

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.03.018

均匀土中非完整桩瞬态纵向动力响应研究

姜 静¹, 刘东甲², 窦本洋¹, 俞 磊¹

(1.宣城职业技术学院电大工作处,安徽 宣城 242000;2.合肥工业大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:为研究桩土参数对非完整桩低应变时域速度曲线和速度振幅谱曲线的影响,根据桩土系统波动理论,建立了桩-土系统瞬态振动的计算模型;得到了基桩在纵向激振力作用下的瞬态动力响应,将计算结果与基桩低应变完整性检测实测数据进行对比分析,验证了该数值模拟的可靠性和可行性;研究了桩长、桩周土、桩底土等因素对时域速度曲线和速度振幅谱曲线的影响。结果表明:桩土参数对时域速度曲线和速度振幅谱曲线都有影响,桩侧土剪切波速增大,桩底反射越弱。

关键词:非完整桩;桩-土系统;低应变测试;时域速度曲线;速度振幅谱曲线

中图分类号:TU473.1+6 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2021)03-0088-04

Study on Transient Longitudinal Dynamic Response of Non-intact Pile in Homogeneous Soil

JIANG Jing¹, LIU Dongjia², DOU Benyang¹, YU Lei¹

(1. Working Office of Radio and Television School, Xuancheng Vocational and Technical College, Xuancheng, Anhui 242000, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: To study the effects of pile-soil parameters on time-domain velocity curve and velocity amplitude spectrum curve of non-intact piles, and based on the wave theory of pile-soil system, we develop a computation model for transient vibration of pile-soil system. The dynamic response of the pile-soil system under vertical impact force is achieved, and feasibility of the numerical simulation is verified by comparing calculation results with measured data. The effects of pile length, surrounding soil, pile subsoil on time-domain velocity and velocity amplitude spectrum curve are studied. The results show that the pile-soil parameters have effect on time-domain velocity and velocity amplitude spectrum curve. The larger the shear wave velocity of surrounding soil, the weaker the pile bottom reflection.

Keywords: non-intact pile; pile-soil system; low strain integrity testing; time-domain velocity curve; velocity amplitude spectrum curve

0 引言

低应变因操作简单、检测速度快等优点而广泛用于基桩完整性检测^[1-3]。低应变反射波法的依据为一维弹性杆纵波理论^[4-5]。雷林源等^[1]应用分离变量法得到了完整桩的瞬态桩顶振动速度。刘东甲^[3,6-7]应用差分法研究了各个参数对完整桩、非完整桩、指数型变截面桩的纵波的影响。Jiang 等^[8]应用交错网格有限差分法研究了各个参数对承台桩

系统的低应变测试曲线的影响,并分析得到了承台表面的最佳拾振位置。同时研究了双速度法对承台桩系统中基桩完整性的检测,结果显示双速度法可以较为准确地测定桩身波速、桩长及判断桩身缺陷的存在^[9]。然而,目前大部分对桩的研究都是对时域速度曲线的分析,而对频域方面的速度振幅谱曲线的分析较少。因此研究应用速度振幅谱曲线来判断桩身完整性是十分必要的,并用其来指导实测低应变曲线的分析具有十分重要的意义。

收稿日期:2021-05-13

基金项目:安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2020A1012);宣城职业技术学院科研振兴计划提升项目(ZXTS201806);安徽广播电视大学青年项目(QN201907);安徽省住房城乡建设科学技术计划资助项目(2018YF-010)。

作者简介:姜静(1989—),男,安徽宣城人,讲师,硕士,研究方向:桩基工程及地下建筑工程教学和科研。

1 桩土系统计算模型与定解问题及其差分形式

假设在低应变时,桩为等截面均质线弹性直杆;桩周土对桩的作用简化为一个与位移成正比的分布弹性力和一个与振动成正比分布的阻尼力^[3]。根据文献[3]和文献[6]得到桩身微段的运动方程为:

$$F + \frac{\partial F}{\partial x} dx - F - c \frac{\partial u}{\partial t} dx - k u dx = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: F 为桩身内力, $F = AE \frac{\partial u}{\partial x}$; x, t 为桩身质点位置和所处的时间; c, k 分别为单位深度桩周土的等效阻尼系数和等效刚度系数; u 为桩身质点纵向位移; ρ 为桩的密度; A 为桩横截面积; E 为桩的弹性模量。

将(1)式化简为(2)式的一维波动方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2\beta \frac{\partial u}{\partial t} + \omega^2 u = 0 \quad (2)$$

初始条件:

$$u|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0 \quad (3)$$

桩顶边界条件:

$$AE \frac{\partial u}{\partial x}|_{x=0} = -p(t) \quad (4)$$

桩底边界条件:

$$(AE \frac{\partial u}{\partial x} + c_b \frac{\partial u}{\partial t} + k_b u)|_{x=l} = 0 \quad (5)$$

式中: $\alpha = \sqrt{E/\rho}$; $\beta = \frac{c}{2A\rho}$; $\omega = \sqrt{\frac{k}{\rho A}}$; $P(t)$ 为激振力; α

为桩内纵波波速; c_b, k_b 分别为单位深度桩底土的等效阻尼系数和等效刚度系数。

采用的激振力表达式按文献[10]确定为:

$$p(t) = \begin{cases} \frac{I}{t_0} (1 - \cos \frac{2\pi t}{t_0}), & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: I, t_0 分别是激振力的冲量和作用时间。

对微分方程(2),用二阶对称差商近似其中的二阶导数,用中心差商近似其中的一阶导数,便得到其差分格式,具体的差分解法在文献[3]和文献[6]给出。

2 模拟结果验证

为了验证该数值模拟的可靠性和可行性,将计算结果与基桩低应变完整性检测实测数据进行对比分析。选择某大桥混凝土灌注桩的实测曲线进行对比,其中桩长为16 m,桩径为0.8 m,桩密度为2 400 kg/m³,杆波波速为3 533 m/s;土层分为4层,

并在8.5 m左右嵌岩。而桩底土较软。从图1中可以看出,拟合曲线和实测曲线具有较好的一致性。从而验证了该方法的可行性。

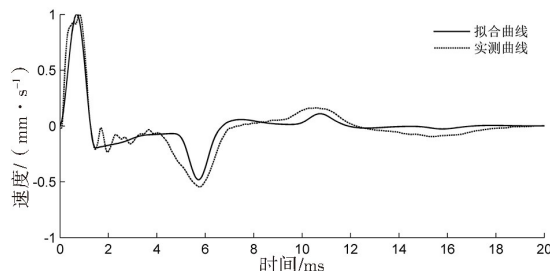


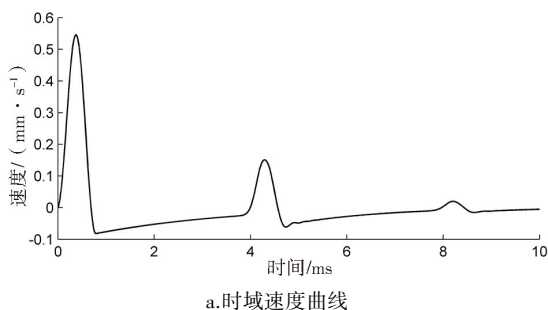
图1 实测曲线和模拟曲线的对比

3 曲线理论分析

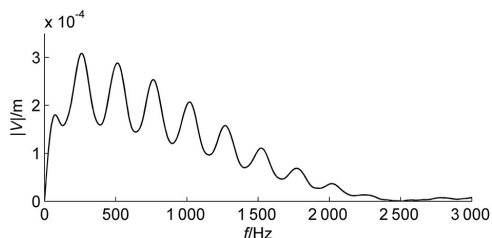
为了进行理论研究,本文建立桩土模型。其中,桩长为7 m,半径为0.4 m,密度为2 400 kg/m³;桩周土密度为1 900 kg/m³,纵波波速为3 533 m/s,剪切波速为200 m/s;桩底土密度为2 100 kg/m³,剪切波速为300 m/s,泊松比为0.35;激振力冲量为1 NS,激振力作用时间为0.8 ms。

3.1 完整桩

从图2的时域速度曲线可以很直观地观察到桩底反射和桩底二次反射,通过计算得到桩身波速为3 594 m/s,与预设波速几乎一致。从图2速度振幅谱曲线中看到,各阶频率的幅值依次递减,通过频差计算得到的桩身波速为3 524 m/s。可以看出,通过速度振幅谱曲线得到的波速更为准确。



a.时域速度曲线



b.速度振幅谱曲线

图2 完整桩的时域速度曲线和速度振幅谱曲线

3.2 缩径桩

桩顶3 m处设置深度为0.5 m的3种不同缩径,缩径处的半径分别为0.35,0.3,0.25 m。从图3a

可以看出,缩径程度越大,缩径处的反射波越明显,且桩底反射波越弱。由于缩径的存在,使得速度振幅谱曲线不再像图 2 中的那么规则,但是从图 3b 可以看出,图中 1,2,3 处的峰值是由于缩径的存在造成的,且缩径程度越大,速度振幅谱曲线中的 1,2,3 处的幅值也越大。通过图 3b 中 1,2,3 处的频差可以计算出桩的缩径位置为 3.19 m。

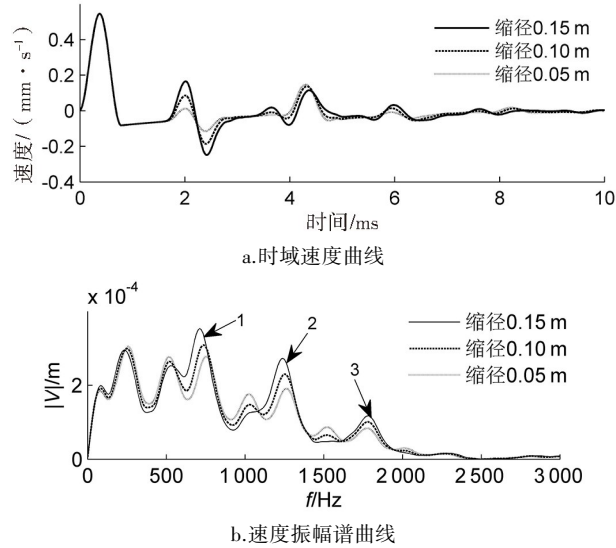


图 3 缩径桩的时域速度曲线和速度振幅谱曲线

3.3 扩径桩

在桩顶 3 m 处设置深度为 0.5 m 的 3 种不同扩径,扩径的半径分别为 0.45,0.5,0.55 m。从图 4a 可以看出,扩径程度越大,扩径处的反射波越明显,且桩底反射波几乎一致。由于扩径的存在,使得速度振幅谱曲线发生变化,但是从图 4b 可以看出,图中 1,2,3 处的峰值是由于扩径的存在造成的,且扩径程度越大,图 4b 中 1,2,3 处的幅值也越大。通过图 4b 中 1,2,3 处的频差可以计算出桩的扩径位置为 3.31 m。

3.4 断桩

在 3 m 处设置成断桩。从图 5a 可以看出,当桩发生断桩时,桩底反射提前,且桩底反射能量较完整桩大,这是因为波传输的距离较短,能量损失的较少。从图 5b 可以看出,断桩的峰值较大,这也验证了断桩桩底反射能量较大。而且,断桩的频差较大,这是因为桩底反射提前,纵波的一次完整传播时间较短,从而使得频差变大。通过速度振幅谱曲线(图 5b)的频差计算出断桩位置为 3.05 m。

4 影响因素分析

为了研究不同桩土参数对缺陷桩的影响,本文选取 3 m 处缩径 0.05 m 的模型进行分析研究。

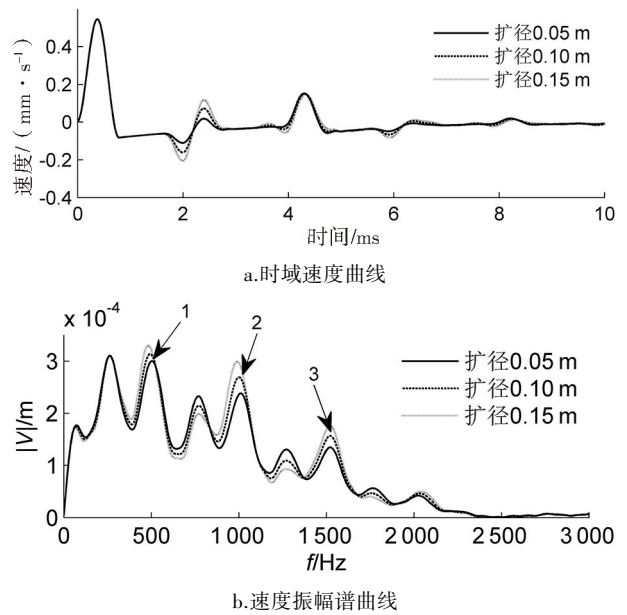


图 4 扩径桩的时域速度曲线和速度振幅谱曲线

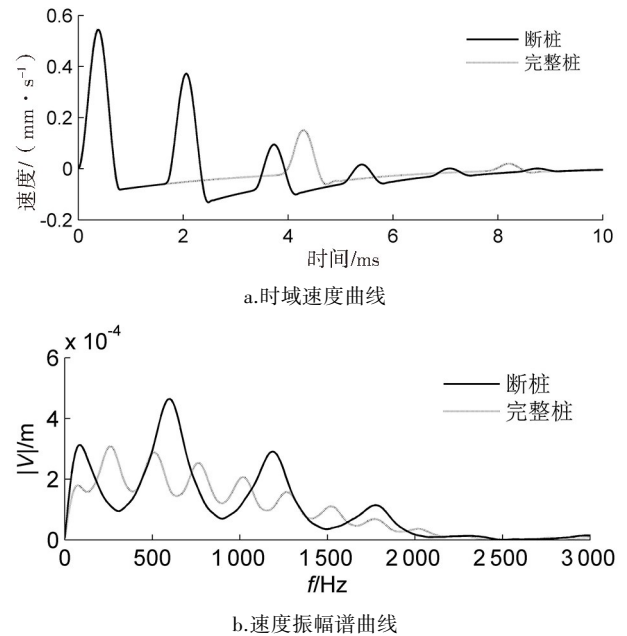


图 5 不同完整性桩的时域速度曲线和速度振幅谱曲线

4.1 桩长

图 6 是不同桩长 ($L=7,9,11$ m) 的时域速度曲线和速度振幅谱曲线,从图 6a 可以看出,桩长变长,桩底反射时间后移,且桩底反射能量降低,这是因为桩长变长,应力波传播的距离增加,从而造成时间后移及能量降低。从图 6b 可以看出,随着桩长增加,同阶共振峰幅值减小,且频差减小。

4.2 桩周土剪切波速

图 7 是不同桩周土剪切波速的时域速度曲线和速度振幅谱曲线。

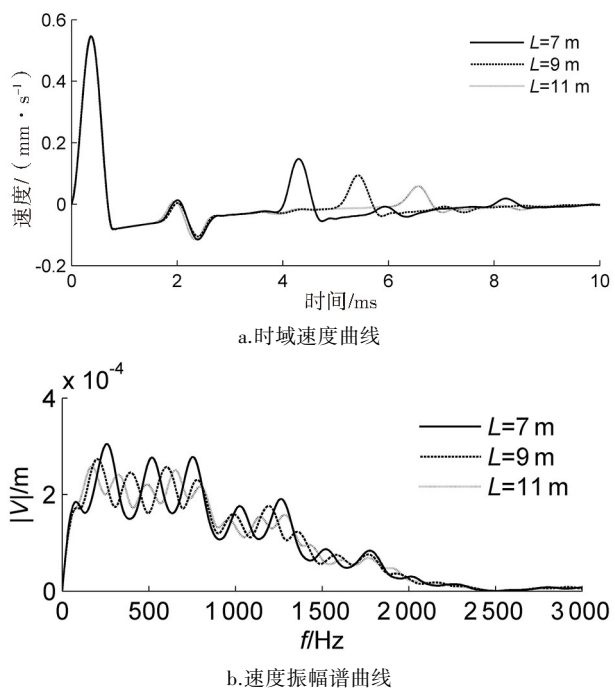


图6 不同桩长的时域速度曲线和速度振幅谱曲线

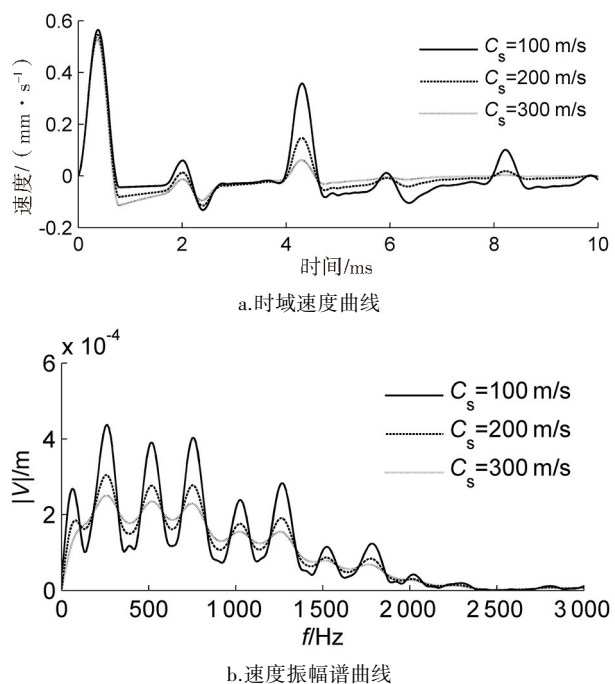


图7 不同桩周土剪切波速的时域速度曲线和速度振幅谱曲线

由7a可以看出,桩周土剪切波速增大,缺陷反射和桩底反射减弱,这主要是因为桩周土剪切波速增大,桩中的能量透射到土中的较多,从而使桩中的能量减少,速度振幅谱曲线也验证了该现象。从图7b可以看出,虽然桩周土剪切波速增大,但是各阶共振峰的位置并没有发生变化。

4.3 桩底土剪切波速

从图8a可以看出,桩底土剪切波速的增大只影响到桩底反射能量的强弱,并未影响到曲线的其他位置。从图8b同样可以看出,桩底土剪切波速的增大只影响了各阶共振峰的幅值,并未影响共振峰的位置。

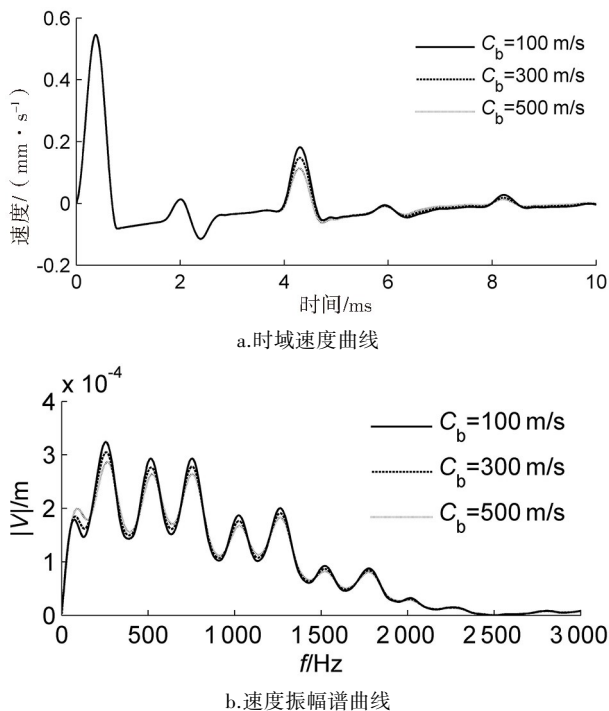


图8 不同桩底土剪切波速的时域速度曲线和速度振幅谱曲线

5 结论

1)对于不同完整性的桩基,通过速度振幅谱曲线都可以很好地判断桩身的缺陷位置,而且缺陷越大,速度振幅谱曲线表现出的越明显。

2)速度振幅谱曲线可以反映出不同桩周土对桩基信号的影响,桩周土剪切波速增大,桩底反射变弱,速度振幅谱曲线峰值减弱。

3)对于自由桩底,桩底土剪切波速增大,桩底反射变弱,速度振幅谱曲线峰值也同样减弱。

参考文献:

[1] 雷林源,杨长特.基桩瞬态动测响应的数学模型及基本特征[J].地球物理学报.1992,5(4):501-509.
 [2] 徐攸在,刘兴满.桩的动测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.

版), 2018, 33(1): 14-17.

- [9] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4003-4010.
- [10] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237.
- [11] 石立明. 邯郸黑龙港平原地下水水文地球化学特征及水质评价研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [12] 赵玉. 渭河干流浅层地下水与地表水中重金属 Cd 污染特征及风险评价[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 267-277.
- [13] 李文赞, 李叙勇, 王慧亮, 等. 濉阳河主要水环境污染物空间分布特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2814-2819.

(上接第 87 页)

4) 楼盖结构的长跨比 >1.5 时, 正交斜放空腹夹 大, 抗变形能力更强。
层板楼盖相较于正交正放空腹夹层板整体刚度更

参考文献:

- [1] 黄勇, 马克俭, 张华刚, 等. 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖体系的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 1997(6): 55-64.
- [2] 田子东, 孙铭辰, 申波, 等. 多层大跨度钢筋混凝土空腹夹层板楼盖施工方法[J]. 四川水泥, 2020(10): 160-161.
- [3] 刘盼盼, 申波, 马克俭, 等. 影响空腹夹层板起拱后内力的因素分析[J]. 混凝土, 2019(11): 154-158+162.
- [4] 刘盼盼, 王惠, 申波, 等. 起拱对钢筋混凝土空腹夹层板内力影响的参数化分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 964-976.
- [5] 徐增茂, 马克俭, 郑晋阳, 等. 大跨正交正放空腹夹层板楼盖刚度分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 911-919.
- [6] 马克俭, 张华刚, 郑涛. 新型建筑空间网格结构理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 才琪, 马克俭, 刘卓群. 多层大跨度蜂窝形钢空腹夹层板楼盖刚度分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 106-109+125.
- [8] DB22/48-2005 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构技术规程[S]. 贵阳: 贵州省建筑厅, 2005.

(上接第 91 页)

- [3] 刘东甲. 完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(5): 683-687.
- [4] MIDDENDORP P, REIDING F J. Determination of discontinuities in piles by TNO integrity testing and signal matching technique[C]//Proceeding of the Third International Conference on Application of Stress Wave Theory to Piles. Rotterdam: AA Balkema, 1988: 33-43.
- [5] 陈凡, 王仁军. 尺寸效应对基桩低应变完整性检测的影响[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 92-96.
- [6] 陈义全, 任志国, 刘东甲. 非完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版). 2004, 27(10): 1210-1214.
- [7] 刘东甲. 指数型变截面桩中的纵波[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1066-1071.
- [8] JIANG Jing, LIU Dongjia, LU Zhitang, et al. A study on low strain integrity testing of platform-pile system using staggered grid finite difference method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 67: 345-352.
- [9] 姜静, 姚志刚, 陈钦元, 等. 双速度法在承台桩系统中的完整性检测研究[J]. 安徽广播电视大学学报, 2017, 176(1): 124-128.
- [10] 刘东甲. 纵向振动桩侧壁切应力频域解及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 544-546.