

文章编号: 1000-4750(2013)04-0275-06

轨道交通地表振动局部放大现象成因分析

马 蒙^{1,2}, 刘维宁¹, 王文斌²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 为研究轨道交通振动产生地表局部放大现象原因, 利用地表落锤试验和半空间位移格林函数解析解, 分析了振源位于地面和地下两种情况下单频振动的地表响应传播规律。结果表明: 1) 当振源位于地面时, 单一频率的地表振动响应幅值随距离呈现波浪形衰减, 波动间隔与其自身频率相关。地表体波和瑞利波衰减速度不同而引起的振动叠加效应是造成上述现象的主要原因。2) 当振源埋置于地下时, 单一频率的地表振动响应将在距振源与埋深大致相当的近场处产生一个明显的波峰或波谷, 在远场衰减规律与振源位于地面的情况近似。

关键词: 轨道交通; 振动放大区; 格林函数; 落锤试验; 波动衰减; 单频振动

中图分类号: TB533+.2; O326; O347.4+1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.12.0836

ANALYSIS ON THE REASONS OF GROUND VIBRATION AMPLIFICATION INDUCED BY RAILWAY TRAFFIC

MA Meng^{1,2}, LIU Wei-ning¹, WANG Wen-bin²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To study the reasons which cause the ground vibration amplification induced by railway traffic, the propagation laws of ground vibration responses for each frequency are analyzed with the help of both the drop-weight test and analytical solution of a displacement Green's function in a halfspace. The conditions include that the vibration source are on the surface and underground. Results show that: 1) when the vibration source applies on the surface, the ground vibration of each frequency attenuates with a fluctuation. There is an interval of fluctuation, which has the relationship with its frequency. Due to the difference of attenuation speeds of body wave and Rayleigh wave, the superposition of the two kinds of the waves mainly induce the phenomenon of fluctuant attenuation. 2) When the vibration source applies underground, there is an obvious wave crest or trough in an adjacent field, whose location is related to the embedded depth of source. In a far field, the similar fluctuant attenuation with the first condition can be found.

Key words: railway traffic; vibration amplifying area; Green's function; drop-weight test; fluctuant attenuation; harmonic vibration

轨道交通引起的振动经由轨道系统、隧道结构(地下轨道交通)、土层传至受振体; 受辐射阻尼和材料阻尼影响, 振动能量在土体中衰减。以往研究认为, 地表振动随距离单调衰减。在国内, 刘维宁和夏禾等^[1]通过三维动力有限元模拟地铁振动, 首

次发现了振动局部放大现象。此后, 夏禾等^[2-3]通过测试地面和高架轨道交通环境振动, 证明了局部放大现象的存在。国内外其他学者对高速铁路^[4]、城市轨道交通^[5-7]的现场测试表明, 无论是总体振动响应(如振动均方根值、振级等评价量)还是单一

收稿日期: 2011-12-08; 修改日期: 2012-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008017)

通讯作者: 马 蒙(1983-), 男, 四川成都人, 博士, 从事轨道交通环境振动研究(E-mail: mameng_02231250@163.com).

作者简介: 刘维宁(1960-), 男, 江西龙南人, 教授, 博士, 博导, 从事隧道工程与城市轨道交通工程研究(E-mail: wnliu@bjtu.edu.cn);

王文斌(1982-), 男, 山东济南人, 博士, 从事轨道交通环境振动研究(E-mail: 07115273@bjtu.edu.cn).

频率的振动响应,均存在地表振动随距离增加而出现增大反弹的现象。对放大区产生原因的解释,夏禾等认为: S 波在地表和基岩间的软土中传播时反复反射和折射是引起振动局部放大的原因^[2-3]。阎维明等认为放大现象产生与地层条件与埋深有关^[6]。栗润德等^[5]认为:放大区与测点所处振动位置与测点处局部地质条件有关。

从工程角度分析,如果距离振源较远处的振动响应远远超过近处,采用单调衰减模式的预测公式评价振动响应则会产生较大误差。目前,国内外绝大多数经验预测公式没有考虑振动放大现象。杨先健等^[8-10]提出的工业振源引起地面振动传播和衰减的计算方法,引入了埋深影响系数,能够计算出地下振源引起地表振动放大现象。闫维明等采用组合函数方法给出了一个可以考虑高架交通振动放大区的 Z 振级经验预测公式^[11],通过统计回归公式提出了可以考虑地铁交通振动放大区的振级经验预测公式^[7]。这些研究为寻求考虑振动放大区的轨道交通环境振动预测提供了一些参考。

研究表明^[1,6]:不同频率的振动放大规律可能存在差异。尽管轨道交通振动是包含各种频率范围的随机振动,但对于某些对单一频率有特殊振动要求的受振体(如精密仪器设备),轨道交通振动的单频分量产生的放大区将直接影响受振体的振动控制;另一方面,由于轨道交通振动的总体振动响应可看作是所有单一频率分量的叠加,因此弄清单频简谐振动放大区的成因和规律将尤为重要,这也是本文分析的重点。

1 落锤激振试验

为了进一步验证单频振动在地表不是单调衰减的,本节首先设计一地面落锤激振试验。落锤试验可以激发出较宽的响应频带,可通过傅里叶变换一次性分析所有关心频率的衰减特性。

在空旷的场地上安置落锤装置锤击地面。安装 5 个配重试件,每块重 14.6kg,因受导杆导槽摩擦力很小,下落过程可近似认为是自由落体。落锤提升高度为 20cm,选用铁质垂体、铝制锤头;并采用多次触发方式,触发次数为 4 次。场地土从上到下主要有填土、砂土、砂质粉土、粉质粘土、卵石等。表层土剪切波速 176m/s,压缩波速 365m/s。由于 60m 以外测点加速度数据信噪比较低,因此只在 0~60m 范围内间隔 1m 布置加速度传感器(图 1)。



图 1 地表落锤试验

Fig.1 Drop-weight test

利用傅里叶变换分析得到每一测点振动响应的频谱,并进一步得到响应实部、虚部和幅值随距离变换的函数,其中幅值函数定义为:

$$A(r) = \sqrt{[\text{Re}(A(r))]^2 + [\text{Im}(A(r))]^2} \quad (1)$$

式中, Re 和 Im 分别表示实部和虚部。图 2 为频率分量分别为 15Hz、18Hz 和 26Hz 的振动加速度幅值、实部和虚部随距离衰减的结果。可以看出,无论是实部(或虚部)还是幅值均具有明显的波动衰减

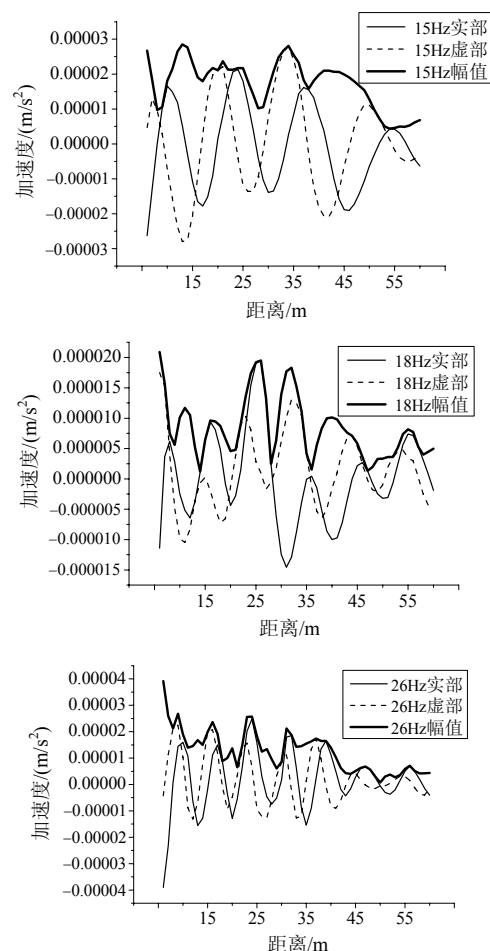


图 2 落锤试验不同频率分量的波动衰减

Fig.2 Fluctuant attenuation of different frequency by drop-weight test

特性；相比幅值而言，实部(或虚部)的波动规律更为明显。

通过落锤激振试验不难发现，单独分析某频率时，地表振动响应的幅值随距离并不是单调递减的，而是不规则地波动衰减。频率越高，两波峰(或波谷)间的距离(该距离并非恒定的，下文简记为波动间隔 L ，以区别于波长的概念)越小；频率越低，波动间隔越大。

2 地表振源作用下单频振动衰减特性

2.1 计算模型

由于落锤激振试验是在实际的场地上完成的，因此无法排除土层不均匀的影响因素、也无法对激振振源的埋深进行控制，同时由于信噪比较低，远距离振动响应测试结果的误差较大。为了实现对上述影响因素的有效控制，研究竖向单一频率激振下地表响应规律，本节采用直接刚度法^[12]计算成层土体的位移格林函数^[13-14]。由于测试结果表明，绝大多数放大区第一次出现的位置在距离线路轴线 40m 内的近场，根据文献[15]的研究表明，列车振源在数学上可以近似模拟为竖向谐振线荷载，地基土可以看作各向同性的弹性半空间平面应变问题求解。因此选取二维简化模型，为方便后文研究埋置振源情况，考虑了竖向谐振线荷载作用下半空间任意一点时，自由表面竖向位移场的情况。

假设成层土体(图3)第 i 个交界面上作用竖向简谐荷载 $p^i(x,t)$ ， x 和 t 分别表示水平方向坐标和时间，由此可将荷载在空间域内分解为：

$$p^i(x,t) = \hat{p}^i(x)e^{i\omega t} + \hat{p}^{i*}(x)e^{-i\omega t} \quad (2)$$

式中： $\hat{p}^i(x)$ 为与空间位置相关的荷载复幅值； \hat{p}^{i*} 为 $\hat{p}^i(x)$ 的共轭复值； ω 为谐振圆频率；虚数单位 $i = \sqrt{-1}$ 。通过傅里叶变换将式(2)由水平空间坐标 x

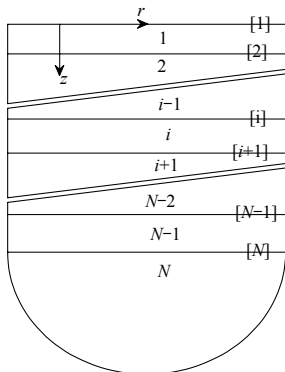


图3 成层半空间土体示意图
Fig.3 Layered halfspace soil model

转换为水平波数坐标 k_x ：

$$\tilde{p}^i(k_x,t) = \tilde{p}^i(k_x)e^{i\omega t} + \tilde{p}^{i*}(k_x)e^{-i\omega t} \quad (3)$$

同理，可以得到空间域和波数域内的位移场表达式：

$$u(x,z,t) = \hat{u}(x,z)e^{i\omega t} + \hat{u}^*(x,z)e^{-i\omega t} \quad (4)$$

$$\tilde{u}(k_x,z,t) = \tilde{u}(k_x,z)e^{i\omega t} + \tilde{u}^*(k_x,z)e^{-i\omega t} \quad (5)$$

为了获得对称的刚度矩阵，将荷载向量 \tilde{p}^i 和位移向量 $\tilde{u}(z)$ 分别在 z 方向乘以虚部单位 i ，得到修正后的层间荷载 \check{p}^i 和位移向量 $\check{u}(z)$ ，即：

$$\check{p}^i = T\tilde{p}^i, \quad \check{u}(z) = T\tilde{u}(z) \quad (6)$$

式中， $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & i \end{bmatrix}$ 。整个半空间中，由层间荷载

\check{P} 作用引起层间位移 \check{U} 的平衡方程可表示为：

$$\check{P} = \check{K}\check{U} \quad (7)$$

式中： \check{P} 、 \check{U} 分别由各层修正后的荷载向量、位移向量集总获得； \check{K} 由各层单位刚度矩阵集总获得。当荷载作用位置不在土层分界面上时，采用人工设置分界面的方法。各层土内部的位移场采用位移形函数获得，具体方法参见文献[12-13,16]。

当考虑竖向谐振线荷载作用于点 $(0,z')$ 时，频域-空间域内荷载向量表示为：

$$\hat{p}(x,z,\omega) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta(x)\delta(z-z') \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中， $\delta(x)$ 为 Dirac 函数。通过傅立叶变换获得波数域内修正后荷载向量：

$$\check{p}(k_x,z,\omega) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ i\delta(z-z') \end{Bmatrix} \quad (9)$$

相对应的位移即为频率-波数域内的格林函数：

$$\check{u}(k_x,z,\omega) = \begin{Bmatrix} \check{u}_{zx}^G(z',k_x,z,\omega) \\ 0 \\ i\check{u}_{zz}^G(z',k_x,z,\omega) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

通过逆傅里叶变换，得到本文关心的竖向荷载作用下的竖向位移格林函数在空间域内的表达：

$$\hat{u}_{zz}^G = F^{-1}[\check{u}_{zz}^G;x] \quad (11)$$

2.2 均匀半空间单频振动衰减特性

为了排除振动在多层土之间产生的反射和折射效应，利用 2.1 节推导的模型，研究地表作用竖向简谐荷载时，均匀半空间表面的振动衰减规律。

为了在同一坐标尺度下比较不同频率振动衰减特性，将地表位移幅值作归一化处理：即将地表各点振动响应值除以 $x=0$ 点的响应值。计算结果如图 4 所示：每个频率的地表振动随距离呈现出“波浪形”衰减，且振动频率 f 与波动间隔 L 存在反相关关系：即 f 越小、 L 越大。例如当 $f=1\text{Hz}$ 时，100m 的衰减距离不足以捕捉到该频率的再次放大现象，当 $f=10\text{Hz}$ 时，100m 距离可以捕捉到 3 个波峰；当 f 较大时， L 很小，衰减曲线呈现出锯齿状。上述结果表明：任意单一频率的地表响应幅值随距离并非单调衰减的，而是呈现波浪形衰减，其波动间隔与自身频率有关。可见，当仅研究某一频率产生放大区原因时，土层、振源埋深并不是决定性的内在因素。

同时，由于本文进行地表振动响应分析时，地表拾振点间距取得很小(落锤激振试验中，间距为 1m；计算分析时，间距为 0.1m)，因此可以清晰地捕捉到每一频率波动衰减的特征。而以往的研究在进行这一问题测试和分析时，拾振点间距过大(通常为 5m 或 10m)，这样，对于较高的频率，上述拾振点间距不足以捕捉到完整的波动间隔。这也是一些研究者分析单一频率的地表传播特性时，认为只有频率很低时才会出现地表放大特性的原因。

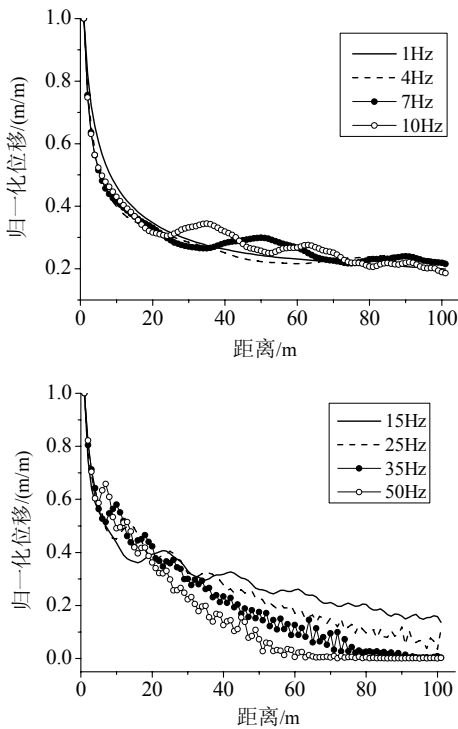


图 4 不同频率的波动衰减

Fig.4 Fluctuant attenuation of different frequency

Kuhlemeyer 也曾发现过这种振源频率分量 f 与

波动间隔 L 的反相关关系，他在其博士论文中提出：这种反相关关系恰好满足反比例函数：

$$f \times L = C \tag{12}$$

式中， C 为常数。通过地表简谐激振试验，Kuhlemeyer 认为常数 C 的取值与瑞利方程中舍弃的增根有关^[17]。然而，由于其激振试验中传感器间隔过大，难以准确捕捉较高频率的波动间隔，因此该结论有待商榷。

2.3 单频振动幅值波动衰减原因分析

尽管振动响应幅值及实部(或虚部)都呈现出随距离波动衰减的特性，然而其成因是不同的。事实上在图 2 中，振动的实部和虚部满足频率、波长与波速的关系式，即：

$$f \times \lambda = C_R \tag{13}$$

式中： λ 为实部(或虚部)的波长(即实部或虚部波动衰减的“波动间隔”)； C_R 为瑞利方程的实根，即瑞利波速。

对幅值而言，假设瑞利波幅值为 w_R ，当忽略材料阻尼的影响时，瑞利波引起的位移幅值可以近似为：

$$w_R = \frac{A_R}{\sqrt{r}} e^{i\omega(t-r/C_R)} \tag{14}$$

式中： A_R 为瑞利波的位移最大幅值； r 为响应点与振源的距离； ω 为圆频率； C_R 为瑞利波波速。式(14)由实部和虚部两部分构成，当只分析实部和虚部时，很容易验证其自身的传播在距离上是存在固定波长的波动衰减特性的，即满足式(13)关系。然而，当分析幅值随距离衰减时，根据式(1)的定义：

$$|w_R| = \frac{A_R}{\sqrt{r}} |e^{i\omega(t-r/C_R)}| = \frac{A_R}{\sqrt{r}} \tag{15}$$

可见，尽管瑞利波的实部和虚部均随距离增加而波动衰减，但在求其幅值时，实部和虚部的波动效应恰好完全抵消掉，即：瑞利波幅值的衰减是单调无波动特性的——这便无法解释图 2 和图 4 的现象。

事实上，实际地表振动衰减规律并非单纯取决于瑞利波的衰减特性，距振源 100m 范围内，体波对地表振动的贡献是不能忽略的。为此，假设 S 波和 P 波的振动幅值的分别为 w_S 和 w_P ，当忽略材料阻尼的影响时，S 波和 P 波的振动位移可以分别近似为：

$$w_S = \frac{A_S}{r} e^{i\omega(t-r/C_S)}, w_P = \frac{A_P}{r} e^{i\omega(t-r/C_P)} \tag{16}$$

而地表振动响应由瑞利波和体波叠加而成：

$$w = w_R + w_S + w_P \quad (17)$$

为了简化分析过程,先忽略P波的贡献,仅讨论瑞利波和S波的叠加效应。将式(15)和式(16)代入式(17),并令 $w_P=0$,则有:

$$w = w_R + w_S = \frac{A_R}{\sqrt{r}} e^{i\omega(t-r/C_R)} + \frac{A_S}{r} e^{i\omega(t-r/C_S)} \quad (18)$$

利用 Euler 公式展开,合并实部和虚部得:

$$w = \left[\frac{A_R}{\sqrt{r}} \cos\left(\omega t - \frac{\omega r}{C_R}\right) + \frac{A_S}{r} \cos\left(\omega t - \frac{\omega r}{C_S}\right) \right] + i \left[\frac{A_R}{\sqrt{r}} \sin\left(\omega t - \frac{\omega r}{C_R}\right) + \frac{A_S}{r} \sin\left(\omega t - \frac{\omega r}{C_S}\right) \right] \quad (19)$$

再利用和差化积公式,可计算得到位移幅值的平方为:

$$|w|^2 = \frac{A_R^2}{r} + \frac{A_S^2}{r^2} + \frac{2A_R A_S}{r\sqrt{r}} \cos\left(\frac{\omega r}{C_S} - \frac{\omega r}{C_R}\right) \quad (20)$$

因此,瑞利波和S波的叠加引起的位移响应幅值随距离变化的函数为:

$$w(r) = \sqrt{\frac{A_R^2}{r} + \frac{A_S^2}{r^2} + \frac{2A_R A_S}{r\sqrt{r}} \cos\frac{\omega r}{C_{SR}}} \quad (21)$$

式中, $\frac{1}{C_{SR}} = \left(\frac{1}{C_S} - \frac{1}{C_R}\right)$ 。可见,当瑞利波与体波

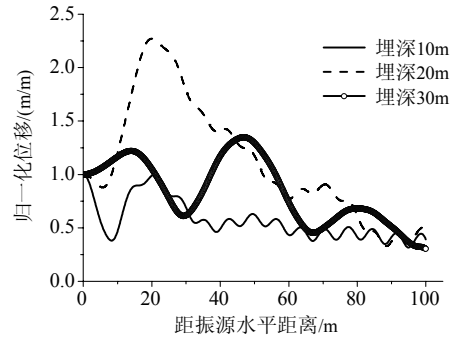
相互叠加后,振动响应的幅值将含有一个耦合的随距离而波动的项,如 $\cos(\omega r/C_{SR})$;因此,在地表观测到的振动响应幅值的衰减也不再是简单的单调递减函数,而是以一定波动间隔进行波浪形衰减的曲线。这便能够解释图4中振动幅值随距离呈波浪型衰减的原因。

3 埋置振源作用下单频振动衰减特性

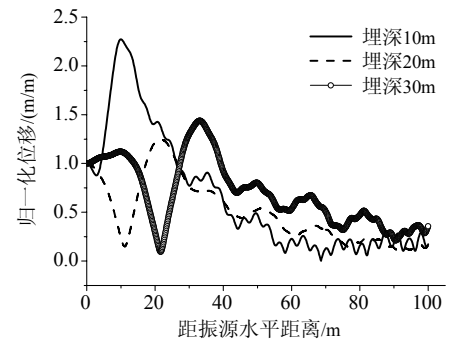
以往的研究发现,地铁引起的地表振动放大现象要显著多于地面轨道交通和高架轨道交通。可以预见,振源的埋置很可能是导致地表放大区产生的另一个重要原因。为此,仍采用2.1节中推导的模型,研究埋置振源为竖向简谐荷载时,均匀半空间表面的振动衰减规律。

图5为在距离地表3种不同埋深(10m、20m和30m)处作用竖向简谐荷载时(10Hz和20Hz),地表位移幅值随距离衰减特性。可以发现,埋置振源与地表振源引起地表振动衰减规律有着非常明显的区别:1)当振源埋置时,地表最大振动幅值不再处于水平坐标原点($x=0$)处。这说明振源埋置时,地表放大现象被明显放大。2)地表波动衰减特性依旧

存在,只是相比地表振源,埋置振源会引起近场振动幅值出现一个较大的波动反弹,第一次反弹的位置与埋深有关;而反弹之后,远场振动幅值继续表现出波动特性,这与地表振源情况类似。



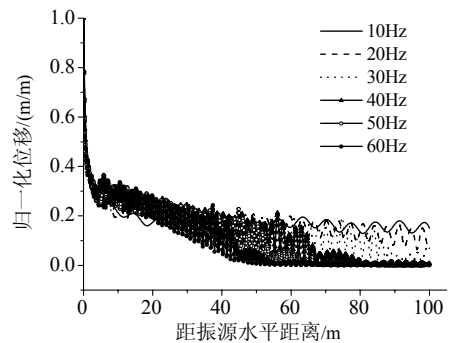
(a) 10Hz



(b) 20Hz

图5 埋置振源作用下地表位移幅值衰减特性
Fig.5 Attenuation characteristic of ground displacement amplitude by embedded source

为了分析埋深对近场幅值反弹位置的影响,将不同振源频率、相同埋深的地表衰减幅值绘制在一起进行比较,如图6所示。可以发现,当振源作用于地表时(埋深0m),不存在近场幅值反弹现象;当振源埋置时,近场幅值反弹明显,且第一次反弹的位置与水平原点的距离近似等于埋深:即图6(b)在约 $x=10\text{m}$ 处反弹,图6(c)在约 $x=20\text{m}$ 处反弹,图6(d)在约 $x=30\text{m}$ 处反弹。但反弹方向并不固定:有可能在反弹位置处出现振幅突然增大的“波峰”,也有可能突然减小的“波谷”。



(a) 地表振源(埋深0m)

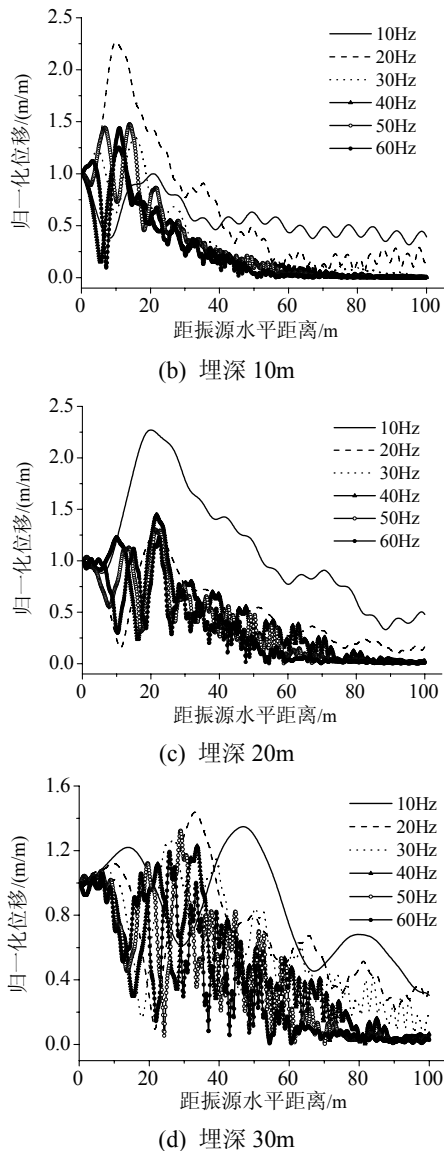


图6 振源埋深对近场放大区位置的影响
Fig.6 Influence of source depth to the location of vibration amplifying area

可见,对于单频振动,地下振源与地表振源引起地面振动放大现象的主要原因是不同的。地下振源会在与埋深相近的水平距离处出现非常明显的振动增大现象,这与文献[6]的测试结果是吻合的。

4 结论

影响轨道交通产生地表振动局部放大现象的因素很多,例如建筑物基础、地下埋置的管线、地下空洞的存在都有可能引起附近地表振动响应场发生较大变化。本文重点讨论了单一频率振动在均匀半空间地表传递的规律,限于文章篇幅,对于成层半空间的情况将另撰文分析。

分析结果表明:

(1) 当振源位于地面时,单一频率的地表振动

响应幅值随距离呈现波浪形衰减,波动间隔与其自身频率相关。造成这一现象的原因是地表体波和瑞利波衰减速度不同而引起的振动叠加效应。在实际工程中,由于低频振动的波动间隔长、衰减速度慢,因此这种波动衰减的效应不能被忽视。当敏感振动体对单一低频振动有专门要求时(如某些精密仪器),需要重点考虑这种波动衰减效应。

(2) 当振源埋置于地下时,单一频率的地表振动响应将在距振源与埋深大致相当的近场处产生一个明显的波峰或波谷,在远场衰减规律与振源位于地面的情况近似。在实际工程中,当振动敏感体对单一频率振动有专门要求时,应注意避开这种由振源埋置因素引起的放大区。

参考文献:

- [1] 刘维宁,夏禾,郭文军. 地铁列车振动的环境响应[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊): 586—593.
Liu Weining, Xia He, Guo Wenjun. Environmental response of metro train vibrations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(Suppl): 586—593. (in Chinese)
- [2] 夏禾,张楠,曹艳梅. 列车对周围地面及建筑物振动影响的试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 93—98.
Xia He, Zhang Nan, Cao Yanmei. Experimental study on train-induced vibrations of ground and nearby buildings [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(4): 93—98. (in Chinese)
- [3] Xia H. Characteristics of traffic induced vibrations and their effects on environments [C]. Beijing: International Symposium on Traffic Induced Vibrations & Controls, 2001: 83—90.
- [4] Degrande G, Lombaert G. High-speed train induced free field vibrations: In situ measurement and numerical modeling [C]// Chou N, Schmid G, eds. Proceedings of the International Workshop Wave, Ruhr University, Bochum, Germany, 2000: 29—41.
- [5] 栗润德,张鸿儒,刘维宁. 地铁引起的地面振动及其对精密仪器的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 206—214.
Li Runde, Zhang Hongru, Liu Weining. Metro-induced ground vibrations and their impacts on precision instrument [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 206—214. (in Chinese)
- [6] 闫维明,聂晗,任珉,等. 地铁交通引起地面振动的实测与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(2): 1—5.
Yan Weiming, Nie Han, Ren Min, et al. In situ experiment and analysis of ground surface vibration induced by urban subway transit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(2): 1—5. (in Chinese)
- [7] 闫维明,张玮,任珉,等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 149—154.
Yan Weiming, Zhang Yi, Ren Min, et al. In situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(2): 149—154. (in Chinese)

(参考文献[8]—[17]转第309页)

(4) 水泥膨胀体会引起外钢管环向受拉及内钢管及水泥浆体环向受压, 但外钢管环向拉应力较大, 因此设计时应当心钢管的环向屈服; 同时水泥浆体膨胀会引起内、外钢管及水泥浆体径向受压, 但外钢管与水泥浆体界面初始压应力大于内钢管与水泥浆体界面初始压应力。

参考文献:

- [1] Lampert W B, Jirsa J O, Yura J A. Strength and behavior of grouted pile-sleeve connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117: 2477—2498.
- [2] Boswell L F, Mello C D. The experimental behavior of grouted connections for construction and repair [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1985: 835—844.
- [3] 龚顺风, 沈伟雄, 李峰, 等. 海洋平台的灌浆卡箍技术研究[J]. *海洋工程*, 2001, 19(3): 32—37.
Gong Shunfeng, Shen Weixiong, Li Feng, et al. Study on technique of grouted clamp for offshore platforms [J]. *Ocean Engineering*, 2001, 19(3): 32—37. (in Chinese)
- [4] 金伟良, 宋剑, 龚顺风, 等. 海洋平台受损构件的承载能力与加固分析. *工程力学*, 2003, 20(5): 100—105.
Jin Weiliang, Song Jian, Gong Shunfeng, et al. Analysis of bearing capacity and strengthening of damaged members for offshore platform [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(5): 100—105. (in Chinese)
- [5] 赵媛媛, 蒋首超. 灌浆套管节点技术研究概况[J]. *工业建筑*, 2009, 39(增刊): 514—517.
Zhao Yuanyuan, Jiang Shouchao. A general view of research on grouted tubular connections [J]. *Industrial Construction*, 2009, 39(Suppl): 514—517. (in Chinese)
- [6] 王震. 预应力灌浆套管的结构性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
Wang Zhen. Structural performance of prestressed grouted pile-to-sleeve connection [D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)
- [7] Zhao X L, Grundy P, Lee Y T. Grout sleeve connections under large deformation cyclic loading [C]. *Proceedings of 2002 ISOPE Conference*, Vol. IV. Kitakyushu, Japan, CD-Rom, 2002.
- [8] Jiang S C, Wang Z, Zhao X L. Structural performance of prestressed grouted pile-to-sleeve connections [C]. *Proceedings of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, 2011, Paper No.364.
- [9] 吴家龙. 弹性力学(新一版)[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993: 175—186.
Wu Jialong. *Elasticity (New Edition)* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1993: 175—186. (in Chinese)
- [10] Health & Security Executives. *Pile/sleeve connections* [R]. Norwich: Offshore Technology Report (2001/016), 2002.

(上接第 280 页)

- [8] 杨先健. 人为地面振动的传播与衰减[C]// 李永盛, 高广运. 首届环境岩土工程学术交流会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2002: 35—41.
Yang Xianjian. Propagation and attenuation of man made ground vibrations [C]// Li Yongsheng, Gao Guangyun. *Proceeding of 1st Conference of Geoenvironmental Engineering*. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 35—41. (in Chinese)
- [9] 高广运, 何俊锋, 李志毅, 等. 列车运行引起的地面振动衰减分析[J]. *交通科学与工程*, 2010, 26(1): 74—78.
Gao Guangyun, He Junfeng, Li Zhiyi, et al. Analysis on attenuation of ground vibration induced by moving train [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2010, 26(1): 74—78. (in Chinese)
- [10] 杨先健. 弹性波的传播与衰减[M]// 徐建. 隔振设计规范理解与应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Yang Xianjian. Propagation and attenuation of elastic waves [M]// Xu Jian. *Understanding and Application of Code for Design of Vibration Isolation*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [11] 常乐, 闫维明, 任珉, 等. 高架路交通诱发的地面振动测试与分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2009, 29(2): 175—178.
Chang Le, Yan Weiming, Ren Min, et al. Test and analysis of ground vibration induced by elevated road traffic [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2009, 29(2): 175—178. (in Chinese)
- [12] Kausel E. *Fundamental solutions in elastodynamics: A compendium* [M]. New York: Cambridge University Press, 2006: 140—184.
- [13] Schevenels M. The impact of uncertain dynamic soil characteristics on the prediction of ground vibrations [D]. Leuven: K.U. Leuven, 2007.
- [14] Schevenels M, Degrande G, François S. EDT: An ElastoDynamics Toolbox for MATLAB [C]// *Proceedings of the International Conference of the Engineering Mechanics Institute*. Minneapolis, USA: 2008.
- [15] Gutowski T G, Dym C L. Propagation of ground vibration: A review [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, 49(2): 179—193.
- [16] 刘卫丰. 地铁列车运行引起的隧道及自由场动力响应数值预测模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
Liu Weifeng. Study on numerical prediction model of metro train induced vibrations in tunnels and free field [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [17] Kuhlemeyer R. Vertical vibrations of footings embedded in layered media [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1969.