

高面板坝地震动三维非一致输入的波函数组合法^①

姚 虞, 刘天云, 张建民

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:提出三维问题的波函数组合法求解不规则河谷的散射问题, 应用到高面板坝动力有限元计算的地震动输入中, 可以满足非一致输入的要求, 并回避人工边界对外行波的反射问题。重点介绍三维问题的波函数组合法的理论推导和程序的算例验证, 并给出将该方法应用到高面板坝地震动输入的基本步骤。

关键词:高面板坝; 三维; 非一致; 位移输入

中图分类号: P315.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0324-005

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0324

Wave Function Combination Method Used for Three-dimensional Non-uniform Input of Earthquake Motion in High Concrete-faced Rockfill Dam

YAO Yu, LIU Tian-yun, ZHANG Jian-min

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The scattering problem of elastic waves is of great engineering significance, especially in earthquake engineering. Frequently, the response of the scatterer is needed to evaluate the safety of structures during earthquakes. The ground motion can be used as dynamic input for the finite-element method calculation, which is a way to realize the non-uniform input. This article puts forward the wave function combination method for a three-dimensional (3D) problem to solve the irregular valley scattering problem. The application of the earthquake input to the dynamic finite-element calculation for a high-face rockfill dam can meet the requirement for non-uniform input and, at the same time, avoid the problem of the reflection of the outward wave by the artificial boundary. The theoretical derivation of the wave function combination method for the 3D problem and the validation of the program are introduced, as are the basic steps needed to apply this method to the earthquake input.

Key words: high concrete-faced rockfill dam; three dimension; non-uniform; displacement input

0 引言

高面板坝的抗震设计常常要进行动力有限元计算, 在地震动输入方面会面临两个问题: 一是如何反映地震波的行波效应^[1], 另一个是如何避免人工边界对外行波的反射^[2]。在目前常用的堆石坝动力分析程序中这两个问题往往被忽略, 代之以均匀输入和固定边界。对于 300 m 级的高面板坝, 地震动作

用的非一致性更加明显, 采用简单的均匀输入与实际有很大差别。

实现非一致输入需要求解计算边界即不规则河谷各点的振动过程。由于基岩的波阻抗(介质密度与波速的乘积)远大于坝体, 可以通过求解不规则空心河谷的散射问题得到边界各点的振动过程。

图 1 表示瑞利波或任意角度的压缩波或剪切波

^① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51038007, 51079074, 51129902)

作者简介: 姚 虞(1989—), 男, 博士生, 研究课题为高坝抗震计算. E-mail: yaoyutsinghua@126.com

入射到半空间不规则河谷的示意图。要求解的问题是在任意入射波的作用下河谷边界任意一点的震动过程。若能求解不规则河谷任意一点的震动过程,则该解可作为河谷内土石坝地震动响应有限元求解的输入。这种输入方式既考虑了地震动作用的非一致性,又回避了人工边界对外行波的反射问题。

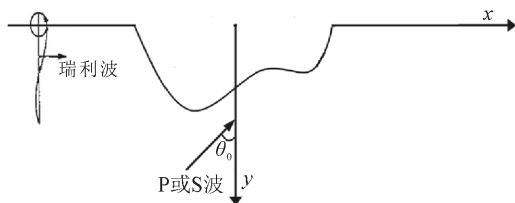


图 1 半空间不规则河谷入射波示意图

Fig.1 Incident wave at an irregular valley in a half-space

弹性波的散射问题已有很长的研究历史。Sezawa在 1927 年完成了对球、圆柱和椭圆柱体在 P 波入射情况下的散射问题的研究,利用特殊波函数构造了问题的解。之后对散射问题的研究陆续展开,并形成了一些方法。Nishimura^[3]解决了各向同性介质中球体空洞的动应力集中问题。同一时期,Pao 和 Mow 等^[4]还探讨了圆柱体内含物的动应力集中问题。Baron 等^[5]率先对弹性介质中圆柱形空腔引起的脉冲散射问题进行了分析,使用积分变换和波函数展开法给出了压缩波散射的解析解;对于球形内含物和空腔的瞬态效应,Mow 和 Miklowitz 进行了求解^[6-8]。Datta 等^[9-11]提出采用匹配渐进展开的方法分析了半空间内含柱形空洞对 P 波、SV 波和 SH 波的散射问题,给出了远场的渐近表达式及相应的数值解。Bostrom 和 Kristensson 等^[12]研究了半空间内球形空洞对 Rayleigh 波的散射问题。上世纪 80 年代,Pao 等^[13]运用广义射线法讨论了柱体的瞬态波散射。黎在良和刘殿魁^[14]还建立了一个射线理论用来解各向异性介质中圆柱体对 SH 波的散射问题。

近 20 多年来,由于计算机技术的广泛应用,用数值化方法求解弹性动力学问题取得了进展。实践证明这些方法已成为解决波动问题的重要工具。如廖振鹏^[15-16]的结构动力反应的数值模拟以及近场波动的数值模拟等。另外,对不规则的地形, Sanchez-Sesma 等^[17-19]先后采用边界元法和波函数展开法对二维、三维问题进行了分析,Ray 等^[20]、刘国利等^[21]分别采用复变函数方法、积分变换和波函数展开相结合的方法给予分析。

1 方法原理介绍

由弹性力学中线弹性体位移表示的位移运动方程(Navier 方程,不计体力):

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu\nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}) = \rho\ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

其中: λ 、 μ 为拉梅常数; $\mathbf{u}$ 为位移矢量。再考虑 Helmholtz 定理^[22]:

$$\mathbf{u} = \nabla\phi + \nabla \times \boldsymbol{\psi}, \quad \nabla \cdot \boldsymbol{\psi} = 0 \quad (2)$$

其中: ϕ 为速度场的标量势; $\boldsymbol{\psi}$ 为矢量势。即任意矢量场可分解为一个无散场和一个无旋场之和。

令 $\mathbf{u}^{(1)} = \nabla\phi$, $\mathbf{u}^{(2)} = \nabla \times \boldsymbol{\psi}$, 代入 Navier 方程,得

$$\nabla(c_p^2 \nabla^2 \phi - \ddot{\phi}) + \nabla \times (c_s^2 \nabla^2 \boldsymbol{\psi} - \ddot{\boldsymbol{\psi}}) = 0 \quad (3)$$

故只需满足

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \phi &= \frac{1}{c_p^2} \ddot{\phi} \\ \nabla^2 \boldsymbol{\psi} &= \frac{1}{c_s^2} \ddot{\boldsymbol{\psi}} \\ \nabla \cdot \boldsymbol{\psi} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在频域内,对于单一频率的波,式(4)的解可写为分离变量的形式,即

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \phi(x, y, z) \cdot e^{i\omega t} \\ \boldsymbol{\psi} &= \boldsymbol{\psi}(x, y, z) \cdot e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式(5)带入式(4),可得

$$\left. \begin{aligned} (\nabla^2 + p^2)\phi(x, y, z) &= 0 \\ (\nabla^2 + s^2)\boldsymbol{\psi}(x, y, z) &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)称为亥姆霍兹方程,是频域内的波动方程。在给定边界条件下求解式(6)得到位移势函数之后便可求解位移场。

对于不规则河谷散射问题,要求满足河谷边界和半空间自由表面面力为零的边界条件。为得到满足边界条件的解,本文提出一种满足全局边界条件的波函数组合法,可以考虑包括瑞利波在内的不同地震波的不同角度入射情况。该方法通过组合体波函数和 Lamb 问题的解以满足半空间全局的边界条件,来求解不规则河谷的散射问题,是一种半解析的方法。目前已用该方法编写了二维和三维河谷的计算程序,并分别利用半圆形和半球形河谷与理论解作对比,验证了程序的正确性。

波函数组合法的基本思路是:

- (1) 确定入射波自由场应力、位移;
- (2) 位移、应力波函数展开;
- (3) 确定自由表面波函数产生的面力;
- (4) 在半无限空间自由表面反向叠加波函数产生的面力,求解 Lamb 问题计算散射边界次生面力;
- (5) 匹配散射边界处自由场面力、波函数产生

的面力与 Lamb 解产生的面力,形成散射边界无面力状态;

(6) 叠加散射边界处自由场、波函数和 Lamb 解产生的位移,得到散射边界的总位移。

对于二维波函数组合法的理论推导及程序验证,作者已在文献[23]中有所介绍。本文主要介绍三维波函数组合法。

2 三维波函数组合法理论推导

球坐标下,式(6)有分离变量形式的通解:

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n A_n^m Z_n^i(pr) P_n^m(\cos\theta) \exp[i(m\varphi - \omega t)] \\ \Psi &= \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n B_n^m Z_n^i(sr) P_n^m(\cos\theta) \exp[i(m\varphi - \omega t)] \\ \chi &= \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n C_n^m Z_n^i(sr) P_n^m(\cos\theta) \exp[i(m\varphi - \omega t)] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 Z_n^i 为 n 阶 i 类球贝塞尔函数; P_n^m 为 n 阶 m 次连带勒让德多项式。定出三个势函数系数 A_n^m 、 B_n^m 、 C_n^m 则可求得问题的解。

用波函数表达三维半空间的应力场和位移场的方法与二维的方法基本一致,其表达式可参见文献[24]。三维问题的难点在于三维非轴对称 Lamb 问题的求解。

由于波函数展开法不能满足水平自由表面的边界条件,存在残余正应力 σ 与参与剪应力 τ 。为满足自由表面条件,提出在表面处施加与残余面力相反方向的虚拟面力 $-\sigma$ 与 $-\tau$ (图 2)。

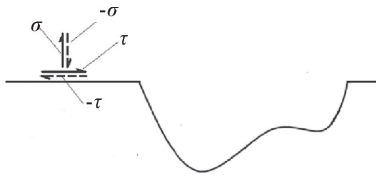


图 2 自由表面残余面力的消除

Fig.2 Elimination of residual force on a free surface

波数域内,三维兰姆问题的控制方程为:

$$\left. \begin{aligned} (\nabla^2 + p^2)\phi &= 0 \\ (\nabla^2 + s^2)\Psi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 ϕ 和 Ψ 满足

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1 \partial x_3} \\ u_2 &= \frac{\partial \phi}{\partial x_2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_2 \partial x_3} \\ u_3 &= \frac{\partial \phi}{\partial x_3} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_3^2} + k^2 \Psi \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

满足以上两式的三个势函数:

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \varphi = A(k) J_n(kr) e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} \\ \Psi^1 &= \Psi = B(k) J_n(kr) e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} \\ \Psi^2 &= \chi = C(k) J_n(kr) e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $\gamma_p^2 = p^2 - k^2$, $\gamma_s^2 = s^2 - k^2$, p 和 s 分别为压缩波和剪切波波数。由位移和势函数关系,结合广义胡克定律可得位移和应力的表达式。其中

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz}(k) &= A(k) \frac{2\mu}{r^2} \left(k^2 r^2 - \frac{s^2 r^2}{2} \right) J_n(kr) e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} + \\ &\quad C(k) \frac{2\mu}{r^2} i\gamma_s k^2 r^2 J_n(kr) e^{in\theta} e^{i\gamma_s z} \\ \sigma_{rz}(k) &= A(k) \frac{2\mu}{r^2} i\gamma_p r (-n J_n(kr) + \\ &\quad kr J_{n-1}(kr)) e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} - \\ &\quad B(k) \frac{2\mu}{r^2} \cdot \frac{1}{2} \gamma_s r n J_n(kr) e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} + \\ &\quad C(k) \frac{2\mu}{r^2} \cdot \frac{1}{2r} (k^2 - \gamma_s^2) r^2 [-n J_n(kr) + \\ &\quad kr J_{n-1}(kr)] e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} \\ \sigma_{\theta z}(k) &= -A(k) \frac{2\mu}{r^2} n \gamma_p r J_n(kr) e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} + B(k) \frac{2\mu}{r^2} \\ &\quad \cdot \frac{1}{2} i\gamma_s r [n J_n(kr) - kr J_{n-1}(kr)] e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} + \\ &\quad C(k) \frac{2\mu}{r^2} \cdot \frac{inr}{2} (k^2 - \gamma_s^2) J_n(kr) e^{in\theta} e^{i\gamma_p z} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将三个边界应力进行组合,有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz}^n(r) |_{z=0} &= \int_0^\infty 2\mu \left[\left(k - \frac{s^2}{2k} \right) A(k) + \right. \\ &\quad \left. i\gamma_s k C(k) \right] k J_n(kr) dk \\ \sigma_{rz}^n(r) |_{z=0} - i\sigma_{\theta z}^n(r) |_{z=0} &= \\ &\quad \int_0^\infty 2\mu \left[i\gamma_p A(k) - \frac{\gamma_s}{2} B(k) + \right. \\ &\quad \left. \frac{k^2 - \gamma_s^2}{2} C(k) \right] k J_{n-1}(kr) dk \\ \sigma_{rz}^n(r) |_{z=0} + i\sigma_{\theta z}^n(r) |_{z=0} &= \\ &\quad \int_0^\infty 2\mu \left[-i\gamma_p A(k) - \frac{\gamma_s}{2} B(k) - \right. \\ &\quad \left. \frac{k^2 - \gamma_s^2}{2} C(k) \right] k J_{n+1}(kr) dk \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

分别对 $\sigma_{zz}^n(r) |_{z=0}$ 、 $\sigma_{rz}^n(r) |_{z=0} - i\sigma_{\theta z}^n(r) |_{z=0}$ 和 $\sigma_{rz}^n(r) |_{z=0} + i\sigma_{\theta z}^n(r) |_{z=0}$ 进行 n 阶、 $n-1$ 阶和 $n+1$ 阶的汉克尔变换得到 Σ_1 、 Σ_2 和 Σ_3 , 则可得三个代数方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{k^2 - \gamma_s^2}{2k} A(k) + i\gamma_s k C(k) &= \frac{\sum_1}{2\mu} \\ i\gamma_p A(k) - \frac{\gamma_s}{2} B(k) + \frac{k^2 - \gamma_s^2}{2} C(k) &= \frac{\sum_2}{2\mu} \\ -i\gamma_p A(k) - \frac{\gamma_s}{2} B(k) - \frac{k^2 - \gamma_s^2}{2} C(k) &= \frac{\sum_3}{2\mu} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

解得

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{k(k^2 - \gamma_s^2) \sum_1 - i\gamma_s k^2 (\sum_2 - \sum_3)}{\mu [(k^2 - \gamma_s^2)^2 + 4\gamma_p \gamma_s k^2]} \\ B &= -\frac{\sum_2 + \sum_3}{2\mu \gamma_s} \\ C &= \frac{(k^2 - \gamma_s^2)(\sum_2 - \sum_3) - 4i\gamma_p k \sum_1}{2\mu [(k^2 - \gamma_s^2)^2 + 4\gamma_p \gamma_s k^2]} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

这样通过计算边界的零面力条件由最小二乘法定出 A_n^m 、 B_n^m 、 C_n^m ,得到波函数和 Lamb 解组合的位移场,并获得边界的位移。

3 算例验证

三维程序利用半球形河谷的散射问题进行验证。验证结果参考文献[18],该文献使用波函数展开法,将三倍半径范围的半空间自由表面纳入计算域边界中,忽略三倍半径以外自由表面的边界条件。文献中提供了不同频率 P 波垂直向上入射的结果,笔者用本方法计算出相应的结果以进行对比(图 3)。

从图 3 中可以看出,采用本文方法计算的结果与文献[18]计算的结果接近,从而验证了三维程序的正确性。

4 应用方法

地震从远处传到坝址建基面,输入坝体内部,引起坝体的变形和破坏。为模拟地震输入情况,需要以下条件:(1)入射方位与入射角;(2)入射波形式;(3)地震时程。

首先,将地震时程 $S(t)$ (一般是间隔 0.02 s 的离散记录)通过 FFT 获得功率谱曲线 $W(\omega)$;

第二,将功率谱曲线 $W(\omega)$ 等间隔离散,如: $\Delta\omega = 0.5$,获得一系列谐波 W_i ;

第三,将谐波以给定的波形与入射方位角作为坝址场地自由场的入射波,通过波函数组合法获得建基面的散射场位移 $W_i^s(\mathbf{x})$;

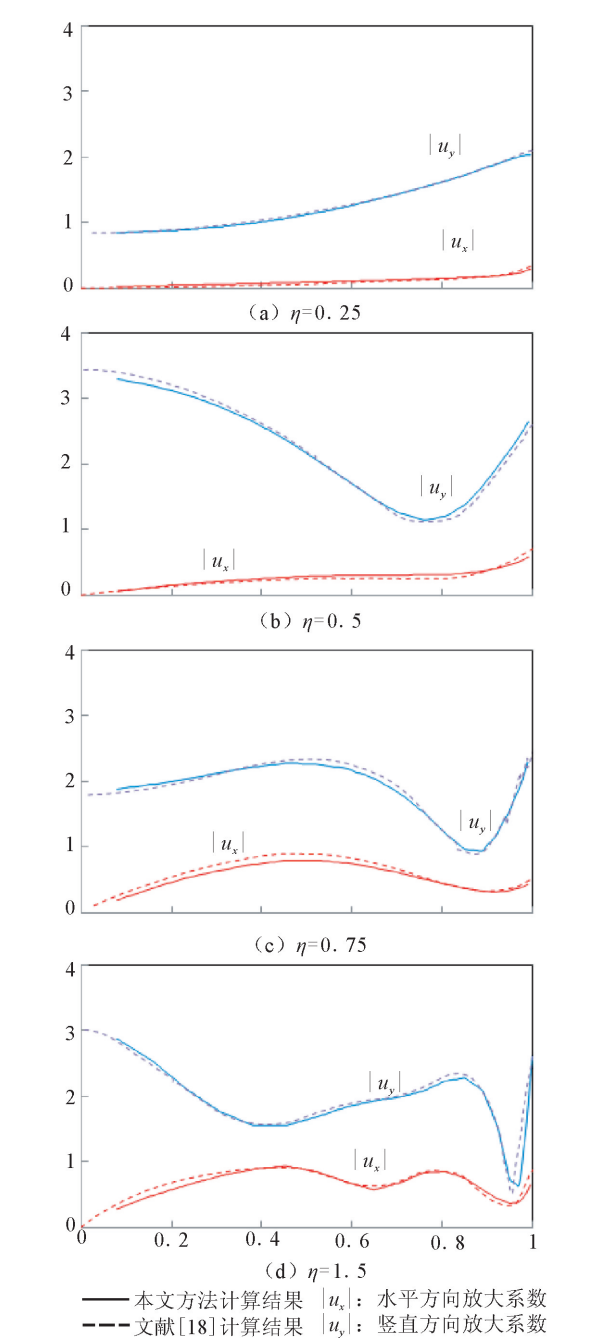


图 3 P 波垂直入射半球形河谷边界位移放大系数
Fig.3 Displacement amplification factor of hemispherical valley boundary under vertical incidence of P wave

第四,对所有离散频点进行第三步的计算,可获得坝址建基面散射场位移谱 $W^s(\mathbf{x}, \omega)$;

第五,应用逆 FFT,获得坝址建基面散射场的位移时程 $w^s(\mathbf{x}, t)$ 。

最后,将获得的建基面时程作为输入位移 $u_b = \{w^s(\mathbf{x}_i, t)\}$,求解如下动力方程:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_s \\ \ddot{\mathbf{u}}_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{u}}_s \\ \dot{\mathbf{u}}_b \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中下标 s 为结构结点数; b 为坝基结点数; $\mathbf{u}_s$ 为结构结点位移向量。

5 结论

本文提出的三维波函数组合法可解决三维半空间内任意空心体的散射问题。其基本思路是将地震波转换到频域之后离散,对每种频率的波通过组合波函数和 Lamb 问题的解,使得边界零面力条件得到满足,再由波函数和 Lamb 问题的解得到边界的频域内的位移,最后转换回时域,得到边界的位移时程。由于堆石体的波阻抗相对于基岩很小,可将该边界位移时程作为坝体动力有限元计算的输入。

通过对半球形河谷在 P 波垂直入射条件下的散射问题进行编程计算,初步验证了理论的正确性。将该方法应用到高面板坝地震动输入中,可以考虑地震动作用的非一致性,并回避人工边界对外行波的散射问题。

参考文献(References)

- [1] 王艳.非一致地震动场数值方法研究及在结构动力分析中的应用[D].北京:清华大学,2007.
WANG Yan. Research on the Numerical Method for Asynchronous Seismic Wave Motions and its Application in Dynamic Analysis of Structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
- [2] 李彬.地铁地下结构抗震理论分析与应用研究[D].北京:清华大学,2005.
LI Bin. Theoretical Analysis of Seismic Response of Underground Subway Structures and Its Application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [3] Nishimura G. Dynamic Problem of stress Concentration in the Vicinity of a Spherical Matter Included in an Elastic Solid Under Dynamical Force[J]. Journal of the Faculty of Engineering, 1955, 24: 101.
- [4] Pao Y H, Mow C C. Dynamic Stress Concentration in an Elastic Plate with Rigid Circular Inclusion. No. SR-41[R]. The MITRE Corporation, Bedford, Massachusetts, 1961.
- [5] Baron M L, Matthews A T. Diffraction of a Pressure Wave by a Cylindrical Cavity in an Elastic Medium[J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 28(3): 347-354.
- [6] Mow C C. On the Transient Motion of a Rigid Spherical Inclusion in an Elastic Medium and Its Inverse Problem[J]. Journal of Applied Mechanics, 1966, 33(4): 807-813.
- [7] Mow C C. Transient Response of a Rigid Spherical Inclusion in an Elastic Medium[J]. Journal of Applied Mechanics, 1965, 32

(3): 637-642.

- [8] Miklowitz J. Scattering of a Plane Elastic Compressional Pulse by a Cylindrical Cavity[C]// Proceedings of the 11th International Congress of Applied Mechanics, Munich, 1966: 469-483.
- [9] Datta S K, Akily N E. Diffraction of Elastic Waves by Cylindrical Cavity in a Half-space[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 64(6): 1978: 1692-1699.
- [10] Datta S K, Shah A H, Truell R. Scattering of SH Waves by Embedded Cavities[J]. Wave Motion, 1982, 4(3): 265-283.
- [11] Datta S K. Scattering of Elastic Waves[M]// Nematnasser S, edit. Mechanics Today. New York: Pergamon Press, 1978, 4: 149-208.
- [12] Bostrom A, Kristensson G. Scattering of a Pulsed Rayleigh Wave by a Spherical Cavity in an Elastic Half Space[J]. Wave Motion, 1983, 5(2): 137-143.
- [13] Pao Y H, Ku G C. Application of the Theory of Generalized Rays to Diffraction of Transient Waves by a Cylinder[J]. Wave Motion, 1983, 5(4): 385-398.
- [14] 黎在良, 刘殿魁. 各向异性介质中圆柱体对 SH 波散射的射线理论[J]. 地震工程与工程振动, 1987, 7(1): 1-8.
LI Zai-liang, LIU Dian-kui. Ray Method of SH Wave Propagation in an Anisotropic Medium with a Circular Cavity[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1987, 7(1): 1-8. (in Chinese)
- [15] 廖振鹏. 近场波动的数值模拟[J]. 力学进展, 1997, 26(2): 193-216.
LIAO Zhen-peng. Numerical Simulation of Near-field Wave Motion[J]. Advances in Mechanics, 1997, 26(2): 193-216. (in Chinese)
- [16] 廖振鹏. 结构动力反应的数值模拟[M]// 中国科学技术前沿(第四卷). 北京: 高等教育出版社, 2001: 427-458.
LIAO Zhen-peng. Numerical Simulation of Structure Dynamic Response[M]// Science and Technology at the Frontier in China (Vol. 4). Beijing: Higher Education Press, 2001: 427-458. (in Chinese)
- [17] Sanchez-Sesma F J, Herrera I, Aviles J. A Boundary Method for Elastic Wave Diffraction: Application to Scattering of SH Waves by Surface Irregularities[J]. Bulletin of The Seismological Society of America, 1982, 72(2): 473-490.
- [18] Sanchez-Sesma F J. Diffraction of Elastic Waves by Three-dimensional Surface Irregularities[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(6): 1621-1636.
- [19] Sanchez-Sesma F J, Miguel A B, Ismael H. Surface Motion of Topographical Irregularities for Incident P, SV, and Rayleigh Waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(1): 263-269.
- [20] Han R PS, Yeh K Y, Liu G L, et al. Scattering of Plane SH-waves by a Cylindrical Canyon of Arbitrary Shape in Anisotropic Media[J]. International Journal of Engineering Science, 1992, 30(12): 1773-1787.

BU Jian-qing, GAO Yong-li, YUAN Xiang-rong. Research on Methods to Reduce Influence of Vibration and Noise of Train [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2001(3):32-47. (in Chinese)

[4] 曹志刚, 蔡袁强, 徐长节. 空沟对列车运行引起的地基振动隔振效果研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8):2373-2382.

CAO Zhi-gang, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Screening Efficiency of Open Trenches to Train-induced Ground Vibration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8):2373-2382. (in Chinese)

[5] 李志毅, 高广运, 邱畅, 等. 多排桩屏障远场被动隔振分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21):3990-3995.

LI Zhi-yi, GAO Guang-yun, QIU Chang, et al. Analysis of multi-row of Piles as Barriers for Isolating Vibration in Far Field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21):3990-3995. (in Chinese)

[6] 冯牧, 雷晓燕. 列车引发建筑物振动试验及数值隔振研究[J]. 噪声与振动控制, 2009(5):80-87.

FENG Mu, LEI Xiaoyan. Field Test of Train-Induced Building Vibrations and Investigation of Numerical Isolation[J]. Noise and Vibration Control, 2009(5):80-87. (in Chinese)

[7] 肖世伟, 雷长顺, 郭超, 等. 高速铁路空沟隔振数值分析[J]. 铁道工程学报, 2011(8):23-29.

XIAO Shi-wei, LEI Chang-shun, GUO Chao, et al. Numerical Analysis of Vibration Reduction of Open Trench for High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, (8):23-29. (in Chinese)

[8] 李志毅, 高广运, 冯世进, 等. 高速列车运行引起的地表振动分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(7):909-914.

LI Zhi-yi, GAO Guan-gyun, FENG Shi-jin, et al. Analysis of Ground Vibration Induced by High-Speed Train[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(7):909-914. (in Chinese)

[9] 国家环境保护局. GB 10071-88 城市区域环境振动测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 10071-88 Measurement Method of Environmental Vibration of Urban Area[S]. Beijing: China Standards Press, 1988. (in Chinese)

(上接 328 页)

[21] 刘国利, 刘殿魁. 位移阶跃 SH 波对半圆形凹陷地形的散射 [J]. 力学学报, 1994, 26(1):70-80.

LIU Guo-li, LIU Dian-kui. The Scattering of Displacement Step SH-waves by a Semi-cylindrical Canyon[J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 26(1):70-80. (in Chinese)

[22] [美]阿肯巴赫. 编. 徐植信, 洪锦如, 译. 弹性固体中波的传播 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.

Achenbach J D, edit. Translated by XU Zhi-xin, HONG Jin-ru. Wave Propagation in Elastic Solids[M]. Shanghai: Tongji Univerity Press, 1992. (in Chinese)

[23] 姚虞, 刘天云, 张建民. 求解二维弹性半空间散射问题的波函数组合法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1):109-113.

YAO Yu, LIU Tian-yun, ZHANG Jian-min. The Method by the Combination of Eave Functions to Solve the Problem of Scattering in 2D Elastic Half Space[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1):109-113. (in Chinese)

[24] 鲍亦兴, 毛昭宙. 弹性波的衍射与动应力集中[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

PAO Yih-hsing, MOW Chao-chow. The Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)