

基于静动法的大直径超长桩承载力实测分析^①

王 湛¹, 刘宇峰², 娄学谦¹, 戴宇文¹, 桑登峰¹

(1.中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510288; 2.中交四航第一工程有限公司, 广东 广州 510310)

摘要:大直径超长桩在海洋工程和桥梁工程中应用广泛,但目前常用的测试方法均有各自的局限性。针对普通静载费时费力,自平衡测试方法研究不够完善等不足,基于马来西亚檳城二桥工程,采用现场实测方法对砂土地层中大直径超长嵌岩桩的静动法测试进行研究。通过对同一根桩上的自平衡法测试结果进行对比,分析静动法测试大直径超长桩承载力的适用性。通过对比发现,静动法测试结果用传统卸荷点法和分段卸荷点法处理得到的等效静承载力比自平衡法大30%左右;且由于土动摩阻和孔隙水压力影响,静动法测得的桩身摩阻力也大于自平衡测试结果,需要进行修正。

关键词:静动法; 自平衡; 大直径; 超长桩; 实测

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1113-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1113

Actual Analysis of Bearing Capacity of Piles with Super-large Diameter and Deep Penetration Based on Statnamic Method

WANG Zhan¹, LIU Yu-feng², LOU Xue-qian¹, DAI Yu-wen¹, SANG Deng-feng¹

(1.Engineering Technology Research Institute of CCCC Forth Harbor Engineering Bureau, Guangzhou, Guangdong 510288, China;

2.The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510310, China)

Abstract: Piles with super-large diameters and deep penetration are widely used in ocean and bridge engineering; however, traditional capacity test methods used for such piles have limitations. Focusing on the imperfections of normal static load and Osterberg cell (O-cell) methods, the statnamic testing method is investigated on the basis of the Second Penang Bridge project in Malaysia. The capacities of piles with super-large diameters and deep penetration in sandy strata are studied. Compared with the results of the O-cell method used on the same pile, the applicability of statnamic testing for super-large diameter, deep-penetration piles is analyzed. Results indicate that the equivalent static capacities resulting from the Unloading Point Method (UPM) and the Segmental Unloading Point Method (SUPM) are 30% larger than the results when using the O-cell method. Because of the influences of dynamic soil resistance and pore pressure, the side friction of statnamic testing is also larger than that when using the O-cell method. Therefore, the statnamic method still requires modification.

Key words: statnamic method; Osterberg cell (O-cell); large diameter; super-large pile; field test

0 引言

目前单桩承载力的常用测试方法主要有静载试验法和高应变动测法。静载试验法包括常规静载和自平衡法。常规静载是在桩顶作用荷载使其产生位移,可得到桩顶的Q-S曲线,以此判断桩的承载力。该法最为可靠,但费用高,且费时较多。而对于大直径超长嵌岩桩,常规静载往往很难加载到桩的极限承载力。自平衡法是在桩的中下部埋设一个荷载箱,通过测得两条向上、向下的Q-S曲线,经过换算得到单桩抗压承载。该方法能测试较大的承载力,在大直径长桩应用广泛。但自平衡法的荷载箱埋设位置的确定方法研究

不够完善,且目前的转换方法对超长桩的试验结果存在较大误差。高应变试桩法是指所有能使桩土产生永久变形(或较大动位移)的动力检测基桩承载力的方法。该法快速轻便,但由于波的复杂性,且要保证桩土间产生一定的相对位移,测试结果的可靠性较差,也难适用于大直径嵌岩桩^[1-3]。

静动法(Statnamic Method)是基于解决静载试验法和高应变动测法的不足而逐渐发展起来的一种桩承载力检测方法。它兼有静载试验和高应变动测的优点,如原理简单、费用低(仅为传统静荷载试验的1/4~1/2)、历时短、方便灵

活(需要的反力物仅为施加荷载的 5%~10%)等。其不足在于 100 ms 的荷载持续时间与静载相比还是太短。从本质来说,静动法仍是一种动测方法,必须通过一系列经验性的假定来调整实测数据,使得分析方法有一定的限制条件。目前,国内外学者对静动法的研究还较少,且研究主要集中在尺寸较小的桩^[4-9]。与其他测桩方法相比,静动法对于检测承载力较高的大直径超长嵌岩桩优势明显,如能克服上述的缺陷,静动法具有很大的发展前途。

本文以马来西亚槟城二桥试桩工程为依托,对静动法在砂土地层中大直径超长嵌岩桩试桩的应用进行阐述和分析。该试桩长 120 m,直径 2 m,其尺寸超过目前所有已发表的静动法试桩。更难得的是,对该试桩同时进行了静动法测试和自平衡法测试。本文将静动法的测试结果与自平衡法测试结果进行对比,分析两种测试方法在大直径超长嵌岩桩的适用性。

1 静动法测试原理及分析方法

静动法是将压力室和反作用体置于测试桩的顶部,利用压力室中燃料燃烧推动堆载上升运动而产生的反冲对桩顶作用高压,使桩体产生向下位移。整个试验过程中,通过安置在桩顶的压力传感器、加速度传感器和激光控制器测定桩顶受力和位移。静动法试验时产生的加速度约 10~20 g,所以反压堆载只需静载试验的 5%~10%,大大节省时间和费用。同时,燃烧时间可人为控制,使荷载作用时间维持 100~800 ms,更接近于静载情况^[10]。

通过静动法试验能实测得到参数有:总静动力 F_{stn} 、位移 u 、速度 v 和加速度 a 。桩的承载力 P_u ,即土对桩的静阻力 F_u 可通过下式计算:

$$P_u = F_u = F_{stn} - F_v - F_a \tag{1}$$

式中: F_v 为土的动阻力,包括土的阻尼力和孔隙水压力产生的阻力, $F_v = cv$, c 为阻力系数, v 为桩身速度; F_a 为桩的惯性力, $F_a = ma$ 。

通过静动法试验结果 $F_{stn}-u$ 曲线转换得到相应的静载 Q-S 曲线,目前常用有卸荷点法 (UPM) 和分段卸荷法 (SUPM)。

(1) 卸荷点法^[10]
该法假定阻尼是线性的,试验中阻尼系数 c 是常数。 $F_{stn}-u$ 曲线上最大沉降点为“卸荷点”,该点处的速度和阻尼力均为零。

$$F_u = F_{umax} \tag{2}$$

而最大荷载点 F_{max} 上加速度为零,速度达到最大值 v_{max} 。

$$F_u = F_{max} - cv_{max} \tag{3}$$

结合式(2),式(3),可得到阻尼系数 c

$$c = (F_{max} - F_{umax}) / v_{max} \tag{4}$$

(2) 分段卸荷点法
分段卸荷点法是对标准卸荷点法的扩展,更适用于长桩。分段卸荷点法将桩分成若干段,每一段的响应为单自由度系统,并采用标准卸荷点的计算方法进行分析。

分段卸荷点法需要在桩身许多截面埋入应变传感器,每一段的结果分析都基于该截面的数据测量值,即

$$P_{wi} = F_i - F_{i-1} - c_i v_i - m_i a_i \tag{5}$$

式中: P_{wi} 为第 i 段的等效静承载力; F_i 和 F_{i-1} 为第 i 段上下截面的静动力; c_i 、 v_i 、 m_i 、 a_i 分别为第 i 段的阻尼系数、速度、质量和加速度。

桩的总承载力为

$$P_u = \sum_{i=1}^n P_{wi} \tag{6}$$

2 工程背景

马来西亚槟城二桥连接槟岛 Bayan Lepas 高速和大陆的 Hujung Bukit,线路总长约 23 km,其中跨越 Penang 海峡的跨海大桥长约 17.0 km。为给槟城二桥下部结构桩基础的设计和施工提供科学依据,在 P025 主墩工程桩位附近补钻一根非工程试验桩(P25)进行桩基竖向承载力(静动法+自平衡静载试验法)测试。槟城二桥整体鸟瞰图和 P25 非工程试验桩位置如图 1 所示。

P25 非工程试验桩主要参数见表 1。高程 -3.25~-38.50 m 范围有钢护筒,桩径为 2.3 m;高程 -38.50~-123.25 m 桩径为 2.0 m。

表 1 P25 试验桩相关设参数
Table 1 Parameters of pile P25

混凝土强度等级	入岩深度/m	桩径/m	桩长/m	工作荷载/MN
C40	4.0	2.0~2.3	120	25.5



图 1 P25 桩位图
Fig.1 Schematic diagram of pile P25

P25 桩所处位置的土层分布情况如表 2 所示。其中,中等风化层原岩结构较清晰,构造较完整,节理裂隙较发育,沿裂隙面有风化痕迹,风化等级为Ⅲ级;微风化层原岩结构清晰,构造完整,节理裂隙不发育,岩芯柱面光滑,锤击声脆,不易断,岩芯较完整,局部近新鲜基岩,风化等级为Ⅱ级。桩端所处岩层单轴饱和抗压强度为 44.6~47.0 MPa。

静动法试验测试设备包含加载系统和测试系统。加载系统包含气缸、活塞、爆炸室、消声器、质量块、支撑板和粒状填充物等。加载系统经小部件装配组成,堆载采用混凝土

表 2 土层情况分布

Table 2 Distribution of soil layers

序号	土层名称	高程/m	埋藏深度/m	实测标贯击数
I 1	浅灰~绿灰色淤泥	-9.95~-18.45	0.0~8.5	0
I 2	浅灰~灰色淤泥质黏土	-18.45~-25.45	8.5~15.5	0
II 1	浅灰色黏土	-25.45~-29.45	15.5~17.8	0
III 1	浅灰~灰色中粗砂	-29.45~-45.95	19.5~34.5	9~37
IV 1	灰~灰白色中粗砂	-45.95~-72.95	36.0~63.0	20~39
IV 2	灰色粉细砂	-72.95~-75.95	63.0~66.0	25~50
V 1	浅灰~灰色中粗砂	-75.95~-110.95	66.0~101.0	21~50
VI 1	花岗岩全~强风化层	-110.95~-119.25	101.0~109.3	>50
VI 2	花岗岩中风化层	-119.25~-119.55	109.3~109.6	>>50
VI 3	花岗岩微风化层	-119.55~	109.6~119.4	>>50

块,用小型吊机将混凝土块逐块安装。本工程静动法加载装置如图 2 所示。



图 2 65 MN 静动法加载装置

Fig.2 Loading device using 65 MN statnamic method

桩顶测试系统由力传感器、加速度传感器和激光位移测量系统组成。桩身测量采用 glostrext 的应变测试系统,该测试由先进的气动固定伸缩仪加上高精度弹簧传感器组成,能够在打桩后安装仪器,消除在制桩和打桩过程中仪器被损坏的风险。传感器布置和土层分布如图 3 所示。

3 实测结果

P25 桩静动法测试曲线如图 4 所示。试验开始后,桩顶荷载、速度、加速度约在 72 ms 达到最大值,位移在 115 ms 达到最大值;桩顶荷载在 150 ms 后基本降为 0。

结合力和位移的数据可得到桩顶荷载—位移曲线,如图 5 所示。该图是典型的有较大动阻力的静动法荷载—位移曲线,整个曲线反映静动法试桩的 5 个过程。阶段 1 为设备和堆载的安装,桩顶所受的荷载为装备和堆载的重力,该阶段属于静力加载。阶段 2 为试验初始阶段,反力物体被激发,土的应力应变基本处于线弹性阶段。随着荷载逐渐增加至最大值 F_{max} ,桩具有较大的速度和加速度,土体会进入塑性直至破坏,此时进入阶段 3。由于本工程 P25 试桩是超长

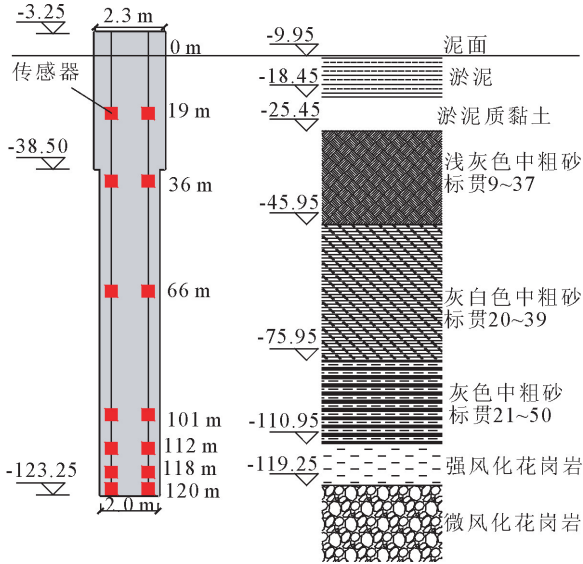


图 3 桩身截面传感器布置图

Fig.3 Pile section and sensor arrangement

大直径嵌岩桩,桩的承载力较大,当 $F_{max} = 65$ MN 时土体还未破坏。因此阶段 3 的荷载—位移曲线非线性特征不明显。阶段 4 为燃烧室结束后的卸载阶段,桩顶荷载减弱,桩的速度和阻尼逐渐降至零。桩顶位移在该阶段达到最大值,此时桩的静极限承载力 $F_{umax} = F_{stn}$ 。阶段 5 为桩卸载后的回弹阶段。土体开始反弹,桩体位移向上,该阶段结束桩的沉降即桩的残余位移。经卸荷点法处理得到的静承载力曲线 F_u 如图 5 所示。

经卸荷点法 (UPM) 和分段卸荷点 (SUPM) 处理,得到的 P25 桩等效静承载力如图 6 所示,同时也附上自平衡法测试结果进行对比。UPM 得到的等效静承载力为 50.2 MN, SUPM 得到的等效静承载力为 59.0 MN,而自平衡法测得的承载力为 38.1 MN。采用常规卸荷点法 (UPM) 和分段卸荷点 (SUPM) 处理的等效承载力要比自平衡法测试的约大 30%。静动法测试结果处理中,动阻力和等效静阻力是在一定假定的基础上计算出来,常规假定方法不适用于超长大直径桩,需要进行修正。

静动法与自平衡法测试的桩身摩阻力分布如图 7 所示。

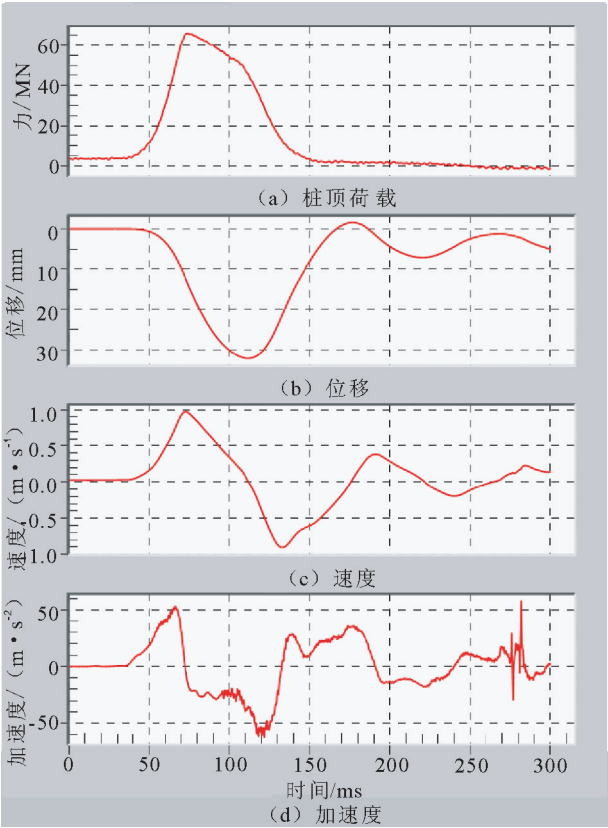


图 4 桩顶力、位移、速度及加速度随时间变化图

Fig.4 Variation of pile head force,displacement and acceleration with time

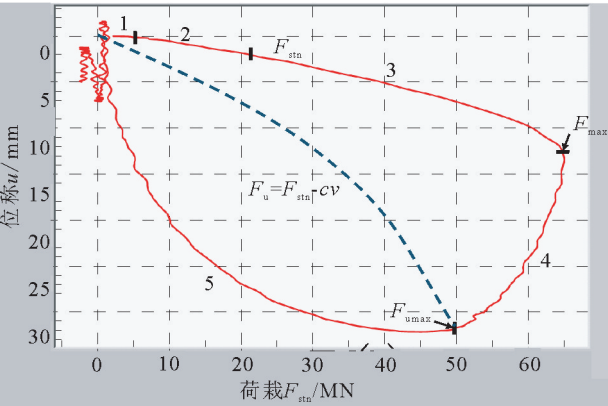


图 5 $F_{stn}-u$ 曲线

Fig.5 $F_{stn}-u$ curve

由于自平衡法的荷载箱安置在桩端,荷载箱以下部分桩身摩阻力远大于正常加载过程产生的摩阻力,对比时不考虑这两个点。由于土动摩阻和孔隙水压力影响,静动法测得的桩身摩阻力均大于自平衡测试结果。因此需对测试结果进行一定的修正才能消除动阻力的影响。同时对于超长桩来说,桩身摩阻力从上到下逐层发挥,不同位置摩阻力会有差异。但本次静动法测试的传感器布置较少,得到的摩阻力结果不能反映超长桩摩阻力发挥特性。

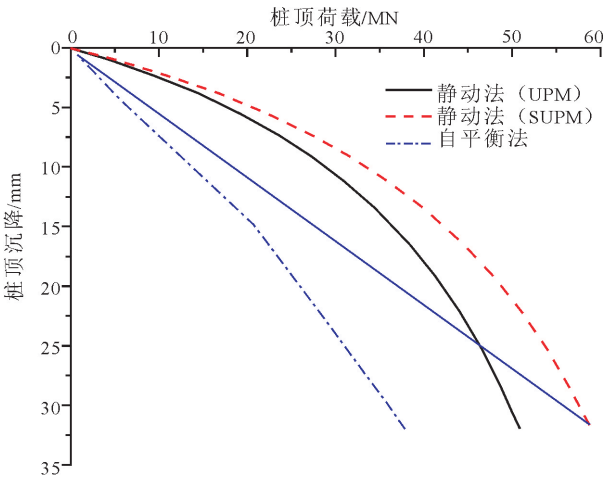


图 6 静动法与自平衡法荷载位移曲线对比图

Fig.6 The $Q-S$ curves tested by statnamic method and O-cell method

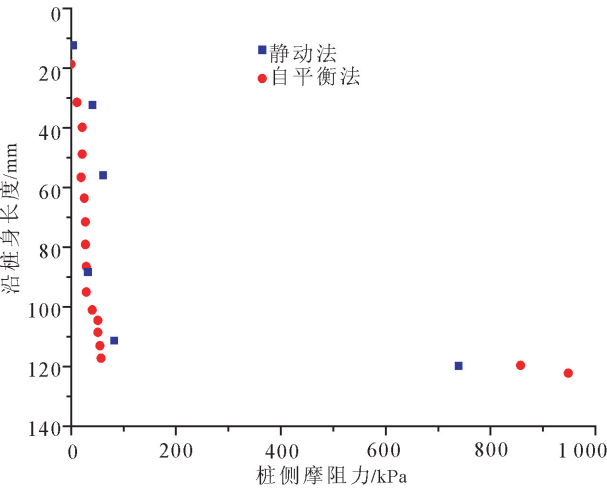


图 7 静动法与自平衡法荷载摩阻力分布对比图

Fig.7 Distribution of frictons tested by statnamic method and O-cell method

4 结论与建议

本文对静动法测试的原理和装置进行了阐述,并结合实际工程对比分析了砂土地层中大直径嵌岩灌注桩的静动法和自平衡法测试结果,初步结论与建议如下:

- (1) 静动法测试单桩承载力,相对于传统静载试验,具有成本低、测试快的优点,能够适用于超大基桩承载力检测。
- (2) 静动法是一种介于传统静载试验和高应变法之间的一种试验方法,检测结果更贴近于传统静载试验过程,但是其测试承载力中仍有动态的成分,需要通过理论假定进行推算,准确度尚有待进一步研究。
- (3) 静动法测试结果用传统方法进行处理得到的等效静承载力比自平衡法大 30% 左右。因此,常规转换方法不适用于超长大直径桩,需要进行修正。
- (4) 由于土动摩阻和孔隙水压力影响,静动法测得的桩身摩阻力大于自平衡测试结果,也需要进行修正。

参考文献(References)

- [1] Institution of Civil Engineers. ICE Specification for Piling and Embedded Retaining Walls[M]. 2nd Edition. London: Thomas Telford Ltd, 2007.
- [2] 李增选. 高应变动力试桩若干问题研究[D]. 上海: 同济大学, 1997.
- LI Zeng-xuan. Research on Several Problems of High Strain Pile Test[D]. Shanghai: Tongji University, 1997. (in Chinese)
- [3] 史佩栋. 桩基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- SHI Pei-dong. Handbook of Pile Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [4] M Janes, A Sy, R G Campanella. A Comparison of Statnamic and Static Load Tests on Steel Pipe Piles in the Fraser Delta [J]. Vancovver Geotechnical Society, Symposium on Deep Foundations, 1994(3): 1-13.
- [5] 李增选, 张莹. 静动试桩法及其应用[J]. 同济大学学报, 2000, 2(1): 108-112.
- LI Zeng-xuan, ZHANG Yin. Stanamic Pile Testing Method and Its Application[J]. Journal of Tongji Univerisy, 2002, 2(1): 108-112. (in Chinese)
- [6] S S Lin, J L Hong, Wei F L, et al. Capacity Evaluation of Statnamic Tested long Piles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004(24): 829-838.
- [7] Michael Brown, William Anderson, Adrian Hyde. Statnamic Testing of Model Piles in a Clay Calibration Chamber[J]. International Journal of Physical Modeling in Geotechnics, 2004(1): 11-24.
- [8] M J Brown, A F L Hyde. Some Observations on Statnamic Pile Testing[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2006, 10: 269-273.
- [9] Jin Li, Ricardo Correia, EdmonChehura, et al. Field Monitoring of Static, Dynamic and Statnamic Pile Loading Tests Using Fibre Bragg Grating Strain Sensors[C]. 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, 2009.
- [10] Goble G G. Dynamic Studies on the Bearing Capacity of Piles [D]. Cleveland, Ohio, US: Case Western Reserve University, 1970.