

混凝土波速受检测方法影响的研究

陈龙珠¹, 沙玲^{1,2}, 邓俊杰¹

(1. 上海交通大学土木系安全与防灾工程研究所, 上海 200030; 2. 浙江建设职业技术学院, 浙江 杭州 311231)

摘要: 为建立超声波法和低应变反射波法检测所得基桩等混凝土构件波速的相互转换方法, 给出了 Kelvin-Voigt 粘弹性介质的三维和一维纵波速度之比及其实用简化公式。结果表明, 混凝土构件的超声波速与 1.054 倍低应变动测波速之比处于 1.03~1.12, 具体数值会随着混凝土龄期、弹性模量和强度等级的增加而有所减小。

关键词: 混凝土; 粘弹性; 波速; 超声波法; 低应变反射波法

中图分类号: TU437 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2006)06-0685-04

作者简介: 陈龙珠(1962-), 男, 安徽省枞阳县人, 教授、博士生导师, 主要从事土动力学、基础工程及地基处理、城市综合防灾救灾等领域的科研与教学工作。

Studies on wave velocities in concrete measured with different test methods

CHEN Long-zhu¹, SHA Ling^{1,2}, DENG Jun-jie¹

(1. Inst. of Eng. Safety and Disaster Prevention, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

Abstract: To establish a relationship between wave velocities in concrete pile shaft measured respectively by the ultrasonic wave method and low-strain reflected wave method, a simplified formula for the ratio of wave velocity in infinite medium to that in one dimensional bar was proposed herein by use of the Kelvin-Voigt viscoelastic theory. It was shown by theoretical and experimental studies that the ratio of ultrasonic wave velocity to 1.054 times of low-strain reflected wave velocity ranged among 1.03~1.12, which decreased with increasing of the age, Young's modulus and strength of concrete.

Key words: concrete; viscoelasticity; wave velocity; ultrasonic wave method; low-strain reflected wave method

0 前言

我国自 20 世纪 50 年代中期开始试用超声波法检测混凝土的纵波速度并推算其抗压强度, 80 年代这项测试技术已被应用于土木工程的许多领域(如混凝土建筑、桥梁和桩基检测等), 并获得较为丰富的研究成果和应用经验^[1]。90 年代初, 随着计算机及其辅助测试技术的发展和普及, 检测基桩质量的低应变反射波法和超声波透射法技术在我国各地逐步得到了广泛的应用, 其中反射波法因其快速便捷而成为各类混凝土基桩检测的普及应用方法, 超声波透射法因须事先埋设测管而一般适用于钻孔灌注桩^[2]。实践证明, 由于激振方法和所用传感器类型不同, 对同一根基桩, 由低应变反射波法检测获得的混凝土纵波速度一般较超声波法的明显偏低。然而, 由于对它们的差别至今尚缺乏深入的研究, 将这两者之间进行可靠的定量转换目前尚存在困难, 继而妨碍了在工程中更好地综合利用这两种方法的检测资料进行混凝土质量评判。例如, 对长径比大的钻孔桩或多节预制桩, 用低应变反射波法检测时, 会因桩端反射信号不易准确识别而难以确

定出桩的平均波速乃至桩身缺陷的准确深度; 但若能够实现这 2 种方法所得波速的转换, 则可以借助于埋管声波透射法或桩顶部一定长度内桩身超声波的实测波速来推算低应变反射波法的桩身平均波速, 上述工程问题便能够迎刃而解。对此, 文献[3]利用弹性波理论和实验方法已对试件几何尺寸以及材料非弹性效应做过一些有益的试探。

为尝试解决好低应变反射波法和超声波法所得混凝土波速的相互转换问题, 本文拟利用粘弹性波理论和实验方法来研究混凝土纵波速度随龄期、振动频率的变化规律, 其中实验所用混凝土试样的设计强度等级处于 C15~C40。

1 理论分析

材料力学的研究表明, 实际固体十分接近粘弹性体, 其中粘性反映的是材料对变形速度的抵抗作用。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478022); 上海市教育发展基金资助项目(2001sg013)

收稿日期: 2005-04-25

粘弹性材料受力后的变形过程是一个随时间而变化的过程, 卸载后的恢复过程又是个延迟过程, 混凝土材料的受力变形过程与此较为相似。鉴于低应变反射波法和超声波法均是使混凝土材料产生微弱的振动, 本文采用如图 1 所示的 Kelvin-Voigt 力学模型^[4], 将混凝土视为线粘弹性介质, 研究混凝土的纵波速度随实验激振频率、龄期而变化的规律。

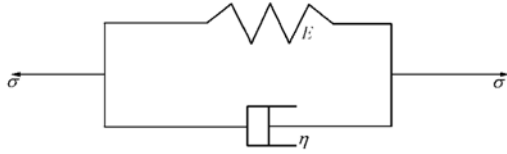


图 1 Kelvin-Voigt 粘弹性力学模型

Fig.1 The Kelvin-Voigt model for concrete

1.1 超声波的传播速度

在超声波法检测中, 当圆频率 ω_u 选择得足够高而使超声波的波长小于混凝土试件横向最小尺寸的一半时, 超声波在试件中传播的速度将与无限大均匀介质中的相当^[1]。为方便推导, 现分析无限大均匀介质中的三维波动问题, 其体应力 - 体应变关系为^[4]

$$\sigma = 3Ke, \quad (1)$$

而偏应力 - 偏应变关系为

$$S_{ij} = 2Ge_{ij} + 2\eta\dot{e}_{ij}, \quad (2)$$

式中, K 、 G 和 η 分别为混凝土材料的弹性体变模量、剪切模量和粘性系数。记 E 和 ν 分别为混凝土的杨氏模量和泊松比, 则 $K = E/3(1-2\nu)$ 、 $G = E/2(1+\nu)$ 。利用式 (1)、(2) 进行推导, 可以得出混凝土的复 Lamb 常数^[4]:

$$\lambda^* = \frac{1}{3}(3K - 2G - i2\eta\omega_u), \quad \mu^* = G + i\eta\omega_u. \quad (3)$$

对简谐波, 弹性解和粘弹性解之间存在对应关系, 即在弹性解中以粘弹性材料的复常数取代弹性材料常数可获得粘弹性解^[5]。记 k 为复波数, 则线粘弹性混凝土中超声波速为

$$V_{pu} = 1/\text{Re}(k/\omega_u) = 1/\text{Re}\sqrt{\rho/(\lambda^* + 2\mu^*)}. \quad (4)$$

由式 (3) 并对普通混凝土的泊松比 ν 近似取 0.2, 式 (4) 经整理后变成

$$V_{pu} = \sqrt{\frac{2E[1 + (1.2R_u)^2]}{0.9\rho[1 + \sqrt{1 + (1.2R_u)^2}]}} \quad (5)$$

式中, $R_u = \eta\omega_u/E$ 。可见, 混凝土的粘性系数和超声波的圆频率越大, 则超声波的速度将越高。当混凝土的粘性较弱而使 $1.2R_u \ll 1$ 时, $V_{pu} \approx 1.054\sqrt{E/\rho} = V_{puc}$ (无限大介质中的弹性纵波速度)。

1.2 低应变反射波的传播速度

在检测基桩的低应变反射波法中, 锤击激振圆频

率 ω_r 通常较低, 沿桩轴向传播的纵波波长容易达到桩直径或边长的 3~5 倍, 可将基桩视为一维杆件^[1]。根据一维纵波理论, 在等直截面的杆件中, 其纵波速度可表示为^[4]

$$V_{pr} = \sqrt{\frac{2E[1 + (R_r)^2]}{\rho[1 + \sqrt{1 + (R_r)^2}]}} \quad (6)$$

式中, $R_r = \eta\omega_r/E$, 其余符号含义同上文。可见, 混凝土的粘性系数和波的圆频率越大, 低应变反射波法中纵波的速度将越高; 但由于 ω_r 比 ω_u 通常要低约 1~2 个量级, V_{pr} 随之增大的速率将比 V_{pu} 的要小。当 $R_r \ll 1$ 时, $V_{pr} \approx \sqrt{E/\rho} = V_{puc}$ (弹性杆件中的一维纵波速度)。

1.3 两种检测方法获得的波速之比

因为低应变反射波法的激振频率低, $R_r \ll 1$ 容易得到满足, 故取 $V_{pr} \approx \sqrt{E/\rho}$ 。但由于 ω_u 比 ω_r 通常要高 1~2 个量级, 此时 $R_u \ll 1$ 将不一定成立。因此, 将 R_u 当成一个小数更为合适。

在这种条件下, 对式 (5) 进行近似简化运算得

$$V_{pu} \approx \sqrt{\frac{E}{0.9\rho}} \frac{1 + 1.44R_u^2}{1 + 0.36R_u^2} \approx 1.054(1 + 0.54R_u^2)V_{pr}. \quad (7)$$

于是, 超声波法与反射波法检测获得混凝土纵波速度之比的近似公式为

$$V_{pu}/V_{pr} \approx 1.054(1 + 0.54R_u^2). \quad (8)$$

式中 1.054 是泊松比为 0.2 的弹性混凝土中三维纵波与一维纵波的速度之比 (反映了试件的几何尺寸效应); 括号中的项反映了混凝土的粘弹性和激振频率对波速的影响。为更直观地反映后者的变化规律, 将式 (8) 改写成如下形式:

$$K_v = V_{pu}/(1.054V_{pr}) = 1 + 0.54R_u^2. \quad (9)$$

式 (9) 表明, 即使对低应变动测波速进行了三维几何尺寸效应修正, K_v 值一般仍会因混凝土材料的粘性和超声波的高频而大于 1。随着龄期的增加, 混凝土逐渐硬化, 其粘性会逐渐减弱而弹性模量则逐渐增大, η/E 便会随之而减小。由式 (9) 可知, 在检测超声换能器和低应变动测中的激振方法均不变的情况下 (ω_u 一定), 波速比 K_v 将随着混凝土龄期的增大而有所减小。同理, 在龄期一定的情况下, 波速比 K_v 将随着混凝土强度等级的增大而有所减小。

2 实验验证

2.1 测试系统

图 2、3 分别为检测混凝土试件纵波速度而采用的低应变反射波法和超声波法的示意图。低应变反射波法的实验仪器包括武汉岩海公司生产的 RS-1616K

桩基动测仪和 RS-V14 II 型高阻尼速度传感器, 激振采用硬塑料锤 (根据不同龄期混凝土试件的实测信号进行频谱分析, 其主频率为 $0.1 \sim 1$ kHz 量级)。超声波实验采用了武汉岩海公司生产的 RS-ST01C 非金属声波检测仪和 50 kHz 纵波平面换能器。

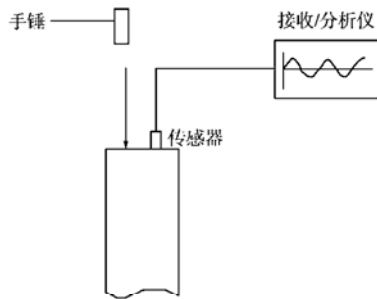


图2 低应变反射波法检测混凝土杆件的波速

Fig. 2 The low-strain reflected wave test for wave velocity in concrete bar

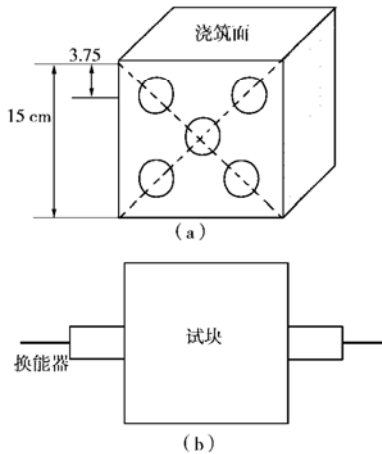


图3 超声波法检测混凝土立方试块的波速

Fig. 3 The ultrasonic wave test for wave velocity in concrete cubic block

低应变法动测中的激振点选在杆件一端顶面的中心, 传感器布置在激振点至杆件顶面边缘的中点附近; 检测时进行多次重复锤击, 将重复性好的波形予以保存并由此分析混凝土的纵波速度。为增加测试分析数据, 每只试块的超声波法测点采用 5 对, 并取其平均声时来计算混凝土的超声波速度; 但如果某测点的声时偏差超过这一平均声时的 $\pm 2\%$, 则该试块将予以废除, 以此来保证检测结果的可靠性。

2.2 混凝土试件制作

为了使实测超声波的传播速度可看成是无限大均匀介质中的纵波波速, 根据 50 kHz 超声波频率和混凝土波速范围, 将超声波试块选定为边长 150 mm 的标准立方体。同时为了满足一维波动理论条件, 根据所用锤击主频率和混凝土波速范围, 低应变反射波法的

试件选定为截面边长 150 mm、长 2000 mm 的混凝土杆件。试块和杆件的制作过程均按照相关混凝土规范的要求进行。

考虑到普通混凝土灌注桩的常用强度等级, 实验对混凝土试件所采用的设计强度等级为 C15、C25、C30 和 C40。各试件经浇筑成型后在室内自然条件下养护, 并在龄期为 3~28 d 时分别用超声波法和低应变变动测法进行检测。根据实验, 设计强度等级为 C15、C25、C30 和 C40 立方体试块在 28 d 时的实际抗压强度分别为 17.4 MPa、29.1 MPa、34.4 MPa 和 46.2 MPa。限于篇幅, 这里仅例举强度等级 C30 的各原材料配合比情况: 每立方米混凝土中水 195 kg, 水泥 330 kg, 中砂 695 kg, 石子 1180 kg, 水泥强度等级为 42.5 MPa。

2.3 实验数据及其分析

由低应变反射波法和超声波法测得各组试件的平均纵波速度 (精确至 0.01 km/s) 随龄期的变化关系分别如图 4、5 所示。由图可见, 随着龄期的增加, 各强度等级的混凝土杆件的低应变变动测波速和试块超声波速均随之增长, 但大约在 10 d 之后其增长速率将逐渐减缓。这与混凝土强度随龄期增长的一般规律基本相似。

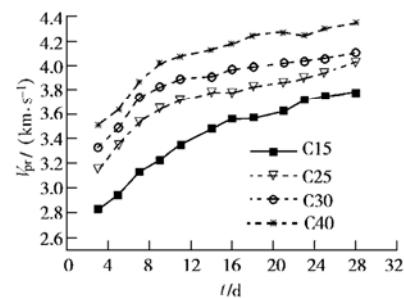


图4 混凝土杆件低应变变动测波速随龄期的变化

Fig. 4 Low strain wave velocities in concrete bars varied with aging time

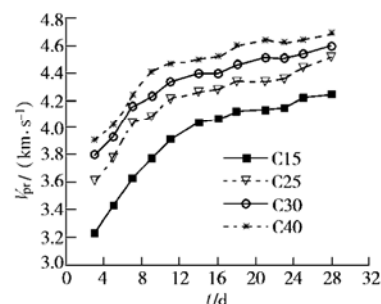


图5 混凝土试块超声波速随龄期的变化

Fig. 5 Ultrasonic wave velocities in concrete blocks varied with aging time

图6是按式(9)定义和图4、5实验数据计算得

到的波速比 K_v 随龄期的变化曲线。由图可见的规律性与上文的理论分析结果颇为相符:

(1) 即使对混凝土杆件的低应变动测波速进行了三维几何尺寸效应修正, 各强度等级试件的波速比 K_v 仍大于 1。这可解释为混凝土材料具有一定的粘性而非完全弹性所致。

(2) 实验数据表明, 对各强度等级的混凝土试件, 其波速比 K_v 随龄期的增加而有所减小。在检测激振频率基本一定的情况下, 这主要是混凝土材料的粘性随龄期增加而减小、弹性模量随之而增大所致。

(3) 实验数据还表明, 在相同龄期下, 混凝土试件的波速比 K_v 随强度等级的增加而有所减小。在检测激振频率和龄期一定的情况下, 这主要是混凝土材料的粘性随强度等级增加而减小、弹性模量随之而增大所致。

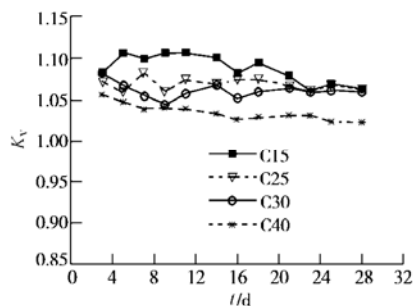


图 6 混凝土波速比 K_v 随龄期的变化关系

Fig. 6 The defined ratios K_v of concrete varied with aging time

3 结 语

本文给出 Kelvin-Voigt 粘弹性介质的三维和一维纵波速度之比并进行了简化分析。结果表明, 混凝土

构件的超声波速与 1.054 倍低应变动测波速之比为 1.03~1.12, 并随着材料粘性系数和激振频率的增大而增大, 但随着混凝土龄期、弹性模量和强度等级的增加而减小。

尽管各地区混凝土材料不同会使波速比在数值上有所差别, 本文的研究工作对建立超声波法和低应变反射波法检测所得基桩等混凝土构件波速的相互转换方法, 将具有理论和应用价值。

参考文献:

- [1] 吴新璇. 混凝土无损检测技术手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2004. (WU Xin-xuan. Handbook on nondestructive testing techniques for concrete [M]. Beijing: China Communication Press, 2004.)
- [2] 陈 凡, 徐天平, 陈久照, 等. 基桩质量检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (CHEN Fan, XU Tian-ping, CHEN Jiu-zhao, et al. Testing techniques for pile quality [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.)
- [3] 尹加德. 用超声波波速推定基桩平均波速的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 20(4):283 - 287. (YIN Jia-de. Studies on the determination of averaged speed of stress wave in a foundation pile [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2000, 20(4):283 - 287.)
- [4] CHRISTENSEN R M. Theory of viscoelasticity [M]. New York: Academic Press, 1982.
- [5] RIZZO F J, SHIPPY D J. An application of the correspondence principle of linear viscoelasticity theory [J]. SIAM J on Appl Math, 1971, 21: 321 - 330.