

端承型静压桩沉桩贯入过程中桩侧阻力变化规律及其时效性试验研究*

胡永强^{1,2}, 汤连生³, 黎志中⁴

(1. 中山大学 工学院, 广东 广州 510275;

2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006;

3. 中山大学 地球科学与地质工程学院//广东省地质过程与矿产资源探查
重点实验室, 广东 广州 510275;

4. 广东永基建筑基础有限公司, 广东 顺德 528300)

摘要: 静压桩承载力的时效性主要由桩侧摩阻力的时效性引起, 沉桩结束时桩侧摩擦的性状及其发挥程度将直接影响承载力的时效性。但是, 目前承载力时效性的研究直接用终压力和承载力进行相关性研究而未考虑这一影响。因此本文将选择珠三角典型地层, 进行模型桩的静力压入试验及其后的载荷试验, 从摩擦学的角度研究桩端阻力变化对桩侧摩阻力发挥的影响机理, 并进一步研究其对承载力时效性的影响。研究表明, 沉桩过程中沉桩速度因桩压入不同性质土层、局部硬层及较硬的桩端持力层而发生变化, 桩土之间的摩擦状态不断在干、湿摩擦之间转变, 桩侧摩阻力的发挥随之变化。终压时桩侧若为干摩擦, 则承载力时效性不明显, 若为湿摩擦则时效性显著, 即可利用终压时桩侧摩擦的性质和发挥程度来判断单桩承载力的时效性。

关键词: 端承型静压桩; 桩侧阻力; 承载力时效性; 干摩擦; 湿摩擦

中图分类号: TU 443 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2015) 01-0130-06

Experimental Study on Variation and Time Effect of Shaft Resistance of Jacked Pile Installation

HU Yongqiang^{1,2}, TANG Liansheng³, LI Zhizhong⁴

(1. Engineering School, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3. School of Earth Science and Geological Engineering//Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

4. Guangdong Yongji Building Foundation Co. Ltd, Guangdong Shunde 528300, China)

Abstract: Time-dependent capacity increase of jacked piles is caused by the timeliness of shaft resistance and is affected directly by the character and mobilization of shaft resistance at the end of pile installation. However, the previous researches on the time-dependent capacity always relies on the correlation study between the pile installation resistance and its bearing capacity tested by load test, while the influence of the total shaft resistance at the end of pile installation on timeliness has been seldom considered. In this paper, jacking installation tests of model piles and load tests after installation are conducted to study the influence of base resistance on shaft resistance and further influence on the timeliness of bearing capacity of jacked pile with the theory of tribology in the Pearl River Delta. The study reveals that the friction at the pile-soil interface changes between lubricated friction and unlubricated friction during the

* 收稿日期: 2014-11-27

基金项目: 国家自然科学基金 (40872205); 全国高等学校博士学科专项科研基金 (20120171110031); 广东省自然科学基金 (07003738); 广东省科技计划基金 (2008B030303009) 共同资助项目

作者简介: 胡永强 (1974年生), 男, 研究方向: 岩土工程; 通讯作者: 汤连生; E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn

whole pile installation. This phenomenon is caused by the change of installation velocity of the jacked pile when inserting different soil layers. If the pile shaft friction is unlubricated friction, then there is almost no time-dependent capacity increase, if the pile shaft friction is lubricated friction, then the timeliness of bearing capacity is very significant. That means the shaft friction condition of pile can be used to prediction the timeliness of bearing capacity.

Key words: end bearing jacked pile; shaft resistance of pile; timeliness of bearing capacity; unlubrication friction; lubrication friction

挤土桩的承载力时效性是指沉桩结束后, 桩的承载力通常会随时间增大的现象。一般认为这种现象是由桩周的扰动重塑土因沉桩 (setup) 或强化 (freeze) 效应引起; 若在某些情况下因桩侧土剪胀或侧压力降低而导致承载力减小^[1], 则称为弱化 (relaxation) 效应^[1-3]。从 20 世纪 50 年代开始至今, 国外众多学者对打入桩的承载力时效性进行了系统的研究, 国内的研究相对薄弱。研究认为桩侧土孔隙水压力消散^[4-5]、土的结构重建^[6-7]、砂土液化和土的疲劳退化^[8]、钢管桩的锈蚀^[9]、黏土分散性、触变性、次固结^[3]及钙质土的重新胶结^[10]等原因导致打桩结束时的承载力与间歇期后的承载力显著不同, 即所谓的时效性; 根据两者之间的时效性规律得出了一系列估算公式和预测模型^[11-13]。受限于压桩机械的限制, 直到最近几十年才兴的静压桩因其施工无噪声、无振动和无污染、质量可靠、施工迅速等特点, 在我国得到大量使用, 因而成为国内学者的研究热点。早期的静压桩基础设计常借鉴打入桩的理论。静压桩与打入桩同属于挤土桩, 两者既有联系, 又有区别。其区别为两者的沉桩力学机理并不相同, 打入桩属动态打入过程, 而静压桩属准静态压入过程^[14]。与打入桩类似, 静压桩的沉桩终压力与单桩竖向极限承载力具有紧密的相关性, 即静压桩同样具有承载力的时效性。已有的打入桩与静压桩的研究结果表明, 桩端阻力在不同的沉桩方式下变化并不大, 单桩承载力随时间的增长主要表现为桩侧阻力的增长^[1, 11, 15-16], 因此引起承载力时效性的主要原因是桩侧摩擦阻力的时效性。

目前关于静压桩承载力时效性的研究较为深入, 也达到了很高的水平^[17-33]。这些研究大多采用沉桩就位后对同一根桩不同间歇期进行复压并与沉桩终压力进行对比统计的方法, 寻求沉桩终压力随时间增长的规律。对于承载力时效性机理的解释, 主要从触变恢复和固结时效^[17]、水膜^[24]及土壳效应^[26]等方面解释, 并认为超静孔隙水压力消散引起的土体固结是承载力增长的主要原因^[24]。

这些研究多以摩擦型桩为主, 其桩端阻力较小对桩侧摩擦阻力的影响并不大, 因此可认为各试验桩在沉桩终压时的桩侧摩擦阻力发挥基本一致, 即并未考虑沉桩结束时桩侧摩擦阻力的发挥程度。但是, 沉桩结束时桩侧摩擦阻力的发挥程度并不一致, 尤其是持力层条件较好的端承型桩, 试验发现压入不同性质土层、局部硬层及较硬的桩端持力层都将导致沉桩速度发生变化, Jackson^[34]认为沉桩速度强烈影响桩侧摩擦阻力的发挥从而导致沉桩终压力与桩的极限承载力之间的差异。因此, 静压桩承载力时效性研究必须考虑终压时桩侧摩擦阻力的发挥程度。对于端承型静压桩而言, 其桩端阻力变化更大, 有利于不同桩端阻力下桩侧摩擦阻力的发挥程度研究。因此, 本文选择珠三角地区的典型地层进行现场原位模型桩沉桩试验及载荷试验, 试验尝试研究静压贯入过程中桩侧阻力的变化规律及其对承载力时效性的影响。

1 试验方法

1.1 试验场地选择

为研究静压桩静压贯入过程中桩侧阻力的变化规律, 所选取的场地位处珠江三角洲冲积平原区, 属河口三角洲堆积地貌, 基岩通常是强风化岩石, 强度变化较大, 更利于研究不同桩端阻力下桩侧摩擦阻力发挥。

试验选择了 3 个场地进行模型桩的静力压入试验。三个试验场地的具体地质条件如为表 1-3 所示。

1.2 试验设备及试验方法

试验模型桩采用 300 mm 直径钢管桩制成, 桩端增设桩尖受压板, 可量测桩端阻力, 桩侧总阻力可根据压桩力与桩尖受压板阻力计算而得。

三个场地采用相同的沉桩速度进行模型桩的沉桩试验, 模型桩桩端压入强风化层, 整个试验过程记录沉桩压力及其对应的桩尖受压板压力。沉桩试验结束并经间歇期后, 利用压桩机进行载荷试验, 确定试桩承载力的同时, 记录桩顶荷载、桩顶沉降和桩尖反压板压力。

表 1 场地 1 试验桩桩长范围内地质情况
Table 1 Soil geological data of the test site 1

土类	分层	土层性质	厚度/m	状态	标贯 ¹⁾ 均值	
填土	①	碎石素填土	1.2~3.0	稍密	5~7	
	冲(坡)积土	②-1	粉土	0.8~3.0	松散	3
		②-2	粉砂	0.8~5.9	松散	3
		②-3	淤泥质土	1.6~4.9	流塑	<2
		②-4	粉质粘土	1.1~4.7	可塑	6
		②-5	淤泥质土	1.0~5.8	流塑	<1
②-6	粉质粘土	1.5~4.3	可塑	7		
残积土	③	粉质粘土	0.8~15.0	可塑-硬塑	15	
基岩	④-1	泥质粉砂岩	0.8~8.0	强风化	26	
	④-2	泥质粉砂岩	0.3~24.0	全风化	62	

1) 标贯均值单位是击, 表 2 和表 3 相同

表 2 场地 2 试验桩桩长范围内地质情况
Table 2 Soil geological data of the test site 2

土类	层序	土层性质	厚度/m	状态	标贯均值	
填土	①	素填土	1.7~2.8	松散	3~4	
	冲(坡)积土	②-1	淤质粉质黏土	2.4~5.3	流塑	4.5
		②-2	粉砂	2.3~5.8	松散	2.4
		②-3	淤泥	2.8~7.1	流塑	<1
		②-4	粉质黏土	0.6~8.8	可塑	10.7
		②-5	淤质黏土	1.9~7.4	流塑	<2
②-6	圆砾	0.5~2.4	中密	20		
残积土	③	粉质黏土	1.1~3.1	硬塑	21.7	
基岩	④	泥质粉砂岩	0.6~5.8	强风化	51~69	

表 3 场地 3 试验桩桩长范围内地质情况
Table 3 Soil geological data of the test site 3

土类	分层	土层性质	厚度/m	状态	标贯均值	
填土	①-1	黏性素填土	0.7~3.9	松散	7	
	①-2	砂性素填土	0.5~3.6	松散	6	
	冲(坡)积土	②-1	淤泥质土	1.3~3.6	流塑	<1
		②-2	粉土	0.4~1.3	松散-稍密	5
		②-3	淤泥质土	4.8~8.5	流塑	<1
		②-4	粉土	1.0~4.5	稍密	7
		②-5	中砂	2.7~18.3	稍密-中密	17
		②-6	粉质粘土	0.2~8.1	可塑	12
		②-7	淤泥质土	0.4~9.3	流塑	<1
②-8		粉土	0.5~10.4	松散-稍密	7	
②-9	中粗砂	0.8~1.0	中密-密实	30		
基岩	③-1	强风化层	0.3~5.0	极软岩	72	
	③-2	中风化层	1.0~11.7	软岩		

2 试验结果及分析

通过现场的模型桩试验, 获得 3 个场地 7 根模型桩的压桩数据。与摩擦型静压桩的压桩过程相比, 差异通常出现在沉桩贯入的后期, 前期的差异并不大, 因此主要考虑沉桩贯入后段的桩侧阻力的变化 (图 1)。由于场地 3 中部 10 m 深度附近存在一层约 6 m 厚稍密-中密的砂层, 上下皆为黏土, 对桩端阻力的影响很大, 故选择从入土深度为 8 m 开始研究; 而其他场地基岩以上性质相近, 桩端阻力变化不大, 因而选择从入土深度为 18 m 开始研究。具体试验结果如图 1 所示。载荷试验获得的承载力数据与沉桩终压力数据对比如表 4 所示。a 试桩由于影响场地实际工程施工进度而未做载荷试验。

表 4 静压桩沉桩终压状态与极限承载状态对比

Table 4 Comparison of the end installation state and the ultimate bearing state of jacked pile

桩号	桩长/m	沉桩结束时/kN			载荷试验时/kN			时效性	
		终压力	端阻	侧阻	承载力	端阻	侧阻	端阻	侧阻
a	20.3	2 174	1 020	1 154	-	-	-	-	-
b	19.7	1 890	570	1 320	1 760	433	1 265	0.76	0.96
c	19.1	1 827	1 543	284	2 010	1 405	604	0.91	2.13
d	23.7	1 753	731	1 021	2 387	637	1 750	0.62	1.71
e	21.6	1 800	1 203	596	2 639	1 064	1 574	0.88	2.64
f	21.0	1 815	1 202	613	1 760	1 093	667	0.91	1.09
g	21.0	1 785	827	958	1 760	871	888	1.05	0.93

2.1 终压时桩端阻力时效性研究

通过终压时与静载试验时两种情况下的桩端阻力的对比发现桩端阻力的变化并不大。表 4 中极限状态下的桩端阻力通常小于终压时对应的桩端阻力, 这与载荷试验的基本规定有关, 即通常将破坏的前一级作为极限荷载。这一荷载并未真正达到极限状态, 若桩端达到极限状态, 其阻力值与沉桩终压时的桩端阻力应非常接近。因此, 桩端阻力对静压桩承载力时效性的影响很小, 桩侧摩擦阻力的时效性是引起静压桩承载力具有时效性的主要原因, 这与前人的研究是一致的^[1, 11, 15-16]。

2.2 静压贯入过程中桩侧阻力变化规律及其解释

对于同一场地, 桩侧土层大体相当, 桩的入土深度也大体相当, 桩侧土所能提供的最大侧阻力也应一致。但是, 由于桩端条件的不同, 出现了很多难以理解的现象 (见图 1)。

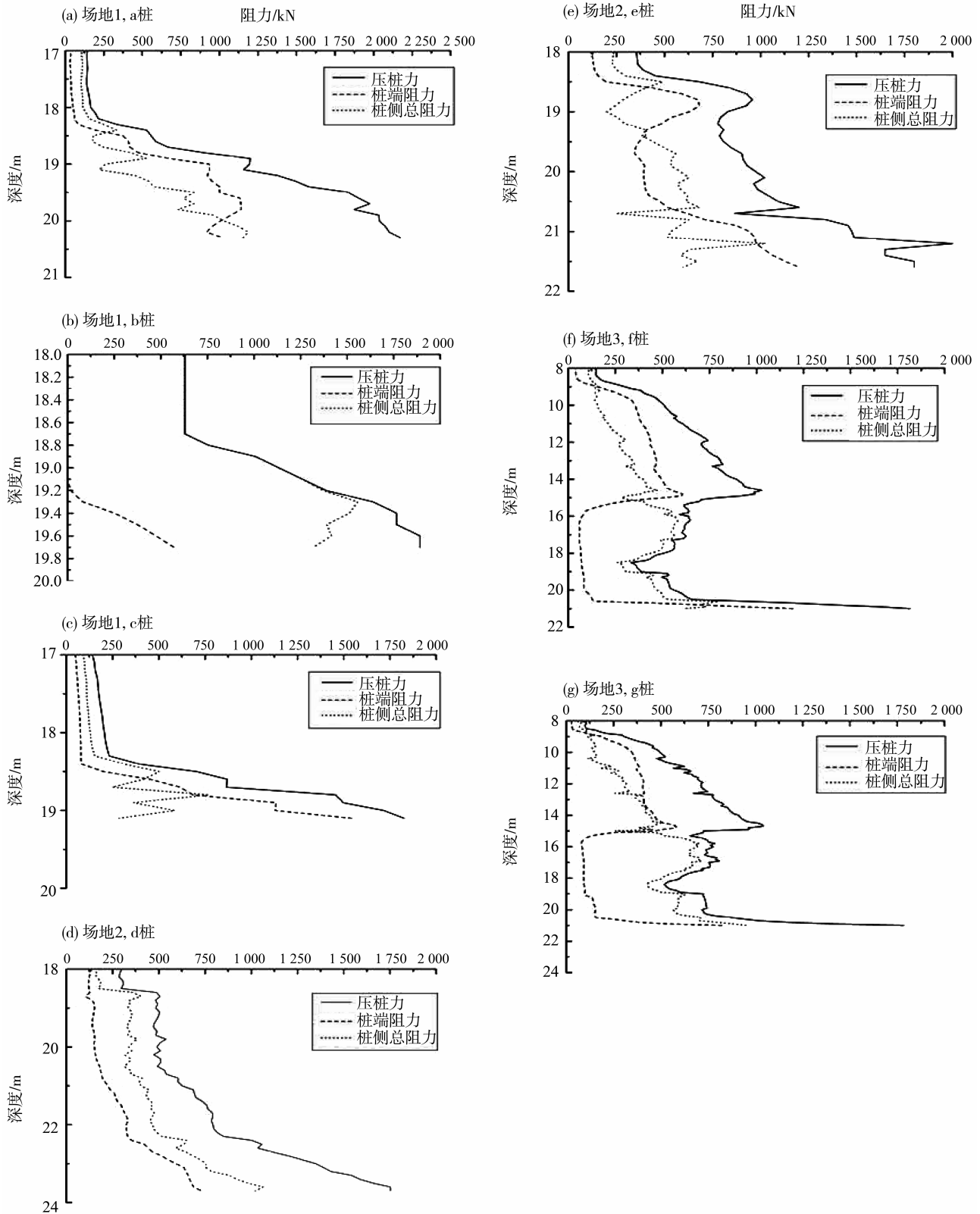


图 1 静压贯入过程中压桩力、桩端阻力及桩侧总阻力实测曲线对比

Fig. 1 Measured curves of installation resistance, base resistance and total shaft resistance of jacked pile during installation

1) 总体而言, 当桩端阻力较小时, 桩侧阻力随着桩端阻力的增大而增大; 但是, 当桩端阻力值继续增大并超过某一数值时, 通常会导致桩侧摩阻力降低。

2) f 、 g 桩在 15 m 左右从强度较高的砂层进入较弱的黏土和淤泥质土中, 桩端阻力突然变小, 桩侧阻力随之变小; 桩端阻力继续下降时, 桩侧阻力又开始增大; 当桩端阻力稳定时 (16 ~ 18 m), 桩侧阻力又开始降低。

这些现象从传统的摩擦学理论及桩侧土因扰动、孔压增大导致土体强度降低等角度难以得到合理的解释, 但若从目前成熟的摩擦、磨损与润滑理论, 能很好的解释上述现象。

1) 当桩端阻力较小时, 静压桩以较大的速度连续贯入, 桩 - 土之间出现水 (或泥浆) 膜, 一旦桩端阻力增大, 必然导致沉桩速度下降, 水 (或泥浆) 膜变薄从而使桩侧阻力增大, 同时桩 - 土的相对位移也有变化, 但此时对侧阻力影响很小。当桩端阻力增大到某一程度, 沉桩速度降低, 桩侧水 (或泥浆) 膜消失, 桩 - 土之间为干摩擦, 同时桩 - 土的相对位移也在极限值附近, 桩侧阻力达到极值。若桩端阻力继续增大, 此时桩端下沉量非常小, 如 f 、 g 桩 20m 以下的桩端阻力曲线几乎是水平线, 即桩端阻力急剧增大, 桩难以压入地层, 此时桩 - 土相对位移很难增大, 开始导致桩侧阻力难以发挥, 如 f 桩终压时已出现变小趋势, 表明 f 、 g 桩桩侧摩阻力的发挥接近极限值。

2) f 、 g 桩在 15 m 左右从强度较高的砂层进入较弱的黏土和淤泥质土中, 桩端阻力突然变小, 沉桩速度急剧上升, 桩土之间为湿摩擦, 即存在较厚水膜或泥浆膜, 使桩侧阻力变小; 但同时桩端阻力下降会导致桩身切向力增大, 而使桩 - 土之间的黏着力大幅增大, 因而出现桩侧摩阻力变小后又增大; 当桩端阻力稳定时 (16 ~ 18 m), 此时沉桩速度达到最大并开始稳定, 桩土之间出现稳定厚度的水膜或泥浆膜, 桩土之间为湿摩擦, 桩侧摩阻力开始下降。

2.3 终压时桩侧阻力对承载力时效性的影响分析

分析图 1 可得, b 、 c 、 f 、 g 桩终压时桩侧阻力随桩端阻力的增大而增大, b 、 c 、 f 桩桩侧阻力明显回落, 表明这几根桩终压时的桩侧摩擦为干摩擦。 f 、 g 桩的桩侧阻力的发挥接近极限值, 桩侧摩阻力发挥程度很高; b 、 c 桩因桩端土强度大致使桩下沉困难, 从而使桩土相对位移过小不能充分发挥桩侧阻力。尤其要注意的是, b 、 c 桩在间歇期

后仍然难以下沉, 故不能使承载力提高; d 、 e 桩都未达到干摩擦状态, 其侧摩阻力的发挥程度未达到极限值, 桩侧摩阻力发挥程度很低, 有提高的可能。根据桩侧摩阻力是承载力时效性的主要原因这一结论以及上述的分析, b 、 c 、 f 、 g 桩的承载力时效性应很小, 而 d 、 e 桩的时效性应很明显。这一规律在表 4 得到了证实, b 、 f 、 g 桩几乎没有时效性, d 、 e 桩具有明显时效性, 仅 c 桩表现出较明显的侧阻力时效性。但是, c 桩侧阻力仅发挥了最大侧阻力的很小一部分, c 桩的承载力提高仅为 10%, 这表明 c 桩的承载力时效性并不明显。

综上所述, 静压桩的承载力时效性主要取决于终压时桩侧摩擦的性状及其发挥程度。

3 结 论

通过上述的分析研究, 可得如下结论:

1) 桩端阻力的变化导致沉桩速度的变化, 从而导致桩侧摩擦在干、湿摩擦之间不断转变, 桩侧阻力随之不断变化。

2) 当桩穿过较硬土层进入软弱土层, 应同时考虑沉桩速度增大和切向力增大两个因素对桩侧摩擦的影响。

3) 对于端承型静压桩, 终压时桩端阻力不断增大, 桩侧摩擦由湿摩擦向干摩擦转变, 直至桩侧阻力极限值; 随着桩端阻力的继续增大, 桩端下沉困难而使桩土相对位移过小而无法充分发挥桩侧阻力, 而且间歇期后仍难以发挥。

4) 对于端承载型静压桩, 若终压时桩侧摩擦为干摩擦, 该桩的承载力时效性不显著, 若仍为湿摩擦则时效性显著。

致谢: 本文的试验在珠三角地区完成, 其他地区是否具有相同规律, 尚须进一步验证。本文的试验与广东永基建筑基础有限公司合作完成, 在此对该公司相关人员的辛勤工作表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] REDDY S C, STUEDLEIN A W. Time-dependent capacity increase of piles driven in the Puget Sound Lowlands [C] // ISKANDER M, GARLANGER J E, HUSSEIN M H. From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering: Geo-Congress. USA, 2014: 464 - 474.
- [2] YORK D L, BRUSEY W G, CLEMENTE F M, et al. Setup and relaxation in glacial sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(9): 1498 - 1513.
- [3] STEWARD E J, WANG X. Predicting pile setup (freeze): A new approach considering soil aging and pore

- pressure dissipation[C]// Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. USA, 2011: 11 - 19.
- [4] SEED 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.
- [5] VESIC A S. NCHRP synthesis of highway practice 42: design of pile foundations[R]. Transportation Research Board, Washington DC, 1977.
- [6] HUANG S. Application of dynamic measurement on long H-pile driven into soft ground in Shanghai [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Canada, 1988: 635 - 643.
- [7] BULLOCK P J. The easy button for driven pile setup: dynamic testing[C] // GeoCongress 2008: From Research to Practice in Geotechnical Engineering, New Orleans: ASCE, 2008: 471 - 488.
- [8] RAUSCHE F, ROBINSON B, LIKINS G. On the prediction of long term pile capacity from end-of-driving information[C] // DIMAGGIO J A, HUSSEIN M H. Current Practices and Future Trends in Deep Foundations: Geo-Trans. USA, 2004: 77 - 95.
- [9] CHOW F C, JARDINE R J, BRUCY F, et al. Effects of time on capacity of pipe piles in dense marine sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(3): 254 - 264.
- [10] MITCHELL J K, SOLYMAR Z V. Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(11): 1559 - 1576.
- [11] SKOV R, DENVER H. Time-dependence of bearing capacity of piles[C] // Proc Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Canada, 1988: 25 - 27.
- [12] BULLOCK P J, SCHMERTMANN J H, McVAY M C, et al. Side shear setup. I: Test piles driven in Florida [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(3): 292 - 300.
- [13] TAN S, CUTHBERTSON J, KIMMERLING R. Prediction of pile set-up in non-cohesive soils[C] // DIMAGGIO J A, HUSSEIN M H. Current Practices and Future Trends in Deep Foundations. USA, 2004: 50 - 65.
- [14] BASU P, LOUKIDIS D, PREZZI M, et al. Analysis of shaft resistance of jacked piles in sands[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(15): 1605 - 1635.
- [15] SAMSON L, AUTHIER J. Change in pile capacity with time: case histories[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23(2): 174 - 180.
- [16] GAVIN K G, O KELLY B C. Effect of friction fatigue on pile capacity in dense sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 63 - 71.
- [17] 张明义, 王崇革. 静压桩极限承载力的时效性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(A02): 2601 - 2604.
- [18] 王戌平. 深厚软土中 PHC 长桩的时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 239 - 241.
- [19] 张明义. 静力压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- [20] 张雪松, 屠毓敏, 龚晓南, 等. 软粘土地基中挤土桩沉降时效性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3365 - 3369.
- [21] ZHANG L M, NG C W, CHAN F, et al. Termination criteria for jacked pile construction and load transfer in weathered soils[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2006, 132(7): 819 - 829.
- [22] 邓学支. 静压桩压桩力与承载力关系研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [23] YU F, YANG Y. Discussion of "Termination criteria for jacked pile construction and load transfer in weathered soils" by L. M. Zhang, C. W. W. Ng, F. Chan, and H. W. Pang [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(11): 1477 - 1480.
- [24] 张明义, 刘俊伟, 于秀霞. 饱和软黏土地基静压管桩承载力时间效应试验研究[J]. 岩土力学, 2009(10): 3005 - 3008.
- [25] 张忠苗, 刘俊伟, 俞峰, 等. 静压管桩终压力与极限承载力的相关关系研究[J]. 岩土工程学报, 2010(08): 1207 - 1213.
- [26] 王家涛, 张明义. 基于时效性的静压管桩侧阻力计算[J]. 岩土工程学报, 2011(S2): 287 - 290.
- [27] 王家涛, 周健, 张明义. 基于球孔扩张理论和时效性的静压桩承载力计算[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 964 - 968.
- [28] 刘俊伟. 静压开口混凝土管桩施工效应试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [29] 王家涛, 张明义. 基于时效性的静压管桩侧阻力计算[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊2): 287 - 290.
- [30] LIU J, ZHANG Z, YU F, et al. Effect of soil set-up on the capacity of jacked concrete pipe piles in mixed soils [J]. Journal of Zhejiang University (SCIENCE A), 2011, 12(8): 637 - 644.
- [31] 寇海磊, 张明义, 刘俊伟. 基于光纤传感技术静压桩承载力时效性机理分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1082 - 1088.
- [32] TEH C I, WONG K S, GOH A T C, et al. Prediction of pile capacity using neural networks[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1997, 11(2): 129 - 138.
- [33] TEH C I, WONG K S, GOH A T C, et al. Prediction of capacity using neural networks [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1997, 11(2): 129 - 138.
- [34] JACKSON A. Pile jacking in sand and silt[D]. London: Cambridge University, 2008.