

单桩轴向抗压承载力检测之疾速载荷试验

朱建民¹, 龚维明², 赵学亮², 谢礼飞¹

(1. 南京东大自平衡桩基检测有限公司, 江苏 南京 210018; 2. 东南大学 土木工程学院)

摘要:疾速载荷试验是一种介于静载与动测之间的单桩轴向抗压承载力检测技术。它利用比静载试验低一个数量级的配重,在100 ms级的时间内产生接近或超过静载水平的荷载,将试桩整体压入地基,再通过一定方法,计算得出等效静载条件下的单桩轴向抗压承载力。按荷载产生方式的不同,疾速载荷试验分为向外推出重物加载(如 Statnamic)、重物下落加载(如 StatRapid)两大类。该文以美国 ASTM 标准、欧洲 ISO 标准为主,对疾速载荷试验的发展历程、适用范围、荷载特性、加载设备、荷载与位移量测、应变传感器布设、试验准备、数据分析与判定等内容进行了介绍。

关键词:抗压承载力;疾速载荷试验; Statnamic; StatRapid; 荷载特性

单桩轴向抗压承载力检测,目前中国多采用静载试验,如堆载法、锚桩法、自平衡法;当条件适合时,也可采用动力检测,如高应变法。

近些年来,一种介于静载与动测之间的新技术——疾速载荷试验,在国外得到了较多应用。该法特点是利用比静载试验低一个数量级的配重,在100 ms级的时间内(约为高应变法时长的数倍)产生接近或超过静载水平的荷载,将试桩整体压入地基,再通过一定计算方法,得到等效静载条件下的单桩轴向抗压承载力。该文以美国 ASTM 标准与欧洲 ISO 标准为主,对该法做简要介绍。

1 发展历程

疾速载荷试验是一类方法的统称。其中,出现最早且影响最大的是 Statnamic——静动法。

静动法是在气缸内快速燃烧特制燃料,产生的高压气体将重物以很大的加速度向外推出(类似发射火箭),其反作用力(接近超过静载试验加载量)施加于桩顶的承载力测试方法。该法最早由 Bermingham 构思(1985年)、提出(1987年)并进行了首次探索试验(1988年,见图1);其加载设备、数据采集分析系统则由加拿大 Bermingham 公司及荷兰 TNO 研究院联合开发。Bermingham 最初称该法为惯性载荷试验(Inertial load testing),后由 Middendorp 定名为 Stat-

namic(Static + Dynamic,取其介于静载与动测间之意),中国多称为静动法。



图1 静动法首次探索试验

静动法之后,又发展出了利用重物下落配以弹簧/垫材的测试方法(类似打桩或高应变,该文简称为落重弹簧法),其作用于桩顶的荷载特性与静动法相似。该法设备有 StatRapid(图2)、Pseudo Static Pile Load Tester、Spring Hammer、Hybridnamic 等若干种。



图2 StatRapid 现场检测设备

虽然上述两类测试方法的荷载产生方式有所区

别,但对受检桩而言加载机理相同,故将其合称为 Rapid Load Test。目前,日本(2002)、美国(2008、2010、2019)、欧洲(2016)已先后发布和更新了试验标准,促进了该法的推广应用。

在中国,1995年6月曾进行过一次静动法演示试验;之后由于种种原因,静动法并未在工程实践中推广应用,相关的研究成果也较少;近年来,随着中国企业大量承接海外项目,静动法又重新回到了工程技术人员的视野。但是,静动法因其燃料较为敏感,在中国推广预计难度较大;落重弹簧法则无此方面限制。

2 “疾速载荷试验”名称的由来

“疾速载荷试验”是该文综合考虑中国术语使用情况与国外检测标准后给出的暂定名称。

中国桩基检测术语中,“快速”一词已用于“快速维持荷载法”;又因该法的加载速度比“快速维持荷载法”还要快得多,故此不宜再用“快”字。

该法目前的国外标准有日本、美国、欧洲3部,其名称分别为“杭の急速载荷試験方法”、“Standard test methods for axial rapid load (compressive force pulse) testing of deep foundations”、“Testing of piles: rapid load testing”;其关键词分别为“急速”、“rapid (pulse)”、“rapid”。日本用“急速”来描述试验的快速程度是较贴切的,但“急”在现代汉语中多包含主观色彩,因此改用“疾”字更好些。

综合上述因素,该文采用“疾速载荷试验”来指代此项检测技术。

3 标准依据

目前,疾速载荷试验已有日本JGS、美国ASTM、欧洲ISO 3部标准,其中ASTM和ISO标准的影响力更大,更容易得到业内认可,故该文结合现阶段部分研究进展,对ASTM和ISO标准的主要内容进行介绍。

4 适用范围

该法适用于检测单桩的轴向抗压承载力。当沿桩身布设传感器时,可获得岩土层的分层侧阻力和端阻力。按ISO标准,该法可用于试验桩和工程桩检测,等效转换后的试验成果可用于岩土工程设计(EN 1997-1)。静动法的荷载产生方式与方向无关,故测

试单桩直桩、斜桩的轴向抗压承载力,单桩和群桩的水平承载力均较方便。落重弹簧法利用重力产生荷载,故多用于单桩竖向抗压承载力检测。

5 荷载特性

ASTM标准给出的该法作用于桩顶的荷载特性如图3所示(L 为桩长, c_p 为桩身波速)。

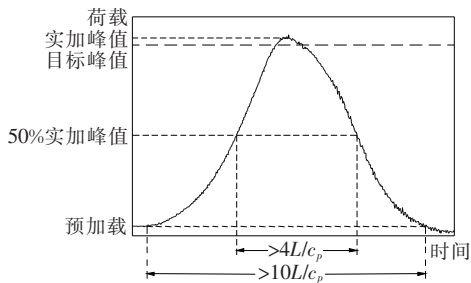


图3 典型荷载特性

荷载-时间曲线为单峰型,具有缓升缓降的特点,并且荷载为连续平滑施加。其关键控制指标有:①峰值荷载。实际施加的峰值荷载应大于目标峰值荷载;②持荷时间。荷载超过预加载值的持荷时间 $t_f > 10L/c_p$;③50%实加峰值荷载持荷时间。荷载超过50%实加峰值荷载的持荷时间 $t_{f,50} > 4L/c_p$ 。

图3中的预加载一般为设备自重作用于桩顶的荷载,多适用于A类设备,B类设备常可忽略(A、B类设备后面介绍);目标峰值荷载是根据试桩条件、项目要求预先确定的,一般在静载要求加载量、动阻力的基础上,再适当增加余量。

对于持荷时间,ISO标准要求 $10\text{ ms} < t_f c_p / L < 1\,000\text{ ms}$,其下限与ASTM标准相同;但ASTM标准与ISO标准均规定,若试桩按要求加装了应变传感器,则 $t_f < 10L/c_p$ 也可接受(注:ASTM D7383-19条款5.1对加装传感器的要求误作5.4.4,应为5.4.5)。

目前,主流试验设备的持荷时间在100 ms左右。ASTM标准2010版曾给出了一些典型数据,可用来估算疾速载荷试验适用的桩长(无需额外增加传感器): $t_f = 90 \sim 250\text{ ms}$;混凝土桩 $c_p = 4\,000\text{ m/s}$,钢桩 $c_p = 5\,100\text{ m/s}$ (按中国情况,混凝土桩一般为 $3\,000 \sim 4\,500\text{ m/s}$,钢桩为 $5\,120\text{ m/s}$)。现取持荷时间的中间值170 ms,按 $10L/c_p$ 计算,可得相应桩长为:混凝土桩68.0 m,钢桩86.7 m。若桩长再增大,则应通过调节设备来延长持荷时间,或者沿桩身增设传感器来提

高测试精度。

一般认为,疾速载荷试验的桩顶荷载大且作用时间相对较长,桩身近似作为整体压入地基,从而激发沿桩身分布的静阻力和动阻力。目前,疾速载荷试验的主流数据分析方法并非基于应力波理论,对持荷时间做出上述规定,主要是为了消除应力波的影响,使桩顶、桩端位移趋于同步。

6 设备仪器

6.1 加载设备

按照荷载产生方式的不同,ASTM 和 ISO 标准均把加载设备分成两类:① 向上推出重物加载(如 Stat-namic,下文简称 A 类);② 通过重物下落加载(如 StatRapid,下文简称 B 类);两部标准给出的相应名称分别为 combustion gas pressure apparatus、launched mass system、cushioned drop mass apparatus、drop mass system。无论采用何种设备,其荷载特性均应满足加载要求(图 3 所示的 ASTM 标准)。

两部标准中,ASTM 标准对加载设备的介绍较详细,有需要的读者可进一步参阅。

ASTM 标准给出的提供反力的配重为 5%~15% 目标峰值荷载,由此可知,加载设备需能产生 20g 的加速度才可采用 5% 的配重。

按 ISO 标准,进行多循环测试时(实为分级加载,每级测一次,荷载逐级增大),加载设备应设制动装置捕获配重,防止反复冲击桩头对后续测试产生影响。ASTM 标准规定 A 类设备应设配重捕获装置,B 类设备宜设捕获装置(非必须)。

6.2 荷载与位移量测仪器

桩顶荷载、桩顶位移是两个基本试验参数,前者通过荷重传感器量测,后者通过位移传感器量测。ASTM 和 ISO 标准对各仪器的量程、精度、响应时间等均有详细规定,在此不赘述。

ISO 标准规定,若不具备直接量测桩顶荷载的条件,也可通过应变计间接量测;一般预制桩的刚度已知或经材料测试即可获得,灌注桩则需在受检桩上进行荷载标定。

ASTM 标准规定,若试桩不具备直接量测位移的条件,也可采用加速度传感器,通过二次积分得到位移。ISO 标准规定,仅在对最终位移进行光学测量的前提下,才可采用加速度二次积分的方式得到位移。

6.3 其他传感器

是否加装其他传感器应结合试验目的、试桩条件等确定。从工程实践来看,对于持荷时间不满足要求的长桩、想进一步提高黏性土中试桩测试精度(与加载速率相关)、通过试验获得侧阻端阻参数等情况,一般需加装传感器;所用传感器类型、位置和数量应根据具体条件和要求确定。

在工程实践中,较常用的传感器是应变计。因试验荷载的持续时间很短,振弦式应变计响应时间难以满足要求,故多采用应变式。目前也有采用光纤传感器的报道。

ASTM 标准规定,对于持荷时间不满足 $10L/c_p$ 要求的试桩,应在桩顶、桩端附近以及沿桩身不大于 $c_p t_f/10$ 间距埋设应变传感器。

如果预期桩顶、桩端位移明显不一致(如桩身压缩量大的长桩,桩身应变分布不均匀的嵌岩桩),应根据需要增加应变传感器。从工程实践来看,嵌岩桩一般能够获得良好的测试结果。

6.4 数据采集系统

目前各成熟的试验设备均配套开发有数据采集系统,集成了信号调节、数据记录、数据显示等功能。

7 试验准备

除了常规的试桩准备项目外,尚有以下几点需要注意:

试桩休止期应同时满足桩身强度发展与土体强度恢复两方面要求,ISO 标准的规定见表 1。此外,ASTM 标准规定,试验时邻近基桩的桩身混凝土也应达到一定的强度。

表 1 休止时间			
类别	土性	桩型	最短时长/d
试验桩	无黏性土	全部	7
	黏性土	钻孔桩	21
		沉桩	35
工程桩	无黏性土	全部	5
	黏性土	钻孔桩	14
		沉桩	21

注:若有正当理由,也可指定其他时长。

因桩头处所受荷载最大,故需进行必要的加固处理,以保证试验的顺利进行。ASTM 标准规定,目标峰值荷载产生的应力不得超过桩身混凝土抗压强度的

85%(指试验时,预应力桩应扣除预应力)或桩身钢材屈服强度的 90%;ISO 标准规定不得超过桩身材料容许应力(permissible stress)。在工程实践中,一般可参照静载或高应变试验进行桩头处理。

一般情况下,疾速载荷试验施加于无黏性土中试桩和嵌岩桩的桩顶荷载与静载要求加载量基本相当(稍小于或略大于);黏性土试桩的加载量有可能显著高于静载要求加载量;按 ISO 标准,最大可达静载要求加载量的 2 倍以上,因此应重视桩身应力验算。

为避免桩身质量问题对试验产生不利影响,可在试验前进行桩身完整性测试(低应变或声波透射法),或采用荷载逐级增大的多循环测试。ISO 标准规定,若对试验后工程桩的桩身完整性存疑,应进行声测。

当直接量测桩顶位移时,基准点(通常放置激光发射器)应在试验影响范围之外。按 ISO 标准,A 类设备基准点到试桩的最小距离为 $c_s t_f$ (c_s 为地基剪切波速);B 类设备的起算点为设备撑脚,计算式为 $c_s(t_g + t_f)$ (t_g 为配重下落时间);并且基准点到 A、B 类设备的距离均不宜小于 15 m。另外,ISO 标准规定,若不满足上述最小距离的要求或不能采用隔振手段时,宜选择不受振动影响的点作为基准点(如基桩)。ASTM 标准的规定与 ISO 标准的 A 类设备相似,基准点到试桩的距离不应小于 15 m。

试验开始前应核查记录桩顶荷载、桩顶位移(标高)等;ISO 标准规定,应记录桩身附着物的质量(其惯性力对结果有影响)。

按 ISO 标准,应事先明确试桩容许最大荷载、位移与试验要求荷载、位移。对于工程桩,除非经过各方认可,桩顶位移一般不应超过 10% 等效桩径(圆桩为外径,矩形桩长短边之比小于 1.5 时取等面积圆的直径)。

8 试验安全

ASTM 标准规定,除了应遵循常规安全条款外,若 A 类设备所用燃料被划归为爆炸物,则应接受相关部门的监管。

试验前人员应撤离至安全区域。ASTM 标准规定的 A 类设备清场半径为 20 m,B 类为 5 m;ISO 标准则统一为 2 倍试验设备高度(自地面起算)。

9 现场检测

试验过程中记录各项数据,至少应包含桩顶荷载

一时间、桩顶位移一时间、桩顶加速度一时间 3 项内容;试验结束后检查荷载或位移是否满足要求,如不满足则再次测试。

10 检测数据分析与判定

疾速载荷试验的测试结果,可以通过一定方法转换得出等效静载试验结果(如桩顶荷载一位移曲线),进而判断轴向抗压承载力。

目前,最为基础的分析方法为卸载点法(UPM, Unloading Point Method),此法已纳入 ISO 标准附录(其性质为 informative,非强制,可供参考)。

对于砂土、碎石土、粉土中的试桩及嵌岩桩,UMP 法均可获得较理想的结果;对于黏性土中的试桩,采用 SHM 法(Sheffield Method)的准确度可能会更高。

为了进一步提高既有方法的分析精度,以及针对持荷时间不满足要求的长桩、受加载速率影响较大的黏性土中试桩等情况,先后发展出了 MUP(Modified Unloading Point)、Fully Mobilized UPM、SUP(Segmental Unloading Point)、SD(Structural Damping)、AMT(Automatic Matching Technique)、Brown Method、Schmucker Method 等方法。

按 ISO 标准,当荷载一沉降曲线为陡降型时,取其拐点为极限承载力;缓变型取桩顶沉降对应 10% 桩底直径的荷载为极限承载力。

ASTM 标准并不涉及详细的数据分析与结果判定,仅给出了若干说明,如:当进行极限承载力测试(加载至岩土破坏)时,宜确保桩顶产生显著的残余沉降量;通常需要引入折减系数来考虑加载速率对承载力的影响,黏性土中试桩的折减程度会更高些等。

11 结论

疾速载荷试验是一种介于静载与动测之间的单桩轴向抗压承载力检测技术。

(1) 疾速载荷试验利用比静载试验低一个数量级的配重,在 100 ms 级的时间内产生接近或超过静载水平的荷载,将试桩整体压入地基,再通过一定方法转换得出等效静载试验结果(如桩顶荷载一位移曲线),进而判断单桩轴向抗压承载力。

(2) 回顾了疾速载荷试验的发展历程,对主要检测设备类型进行了介绍。

(3) 以美国 ASTM 标准和欧洲 ISO 标准为基础,

对疾速载荷试验的适用范围、荷载特性、加载设备、荷载与位移量测、应变传感器布设、试验准备、试验安全、现场检测、数据分析与判定等内容进行了介绍。

参考文献:

- [1] Middendorp P.. Statnamic, The Engineering of Art[C]. Proc. 6th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Sao Paulo, 2000: 551—562.
- [2] Fellenius B. H. The Conception of Statnamic(Welcome Address)[Z]. 1st Int. Statnamic Seminar, Vancouver, 1995.
- [3] StatRapid, A New Rapid Load Testing Application[Z]. [https:// www.allnamics. com](https://www.allnamics.com).
- [4] Schellingerhout A. J. G., Revoort E.. Pseudo Static Pile Load Tester[C]. Proc. 5th Int. Conf. on Application of Stress Wave Theory to Piles, Orland,1996:1 031—1 037.
- [5] Matsuzawal K., Matsumoto T.. Extended Use of Spring Hammer Rapid Load Testing[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2011, 42(2): 29—42.
- [6] Miyasaka T., Kuwabara F., Likins G., et al. Rapid Load Test on High Bearing Capacity Piles[C]. Proc. 8th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Lisbon, 2008: 501—506.
- [7] Hölischer P., Van Tol A. F.. Rapid Load Testing on Piles[M]. Balkema: CRC Press, 2009.
- [8] Hölischer P., Brassinga H., Brown M., et al. Rapid Load Testing on Piles: Interpretation Guidelines [M]. Balkema: CRC Press, 2012.
- [9] JGS 1815—2002 杭の急速载荷試験方法[S].
- [10] ASTM D7383—08 Standard Test Methods for Axial Compressive Force Pulse (Rapid) Testing of Deep Foundations[S].
- [11] ASTM D7383—10 Standard Test Methods for Axial Compressive Force Pulse (Rapid) Testing of Deep Foundations[S].
- [12] ASTM D7383—19 Standard Test Methods for Axial Rapid Load (Compressive Force Pulse) Testing of Deep Foundations[S].
- [13] ISO 22477—10:2016(E) Geotechnical Investigation and Testing — Testing of Geotechnical Structures Part 10: Testing of Piles: Rapid Load Testing[S].
- [14] 王五平. 基础结构承载力分析的动静法非线性模型及评估方法[D]. 东南大学硕士学位论文, 1997
- [15] 韩晓林, 王五平. 桩基承载力检测的准静载灰色方法[J]. 岩土工程学报, 2000(1).
- [16] 王湛, 刘宇峰, 娄学谦, 等. 基于静动法的大直径超长桩承载力实测分析[J]. 地震工程学报, 2014(4).
- [17] 时闽生, 郭灵华, 史炳峰. 静动法试桩技术对比[J]. 水运工程, 2014(10).
- [18] JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S].
- [19] Middendorp P., Bielefeld M. W.. Statnamic Load Testing and the Influence of Stress Wave Phenomena[C]. Proc. 1st Int. Statnamic Seminar, Vancouver, 1995: 207—220.
- [20] Brown M J, Hyde A F L, Anderson W F. Analysis of a Rapid Load Test on An Instrumented Bored Pile in Clay [J]. Géotechnique, 2006, 56(9): 627—638.
- [21] Tran K T, Mcvay M, Nguyen T D, et al. Evaluation of Drilled Shaft Capacity Using Embedded Sensors and Statnamic Testing[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11): 04016075(1—13).
- [22] Li J, Correia R, Chehura E, et al. Field Monitoring of Static, Dynamic, and Statnamic Pile Loading Tests Using Fibre Bragg Grating Strain Sensors [C]. Proc. SPIE 7503, 20th Int. Conf. on Optical Fibre Sensors, Edinburgh, 2009: 75034O—1—4.
- [23] Lin S S, Hong J L, Lee W F, et al. Capacity Evaluation of Statnamic Tested Long Piles[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2004, 24(11): 829—838.
- [24] Mullins G, Lewis C L, Justason M D. Advancements in Statnamic Data Regression Techniques[C]. Proceedings of the ASTM International Deep Foundations Congress, ASTM Geotechnical Special Publication, 2000: 915—930.
- [25] Miyasaka T, Likins G, Kuwabara F. Improved Methods for Rapid Load Tests of Deep Foundations[C]. Contemporary Topics in Deep Foundations, International Foundation Congress and Equipment Expo, ASCE, 2009: 629—636.
- [26] Naggar M H E, Baldinelli M J. Interpretation of Axial Statnamic Load Test Using an Automatic Signal Matching Technique [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(5): 927—942.
- [27] Brown M J, Powell J J M. Comparison of Rapid Load Test Analysis Techniques in Clay Soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(1): 152—161.