

应力波在承台-桩系统中传播数值分析

Numerical analysis of wave propagation in platform-pile system

柴华友, 刘明贵, 白世伟, 李 祺
(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 通过应力波在承台-桩系统中传播有限元计算, 分析了承台-桩几何尺寸、承台-桩材料特性对应力波传播图案及能量的影响, 同时还讨论了激振频率、激振区域、接收点位置以及邻桩桩体反射波对测点信号影响。计算表明承台的几何尺寸对应力波在承台-桩传播影响很大。边界的反射波不再是单一的波, 而是很复杂的波列, 它不仅会影响承台表面测点的响应, 而且还会在承台-桩交界面形成新的入射、反射, 使得测点的桩身反射波形识别很困难。

关键词: 承台-桩; 承台边界; 球面波; 转换波; 波阻抗

中图分类号: TU 473.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2003)05-0624-05

作者简介: 柴华友(1965-), 男, 安徽六安人, 副研究员。主要从事波动理论、数值计算、岩土反分析等研究。

CHAI Huayou, LIU Minggui, BAI Shiwei, LI Qi

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Effects of the geometric sizes and the material properties of platform-pile system on the wave patterns and energy are analyzed through the finite element calculation of wave propagation in platform-pile system. Effects of the vibration frequencies, the loading area, the receiver locations and the neighboring piles on wave propagation are also discussed. The results show that the geometric sizes of platform have great influences on wave propagation. Because the different type of waves with different incident angles are reflected from the boundaries, the patterns of reflected waves are complex. The reflections from the boundaries not only influence the response of a platform surface, but also form a new incidence into and reflection from the boundary between a pile and a platform. It is very difficult to distinguish the waves reflected from the pile under the influences of boundary reflection.

Key words: platform-pile; platform boundary; spherical wave; conversion wave; impedance

0 前 言*

反射波法被广泛用于单桩完整性无损检测中, 在激振脉冲宽度 λ 与桩径之比及桩长径之比、振源及测点位置等满足一定条件下, 检测信号可近似用一维波动理论分析^[1~3]。在港口码头、民用建筑基础、深基坑支护中, 桩往往是用承台连接的, 承台的出现使基于反射波法的无损检测面临很多困难。首先, 承台四周边界不仅反射来自各个方向的 P 和 SV 波, 而且还反射表面波^[4~6], 由于承台横向尺寸一般远小于桩的长度, 周边的反射波列可能超前于桩身的反射波到达测点。表面波的能量较大, 反射的表面波对测点的有效信号干扰也是很大的, 从而影响对桩身反射波的识别。其次, 冲击引发的应力波在承台的传播起始阶段是球面波, 传播过程中能量不断衰减, 它在交界面处入射角不断改变, 其反射、透射图案很复杂。除了四周边界反射波, 影响表面测点还有直达体波(P 波, SV 波)、瑞利波、承台-桩交界面处反射波、桩体反射波。在有群桩的承台中球面波会通过承台向邻近桩入射, 当邻桩体波阻抗发生变化时, 应力波发生反射, 反射波影响测点信号。因此, 研究应力波在承台-桩系统中传播, 对提高检测信号解释精度有一定的帮助, 同时, 对探索新的

测试方法也有一定指导意义。应力波在承台-桩系统检测中应用可参见文献[7]。

1 应力波在承台中射线分析

在承台表面, 激振不仅产生球面 P 波还会产生球面 S 波, 球面波在交界面处每点入射角都是不同的, 它不仅反射(或透射)同类型球面波, 同时还反射(或透射)转换波, 因而研究球面波在交界面反射、透射是困难的。但球面波可通过维尔积分等方法分解成平面波^[4], 这样, 通过对斜入射的 P 波、SV 波在两介质交界面处的反射、透射波与入射波的关系, 可以定性描述应力波在承台传播, 对表面各点响应成分进行定性解释^[8,9]。

假设承台四周边界尺寸相对承台厚度足够大, 影响测点波有直达纵波、横波、沿承台表面传播的瑞利波, 以及承台底部反射的各类型体波。纵波 V_P 、横波 V_S 、瑞利波速 V_R 满足以下关系:

$$\begin{aligned} \frac{V_P}{V_S} &= \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \\ V_R &= \frac{0.87 + 1.12\nu}{1+\nu} \cdot V_S \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ν 为混凝土的泊松比, $\nu \approx 0.25$; $V_P = \sqrt{3}V_S$; $V_R = 0.919V_S$ 。

当测点与激振点较近时, 到达测点波顺序依次是直达纵波、横波、瑞利波以及底部的反射波。直达纵波、横波能量较小, 直达波以瑞利波为主。随着测点间距增加, 底部的反射波会与瑞利波叠加, 以至超前于瑞利波, 同时波在振源与测点之间也会有复杂反射, 不仅有多次反射的同类型波而且还有转换波, 如 PPPP、SSSS、PSPP、SPSP 等, 见图 1。随着记录时间增加, 这些反射波会相继影响测点, 四周边界反射波到来会与这些反射波共同影响测点响应。由于瞬态激振脉冲信号有一定持续时间, 不同类型反射波是相互叠加的, 试图从实测信号上识别各类型波是困难的。

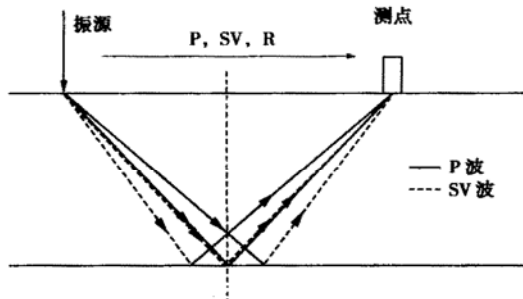


图 1 承台底面各类型波反射示意图

Fig. 1 Different type of waves reflected from the platform bottom

2 承台-桩应力波分析

应力波在承台-桩交界面反射、透射对承台-桩系统响应分析很重要, 在这里侧重于对应力波在传播过程中的能量变化及相位变化进行分析。

离振源一定距离的 P、SV 波阵面近似为球面波, 可以用球面波来进行分析。P、SV 球面波在交界面处不仅反射、透射同类型的球面波, 而且还产生转换波, 图 2 是球面 P 波反射、透射示意图, 球面 SV 波波动图案更复杂。桩可近似看作一维杆件, 在桩中传播的波以 P 波为主。作为近似, 分析球面波在交界面处反射波相位及能量与材料的关系时, 仅考虑球面 P 波, 也不考虑反射、透射的 SV 波。

若定义广义波阻抗 $Z_i = \frac{\rho_i V_{Pi}}{\cos \theta_{Pi}}$, 则反射、透射幅值满足^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{A_1}{A_0} &= \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1 - n}{1 + n} \\ \frac{A_2}{A_0} &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{2n}{1 + n} \\ n &= \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\rho_2 V_{P2}}{\rho_1 V_{P1}} \cdot \frac{\cos \theta_{P1}}{\cos \theta_{P2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

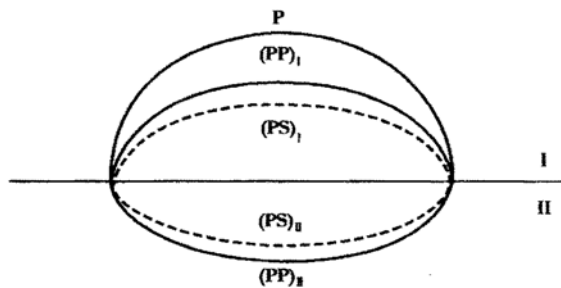


图 2 球面 P 波反射、透射示意图

Fig. 2 Reflection and transmission of spherical wave from and across the boundary

式中 A_0, A_1, A_2 分别为入射、反射和透射 P 波幅值; θ_{P1}, θ_{P2} 分别为入射角和透射角。对球面波来说, 由于 $\cos \theta_{Pi}$ 是变化的, 因而反射波、透射波位移幅值也是变化的。

由于测点离振源较近, 仅考虑角度很小的情形。从上式可以看出无论纵波速如何变化, 透射球面波总是与入射球面波相位相同。若不计 $\cos \theta_{Pi}$ 变化对 n 影响, 当 $\rho_2 V_{P2} < \rho_1 V_{P1}$, $n < 1$, 反射波与入射波同相; 当 $\rho_2 V_{P2} > \rho_1 V_{P1}$, $n > 1$, 则反射波与入射波反相。 $\rho_2 V_{P2}$ 与 $\rho_1 V_{P1}$ 差别越大, 则反射越强烈。

桩体的反射波、透射波、入射波质点速度近似用一维应力波理论来描述:

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_R &= \frac{1 - n}{1 + n} \dot{u}_I \\ \dot{u}_T &= \frac{2n}{1 + n} \dot{u}_I \\ n &= \frac{(\rho CA)_II}{(\rho CA)_I} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 ρCA 为波阻抗。

承台表面及桩侧在不同波速下响应如图 3 所示。承台厚 0.5 m, 四周采用无反射边界, 桩尺寸为 0.2 m $\times$ 0.2 m $\times$ 2.5 m。承台表面响应点在桩正上方, 桩侧响应点距交界面一个平台厚度。 $\nu_1 = \nu_2 = 0.25$, $\rho_1 = \rho_2 = 2500 \text{ kg/m}^3$ (下同)。

由图 3 可见, 波速的差异对表面测点波形影响不大, 这主要是因为: ①交界面的反射波在向上传播过程能量衰减; ②交界面处反射波相对面波影响较小, 但波速的差异对承台下桩的行波能量及其走时有影响。

由式(2)、(3)可知, 应力波在透射过程并不改变其质点速度方向。虽然承台表面测点首波质点速度变化受瑞利波影响较大, 但首波质点速度方向与下行体波质点速度方向相同。这样, 根据桩体反射波在表面测点质点速度相位变化就可判断桩体波阻抗变化情况。若反射波相位与首波相反, 桩体波阻抗增大, 反之, 则桩体波阻抗减小。

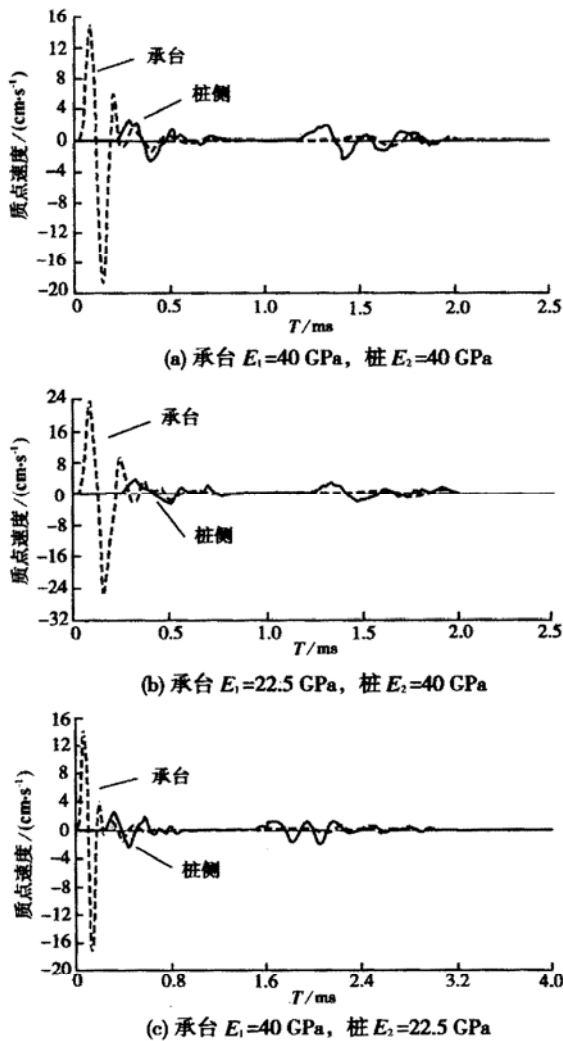


图3 纵波速对测点响应的影响

Fig. 3 Influence of the dilatational wave velocities on the responses

3 有限元计算参数

用显示有限元 ANSYS/LS-DYNA 软件计算承台-桩系统在瞬态荷载作用下的响应,单元为 8 节点六面体,LS-DYNA 分析时间步长是自动设定的。脉冲力采用时间宽度 T 半正弦波。本算例中, $T = 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ s, 半正弦波的频谱为

$$|F(f)| = \frac{2AT}{\pi} \left| \frac{\cos \pi f T}{1 - 4f^2 T^2} \right|, \quad (4)$$

频谱主要能量集中在 $[0, 1/T]$ 。

网格尺寸对波在承台上、下表面反射计算很重要,网格最大尺寸应小于 $0.2 V_{\min}/f_{\max}^{[12]}$ 。最大频率采用 $1/T$ 或用应力波在承台上、下表面最大反射频率 $V_p/(2H)$, H 为承台厚度。P 波在承台上、下表面反射及传播是本研究所关心的,可取 $V_{\min}$ 为 $V_p, f_{\max} = V_p/(2H)$, 可得最大尺寸应小于 $0.4H$ 。本算例中,视承台厚度、脉冲宽度及计算模型尺寸,厚度方向约有 10 个单元。

模型阻尼有 Rayleigh 阻尼及与材料有关的阻尼^[13],这些阻尼值需通过实验确定。在考虑阻尼计算时, Rayleigh 阻尼中 beta 阻尼取 0.02 左右,材料有关的阻尼取 10^{-5} 。

为了便于分析波动的影响因素,承台四周边界有时取无反射边界,以消除边界反射波的干扰。

4 波动图案影响因素

在承台-桩系统中,承台几何尺寸、桩几何尺寸、邻桩都会影响应力波传播,此外,测点的响应还与激振频率、激振面积及测点位置有关。探讨这些影响因素可以分析反射波法检测承台下桩完整性可行性以及达到最佳检测效果的激振方式、布点。虽然实际的承台-桩系统可能是很复杂的,除了承台下有群桩外,还有承台-土、桩-土、桩-土-桩作用,各边界距试桩轴线距离也不同,但以下的分析不失一般性。

4.1 承台边界的影响

不仅 P-SV 波在边界从振源反射,而且 Rayleigh 波也会在边界反射,这些类型波会相继到达边界,反射波相互叠加,后续反射波特征是很难识别的。它们不仅影响承台表面测点,同时也会影响桩体的应力波,应力波会不断从承台-桩交界面向桩体透射。由于桩体透射波不是单一脉冲,是一波列,其反射波也是一波列,即使从桩侧测点识别桩底反射波也很困难,见图 4(a)。

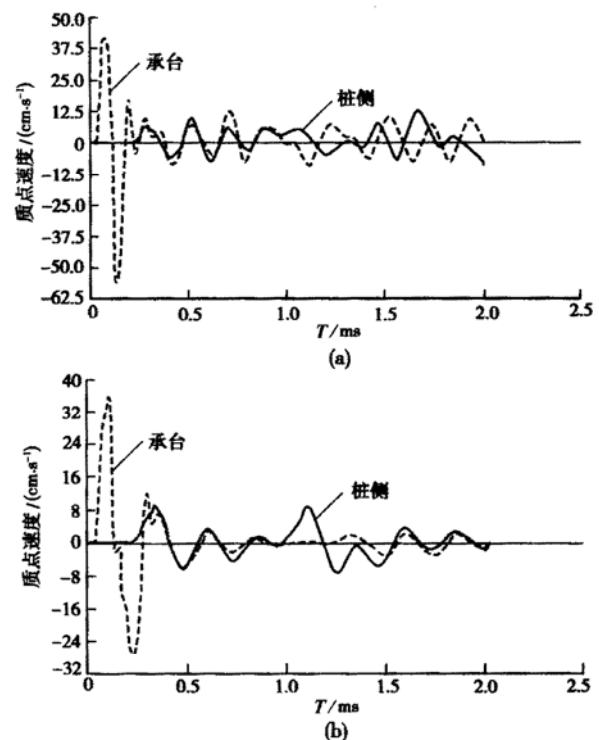


图4 边界反射波对测点响应影响

Fig. 4 Influence of reflections from the platform boundaries on the responses

图4(a)的模型尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (承台) + $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 2\text{ m}$ (桩), $E_1 = 40\text{ GPa}$, $E_2 = 40\text{ GPa}$ 。

从能量角度上分析,承台长、宽尺寸越大,反射波走时越长,边界反射波能量越小,它对表面测点波动及桩体的行波影响就越小。当承台边界足够大时,其反射波影响在桩体反射波影响之后,它对检测分析最为有利,在作有限元计算时,可作无反射边界来处理,见图4(b)。

在材料阻尼的作用下,应力波在传播过程能量不断衰减,虽然阻尼会影响承台应力波向桩体传播的能量,由于边界反射波的走距相对厚度较大,阻尼对边界反射波的影响更为明显。

4.2 承台厚度

由文献[4, 10]可知球面波阵面振幅按球面半径 r^{-1} 衰减,因此,承台厚度减小,有利于提高下行波和上行波的能量,图5是模型尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ (承台) + $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 2\text{ m}$ (桩), $E_1 = E_2 = 40\text{ GPa}$,承台表面及桩侧轴向质点速度时程曲线。通过图5与图4(a)信号比较可以看出,厚度减小,承台下桩底反射能量显著提高。而对有一定的边界承台来说,厚度减小,边界反射面积也会相应减小。在相同波强度情况下,边界反射波对测点竖向响应影响会减弱。

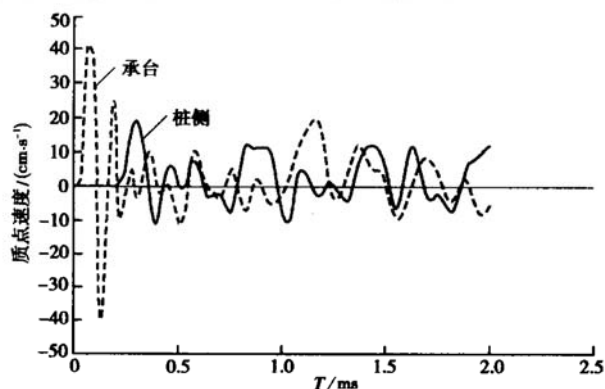


图5 承台厚度对波传播的影响

Fig. 5 Influence of thickness of platform on wave propagation

4.3 桩截面尺寸的影响

波阵面的能量与波强及通过的面积有关,桩截面尺寸的增大,会增加透射的能量,但波阵面的波强度并没有大的变化,因此,桩的截面尺寸的变化,对桩体反射波强度影响不大。但对有限边界,由于透射波的能量增加,周边界反射波就会减弱,这样,桩截面尺寸的相对增加会降低边界反射波的干扰,桩截面相对承台表面越大,边界反射波的干扰相对越小。图6计算模型尺寸: $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (承台) + $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 2\text{ m}$ (桩),与图4(a)比较,承台表面测点桩底反射波能量略有增加。

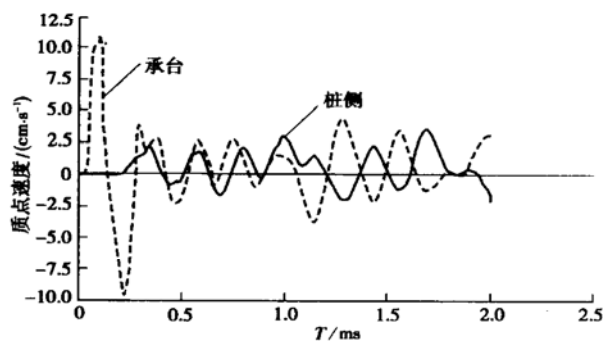


图6 桩截面尺寸变化对应力波传播的影响

Fig. 6 Influence of cross section of pile on wave propagation

4.4 邻桩的影响

在桩上方承台锤击产生的应力波会向该桩相邻桩透射,当邻桩桩体有波阻抗变化时,波会发生反射,反射波经交界面向承台传播,影响测点处响应。为了考察邻桩反射的影响,取一根桩尺寸为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 3\text{ m}$,另一根为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 1\text{ m}$,两桩中心距为 0.3 m ,承台厚为 0.2 m ,承台取无反射边界,弹模均为 40 GPa ,计算模型见图7,计算结果见图8。邻桩的桩底反射能量受承台厚、激振频率等因素影响。



图7 桩-承台-桩有限元模型

Fig. 7 Finite element mesh of pile-platform-pile model

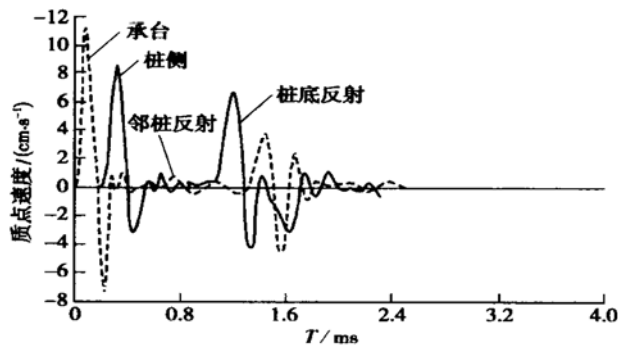


图8 邻桩反射波对测点响应的影响

Fig. 8 Influence of a neighboring pile on the responses

4.5 激振频率 激振面 测点位置

由于波在交界面处多次反射、透射,无论是反射波还是透射波都不是单纯脉冲,而是波列。激振频率降低可使这些波列相互叠加形成能量较强的单一透射

波,有效地提高桩底反射波的能量。图 9 与图 5 模型尺寸及参数相同,仅将脉冲宽度增加一倍,得到的波形比较。

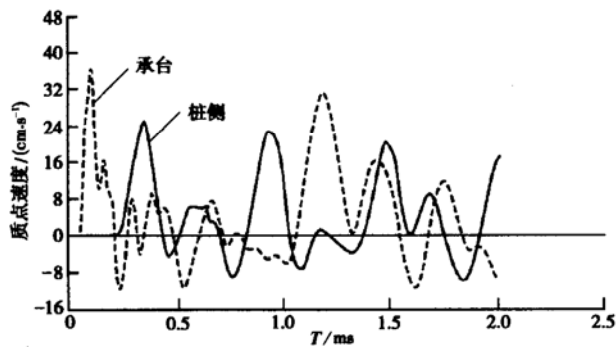


图 9 激振频率的影响

Fig. 9 Influence of the vibration frequencies on signal patterns

增加激振面积,可以提高向上传播的能量,桩底的反射波会增强。但激振面积增加也会相应提高表面直达波、瑞利波的能量,对有限边界来说还会增加边界反射波对测试信号的干扰,因此,加大激振面并不能有效地提高桩底反射波相对于干扰波能量。

在振源与测点之间,不仅有沿表面传播的直达体波、瑞利波,而且还有经承台底层传播的反射波。当表面测点位置偏离桩截面上方,这样测点接收的信号除了有来自承台-桩交界面的反射信号,还有来自承台底面的反射信号。当测点与振源有一定的距离时,斜入射角增大,不仅会反射同类型波,而且还有转换波。这样,测点信号成分复杂,增加了测试信号分析、判断难度。

5 结 论

(1) 应力波在承台-桩系统中传播是很复杂的,影响波动图案的因素很多,几何尺寸、材料特性、激源都会影响波动图案。由于波不再是一维波,测点位置的变化得到的波动图案也会不同。

(2) 用反射波法检测承台下桩完整性成功与否取决于周边边界反射波的影响程度。当承台边界反射波在桩体反射波之前到达时,它会严重干扰表面测点信号并向桩体透射波,即使用承台、桩侧两点测试也无法分离出有效的桩体反射波信号。

(3) 当边界远离测点,边界反射波影响在桩体反射波之后,这时可尝试用反射波法来检测桩体波阻抗变化,并通过改变激振频率来提高信噪比。

(4) 当承台下有多个桩时,邻桩桩体反射波对测试信号的影响不可忽略。承台混凝土材料粘性增大虽然不利于能量向桩体传播,但有利于降低边界反射波干扰。值得庆幸的是在护坡桩测试中,由于承台长度较大,且承台下层有土层,因此边界反射波的影响大为减小,为反射波测试提供了条件。

参考文献:

- [1] 柴华友. 桩土相互作用对基桩定量分析的影响[J]. 岩土力学, 1996, 17(4): 41-47.
- [2] Chai Huayou. Studies on interaction between pile toe and soil under dynamic loading[A]. Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics[C]. Rotterdam: A A Balkema, 1997.
- [3] 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.
- [4] 冯德益. 地震波理论与应用[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [5] 小理查特 F E, 伍兹 R D, 小霍尔 J R. 土与基础的振动[M]. 徐攸在译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1976.
- [6] 柴华友, 汪江波, 周一勤, 等. 瞬态瑞利波分析方法及其在工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 119-125.
- [7] 柴华友, 刘明贵, 李祺, 陈星烨. 应力波在承台-桩系统中传播的实验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 459-464.
- [8] Graff K F. Wave Motion in Elastic Solids[M]. Ohio: Ohio State University Press, 1975.
- [9] 徐仲达. 地震波理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [10] 何樵登. 地震勘探原理和方法[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [11] 阿肯巴赫. 弹性固体中波的传播[M]. 徐植信, 洪锦如译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [12] Zerwer A, Cascante G, Hutchinson J. Parameter estimation in finite element simulations of Rayleigh waves[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 28(3): 250-261.
- [13] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical Manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corp, 1998.