

文章编号: 1000-7598-(2003)04-0598-05

面波法在深层水泥土搅拌墙中的应用研究

孙建运¹, 王建华¹, 张松¹, 刘波², 罗莎²

(1. 天津大学岩土工程研究所, 天津 300072; 2. 天津市水利科学研究所, 天津 300061)

摘 要: 面波法的理论基础是英国学者瑞利提出的半无限弹性均匀介质中的瑞利面波理论, 及其后来发展的半无限弹性层状介质中的频散理论, 所有这些理论的前提是半无限弹性空间, 对于像水泥土搅拌墙等水平方向宽度有限, 并且往往宽度很小的弹性介质, 对其瑞利面波的特性研究的很少。对于有限宽度弹性介质, 根据其边界条件的不同可以简化为平面应力、平面应变、弹性约束三种情况。通过理论分析发现三种情况下, 其瑞利面波(直达波)的速度与半无限弹性空间中的瑞利面波速度相差很小, 并通过室内模型试验验证了这一结论, 为瑞利面波在水泥土搅拌墙等宽度有限的弹性介质中的应用提供了科学依据。

关 键 词: 瑞利波; 水泥土搅拌墙; 室内模型试验

中图分类号: TU 435 O 347 **文献标识码:** A

Research on application of surfacewave method to cement-soil wall

SUN Jian-yun¹, WANG Jian-hua¹, ZHANG Song¹, LIU Bo², LUO Sha²

(1. Geotechnical Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Water Conservancy Science & Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Surfacewave theory was firstly proposed by Rayleigh which can be used in even medium; many other learners developed Rayleigh's theory and proposed another theory which can be used in layered medium. But all of the methods are based on semi-infinite elastic space; there is a little research in the medium which has the limited dimension in horizontal direction, such as the deep-mixing wall. According to the boundary condition, the deep-mixing wall can be simplified as plane-stress, plane-strain and elastic restriction. Author finds that the Rayleigh wave's velocities are almost the same in the three conditions as in the semi-infinite elastic space and check out the result by the model-test in laboratory so as to provide the scientific testimony for the Rayleigh wave's application to limited dimension medium.

Key words: Rayleigh-wave; cement-soil wall; model-test in laboratory

1 前 言

自水泥土深层搅拌法问世以来, 国内外对其施工机械、加固机理以及水泥土的物理力学性能都做了深入的研究^[1~3]。由于水泥土具有止水、挡土、地基加固等许多作用, 且造价低、应用灵活, 故广泛地应用在土木水利工程中。因其施工质量受多种因素影响, 不易控制, 所以, 施工质量检测就显得十分重要。以往所采用的钻芯取样等方法因存在许多困难, 限制了其实际应用, 因此, 发展无损检测技术来检测水泥搅拌土的施工质量是非常必要的。

瑞利面波是由英国学者 Rayleigh 于 1887 年首先在研究弹性介质中的波时发现的, 随后 Rayleigh

波在地球物理学和地震工程学以及工程测量学中得到了广泛的应用。但是, 以往人们对瑞利面波的研究仅限于弹性半无限空间, 对于水泥土搅拌墙等水平方向宽度有限的弹性介质中的瑞利面波的传播特性研究得很少。为了能把瑞利面波这一有效工具用于水泥土搅拌墙的无损检测, 作者对其中的瑞利面波特性进行了研究分析。对于有限宽度弹性介质, 根据其边界条件的不同可以简化为平面应力、平面应变、弹性约束三种情况, 通过理论分析和试验验证, 发现在这三种情况下, 虽然其瑞利面波(直达波)的波速不同, 但相差很小, 在工程应用中把半无限弹性介质中的瑞利波波速理论用于平面应变、平面应力和弹性约束时, 引起的误差很小, 可以忽

收稿日期: 2002-07-15

作者简介: 孙建运, 男, 1970 年生, 硕士, 一级注册结构工程师, 从事地基与基础工程、地基加固、土力学及土动力学研究等。

略不计。为瑞利面波在水泥土搅拌墙等宽度有限的弹性介质中的应用提供了科学依据。

2 有限宽度弹性介质中瑞利面波研究分析^[4~7]

弹性体中波的传播过程实际上是能量(动能)向外扩散的过程,动能的传播是通过质点位移的传播来实现的,因此,在应用中往往把波的传播用位移的形式来表示。对于略去体积力的,用位移表示的运动方程如式(1)所示。

$$(\lambda + \mu)\text{grad}(\text{div}u) + \mu\nabla^2 u = \rho\ddot{u} \quad (1)$$

对于运动方程中的位移矢量 u ,Lame于1852年给出了如下形式的矢量分解:

$$u = \nabla\phi + \nabla\psi \quad (2)$$

其中 ϕ , ψ 存在且满足式(3)所示

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{V_d^2}\phi, \quad \nabla^2\psi = \frac{1}{V_s^2}\psi \quad (3)$$

并且

$$V_d^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, \quad V_s^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

式中 ϕ 为压缩势或压缩波(纵波); ψ 为旋转势或剪切波(横波); V_s 为剪切波波速; V_d 为压缩波波速; ρ 为弹性体体积密度; λ 和 μ 为拉姆系数。

对于实际应用中常遇到的半无限弹性均匀介质,例如在地震观测时,常取水平方向为 x_1 轴(或记为 X 轴),深度方向为 x_3 轴(或记为 Z 轴),另一个水平方向为 x_2 轴(或记为 Y 轴),如果观测点离开震源(浅层震源)很远,则可以近似认为 X 轴沿半径方向, Y 方向为垂直于半径方向,沿 Y 方向位移势函数变化很小,忽略不计,从而,形成如式(5)所示的简化波动方程:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{\partial\phi}{\partial x_1} - \frac{\partial\psi_2}{\partial x_3} \\ u_2 &= -\frac{\partial\psi_3}{\partial x_1} + \frac{\partial\psi_1}{\partial x_3} \\ u_3 &= \frac{\partial\phi}{\partial x_3} + \frac{\partial\psi_2}{\partial x_1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 u_1 , u_2 和 u_3 分别为位移矢量 u 的三个分量; ψ_1 , ψ_2 和 ψ_3 分别为旋转势函数 ψ (矢量函数)的三个分量; ϕ 亦是压缩势函数 ϕ (标量函数)。研究式(5)发现, u_1 和 u_3 由 ϕ 和 ψ_2 引起, u_2 由 ψ_1

和 ψ_3 引起,故 u_1 和 u_3 与 u_2 不耦合,从而定义 ϕ 为P波, ψ_2 为SV波, ψ_1 和 ψ_3 合成SH波。由于 ϕ 和 ψ_2 只产生 x_1 和 x_3 方向上的位移,故可以把三维问题简化为平面二维问题来考虑。下面的分析仅就P波和SV波来进行,分别计为 ϕ 和 ψ 。

因为弹性介质中的波动实际上是能量(动能)向外扩散的过程,故所有满足已知条件的,使得能量能够向外扩散的波动方程都可能成为能量传播的一种形式。对于半无限弹性介质,假设震源处的动能向外扩散时,有一种沿表面传播的波动形式,即假设位移势函数有如式(6)所示的解:

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \phi(z)\exp(ik(x-Vt)) \\ \psi &= \psi(z)\exp(ik(x-Vt)) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

又因为式(6)所示的位移势函数必须满足波动方程式(3),故可以求得式(6)的解为:

$$\left. \begin{aligned} \phi &= A\exp\left(-k\sqrt{1-\left(\frac{V}{V_d}\right)^2}z\right)\exp(ik(x-Vt)) \\ \psi &= B\exp\left(-k\sqrt{1-\left(\frac{V}{V_s}\right)^2}z\right)\exp(ik(x-Vt)) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式中,为了使得这种沿水平方向传播的波存在,必须满足下式:

$$V < V_s < V_d \quad (8)$$

因为,这种波是一种独立存在的波,故其在沿表面传播时必须满足表面约束条件。对于自由表面的半无限弹性介质,将式(7)代入平面应变表面自由约束条件可以得出著名的Rayleigh方程:

$$r^3 - 8r^2 + 8\frac{2-\nu}{1-\nu}r - \frac{8}{1-\nu} = 0 \quad (9)$$

进而可以确定出瑞利波波速的近似表达式:

$$V \approx \frac{0.87 + 1.2\nu}{1+\nu}V_s \quad (10)$$

式(9),(10)中 $r = \left(\frac{V}{V_s}\right)^2$; ν 为泊松比; V 为

Rayleigh波波速; V_s 为剪切波波速。

对于像水泥土搅拌墙等水平方向宽度有限的弹性介质,当仅仅研究墙内瑞利面波的特性时,根据水平方向边界条件的限制可以简化为三种情况:

①墙体周围有其它介质约束,并且该介质刚度与墙体相差不大或远远大于墙体,可以简化为平面应变情况来考虑;②墙体周围没有任何约束,可以简化为平面应力来考虑;③墙体周围有其它介质约束,

但是, 该介质的刚度远远小于墙体的刚度, 既不满足平面应力条件, 也不满足平面应变条件, 对于这种复杂的边界条件, 理论分析上必须用空间理论进行分析, 不易简化为平面问题。各种简化条件数学表达式如式 (11) 所示。

$$\left. \begin{array}{l} \text{平面应变情况下} \\ \sigma_{yy} \neq 0, \sigma_{xy} = 0, \sigma_{zy} = 0, u_2 = 0 \\ \text{平面应力情况下} \\ \sigma_{yy} = 0, \sigma_{xy} = 0, \sigma_{zy} = 0, u_2 \neq 0 \\ \text{弹性约束条件} \\ \sigma_{yy} \neq 0, \sigma_{xy} \neq 0, \sigma_{zy} \neq 0, u_2 \neq 0 \end{array} \right\} \quad (11)$$

对于①所述的平面应变问题, 实际上与前面所述半无限弹性空间情况一样, 因为, 半无限弹性空间实际上代入的是平面应变的边界条件。

对于平面应力问题, 因为研究 P 波和 SV 波时 $u_2 \neq 0$, 即 P 波和 SV 波在传播过程中要产生位移 u_2 , 故式(5)要写成:

$$\left. \begin{array}{l} u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \\ u_2 = -\frac{\partial \psi_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi_1}{\partial x_3} + f(\phi, \psi_2) \\ u_3 = \frac{\partial \phi}{\partial x_3} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x_1} \end{array} \right\} \quad (12)$$

在式 (12) 第 2 式中, $f(\phi, \psi_2)$ 表示 ϕ 和 ψ_2 引起的位移 u_2 。

由式 (12) 可以看出, 虽然 ϕ 和 ψ_2 引起位移 u_2 , 但是, u_1 和 u_3 仍然可以看作只由 ϕ 和 ψ_2 产生, 即 ψ_1 和 ψ_3 不产生 u_1 和 u_3 , 当单独考虑 u_1 和 u_3 时, 平面问题仍然成立, 但应简化为平面应力情况。将波动方程代入平面应力条件下边界条件, 得出瑞利波速方程式为

$$r^3 - 8r^2 + 8(2 + \nu)r - 8(1 + \nu) = 0 \quad (13)$$

进而可以求得平面应力情况下瑞利波波速为

$$V' \approx \frac{0.87 + 2.07\nu}{1 + 2\nu} V_s \quad (14)$$

对比式 (10) 和式 (14), 可以看出两表达式比较接近。对于弹性材料, 其泊松比 ν 在 $0 \sim 0.5$ 之间, 故可得平面应变条件下瑞利波波速与平面应力条件下瑞利波波速之比为

$$\frac{V}{V'} \in (1, 1.03) \quad (15)$$

对于③所示的弹性边界条件, 在远离震源处, 式 (5) 也应改写为式 (12), 但是, 如式 (11) 第

3 式所示, 此时弹性波动问题不能简化为平面问题来处理, 必须代入空间波动方程求解。波在弹性介质中传播时, 其波速与弹性体的刚度有关, 如式 (15), 平面应变条件下瑞利波波速大于平面应力条件下瑞利波波速, 而弹性约束条件下的刚度介于平面应变与平面应力 (自由状态) 之间, 因此, 此时的瑞利波波速也应介于两者之间。

3 室内模型试验

为了验证作者提出的结论, 参照室内模型试验理论基础见文献[8], 选择白蜡为试验材料, 进行了室内模型试验。图 1 为室内模型试验详图。测试瑞利波时, 采用湖南省湘潭市天鸿电子研究所研制生产的 DB4h 型多功能声波仪, 其发射和接收都采用 50 kHz 的纵波超声波换能器, 本次试验所接收到的是模型中的纵波信号和瑞利面波中的纵波分量。

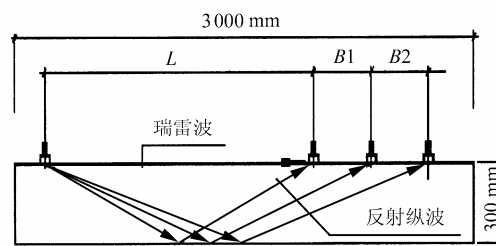


图 1 瑞雷波模型试验详图

Fig.1 Picture of model test of Rayleigh wave

模型材料的纵波波速和横波波速很容易测得, 由式 (4), 式 (10) 和式 (14), 可以求得室内模型的泊松比以及平面应变和平面应力条件下的瑞利波波速的理论值。如表 1 所示。

表 1 模型瑞利波波速理论值

Table 1 The theoretical value of rayleigh wave's velocity				
测试值 $V_d / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	测试值 $V_s / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	泊松比 ν	平面应变 理论值 $V / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平面应力 理论值 $V' / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1 580	740	0.36	708	695

测试时, 根据边界条件的不同, 分别模拟平面应变和平面应力两种情况。当模型周围有刚度很大的模板约束时, 可以认为, 模型不能产生侧向变形, 满足平面应变条件; 当模型周围没有任何约束时, 可以认为, 模型侧向能自由变形, 满足平面应力条件。图 2 为所测试到的典型波动信号, 由图中可以明显看出, 首先, 到达接收点的是反射纵波信号,

然后,是瑞利面波信号,并且,试验时所选择的条件可以明显地区分出纵波信号和瑞利面波信号。

在试验中,怎样确定瑞利波的初至点是非常重要的。因为前面的反射纵波包含着许多频率成份,其中高频成份衰减的快,低频成份衰减的慢,所以,

低频反射纵波信号容易与瑞利波信号重叠。根据在离开震源一定距离处,瑞利波信号能量比重占65%以上这一理论,选择振幅突然增大(振幅增大比较明显)点为瑞利波初至点。本实验根据这一原则选择瑞利波起跳点,见图2。

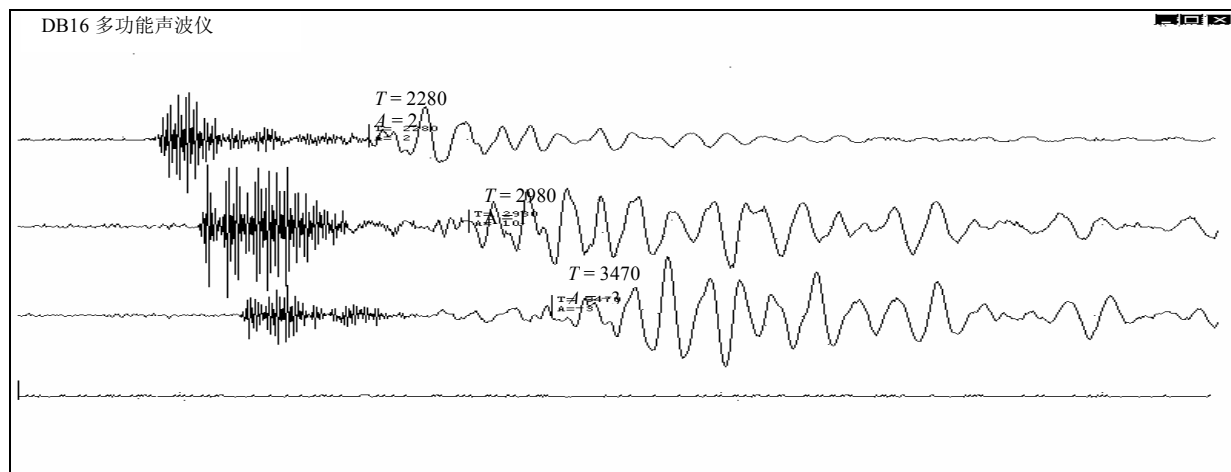


图2 典型模型测试信号 (采样频带宽1~100 kHz, 采样时间间隔10 μs)
Fig.2 Picture of model test wave (frequency range 1~100 kHz, intervals 10 μs)

经过对不同情况下测试结果的分析,求得不同情况下的瑞利波速,并且与表1理论值作对比,对比结果如表2。表中相对误差分别是平面应变测试值与理论值相对误差和平面应力测试值与理论值相对误差。

表2 模型试验测试结果及对比分析
Table 2 Analysis of results of model test

试样尺寸	测试值 $V / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	测试值 $V' / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平面应变 相对误差/ %	平面应力相 对误差/%
3000×200×300	685	673	3.2	3.2
3000×100×300	682	676	3.3	2.8

由表2可以看出,模型试验得出的平面应力和平面应变情况下瑞利波波速与理论瑞利波波速值都非常接近,并且,平面应力和平面应变两种情况下的瑞利波波速值也非常接近,对作者提出的结论提供了有力的论证。

4 瞬态面波法(SASW)的应用

在工程应用中,面波法分为稳态法和瞬态法两种,由于瞬态面波法具有快速、高效等许多优点而得到更为广泛的应用^[9]。瞬态面波法的基础是半无限弹性层状介质中的瑞利波频散理论,对于水泥土搅拌墙这种有限宽度弹性介质,作者研究了均匀

介质中的瑞利波波速特征后,知其瑞利波直达波速与半无限弹性介质中的瑞利波波速相差不大,工程应用时误差很小。

为了把此结论用于层状介质,作者选用天津市堤坝工程常用的粘性土进行了水泥搅拌土室内试验,测其纵波波速、横波波速、无侧限抗压强度等物理力学指标,测试结果见表3。

表3 水泥土室内试验结果
Table 3 Laboratory result of cement-soil

压缩波波速 $V_d / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	剪切波波速 $V_s / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	无侧限抗压强度 / MPa
1352	460	0.715

然后,对某一实际工程施工的水泥土搅拌墙(室内试验所取土样与该工程现场土样一致)进行了瞬态面波法测试反演。结果如图3所示,图3中所示

V_s 为测试反演出的各层土剪切波波速。

由图3和表3可以看出,对于同类土,同样的灰土比,同样含水量,同样养护时间下,室内试验测试出的剪切波波速(450 m/s)与现场反演结果得出的下面几层土剪切波波速相近。图3中所示浅层土误差较大,是因为在反演浅层土时用到短波高频信号,而短波高频信号衰减很快;并且在测试水

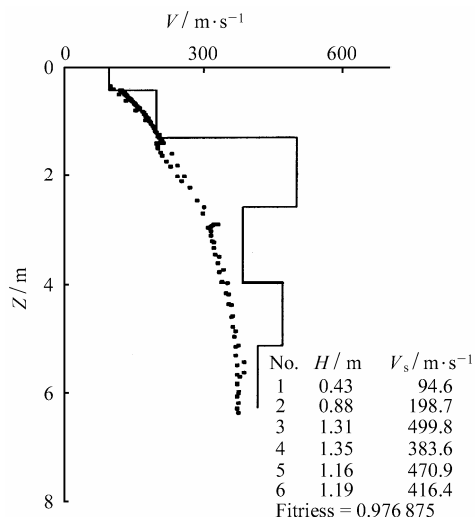


图3 水泥土搅拌墙 SASW 法测试结果
Fig.3 SASW'S result of cement-soil wall

泥土搅拌墙时,所用传感器对高频信号不太敏感以及施工原因等诸多因素造成的。

5 结论

(1) 对于平面应力、平面应变和弹性约束三种不同的边界情况,在水平方向宽度有限的弹性均匀介质中,虽然,经过多次反射和透射,会产生不同的复杂衍生波,但对于远离震源的观测点处,当仅考虑直达瑞利波波速时,虽然这三种情况下的瑞利波波速不同,但相差很小。当把半无限弹性介质中的瑞利波波速理论用于平面应变、平面应力和弹性约束条件时,引起的误差很小,在工程中可以忽略。

(2) 对于非均匀介质,例如层状介质,作者认为半无限弹性层状介质中的瑞利波频散理论用于平

面应变、平面应力和弹性约束情况时误差也很小,在工程应用时也可忽略不计。基于半无限弹性分层介质基础上的瞬态面波法可以用于水泥土搅拌墙的无损检测,但由于水泥土搅拌墙的施工质量受许多因素的影响,因此,在应用瞬态面波法时要尽量减小道间距、加大采样道数以便减小采样误差,同时,采用合理精确的反演算法也是瞬态面波法能否成功的基础。

参考文献

- [1] Mitchell J K, In-place Treatment of Foundation Soils [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, ASCE 1970, (1): 74-110.
- [2] Bruce D A, Bruce M E C, Dimillio A F. Deep mixing method: a global perspective [J]. *Civil Engineering*, ASCE 1998, (12): 38-41.
- [3] 地基处理手册编写委员会, 地基处理手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- [4] 杨桂通, 张善元. 弹性动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- [5] J.L.M. 布列霍夫斯基赫 著, 杨训仁 译. 分层介质中的波[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [6] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [7] 夏唐代, 林水珍. 波速法在防渗墙质量检测中的应用研究 [J]. 沈阳化工学院学报, 2000, 14(4): 273—276.
- [8] 赵鸿儒. 超声地震模型试验及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.
- [9] 吴世明. 土介质中的波[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

书 讯

B. B. Broms 教授新著《地基基础工程学》问世 ——“看图学地基基础”——

最近,国际著名土力学家、原国际土力学及基础工程学会会长 Bengt B. Broms 教授在网上发表了一部著作,其书名为《Foundation Engineering》,中文可译作《地基基础工程学》。该书共分阶段4章,章名如下:

1.地基基础工程的各类问题; 2.土力学; 3.岩土工程现场勘察; 4.地基承载力; 5.地基基础沉降; 6.地基基础设计中应考虑的因素; 7.扩展基脚设计; 8.弹性地基上的特殊基脚和梁; 9.筏形基础; 10.侧向土压力; 11.挡土结构物; 12.桩基础——单桩; 13.单桩——动力分析; 14.桩基础——群桩。

该书的最大特色是全书内容均用图表示,而且只用图表示,基本不用文字;每一章各分若干节,每一节各用一幅图。每一幅图下各有若干个关键词。全书14章共有401节,亦即全书内容就是401幅图。每一幅图下的关键词反映各节主要内容,并可供读者在网上点击查找所需要的内容之用。

(史佩栋 供稿)