

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.002

应力反射波在注浆微型钢管桩中的波速研究*

何忠意¹, 朱佩宁¹, 周亚东², 齐昌广³

(1. 广东天信电力工程检测有限公司, 广东 广州 510663; 2. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384;
3. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于三维波动理论, 考虑对长细比较大的注浆微型钢管桩(GMSP桩)满足一维弹性杆件条件, 对应力反射波运动方程进行简化分析; 利用材料对强冲荷载的动态响应研究成果, 结合物质运动学 LOVE 方程及弹性力学 ST. Venant 原理, 推导出低应变法反射波在 GMSP 桩注浆体与钢管共同组成的复合胶结体中的传播波速理论计算模型; 设计及开展了三个不同地质条件场地的 9 条试桩低应变反射波试验; 并对现场试验与理论模型计算波速进行对比与分析, 得出以下结论: GMSP 桩完整性可采用低应变动测检测; 文中提出的理论模型计算波速与现场实测波速吻合度高, 相对可靠性、准确性。建议在 GMSP 桩工程桩进行低应变应力反射波检测时, 可结合提出的理论计算模型, 先对其低应变波速进行计算, 以此对桩长、缺陷位置以及完整性进行判定。

关键词: 注浆微型钢管桩; 波动理论; 桩身完整性, 低应变反射波法; 波速理论计算模型

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0009-09

Behaviour of the Wave Velocity during Low-strain Integrity Test for Grouting Micro-steel-pipe Pile

HE Zhongyi¹, ZHU Peining¹, ZHOU Yadong², QI Changguang³

(1. Guangdong Tianxin Electric Power Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

3. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A motion equation of stress reflection wave, based on three-dimensional wave theory, was proposed in this paper to provide insight into the low-strain integrity behaviour of grouting Micro-steel-pipe with large slenderness ratio which satisfy the one-dimensional elastic member condition. This new analytical solution can be used to calculate the propagation velocity of the reflected waves in the composite cementation composed of the cement grouting and steel tube in GMSP pile. This analytical solutions have advantage of previous research results in dynamic response of materials to strong impact loads, which combines with the LOVE equation of material kinematics and the ST. Venant principle of elasticity. Three low-strain reflected wave tests for nine piles under different geological conditions have been conducted to examine the behaviour of low-strain integrity of GMSP pile. And then, the analytical solution were validated against field tests, with good agreement obtained. Following

* 收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2019-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508282)、浙江省自然科学基金青年基金项目(LY18E080010)、天津市自然科学基金项目(18JCYBJC22600)资助

作者简介: 何忠意(1986-), 男, 高级工程师, 硕士。主要从事岩土工程测试与数值计算研究。Email: hezhongyihao@163.com

conclusions are drawn: (i) the integrity of GMSP pile can be tested by low-strain integrity test; (ii) the calculated wave velocity by this new analytical solution proposed in this paper coincides with measured wave velocity, which proved that it is relatively reliable and accurate. It is suggested that, in the detection of engineering piles by the low-strain integrity test, the wave velocity can be calculated firstly through this new analytical solution. And, this new analytical solution, can provide guidance for low-strain integrity test of GMSP pile, which can determine and analyze the length, defect location and then estimate the integrity of GMSP pile.

Keywords: cement paste grouting micro-steel-pipe pile; wave theory; pile integrity; low-strain wave method; Theoretical calculation model of wave velocity

引言

钢管桩基础是一种传统的桩基础形式,由于其承载力高,经济性好,被广泛应用于在岸和离岸地基加固中^[1-4]。基于此,注浆微型钢管桩(Grouting Micro-steel-pipe Pile,简称GMSP桩)被引入研究;GMSP桩是利用地质钻机,钻出直径15~35 cm的钻孔,然后在钻孔中设置预先在管壁加工微孔的钢管,利用一定压力将水泥浆或水泥砂浆注入固结成桩的一种新型的微型桩。微型钢管桩具有施工设备小、施工速度快、施工质量可靠、对环境影响小,桩长和桩截面尺寸容易调节的特点,目前广泛应用于边坡和基坑支护、既有房屋的地基基础加固及桩基事故加固处理中^[5-11]。但目前对于GMSP桩的试验研究大部分都停留在承载力方面^[10-15],而对于作为GMSP桩成桩质量监控的重要指标之一,完整性的测试方面鲜有研究。

应力反射波法作为一种无损检测方法^[16],众多学者对其用于灌注桩、PHC管桩、CFG桩、水泥搅拌桩等基桩的测试开展研究^[17-20]。应力反射波法基本的理论依据是认为桩体的横向尺寸(桩径 d)与竖向尺寸(桩长 L)的比值足够小的情况下,视基桩为一维杆状体,来研究和探讨应力反射波在线性杆状体中的传播规律和特性^[16-17,20]。其基本测试原理^[16,21]是在桩身顶面给予竖向激振,进而产生应力波,波沿着桩身向下传播,当桩身存在明显波阻差异的界面(桩底、断桩等位置)时,或桩身截面面积变化(缩径、扩径等位置)时,将产生不同特征的反射波,经测试仪器接收放大、滤波及后期的分析处理,再获得不同部位的反射信号数据,对采集波信号进行相关数学公式变换处理(频域或时域)分析,求得桩身波速,进而对桩身完整性、桩身强度等综合评价。

在应力波反射法对桩基完整性的测试过程中,准确的波速是确定桩长和桩身缺陷位置的必要条件^[22-23],因此对于GMSP桩中应力反射波波速的研究甚为重要。

基于三维波动理论,考虑到GMSP桩满足桩径 d 与桩长 L 的比值足够小前提下,满足一维弹性杆件条件,对其方程进行简化;利用前人在材料对强冲荷载的动态响应方面的研究成果,结合物质运动学LOVE方程及弹性力学ST. Venant原理,在满足文中假设条件下,推导低应变法反射波在GMSP桩注浆体与钢管共同组成的复合固结体中的传播波速理论计算模型;设计及开展三个不同地质条件场地的9条试桩低应变反射波试验,通过现场试验和本模型计算波速对比与分析,验证理论公式的可行性;为应力法反射波在GMSP桩检测中的应用提供依据和基础。

1 理论基础

1.1 反射波在弹性杆体的理论传播速度

从理论意义上来说,波的类型、介质物理力学性质以及主要运动学边界条件等对固体介质中的波传播速度影响较大。基于文献[18,20-21]的结论,采用低应变法测试时,GMSP桩的几何特征,满足横向尺寸 b 与纵向尺寸 L 比值足够小时,认为可以忽略杆体的横向尺寸效应,将其作为一维弹性杆进行考虑,满足:

$$C^2 = \frac{E}{\rho} \quad (1)$$

式中, C 为弹性介质材料弹性波速; E 为介质材料弹性模量; ρ 为介质的密度。

1.2 GMSP 桩波速计算模型

对于注浆微型钢管桩(GMSP 桩)来说,水泥或水泥砂浆注浆体可认为是基体材料,钢管可认为增强体材料,从某种意义上说,可认为 GMSP 桩是一种复合杆体材料。当基体与钢管在阻尼和刚度方面可相比时,则基体材料会较大程度上对钢管(增强体材料)的振动特性产生影响。钢管与基体材料共同工作时,钢管的振动非常复杂。文献[24-26]在锚固体固结波速方面的研究,本文为了构建 GMSP 桩反射波简化计算模型,作以下假设:

(1)增强体钢管材料的受激振动在弹性变形限度内时,钢管内各运动质点的位移 u 、应力 σ 以及应变 ϵ 之间的关系从某种意义上满足虎克定律。而事实上,低应变测试中,由于瞬间的激振力很小,且易控制,故认为钢管的振动满足该假定条件。

(2)增强体钢管材料均匀或分段均匀且各向同性。基体材料的拉伸以及压缩特性存在差异性和不均匀性,但各质点在低应变的情况下,可认为近似满足该假设条件。

(3)GMSP 桩顶面受激振时,其截面保持为平面。桩体受激振动时,同一截面上所有运动质点位移 u 的大小和方向一致,无相位差,也无振动的超前、滞后现象。当桩体直径 d 、桩长 L 比值(L/d) $\leq 1/10$ 时可认为满足该假设条件。

在 GMSP 桩截取一控制体积单元,如图 1 所示。在低应变的情况下,认为钢管与基体材料的界面的黏结强度足够大,在 GMSP 桩的自由端给予一脉冲激振,依据弹性力学 ST. Venat 原理,将在 GMSP 桩桩体内产生一稳定的弹性应力波向杆体前端传播,但是弹性应力波在基体与钢管的界面,并且沿弯曲表面产生动态剪应力^[27]。

假定这个复杂应力场的范围有限,则波阵面(图 1)下方一定距离处理论上为准静态区域^[28-29],在该区域中杆体运动质点的速度是相对均匀的,可认为界面切应力等于零^[26-27]。

基于此,写出 GMSP 桩体这种基于浆体与钢管的复合体材料在波阵面两侧的运动学连续方程为:

$$\rho'_g A'_g (V - \nu) = \rho_g A_g V \quad (2)$$

$$\rho'_c A'_c (V - \nu) = \rho_c A_c V \quad (3)$$

式中, V 为桩体内波阵面传播的速度; ν 为运动质点速度; ρ_g 、 ρ_c 分别表示钢管和水泥基体材料在控制体

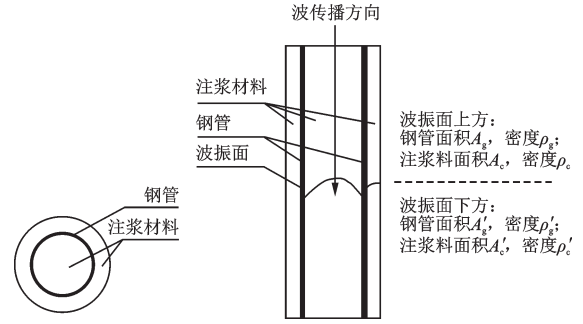


图 1 GMSP 桩所取控制体积单元

Fig.1 Stationary controlling volume element of GMSP pile

积单元中的密度; A_g 、 A_c 分别表示钢管和水泥基体材料在控制体积单元中的横截面积; ρ'_g 、 ρ'_c 分别表示准静态应变状态下钢管和水泥基体材料的密度; A'_g 、 A'_c 分别表示准静态应变状态下钢管和水泥基体材料的面积。

由于复合体材料控制体积单元内波阵面前方桩体单元未受扰动,可认为波阵面前的介质未产生应变,从某种意义上说,相对伸长率等于正应变 ϵ_x ,则有:

$$\rho'_g A'_g = \rho_g A_g / (1 + \epsilon_{xg}) \quad (4)$$

$$\rho'_c A'_c = \rho_c A_c / (1 + \epsilon_{xc}) \quad (5)$$

结合式(2)~式(5)可推导得:

$$\epsilon_{xg} = \epsilon_{xc} = \epsilon_x = \frac{\nu}{V} \quad (6)$$

以上符合 Love 运动学条件^[27], ϵ_{xg} 和 ϵ_{xc} 分别表示复合体材料控制体积单元内钢管和基体材料的应变。结合式(6),在控制体积单元下方,即在准静态应变区中,复合体材料的单向应力—应变关系可用一般形式表达为:

$$\sigma_{xg} = K_g \epsilon_{xg} = K_g \frac{\nu}{V} \quad (7)$$

$$\sigma_{xc} = K_c \epsilon_{xc} = K_c \frac{\nu}{V} \quad (8)$$

式中, K_g 、 K_c 分别为钢管和基体材料在固结复合体中的动刚度系数(折算刚度),这两个值要从施加的平衡和几何约束条件中确定,并不是单独存在的数值。

联立式(4)~式(8),文中研究的桩体平均应力可由 ϵ_x 和平均折算刚度求得,则有:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{xg} \alpha_g + \sigma_{xc} \alpha_c = \nu / V (K_g \alpha_g + K_c \alpha_c) \quad (9)$$

式中, α_g 、 α_c 分别为钢管和基体材料的体积分数,有 $\alpha_g = A_g / (A_g + A_c)$, $\alpha_c = A_c / (A_g + A_c)$ 。

在文中所取复合体材料控制体积单元内参考

文献[27]的研究成果,研究控制体积动量方程时,可以把复合体材料控制体积单元的钢管与基体材料当做两部分来分析,或者把两部分合成一个整体来研究。前一种是列出两个动量方程,而两方程都将出现剪切应力,推导时从方程中把它们消去;后一种合起来一起考虑,而剪切应力是内应力,并不影响总动量平衡;按以上两种方法均可求得:

$$\sigma_{X_g} A'_g + \sigma_{X_c} A'_c = V(\rho_g A_g + \rho_c A_c) \nu \quad (10)$$

忽略横向应变,则有:

$$A'_g/A_g = A'_c/A_c = 1 \quad (11)$$

联立式(12)~式(16),则可导出:

$$V^2 = \frac{K_g A_g + K_c A_c}{\rho_g A_g + \rho_c A_c} \quad (12)$$

基于弹性力学理论,对于一维线性杆体材料来说, K_g 可取钢管的弹性模量 E_g , K_c 可取水泥基体材料的弹性模量 E_c ,从而简化得到低应变法测试时,近似波阵面速度计算模型:

$$V^2 = \frac{E_g A_g + E_c A_c}{\rho_g A_g + \rho_c A_c} \quad (13)$$

式中,令 $\alpha_g = A_g/(A_g + A_c)$,则当 α_g 趋向于零时,波速 V 趋向于应力波在基体材料中的传播速度;当 α_g 趋向于无穷大时,波速趋向于应力波在钢管中的传播速度。

在GMSP桩体内,应力波波速介于其在水泥基体材料和钢管中的传播速度之间。分析文中模型可得出当桩体材料在不同位置时基体、钢管的密度及弹性模量均发生改变,应力波波速也会发生变化。若基体材料为水泥砂浆,钢管由钢筋替代,这与文献[22-23,28]在研究锚杆固结波速时得出的结果也一致。文中模型从理论上证明了在类似介质中传播,应力波波速确实会发生变化。如果基体材料为混凝土,钢管由钢筋笼替代,当满足桩径比 $L/d \leq 1/10$,即可得到灌注桩中应力波在不同位置的波速。

2 GMSP桩低应变动测现场试验

为验证GMSP桩波速计算模型的可靠性,选取3个场地进行现场施工GMSP桩,并开展低应变动测试验,试验桩设计如图2所示,成孔均采用钻孔成孔工艺。

(1)A场地:上覆岩土层主要为素填土、根表土、

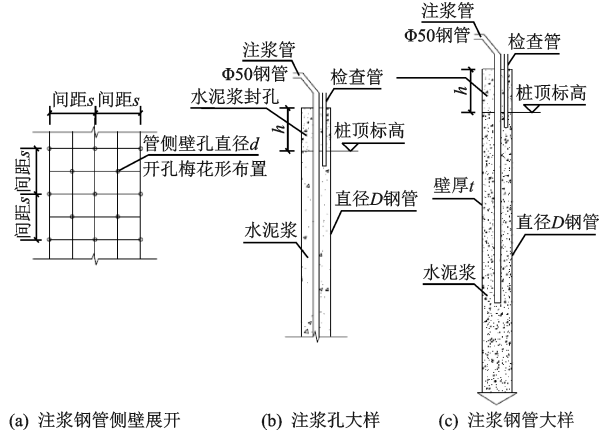


图2 注浆微型钢管桩

Fig.2 The design of grouting micro-steel-pipe pile

黏土、中粗砂、残积砂质黏性土等,下伏基岩为各风化等级的砂岩。现场试验3根桩,桩号记为S1、S2、S3,桩长分别为9.13、8.93、8.93 m,持力层为砂质黏性土。钻孔直径 $D_0=350$ mm,内置钢管采用 $\Phi 219$ 焊接镀锌管(Q236),壁厚 $t=6$ mm,端部加工成锥形,端封板与钢管采用满焊连接,桩管壁采用梅花形式开孔($d=15\sim 20$ mm),开孔以便高压注浆填满钢管与岩土层间隙,注浆钢管采用 $\Phi 50$ 钢管,分段焊接。注浆采用M30水泥浆体,注浆材料为水泥浆,水泥采用C42.5,水灰比为0.45,注浆压力采用1.0~2.0 MPa。

(2)B场地:上覆岩土层主要由素填土、中砂、粉砂、砾质黏性土、粉质黏土组成等,下伏基岩为各风化等级花岗岩)。现场试验3根桩,桩号记为S4、S5、S6,桩长分别为11.5、12.0、13.0 m,持力层为强风化花岗岩。钻孔直径 $D_0=250$ mm。内置钢管采用 $\Phi 219$ 焊接镀锌管(Q235B),壁厚 $t=9$ mm,端部用钢板封口,端封板与钢管采用满焊连接,桩管壁采用梅花形式开孔($\Phi 15$),桩底封板均匀开100个孔($\Phi 15$),桩底部1 m范围内加密开孔(沿周长方向每500 mm梅花形布置10个孔)。注浆钢管采用 $\Phi 50$ 钢管,分段焊接,连接采用套管焊接。注浆采用M30水泥浆体,采用二次灌浆,首次灌浆压力为0.5~1.5 MPa,第二次灌浆压力为2.0~3.0 MPa。注浆材料为水泥浆,水泥采用C42.5,水灰比为0.45,采用二次灌浆确保注浆密实。

(3)C场地:上覆岩土层主要由素填土、淤泥质土、砾质黏性土、砂质黏性土、全风化花岗岩组成

等,现场试验3根桩,桩号编为S7、S8、S9,桩长分别为23.2、23.5、23.5 m,持力层为全风化花岗岩。钻孔直径 $D_0=300$ mm,内置钢管采用 $\Phi 219$ 焊接镀锌管,壁厚9 mm,端部用钢板封口,端封板与钢管采用满焊连接,桩管壁采用梅花形式开孔($\Phi 15$),注浆钢管采用 $\Phi 50$ 钢管,分段焊接,连接采用套管焊接。注浆采用M25水泥浆体,注浆材料为水泥浆,水泥采用C42.5,水灰比为0.35~0.40,注浆压力采用1.0~2.0 MPa。

对以上3个场地的9根GMSP试桩,在施工完成后达到养护龄期28 d后,凿去桩顶的浮浆露出桩体的注浆体硬面,采用低应变对桩身完整性进行测试。参考《建筑地基基础检测规范》^[30]对试验桩低应变法完整性判别。本试验中对试验桩完整性测试的仪器采用美国桩动力学公司(Pile Dynamics, Inc.)生产的PIT-X型低应变测试仪,如图3所示。



图3 PIT-X低应变测试仪
Fig.3 The PIT-X low strain tester

3 结果分析

3.1 低应变测试结果分析

图4描述是S1~S3桩在达到28 d龄期后的低应变实测曲线。曲线存在明显的桩底同向反射信号,这与持力层为砂质黏性土相符。由S1桩长为9.13 m,可计算波速约为3 200 m/s;结合表1,可得出在S1桩在4.5 m左右存在一个轻微缺陷信号,且在桩身2.0~4.5 m时有明显的扩径表现,参考现行规范^[30]该桩完整性判别可判为II类。由S2桩长为8.93 m,可计算波速约为3 500 m/s;结合表1,可知S2在桩身2.5~2.8 m时有明显的扩径表现,参考规范^[30]该桩完整性判别可判为I类。由S3桩长为

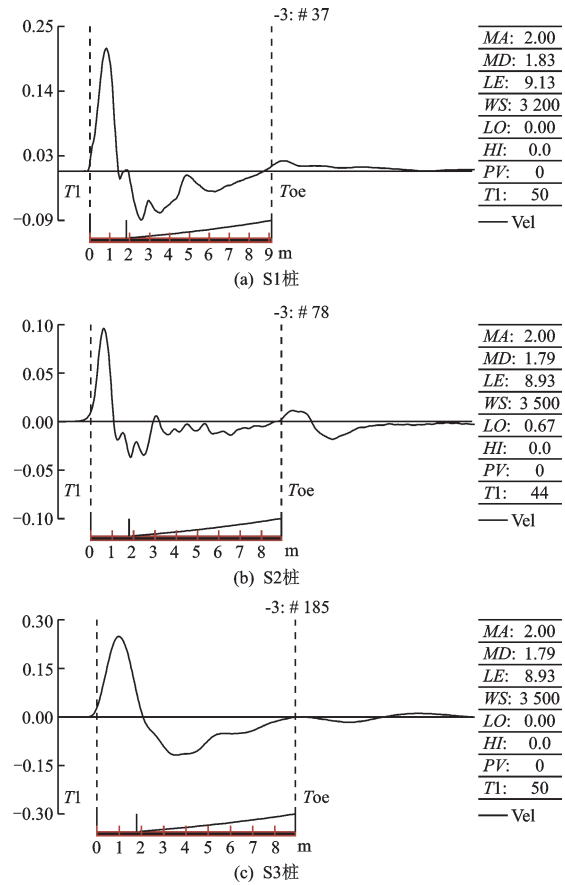


图4 S1、S2、S3桩的低应变反射波曲线

Fig.4 Test curves of low-strain reflection wave for S1, S2 and S3 pile

注:MA—信号指数放大倍数;MD—信号指数放大位置(单位:m);LE—传感器以下桩长(单位:m);WS—测试波速(单位:m/s);LO—低滤波指数;HI—高通滤波指数;PV—尾部旋转指数;T1—波传播起始时间(单位:ms);Toe—桩底位置

8.93 m,可计算波速约为3 500 m/s;类似S2桩,S3在桩身2.2~5.3 m时有明显的扩径表现,参考规范^[30]该桩完整性判别可判为I类。

图5描述是S4~S6桩在达到28 d龄期后的低应变实测曲线。据图5中三条曲线均表现出存在明显的桩底同向反射信号,这与持力层为强风化花岗岩相符。由S4桩长为11.5 m,可计算波速约为3 700 m/s,由S5桩长为12.0 m,可计算波速约为3 750 m/s;由S6桩长为13.0 m,可计算波速约为3 700 m/s;其中S5在桩身3.5~5.0 m时有明显的扩径表现,S6在桩身2.5~8.0 m时有明显的扩径表现。结合表1,参考规范^[30]以上3桩完整性判别均可判为I类。

图6描述的是S4~S6桩在达到28 d龄期后的低应变实测曲线。据图6中三桩的波形图与前面几

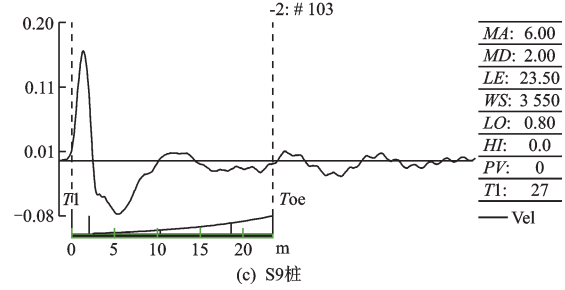
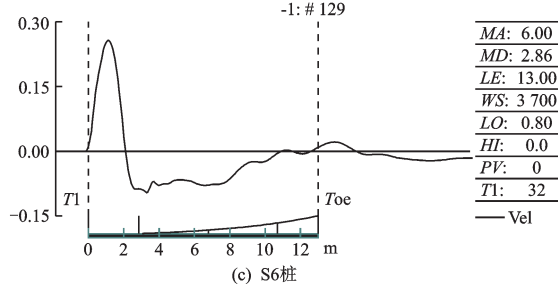
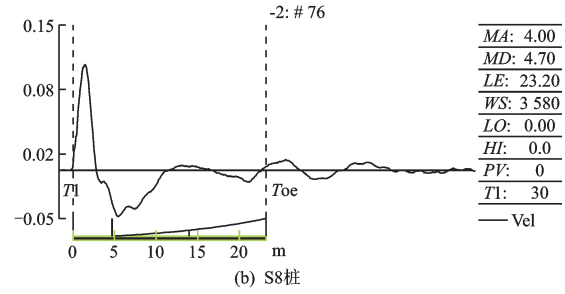
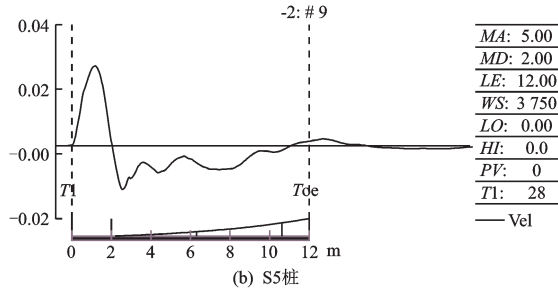
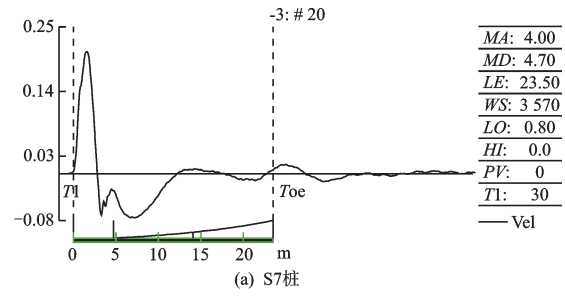
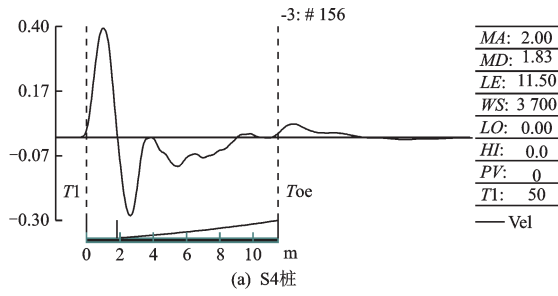


图5 S4、S5、S6桩的低应变反射波曲线

图6 S7、S8、S9桩的低应变反射波曲线

Fig.5 Test curves of low-strain reflection wave for S4, S5 and S6 pile

Fig.6 Test curves of low-strain reflection wave for S7, S8 and S9 pile

桩类似，桩底有明显同向反射信号，这也与其持力层为全风化花岗岩相符。由S4桩长为23.5m，可计算波速约为3570m/s，由S5桩长为23.2m，可计算波速约为3580m/s；由S6桩长为23.5m，可计算波

速约为3550m/s；图6中3根桩分别在5.0~10.3、4.8~10.2、2.7~8.2m范围内有明显的扩径表现。结合表1，参考规范^[30]以上3桩完整性判别均可判为I类。

表1 低应变反射波波速实测值与模型计算值

Table 1 The wave velocity of low-strain reflection wave by measuring and calculating

桩号	桩径 D_0/mm	钢管 外径 D/mm	钢管 壁厚 t/mm	基体 密度 $\rho_c/$ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	钢管 密度 $\rho_g/$ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	基体弹性 模量 E_c/Pa	钢管弹性 模量 E_g/Pa	计算波速 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	实测波速 $V_u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	差值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
S1	350	219	6	2 200		2.4×10^{10}			3 200	-270
S2	350	219	6	2 200	7.85×10^{11}	2.4×10^{10}	2.1×10^{11}	3 470	3 500	30
S3	350	219	6	2 200		2.4×10^{10}			3 500	30
S4	250	219	9	2 200		2.2×10^{10}			3 700	-31
S5	250	219	9	2 200	7.85×10^{11}	2.2×10^{10}	2.1×10^{11}	3 731	3 750	19
S6	250	219	9	2 200		2.2×10^{10}			3 700	-31
S7	300	219	9	2 000		2.0×10^{10}			3 570	34
S8	300	219	9	2 000	7.85×10^{11}	2.0×10^{10}	2.1×10^{11}	3 536	3 580	44
S9	300	219	9	2 000		2.0×10^{10}			3 550	14

注：水泥浆固结体（基体）弹性模量结合文献[31-37]再进行经验取值

3.2 模型计算波速与实测波速对比分析

采用式(13)中GMSP桩波速计算模型对9个桩的波速进行计算,计算结果见表1。

S1桩实测波速与式(13)计算波速差别较大,差值达270 m/s,究其原因因为在S1桩4.5 m左右存在缺陷,导致其实测波速低于计算波速,这与文献[17]对基桩波速的研究比较吻合;而对于剩余8根桩,S2、S3桩实测波速 $V_u=3\ 500$ m/s,文中模型计算波速 $V=3\ 470$ m/s;S4、S5、S6桩实测波速 $V_u=3\ 700\sim 3\ 750$ m/s,文中模型计算波速 $V=3\ 731$ m/s;S7、S8、S9桩实测波速 $V_u=3\ 550\sim 3\ 580$ m/s,文中模型计算动测波速 $V=3\ 536$ m/s;实测波速与模型计算波速差值为 $-31\sim 34$ m/s,吻合度较高。可见在GMSP工程桩检测过程中,当不能确定桩长时,可采用文中模型对GMSP桩的波速进行计算,然后对信号曲线进行分析,对施工桩长和缺陷位置进行判定,提高测试结果的准确性。

4 结 论

(1)在三维波动理论基础上,考虑到GMSP桩在桩径 d 与桩长 L 的比值足够小时满足一维弹性杆件条件,对应力反射波运动方程进行简化演算;基于物质运动学LOVE方程及弹性力学ST.Venant原理,推导出低应变法反射波在GMSP桩注浆体与钢管共同组成的复合固体中的传播波速理论计算模型。

(2)基于计算模型对不同注浆体与不同直径钢管的组合体的应力波速进行计算,通过三个场地的现场试验桩低应变法测试与对理论模型计算波速进行对比与分析,验证了理论模型公式的可靠性与准确性。

(3)现场试验证明可采用低应变动测对GMSP桩的完整性进行检测。在工程桩检测过程中,不能准确确定桩长时,可按导出的计算模型对其低应变波速进行计算,结合计算波速对桩长以及缺陷位置进行判定,有利于提高低应变动测结果的准确性。

参考文献:

[1] Zhao Z, Zhou M, Hu Y, et al. Behavior of soil heave

inside of stiffened caissons installing in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(5): 698-709.

- [2] Zhou M, Liu H L, Chen Y, et al. First application of cast-in-place concrete large-diameter pipe (PCC) pile-reinforced railway foundation: a field study[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 708-716.
- [3] Zhou M, Liu H L, Hossain M, et al. Numerical simulation of plug formation during casing installation of PCC piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(7): 1-17.
- [4] Zhou M, Hossain M, Hu Y, et al. Installation of stiffened caissons in nonhomogeneous clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2016, 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001381, 1-14.
- [5] 夏华宗, 吕建国. 微型钢管桩超前支护复合土钉墙研究现状[J]. 华北科技学院学报, 2007, 4(2): 41-43.
- Xia H Z, Lyu J G. Research status of the compound earth nail wall supported by micro steel pipes in advance [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2007, 4(2): 41-43. (in Chinese)
- [6] 杨 敏. 微型钢管桩施加预应力加固沉降基础的试验研究[J]. 建筑技术, 2008, 39(6): 465-466.
- Yang M. Test Research on reinforcing sunk foundation with pre-stressed micro steel pipe piles[J]. Architecture Technology, 2008, 39(6): 465-466. (in Chinese)
- [7] 肖春锦. 微型钢管桩用于滑坡治理及理论分析[J]. 路基工程, 2010, 151(4): 94-97.
- Xiao Ch J. Land slide treatment with micro steel tube pile and theoretical analysis[J]. Subgrade Engineering, 2010, 151(4): 94-97. (in Chinese)
- [8] 李 白, 刘小丽, 黄 敏. 微型桩在基坑工程中的应用与思考[J]. 工程地质学报, 2011, 19(增刊): 492-497.
- Li B, Liu X L, Huang M. Application of micro piles to foundation pit excavation[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(Sup): 492-497. (in Chinese)
- [9] 吴学锋, 寇海磊. 土岩复合地层注浆微型钢管桩-锚杆联合支护研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 836-841.
- Wu X F, Kou H L. Research on support combined with grouting micro-steel piles and bolt in soil-rock formation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 836-841. (in Chinese)
- [10] 李 湛, 滕延京, 李钦锐, 等. 既有建筑加固工程的微型桩技术[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增2): 197-201.
- Li Zh, Teng Y J, Li Q R, et al. Micro-pile techniques for improvement project of existing buildings[J]. China

- Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup 2): 197-201. (in Chinese)
- [11] 吕文龙, 刘 恋, 邓 婷. 钻孔注浆钢管桩桩身轴压承载力的试验研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(3): 61-65.
Lyu W L, Liu L, Deng T. Axial behavior test of steel tubular injection piles filled with cement mortar[J]. Building Science, 2016, 32(3): 61-65. (in Chinese)
- [12] 邓朗妮, 马 骏, 彭 来, 等. 微型钢管桩抗弯性能及受力监测试验研究[J]. 混凝土, 2016(8): 130-132, 135.
Deng L N, Ma J, Peng L, et al. Experimental study on flexural behavior and stress monitor of micro-steel-pipe piles[J]. Concrete, 2016(8): 130-132, 135. (in Chinese)
- [13] 唐咸远, 杨和平, 肖 杰, 等. 注浆微型钢管桩抗弯承载力及抗弯刚度研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(10): 89-94.
Tang X Y, Yang H P, Xiao J, et al. Experiment study of flexural behavior of grouted micro steel pipe piles[J]. Industrial Construction, 2016, 46(10): 89-94. (in Chinese)
- [14] 徐 勋. 微型钢管桩组合结构工作机理的模型试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
Xu X. Model experimental study of the combination of miniature steel pile structure working mechanism [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [15] 刘小丽, 李 白. 微型钢管桩用于岩石基坑支护的作用机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增1): 217-222.
Liu X L, Li B. Analysis of supporting mechanism of micro-steel-pipe piles in rock foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup1): 217-222. (in Chinese)
- [16] 高红伟, 姚 勇, 陈代果, 等. 低应变反射波法在桩基检测中的应用[J]. 西南科技大学学报, 2013, 28(3): 40-44.
Gao H W, Yao Y, Cheng D G, et al. Application of low strain reflected wave method in pile foundation detection[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2013, 28(3): 40-44. (in Chinese)
- [17] 林彦英. 低应变反射波法三维缺陷桩动测响应分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
Lin Y Y. Analysis on dynamic response of 3D-defective piles using low strain reflected wave method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [18] 夏安营, 董军海. 反射波法检测粉喷桩的应用[J]. 内蒙古民族大学学报, 2005, 11(3): 125-126.
Xia A Y, Dong J H. Application of reflection wave method in testing powder sprayed piles [J]. Journal of Inner Mongolia University for the Nationalities, 2005, 11(3): 125-126. (in Chinese)
- [19] 谢 平, 范文斌, 秦 敏, 等. 低应变反射波法在CFG桩浅部缺陷检测中的应用[J]. 中外建筑, 2008(8): 178-180.
Xie P, Fan W B, Qin M, et al. The application of reflect wave in CFG picket vice survey [J]. Chinese and Overseas Architecture, 2008(8): 178-180. (in Chinese)
- [20] 张 宏, 刘衍林. 应力波法基桩检测中复杂地层等效转换[J]. 中国公路学报, 2002, 15(2): 83-86.
Zhang H, Liu Y L. Equivalent transformation of complicated layer for pile test with stress wave [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 83-86. (in Chinese)
- [21] 李青锋, 徐金海, 吴 宇. 连续小波变换在基桩完整性检测分析中的应用[J]. 矿冶工程, 2006, 26(2): 30-32.
Li Q F, Xu J H, Wu Y. Application of continuous wavelet transform in analysis of pile integrity [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006, 26(2): 30-32. (in Chinese)
- [22] 张明义, 章 伟. 预制桩波速随时间增长的试验现象及分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(6): 62-64.
Zhang M Y, Zhang W. Increase of wave velocity in pre-cast pile along with time and its analysis [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(6): 62-64. (in Chinese)
- [23] 杜思义, 陈一汉. 基桩低应变波速的量值研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(2): 24-27.
Du S Y, Chen Y H. Study on quantity of wave speed in low strain integrity testing of foundation pile [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(2): 24-27. (in Chinese)
- [24] 张昌锁, 李 义, ZOU Steve. 锚杆锚固体系统中的固结波速研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3 604-3 608.
Zhang Ch S, Li Y, Zou S. Research on consolidation wave in grouted rock bolt structure system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup 2): 3 604-3 608. (in Chinese)
- [25] 邓东平, 李 亮, 高连生. 锚索锚固质量检测的应力波法试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2 768-2 775.
Deng D P, Li L, Gao L Sh. Experimental study on

- stress wave method for detecting anchorage quality of anchor cable [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(8): 2 768-2 775. (in Chinese)
- [26] 刘海峰, 杨维武. 混凝土强度的锚固体固结波速检测法[J]. *无损检测*, 2007, 27(9): 522-525, 528.
Liu H F, Yang W W. Testing method of concretion wave speed of anchorage bolt for concrete strength[J]. *Nondestructive Testing*, 2007, 27(9): 522-525, 528. (in Chinese)
- [27] 周培基, 霍普肯斯 A K. 材料对强冲荷载的动态响应[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Zhou P J, Hopkins A K. Dynamic response of materials to intense impulsive loading [M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)
- [28] 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.
Zhao H Sh, Li L T, He J. Analysis of the testing wave speed in concrete pile by wave theory[J]. *Building Science*, 2003, 19(3): 34-37. (in Chinese)
- [29] 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 F, Xu T P, Chen J Zh, et al. Testing techniques for pile quality [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [30] 建筑地基基础检测规范: DBJ15-60—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Code for testing of building foundation: DBJ15-60—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [31] 林 枫, Christian MEYER. 硬化水泥浆体弹性模量微观力学模型[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(2): 184-189.
Lin F, Meyer Ch. Micromechanics model for the effective elastic properties of hardened cement pastes[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(2): 184-189. (in Chinese)
- [32] 沙 玲, 杜时贵, 陈龙珠. 不同检测方法对混凝土波速的影响研究[J]. *工程地质学报*, 2007, 15(1): 124-128.
Sha L, Du Sh G, Chen L Zh. Ratio of concrete wave velocities measured with two test methods [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(1): 124-128. (in Chinese)
- [33] 陈龙珠, 沙 玲, 邓俊杰. 混凝土波速受检测方法影响的研究[J]. *岩土工程学报*, 2006(6): 685-688.
Chen L Zh, Sha L, Deng J J. Studies on wave velocities in concrete measured with different test methods [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006(6): 685-688. (in Chinese)
- [34] 尹尚先, 王尚旭. 弹性模量、波速与应力的关系及其应用[J]. *岩土力学*, 2003, 24(增2): 597-601.
Yin Sh X, Wang Sh X. Relation of stresses with elastic modulus and velocities and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Sup 2): 597-601. (in Chinese)
- [35] 吴 浪, 宋固全, 雷 斌. 基于细观力学模型水泥浆体弹性力学性质预测[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(3): 39-42.
Wu L, Song G Q, Lei B. Prediction of elastic properties of cement pastes using micro mechanic [J], *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2011, 39(3): 39-42. (in Chinese)
- [36] 胡长明, 王玉洲, 马继明. 初凝后水泥浆体的弹性模量研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 44(2): 177-182.
Hu Ch M, Wang Y Zh, Ma J M. Elastic modulus research on initial setting of cement pastes [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science)*, 2012, 44(2): 177-182. (in Chinese)
- [37] 饶泉宇, 李 剑, 杨 静. 锚固注浆体性能试验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(3): 497-500, 530.
Rao X Y, Li J, Yang J. Experimental study on performance of cement-based grout for anchorage engineering [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2009, 28(3): 497-500, 530. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)