

doi: 10.11720/wtyht.2021.0020

肖妍姗,周正华,苏杰,等.地表水平正反敲击激振下孔法剪切波速测试理论依据讨论[J].物探与化探,2021,45(5):1288-1294. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0020>

Xiao Y S, Zhou Z H, Su J, et al. Discussion about the theoretical basis of the down-hole method for shear wave velocity test under surface forward and reverse horizontal hammer strikes[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1288-1294. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0020>

地表水平正反敲击激振下孔法剪切波速 测试理论依据讨论

肖妍姗¹, 周正华¹, 苏杰¹, 魏鑫²

(1. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 黑龙江中医药大学附属第一医院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 地表水平正反敲击激振下孔法常用于现场剪切波速测试。本文基于动力有限元方法建立了地表水平正反敲击激振下孔法剪切波速测试三维分析模型, 采用时域集中质量动力有限元显式逐步积分方法求解了地表水平敲击下线弹性半空间波动响应, 分析了不同深度点波形特征及地表水平正反敲击激振下孔法剪切波(S波)波速测试理论依据的合理性。结果表明: 地表水平正反敲击下孔法 S 波波速测试的理论依据, 即地表水平正反敲击下压缩波(P波)初动不反向而 S 波初动反向的理论依据不成立。此外, 依据地表水平正反激振下线弹性半空间波动解析解, 进一步佐证数值模拟结果的可靠性。

关键词: 下孔法; 数值模拟; 解析解; S 波; P 波

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)05-1288-07

0 引言

土体 S 波波速是一重要的土体动力特征参数, 包括场地动剪切模量的确定、场地地震反应分析、场地类型判别、地震液化场地液化势确定等均需要土体 S 波波速这一参数^[1-7]。目前工程中土体 S 波波速多通过现场 S 波波速测试获得, 如单孔法、跨孔法等钻孔侵入法^[4, 8-9]及面波法(SASW、MASW)等非侵入法^[5, 9-10]。通常利用钻孔测试的侵入法被认为可获取较好的测试结果, 因其不需如面波法进行反演计算, 而是基于观测点与源或观测点间 S 波传播时间来直接计算 S 波波速, S 波测试深度较深。而在钻孔侵入法中, 地表水平正反敲击激振下孔法由于其特有的优点而被工程测试广泛应用。与钻孔跨孔法相比, 地表水平正反敲击激振下孔法钻孔数量较少, 并能与工程场地勘察钻孔共用, 更为经济, 且现

场测试操作简易等。

在地表水平激振作用下, 弹性波在土体中传播并被置于孔内检波器检测到, 从而获得不同方向上的位移或速度波形, 检波器在孔内由下而上或由上而下按一定的间距移动, 在每个点均进行多次激振波形记录, 并获得一次有效的高质量波形记录, 继而形成土体按深度分布的波形图。通过对获得的波形进行震相识别并分析, 以获取波在土体中的传播时间, 因此如何准确地判断 S 波初动并确定出剪切波的传播时间至为重要。由于现场测试不可避免地存在噪声干扰, 从单一波形中直接分辨出 S 波的准确到时较为困难, 工程上常应用的水平正反敲击下的反相判别方法来确定每个深度波形中 S 波的初动, 并据此确定 S 波到时, 由此计算出 S 波在不同深度的旅时, 进而计算得到一定土体区间内 S 波波速^[11]。这一方法的理论依据认为, 在水平正反敲击下钻孔内位移型或速度型检波器可接收到一组三分

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-07-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(U1839202、U2039208); 国家重点研发计划项目(2017YFC1500400)

第一作者: 肖妍姗(1995-), 女, 硕士研究生, 研究领域为岩土地震工程。Email: 954231383@qq.com

通讯作者: 周正华(1962-), 男, 江苏扬州人, 研究员, 博士生导师, 研究领域为防灾减灾与防护工程。Email: bjsmoc@163.com

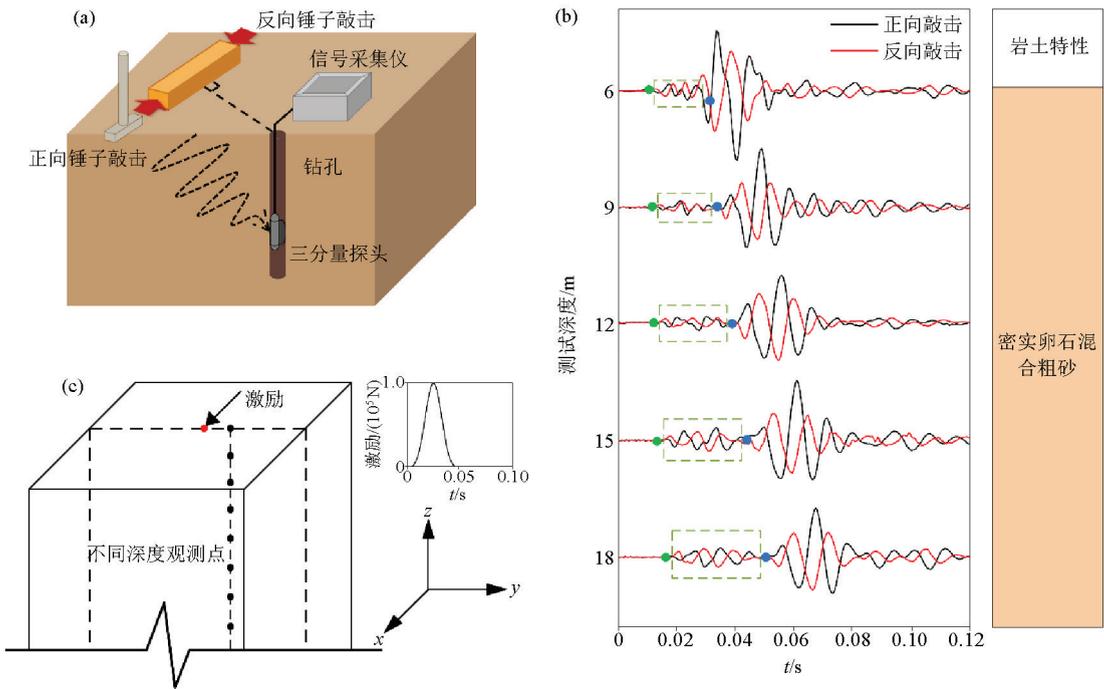
量(两水平分量、一垂直分量)P 波不反相而 S 波反相的波形,从而据此识别出 S 波初动^[11]。然而实际测试中,时有发现水平正反敲击下 P 波和 S 波均反相的现象,与反相法依据相矛盾。究其原因,一方面可能是由于环境噪声干扰导致了同一深度的两组波形的相位差不足以产生明显的反相点,或者波形中剪切波的信号不强导致初动点判断不准确^[12-13],另一方面则可能是在一些波形清晰的信号中,在剪切波到达前出现振幅较小的连续反相波形^[9,14],从而对剪切波反相点初动判断产生误导。这些因素均有可能造成计算得到的 S 波波速与实际 S 波波速间存在较大偏差。对于环境噪声干扰,实际测试中可通过增强信噪比、选取干扰较小的时段或测试场点等方法来消除;而对于 S 波到达前的反相波形,由于其振动振幅小而往往被忽略,并未对其波动性质深入探究。因此,进一步深入了解和认知地表水平正反敲击激振下孔法 S 波波速测试中获取的信号波形特征,判断下孔法 S 波波速测试的理论依据成立与否,其研究具有重要的实际应用价值。

本文基于动力有限元方法建立了地表水平正反敲击激振下孔法剪切波速测试三维分析模型,采用

时域集中质量动力有限元显式逐步积分方法求解了水平地表敲击下线弹性半空间波动响应,分析了各深度波形特征及下孔法 S 波波速测试理论依据的合理性。同时,依据地表水平正反激振下线弹性半空间波动解析解,进一步佐证数值模拟结果的可靠性。

1 地表水平正反敲击下孔法 S 波波速测试理论依据质疑

地表水平正反敲击下孔法 S 波波速测试中,一般将内置三分量检波器的单个探头置于钻孔内,S 波波速测试时,水平敲击置于地表上压重物的枕木两端产生剪切能量,经由反复敲击并通过由下而上或由上而下移动的检波器(图 1a)即可采集记录到一组土层波形剖面(图 1b)。为得到土层 S 波波速,地表水平正反敲击下孔法波速测试常依据水平向反相信号进行剪切波初动确定,继而确定 S 波旅行时并计算 S 波波速。其方法理论依据为水平正反向激振下,P 波信号不反向而 S 波信号反相,从而认为记录信号波形中第一次信号出现反向的时刻即为 S 波初动时刻(反相法)^[11]。



a—地表水平敲击下孔法波速测试示意;b—北京某场地正反向地表水平敲击下孔法 S 波波速测试获得的记录波形;c—地表水平激振下孔法 S 波波速测试三维分析模型
a—schematic of downhole seismic method with surface plank source;b—signal traces recorded at different testing depth by downhole seismic method at a site in Beijing;c—3D numerical analysis model of downhole seismic method

图 1 地表水平正反敲击下孔法 S 波波速测试

Fig. 1 Surface level positive and negative percussion hole method S-wave velocity test

然而,在实际工程应用中,水平地表正反敲击波速测试下孔法,存在一些让人无法理解的现象,且极易引起 S 波初动的误判。如图 1b 是在北京密云区某工程场地进行下孔法波速测试时所测得的不同深度点的信号波形,并应用反相法对测试弹性波波进行 S 波初动判断。若将初始出现反相的位置作为 S 波初动,则图 1b 中绿色反相点可能被确定为 S 波初动点,若依据 S 波幅值大, P 波幅值小的特点,则可能将蓝色点确定为 S 波初动点。依据蓝色点确定初动时间计算得到的波速值约为 489.1 m/s,比依据绿色点确定初动时间得到的波速值更接近卵石层的 S 波波速。本次现场波速测试若以蓝色点确定 S 波初动,则可以得到一个较接近预测范围的波速值,由此可知,绿色点至蓝色点之间反相波形实际应为 P 波信号,显然表现的 P 波反相特征与地表水平正反敲击下孔法波速测试理论判据相佐。若是如此,则水平正反敲击下的 P 波极性不变而 S 波极性相反的反向法依据不成立? 为了深入研究地表水平正反敲击下孔法 S 波波速测试理论依据是否成立,在不考虑环境干扰及复杂土层分布条件下,通过应用动力有限元分析方法模拟了地表水平敲击下孔法 S 波波速测试,以探讨下孔法 S 波波速测试中信号波形特征和反向法理论依据是否成立,并辅以地表水平正反激振下线弹性半空间波动解析解佐证数值模拟结果的可靠性。

2 地表水平正反敲击下孔法 S 波波速测试有限元数值模拟

为了模拟地表施加水平正反荷载下土体钻孔内各测点波形,本节将基于动力有限元方法,针对地表

水平敲击下孔法 S 波波速测试建立三维数值模型。首先,引入人工边界从均匀、各向同性线弹性半无限空间中截出一长方体计算区域,其大小为长 16 m、宽 16 m、高 25 m,计算区域上边界为自由表面,底边界与侧边界均设置为人工边界。由 Campanella R G 等^[15]及 Ishihara K^[16]的理论可知,地表水平敲击下孔法 S 波波速测试中土体的应变水平处于小应变范围,因此计算区域中土体考虑为线弹性介质,其力学参数列于表 1 中。在模型水平自由表面中心处作用一水平向(沿 X 向)时间为 0.05s 的单位脉冲荷载,其截止频率约 80Hz,如图 2 所示,其中 x 与 y 向为水平向,z 向为垂直向。计算区域采用三维八节点六面实体有限单元进行离散,其单元尺寸为 0.2m,是依据动力有限元计算精度要求确定的。对于计算区域内节点激振位移响应采用时域集中质量动力有限元显式逐步积分方法求解,并依据显式动力有限元时域分析稳定性要求,确定时间步长为 0.000 2s。在计算区域底和侧人工边界上应用二阶多次透射公式(multi-transmitting formula, MTF)^[17-20]模拟弹性半空间的辐射阻尼效应,以确保计算区域的散射波场从计算区透过人工边界而不发生反射。

在数值模拟分析中,通过改变加力方向来模拟波速现场测试中的正反向敲击,图 3 给出了数值模拟获得的叠加正反向激振下不同深度测点 x 方向的位移响应波形。图 3a~3c 显示了不同深度测点波形中反向加载与正向加载得到的波形相位完全相反,此时若采用地表水平正反敲击激振下孔法 S 波

表 1 模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the model

$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	弹性模量 E/Pa	泊松比 μ	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
200	663.3	2.204×10^8	0.45	1900

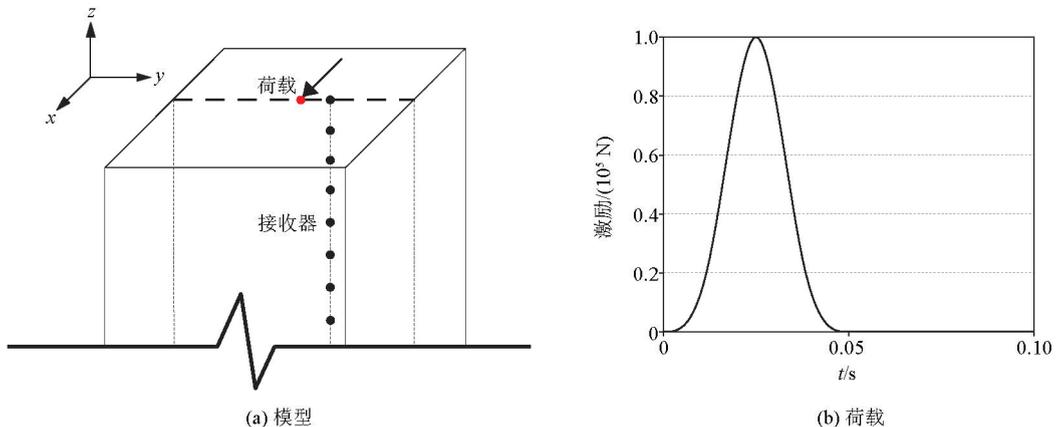


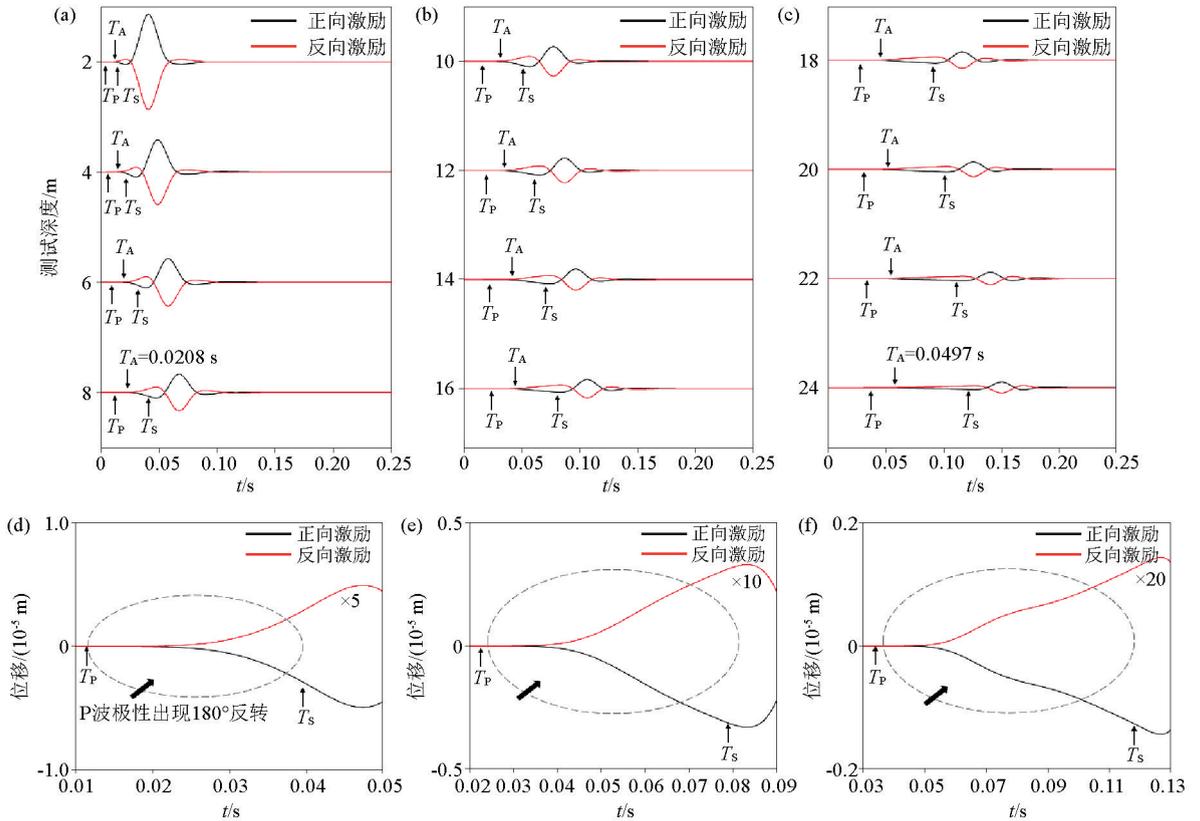
图 2 地表水平激振下孔法 S 波波速测试三维分析模型 (a) 及荷载 (b)

Fig. 2 3D analysis model (a) and load (b) of S-wave velocity test by hole method under surface horizontal excitation

波速测试的反向法依据,初始反相点应为图 3 中的 T_A 点,则该点后面的部分应为 S 波,但经分析实际波的性质并非如此。

由理论分析可知,在固体介质中集中力源激振所产生的波并非“纯粹”的 S 波,而是 P 波和 S 波耦合的效果^[21-22],从而导致激振位移响应波形中没有一个纯粹的 S 波初动点。那么,前面确定的 T_A 是否是 S 波初动点,可依据数值模拟中模型土体介质的 S 波波速值来判断。根据“时间=距离/波速”在各个深度的波形中用 T_P 和 T_S 标记相应深度处 P 波和

S 波的初动时间,由此可以发现:表现初始反相的时刻 T_A 并非 T_S 时刻,也不是 T_P 时刻。针对 3 个深度处(8 m、16 m、24 m)激振位移响应波形前部进行放大(如图 3d~3f),并可看到 T_P 至 T_S 间反向点时刻发生变化,并逐渐趋于 T_P 点,显然因放大而变动部分的激振位移响应波动并非是 S 波,而为 P 波;此外,随显示不同幅值比例变化 T_A 位置也发生变化,且逐渐趋近于 T_P 。另一个值得注意的是,无论波形是否放大,反向加载所得到的激振位移响应波形中的 P 波部分亦同样反相。



a、b、c—部分深度的测点时程曲线;d、e、f—8 m、16 m、24 m 测点放大波形示意

a、b、c—the original signal traces at different selected depth;d、e、f—amplified waveform of partially signals at observation points with depth of 8 m, 16 m, 24 m

图 3 水平正反向激振下不同深度测点 x 向记录波形

Fig. 3 Signal traces at different depth observation points in x -direction under the horizontal forward and backward excitation

综上所述,地表水平正反施加荷载所获得的平行敲击方向的位移响应波动中,无论 P 波还是 S 波均具有震相反向这一特征,由此可知地表水平正反敲击下孔法 S 波波速测试判据值得商榷。但由图 3 也可看出,在已知水平正反向敲击激振的 P 波反相的前提下,对于实际现场测试也很难准确判断 T_S 点,这主要因为:

1) 从图 3a 中可以看出,浅地表测点信号前部中 P 波与 S 波耦合在一起,难以识别出 S 波初动,即使放大波形(图 3d)亦无法识别,且易将 P 波部分误识

别为 S 波部分,从而造成确定的 T_A 点而非 T_S 点。

2) 随着深度增加,由于 P 波波速大于 S 波波速的原因两者逐渐分离开(如图 3d、e、f),但仍无法识别出 S 波初动,这是因为尽管 P 波随测点深度增加有较大衰减,但此时 P 波仍有一定幅值并叠加到 S 波上,此时通过波形放大只能识别出 S 波初动的大概位置,且 T_S 位置在不同条件下变化很大。

图 3a~3c 所显示的波形中,由于幅值小,未明显显示出反向的 P 波部分,这一特征有可能在实际测试中被认为不存在反相特征,这可能是导致现场

S波波速测试中认知错误的原因之一。本文数值模拟结果已证明,地表水平正反敲击激振所产生的位移响应波形未能显现 P 波不反向而 S 波反向的特性。但在地表水平正反敲击下孔法现场 S 波波速测试中,却能观察到 P 波不反向而 S 波反向的这一特征,这可能是由于实际测试中的工作状态及背景振动干扰引起的,而本文分析未考虑这些因素的影响,将另文讨论地表水平正反敲击下孔法剪切波速测试在什么条件下才显现出 P 波不反向而 S 波反向的这一特征。

$$\begin{cases} u = 0 & \tau < 1/\sqrt{3} \\ u = \frac{F}{4\pi\mu Z} \frac{\tau(\tau^2 - 1/3)(\tau^2 + 2/3)^{1/2}}{(2\tau^2 + 1/3)^2 - 4\tau(\tau^2 - 1/3)(\tau^2 + 2/3)^{1/2}}, & 1/\sqrt{3} < \tau < 1 \\ u = \frac{F}{4\pi\mu Z} \left\{ (\tau^2 + 1) - \frac{2\tau(\tau^2 - 1/3)(\tau^2 + 2/3)^{1/2}}{(2\tau^2 + 1/3)^2 - 4\tau(\tau^2 - 1/3)(\tau^2 + 2/3)^{1/2}} + \frac{2\tau^2(\tau^2 - 1)[2\tau(\tau^2 - 2/3)^{1/2} - (2\tau^2 - 1)]}{(2\tau^2 - 1)^2 - 4\tau(\tau^2 - 1)(\tau^2 - 2/3)^{1/2}} \right\}, & 1 < \tau \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\tau = \frac{v_s t}{Z}$$

且 F 为 Heaviside 单位阶跃函数, Z 为计算点与荷载作用点间垂直距离, μ 为剪切模量, v_s 为 S 波波速。

为确定式 (1) 的数值解, 本文引入了一近似 Heaviside 单位阶跃函数, 如式 (2) 所示:

$$F(\bar{t}) = \begin{cases} 16\bar{t}^3 & 0 \leq \bar{t} < 0.25 \\ 1 - 48\bar{t}(\bar{t} - 0.5)^2 & 0.25 \leq \bar{t} < 0.5 \\ 1 & \bar{t} \geq 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

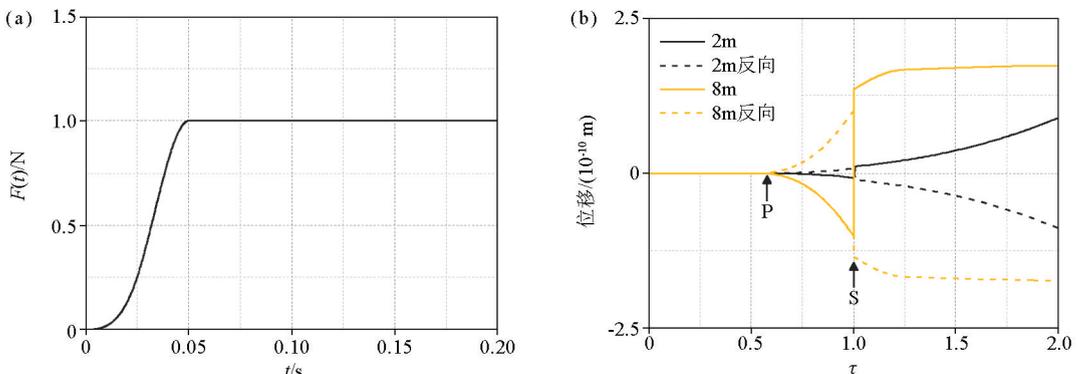
其中, \bar{t} 为无量纲时间。 $\bar{t} = 0.5t/t_0$, t 为时间, t_0 为近似 Heaviside 单位阶跃函数上升段时间。当 $t_0 =$

3 自由表面水平力作用下均匀线弹性半空间波动解析解佐证

Chao C C 等^[23] 基于理论分析获得了均匀各向同性线弹性半空间在自由表面切向荷载作用下的切向(平行作用力方向)和垂向位移的精确解。进一步利用 Laplace 变换和 Hankel 变换, 基于半逆方法求解得到了沿作用力加载点垂直向下各点的位移响应, 当泊松比为 0.25 时, 切向位移响应可以表示为:

0.05 s, 近似 Heaviside 单位阶跃函数如图 4a 所示, 不难证明式 (2) 中 $F(\bar{t})$ 连续可微, 且其一阶导数在 $\bar{t} \geq 0$ 区域内连续。

假设在剪切模量 $\mu = 68 \text{ MPa}$ 、S 波波速 $v_s = 200 \text{ m/s}$ 的均匀各向同性线弹性半空间自由表面作用一正反向切向近似 Heaviside 单位阶跃集中力(图 4a), 则可通过式 (2) 求解得到半空间内沿作用力加载点垂直向下各点的切向位移响应。图 4b 给出了作用力加载点垂直向下距离 2 m 和 8 m 点的切向位移(平行作用力方向)。由于横坐标采用的是无量纲时间, 结合给定的泊松比, 横坐标 0.577 时意味着 P 波到达时刻, 而横坐标 1.0 时对应的是 S 波到达时刻。从图 4b 能明显观察到正反向加载下 P 波极



a—近似 Heaviside 单位阶跃函数;b—正、反向加载下半空间内沿荷载作用点垂直向下 2 m 和 8 m 点的位移反应, 泊松比为 0.25

a—approximate Heaviside unit function;b—displacements at depth of 2 m and 8 m in an elastic half-space directly below surface tangential point source with the poisson's ratio of 0.25

图 4 近似 Heaviside 单位阶跃函数沿作用力加载点垂直向下各点位移

Fig. 4 Displacements of directly below surface tangential point source with approximate Heaviside unit function

性与 S 波极性均反向,后者与荷载的极性保持相同。而在正、反向激振下,P 波和 S 波均表现出极性反转的特性,这一特性与数值模拟所获得的特征一致,这进一步说明地表水平正反敲击下孔法 S 波波速测试的反相法依据不成立。

4 结论及讨论

为了探究地表正反向水平敲击下孔法剪切波速测试反向法依据的可靠性,本文基于 MTF 的三维动力时域显式有限元方法数值模拟了均匀弹性半空间自由表面正反向水平敲击下孔法剪切波速测试,继而分析了地表正反向水平敲击下弹性半空间位移响应信号波形特征,结果表明:通常所认为的地表正反向水平敲击下孔法剪切波速测试反向法依据不成立,即:在正反向水平荷载作用下,平行加载方向上的位移信号波形中无论 P 波还是 S 波均相位相反。因此,由地表正反向水平敲击下孔法剪切波速测试反向法依据判断的初动点并非 S 波初动,这将对 S 波波速计算结果产生影响。此外,本文亦通过地表水平正反激振下线弹性半空间波动解析解佐证了数值模拟结果的可靠性。

尽管本文数值模拟模型和理论分析模型均为弹性半空间模型,但其分析结果不失普遍性,仍能反映地表正反向水平敲击激振下孔法剪切波速测试中观测点波形特性,揭示了地表正反向水平敲击激振下孔法观测点水平向波形中 P 波发生反相这一与实际认知矛盾的现象,并指出了应用其确定剪切波初动时刻的不合理性。本文研究对于如何利用地表正反向水平敲击激振下孔法来获取土体的 S 波波速具有重要的参考价值。

参考文献 (References):

[1] 汪闻韶. 土地地震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速 [J]. 水利学报, 1994, 15(3): 80-83.
Wang W S. An important parameter in geotechnical engineering for earthquake disaster mitigation—shear wave velocity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 15(3): 80-83.

[2] 毕兴锁. 场地剪切波速在岩土工程中的应用 [J]. 山西建筑, 1992(1): 23-29.
Bi X S. Application of site shear wave velocity in geotechnical engineering [J]. Shanxi Architecture, 1992(1): 23-29.

[3] 陈昌军. 场地剪切波波速测试及其应用 [J]. 华南地震, 2003, 23(4): 81-86.
Chen C J. Shear wave velocity testing of building site and its application [J]. South China Journal of Seismology, 2003, 23(4): 81-86.

[4] Hunter J A, Pullan S E, Burns R A, et al. Downhole seismic logging for high-resolution reflection surveying in unconsolidated overburden [J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1371-1384.

[5] Hunter J A, Benjumea B, Harris J B, et al. Surface and downhole shear wave seismic methods for thick soil site investigations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9-12): 931-941.

[6] Schneider J A, Mayne P W, Rix G J. Geotechnical site characterization in the greater Memphis area using cone penetration tests [J]. Engineering Geology, 2001, 62(1-3): 169-184.

[7] Kayabasi A, Gokceoglu C. Liquefaction potential assessment of a region using different techniques (Tepebasi, Eskişehir, Turkey) [J]. Engineering Geology, 2018, 246: 139-161.

[8] Stokoe K H, Joh S H, Woods R D. Some contributions of in situ geophysical measurements to solving geotechnical engineering problems [C]//International site characterization ISC'2 Porto, Portugal, 2004: 19-42.

[9] Garofalo F, Foti S, Hollender F, et al. InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part II: Inter-comparison between surface-wave and borehole methods [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2016, 82: 241-254.

[10] 陈云敏, 吴世明, 曾国熙. 表面波谱分析法及其应用 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 61-65.
Chen Y M, Wu S M, Zeng G X. The spectral analysis of surface waves and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 61-65.

[11] ASTM. Standard test methods for downhole seismic testing [M]//Pennsylvania: Annual book of ASTM standard, 2007.

[12] 侯兴民, 杨学山, 廖振鹏, 等. 基于互相关函数的单孔法波速测试优化算法 [J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1161-1165.
Hou X M, Yang X S, Liao Z P, et al. An optimized approach for single-hole method of shear wave velocity measurement based on correlation functions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1161-1165.

[13] Bazui E J. Digital filtering techniques for interpreting seismic cone data [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(6): 998-1018.

[14] Crice D. Borehole shear-wave surveys for engineering site investigations [M]. Saratoga: Geostuff, 2002: 1-14.

[15] Campanella R G, Stewart W P. Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(3): 477-486.

[16] Ishihara K. Soil behaviour in earthquake geotechnics [M]. Oxford: Clarendon Press, 1996.

[17] 廖振鹏. 工程波动理论导论 (第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Liao Z P. Introduction to wave motion theories in engineering (Second Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2002.

[18] 廖振鹏, 周正华, 张艳红. 波动数值模拟中透射边界的稳定实现 [J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 533-545.
Liao Z P, Zhou Z H, Zhang Y H. Stable implementation of transmitting boundary in numerical simulation of wave motion [J]. Chinese

Journal of Geophysics, 2002, 45(4): 533 – 545.

- [19] 周正华, 廖振鹏. 消除多次透射公式飘移失稳的措施[J]. 力学学报, 2001, 33(4): 550 – 554.

Zhou Z H, Liao Z P. A measure for eliminating drift instability of the multi-transmitting formula [J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, 33(4): 550 – 554.

- [20] 董青, 周正华, 苏杰, 等. 消除多次透射公式高频振荡失稳的一种措施[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(3): 571 – 577.

Dong Q, Zhou Z H, Su J, et al. The measure against high frequency oscillating instability of multi-transmitting formula [J]. Technology

for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(3): 571 – 577.

- [21] Sanchez-Salinerio I, Roesset J M, Stokoe K H II. Analytical studies of body wave propagation and attenuation [R]. Austin: Geotechnical Engineering Center the University of Texas at Austin, 1986.

[22] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology theory [M]. Mill Valley: University Science Books, 2002.

- [23] Chao C C. Dynamical response of an elastic half-space to tangential surface loadings [J]. Journal of Applied Mechanics, 1960, 27(3): 559 – 567.

Discussion about the theoretical basis of the down-hole method for shear wave velocity test under surface forward and reverse horizontal hammer strikes

XIAO Yan-Shan¹, ZHOU Zheng-Hua¹, SU Jie¹, WEI Xin²

(1. Collage of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. First Affiliated Hospital, Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin 150040, China)

Abstract: The down-hole method under surface horizontal forward and reverse hammer excitation is frequently used for on-site tests of shear wave velocity. Based on the dynamic finite element method, this paper establishes a three-dimensional analysis model of the down-hole method used for shear wave velocity tests under the surface horizontal forward and reverse hammer excitation. Meanwhile, it determines the solutions of the wave response of linear elastic half space under the surface horizontal hammer excitation through explicit step-wise integration of time-domain lumped mass dynamic finite element. Furthermore, it analyzes the waveform characteristics of points at different depths and the rationality of the theoretical basis of shear wave (S-wave) velocity tests under the surface horizontal forward and reverse hammer excitation. As indicated by the results, the theoretical basis of S-wave velocity tests (i. e., the non-inversion of P-wave onset but inversion of S-wave onset) using the down-hole method under surface horizontal forward and reverse hammer excitation is not tenable. In addition, the numerical simulation results have been further verified reasonable by the analytical solution of the wave motion in the linear elastic half space under the surface horizontal forward and reverse excitation.

Key words: down-hole method; numerical simulation; analytical solution; S-wave; P-wave

(本文编辑: 叶佩)