



桩侧摩阻力-桩土相对位移试验曲线及其拟合分析

包彦冉, 马海龙, 雷珊珊

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为研究单桩不同加载方式对桩侧摩阻力-桩土相对位移规律的影响,通过粉土中桩底无土顶压桩、桩底有土顶压桩、底托桩、自平衡桩等的室内模型试验,得出不同加载方式下的桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线(τ - s 曲线)。对 τ - s 曲线的分析结果表明:桩侧平均摩阻力呈阶段性变化;桩底有土顶压桩达到极限摩阻力需要的桩土相对位移大于桩底无土顶压桩及底托桩;不同加载方式的单桩荷载传递均较好地遵循双曲线函数传递规律,通过两种方法拟合实测单桩桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线,所得拟合 τ - s 曲线的拟合度大于 0.98。此外,采用变形的双曲线函数进行线性函数拟合,比采用双曲线函数模型对 τ - s 曲线直接拟合得到的拟合度更高。

关键词: 模型试验;荷载传递函数;桩土相对位移;双曲线函数

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2020) 01-0102-07

Test curve of pile side friction-relative displacement of pile & soil and its fitting analysis

BAO Yanran, MA Hailong, LEI Shanshan

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

Abstract: In order to study the effect of different loading modes of single pile on pile side friction-relative displacement of pile and soil, the curves (τ - s curve) of pile side friction-relative displacement of pile and soil under different loading modes were obtained through laboratory model tests of top-pressed pile without soil at the end of pile, top-pressed pile with soil at the end of pile, bottom-supported pile and self-balanced pile in silt. The results of τ - s curve analysis show that: the average frictional resistance at the pile side changes in stages. The relative displacement of pile and soil required to reach the ultimate frictional resistance of the top-pressed pile with soil at the end of pile is greater than that of the top-pressed pile without soil at the end of pile and the bottom-supported pile. The load transfer of single pile under different loading modes well follows the transfer law of hyperbolic function. When the two methods were combined to fit the measurement of pile side friction-relative displacement of pile and soil of single pile, the fitting degree of τ - s curve gained is higher than 0.98. Besides, the fitting degree of deformed hyperbolic function used for linear fitting is higher than that of hyperbolic function model used for direct fitting of τ - s curve.

Key words: model test; load-transfer function; pile-soil relative displacement; hyperbolic function

收稿日期: 2019-09-15 网络出版日期: 2019-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878618)

作者简介: 包彦冉 (1994-), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 主要从事桩基础方面的研究。

通信作者: 马海龙, E-mail: ma-hailong@163.com

0 引言

目前计算单桩沉降主要有荷载传递法、剪切位移法、弹性理论法、分层总和法等^[1]。由于不同计算方法的假设条件和原理不同,因此表现出不同的特点。荷载传递法^[2-5]因原理简单、计算快捷、实用性较强,在工程桩沉降的计算中得到广泛运用。荷载传递函数,也就是桩土界面侧摩阻力-桩土相对位移规律,能够真实反映桩土相互作用机理,因而正确选取荷载传递函数并确定其参数是荷载传递法的关键。

国内外学者针对桩的荷载传递性状,得到了多种不同类型的荷载传递曲线,如:Seed 等^[6]首先提出了荷载传递法,并根据该方法得到了淤泥土的荷载传递曲线;Goel 等^[7]将桩离散成多个单元,根据荷载传递法得到了砂土的荷载位移性状;Kraft 等^[8]根据剪切位移法的原理,建立了理论上的荷载传递曲线;李韬^[9]依据实测荷载传递曲线,建立了非加工软化型和加工软化型桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线(τ - s 曲线)的表达公式,并给出了公式参数的经验值。此外,奚笑舟等^[10]采用三折线函数模型推导出荷载位移曲线的解析解;Jeong 等^[11]针对受压嵌岩桩的荷载传递函数,提出了采用了 Mindlin 点荷载解的理论分析法;马晔^[12]根据超长钻孔灌注桩的实测数据,对其荷载传递函数进行数据拟合,认为采用双曲线模型能更好地描述桩侧摩阻力与剪切位移的关系;孙晓立等^[13]假定桩侧土体荷载传递曲线满足理想弹塑性关系,推导出抗拔桩轴力和变形的弹塑性解析表达式;李林等^[14]采用指数型函数模型对荷载传递曲线进行分析,分别建立了静压桩的桩侧和桩端荷载传递模型。

上述研究均是在单一加载方式下,给出了不同的荷载传递模型,而对于不同加载方式下的单桩荷载传递模型到底符合哪一种,目前的研究还尚不完善。本文通过多种加载方式下的室内模型试验,获得不同加载方式下桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线;基于双曲线函数模型直接拟合法及线性拟合法对试验曲线进行拟合对比,以揭示不同加载方式的荷载传递规律特性。

1 荷载传递法原理

荷载传递法的计算原理示意图如图 1 所示。首先沿桩身方向把桩分为若干微小弹性单元,每个微单元与土体之间用弹簧联系,桩顶所受荷载为 P_0 ,

各截面桩身轴力为 P_{i-1}, \dots, P_n ,其次取深度 z 处的微小桩段 dz ,设 dz 桩顶轴力和桩底反作用力分别为 $P(z)$ 和 $P(z) + dP(z)$,桩侧摩阻力为 $\tau(z)$ 。假定桩任意单元位移只与该点侧摩阻力有关,用这些独立的弹簧模拟桩土间的相互作用,即模拟桩土荷载传递关系。

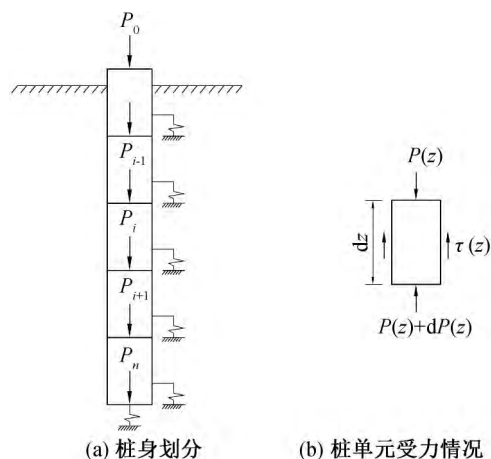


图 1 荷载传递法的计算原理示意图

由微小桩段 dz 的静力平衡条件可得:

$$\tau_z U dz + P(z) + dP(z) = P(z)$$

即:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -U\tau(z) \quad (1)$$

其中: U 表示桩截面周长。

桩单元体产生的弹性压缩量 ds 为:

$$ds = -\frac{p(z) dz}{AE} \quad (2)$$

或

$$\frac{ds}{dz} = -\frac{p(z)}{AE} \quad (3)$$

其中: A 、 E 分别表示桩截面积、弹性模量。

对式(3)求导,并将式(1)——(2)代入得:

$$\frac{d^2 s}{dz^2} = -\frac{U}{AE} \cdot \tau(z) \quad (4)$$

式(4)即为荷载传递法的基本理论方程,而选取桩侧摩阻力-桩土相对位移的关系,即 $\tau(z)$ - s 的曲线形式,是该微分方程求解的关键。

2 荷载传递函数模型

2.1 双折线函数模型

双折线函数模型由日本学者佐藤梧提出,也称为理想弹塑性模型^[15]。理想弹塑性模型将荷载传递曲线由原实测曲线分布形式转化为双折线的分布形式,如图 2 所示,其中: τ_u 、 s_u 分别表示极限侧摩

阻力、极限侧摩阻力对应的桩土相对位移; K 表示土的剪切变形系数。双折线函数由两段函数表达式组成,转换后的双折线分布函数的数学表达式为:

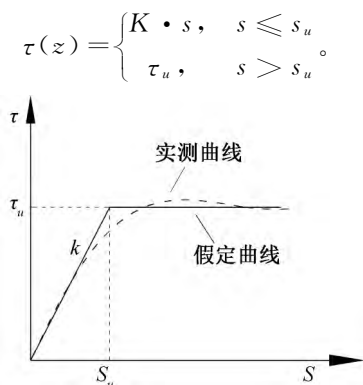


图2 理想弹塑性模型

2.2 双曲线函数模型

双曲线模型是简单实用、拟合精度高的一种方法。其基本方程可以假定为:

$$\tau = \frac{s}{a + bs} \quad (5)$$

其中: a 、 b 表示荷载传递系数。式(5)两边取极限,得:

$$\tau_u = \lim_{s \rightarrow \infty} \left(\frac{s}{a + bs} \right) = \frac{1}{b}$$

当 $s \rightarrow \infty$ 时, τ_u 为桩极限侧摩阻力, $1/b$ 即为所求的桩极限侧摩阻力。将式(5)变形得到:

$$\frac{s}{\tau} = a + bs \quad (6)$$

因为 a 、 b 为常数,所以 s/τ 与 s 呈线性关系。因此,可以通过拟合得到直线斜率,从而计算出系数 a 、 b 的取值。

2.3 其他函数模型

由于桩土体系的荷载传递具有一定复杂性,其桩土相互作用关系除了以上两种模型还可以用其他模型模拟。Wang等^[16]提出Boxlucas1非线性模型;罗红星等^[17]提出了考虑多阶段的统一三折线函数模型;潘时声^[18]综合多种因素的影响,提出了一种新的传递函数等式:

$$\tau = \frac{a_1 s}{b_1 + s} + \frac{a_2 s}{b_2 + s^2} + \frac{a_3}{(b_3 + s)^2} + a_4(1 - e^{-b_4 s}) + a_5 s e^{-b_5 s} + a_6 s e^{-b_6 s},$$

其中: $a_1, \dots, a_6, b_1, \dots, b_6$ 表示常数。该荷载传递等式的前4项基本函数综合了双曲线函数模型、应变软化模型和指数函数模型。但该传递函数变量多,确定变量数值也就成了不可避免的问题,因此在实际工程的计算中较少用到。

3 基于双曲线模型的拟合分析

通过粉土中顶压桩(桩底无土P1、桩底有土P3)、底托桩P2、自平衡桩P4等室内模型试验,分别获得了不同加载方式下,桩侧摩阻力随桩土相对位移变化曲线。采用双曲线函数模型对桩侧摩阻力随桩土相对位移变化曲线直接拟合以及按照变形后的式(6)进行线性拟合。

3.1 室内模型试验

试验所用的模型箱尺寸为,其中长、宽和高的尺寸分别为1500、900 mm和1700 mm,模型箱侧壁为钢板焊接,其中箱壁一侧开口,用有机玻璃板封住,用于观测箱内填土情况,箱底能排水。为保证模型箱侧壁的刚度,外侧壁在横向上焊接槽钢以防止模型箱在箱内土压力作用下发生变形。试验用土取自杭州市江干区下沙地区的粉土,填土时采用分层填铺的方法,填土总厚度为1500 mm,试验桩在土中长度1100 mm,桩底到模型箱底距离400 mm,填土完成后,静置10 d。

模型桩材料取用有机玻璃(亚克力)空心管,由应力-应变关系实测得模型桩弹性模量为2.1 GPa。模型桩由50、100、200 mm的桩段通过螺纹拼接而成,目的是方便在桩身内侧粘贴应变片。相较于将桩劈开粘贴应变片和在桩身外侧粘贴应变片,拼接的方式对试验应变测试的误差影响更小。

为获得桩在荷载作用下不同截面处的桩身轴力,于模型桩身不同位置处粘贴BX120-3AA型金属应变片。桩身应变数据采集由DH3820高速静态应变数据采集仪完成,该仪器最高采样频率100 Hz,能精确捕捉并记录实验过程中的缓变信号,确保试验数据采集的准确性。

模型试验桩加载简图及数据采集照片如图3所示。

为增大桩侧摩阻力提高试验数据的准确性,在桩身外表面粘砂处理,参考邵光辉等^[19]桩身表面的处理方法。采用E44环氧树脂与650聚酰胺树脂1:1混合,在桩身表面均匀涂抹,涂抹完成后,均匀撒上一层标准砂,待表面凝结后用毛刷扫去多余砂。模型桩尺寸参数见表1。其中,自平衡试桩由两段构成,上段桩长度1050 mm,下段桩长度50 mm。平衡点位置是通过先期P1、P2试验结果,结合基桩承载力自平衡检测技术规程预估桩底承载力计算得到。

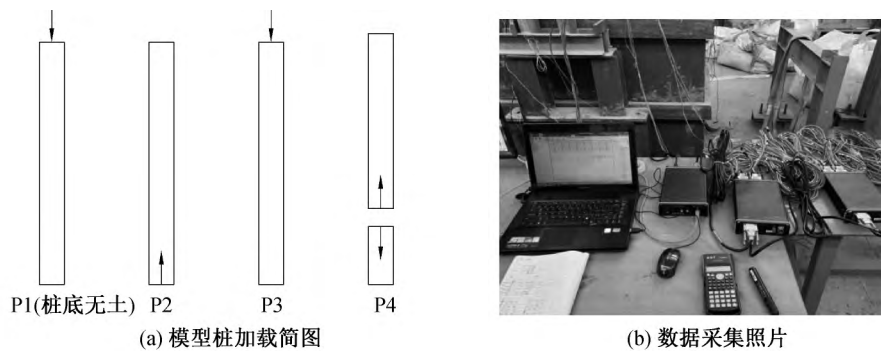


图 3 模型桩加载简图及数据采集照片

表 1 模型桩参数

桩号	桩长/ mm	外径/ mm	内径/ mm	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
P1	1100	50	34	1.18
P2	1100	50	34	1.18
P3	1100	50	34	1.18
P4	1050(上段桩), 50(下段桩)	50	34	1.18

3.2 试验仪器配置及操作说明

本文采用的模型试验设备构造如图 4 所示。其中, P1、P3 桩加载设备采用伺服电动缸, 可提供最大荷载为 10000 N, 在加载过程中通过位移传感器在电脑中实时采集并记录桩顶竖向位移, 其构造如图 4(a) 所示。P2 桩加载设备通过研发制作, 其构造如图 4(b) 所示。桩底部开小孔与 3 mm 粗钢丝索相

接, 钢丝索另一端穿过桩身内部绕过滑轮, 通过锁扣与上钢板锁住。试验时, 横梁作为反力架, 压力传感器调零, 千斤顶加载带动钢丝索, 钢丝索通过下钢板滑轮传递到模型桩底, 实现底托。荷载大小通过压力传感器控制, 桩顶竖向位移由位于模型桩桩顶处的百分表读数得到。P4 桩与 P2 桩加载方法相似, 基于自平衡试桩法的原理, 将自平衡法中的荷载箱(千斤顶)移至上段桩桩顶, 这一改变, 可以在地面以上为自平衡试桩加载, 其构造如图 4(c) 所示。加载时, 千斤顶向上升起, 带动钢丝索通过滑轮等装置向上拉动上段桩, 实现底托; 同时千斤顶反作用于传力杆向下压桩顶, 实现顶压。上段桩的桩顶竖向位移由置于桩顶的百分表读数获得, 下段桩的桩顶竖向位移通过百分表测传力杆位移得到。

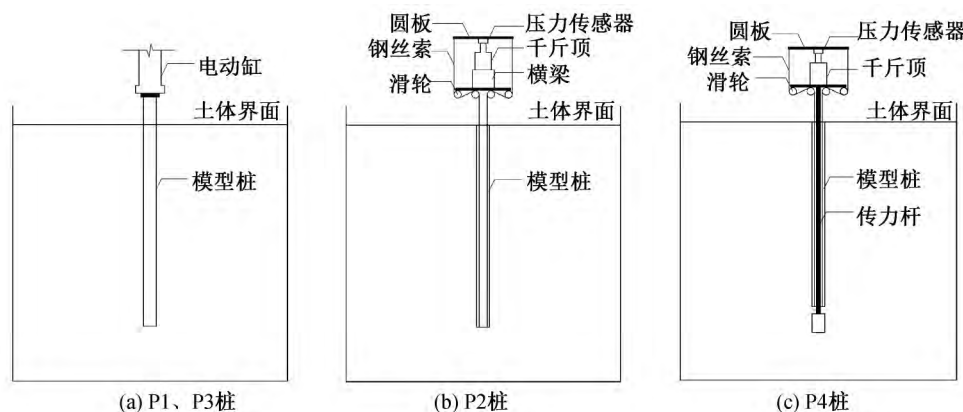


图 4 模型试验设备构造示意

桩土相对位移根据位移传感器、百分表测得的位移数据得到。经过测试, 试验装置测试可靠, 试验数据准确, 为测试桩的承载力提供了一种操作性强的加载方法。

桩身受荷时, 采集桩身不同截面处的应变值, 通过式(7)计算出各截面轴力值:

$$P_i = A \cdot E \cdot \xi_i \quad (7)$$

其中: ξ_i 表示测点 i 处的应变值。截面处的轴力值相减, 代入式(8)进而得到不同加载方式下的桩侧摩阻力:

$$Q_i = \frac{P_{i-1} - P_i}{U \cdot l_i} \quad (8)$$

其中: Q_i 表示第 i 个桩段的平均侧摩阻力, 桩侧摩阻力平均值即为 τ 值; l_i 表示第 i 个桩段的长度。

3.3 双曲线模型拟合分析

模型试验获得了桩身加载至极限荷载时, 桩侧摩阻力随桩土相对位移变化曲线($\tau-s$ 曲线)变化。本文采用双曲线函数对 $\tau-s$ 曲线直接拟合, 并按照变形后的式(6)进行线性拟合。

3.3.1 直接拟合

不同加载方式下,模型桩的实测及拟合 τ - s 曲线见图5。由图5看出,当桩土相对位移较小时,桩侧平均摩阻力均随着桩土相对位移的增大而线性增加,两者之间有着较好的对应关系。随着桩土相对位移继续增大,桩侧摩阻力的增加表现为非线性,缓慢增加进而达到极限值。在此之后,随着桩土相对

位移的增加,桩侧摩阻力基本不变或变化幅度较小。这与王卫东等^[20]所描述的情况一致,同时也验证了本次模型试验实测得到的 τ - s 曲线的可靠性。由图5还可以看出,采用双曲线模型直接拟合,能较好地描述桩侧摩阻力随桩土位移变化规律。即不同加载方式下,桩身侧摩阻力-桩土相对位移的荷载传递函数符合双曲线函数模型。

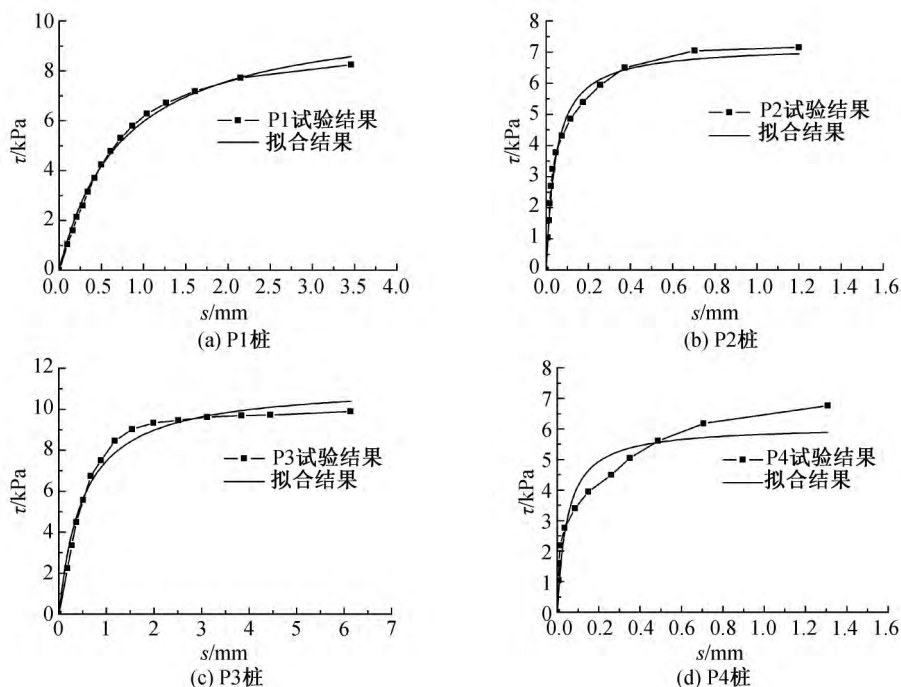


图5 τ - s 曲线直接拟合曲线

另外,在不同加载方式下,桩侧摩阻力接近或达到极限时所要求的桩土相对位移是不同的。张晓炜^[21]指出,黏性土层中桩侧摩阻力达到极限时所需要的桩土相对位移为5~10 mm。本试验结果表明,粉土中不同加载形式下的桩侧摩阻力达到极限时所需要的桩土相对位移小于5 mm。当底托桩相对位移为1 mm左右时,桩侧摩阻力即能充分发挥,而顶压桩P1(桩端无土)桩土位移则需要3 mm左右,顶压桩P3(桩端有土)的桩土相对位移要大于顶压桩(桩端无土),需要5 mm左右。

3.3.2 线性拟合

根据变形得到的式(6),可以认为 s/τ 与 s 呈线性关系。经数据转换后,不同加载方式下模型桩的实测及拟合 τ - s 曲线见图6。从图6中可以看出:不同加载方式下,桩土相对位移较桩侧摩阻力的比值与桩土相对位移呈明显的线性关系,拟合结果较好。

3.4 拟合结果对比分析

综合以上两种拟合方式,双曲线模型能够准确的描述桩身荷载传递函数,拟合精度高,是揭示桩侧摩阻力随桩土相对位移变化规律较精确的拟合方法。

采用双曲线函数模型对 τ - s 曲线直接拟合及线性拟合,分别得到双曲线函数模型的参数 a 、 b 。两种拟合方法得到的参数详细见表2。

可以看出,无论采用直接拟合或是线性拟合,两种拟合方式得到的参数 a 、 b 均较为接近,拟合度大多在0.98以上。通过可决系数 R^2 的数值可以判定,无论桩身受荷方向如何,采用变形后的线性拟合的方式比采用双曲线函数模型对 τ - s 曲线直接拟合得到的拟合程度更好。即采用线性拟合的精度更高。另外注意P4桩,可以发现:当实测数据与函数模型直接拟合精确度不高时,通过线性拟合公式能显著提高可决系数,进一步提升拟合的精确性。

因此,对于工程测试或是理论推导,建议优先选用双曲线变形后的线性拟合方法,进行荷载传递曲线分析。

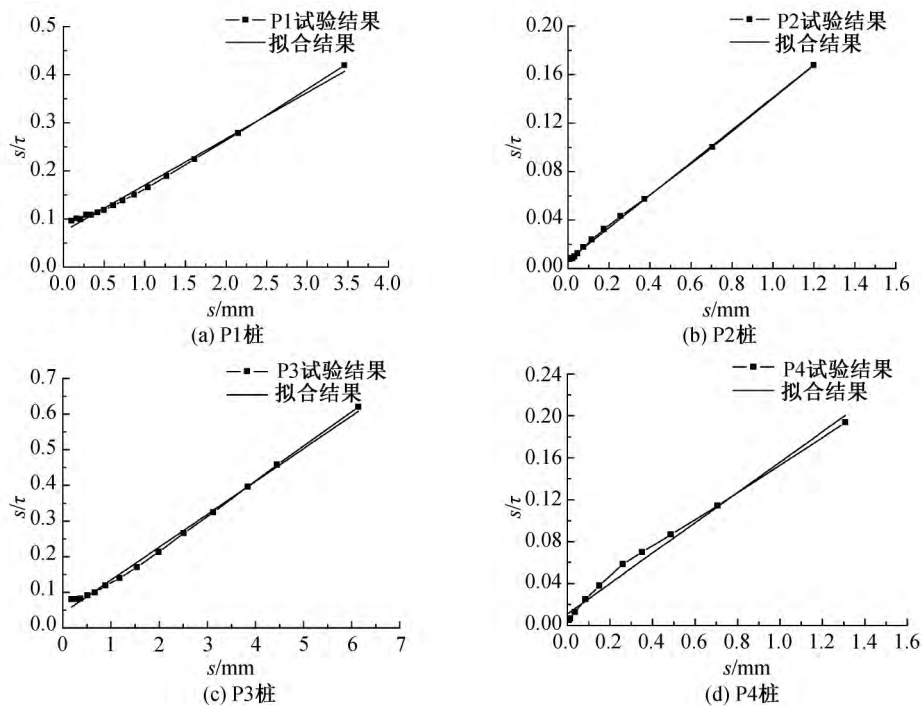
图 6 τ - s 曲线线性拟合曲线

表 2 双曲线模型拟合结果

桩号	直接拟合			线性拟合		
	a	b	R^2	a	b	R^2
P1	0.071	0.096	0.992	0.074	0.096	0.995
P2	0.006	0.139	0.991	0.007	0.134	0.999
P3	0.045	0.089	0.982	0.042	0.092	0.996
P4	0.008	0.164	0.921	0.011	0.145	0.987

注： R^2 为可决系数，是指整体拟合度， R^2 的值越接近 1 表明拟合程度越好。

4 结 论

通过粉土中顶压桩（桩底无土）、顶压桩（桩底有土）、底托桩、自平衡桩等室内模型试验，得到了多种加载方式下的桩侧摩阻力随桩土相对位移变化曲线。所得主要结论有：

a) 桩土相对位移较小时，桩侧平均摩阻力均随着桩土相对位移的增大而线性增加；随着桩土相对位移继续增加，桩侧摩阻力的增加表现为非线性，进而达到极限值。在此之后，桩侧摩阻力基本不变或变化幅度较小。

b) 桩底有土的顶压桩达到极限摩阻力需要的桩土相对位移比桩底无土的顶压桩及底托桩都要大，这一现象可以用桩端土的强度大小会影响桩侧摩阻力的发挥来解释。

c) 粉土中不同加载点及加载方式下的桩侧摩阻力与相对位移关系，均较好的遵从双曲线函数规律。

采用变形后的线性拟合函数比采用双曲线函数模型对 τ - s 曲线直接拟合得到的拟合度更好。

参考文献：

- [1] 张瑞鹤, 黄磊. 桩基础沉降计算方法综述[J]. 中国水运: 下半月, 2013, 13(3): 243-245.
- [2] 贾煜, 宋福贵, 王炳龙, 等. 基于改进荷载传递法计算降水引起的基桩沉降[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 68-74.
- [3] Liu W Z, Qu S, Zhang H, et al. An integrated method for analyzing load transfer in geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(3): 687-702.
- [4] 党发宁, 刘娜, 何文安. 西安地区单桩荷载传递双曲线模型与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1428-1432.
- [5] 万志辉, 戴国亮, 龚维明. 超厚细砂地层大直径后压浆桩荷载传递计算与分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1386-1394.
- [6] 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: 731-754.
- [7] Goel S, Patra N R. Prediction of load displacement response of single piles under uplift load [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(1): 57-64.
- [8] Kraft L M, Ray R P, Kagawa T. Theoretical $t-z$ curves[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division,

- ASCE, 1981, 107(11): 1543-1561.
- [9] 李韬. 上海超长桩荷载传递函数实测分析和数值模拟[J]. 工程勘察, 2019, 47(1): 18-23.
- [10] 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.
- [11] Jeong S, Ahn S, Seol H. Shear load transfer characteristics of drilled shafts socketed in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(1): 41-54.
- [12] 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: 42-53.
- [13] 孙晓立, 唐孟雄, 周治国. 抗拔桩变形的弹塑性解析计算[J]. 工业建筑, 2010, 40(3): 82-87.
- [14] 李林, 李镜培, 孙德安, 等. 考虑沉桩效应的群桩非线性荷载-沉降解析[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 668-677.
- [15] 彭世明, 赵明华. 基于佐藤悟双折线模型的灌浆锚杆抗拔承载特性分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2009, 31(1): 104-108.
- [16] Wang Z J, Xie X Y, Wang J C. A new nonlinear method for vertical settlement prediction of a single pile and pile groups in layered soils[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 45: 118-126.
- [17] 罗红星, 林高原. 荷载传递函数统一三折线模型及验证[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(4): 256-261.
- [18] 潘时声. 用分层积分法分析桩的荷载传递[J]. 建筑结构学报, 1991, 12(5): 68-79.
- [19] 邵光辉, 赵志峰, 吴正余. 托底抗拔桩承载特性的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1140-1146.
- [20] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1817-1826.
- [21] 张晓炜. 试桩测试方法对桩基承载特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1819-1822.

(责任编辑: 康 锋)