

文章编号: 1000-7598-(2007) 08-1655-06

浅埋孔洞对地表反平面运动的影响

陈志刚

(暨南大学 力学与土木工程系, 广州 510632)

摘 要: 采用复变函数和多极坐标方法, 构造了一个能够自动满足水平表面上应力自由边界条件的散射波函数, 研究了地下任意形柱状孔洞对任意角度入射的平面 SH 波的散射及其对地面震动的影响, 给出了浅埋孔洞附近地面运动的数值结果。定量分析了入射波长、入射角度、孔洞的形状和埋深等因素对地面运动的影响。研究表明, 浅埋孔洞与水平表面存在强烈的相互作用对局部地面运动将起到放大作用, 在地面建筑物抗震设计时应考虑地下隧洞的存在对地震动的影响。

关 键 词: 浅埋孔洞; 地面运动; SH 波; 保角映射

中图分类号: P315.9; O347.4

文献标识码: A

Effects of shallow buried cavity on anti-plane ground motion

CHEN Zhi-gang

(Department of Mechanics and Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: A scattering wave function satisfying zero-stress condition on horizontal surface is constructed by using the functions of complex variable and multi-polar coordinate system. The scattering of SH-wave with arbitrary incident angle by a subsurface cavity of arbitrary shape in half space is studied together with its influence on ground motion. Numerical results of the ground motion on subsurface cavity are provided. The effects of incident wavelength, incident angle, shape of cavity and buried depth on ground motion are analyzed quantitatively. The research indicates that great interaction exists between the subsurface cavity and the horizontal surface, which will bring about great influence on ground motion. Therefore enough importance must be attached to the existing of subsurface cavity while finishing seismic design for building.

Key words: shallow buried cavity; ground motion; SH-wave; conformal mapping

1 引 言

局部地形和地质构造对地震动的影响是地震工程和岩土工程领域具有重要理论意义和工程应用价值的研究课题, 这一问题实质上是波的散射问题^[1]。多年来, 在采用解析方法研究地表不规则地形对地震动影响方面, 已积累了一定的研究成果, 如研究凹陷与凸起地形对地震动的影响^[1-5]。若将浅埋孔洞视为“隐蔽地形”, 浅埋问题可与凹陷和凸起地形的研究归为一类, 属于地形影响的范畴。目前有关半空间中的孔洞对弹性波的散射对地面运动影响的解析研究成果, 主要是以圆形孔洞为研究对象, V.W.Lee 和 M.D.Trifunac^[6]求解了弹性半空间内圆形隧道在 SH 波入射时的解析解; 刘殿魁等^[7-9]采用复

变函数和多极坐标方法分析了 SH 波作用下半空间中浅埋单个圆形孔洞、多个圆形孔洞和圆形衬砌结构对地震动的影响; V.W.Lee 和 J. Karl^[10, 11]用非常大的圆弧模拟半空间表面的方法, 获得了半空间内单个圆形孔洞对 P 波和 SV 波散射的近似解析解和地表位移; 梁建文等^[12-15]采用和 V.W.Lee 同样的方法求解了地下多个圆形孔洞和圆形衬砌隧道对沿线地震动的影响。本文拟以 SH 型地震波为例, 应用复变函数的保角映射方法, 研究地表面附近一个浅埋非圆形柱状孔洞对 SH 波的散射及其对地震动的影响。

2 计算模型

研究地表面附近一个浅埋孔洞对 SH 波的散

射,可采用如图 1 所示计算模型。在弹性半空间中, h 为孔洞的中心距水平表面的距离; S 为孔洞的边界; n 为孔边界的法线方向。稳态 SH 波在弹性半空间内,与 o_1x_1 轴成 α_0 角度方向入射。在不含孔洞的弹性半空间中,入射的 SH 波 $w^{(i)}$ 在水平界面上将产生一个反射的 SH 波 $w^{(r)}$,在复平面 Z 上可以表示为

$$w^{(i)} = w_0 e^{\frac{ik}{2}[(z-ih)e^{-i\alpha_0} + (\bar{z}+ih)e^{i\alpha_0}]} \quad (1)$$

$$w^{(r)} = w_0 e^{\frac{ik}{2}[(z-ih)e^{i\alpha_0} + (\bar{z}+ih)e^{-i\alpha_0}]} \quad (2)$$

式中: w_0 为入射波的波幅, $i = \sqrt{-1}$, 省略了 $e^{-i\omega t}$ 。

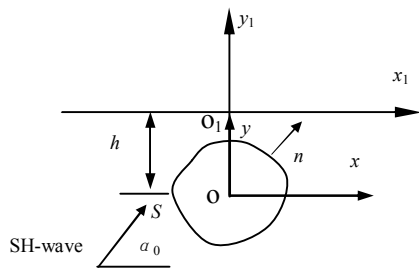


图 1 SH 波作用下浅埋任意形孔洞模型

Fig.1 The shallow buried cavity of arbitrary shape model by SH-wave

在均匀各向同性连续介质中传播的稳态 SH 波应满足 Helmholtz 方程,在复平面 Z 上可表示为

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial \bar{z}} + \frac{k^2}{4} w = 0 \quad (3)$$

式中: $w(x, y)$ 为位移函数,稳态情况下位移场为 $w(x, y)e^{-i\omega t}$; $k = \omega/c_s$, ω 为位移场的圆频率, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$ 为介质的剪切波速; ρ 、 μ 分别为介质的质量密度和剪切模量。

应力-应变关系为

$$\tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial \bar{z}} \right); \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial \bar{z}} \right) \quad (4)$$

引入映射函数 $\omega(\zeta)$, 将复平面 ζ 上的单位圆外域映射成 Z 平面上相应曲线边界的外域,则相应的控制方程式 (3) 和应力-应变关系式 (4) 可以表示如下:

$$\frac{1}{\omega'(\zeta)\overline{\omega'(\zeta)}} \frac{\partial^2 w}{\partial \zeta \partial \bar{\zeta}} + \frac{k^2}{4} w = 0 \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{rz} &= \frac{\mu}{|\omega'(\zeta)|} \left(\zeta \frac{\partial w}{\partial \zeta} + \bar{\zeta} \frac{\partial w}{\partial \bar{\zeta}} \right); \\ \tau_{\theta z} &= \frac{i\mu}{|\omega'(\zeta)|} \left(\zeta \frac{\partial w}{\partial \zeta} - \bar{\zeta} \frac{\partial w}{\partial \bar{\zeta}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 (r, θ) 为与复平面 ζ 上极坐标相应的曲线坐标。

在复平面 ζ 上入射波和反射波可以表示为

$$w^{(i)} = w_0 e^{\frac{ik}{2}[\omega(\zeta)-ih]e^{-i\alpha_0} + [\overline{\omega(\zeta)+ih}]e^{i\alpha_0}} \quad (7)$$

$$w^{(r)} = w_0 e^{\frac{ik}{2}[\omega(\zeta)-ih]e^{i\alpha_0} + [\overline{\omega(\zeta)+ih}]e^{-i\alpha_0}} \quad (8)$$

3 散射波

构造如图 1 所示孔洞激发出的散射波,它应满足方程式 (5),且还要满足无穷远处的 Sommerfeld 辐射条件和在半空间水平表面上应力自由的边界条件。在复平面 ζ 上,利用 SH 波散射的对称性和多极坐标的方法构造出半空间水平表面附近孔洞的散射波场,它可以写成为

$$w^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \left\{ H_n^{(1)} \left[k |\omega(\zeta)| \right] \left[\frac{\omega(\zeta)}{|\omega(\zeta)|} \right]^n + H_n^{(1)} \left[k |\omega(\zeta) - i2h| \right] \left[\frac{\omega(\zeta) - i2h}{|\omega(\zeta) - i2h|} \right]^{-n} \right\} \quad (9)$$

式中: A_n 为待定的任意常数; $H_n^{(1)}(\cdot)$ 为 n 阶第一类 Hankel 函数。

将式 (9) 代入式 (4) 中,在 x_1oy_1 坐标系中,水平表面上 τ_{xz} 恒为 0。若孔洞为圆孔,即 $z = \omega(\zeta) = e^{i\theta}$,则散射波场式 (9) 与文[7]中浅埋圆孔的散射波场相一致。

4 求解

具有式 (7) ~ (9) 形式的入射波、反射波和散射波,在半空间表面上产生的应力会自动满足应力自由的边界条件。在弹性半空间内孔洞周边应力也是自由的,在曲线坐标下孔周边应力自由条件可写为

$$\tau_{rz} = \tau_{rz}^{(i)} + \tau_{rz}^{(r)} + \tau_{rz}^{(s)} = 0 \quad (\text{在 } S \text{ 上}) \quad (10)$$

将半空间中的入射波、反射波和散射波的表达式 (7) ~ (9) 代入式 (6),求出其应力表达式,并代入边界条件式 (10) 得

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \varepsilon_n - \varepsilon = 0 \quad (11)$$

式中:

$$\varepsilon = -iw_0 e^{\frac{ik}{2}[\omega(\zeta)e^{-i\alpha_0} + \overline{\omega(\zeta)}e^{i\alpha_0}]} \left[\frac{\zeta \omega'(\zeta)}{|\omega'(\zeta)|} e^{-i\alpha_0} + \frac{\bar{\zeta} \overline{\omega'(\zeta)}}{|\overline{\omega'(\zeta)}|} e^{i\alpha_0} \right] - iw_0 e^{\frac{ik}{2}[\omega(\zeta)e^{i\alpha_0} + \overline{\omega(\zeta)}e^{-i\alpha_0}]} \left[\frac{\zeta \omega'(\zeta)}{|\omega'(\zeta)|} e^{i\alpha_0} + \frac{\bar{\zeta} \overline{\omega'(\zeta)}}{|\overline{\omega'(\zeta)}|} e^{-i\alpha_0} \right];$$

$$\varepsilon_n = \left[H_{n-1}^{(1)}(k|\omega(\zeta)|) \left(\frac{\omega(\zeta)}{|\omega(\zeta)|} \right)^{n-1} - \right. \\ \left. H_{n+1}^{(1)}(k|\omega(\zeta) - i2h|) \left(\frac{\omega(\zeta) - i2h}{|\omega(\zeta) - i2h|} \right)^{-(n+1)} \right] \frac{\zeta \omega'(\zeta)}{|\omega'(\zeta)|} - \\ \left[H_{n+1}^{(1)}(k|\omega(\zeta)|) \left(\frac{\omega(\zeta)}{|\omega(\zeta)|} \right)^{n+1} - \right. \\ \left. H_{n-1}^{(1)}(k|\omega(\zeta) - i2h|) \left(\frac{\omega(\zeta) - i2h}{|\omega(\zeta) - i2h|} \right)^{-(n-1)} \right] \frac{\bar{\zeta} \overline{\omega'(\zeta)}}{|\omega'(\zeta)|} \quad (12)$$

可按最小二乘法求解散射波系数:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \bar{\varepsilon}_m \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} \varepsilon_n A_n - \varepsilon \right) d\theta = 0, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中 $\bar{\varepsilon}_m$ 为复变量 ε_m 的共轭变量。

通过控制浅埋孔洞边缘应力计算数值 (该值小于 0.1 %) 精度, 截取有限项, 将式 (12) 转化为求解未知系数 A_n 的代数方程组。

5 地面运动的数值结果

在地震工程和结构抗震分析中, 关注的是地面上加速度的最大幅值和相位的变化。对于稳态 SH 波而言, 如求得浅埋孔洞影响下的地表各点位移, 即可求出地表各点的加速度。在平面 SH 波作用下含任意形柱状孔洞的弹性半空间中总波场为

$$w^{(t)} = w^{(i)} + w^{(r)} + w^{(s)} \quad (14)$$

已知入射的 SH 波的位移幅值为 w_0 , 定义 w_d 为水平地表面上的无量纲位移幅值:

$$w_d = \frac{|w^{(t)}|}{w_0} \quad (15)$$

对于无孔洞存在的均匀弹性半空间, $w_d = 2.0$ 。无量纲频率 η 定义为

$$\eta = \frac{2a}{\lambda} = \frac{ka}{\pi} = \frac{\omega a}{\pi c_s} \quad (16)$$

式中: λ 为波长; a 为孔洞的特征尺寸。对于圆孔取圆孔的半径, 椭圆孔可取椭圆长轴的一半, 方孔取边长的一半, 菱形孔取对角线长的一半。在求解半空间中椭圆孔、方孔和菱形孔洞上方地表位移的数值时, 采用如下形式的映射函数:

$$z = \omega(\zeta) = R \left(\zeta + \frac{m}{\zeta} \right) \quad (17)$$

$$z = \omega(\zeta) = 1.11c \left(\zeta - \frac{1}{9\zeta^3} \right) \quad (18)$$

$$z = \omega(\zeta) = 0.889d \left(\zeta + \frac{1}{9\zeta^3} \right) \quad (19)$$

式中: $R = (a+b)/2$, $m = (a-b)/(a+b)$; a 和 b 为椭圆的长短半轴; c 为方孔边长的一半; d 为菱形孔对角线长的一半。

当 $a = b$ 时椭圆孔退化为圆孔。图 2 为半空间中浅埋圆孔的计算结果, 为便于与文[7]的数值结果比较, 采用与它相同的埋深 ($h = 3a$) 和入射波的波数, 可以看出本文的计算结果与文[7]完全一致。

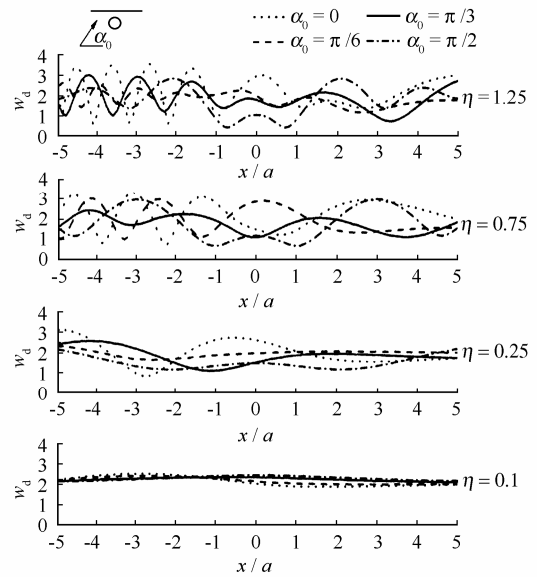


图 2 含圆孔半空间地表位移幅值
Fig.2 Surface displacement amplitudes in half space with cylindrical cavity

图 3 为半空间中孔洞的埋深为 1.5 倍孔洞特征尺寸时 SH 波作用下孔洞上方的地表位移幅值 w_d 随入射频率 η 变化的空间曲线。从图中可以看出, 随入射频率 η 的增大, 地表位移幅值 w_d 的空间变化趋于复杂。当 SH 波水平或斜入射时, 在迎波面一侧地表位移变化剧烈, 且入射波的频率越高, 地表位移这种剧烈波动的现象越显著, 表明在地表与孔洞的迎波面之间对入射波存在着强烈的相互反射作用。在 SH 波水平入射浅埋方孔时, 位移幅值 w_d 的最大值可达 5.42, 与无孔洞的半空间地表位移幅值相比提高了 1.7 倍。

图 4~6 为埋深为 1.5 倍孔洞特征尺寸情况下频率 $\eta = 0.1, 0.5, 1.0$ 和 2.0 的 SH 波分别以 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和垂直入射时孔洞上方地表位移的变化曲线。可以看出, 在入射波的频率较高时浅埋孔洞对地表位移的影响显著。在相同频率的入射波作用下, 不同入射角度和孔洞的形状对地表位移的影响也不相同。地表位移幅值的大小需综合考虑入射波频率、

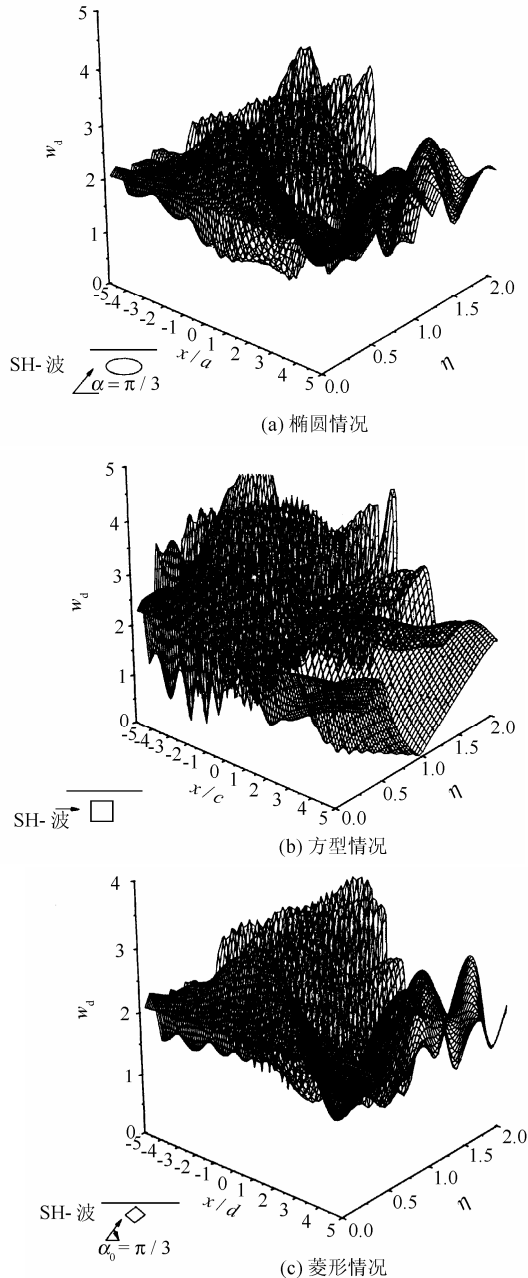


图3 地表位移幅值随频率的变化

Fig.3 Variation of surface displacement amplitudes with different frequencies

孔洞特征尺寸和入射角度不同。如图5中方孔上方的地表位移,在 $\eta = 2.0$ 的SH波垂直入射时就明显高于图4和图6中相同情况的椭圆孔和菱形孔上方的地表位移。由图4~6地表位移曲线可以看出,在SH波水平或倾斜入射时,在孔洞的背波面一侧地表位移的变化明显减缓,地表位移的幅值明显降低,这表明浅埋孔洞的迎波面对入射波的反射对其后面的区域产生了屏蔽,起到了隔振作用。随入射角度的增大这种作用将减弱。图7和图8给出了表示当 $\eta = 0.5$ 和 $\eta = 2.0$ SH波水平或垂直入射弹性半空间中不同埋深的方孔时方孔上方地表位移的变

化曲线。可以看出,随埋深 h 的增大,地表位移的变化趋于平稳。从 $\eta = 0.5$ 和 $\eta = 2.0$ 两种情况的对比看出,对于高频入射波地表位移随埋深的衰减比较慢,在垂直入射的情况下,当入射波频率较低时埋深为3倍特征尺寸就可以不考虑孔洞对地表位移的影响,而当频率较高时这种影响需15倍左右时才能消除。在相同的入射波频率下,水平入射时地表

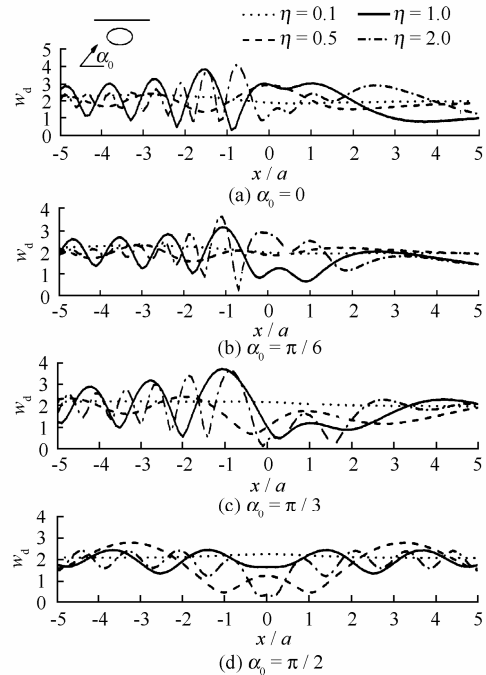


图4 含椭圆孔半空间地表位移幅值

Fig.4 Surface displacement amplitudes in half space with elliptic cavity

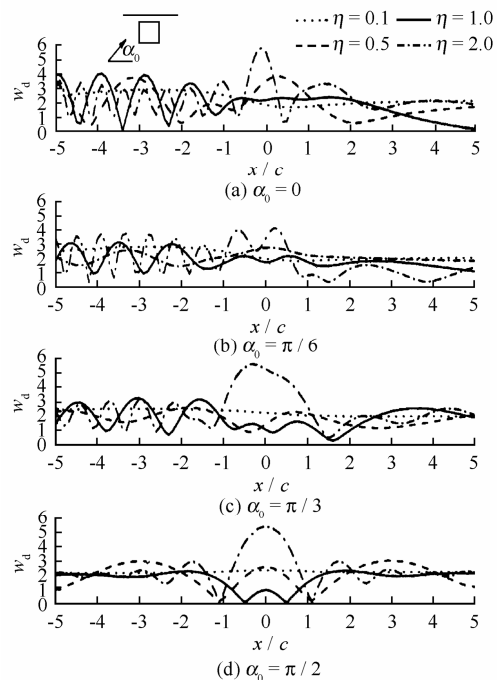


图5 含方形孔半空间地表位移幅值

Fig.5 Surface displacement amplitudes in half space with square cavity

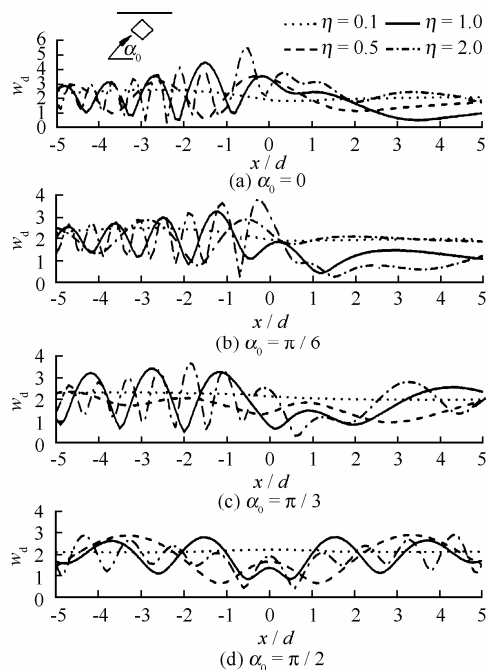


图6 含菱形孔半空间地表位移幅值

Fig.6 Surface displacement amplitudes in half space with rhombus cavity

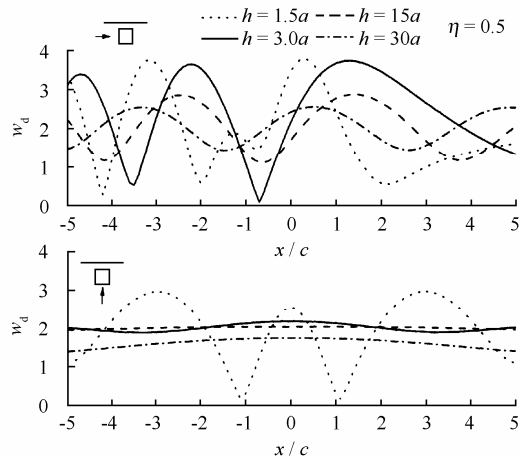


图7 地表位移幅值随埋深的变化(\$\eta = 0.5\$)

Fig.7 Variation surface displacement amplitudes to different depth (\$\eta = 0.5\$)

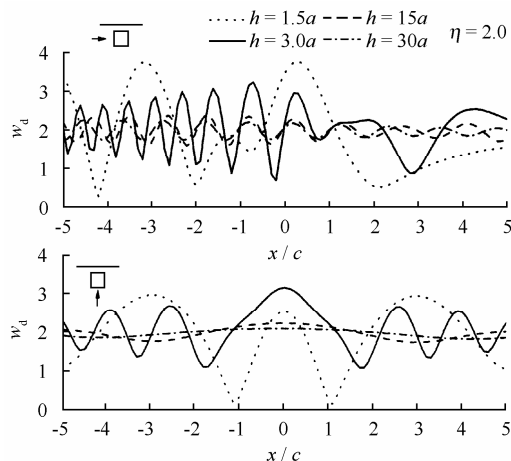


图8 地表位移幅值随埋深的变化(\$\eta = 2.0\$)

Fig.8 Variation surface displacement amplitudes with different depths (\$\eta = 2.0\$)

位移随埋深的衰减明显较垂直入射时要慢, 当水平入射波频率较低时, 孔洞的埋深也要大于 15 倍特征尺寸才能明显减少对地表位移的影响。图 7 和图 8 的数值结果与文[7]中相同埋深下圆孔相比, 位移幅值有明显的增加, 说明孔洞的形状、埋深和入射方向对地表位移的幅值都将产生较大的影响。

5 结 语

采用保角映射和多极坐标方法给出了 SH 波在弹性半空间中非圆孔洞上散射对地面运动影响的解析解。数值结果表明, 半空间中孔洞对地表位移有着较大的影响, 随孔洞埋深的增加其影响逐渐减弱, 但消除得很慢。孔洞浅埋时, 与水平表面之间存在强烈的相互作用, 地震动将受到很大影响。已修建的地下隧道、管线都可视为“隐蔽地形”, 在地面建筑物抗震设计时应应对这种“隐蔽地形”的存在予以充分重视。

参 考 文 献

- [1] 薄景山, 李秀领, 李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 2003, 2 (19): 11—15.
BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LI Shan-you. Some progress of study on the effect of site conditions on ground motion[J]. **World Earthquake Engineering**, 2003, 2(19): 11—15.
- [2] Trifunac M D. Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1973, (1): 267—281.
- [3] YUAN Xiao-ming, MEN Fu-lu. Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical hill[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1992, (21): 1 091—1 098.
- [4] 崔志刚, 曹欣荣, 刘殿魁. SH 波对半圆形凸起地形的散射[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18 (1): 140—146
CUI Zhi-gang, ZOU Yong-chao, LIU Dian-kui. Scattering of plane SH-wave by a cylindrical hill of circular-arc cross section[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1998, 18(1): 140—146.
- [5] LIU Dian-kui, HAN Feng. Scattering of plane SH-wave by cylindrical canyon of arbitrary shape[J]. **Soil Dynamic and Earthquake Engineering**, 1991, 10(5): 249—254.
- [6] Lee V W, Trifunac M D. Response of tunnels to incident SH-wave[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, 1979, 105: 643—659.

- [7] 刘殿魁, 林宏. 浅埋的圆柱形孔洞对 SH 波的散射与地震动[J]. 爆炸与冲击. 2003, 23(1): 6—12.
- LIU Dian-kui, LIN Hong. Scattering of SH waves by a shallow buried cylindrical cavity and the ground motion[J]. **Explosion and Shock Waves**. 2003, 23(1): 6—12.
- [8] Wang Guoqing, Liu Diankui. Scattering of SH-wave by multiple circular cavities in half space[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, 1(1): 36—44.
- [9] 齐辉, 王艳, 刘殿魁. 半无限空间界面附近 SH 波对圆形衬砌的散射[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 41—46.
- QI Hui, WANG Yan, LIU Dian-kui. Dynamic analysis of shallow embedded lining structure by incident SH-wave[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2003, 23(3): 41—46.
- [10] Lee V W, Karl J. Diffraction of SV waves by underground circular cylindrical cavities[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. 1992, 11: 445—456.
- [11] Lee V W, Karl J. On deformations of near a circular underground cavity subjected to incident plane P waves[J]. **European Journal of Earthquake Engineering**. 1993, (1): 29—36.
- [12] 梁建文, 纪晓东, Vincent W Lee. 地下圆形衬砌隧道对沿线地震动的影响(I): 级数解[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 520—524.
- LIANG Jian-wen, JI Xiao-dong, Vincent W Lee. Effects of an underground lined tunnel on ground motion(I): series solution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 26(4): 520—524.
- [13] 梁建文, 纪晓东, Vincent W Lee. 地下圆形衬砌隧道对沿线地震动的影响(II): 数值结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 687—692.
- LIANG Jian-wen, JI Xiao-dong, Vincent W Lee. Effects of an underground lined tunnel on ground motion (II): numerical results[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 26(5): 687—692.
- [14] LIANG Jian-wen, ZHANG Hao, Vincent W Lee. A series solution for surface motion amplification due to underground twin tunnels: incident SV waves[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2003, 2(2): 289—298.
- [15] 梁建文, 张浩, Vincent W Lee. 地下洞室群对地面运动影响问题的级数解答——P 波入射[J]. 地震学报, 2004, 26 (3): 269—280.
- LIANG Jian-wen, ZHANG Hao, Vincent W Lee. A series solution for surface motion amplification due to underground group cavities: Incident P waves[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2004, 26(3): 269—280.

杭州湾跨海大桥 26 日贯通长 36 公里居世界第一

6 月 14 日, 杭州湾跨海大桥主航道桥顺利合龙。当日, 位于浙江海盐海域内的杭州湾跨海大桥(北航道桥)最后一根钢箱梁顺利安装完工, 标志着世界最长的跨海大桥——杭州湾跨海大桥主航道桥顺利合龙。此次合龙的北航道桥为钻石型双塔双索钢箱梁斜拉桥, 主跨度 448 米, 通航标准 3.5 万吨, 是杭州湾跨海大桥跨度最大、通航能力最高的主航道桥。杭州湾跨海大桥将于 26 日举行全线贯通仪式, 大桥全长 36 公里, 建成后将缩短宁波至上海间的陆路距离 120 公里, 是国道主干线——同三线跨越杭州湾的便捷通道。

据介绍, 大桥建设创造了多项世界或国内第一: 杭州湾跨海大桥全长 36 公里, 其长度在目前世界上在建和已建的跨海大桥中位居第一; 在国内第一次明确提出了设计使用寿命大于等于 100 年的耐久性要求; 架设运输重量从 900 吨提高到 1430 吨, 到目前为止居世界第一; 在国内第一次成功实施了“二次张拉技术”; 采用整桩螺旋钢管桩, 最大直径 1.6 米, 单桩最大长度 89 米, 整桩螺旋钢管桩长度在国内外桥梁钢管桩中位居第一; 在滩涂区的钻孔灌注桩施工中, 第一次采用有控制放气的安全施工工艺, 这一施工工艺在世界同类地理条件中尚属首创。杭州湾跨海大桥创下多项世界第一。

据悉, 杭州湾跨海大桥全长 36 公里, 建成后将缩短宁波至上海间的陆路距离 120 公里, 是国道主干线——同三线跨越杭州湾的便捷通道。大桥按双向六车道高速公路设计, 设计时速 100 公里, 设计使用年限 100 年, 总投资约 118 亿元。2003 年 11 月 14 日开工, 经过 43 个月的工程建设, 计划于 2007 年 6 月 26 日全桥贯通, 于 2007 年 11 月 30 日前完成桥面铺装, 2008 年奥运会前建成通车。

(摘自中国土木网)