

减少动测法确定单桩 承载力误差的有关途径

林建生

(福建省地震局泉州基准地震台, 泉州 362000)

提 要 通过比较静载与动力试验(大、小应变)两种方法在确定单桩承载力方面的区别, 分析不同测试方法所存在的误差, 对减少误差的途径及提高动、静对比效果等问题进行讨论。同时本文还研究了桩基质量对桩、土受力体系的影响及其与承载力的关系等问题, 有关结果提高检测水平具有一定意义。

关键词 桩基测定 方法比较 误差分析

1 前 言

单桩承载力是衡量桩基质量最重要的一项指标, 其承载能力大小直接关系到上部建筑物的安危, 因此必须通过检测手段了解桩基情况。传统的检测方法是用静载实测承载力, 因为静载试验较接近于今后单桩的实际受力状态, 所以是目前规范中要求的方法。但由于静载实验需要消耗较多的时间和费用, 因此只能对少数桩进行试验。而近年发展的桩基动测法却具有速度快、效率高、经济、方便等的优点, 所以在桩基工程中受到日益重视。但是动测法在确定承载力方面的准确程度以及如何改进和提高其检测精度等问题亦是目前人们普遍关心的问题。因此分析不同测试方法的原理及存在误差的原因, 探讨提高检测效果的有关途径和方法具有重要的现实意义。

2 确定单桩承载力的常用方法

在确定单桩承载力时, 静载试验通常采用锚桩和堆桩两种主法。当桩所承受的荷载较大时(例如大于 5 兆牛顿)可用锚桩法。试验时需要布设 4—6 根锚桩, 使千斤顶能够借助锚桩提供的反力对试桩进行加荷。当桩所承受的荷载不大时可用堆载法, 试验时使用承重台加荷, 并用预测砣块、钢锭等提供反力。由于静载试验是直接在桩顶进行加载试验, 所以被认为是较可靠的方法。而动测方面, 测试方法根据试验时桩身的受力大小和桩土之间的相对位移情况分为大、小应变法。目前国内常用的大应变法为锤击贯入法与打桩分析仪

① 本文收稿日期: 1992-01-21

法(如 CASE 法)等方法。而小应变法有桩基参数动测法、机械阻抗法、水电效应法等方法。在动测中一般认为大应变法由于桩土之间的作用得到较好的发挥,因此要比小应变法可靠,但不如小应变法方便。然而由于动测法与静载试验时桩土体系的实际变形条件、受力状态和持荷时间存在差异,所以目前在评估单桩承载力方面改善动测检测精度的两条途径是:

- (1) 增大测试时桩土材料的变形量,使桩土材料的变形规律尽可能接近于静载试验的情况;
- (2) 通过动、静对比关系的统计分析引进动静之间的比例(或修正)系数,使动测计算值接近于静载试验值。

在大应变法中,由于能使桩土之间产生相对位移,并使桩侧土摩阻力和桩端土强度得到较好发挥,因此有利于确定承载力和检查桩身缺陷。同时在一些大应变法中也引进了动、静对比系数来进一步提高检测精度,例如在 CASE 法中确定单桩承载力的两种具体方法(即时间延迟法和阻尼法)需要考虑时间延迟系数和阻尼系数。而在锤击贯入法中则需要引进两个比例系数,即动、静极限荷载之比和动、静极限荷载时的总贯入度与沉降量之比。但是目前一些大应变法也存在由于配套设备笨重而增加了试验难度和费用等静载试验中所遇到的一些问题。而在小应变法中测试方法相对比较简便,但由于激振能量小,桩土之间的位移趋于零,因此桩土系统的相互作用还没有得到发挥,这种情况与静载实验下桩土材料由弹性变形进入弹塑性变形的规律(图 1)有较大区别,因此不利于测定承载力。所以对于小应变法改善检测精度除了应加大击发能量外,另一途径就是应进行动、静对比试验并找出动、静刚度的理论关系。由上述分析可见无论大、小应变法利用动、静对比来找出各种参数之间的关系对其最后确定承载力是十分重要的。而根据有关测试资料的分析表明,各类动测法在同样土质条件下对同一类桩的测试值与静载值之间具有一定的统计规律,因此可利用其动、静实测对比数据经过回归分析后所取得的回归系数对测试值进行修正,然而为了达到修正的目的必须排除有关因素对动、静对比测试中可能产生的误差影响。

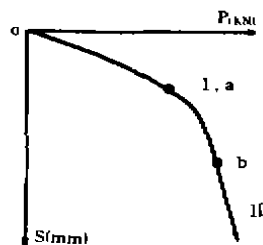


图 1 P-S 曲线图

Fig. 1 P-S curve

- 1、第一拐点(弹性与弹塑性阶段的交点)
- II、第二拐点(弹塑性性与塑性阶段的交点)
- a、临界荷载(I点所对应的荷载)
- b、极限荷载(II点所对应的前一级荷载)

统计规律,因此可利用其动、静实测对比数据经过回归

分析后所取得的回归系数对测试值进行修正,然而为了达到修正的目的必须排除有关因素对动、静对比测试中可能产生的误差影响。

3 动、静对比试验中的若干问题

3.1 混凝土的龄期影响问题

混凝土强度随龄期的增长而提高,初期增长速度较快,以后逐渐减慢,最后趋于某个极限值,不同龄期的混凝土强度增长情况如表 1:

由表 1 可见混凝土前 28 天强度增长较快(特别是前 14 天),这阶段如进行动、静测试,由于强度尚不稳定,承载力测试结果将会偏小,这对于静载试验的影响将会更加明显,所以测试时应能排除(或者考虑)混凝土龄期所带来的影响。

表 1 各龄期混凝土强度增长情况^[1]

Tab. 1 An increase in concrete intensity at different periods

龄 期	7 天	28 天	3 个月	6 个月	1 年	2 年	4—5 年
强 度	0.6—0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25

3.2 动、静测试的先后次序

在静载试验中, 桩基的破坏大多是由于桩周土失去支承能力和桩端土发生大量塑性变形使桩身沉降过大所致, 而试桩后桩周 (包括桩端) 土的强度和有效应力随时间的推移不断地得到调整、恢复和增大, 因此必须有足够的时间桩周土才可能趋于稳定, 所以在静载试验后进行动测往往不便于动、静对比。但如果利用动测法对桩周土变形影响相对较小 (特别是小应变法) 的特点, 采用先测动后测静的方法则有利于排除误差的影响。

3.3 打入桩桩周土的物理变化及其对确定承载力的影响

对于打入桩在桩被打入土层后的一段时间内, 由于地基土的天然结构被破坏了, 土层受到急速挤压, 以致孔隙水压力急剧上升, 有效应力减小, 桩周 (包括桩端) 土的强度明显降低^[2], 因此如果试桩不是在桩周土体的强度恢复后或变形稳定后进行 (通常砂土应 > 2 天, 粘土应 > 10 天, 软土时间应加长^[3]), 则承载力的动、静测试结果将会受到土层在强度 (或变形) 恢复过程中不稳定性因素的影响。

3.4 与静载试验有关的问题

在衡量动测的误差方面, 通常是以静载测试值作为标准值来了解或修正动测的测试结果, 因此静载试验是否按规范要求进程是重要的。但在静载试验中有时为了加快试验速度而增大了每级加载的吨位, 这种情况由于缩短了试验时间, 可能使桩周被扰动土的结构未能得到充分的恢复, 而且由于 P—S 曲线上试验点之间的间距被拉大, 以致当加到某级荷载桩基沉降量过大时, 则所退回一级荷载值确定出的承载力将可能偏小。表 2 为闽南某住宅楼的动、静测试结果, 表中可见如不考虑静载测试误差就直接进行动、静比较将会导致盲

表 2 某住宅楼单桩容许承载力动、静结果比较

Tab. 2 Comparison between static and dynamic results of bearing capacity for single pile in a residential building

桩 号		1	2	3	4	备 注
动 测 (KN)		400	370	370	350	1、设计要求单桩容许承载力为 350KN; 2、第 1 组静载按每级 70KN 加载;
第 一 组	静 载 (KN)	350	350	315	280	
	相对误差 %	14	6	17	25	
第 二 组	静 载 (KN)	385	350	350	315	3、第 2 组静载按每级 350KN 加载。
	相对误差 %	4	6	6	11	

目修正。另一方面在选择静载实验对象时, 所需要的应是设计性的荷载试验 (这种实验的

目的在于为设计人员提供单桩承载力的依据, 所以其荷载值应加到极限荷载), 而不是控制性的荷载试验 (这种实验的最大荷载并不测到极限荷载, 一般只测到满足设计荷载), 因此了解和研究静载试验有关数据和方法的来源是必要的。

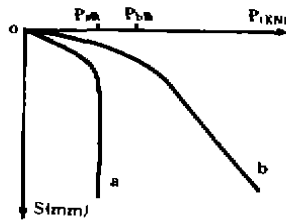


图 2 不同场地的静载试桩曲线

Fig. 2 The static load test curves on different grounds

a、软土地基; b、硬土地基

在静载试验中持力层的性质对 $P-S$ 曲线的形状及承载力的大小有直接影响, 对于桩尖土层强度较低的情况, 桩基的极限荷载容易确定 (图 2, 曲线 a), 但如果桩尖下土层强度较大时 $P-S$ 曲线没有明显的拐点 (图 2, 曲线 b), 甚至 $\lg P-S$ 曲线有时也难于判定, 这种情况下在选择试桩极限承载力的准则方面存在较大的不确定性, 以致只能根据各地经验指定的沉降量作为控制单桩极限荷载的指标, 这种结果带有一定的人为因素。所以对于这类场地静极限荷载的选取是否合理关系测试结果的精度。

3.5 与辅助参数有关的问题

在确定承载力时静载试验较直观, 只要了解桩顶加载量和沉降量情况, 而动测法则必须研究桩的动刚度与有关参数之间的关系。例如桩边土质情况 (地质剖面, 土工试验资料、桩尖持力层位置等) 或桩的反应信息 (贯入度、自振频率、桩头反应速度、阻尼以及其他动力特性)。因此在动测法中一些辅助参数对其计算结果有明显的影响, 而这些参数往往必须在积累了一定经验后才能放心使用。同时了解和熟悉一些参数的来源和实验过程亦是非常重要的。例如在土工实验中摩擦角 ψ 值往往因实验方法不同而结果不一样, 当慢剪 (排水剪) 时 ψ 值最大, 快剪 (不排水剪) 时 ψ 值最小, 固结快剪 (不排水剪) 时居中, 由于选用那种试验方法通常与工程实际情况有关, 所以不可盲目使用。然而笔者认为由于土工实验中一些试验方法往往因人而异且存在较大的不确定性, 所以如想减少检测误差可暂不考虑土工实验资料或地质剖面等辅助参数对计算的影响, 即所需计算参数只与动测试验本身有关而不取决于或依赖于其他试验方法。

3.6 动、静修正系数的选取问题

动测法中动、静修正系数的选取是否合理关系到桩基承载力的检测精度, 一些动测法在考虑这一修正值时通常是将桩的动刚度乘以某一系数即求得桩的承载力, 这种情况只是将修正值作为常数而不考虑桩型 (桩长、桩径)、土质条件、承载力大小等因素的影响, 因此误差将会较大, 从大量的静载试验资料中可看出 $P-S$ 曲线初始斜率 (即静刚度或第一级荷载桩底所受的力/桩底位移) 相等的桩, 它们的极限承载力也可以相差很多, 这种差异随桩径的变化反映是明显的。另一方面一些小应变法的实验结果也表明桩顶作用力的大小往往引起桩土振动频率的变化 (随作用力增大而减小)。这种情况可能表明作用力大小对桩基振动时带动桩周土 (参振土体) 一起振动的能力不同。显然这种差异将使桩基的动刚度值随之产生变化。然而要排除这种误差只有当作用力达到一定量时才可能使测试值趋于稳定或使误差限制在工程允许范围内。综上所述如果分别考虑桩型尺寸, 场地土质、激发条件或分别考虑桩在弹性、弹塑性、塑性各个变形阶段的变化梯度等因素的影响, 即把修正系数作为某些变量的函数分别取值, 则修正后的误差将会有规律地明显减小, 当然如能直接利用同一场地、同一桩型、同一测试条件的动、静对比资料将会更有利于动、静修正系数

的选取和应用。

4 桩身质量对承载力的影响问题

单桩垂直极限承载力指的是单桩在上部垂直荷载作用下,桩不因失去稳定而产生破坏,也不因土对桩的支承力不足而引起过大沉降时所能承受的最大荷载。所以单桩的垂直承载力决定于:(1)桩基的材料强度;(2)土对桩的支承力。对于端承桩其垂直承载力一般取决于(1),对于摩擦桩大多数取决于(2)。但如果桩身质量有问题(例如缩颈、断桩等)桩基稳定性的破坏则由桩本身材料强度不足引起。一般情况下,对于桩型、材料、持力层相同的桩基,如果桩土系统的动力特性(剪切波速比,频率特性,阻尼特性等)存在差异则表明桩身的质量(桩的长度与有效半径之比,桩与土的质量密度比,桩周与土的接触,孔底沉渣等)发生了变化,这些变化改变了桩土系统的边界条件及土层对桩的约束作用^[4],以致影响了桩基刚度及承载力的大小。因此对于同一场地上同一类型的桩,当其承载力存在差别时,利用质量检测手段可分析出是局部场地地质条件变化,还是施工质量问题带来的差异,这样就有利于设计人员对静力设计方案是否需要修改做出进一步判断并及时根据所查明的结果采取必要的补救措施。所以质量检测工作上可作为评估单桩承载力的一种重要辅助手段。这项工作对于一些大口径的长桩显然更为重要,因为这类桩大多是单桩承单柱,其垂直极限荷载有时高达几十兆牛顿,用传统的静载实验方法难于进行,而这类桩用动测法确定承载力时其相应的修正系数显然只能从一些小口径桩基的动、静对比曲线上外推得到。

同时由于动测法对于大口径桩的激发能量往往不够,以致桩径越大,桩土之间的位移响应就越困难,其承载力测试误差也将随之增加。这种情况下只考虑动测法对承载力的测试结果(土对桩的支承力问题)显然是不够的,因此进一步结合桩身质量进行检测,保证其材料强度能够满足承载力方面的要求,避免出现因桩身缺陷导致单桩承载力大幅度下降等问题是非常必要的。在判断桩基质量方面,笔者认为起码应能包括下列指标:(1)桩基实际长度;(2)桩基截面的有效半径、缺陷类型及相应的损坏位置;(3)桩基混凝土的平均抗压强度;(4)桩基的孔底沉渣厚度等。显然,其(1)关系到桩尖持力层位置,所以其桩长应是实测值而不是由设计人员或施工人员所提供的理论值;其(2)关系到截面损坏程度的处理方案;其(3)关系到桩身稳定性问题;其(4)则直接关系到承载力大小(特别是端承桩)。然而要提高上述指标的检测精度除了必须考虑检测系统方面拾震器(频响范围、测试参数的一致性)、激振技术(激振频率、激振能量,有效信息的信噪比)以及响应信号的接收、采集、放大、处理等技术环节的选择之外,而且还必须使配套后的仪器具有较高的分辨率和灵敏度以及较宽的频带范围。同时对检测结果进行时域(t域)或频域(f域)等方面的综合分析也是至关重要的。

5 动、静试验结合的意义

由于静载试验只能量测桩顶位移和所加荷载,所以很难加深人们对桩基性能的了解,而且由于静载测试数量只占工程桩总数的1—2%,代表性有限,难于保证其他桩都能符合设计要求。从工程经济、合理、安全等方面考虑,在桩基工程中增加动测法在质量检测及评

估单桩承载力方面的工作是必要的, 它将有更利于更全面地了解桩基情况和提高桩基的工程质量。目前对于不同工程测试承载力的方法可根据不同情况分别对待。当地质资料清楚, 地层构造不是很复杂, 土质参数又基本掌握的情况下, 可考虑采用动测法(大、小应变法)并辅以少量静载桩加以验证。当工程重要, 场地地质情况复杂, 土质参数又难以准确确定时, 除对部分桩进行静载外, 还应增加动测试验的方法, 即可利用大应变法测试承载力而小应变法检测桩身质量, 这种动、静试验法结合, 大、小应变法互补的办法, 既能控制测定, 又便于进行大面积普查, 是提高检测精度和保证工程施工质量的一种既经济又安全的措施。

6 结 语

目前一般认为大应变法在测试单桩承载力时比小应变法可靠, 而小应变法则比较适合于检测桩身质量, 但两种方法在评估单桩承载力方面都仍处于发展研究阶段, 因此增加桩身完整性的检测精度并不断积累动、静对比测试资料有利于提高动测法在评估单桩承载力方面的可靠性, 虽然目前动测法要同时达到可靠、方便、实用、经济等方面要求尚需一个完善过程, 然而随着测试技术和数据处理方法以及桩土系统动力分析理论等方面的不断改进, 动测法将会在桩基工程中发挥其越来越重要的作用。

参 考 文 献

- 1 东北三省职教教材编写组编。建筑材料。辽宁科学技术出版社, 1987, p35
- 2 孙更生, 郑大同, 软土地基与地下工程。中国建筑工业出版社, 1984, p517
- 3 武汉水利电力学院土力学教研组编。土力学地基与基础。中国工业出版社, 1961, p238
- 4 严人觉, 王贻荪, 韩清宇。动力基础半空间理论概论。中国建筑工业出版社, 1981, p492

DISCUSSION ON THE EFFECTIVE WAYS OF REDUCING ERROR IN DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF A SINGLE PILE BY DYNAMIC MEASUREMENT METHODS

Lin Jiansheng

(Quanzhou Basic Seismic Station, seismological Bureau of Fujian Province, Quanzhou 362000)

Abstract

In this paper, by comparing the difference between static and dynamic pile tests (large and small strain methods) for determining the bearing capacity of a single pile, the principles of different test methods and existing their errors are analysed, some problems including the causes of producing errors, the ways of reducing errors and the effects of raising the correlation of dynamic and static pile tests are discussed. Moreover, the influences of quality of pile foundation on pile-soil loading system and the relations between the quality of pile and the bearing capacity and other problems are also studied in this paper and some results indicate the significance for improving the detection standard.

Key words: Static and dynamic pile tests; comparative analysis; Pile foundation quality