

基桩低应变波速的量值研究

杜思义, 陈一汉

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:在应力波反射法测试基桩完整性的过程中,应力波波速是确定桩长和桩身缺陷位置的必要条件,而应力波波速受多种因素影响很难准确定量,这已成为基桩测试技术发展的瓶颈。根据应力波传播的基本原理,结合试验研究,分析了应力波在基桩中传播速度的影响因素,得出了应力波传播波速与混凝土龄期和混凝土强度等因素之间的量值关系,并结合工程实际提出了3种确定低应变波速的简便实用方法,以便检测人员更好地控制桩基工程质量。

关键词:基桩;低应变测试;应力波波速;桩身完整性

中图分类号: TU198+.6

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.03.006

0 引言

通常认为低应变应力波波速与混凝土强度等级存在一定的相关关系。1986年Jorn M. Seitz^[1]在第二届应力波理论在桩基工程应用会议上提出应力波波速与混凝土质量关系如表1所示。

表1 波速与混凝土质量关系

Tab.1 The relationship between the stress wave speed and the concrete quality

波速/(m·s ⁻¹)	混凝土质量评价
<1920	很差
1 920~2 750	差
2 750~3 300	有问题
3 300~4 120	好
>4 120	很好

国内JGJ/T 93—95《基桩低应变动力检测规程》4.4.10条规定,桩身混凝土强度等级可依据波速来估计,波速与混凝土抗压强度的换算系数应通过对混凝土试件的波速测定和抗压强度对比试验确定。国内很多学者开展了这方面的研究^[2-4]。二十世纪末期得出低应变反射波法波速与桩身混凝土强度的关系如表2所示。

在国际工程界基本上是依据第二届“应力波理论在桩基中的应用”国际会议推荐的公式进行推算,该公式表达式为

表2 波速与混凝土强度等级间的对应关系

Tab.2 The relationship between the wave speed and the concrete strength grade

波速/ (m·s ⁻¹)	特征波速/ (m·s ⁻¹)	强度等级/ MPa
3 800~4 200	3 900	C35
3 600~4 000	3 700	C30
3 300~3 800	3 500	C25
2 800~3 500	3 200	C20
2 500~3 000	2 900	C15

$$f_{cu} = 4.18 \times e^{0.49c} \quad (1)$$

式中: f_{cu} 为桩身混凝土强度,MPa; c 为应力波波速,km/s。

在国内,混凝土弹性波速和强度的相关曲线基本上采用

$$f_{cu}^c = Ac^B \quad (A, B \text{ 为常数}) \quad (2)$$

研究资料表明,不同人的研究结论不同,而且相差很大。其间利用混凝土强度与应力波波速的关系估计混凝土强度,有不少成果案例,也有不少失败的教训^[5]。

工程界经过20世纪90年代初到本世纪初的摸索,发现低应变应力波波速除与桩身混凝土强度有关外,还与混凝土的骨料品种、粒径级配、密度、水灰比、成桩工艺(导管灌注、振捣、离心)等因素有关。波速与桩身混凝土强度整体趋势上呈正相关关系,即强度高波速高,但二者并不是一一

收稿日期:2011-06-28;修订日期:2012-01-17

基金项目:河南省骨干教师资助计划项目(2011873)

作者简介:杜思义(1970-),男,河南淮阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事结构工程与检测方向的研究,E-mail:

dsey3227@zzu.edu.cn.

对应关系。在影响混凝土波速的诸多因素中,强度对波速的影响并非首位。中国建筑科学研究院的试验资料表明:采用普硅水泥,粗骨料相同,不同级配强度及龄期强度相差1倍时,声速变化仅为10%左右;根据辽宁省建设科学研究院的试验结果:采用矿渣水泥,混凝土试块28 d强度为3 d强度的4~5倍,桩在28 d龄期时的波速较3 d龄期时的波速增加20%~30%。因此,不能依据波速去评定混凝土强度等级^[6-7]。

还有新的研究表明,应力波波速还与混凝土养护条件有关,如水养、自然养护、蒸汽养护的同样配合比的混凝土的波速不同。另外还与添加剂种类、数量有关。基于此,低应变检测基桩的完整性报告就不再用波速评定混凝土强度,反之亦然^[8-11]。

然而低应变测试中,要判定桩长和缺陷位置,必须首先确定波速。而波速有上述诸多影响因素,测试中一般根据施工单位或监理单位提供的桩长确定,而施工单位或监理单位提供的桩长往往有误(一般偏长),造成计算出的波速偏高,有的CFG桩的波速高达4 500 m/s,反过来由此也无法确定桩长和缺陷位置。笔者将根据应力波传播的基本原理,结合试验研究,分析应力波传播波速与时间、混凝土龄期等影响因素之间的关系,并由此提出工程应用时确定低应变波速的简易方法。

1 应力波在基桩中的理论传播速度

根据波动理论可导出应力波在三维弹性介质中的波动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left\{ \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right\}; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left\{ \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right\}; \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left\{ \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right\}. \quad (5)$$

式中: E 为介质杨氏弹性模量; μ 为介质材料泊松比; u 为位移; x, y, z 为坐标轴方向。令

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (6)$$

则 c 为应力波传播速度。

对于横向尺寸远小于纵向尺寸的弹性杆,可以忽略横向尺寸效应,假设为一维弹性杆,则波在

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (7)$$

固体介质中的传播速度主要受波的类型、固体介质的性质和边界条件的影响。根据基桩的几何特征及低应变法、超声波法等测试方法,可以判断低应变反射法的应力波遵循细长杆中纵波的传播规律,近似符合式(7),超声波法测试用的声波遵循无限大固体介质中纵波的传播规律^[6],近似符合式(6)。

理论上两种波速之间有确定的比例关系。即(混凝土的 $\mu=0.20 \sim 0.3$)

$$k = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \cdot \frac{E}{\rho} = 1.054 \sim 1.160. \quad (8)$$

2 基桩低应变波速的试验研究

2.1 试验目的及方法

研究低应变应力波波速与混凝土龄期和混凝土强度之间的关系。

试验方法:现场设置10根素混凝土桩,桩长分别为5 m, 10 m, 15 m, 桩径400 mm,混凝土强度等级分别为C15, C20, C25, C30,试块采用标准养护。2根桩径800 mm,桩长12 m的混凝土灌注桩,试块采用同条件养护。

低应变测试仪器采用美国桩身完整性测试仪PIT,测试操作采用JGJ 106—2003《建筑基桩检测技术规范》中标准的测试过程,低应变波速的判定采用“峰-峰”法,若桩底二次反射明显,采用一次反射峰与二次反射峰判定。混凝土试块强度的测试和低应变应力波速的测试分别在基桩3, 7, 14, 21, 28 d等时间同时进行测试。

2.2 试验结果

2.2.1 低应变应力波波速与混凝土龄期之间的关系

低应变应力波波速与混凝土龄期之间的关系如图1所示,由图可知,低应变应力波波速随混凝土龄期在逐渐增长,直至半年以上,波速仍有微小的增幅。在28 d龄期之前波速增长速率比较大,28 d之后增长速率比较小,龄期从28 d至189 d波速约增长5.9%,在龄期达到6个月后的30 d里,平均波速增长仅有0.7%,基本趋于稳定。

有资料显示,打好2~3 a的基桩低应变应力波波速仍在增长,只是增长幅度很小。

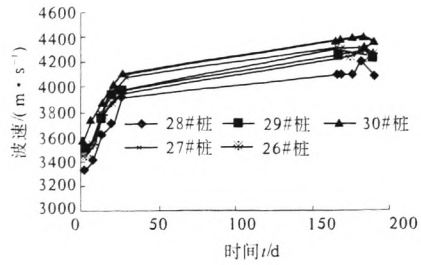
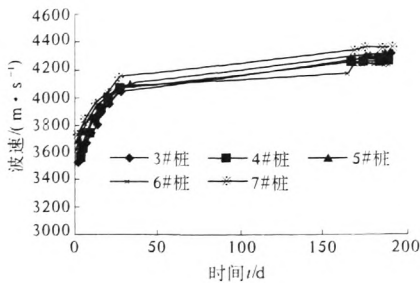


图 1 低应变应力波波速随时间增长曲线

Fig. 1 The curve between low strain wave speed and the age of concrete

2.2.2 低应变应力波波速与混凝土强度的关系

通常认为低应变应力波波速与混凝土强度等级存在一定的相关关系. 如果按照一维波动方程得出的波速公式, 低应变应力波波速仅与混凝土的弹性模量、密度、泊松比有关, 而不同强度等级混凝土的密度基本都在 $2.4 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 混凝土的泊松比基本在 $0.2 \sim 0.3$ 之间, 因此从理论及桩本身的材料因素上考虑, 影响低应变应力波波速的主要因素是弹性模量. 而影响混凝土弹性模量主要有混凝土的强度、含水状态、龄期、配合比、养护条件等, 而这些因素又受到多种条件的影响, 因此混凝土弹性模量的大小是由很多因素综合决定的, 低应变应力波波速的影响因素更是如此.

而一般低应变测试现场知道的仅仅是桩的设计几何参数及桩身的混凝土强度等级, 因此有必要建立低应变波速与混凝土强度等级的相关关系.

2 根 C30 灌注桩混凝土强度等级(同条件养护)随龄期的变化关系如图 2 所示, 实际上混凝土强度等级在 28 d 龄期后仍在增长, 只是增长的缓慢, 增长幅值也比较小. 低应变应力波波速与混凝土强度之间的关系如图 3 所示, 由图 3 可知低应变应力波波速与混凝土强度等级成正相关关系, 40 d 内的拟合公式为

$$y = 132.88 \ln(x) + 3572.9. \quad (9)$$

式中: x 为混凝土强度等级, MPa; y 为低应变应力波波速, m/s.

混凝土强度等级由 15 MPa 到 37 MPa, 增长 146%, 低应变波速由 3 718 m/s 到 4 050 m/s, 增长 8.9%.

由素混凝土桩 28 d 的波速测试结果可知, 混凝土强度等级由 15 MPa 变化到 30 MPa, 增长 100%, 低应变波速由 3 900 m/s 变化到 4 150 m/s, 仅增长 6.4%. 180 d 低应变应力波波

速从 4 200 m/s 变化到 4 350 m/s, 增长 3.5%.

由此可以得出, 基桩低应变应力波波速随混凝土强度等级的变化而变化, 但波速变化幅度不大, 一般不超过 10%.

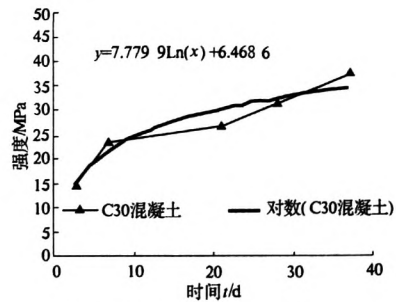


图 2 混凝土强度随龄期增长曲线

Fig. 2 The relationship between the strength grade and the age of concrete

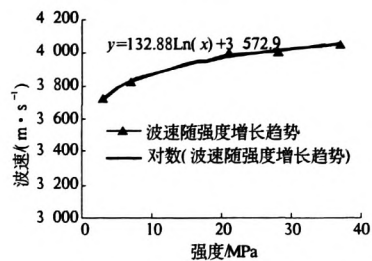


图 3 低应变波速与混凝土强度等级关系曲线

Fig. 3 The relationship between low strain wave speed and the strength of concrete

3 基桩低应变应力波波速的确定方法

(1) JGJ 106—2003《建筑基桩检测技术规范》8.4.1 条规定, 当桩长已知、桩底反射信号明确时, 在地质条件、设计桩型、成桩工艺相同的基桩中, 选取不少于 5 根完整桩的桩身波速值计算其平均值作为该工地桩身波速平均值.

(2) 根据当地研究的应力波波速和混凝土强

度等级之间的关系估计低应变检测波速.某一地区混凝土骨料的品种、水泥种类、强度基本相同,因此应力波波速和混凝土强度等级具有确定的关系,可以由此估计低应变应力波波速.

(3)根据截掉的桩身测定低应变波速.对于混凝土灌注桩、预制桩、CFG桩,一般施工现场都会有截掉的桩身,可以用低应变方法确定截掉桩身的应力波波速作为原桩身的波速,但应注意测试方法的标准化,因为截掉桩身一般比较短,若测试方法不标准则波速受桩身几何弥散影响严重.

(4)用2个速度传感器测定波速.在桩顶和桩顶下 $x(x \geq 2d)$ 处同时安装两个传感器,根据波动理论,桩顶激发,桩顶传感器首先接收到第一个信号峰值,经过 ΔT 时间后在 x 处的传感器接收到第二个信号峰值,利用 x 和 ΔT 这两个数值可以推算出应力波在该桩身中传播的波速 $c = x/\Delta T$.

(5)根据混凝土试块的超声波波速换算低应变应力波波速.混凝土试块或桩身埋管超声的波速测试一般比较准确,根据公式(5)可以换算低应变应力波波速.

4 结论

综合基桩中传播的一维、三维应力波理论及现场低应变测试方法,可以得出以下结论.

(1)骨料、水泥品种基本一致,同样工艺的普通混凝土桩的低应变应力波波速与混凝土强度等级之间有确定的关系,一般随混凝土强度等级的增加而增加,但增加幅度不大,一般不超过10%.

(2)低应变应力波波速随混凝土龄期在逐渐增长,直至半年以上,甚至2~3a波速仍有微小

的增幅.

(3)避开影响应力波传播波速的多种因素,根据工程实际,提出了5种确定应力波传播波速的简便方法,为检测人员更好地控制桩基工程质量提供了保证.

参考文献:

- [1] SEITZ J. Low strain integrity testing of bored piles [C]// Proc. of 2nd int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles. Stockholm: Sweden, 1984.
- [2] 刘金砺,李大展,黄强. 桩基工程检测技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,1993.
- [3] 张圣斌,张卉. 基桩反射波法检测技术在推求桩身砼强度中的应用[J]. 华中科技大学学报,2005,22(3),98-100.
- [4] 罗骥先. 桩基检测工程手册[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [5] 刘向阳,刘毅岱,李俊. 用纵波波速推算混凝土抗压强度的对比试验及其分析[J]. 无损检测,2001,23(9),389-413.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国行业标准. 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [8] 吕丽萍,史忠. 浅谈影响混凝土弹性模量的因素[J]. 混凝土,2003,20(1):33-34.
- [9] 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.
- [10] 王雪峰,吴世明. 桩基动测技术[M]. 北京:科学技术出版社,2001.
- [11] 王卫. 嵌岩桩承载力竖向抗压静载试验测定[J]. 徐州工程学院学报:自然科学版,2011(1):55-57.

Study on Quantity of Wave Speed in Low Strain Integrity Testing of Foundation Pile

DU Si-yi, CHEN Yi-han

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The stress wave speed is the necessary condition to make sure pile length and pile defects position in low strain integrity testing of foundation pile with the stress wave echo method. Quantifying the stress wave speed is very difficult, because it is affected by multi-factors. This has been the bottleneck in point for developing test technology of foundation pile. In this paper, some factors affecting the stress wave speed were analyzed according to stress wave theory and experiment results, the quantity relationships of the stress wave speed in pile and time and concrete age were determined. Lastly, five brief methods to quantifying the stress wave speed in pile were presented to control pile quality for test engineers according engineering practice.

Key words: foundation pile; low strain integrity testing; stress wave speed; pile integrity.