

弱应力波传播法检验桩的质量

黄 承 贤

提 要

本文简要介绍了检验桩基质量的理论依据,检测方法及其数据处理;阐述了弱应力波在混凝土桩中传播衰减的规律,混凝土强度与其弹性波速的相关关系等;提出了桩基质量缺陷确定的判据。对桩基工程质量的现场检测有实用价值和理论意义。

一、前 言

许多高层建筑、重建筑(包括桥梁、海洋平台、高塔等)座落在土、软土或风化岩石上,其地基往往采用桩基的形式。桩埋于地下,施工中质量不易把握。如果不事先检测桩的质量,一旦出现问题就会对建筑在其上的构筑物产生不利的影响,甚至危及它的稳定与安全。据不完全统计,在我国桩出现的质量问题约占总桩数的10%以上。桩基的造价约占整个建筑物造价的15~30%。因此桩的工程质量问题,对工程的经济和社会效益影响甚大。既要降低桩基工程造价,又要确保建筑物正常使用,这已成为当前设计、施工、管理、使用部门共同关注的问题。

桩可按材料划分为混凝土桩、钢桩和木桩三大类。目前在我国钢桩仅在极少数工程中被采用;木桩已基本不用;混凝土桩在建筑工程中大量而广泛地被采用。混凝土桩可分为预制桩和灌注桩两大类。灌注桩由于其成桩全过程是地下作业,因此质量控制的难度比预制桩大得多,所出现的质量问题也比后者严重得多、复杂得多。当前灌注桩工程质量存在的主要问题有:混凝土密实度差,桩身混凝土强度低于设计要求,桩身结构不完整(夹泥、断裂、颈缩等);预制桩施工质量存在的主要问题是桩身折断。

通常将确定桩身质量问题的方法分为直视法(直接开挖、钻孔取芯、钻孔电视或钻孔摄影等)和动载试验法。直视法应用于现场是十分困难的,也不经济,有的甚至是完全不可能的。因此,唯一的有效方法就是动载测桩,它具有成本低、快速、简捷等优点,动测方法比较多,且各有千秋。我们是用弱应力波传播法对桩进行综合检测,以评价其质量。本文主要阐述在武汉地区10余个工程的200余根混凝土预制桩(断面尺寸30×30cm,长16m)和钻孔灌注桩(包括摩擦桩和端承桩,直径为 $\phi 60\text{cm}$ —100cm,长13—42m)质量的无损动测的初步结果。

二、试验依据

(一) 杆的振动与波的传播

在杆端施加冲击或稳态荷载, 杆体则产生纵向的、扭转的和横向的三种振动, 这些振动以纵波、扭转波、弯曲波的形式传播^[1]。

1、纵波

$$\text{纵波波速为: } V_{po} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

式中 ρ ——杆材料的密度; E ——弹性模量。

2、扭转波

$$\text{扭转波波速为: } V_{so} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

式中 μ ——剪切模量。

从式(2)可见扭转波波速和在无限介质中传播的横波波速相同。

3、弯曲波

$$\text{弯曲波波速(相速)为: } V' = \frac{\pi V_{po} R}{\lambda} = \frac{1}{2} V'_g \quad (3)$$

式中 R ——杆半径; λ ——波长; V'_g ——弯曲波的群速度。当 R/λ 很大时, V' 和 V'_g 趋近于 V_{po} 。

(二) 波的反射与折射

当任何一种弹性波入射到两种介质的分界面上时将产生波的反射和折射(图1)。波的反射和折射遵守反射定律和折射定律。反射与折射波的能量取决于两种介质的波阻抗 ρV 值, 并遵循能量守恒关系。当两种介质的波阻抗相差愈大时, 折射波的能量就愈小, 反射波的能量就愈大; 当两种介质的波阻抗愈接近, 折射波的能量就愈大, 反射波的能量就愈小。

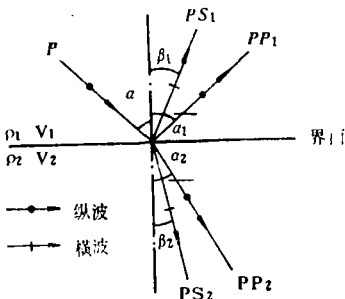
波的反射系数为:

$$R = \frac{(\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1)^2}{(\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)^2} \quad (4)$$

波的折射系数为:

$$T = \frac{4\rho_1 V_1 \rho_2 V_2}{(\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)^2} \quad (5)$$

如果第二种介质的特征阻抗大于第一介质中的, 那么反射波的振幅与入射波的振幅有着同样的符号, 但入射波和反射波传播的方向相反, 振动的相位改变了 180° 。如果第二种介质的特征阻抗小于第一种介质的, 那么振幅改变符号, 在反射时相位不会有改变。



1 图 入射到平面的分界面上纵波的反射和折射

(三) 弹性波在传播过程中的衰减

弹性波在混凝土介质内传播的过程中, 其峰值不断衰减, 引起弹性波峰值衰减的原因很

多, 主要是:

1. 几何扩散: 波阵面在混凝土中不论以什么形式(球面波, 柱面波或平面波)传播, 均将随距离增加而逐渐扩大, 单位面积上的能量则愈来愈小。若不考虑波在介质中的能量损耗, 由波动理论可知: 在距振源的近区内, 球面波位移、速度与 $\frac{1}{R^2}$ 成正比变化, 而应变、径向应力则与 $\frac{1}{R^3}$ 成正比; 柱面波位移、速度与 $\frac{1}{R}$ 成正比, 而应变、径向应力则与 $\frac{1}{R^2}$ 成正比。在远区 $[r > (3-4)R]$ 时, 球面波波阵面处径向应力、质点速度与 $\frac{1}{R}$ 成正比, 而柱面波的相应量随 $\frac{1}{\sqrt{r}}$ 而衰减。

2. 吸收衰减: 由于固体材料的粘滞性及颗粒之间的摩擦以及弥散效应等, 使振动的能量转化为其它能量, 导致弹性波能量衰减。

3. 桩的完整性影响: 由于桩身含有程度不等和大小不一的缺陷, 裂隙、孔洞、夹层等, 造成物性上的不连续性、不均一性, 导致波的能量更大的衰减。

(四) 桩的运动方程(频率方程)与振型分析

桩嵌固在土体中, 若考虑桩周土的阻尼影响, 则其动力特性可用均质量(m), 阻尼及刚度等系数描述, 通常用图2所示的力学模型来模拟, $F(t)$ 是作用于 m 的广义外力, u 为广义位移, 则其运动方程标准形式为:

$$u + 2n\dot{u} + p^2u = \frac{F(t)}{m} \quad (7)$$

式中: n —— 阻尼因子, $2n = \frac{C}{m}$; p —— 圆频率, $p = \sqrt{\frac{K}{m}}$; K —— 刚度系数。

$$\text{无阻尼时自由振动频率 } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (8)$$

$$\text{有阻尼时自由振动频率 } f' = \frac{\sqrt{p^2 - n^2}}{2\pi} \quad (9)$$

对完整的桩而言, 试验资料表明, 当阻尼比 $D < 0.2$ 时, 阻尼对周期的影响不大, 有阻尼和无阻尼的自振频率是近似相等的。则下列几种情况可采用无阻尼自由振动对桩进行振型分析:

1. 上下端皆自由: 当桩长为 L 时, 自振频率

$$f_i = \frac{iV_p}{2L} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

$i = 1$ 时, f_1 称为基频; $i = 2, 3, \dots$ 时得到 $f_2, f_3, \dots$ 为第二、三……振型的频率(下同)。

2. 下端固接、上端自由: 自振频率

$$f_i = \frac{iV_p}{4L} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

3. 下端固定、上端自由, 但带有扩大部份: 频率方程

$$\zeta \operatorname{tg} \varphi = \eta \quad (12)$$

$$\text{式中 } \zeta = \omega i L / V_p \quad (13)$$

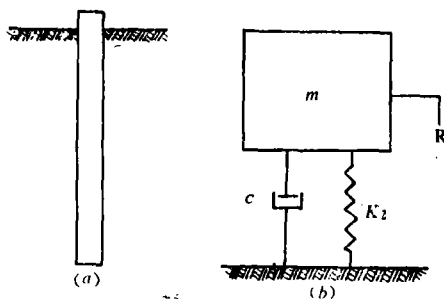


图2 单自由度振动体系
a. 实体模型 b. 计算模型

$$\eta = mL/M \quad (14)$$

m ——桩身质量, M ——扩大端的质量。

对于断桩和有其他缺陷的桩,系统就变得更加复杂,即使是近似计算,要得到频率响应函数或频率方程也是困难的,目前只能用对比试验的办法来解决,即给桩以瞬态激励,测出桩的频率响应函数,这种方法又称之为系统识别或故障判断^[2]。

三、试验方法及数据处理

(一) 试验方法及主要设备

1. 混凝土试件的弹性波速和单轴抗压强度的测定

采用 1 MHz 的超声波换能器和谐振频率为 700 kHz 的 82-01 型横波换能器及 SYC-3 型数字式超声波岩石参数测定仪测定混凝土试件的纵波波速和横波波速,在 YE-200A 型液压式材料试验机上进行混凝土试件单轴抗压强度试验;用电阻应变片和 YJ-16 型数字式电阻应变仪测定混凝土试件轴向应变和环向应变。

2. 弱应力波传播法

桩身中出现的质量变化,使其物理力学性质和振动特性发生变化,从而导致波的到时、振幅、频率和形状的变化,利用这一特征我们采用弱应力波传播法进行桩的质量无损综合检测。

弱应力波传播法是用压电晶体、磁致伸缩元件、小铁锤、钢钎、钢球式水电效应装置等在桩头激振,所产生应力波的峰值应力比较小,实际上它是一种集多种动测法(声波法、冲击回波法、水电效应法、机械阻抗法和振型分析法等)之大成的一种综合检测法。弱应力波传播法的动荷载施加点和反应信息的接收点均在桩头上,动测时从桩顶获得的全波列反应信息是极其丰富的,主要由入射波信息、回波(反射波)信息和桩与土的相对运动三部份组成,因此它表征了桩身施工质量和桩-土体系共同工作的情况。我们动测试验主要提取的信息是回波和桩与土的相对运动信息。

(1) 声波法:

a. 声波法表面测量:在桩顶裸露部份,用 MS 型 15—30 kHz 平面式声波换能器和 SYC-2 型数字式岩石参数测定仪,测定桩头的弹性波速。

b. 声波法测井:本次声波探测分单孔测井和双孔或多孔测井:

单孔测井:是将单孔测井一发一收或一发两收声波换能装置置于桩的预留孔中,用声波法测井自动提升仪进行数据处理、打印、绘图,测定弹性波速沿孔深的变化曲线。

双孔测井:在桩的一预留孔中放入发射换能器,另一个或多个预留孔中放入接收换能器,用水偶合,从下往上用声波法测井自动提升装置以一定间隔距离逐点同步自动提升接收和发射换能器,测定不同孔深处弹性波在两孔间的混凝土中传播的时间,可得到弹性波速和物理力学参数随孔深的变化曲线。

(2) 冲击回波法:

a. 单点法:在桩顶中心位置上,用锤击或水电效应装置激发产生在桩中传播的弹性波,采用水听器或加速度计、地震检波器拾震,拾震信号输入 RSM-08 型多通道瞬态信号记录

处理仪或 EF - 1210 型讯号增强仪和 DMF - 911 型磁带记录器, 进行讯号信息处理、记录与打印绘图。

b. 多点法: 对于大直径桩, 宜采用多点法, 利用入射纵波、横波和沿桩身与土界面传播的界面波, 进行波形的时间域和频率域数据处理, 确定桩的频率响应函数或频率方程, 从而为判定桩的弹性波波速、桩长、缺陷的类型与位置提供振型分析资料。

(二) 桩顶反应信号数据处理

1、在时间域内进行全波列信号处理, 相关分析, 波形解调和子波分析等。

2、在频率域内进行信号处理, 绘出振幅谱、功率谱、相位谱等。由加速度计与速度计得测的自功率谱相似, 两者的主频率基本相同, 振幅谱与自功率谱相似, 而自功率谱更能突出主频率和次要的频率成份。

3、导纳法: 用磁带机中的两个通道同时记录激励力的功率谱 $G_F(f)$ 或加速度功率谱 $G_u(f)$, 以代表外力 F , 以及速度功率谱 $G_{\dot{u}}(f)$, 以代表速度响应 V ; 绘出导纳 (V/F) 与频率 (f) 的曲线, 其导纳 $N = \frac{V}{F} = \frac{1}{P A V_p}$, 则可以判断桩的颈缩程度和缺陷的位置。

四、混凝土的强度及其弹性波速

混凝土是由水泥、砂、碎石组成。不同的原材料、配合比、制作工艺、养护条件、龄期和混凝土的含水率, 其强度和弹性波速均不一样, 影响的主要因素有:

(一) 原材料的影响

水泥浆硬化体的弹性波速较低, 一般在 4 km/s 以下; 常用的砂、碎石弹性波速较高, 通常都在 5 km/s 以上。混凝土是水泥浆胶结砂和碎石而成, 因此它的强度和弹性波速, 实际上是组成混凝土的碎石、砂、水泥浆硬化体的强度及弹性波速的综合值, 而普通混凝土的

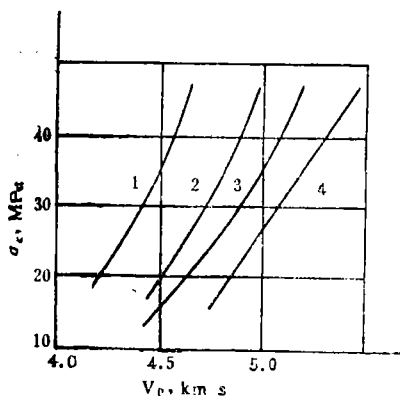


图3 不同品种石子的 $\sigma_c - V_p$ 曲线
1. 石英砂岩碎石 2. 石灰岩碎石
3. 花岗岩碎石 4. 石英岩碎石

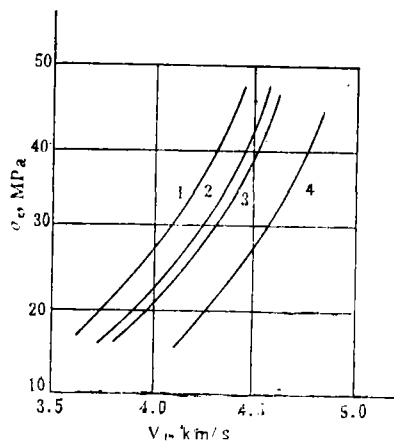


图4 不同石子粒径的混凝土的 $\sigma_c - V_p$ 曲线
1. 5—15mm 2. 5—30mm
3. 5—40mm 4. 25—40mm

强度一般在 10—40MPa，弹性波速在 4—5 km/s。低标号、早龄期的混凝土，也有在 10MPa 与 4 km/s 以下的；高标号、含坚硬碎石较多的混凝土的强度和弹性波速也有超过 40MPa 与 5 km/s 的。

(二) 石子的岩石种类、粒径、用量的影响

不同岩石的石子其弹性波速是不同的，即使石子粒径、级配、用量都一样，其混凝土弹性波速也会不同，可相差 20%。如陕西省建筑科学研究所就报导过这方面的试验结果（图 3）。

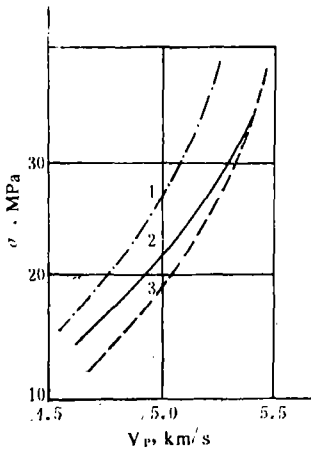


图 5 不同养护条件下的 $\sigma_c - V_p$ 曲线

1. 自然养护 2. 标准养护
3. 水中养护

在石子的岩石品种，用量相同情况下，粒径大的混凝土其弹性波速比粒径小的混凝土弹性波速高。同济大学曾做过这方面的试验（图 4）。

在石子的岩石品种、粒径相同的情况下，单位体积混凝土中的石子用量越多，其弹性波速也越高。

(三) 养护方式的影响

不同养护方式， $\sigma_c - V_p$ 曲线也明显不同，如南京水利科学研究院的试验结果（图 5）。

室内试验结果表明：混凝土的强度和弹性波速有较好的相关性。用最小二乘法整理试验数据，获得混凝土强度（ σ_c ）与弹性波速（ V ）的相关关系为：

$$\sigma_c = 4.18e^{0.48V} \quad (15)$$

$$(n = 30, r = 0.9869)$$

式中 σ_c ——混凝土准抗压强度（MPa）， V ——混凝土的纵波波速（km/s）。

五、桩的弹性波波速确定

桩的弹性波波速是评价桩身混凝土质量和缺陷位置及动测法测定单桩承载力的基本参数，因此较精确测定弹性波波速至为重要。但由于桩的结构与桩-土体系相互作用的复杂性，所以用单一的方法确定桩的弹性波波速是不甚可靠的，往往易造成误判。

鉴此，采用冲击回波法，测定桩底部的回波到时（图 6）^[3]，以及用振型分析法求得桩

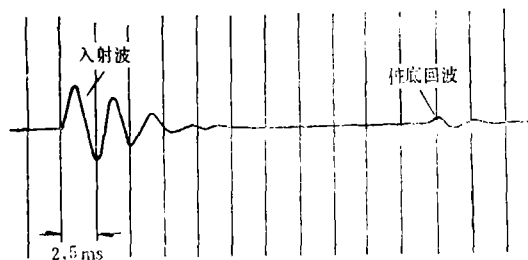


图 6 某大楼基础工程 88 号桩弱应力波波波形图

的振动基频,据这两者计算桩的弹性波速,并辅以桩中弹性波传播衰减规律,桩头混凝土的弹性波速以及在正常配合比,标准养护状态下混凝土试件的超声波波速等试验资料,通过分析对比,然后确定桩的弹性波波速。在这过程中,注意区分桩深部缺陷形成的回波与底面回波。

六、桩的质量与完整性的评价

桩基质量状态复杂,形式多样,仅依据单一的动力学指标来评价桩的好坏是比较困难的。我们根据弹性波速、阻尼比、断面系数、波形特征和频谱特征等几方面来判定桩的质量与完整性,并对桩的好坏进行分类。

(一) 桩的混凝土质量评价

1、据桩的纵波波速对混凝土的质量,密实度进行评价。根据现场试验和参考文献〔4〕获得表1

表 1

纵波波速 (m/s)	<2000	2000—3000	3000—3500	3500—4000	>4000
混凝土质量	极差	差	中等	好	优质
桩的类别	V	IV	III	II	I

2、据阻尼比对桩的质量进行评价(表2)

表 2

阻尼比	<0.1	0.1—0.2	0.2—0.3	0.3—0.4	>0.4
混凝土质量	优质	好	中等	差	极差
桩的类别	I	II	III	IV	V

(二) 桩的完整性评价

1、据截面完整系数进行桩完整性评价(表3)

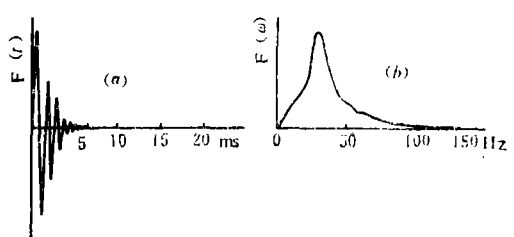
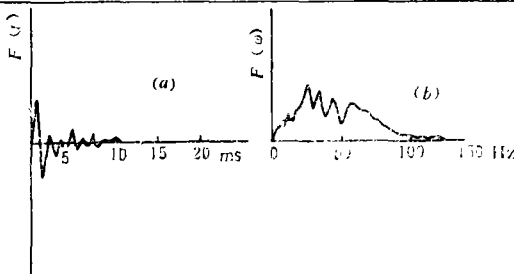
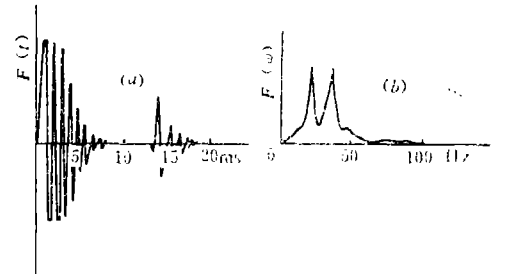
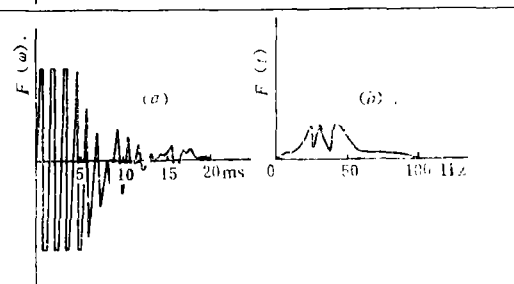
表 3

截面完整系数	<0.3	0.3—0.6	0.6—0.8	0.8—0.9	0.9—1
桩径变化情况	似于折断	严重颈缩	颈缩	略有颈缩	桩径均一
桩的类别	V	IV	III	II	I

2、据波形和频谱特征进行桩的完整性评价(表4)

此表中桩的完整性评价主要是指混凝土灌注桩。前面已经叙及预制桩施工质量存在的主要问题是桩身折断,据预制桩质量无损检测结果,桩身折断的波形和频谱特征类似于表4中混凝土灌注桩Ⅲ或Ⅳ类的波形和频谱特征,可借此判定预制桩的完整性。

表 4

桩的类别	完整性评价及其主要缺陷	波形特征及频谱特征	典型波形和频谱曲线
I	完整, 混凝土密实, 桩径均匀	波形规整, 上下幅值对称, 似自由振动衰减, 持续振动时间短, 振动频率高, 频谱曲线只有一个主峰且对应的频率为基频, 曲线光滑。	
II	基本完整, 桩径略有变化, 具有轻度缩颈或局部夹泥和微裂纹。	波形欠规整, 上下幅值基本对称, 近于自由振动衰减, 振动频率稍高, 频谱曲线呈多峰形, 但主峰幅值高, 其它峰值都较主峰值低很多。	
III	完整性差, 有一条断裂或软弱夹层。	波形不规整, 上下幅值不对称, 呈双峰形, 频谱曲线也呈双峰形, 第一峰值对应于基频。	
IV	完整性极差, 有多条断裂或软弱夹层。	波形极不规整, 上下幅值极不对称, 振动持续时间长, 振动频率低, 频谱曲线呈多峰形, 几个峰值同时存在。	

七、结 论

综合分析桩基的无损检测试验结果, 得到如下几点认识:

1、用小锤或球击, 水电效应装置给桩施振, 在桩中激发应力波, 用信号增强仪与多通道瞬态信号处理仪进行信号采集与数据处理, 以研究应力波传播衰减规律, 波形特征和频谱特征及其变化, 鉴别桩的质量, 是一种简便、灵活、快速、经济的有效方法, 所给出的单

桩质量和完整性评价标准具有实用价值,对确保建筑物的安全有重要意义。

2、桩的结构完整程度与频谱形状密切相关。桩的频谱可分为四类,代表不同的完整程度。

3、对于桩底面回波不明显的情况,可根据无阻尼自由振动的桩在不同边界条件下的频率方程,在检测出桩的振动基频的条件下,就可求出桩的弹性波波速,判定混凝土的密实程度。

4、可以根据第二、三振型频率近似地估算断裂深度,误差在10%以内。

本所原动力试桩组及高建光、汤桃森等同志参加了现场检测工作,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] Kolsky, H., 固体中应力波, 王仁等译, 科学出版社, 1966年。
- [2] 赵学勤等, 钻孔桩完整性无损检验的新方法, 中国土木工程学会第四届土力学及基础工程学术会议论文选集, 中国建筑工业出版社, 1986年。
- [3] Sleinhach, J., Vey, E., 应力波传播法检验墩基, 地基与基础译文集(5), 桩基确, 中国建筑工业出版社, 1982年。
- [4] Seitz, J.M., Low Strain Integrity Testing of Bored Piles, Application of Stress-Wave Theory on Piles, Second International Conference, A.A.Balkema, 1985.

Inspection Test of Pile Quality with Weak Stress Wave Method

Huang Chengxian

Abstract

This paper describes theoretical basis, test technique, data interpretation for pile quality inspection. The propagation and attenuation law of weak stress waves in concret piles, relationship between concret strength and elastic wave velocity are discussed. A criterion of inspecting pile quality is proposed. The study mentioned in this paper has practical value and theoretical significance for field inspection test of pile quality.