

DOI: 10.11779/CJGE2021S1008

基于桩土界面荷载传递的荷载-沉降曲线转化研究

马文杰^{1,2}, 王旭³, 王炳龙^{1,2}, 王博林³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;
3. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 自锚试验是一种新型检测桩基承载力的方法, 为了探讨自锚试验中基桩的荷载-沉降($Q-s$)曲线与静载试验的差异, 实现自锚试验向静载试验结果的转化, 通过室内模型试验与数值模拟分析研究, 结果表明自锚试验中基桩的沉降量小于静载试验, 桩端阻力提前发挥, 极限承载力较大; 两种试验中基桩极限承载力的比值及 $Q-s$ 曲线弹性斜率的比值均与基桩锚固深度呈指数关系。最后, 基于实测数据的地基土参数分析, 提出对数荷载传递模型, 利用迭代算法求解基桩承载性状, 经室内试验验证, 桩土界面荷载传递法可实现基桩 $Q-s$ 曲线向静载试验结果的转化。该研究成果可为自锚试验基桩的承载力检测提供有益的参考。

关键词: 桩基础; 荷载传递法; 自锚试验; 静载试验; 荷载-沉降曲线

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)S1-0041-06

作者简介: 马文杰(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事软土路基处理与沉降控制方面的研究。E-mail: mawjtongji@163.com。

Transformation of load-settlement curve based on load transfer at pile-soil interface

MA Wen-jie^{1,2}, WANG Xu³, WANG Bing-long^{1,2}, WANG Bo-lin³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The self-anchoring test is a new method to detect the bearing capacity of pile foundation. The indoor model tests and the numerical simulation are used to explore the difference of the $Q-s$ curves between the static load tests and the self-anchoring tests, and to realize the transformation of the results from the self-anchoring to static load tests. The results show that the settlement of foundation piles in the static load tests is larger than that of the self-anchoring tests, the resistance is developed in advance and its ultimate bearing capacity is smaller. Both the ratios of the ultimate bearing capacity and the elastic slopes of $Q-s$ curve of the self-anchoring tests and static load tests are exponential with the anchoring depth of the foundation piles. Based on the parameter analysis of foundation soil of the measured data, the logarithmic load transfer model is proposed, the bearing behavior of the foundation piles can be solved by the iterative algorithm, and the load transfer at pile-soil interface can achieve the transformation of the $Q-s$ curve of the foundation piles from the self-anchoring tests to the static load tests, which is verified by the indoor model tests. The research results may provide a useful reference for testing the bearing capacity of the self-anchoring tests in pile foundation engineering.

Key words: pile foundation; load transfer method; self-anchoring test; static load test; load-settlement curve

0 引言

静载试验为目前公认的最可靠的桩基承载力测试方法, 但由于自身的构造特点及技术局限, 堆载法、锚桩法和自平衡法均存有不同程度的缺陷^[1]。随着岩土锚固技术的逐步完善, 基桩自锚试验成为一种新型检测基桩承载力的方法, 利用桩底锚固技术为试验提供反力, 基桩、地基土和桩底锚杆构成相对封闭的内力传递系统, 由于桩底土(岩)层在基桩

和锚杆荷载作用下发生位移及变形, 导致基桩承载性能发生变化。自锚试验所得 $Q-s$ 曲线与静载试验存有多大的差异以及相互之间如何实现转化, 需进一步分析研究。

目前, 学者们针对自锚试验桩-土-锚系统中的锚

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678447)

收稿日期: 2020-12-15

* 通信作者(E-mail: wangbl8@163.com)

杆荷载传递机理研究成果较为丰硕,主要有现场试验、数值模拟以及理论等方面的研究^[2-6],然而,对于三者耦合作用的研究较为少见。自锚试验中桩-土(岩)界面荷载传递模型对基桩承载性状有重要影响,目前针对基桩承载性状的计算方法主要有:弹性理论法、荷载传递法、剪切位移法、数值计算法等^[7-21]。基于上述研究背景,本文利用室内模型试验和数值模拟结果提出一种非线性的桩-土荷载传递模型,进而基于桩土界面荷载传递法实现基桩 Q - s 曲线的转化。

1 模型试验及数值模拟

1.1 室内模型试验

本次试验共分为锚固深度 L_0 依次为 12.5、25、50 cm 的 3 组自锚试验以及一组静载试验(对比试验)。其中,模型桩嵌入混合料层的深度 H_0 均为 20 cm,桩长 90 cm,锚杆采用直径为 $\varphi 8$ 的钢绞线模拟,试验装置全貌如图 1 所示,桩周土和混合料其他具体参数详见文献[22]。

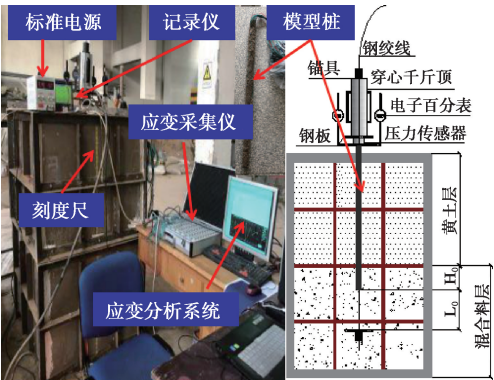


图 1 自锚试验装置全貌图

Fig. 1 Full topography of self-anchoring test device
自锚试验与静载试验中基桩的 Q - s 曲线变化如图 2 所示。

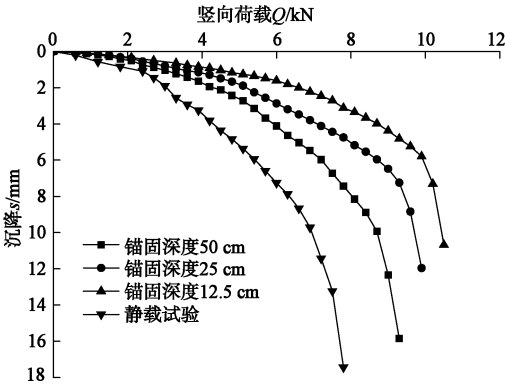


图 2 自锚试验与静载试验 Q - s 曲线图

Fig. 2 Q - s curves of self-anchoring tests and static load tests
从图 2 可知,相同竖向荷载下,静载试验中基桩的沉降大于自锚试验,本次静载试验基桩的极限承载力

为 7.2 kN,自锚试验中基桩的极限承载力分别为 9.9 kN(12.5 cm)、9.3 kN(25 cm)、8.6 kN(50 cm),自锚试验中,桩底锚杆起到桩锚强化效应。当锚杆受到向上的拉拔荷载,桩端锚固体有向上的运动趋势,一方面类似于给基桩施加了向上的预应力,另一方面桩端土体的压力大于静止土压力,土体位移不为零,致使桩端土体挤密压实,锚固深度越小,桩端挤压效果愈加明显。相同荷载下,锚固荷载引起土层位移的竖向影响深度以及每一深度的位移值都在增大,导致基桩位移总变化量较小。随着锚杆锚固深度的减小,基桩的极限承载力逐渐增大,但并非线性增加。在桩-土-锚共同作用下,当锚固深度逐渐增大时,桩端受到的影响逐渐远离锚固荷载的应力扩散范围,其极限承载力值愈发接近桩底无锚时的情况。

1.2 数值模拟

桩底有无锚杆对 Q - s 曲线的刚性系数和极限承载力均存有影响,为了进一步探讨锚固深度对基桩承载性状的影响,利用有限元进行数值模拟,结合室内模型试验。桩周土体采用二维轴对称可变形的壳体,计算范围以桩轴线为对称轴,左右岩土体宽各 50 cm,桩、填料参数与室内模型试验均一致。在试验基础上增加 6 组基桩试验,锚固深度依次为 45、40、35、30、20、15 cm,模拟所用的材料参数如表 1 所示,室内实测与数值模拟 Q - s 曲线如图 3 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

单元	弹性模量/GPa	泊松比 ν	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
黄土	0.00282	0.26	1.560	14.91	23.7
混合料	0.35	0.30	1.736	146.3	38.0
桩	71	0.20	2.1	—	—
锚杆	195	0.25	2.6	—	—
锚固体	210	0.28	2.8	—	—

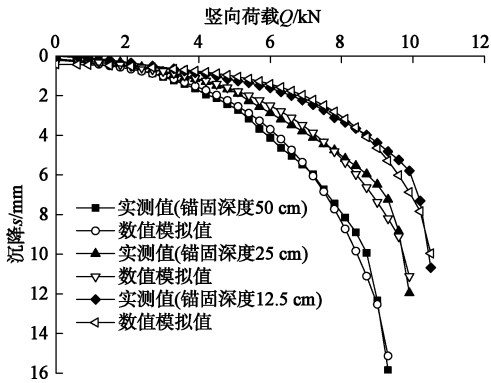


图 3 实测与模拟 Q - s 曲线对比图

Fig. 3 Comparison between measured and simulated Q - s curves
从图 3 可知,实测值与模拟值较为接近,曲线吻合

度较高,因此,可用该模型探究其他锚固深度对基桩性状的影响。其中,当荷载等级为 2.1 kN 时,锚固深度分别为 12.5 cm 和 25 cm 的竖向位移云图如图 4 所示,对于桩-土-锚共同体系,在多种力耦合作用情况下,桩端出现了塑变区和成拱区两个性质不同的区域,受拉拔荷载的影响,塑变区和成拱区延伸到桩端附近以上几倍的桩径范围之外,同时,由于上覆土压力的限制作用使其形成一稳定区域。桩端土体通常强度较高,在高应力作用下,桩端附近桩土相对位移增大,且使桩端附近范围内土体应力增大。自锚试验中,在加载末期,桩侧摩阻力逐渐达到极限值,对应于基桩顶部荷载的增量,桩端阻力增量所占比例逐渐增大,使得桩端出现塑限区并且逐渐扩展,基桩急剧下沉,导致桩端发生刺入破坏。

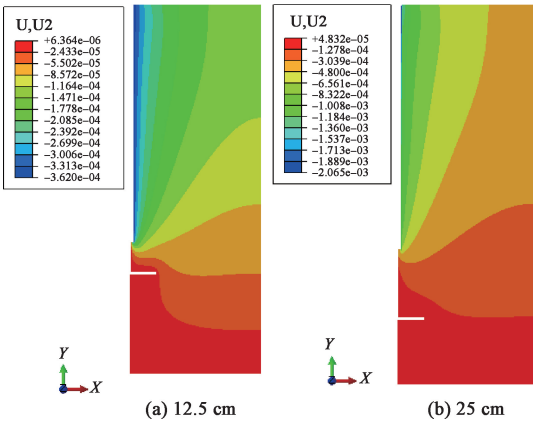


图 4 不同锚固深度下的竖向位移云图(2.1 kN)

Fig.4 Cloud diagram of vertical displacement at different anchoring depths(2.1 kN)

试验结果得静载试验与自锚试验的弹性斜率 K_p 与极限承载力 Q_u 的值如表 2 所示,其中,数值解极限承载力采用切线交汇法确定。

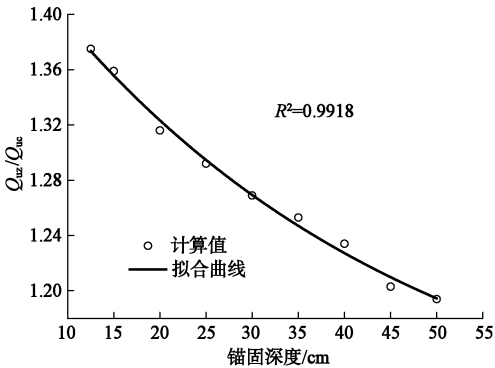
表 2 弹性斜率与极限承载力

Table 2 Elastic slopes and ultimate bearing capacities						
参数	静载	$L_0 = 12.5$	$L_0 = 15$	$L_0 = 20$	$L_0 = 25$	
Q_u/kN	7.2	9.9	9.76	9.54	9.3	
$K_p/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.83	3.73	3.35	2.66	2.09	
		$L_0 = 30$	$L_0 = 35$	$L_0 = 40$	$L_0 = 45$	$L_0 = 50$
Q_u/kN	9.09	8.80	8.57	8.42	8.6	
$K_p(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	1.78	1.55	1.31	1.22	1.16	

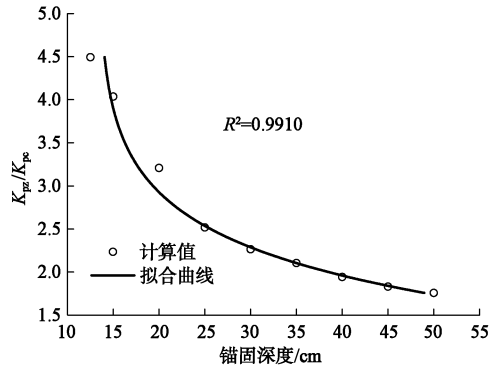
注:表中自锚试验的 L_0 (锚固深度)单位为 cm。

利用模拟结果得 Q_{uz} (自锚试验极限承载力) 和 Q_{uc} (静载试验极限承载力) 的比值以及 K_{pz} (自锚试验 Q - s 曲线弹性斜率) 和 K_{pc} (静载试验 Q - s 曲线弹性斜率) 的比值与基桩锚固深度的关系如图 5 所示。当锚固深度取值趋近于无穷时, $Q_{uz}/Q_{uc} = 1.078$, $K_{pz}/K_{pc} =$

1.046,其变化规律与图 2 揭示的机理类似,即当锚固深度足够大时,桩端处于锚固荷载的应力扩散范围之外,锚固荷载引起的土层位移达不到桩端或小到可以忽略。然而在实际工程中,软土地区基桩埋深较大,桩端一般达至基岩顶面或桩端位于较密的持力层,若锚固深度过大,施工难度不但大幅度提升,而且也不经济。因而基桩锚固深度值不可能过大,其端部通常位于锚固区的影响范围之内,锚杆的存在必定引起基桩承载特性的变化,因此,研究自锚试验与静载试验结果之间的差异,将自锚试验结果向静载试验转化对实际工程具有重要意义。



(a) Q_{uz}/Q_{uc} 与锚固深度的关系



(b) K_{pz}/K_{pc} 与锚固深度的关系

图 5 锚固深度与极限承载力及弹性斜率比值关系图

Fig.5 Relationship among anchoring depth, ultimate bearing capacity and elastic slope

从图 5 可知,上述关系满足式(1)的指数关系:

$$\begin{cases} Q_{uz}/Q_{uc} = 1.078 + 0.403\exp(-0.025x) \\ K_{pz}/K_{pc} = 1.046 + 446.102\exp(-1.437x) \end{cases} \quad (1)$$

2 自锚试验数据的转化

2.1 基于实测数据的地基土参数分析

为准确获得基桩的桩土荷载关系,需要在实测资料的基础上加以分析处理,基于试验得出基桩 Q - s 曲线及每级荷载下的桩身轴力,进而获得桩土荷载传递资料。假设在荷载 Q_i 作用下,桩身各测点的轴力为 N_i ,桩顶位移 s_1 为轴力 N_1 所对应的位移,如图 6 所示。

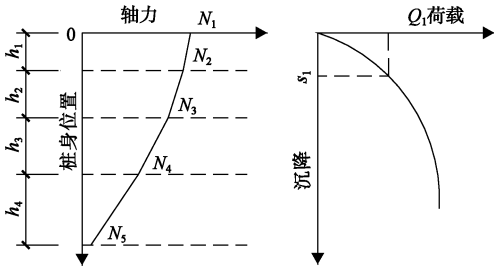


图6 基桩轴力与 Q - s 曲线图

Fig. 6 Axial forces and Q - s curve of foundation piles

根据静力平衡方程,可得两测点间的平均剪应力为

$$\bar{\tau}_i = \frac{\Delta N_i}{2\pi r h_i} \quad (2)$$

式中, r 为桩的半径, h_i 为两测点间的距离, ΔN_i 为第 i 个测点与 $i+1$ 测点的轴力差值。两测点间平均应变可表示为

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{N_i + N_{i+1}}{2EA} \quad (3)$$

式中, E 为弹性模量, A 为横截面积。两测点间桩身变形量为

$$\Delta S_i = \bar{\varepsilon}_i h_i \quad (4)$$

各测点桩身位移为

$$S_i = S_{i-1} - \Delta S_{i-1} \quad (5)$$

桩土平均位移计算式可表示为

$$\bar{S}_i = \frac{1}{2}(S_{i-1} + S_i) + \bar{S}_{pi} \quad (6)$$

式中, $\bar{S}_{pi}$ 为由桩底锚固荷载引起的土层位移,在测点深度的中点位置取值即可。

基于能量原理可求解出锚固荷载作用下的桩底土体位移^[6],模型桩(锚固深度 25 cm)底土层位移分布如图 7 所示。

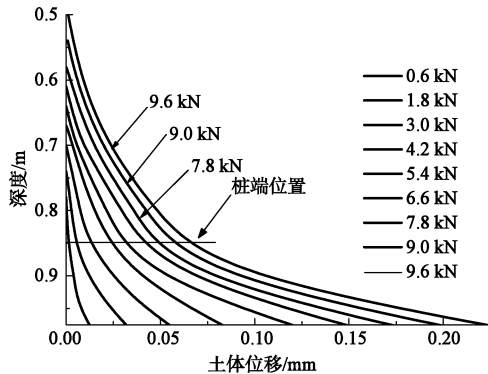


图7 桩端附近土层位移分布

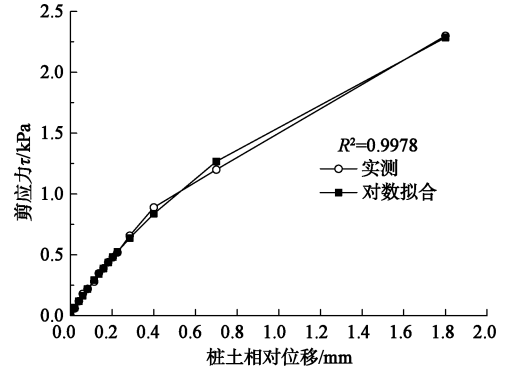
Fig. 7 Displacement distribution of soil layer near pile end

针对锚固深度 25 cm 的基桩桩土界面荷载传递关系进行非线性拟合分析,如图 8 所示,桩土界面荷载传递模型用对数曲线 $y = a - b\ln(x + c)$ 拟合精度高,由于桩底有无锚杆对桩土相对位移与基桩摩阻力的荷载

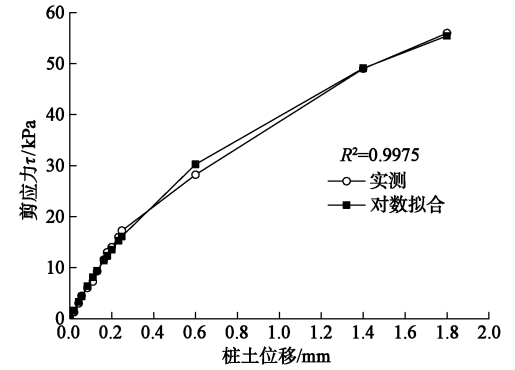
传递关系无关^[6],因而基桩的桩土荷载传递关系可用于计算桩底无锚时的 Q - s 曲线,对数荷载传递模型表达式为

$$\tau(z) = a - b\ln(\Delta s + c) \quad (7)$$

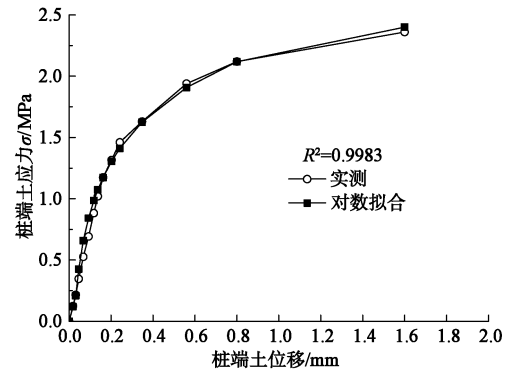
式中, Δs 为桩土相对位移, a, b, c 为待求参数。



(a) 黄土层



(b) 混合层



(c) 桩端

图8 桩土荷载传递关系

Fig. 8 Load transfer relationship of pile-soil

特别指出,在实际工程中利用实测数据估算桩土相对位移时,一般假定桩土之间无相对滑移,通常所说的桩土相对位移只是桩相对较远处不发生位移的土的位移。因此,现场实测得到的某深度处的桩土相对位移,其实就是指该深度处的桩身位移^[23],故第 i 段的桩土相对位移值 Δs_i 如下所示:

$$\Delta s_i = s_i - \sum_{j=1}^i \frac{L_j}{2}(\varepsilon_j + \varepsilon_{j+1}) \quad (8)$$

式中, s_i 为桩顶沉降, L_j 为第 j 段桩的桩长, ε_j 和 ε_{j+1} 分

别表示第 j 和第 $j+1$ 的断面钢筋应变。

2.2 荷载沉降计算方法

采用 Matlab 软件编制程序,结合下述迭代算法可求解基桩承载性状^[24],其主要计算步骤如下:

(1) 沿桩身长度方向将桩长分为 n 段;

(2) 假设作用在桩顶的荷载 $P_{\text{tl}} = 0$, 因此桩段 1 的荷载 $P_{\text{tl}} = 0$, 假定桩顶有向下的小位移 S_{tl} , 则桩段 1 有向下的位移 z_{tl} , 此时 $S_{\text{tl}} = z_{\text{tl}}$, 起初桩土相对位移

$$s_{\text{cl}} = z_{\text{tl}};$$

(3) 利用式(7)可求解出桩段 1 的剪应力 τ_1 ;

(4) 此时可求解出桩段 1 的总侧摩阻力 T_1 , $T_1 = 2\pi r l_1 \tau_{s1}$;

(5) 根据桩段力的平衡可得: 桩段 1 底部的力 $P_{\text{bl}} = P_{\text{tl}} - T_1$;

(6) 桩段 1 中点处的弹性压缩量可表示为: $z_{\text{cl}} = \frac{(P_{\text{bl}} + 3P_{\text{tl}})l_1}{8E_p A_p}$;

(7) 桩段 1 的修正相对位移 $s_{\text{cl}}' = s_{\text{cl}} + z_{\text{cl}}$;

(8) 比较桩段 1 内的桩身修正相对位移 s_{cl}' 与初始值 s_{cl} 的差, 如果 $|s_{\text{cl}}' - s_{\text{cl}}| \geq 1 \times 10^{-6} \text{m}$, 重复步骤(2)~(7), 直至 $|s_{\text{cl}}' - s_{\text{cl}}| \leq 1 \times 10^{-6} \text{m}$ 为止;

(9) 利用式 $z_{\text{bl}} = \frac{(P_{\text{tl}} + P_{\text{bl}})l_1}{2E_p A_p} + z_{\text{tl}}$ 求解桩段 1 底部的位移 z_{bl} ;

(10) 更新 P_{tl} 和 z_{tl} : $P_{\text{tl}} = P_{\text{bl}}$, $z_{\text{tl}} = z_{\text{bl}}$, 重复步骤(2)~(9)直至桩段 n , 然后 P_{tl} 和 z_{tl} 分别储存为 P_1 和 s_1 ;

(11) 假定一系列桩顶位移 $S_1 \cdots S_m$, 重复步骤(2)~(10), 直至得到一系列 $P_1 \cdots P_n$ 和 $s_1 \cdots s_n$ 。

根据上述荷载沉降计算, 可实现自锚试验中基桩 Q - s 曲线的转化, 转化结果如图 9 所示。从图可知, 采用对数荷载传递模型模拟桩侧阻力和桩土相对位移以及桩端阻力与桩端位移间的关系, 运用迭代法转化后的基桩 Q - s 曲线与静载试验结果较为吻合, 与基于能

量原理的桩身能量差分方程求解结果较为接近, 可见此方法较为合理, 计算过程简便可行, 可作为自锚试验测试结果向静载试验转化的一种有效方法。

3 结 论

本文结合室内模型试验以及数值模拟研究, 基于桩土界面的荷载传递实现自锚试验 Q - s 曲线的转化, 其主要结论为

(1) 相同竖向荷载下, 静载试验中基桩的沉降量大于自锚试验, 其极限承载力小于自锚试验; 随着锚固深度的减小, 基桩的极限承载力逐渐增大, 但并非线性增加。

(2) 自锚试验中, 随着锚固深度逐渐增大, 桩端受到的影响逐渐远离锚固荷载的应力扩散范围, $Q_{\text{uz}}/Q_{\text{uc}}$ 和 $K_{\text{pz}}/K_{\text{pc}}$ 的值分别与基桩锚固深度呈指数关系。

(3) 采用对数荷载传递模型模拟桩侧阻力和桩土相对位移以及桩端阻力与桩端位移间的关系, 运用迭代法可较好地实现自锚试验基桩 Q - s 曲线向静载试验的转化。

参考文献:

- [1] 建筑基桩检测技术规范: JGJ106—2014 [S]. 2014. (Technical Specification for Pile Testing of Building Foundation: JGJ106—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese))
- [2] KUANG Z, ZHANG M Y, BAI X Y. Load-bearing characteristics of fibreglass uplift anchors in weathered rock [J]. Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2020, **173**(1): 49–57.
- [3] XING H F, XIONG F, WANG L J, et al. Research on shaft resistance of rock-socketed piles based on the cavity expansion theory [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, **35**(6): 873–877.
- [4] 赵明华, 龙 照, 邹新军. 基于剪胀效应的桩底嵌岩锚杆荷载传递分析法 [J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1938–1942. (ZHAO Ming-hua, LONG Zhao, ZOU Xin-jun. Load transfer method of rock-socketed anchoring rods under pile tip considering dilatancy effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical mechanics, 2008, **29**(7): 1938–1942. (in Chinese))
- [5] HYETT A J, BAWDEN W F, REICHERT R D. The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, **29**(5): 503–524.
- [6] 刘思思. 基桩自锚静载测试技术的理论与试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010. (LIU Si-si. Theoretical and Experimental Study on Static Load Testing Technology of

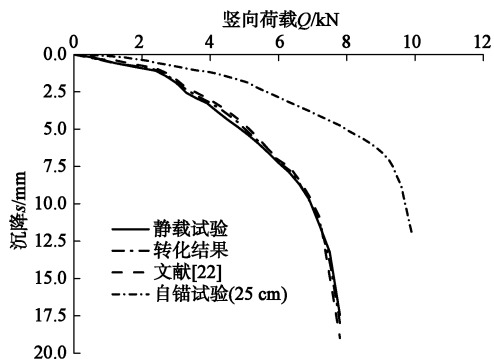


图 9 自锚试验基桩 Q - s 曲线转化图

Fig. 9 Transformation of Q - s of foundation piles from self-anchoring tests

- Foundation Pile with Self-Anchor [D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese))
- [7] POULOS H G. Pile behavior-theory and application [J]. Géotechnique, 1989, **39**(3): 365–415.
- [8] POULOS H G. Pile behavior-consequences of geological and construction imperfections [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(5): 538–563.
- [9] XIAO H B, LUO Q Z, TANG J, et al. Prediction of load-settlement relationship for large diameter piles [J]. Structural Design of Tall Buildings, 2002, **11**(4): 285–93.
- [10] KRAFT L M, RAY R P, KAGAWA T. Theoretical τ - z curves [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1981, **107**(3): 1465–1482.
- [11] CHOW Y K. Axially loaded piles and pile groups embedded in a cross-anisotropic soil [J]. Géotechnique, 1989, **39**(2): 203–212.
- [12] 王伟, 卢廷浩, 池旭超, 等. 截面圆形灌注桩静载 Q - S 曲线复合对数模型 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, **46**(5): 1832–1837. (WANG Wei, LU Ting-hao, CHI Xu-chao. Composite logarithmic model for static load-settlement curve of cast-in-place single pile with uniform-circular cross section [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, **46**(5): 1832–1837. (in Chinese))
- [13] SAID I, DE GENNARO V, FRANK R. Axisymmetric finite element analysis of pile loading tests [J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(2): 6–19.
- [14] MATSUOKA H, YAO Y P, SUN D A. The cam-clay models revised by the SMP criterion [J]. Soils and Foundations, 1999, **39**(1): 81–95.
- [15] BUTTERFIELD R, BANERJEE P K. The elastic analysis of compressible piles and pile groups [J]. Géotechnique, 1971, **21**(1): 43–60.
- [16] COMODROMOS E M, PAPADOPOULOU M C, RENTZEPPERIS I K. Pile foundation analysis and design using experimental data and 3-D numerical analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(5): 819–836.
- [17] ARMALEH S, DESAI C S. Load-Deformation Response of Axially Loaded Piles [J]. Journal of Geotechnical Engineering-ASCE, 1987, **113**(12): 1483–1500.
- [18] COOKE R W, PRICE G, TARR K. Jacked Piles in London Clay, A study of Load Transfer and Settlement under Working Conditions [J]. Géotechnique, 1979, **29**(2): 341–352.
- [19] AI Z Y, HAN J. Boundary element analysis of axially loaded piles embedded in a multi-layered soil [J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(3): 427–434.
- [20] CHEUNG Y K, THAM L G, GUO D J. Analysis of pile group by infinite layer method [J]. Géotechnique, 1988, **38**(3): 415–431.
- [21] ZHANG Q Q, ZHANG Z M, HE J Y. A simplified approach for settlement analysis of single pile and pile groups considering interaction between identical piles in multilayered soils [J]. Computers and Geotechnics, 2010, **37**(7/8): 969–976.
- [22] MA W J, WANG B L, WANG X, et al. Research on the conversion of self-anchoring test data to static loading test data [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, DOI:10.1680/jgeen.19.00232.
- [23] 张乾青, 李连祥, 李术才, 等. 成层土中单桩受力性状简化算法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 1): 3390–3394. (ZHANG Qian-qing, LI Lian-xiang, LI Shu-cai, et al. Simplified analytical method for response predication of single pile embedded into layered soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S1): 3390–3394. (in Chinese))
- [24] CUI J F, Li J P, ZHAO G W. Long-term time-dependent load-settlement characteristics of a driven pile in clay [J]. Computers and Geotechnics, 2019, **112**: 41–50.

(编校: 黄贤沙)