 + \lambda_2 (W - W_1), & W \geq W_1 \end{cases} \quad (3)$$

2 解析解推导及参数确定

2.1 基本假设和推导思路

荷载传递解析解推导作如下基本假设: a) 桩身为线弹性等截面直杆; b) 桩侧地基土为单层均质土。

当荷载较小时, 桩周土完全处于弹性阶段; 当荷载逐渐增大时, 桩周土自桩顶的加载点处开始向下进入塑性状态, 示意图如图 3 所示, 其中: L 为桩长, l_1 和 l_2 分别为桩周土进入塑性区和弹性区的长度; 当荷载进一步增大, 桩侧土完全进入塑性硬化阶段。

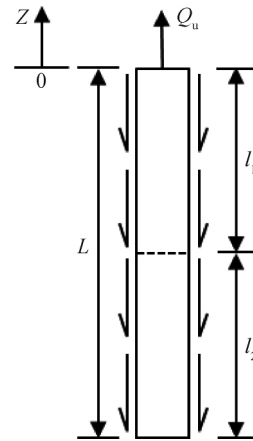


图 3 顶拉抗拔桩桩周土进入塑性阶段示意图

解析解推导思路为: 当顶拉抗拔桩桩顶部分的桩周土开始向下进入塑性阶段时, 在基本微分方程中分别引入塑性段和弹性段的荷载传递函数, 结合塑性段和弹性段临界处的荷载、位移连续条件和边界条件, 解出微分方程, 就可得到顶拉抗拔桩荷载-位移曲线的解析解。

求解时, 以加载点为坐标原点, 以加载方向为正, 即以向上为正(如图 3 所示)。桩长 L 对应加载点荷载为 Q_u , 位移为 S_u 。

2.2 桩周土局部处于塑性阶段

在塑性区开展范围 $-L < -l_1 \leq 0$, 此时同时存在处于塑性阶段和弹性阶段的桩侧土, 将荷载传递函数(3)分别代入基本微分方程(2), 得:

$$\begin{cases} \frac{d^2 W_a}{dZ^2} = -\frac{U}{EA} [\lambda_1 W_1 + \lambda_2 (W_a - W_1)], & -l_1 \leq Z \leq 0 \\ \frac{d^2 W_b}{dZ^2} = -\frac{U}{EA} \lambda_1 W_b, & -L \leq Z < -l_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中: W_a 为塑性区的桩身位移; W_b 为弹性区的桩身位移。

边界条件为:

$$\left. \frac{dW}{dZ} \right|_{Z=-L} = 0, \quad W_a|_{Z=0} = W_u \quad (5)$$

连续条件为:

$$\left. \frac{dW_a}{dZ} \right|_{Z=-l_1} = \left. \frac{dW_b}{dZ} \right|_{Z=-l_1},$$

$$W_a|_{Z=-l_1} = W_b|_{Z=-l_1} \quad (6)$$

令 $\alpha_i = \sqrt{U\lambda_i/EA}$ ($i=1,2$), 则方程组(4)整理后得:

$$\begin{cases} \frac{d^2 W_a}{dZ^2} = (\alpha_2^2 - \alpha_1^2)W_1 - \alpha_2^2 W_a, & -l_1 \leq Z \leq 0 \\ \frac{d^2 W_b}{dZ^2} = -\alpha_1^2 W_b, & -L \leq Z < -l_1 \end{cases} \quad (7)$$

微分方程组(7)解得:

$$\begin{cases} W_a = b_1(\cos\alpha_2 Z + b_2 \sin\alpha_2 Z) - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_2^2}{\alpha_2^2} W_1 \\ = b_1(\cos\alpha_2 Z + b_2 \sin\alpha_2 Z) - mW_1, \\ W_b = b_3(\cos\alpha_1 Z + b_4 \sin\alpha_1 Z), \end{cases}$$

其中: $m = (\alpha_1^2 - \alpha_2^2)/\alpha_2^2$ 。

根据边界条件 $W_a|_{Z=0} = b_1 - mW_1 = S_u$, 解得:

$$b_1 = S_u + mW_1.$$

根据边界条件 $dW_b/dZ|_{Z=-L} = b_3\alpha_1(\sin\alpha_1 L + b_4 \cos\alpha_1 L) = 0$, 解得:

$$b_4 = -\tan\alpha_1 L.$$

再根据 $Z = -l_1$ 处的连续条件(6)得:

$$\begin{cases} b_1\alpha_2(\sin\alpha_2 l_1 + b_2 \cos\alpha_2 l_1) = \\ b_3\alpha_1(\sin\alpha_1 l_1 + b_4 \cos\alpha_1 l_1) \\ b_1(\cos\alpha_2 l_1 - b_2 \sin\alpha_2 l_1) - mW_1 = \\ b_3(\cos\alpha_1 l_1 - b_4 \sin\alpha_1 l_1) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中两等式相除, 可得:

$$\frac{b_1\alpha_2(\sin\alpha_2 l_1 + b_2 \cos\alpha_2 l_1)}{b_1(\cos\alpha_2 l_1 - b_2 \sin\alpha_2 l_1) - mW_1} = \frac{\alpha_1(\tan\alpha_1 l_1 + b_4)}{1 - b_4 \tan\alpha_1 l_1},$$

令

$$b_5 = \frac{\alpha_1(\tan\alpha_1 l_1 + b_4)}{1 - b_4 \tan\alpha_1 l_1}, b_6 = \alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1,$$

得:

$$b_2 = \frac{\alpha_2 \sin\alpha_2 l_1 - b_5 \cos\alpha_2 l_1}{b_6} - \frac{b_5 \cdot mW_1}{b_1 b_6}.$$

根据式(6)连续条件 $W_a(-l_1) = W_b(-l_1) = W_1$, 可得:

$$W = W_1 \frac{(m+1)\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1}{\alpha_2} - mW_1,$$

则:

$$b_1 = W_1 \frac{(m+1)\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1}{\alpha_2}$$

因 $Q_u = EA \cdot dW_a/dZ|_{Z=0}$, 则:

$$Q_u = EA \cdot \alpha_2 b_1 b_2 = EAW_1 \left[\frac{\alpha_2 b_5 m}{\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1} - \frac{(m+1)\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1}{\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1} \cdot \frac{-\alpha_2 \sin\alpha_2 l_1 + b_5 \cos\alpha_2 l_1}{\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1} \right].$$

最后得到:

$$\begin{cases} Q_u = EAW_1 \left[\frac{\alpha_2 b_5 m}{\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1} - \frac{(m+1)\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1}{\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1} \cdot \frac{-\alpha_2 \sin\alpha_2 l_1 + b_5 \cos\alpha_2 l_1}{\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1} \right] \\ S_u = W_1 \frac{(m+1)\alpha_2 \cos\alpha_2 l_1 + b_5 \sin\alpha_2 l_1}{\alpha_2} - mW_1 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)是 Q_u 和 S_u 关于 l_1 的函数, 随着塑性区 l_1 ($-L < -l_1 \leq 0$) 的开展范围增大, 可得 $Q_u - S_u$ 曲线。

当 $l_1 = 0$ 时, 桩周土处于弹性阶段和塑性开展的临界状态, 此时位移和荷载为: $S_u = W_1, Q_u = EAW_1 \alpha_1 \tan\alpha_1 L$ 。因此, 当桩周土处于弹性阶段时, 位移和荷载的关系为:

$$\frac{Q_u}{S_u} = EA\alpha_1 \tan\alpha_1 L \quad (10)$$

2.3 桩周土均处于塑性阶段

此时, 全桩长范围均处于塑形开展区, 即 $l_1 = L$, 基本微分方程变为:

$$\frac{d^2 W_c}{dZ^2} = -\frac{U}{EA} [\lambda_1 W_1 + \lambda_2 (W_c - W_1)].$$

其中: W_c 为桩周土均处于塑性状态时桩身位移。

边界条件为:

$$\left. \frac{dW_c}{dZ} \right|_{Z=-L} = 0, W_c|_{Z=0} = S_u,$$

解得:

$$W_c = b_7(\cos\alpha_2 Z + b_8 \sin\alpha_2 Z) - mW_1.$$

由边界条件得:

$$b_7 = S_u + mW_1, b_8 = \tan\alpha_2 L,$$

所以,

$$W_c = (S_u + mW_1)(\cos\alpha_2 Z + \tan\alpha_2 L \cdot \sin\alpha_2 Z) - mW_1.$$

又因为 $Q_u = EA \cdot dW_c/dZ|_{Z=0}$, 则:

$$Q_u = EA\alpha_2 (S_u + mW_1) \tan\alpha_2 L \quad (11)$$

由式(11)知, 当桩周土全部处于塑性阶段时, 荷载与位移呈线性关系, 斜率为 $EA\alpha_2 \tan\alpha_2 L$ 。

由式(10)和式(11)可知, 当给定试桩试验曲线, 便可确定参数 $W_1, \lambda_1, \lambda_2$ 。

2.4 拟合方法及其参数确定

若仅有工程试桩的实测数据, 桩侧土传递函数曲线拟合步骤如下: 由式(10)可以看出, 当桩周土处

于弹性阶段时,位移和荷载成正比,根据这一特征从试桩实测数据中找到桩周土处于弹性阶段和塑性开展阶段的临界荷载和临界位移,此临界位移便是参数 W_1 的值,再将临界荷载、临界位移及其他单桩特性已知量代入式(10),便可求得参数 λ_1 ;同理,由式(11)可知,当桩周土全部处于塑性阶段时,荷载和位移呈线性变化,将此时的荷载、位移及其他已知物理量代入式(11),便可计算出参数 λ_2 的值。

若能得到试桩实际所处地区的各土层传递函数的经验参数,可将其进行简化处理,由厚度加权平均法算出上述解析解公式中所需参数 $W_1, \lambda_1, \lambda_2$ 。但工程中关于确切土层传递函数的经验参数不多,所以解析解公式中所需参数 $W_1, \lambda_1, \lambda_2$ 多数仍是由与工程试桩的现场实测结果拟合后得到。

另外,上述所得的解析解公式适用于桩侧为单层均质地基土的等截面顶拉抗拔桩。对于分层地基,可将桩身按桩侧土的特性分为若干计算段,为简化计算,可将性质相似的土层合并为一个计算段,再由式(9)~(11)由加载点向下逐段递推计算得出顶拉抗拔桩荷载-位移曲线。

3 工程实例

为验证本文方法的合理性,以顶拉抗拔桩的两个实际工程为例,通过拟合后数据 $W_1, \lambda_1, \lambda_2$ 计算所得荷载-位移曲线,与实测曲线进行对比。

3.1 工程实例一

本实例的试验数据来自文献[20]。位于上海市闵行区莘庄镇的新梅莘苑地下车库采用了预制混凝土方桩作为该工程的桩基,承受抗拔作用,方桩编号为148号,混凝土等级为C30,桩身弹性模量 E 取 3.0×10^4 MPa,桩截面尺寸为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,等效直径 D 为 282 mm ,桩长 L 为 20 m ,桩身自重约为 30 kN 。根据桩周土完全处于弹性阶段时位移和荷载成正比的特征,从实测数据中得到临界荷载,即弹性极限位移 $W_1 = 1.1 \text{ mm}$;再将临界荷载、临界位移、桩长、桩径等物理量代入式(10)得到参数 $\lambda_1 = 7.1 \text{ MPa/m}$;同理,根据桩周土全部处于塑性阶段时荷载和位移呈线性变化的特性,将此阶段的实测荷载、位移等物理量代入式(11)得到参数 $\lambda_2 = 2.8 \text{ MPa/m}$;最后,将三个计算参数代入式(9),由Matlab软件计算得到荷载-位移曲线,因顶拉抗拔桩所受荷载与其自重方向相反,最终所得荷载值应加上桩身自重。解析法得到的荷载-位移曲线与实测曲线如图4所示。从图4中可以看出,双折线硬

化模型能很好地反映顶拉抗拔桩的荷载-位移关系特性。在整个加载过程中,解析法得到的理论值与实测值吻合度很高,荷载-位移曲线整体趋势一致,表明解析拟合曲线得到的模型参数具有较高的精度,能满足实际工程所需。

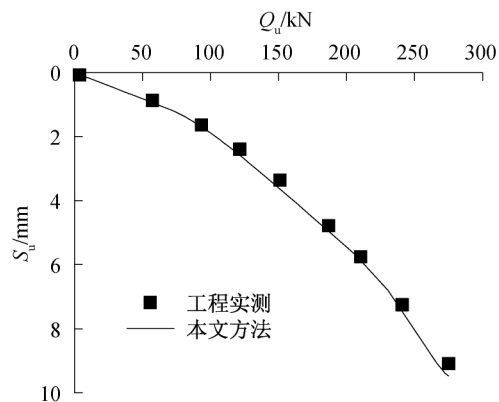


图4 148号试桩荷载-位移关系曲线

3.2 工程实例二

上海河滨香景园工程地下车库^[20]进行了2根钢筋混凝土预制桩现场抗拔静载试验。其中62号试验桩桩身混凝土等级为C30,桩身弹性模量 E 取 3.0×10^4 MPa,桩长 L 为 16 m ,桩截面尺寸为 $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,等效直径 D 为 395 mm ,桩身自重约为 47 kN 。与工程实例一拟合步骤相似,从实测数据中确定处于弹塑性临界处的荷载,即弹性极限位移 $W_1 = 0.52 \text{ mm}$;再将临界荷载、临界位移、桩长、桩径等物理量代入式(10)得到参数 $\lambda_1 = 14.9 \text{ MPa/m}$;再将完全处于塑性阶段的实测荷载、位移等物理量代入式(11)得到参数 $\lambda_2 = 6.4 \text{ MPa/m}$;最后,由Matlab软件计算得到荷载-位移曲线,与工程实例一原理相同,最终荷载值应加上桩身自重。

图5为解析法得到的荷载-位移曲线与实测曲线。在前期加载阶段,荷载相同时,位移量的理论值略大于实测值;在后期加载阶段,荷载相同时,位移量的理论值略小于实测值。究其原因,可能是该试验采用了快速加载法。快速加载法是指按固定的时间间隔(如每小时一级)进行加载,相较常规的慢速加载法,每级荷载维持时间较短,导致在荷载为 250 kN 前实测曲线位移量偏小。总体来说,计算曲线与实测曲线的一致性仍然很好,每级荷载对应的位移误差最大不超过 9.1% ,这表明本文所提方法具有较高参考价值。

4 结论

本文假定桩侧土符合双折线硬化模型,推导出

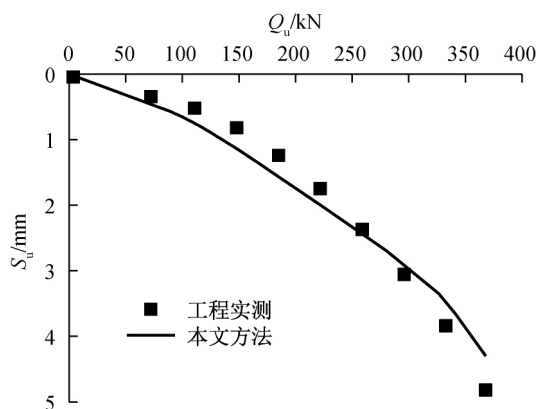


图5 62号试桩荷载-位移关系曲线

了一组完整的顶拉抗拔桩荷载-位移曲线的解析解。将实测数据代入该解析解公式,拟合得到抗剪刚度系数、弹性极限位移等公式所需的计算参数,绘得顶拉抗拔桩完全处于弹性阶段、部分处于塑形阶段及完全处于塑形阶段的荷载-位移曲线。从两个实际工程案例的顶拉抗拔桩荷载-位移关系曲线的结果中可以看出,采用本文方法得到的荷载、位移值与实测值较为接近,可用于预测同场地,不同桩径、桩长的桩基性状,也可通过与实测值对比分析桩周土的力学性质,具有较高的工程实用性。

本文方法相较荷载传递位移协调法,无须实测各土层的传递函数,应用效率更高,提供了一种确定顶拉抗拔桩极限承载力的理论计算手段,可取得较好的技术和经济效益。

参考文献:

- [1] 穆锐, 浦少云, 黄质宏, 等. 土岩组合岩体中抗拔桩极限承载力的确定[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2825-2837.
- [2] Ciavaglia F, Carey J, Diambra A. Time-dependent uplift capacity of driven piles in low to medium density chalk [J]. Géotechnique Letters, 2017, 7(1): 90-96.
- [3] Kranthikumar A, Sawant V A, Kumar P, et al. Numerical and experimental investigations of granular anchor piles in loose sandy soil subjected to uplift loading [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(2): 04016059.
- [4] 马晔. 超长钻孔灌注桩桩基承载性能的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 9-14.
- [5] Jang Y E, Han J T. Field study on axial bearing capacity and load transfer characteristic of waveform micropile[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(5): 653-665.
- [6] Truong P, Lehane B M. Effects of pile shape and pile end condition on the lateral response of displacement piles in soft clay[J]. Géotechnique, 2018, 68(9): 794-804.
- [7] Seed H B, Reese L C. The action of soft clay along friction piles[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1957, 122(1): 731-754.
- [8] Coyle H M, Reese L C. Load transfer for axially loaded piles in clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1966, 92(2): 1-26.
- [9] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 82-88.
- [10] 张绍斌, 童华伟, 陈建平, 等. 基于荷载传递函数法的单桩抗拔承载力计算方法研究[J]. 广州建筑, 2017, 45(6): 21-26.
- [11] Zhang D D, Lv Y, Liu H L, et al. An analytical solution for load transfer mechanism of XCC pile foundations [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 67: 223-228.
- [12] 邓浩昀, 金新阳, 顾明. 桩-土-结构动力相互作用研究现状与进展[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(1): 1-7.
- [13] 张雄, 陈胜宏. 预应力锚索锚固段荷载传递解析算法[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1667-1675.
- [14] 黄明, 江松, 许德祥, 等. 超大直径变截面空心桩的荷载传递特征与理论模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2370-2383.
- [15] 费康, 戴迪, 洪伟. 能量桩单桩工作特性简化分析方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 70-80.
- [16] 陈龙珠, 梁国钱, 朱金颖, 等. 桩轴向荷载-沉降曲线的一种解析算法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 30-38.
- [17] 奚笑舟, 陈龙珠. 自平衡法试验上段桩荷载-位移曲线的解析拟合算法[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(10): 1498-1503.
- [18] 熊巨华, 蒋益平, 杨敏. 自平衡试桩结果的解析转换法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 161-165.
- [19] 莫海鸿. 基础工程[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 127-135.
- [20] 凌辉. 上海软土中单桩抗拔承载机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2004: 23-32.

(责任编辑:康 锋)