

预制桩波速随时间增长的试验现象及分析*

张明义, 章伟

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东青岛 266033)

摘要:通过实际工程的低应变桩基动测,发现打入桩的波速随时间提高。用一维和三维应力波传播理论进行了分析。评价了影响桩的波速的各种因素,认为被测桩波速的提高主要是由于桩侧土的贡献造成的。桩侧土和桩共同工作,就象是加大了桩的截面尺寸。波速的增大和桩承载力的提高有着一致性,可以借助波速提高的时效性来研究桩的承载力的时效性,推算和确定桩的承载力。

关键词:波速; 桩; 动力测桩; 承载力, 时效性

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2006)06-0062-03

Increase of Wave Velocity in Precast Pile along with Time and Its Analysis

ZHANG Ming-yi, ZHANG Wei

(Civil Engineering Institute, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, P. R. China)

Abstract: Low strain dynamic testing on actual pile was conducted to investigate if the wave velocity is varied in the installed pre-cast pile. It was found that the wave velocity of the pile is raised along with time. The analysis has been carried out through with one dimension and three dimension stress wave propagation theories. Among various factors influencing the rise of wave velocity, the factor of the side soil contribution is the chief one. The soil around the pile works jointly with the pile, as if to enlarge the section size of the pile. Both the increase of wave velocity and the bearing capacity of pile are consistent. So the time effect of wave velocity can be used to study the time effect of bearing capacity of the pile and to determine the bearing capacity of piles.

Keywords: wave velocity; pile; dynamic testing of the pile; bearing capacity; time effect

在混凝土桩的低应变动测法中,波速是一个重要参数,用来计算缺陷的位置、复核桩的长度等。传统观点认为预制桩在设置以后波速不会发生变化。

另一方面,根据弹性波传播理论,应力波在无限弹性体内和细长杆件中传播时,波速会有所不同。

应力波在无限弹性体中的传播时,满足三维波动方程,即:

$$\rho \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: ε 为体积应变, c 为波速:

$$\varepsilon = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2)$$

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3)$$

式(3)说明,波速与介质的弹性模量 E 、质量密度 ρ 和泊松比 μ 有关。

在细长杆(横向尺寸远小于杆长)中,上述三维波动方程简化成为一维波动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

式(5)说明,波速与介质的弹性模量 E 以及质量密度 ρ 有关。

低应变动测法与高应变法一样,也是通过对桩施加一定的荷载,使桩身混凝土内产生压缩应力波,量测这种压缩波在混凝土中的传播的时间来得到混凝土的纵波波速的。根据频谱分析可知,所施加荷载信号是由无数个频率不同、振幅各异、并具有不同的初相位的正弦或余弦信号波组成的。当荷载作用于桩顶后,这些信号分量分别以各自的波长在混凝土桩中传播。各

* 收稿日期:2006-03-20

作者简介:张明义(1958-),男,山东青州人,教授,博士,主要从事岩土工程研究。

信号分量的波长 λ 与各自的频率 f 以及传播介质的波速 c 有关:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

实用中,通过对信号进行频谱分析得到的频率成分,结合传播介质的材料性质,就可得到信号中波长。低应变测桩,应力波波长的数量级为米。

一般情况下,当波长 $\lambda <$ 横向尺寸 d (桩径)的 0.2 ~ 0.5 倍,或 $d > (2 \sim 5)\lambda$ 时,可认为所测弹性体为无限弹性体,波在其中的传播遵循上述式(1)所示的三维波动方程,波传播的速度由式(3)确定;而当波长 $\lambda >$ 弹性体横截面尺寸 d 的 2 倍以上且远小于纵向长度时,可将其简化为一维杆件体,波在其中的传播遵循上述式(4)所示的一维波动方程,波速由式(5)确定^[1]。

取混凝土的泊松比 $\mu = 0.15 \sim 0.30$,由式(3)和式(5)表示的关系可推得三维弹性体中的波速是一维杆波速的 1.03 ~ 1.16 倍。也就是说,弹性固体介质中的波速与边界条件有关,介质的横向尺寸与波长的比值越大,波速传播越快^[2]。

研究发现,桩在可固结的土中设置后,随着固结的发生,反映桩承载力的一些动测指标,如动刚度等提高。但是,对动测波速的类似提高,尚没有文献提及。论文结合试验中发现的现象,以上述的波速在固体介质中的传播理论为基础进行分析。

2 试验及发现

低应变动测试验使用成都某研究所生产的桩基动测仪。同时采用反射波法和瞬态机械阻抗法两种试验

方法。反射波法用硬木小锤敲击,机械阻抗法用带有复合材料头的力棒敲击。试验均在青岛地区的钢筋混凝土打入桩^[3]上进行。为了比较和对比,进行了重复试验,仅间隔一定时间,其他试验条件完全相同。

试验场地选择两个实际工程,两个场地的土层条件见表 1 及表 2。需要说明的是,场地的土层厚度并不是均一不变的,有的桩所在土层与平均厚度有差别。另外,试验场地的地下水位均在 1.5 m 深度左右。

表 1 场地 A 的土层条件

土层序号	土层名称	平均厚度/m	土层状态
1	素填土	1.3	新填,粉质粘土为主
2	粉质粘土	1.6	软塑
3	粉细砂	1.2	稍密
4	淤泥质粉质粘土	1.8	流塑
5	粉质粘土	1.1	可塑
6	粗砾砂	0.8	中密
7	含碎石粉质粘土	0.7	可塑
8	强风化泥岩	2.0(桩端进入 0.4 m)	桩端持力层

表 2 场地 B 的土层条件

土层序号	土层名称	平均厚度/m	土层状态
1	杂填土	1.7	
2	粉质粘土	1.2	软-可塑
3	粉细砂	4.3	稍密
4	泥岩	顶面埋深 7.0 ~ 7.5 m	桩端持力层

通过试验发现,随着桩设置时间的不同,不仅桩的动刚度提高,桩的波速也有不同程度的提高。两个场地的动测指标变化情况见表 3 及表 4。表中不同桩指标的变化幅度不同,有的差别较大,主要是因为各土层厚度有较大的不同造成的,尽管如此,随时间指标变化的规律还是明显存在的。

表 3 场地 A 的动测指标随时间的变化

桩号	桩截面/mm	桩长/m	动刚度/kN/mm			波速/m · s ⁻¹		
			1 d	33 d	提高幅度/%	1 d	33 d	提高幅度/%
A1	450 × 450	8.9	358	403	12.6	3 564	3 757	5.4
A2	450 × 450	8.9	390	442	13.9	3 519	3 664	4.1
A3	400 × 400	8.9	255	294	15.1	3 470	3 679	5.9
A4	400 × 400	8.9	235	300	27.7	3 347	3 710	10.8

表 4 场地 B 的动测指标随时间的变化

桩号	桩截面/mm	桩长/m	动刚度/kN · mm ⁻¹			波速/m · s ⁻¹		
			5 d	17 d	提高幅度/%	5 d	17 d	提高幅度/%
B1	300 × 300	7.5	165	167	1.2	3 681	3 755	2.0
B2	300 × 300	7.5	119	124	4.2	3 610	3 755	4.0
B3	300 × 300	6.5	162	16.7	33.9	3 855	4 177	8.3

图 1 为场地 B 中 B3 号桩的反射波法曲线,图(a)和图(b)为 5 d 与 17 d 的波速提高的对比。

2 对试验现象的分析

2.1 影响混凝土波速的因素

一般认为,对于同一类型的波,影响混凝土波速的

主要因素有:(1)混凝土内石子的品种、粒径和用量。(2)混凝土的养护方式。(3)作为弹性介质的密度、弹性模量及泊松比。(4)混凝土的含水率,一般含水率大的混凝土波速大于含水率小的。(5)边界条件,即固体介质垂直于波的传播方向的几何尺寸^[4],如论文所述,在无限大介质中传播,波速最高;在垂直于波速

的两维方向为无限大(即薄板)或一维方向为无限大的介质中传播,波速次之;在杆件中传播,波速最小。

试验中,上述(1)~(3)条不变;关于第(4)条,桩设置后由于地下水的渗透,桩身混凝土含水率会有提高,但一般而言,这种过程经过几天(比如5 d)即可完

成,而场地 B 上,17 d 桩的波速比 5 d 的有较大幅度的提高,说明含水率并不是主要的影响因素;剩下的是第(5)条,表面上看,桩的所有尺寸都没有变化,这一条并没有改变,实质上并非如此,如下面的分析。由此推断,本条应该是影响波速的主要因素。

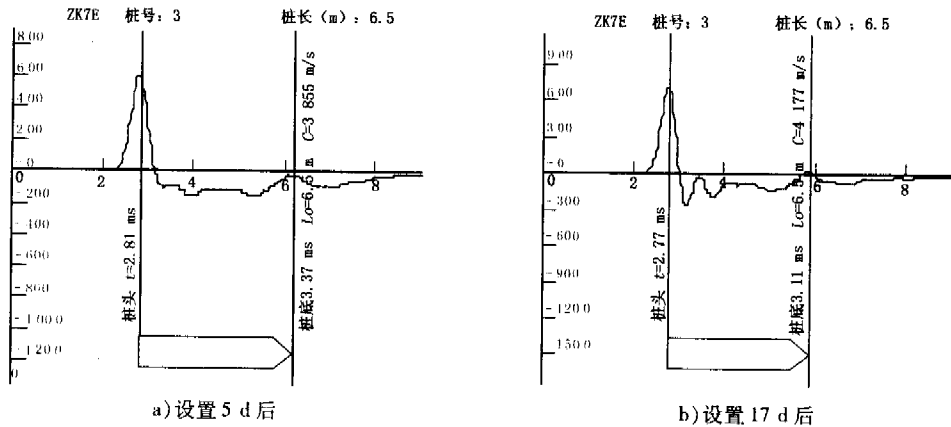


图1 B3 桩波速提高的反射波法曲线

2.2 桩侧土参加工作

用声波透射法^[2]检测桩身混凝土质量时,探测元件成对地埋在桩身的不同深度,桩的“横向尺寸”即为桩的纵剖面,所测出的波速明显大于低应变法测出的将桩作为杆件时的波速。排除两种测试方法的微弱差别,垂直于波的传播方向的桩几何尺寸的影响非常明显。

把波速的提高归咎于桩“横向尺寸”的增大,也就是认为桩侧土参加了桩的工作,或者说桩侧土与桩共同工作。预制桩设置完毕后,随着时间的增加,桩侧土产生触变恢复和固结效应,相当于桩的横向尺寸增大。由表1和表2可知,尽管本文试验场地的土层并非全为粘性土,特别是场地B,粉细砂居多,波速尚有提高。可以推测,场地土粘性增大时,波速的提高会更明显。

表3和表4中波速提高的幅度最大达10.8%,而文章开头取定的混凝土的泊松比,推得三维弹性体中的波速是一维杆波速的1.03~1.16倍,即提高3%~16%。考虑到本文用于比较的最开始阶段的波速也是1 d以后的,并不是桩在刚设置完成时的,可见波速的提高相关理论的预测比较吻合;本文试验波速提高的幅度较大,桩侧土参加工作的程度较高。

2.3 波速提高与承载力提高的相关性

实践已经证明,用低应变的机械阻抗法测得的动刚度能够反映桩的承载力,尽管这种反映并不十分精确。表3和表4中波速的提高与动刚度的提高有一定的相关性,说明波速提高与承载力提高有着相关性。

挤土桩承载力随时间提高,称为承载力的时效性^[5-7]。在取得了足够多的对比资料后,用被测桩波速的提高反映承载力的提高,是非常简捷的方法,工程

意义较大。特别是对静力压入桩,在已知最终压桩力的情况下,再配合波速提高的时效性,可以方便地推算桩的承载力。

3 结语

通过工程实测,发现打入桩的波速随时间提高,具有时效性;而弹性介质中波速传播的一维和三维理论证明,垂直于波速前进方向的介质尺寸是影响波速的主要因素,波速在三维介质中最高,在一维杆件中最低。两者有着一致性。

在分析影响桩的波速的各种因素后,认为被测桩波速的提高主要是由于桩侧土的贡献造成的。预制桩沉桩完成后,桩侧土经历了触变恢复、再固结的复杂过程。在这个过程中,波速的增大和桩承载力的增加有着一致性。寻求一定的方法,测试桩在不同阶段的波速,比如未设置前的波速,刚设置后的波速以及其他特定时刻的波速,通过测试桩的波速来判断土对桩的实际支承(包括桩侧和桩端)作用,推算桩的承载力,这可以作为进一步研究的目标。

挤土桩承载力随时间的提高呈双曲线型,承载力的提高需要一定的时间,所以检测桩的承载力的试验需要一定的时间。可以通过易于进行的桩的低应变试验做出波速提高的曲线,利用两者是相关性判断确定这一时间。

由于桩设置以后的复杂环境,实际波速值是一个变数,如本文所述。这也再一次说明,桩身混凝土强度与波速之间没有一成不变的对应关系,单凭动测波速确定桩身混凝土强度的方法是不可取的。或者说,与

(下转第105页)

大力量作好广告及推销策划。这是美国采用的主要契约方式,鉴于我国代理业处于起步阶段,为保护代理人合法利益,促进代理业发展,目前应多推广这种形式。

5.4 建立长期的合作关系,建立动态契约结构体系

房地产企业与代理机构订立的合约,建立长期契约伙伴关系。同时,在契约内容与形式中引入柔性条款,建立动态契约结构体系,如契约的分阶段条款、再议价机制及顶级经纪人的选择问题,增加了合约的稳定性和灵活性。有利于提高代理机构对未来收益的重视程度。

5.5 加强对行业监督,建立有效的惩罚机制

相关部门(或行业协会)应加强对开发商和代理商双方的监督。对代理机构在业务活动中有不实陈述、虚假承诺、做不实广告等损害客户和开发商的行为制定相应的惩罚机制,加大对这些行为的惩罚。同时,开发商和代理应注重代理合同,加大对违约行为的违约金,并加强对对方的监督。

5.6 规范房地产代理行业管理,完善相关法规政策

房地产代理业的健康有序的发展,离不开相关法律法规的完善,同时以上各种措施也要依赖完善的法律制度。而我国目前仅有《中华人民共和国城市房地产管理法》、《中华人民共和国商品房销售管理办法》、《经纪人管理办法》、《城市房地产中介服务管理规定》

等法律、法规,尚不能满足中介市场发展的需要和诚信原则的有效贯彻。根据目前代理业存在的问题和行业发展的长远规划,需要进一步建立严格规范的市场准入制度和清除制度,科学地设置企业的资质分类、分级和专业技术人员的执业资格注册体系,实施考核、专家评审和政府核准相结合的资质管理体制。同时,弱化政府过多的行政手段,强化行业协会的管理职能,提高管理效率。只有这样,房地产代理行业才能健康有序的发展。

参考文献:

- [1] Gary Becker & George J. Stigler. Law enforcement, malfeasance, and the compensation of enforcers[J]. Journal of Legal Studies, 1974, (3): 1-18.
- [2] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海:上海人民出版社, 1996.
- [3] 李炜. 房地产交易中的委托-代理行为研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, (2): 60-62.
- [4] 李贵良. 房地产经纪业信用缺失问题的探讨[J]. 中国房地产金融, 2004, (10): 21-24.
- [5] 陈健. 房地产代理契约模式的比较分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2004, (12): 36-40.
- [6] 李文娟. 我国房地产代理业的现状、问题及对策[J]. 科技进步与对策, 2002, (6): 156-157.

(上接第64页)

其用波速来反映桩身混凝土强度,还不如用来反映桩的承载力的提高。

对所发现的试验现象作了一定分析,研究只是初步的。期望研究者注意这种现象并进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 赵海生, 李林涛, 何剑. 用波动理论分析混凝土桩检测波速[J]. 建筑科学, 2003, 19(3): 34-37.
- [2] 陈凡, 徐天平, 陈久照, 等. 桩基质量检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [3] 张明义, 邓安福. 预制桩贯入层状地基的试验研究[J]. 岩

土工程学报, 2000, 22(4): 490-492.

- [4] 彭凯, 黄志堂, 肖盛燮, 等. 持续荷载下混凝土抗压强度的时效模型[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(4): 29-34.
- [5] 张明义, 时伟, 王崇革, 等. 静压桩极限承载力的时效性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2): 2601-2604.
- [6] E. U. Klotz, M. R. Coop. An Investigation of the Effect of Soil State on the Capacity of Driven Piles in Sands[J]. Geotechnique, 2001, 51(9): 733-751.
- [7] 赵建平, 周峰, 宰金珉, 等. 软土地区预制桩单桩最终极限承载力估算方法[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(6): 44-48.