

Gibson 地基波阻板隔振分析

孙雨明¹, 李伟², 高广运³

(1. 上海应用技术学院土木建筑与安全工程学院, 上海 200235; 2. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011; 3. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:采用薄层法层状半空间基本解答作为格林函数的边界元法,对 Gibson 地基三维波阻板(WIB)隔振设计进行了详细的参数分析。结果表明 Gibson 地基内采用 WIB 隔振有较好的隔振效果;应保证 WIB 具有合理的宽度和较小的埋深;增加 WIB 的厚度和模量是提高隔振效果的最有效的两种措施;此外地基竖向模量变化对 WIB 隔振效果也具有一定的影响。本文的研究成果对于 WIB 隔振设计的推广使用具有重要意义。

关键词: Gibson 地基; 波阻板; 半解析边界元法; 薄层法; 土-结构动力相互作用

中图分类号: TU352.1; O328 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)01-0040-06

Analysis of Vibration Isolation Using WIB for Gibson Ground

SUN Yu-ming¹, LI Wei², GAO Guang-yun³

(1. School of Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China;

2. Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Considering the fundamental solution of Gibson halfspace obtained by Thin-layer method as the Green function for BEM, some parameters in the design of 3-D Wave Impeding Block (WIB) isolation for the Gibson homogenous elastic halfspace and stratified foundation are studied in detail. The result indicates that relatively good isolation effect can be obtained by WIB in the Gibson foundation, while the WIB has reasonable breadth and relatively small embedment depth. Increasing the thickness and modulus of WIB is most effective way to get a good effect of isolation. The Gibson ground's property has some influence on the effect of isolation also. The research in this paper will be helpful for the application of WIB in popular.

Key words: Gibson foundation; Wave Impeding Block (WIB); BEM; Thin-layer method; Dynamic soil-structure interaction

0 引言

随着社会的发展,各种振动公害问题(动力机器、铁路、公路、爆炸、打桩、强夯等)日益频繁,对临近的建筑物及地下管线、精密仪器和设备、人们的生活环境和工作环境具有不可忽视的影响。国际上已把人工振动列为七大公害之一,因此对各种人工振动对环境的影响和治理研究是土动力学领域的一个

热点问题。

除动力基础和工程施工之外,铁路交通引起的环境振动是公众反应最强烈的。特别是当铁路通过软土地区时,其产生的振动问题尤为突出。

目前铁路交通常用的隔振方式有:设置橡胶支撑、增强路基土的强度、采用屏障隔振等。高广运等^[1-2]研究了层状地基空沟隔振。另一种可供选择

收稿日期:2009-12-29

基金项目:上海市教育委员会重点学科建设项目(J51502);上海市科学技术委员会项目(09QB1402800);上海市教育委员会科研(创新)项目

作者简介:孙雨明(1963-),男(汉族),山西晋中人,副教授,博士,主要从事土动力学与地基处理的研究。

的隔振方法是使用埋置在振源或被保护结构下的弹性隔板进行隔振;其思想来源于受表面激振的层状地基中波的传播存在截止频率,当激振频率低于截止频率时,地基中不存在波的传播现象。利用这个效应,Schmid等^[3]建议使用一个刚性层来形成有限尺寸的人工基岩,并将这个人工基岩称为波阻板(Wave Impeding Block, WIB);其后 Takemiya^[4,5]分别用边界元和有限元法研究了 WIB 的隔振效果。Peplow^[6]则采用边界积分方程法研究了双层地基 WIB 隔振效果。我国新修订的《隔振设计规范》^[7]也首次将 WIB 纳入推荐的隔振方式,但目前国内尚未对 WIB 隔振设计进行过详细分析。

WIB 隔振设计属于土与结构动力相互作用问题,由于其复杂性,目前常用的分析方法主要是数值模拟(边界元法、有限元法)和试验验证。其中有限元法需要在一个较大区域内离散,计算工作量很大;边界元法则仅需在土与结构界面处进行离散,计算量较小。

天然地基大多具有分层性、不规则边界或各向异性等特性。试验结果表明,即使对于自然沉积的天然土层,其刚度(以弹性模量表示)也随着有效围压而改变,也就是说其弹性模量会随着深度的增加而逐渐改变,可以将这样的土层定义为竖向非均匀地基。这其中假设土体剪切模量随深度线性增加的 Gibson 地基模型得到了广泛的应用。但试验表明,大多数情况下土体的剪切模量与深度应该是一种非线性关系,所以许多学者建议土体的剪切模量应采用随深度呈幂函数或指数函数变化的模型。考虑到土体剪切模量不会无穷增大,因此本文研究如式(1)所示的 Gibson 地基模型:

$$\mu_s(z) = \mu_{s0}(1 + \beta z)^n \quad (1)$$

式中: $\mu_s(z)$ 、 μ_{s0} 分别代表深度 z 与地表处土体的剪切模量。

为了能更好的模拟 Gibson 地基,本文采用一种特殊的半解析边界元法,即采用薄层法层状地基的格林函数作为边界元法的基本解答。利用该方法对 Gibson 地基中 WIB 隔振进行详细分析。

1 层状半空间的频域边界元法

1.1 格林函数的推导

边界元法是利用基本解函数将微分控制方程的定解问题转化为边界积分方程求解,因此寻求恰当的基本解函数是边界元法求解的关键。在土与结构动力相互作用的研究中,通常是采用均质全空间或

均质半空间的解析格林函数,但这种格林函数应用到层状地基时会导致系统的自由度急剧增大,运算时间的巨大消耗。为此一些研究者致力于层状半空间格林函数的研究,薄层法(Thin-layer method)得到了广泛的应用^[8-9]。

薄层法属于一种半解析半数值方法,其基本思想是将土体沿竖向进行有限元离散,划分成一些很薄的子土层,如图1所示。对剩余的坐标方向采用解析法求解。因此对于轴对称问题,利用竖向坐标的插值函数和加权余量法对波动方程进行离散,可以得到一组由各层节点表示的偏微分方程组,然后再对水平坐标 x 和时间变量进行 Fourier 变换,可以得到以矩阵形式的表达式:

$$\bar{\mathbf{P}}_m = \mathbf{K}\bar{\mathbf{U}}_m \quad (2)$$

式中: $\mathbf{K} = [\mathbf{A}]k^2 + [\mathbf{B}]k + [\mathbf{C}]$ 为总体刚度矩阵, $3N \times 3N$ 维; N 是结点总数; k 是水平波数; $[\mathbf{A}]$ 、 $[\mathbf{B}]$ 和 $[\mathbf{C}]$ 是只与材料特性有关的矩阵; $\bar{\mathbf{U}}_m$ 为频率波数域的结点位移向量, $3N \times 1$ 维; $\bar{\mathbf{P}}_m$ 为频率波数域的结点力向量, $3N \times 1$ 维。

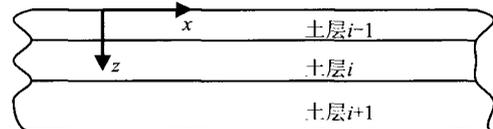


图1 土的分层示意图

Fig. 1 Sketch of layered ground.

式(2)所示方程组可以采用振型叠加法进行求解。解式(2)对应的齐次方程组可得到一组特征值与特征向量,可设与特征值 k_i 相应的特征向量为 $\{\mathbf{U}_i\}$ 。同时,对于层状半空间不可能对竖向坐标进行无限离散,所以在一定深度处需要采取旁轴近似方法来模拟更深处半空间土体。利用特征值与特征向量则可从式(2)中解得频率波数域中的结点位移向量 $\bar{\mathbf{U}}_m$ 与结点力向量 $\bar{\mathbf{P}}_m$ 的关系式,然后对所得的关系式进行水平波数 Fourier 逆变换,则可以得到空间频率域中的结点位移向量 $\{\mathbf{u}\}$ 与结点力向量 $\{\mathbf{p}\}$ 的关系式:

$$\{\mathbf{u}\} = [\mathbf{U}]\{\mathbf{p}\} \quad (3)$$

式中: $\{\mathbf{u}\}$ 为频域内的结点位移向量, $3N \times 1$ 维; $\{\mathbf{p}\}$ 为频域内的结点力向量, $3N \times 1$ 维; $[\mathbf{U}]$ 为频域内的位移基本解答, $3N \times 3N$ 维。

在位移的基本解得到以后,可以通过土体的本构方程和几何方程求得力的基本解。关于薄层法求解层状半空间格林函数的详细推导可参考文献[10]。

1.2 层状半空间频域边界元法

频域内的动力边界元法的边界积分方程可以表示为

$$cu'_j(\xi) = \int_S U_{ji}(x, \xi, \omega) t'_i(x) dS(x) - \int_S T_{ji}(x, \xi, \omega) u'_i(x) dS(x) \quad (4)$$

式中： u'_i, t'_i 为边界上的位移和力； U_{ji}, T_{ji} 为由上节得出的层状半空间位移和力的基本解； c 为边界积分方程的自由项，若边界 S 在点 ξ 光滑，则 $c=1/2$ 。

为了求解上述边界积分方程，需对土与结构的交界面进行离散，并将式(4)改写为离散后的矩阵形式：

$$\frac{1}{2}\{u'\} = [U']\{t'\} - [T']\{u'\} \quad (5)$$

求解离散的边界积分方程(5)，即可得到未知的边界位移和边界力，进而利用离散的频域内的动力 Somigliana 公式，即可求得域内任意点的位移 u_d ：

$$\{u_d\} = [U']\{t'\} - [T']\{u'\} \quad (6)$$

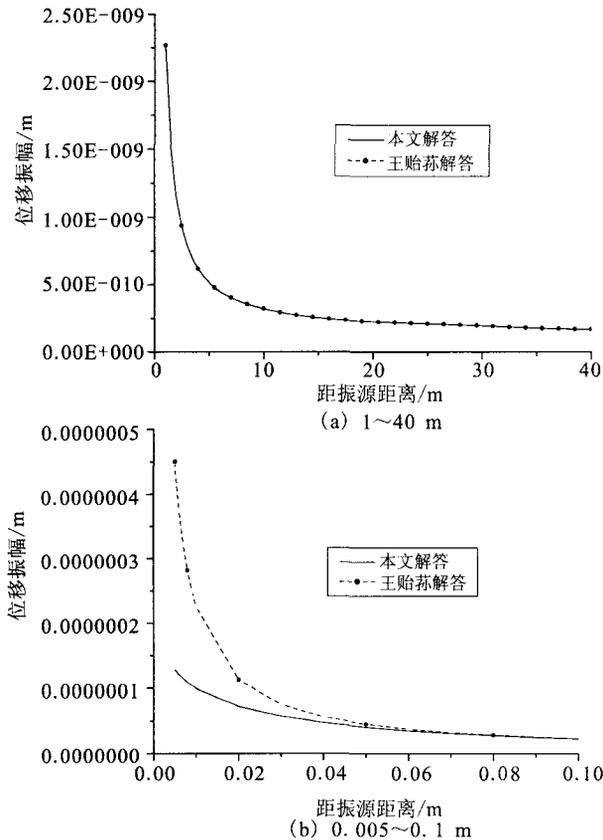


图 2 地表竖向位移解答对比

Fig. 2 Comparison between different solutions of ground vertical displacement (a) 1~40 m; (b) 0.005~0.1 m.

有关频域内动力边界元的详细推导可参考文献 [9]。

2 三维半解析边界元法及其验证

为了验证本文算法的正确性，本节选取 Lamb 问题进行对比分析。Lamb 问题采用王贻荪解答^[11]。土体的密度 $\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$ ；剪切模量 $\mu_s = 53 \text{ MPa}$ ；泊松比 $\nu_s = 0.25$ ；激振频率选取为 $f = 16 \text{ Hz}$ 。

本文算法与王贻荪解答对比见图 2。可以看出，对于远离振源的点 ($>0.07 \text{ m}$)，两者的计算值非常接近，误差很小；当计算点逐渐接近振源时，两者的计算值差异逐渐增大，王贻荪的解析解答以更快的速度趋于奇异。

3 Gibson 地基三维 WIB 主动隔振分析

采用上述的层状半空间频域边界元法对图 3 所示的 WIB 隔振进行了详细的参数分析。

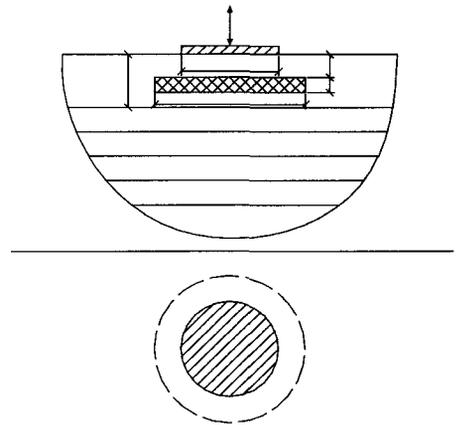


图 3 WIB 隔振示意图

Fig. 3 Sketch of vibration isolation by WIB.

将 $\mu_{s\infty}$ 与 μ_{s0} 之比记为 $\eta = \mu_{s\infty} / \mu_{s0}$ 。采用地表剪切模量对应的 R 波波长 ($L_{R0} = 10 \text{ m}$) 对各种长度尺寸归一化：WIB 的归一化直径和厚度分别记为 $W = w/L_{R0}, T = t/L_{R0}$ ；WIB 顶面距地表的归一化埋深为 $H = h/L_{R0}$ ；WIB 的剪切模量采用地表处剪切模量归一化为 $M = \sqrt{\mu_b / \mu_{s0}}$ ；密度为 $\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$ ；泊松比为 $\nu_b = 0.20$ ；粘滞阻尼比为 $\xi_b = 0$ 。激振频率 16 Hz 。

对于隔振效果的评价，Woods 提出用振幅衰减系数 A_R 来衡量，并认为 $A_R \leq 0.25$ 时隔振效果较好^[9]。 A_R 的表达式为：

$$A_R = \text{有屏障时测点的振幅} / \text{无屏障时测点的振幅} \quad (7)$$

3.1 WIB直径对隔振效果的影响

图4表示 $H=0.05$ 、 $T=0.2$ 、 $M=12$ 、 $\eta=3.5$ ，WIB的归一化直径 W 变化时，相应的地表径向位移和竖向位移振幅衰减系数随距离的变化曲线。从图中可以看出，对于三维 Gibson 地基采用 WIB 主动隔振体系可以取得理想的隔振效果。对于本算例，当 WIB 的无量纲直径很小 ($W \leq 0.2$) 时，采用 WIB 隔振体系不能取得任何隔振效果；当 WIB 的无量纲直径 $W \leq 1.0$ 时，增加 WIB 的宽度可以显著

的提高 WIB 隔振体系的隔振效果。当 WIB 的无量纲直径继续增大 ($W > 1.0$) 时，其隔振效果变化比较复杂：位于弹性板上方的地表径向位移和竖向位移振幅均随 WIB 直径的增大而有相当程度的减小；而位于弹性板外侧的地表径向位移和竖向位移振幅波动较大，其隔振效果均没有明显的提高。所以，应根据隔振设计实践的需要，合理的选取 WIB 的直径。

3.2 WIB厚度对隔振效果的影响

图5表示 $W=0.5$ 、 $H=0.05$ 、 $M=12$ 、 $\eta=3.5$ ，WIB的归一化厚度 T 变化时，相应的地表径向位移和竖向位移振幅衰减系数随距离的变化曲线。从图

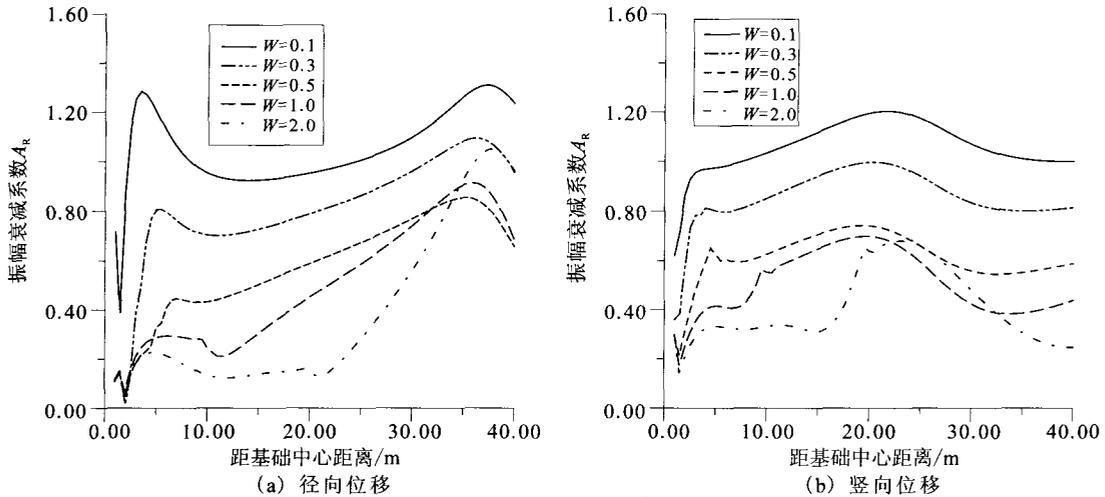


图4 不同 WIB 直径时 Gibson 地基(a)径向位移和(b)竖向位移振幅衰减系数随距离变化曲线 ($T=0.2$)

Fig. 4 Curves of A_R for Gibson ground (a) radial displacement and (b) vertical displacement with different WIB diameters ($T=0.2$).

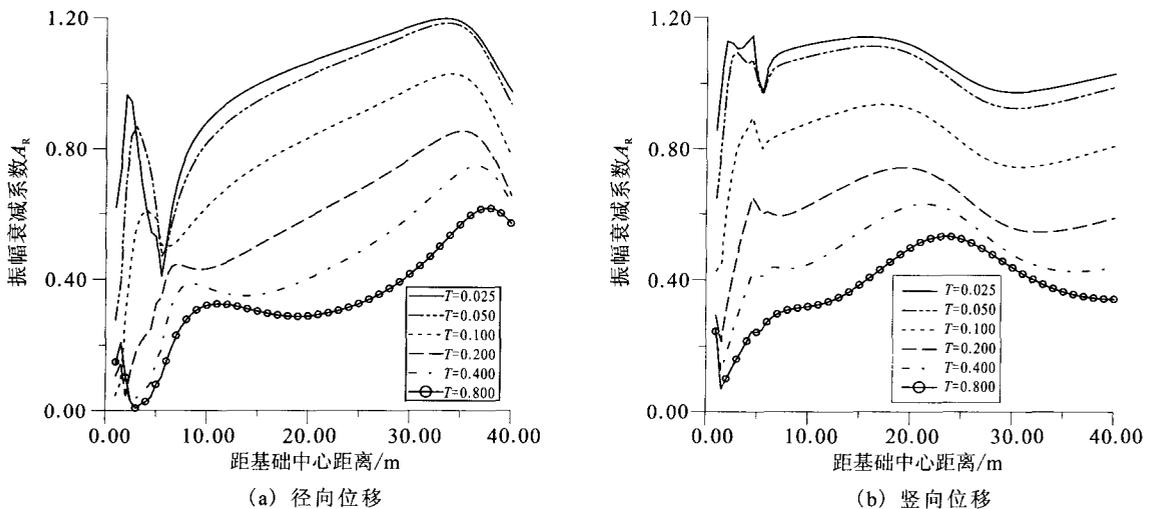


图5 不同 WIB 厚度时 Gibson 地基(a)径向位移和(b)竖向位移振幅衰减系数随距离变化曲线

Fig. 5 Curves of A_R for Gibson ground (a) radial displacement and (b) vertical displacement with different WIB thickness.

中可以看出,当 WIB 的无量纲厚度较小 ($T \leq 0.025$) 时,WIB 隔振体系将失效;当 WIB 的无量纲厚度 $T \leq 0.2$ 时,随着 WIB 厚度的增加地表径向位移和竖向位移振幅衰减系数有显著的降低,此时增加 WIB 的厚度,可以取得显著的隔振效果;当 WIB 的无量纲厚度继续增大 ($T > 0.2$) 时,WIB 的隔振效果虽然也在逐步提高,但提高的幅度却逐渐减小。所以对于 WIB 隔振体系增加 WIB 厚度是提高其隔振效果的最有效的措施之一。

3.3 WIB 剪切模量对隔振效果的影响

图 6 表示 $W=0.5, T=0.1, H=0.05, \eta=3.5$, WIB 的归一化剪切模量 M 变化时,相应的地表径

向位移和竖向位移振幅衰减系数随距离的变化曲线。从图中可以看出,随着 WIB 剪切模量的增加,当 WIB 的无量纲剪切模量 $M=3$ 时,设置波阻板对地表水平位移和竖向位移的隔振效果均较差;但随着波阻板弹性模量的增大,其隔振效果也迅速增加;但当 WIB 的无量纲剪切模量 $M \geq 24$ 时,无论是地表径向位移振幅还是竖向位移振幅,其振幅衰减系数随 WIB 剪切模量增加而减小的幅度迅速减小,也就是说,此时增加 WIB 的剪切模量虽然可以减小地表径向位移振幅和竖向位移振幅,但其减小的幅值却大大降低了。所以增加 WIB 的剪切模量也是提高 WIB 隔振体系隔振效果最有效的措施之一。

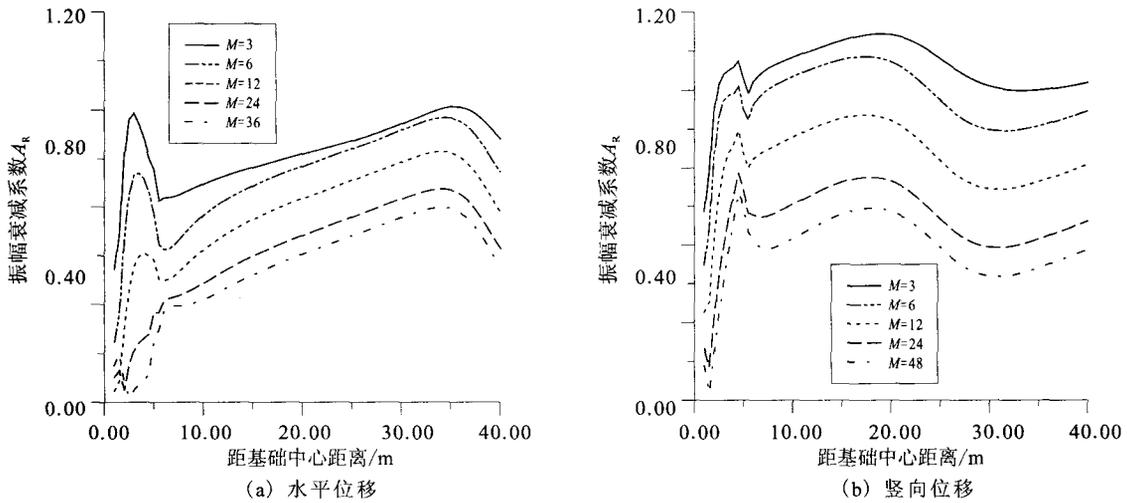


图 6 不同 WIB 剪切模量时 Gibson 地基 (a) 水平位移和 (b) 竖向位移振幅衰减系数随距离变化曲线

Fig. 6 Curves of A_R for Gibson ground (a) horizontal displacement and (b) vertical displacement with different WIB shear modulus.

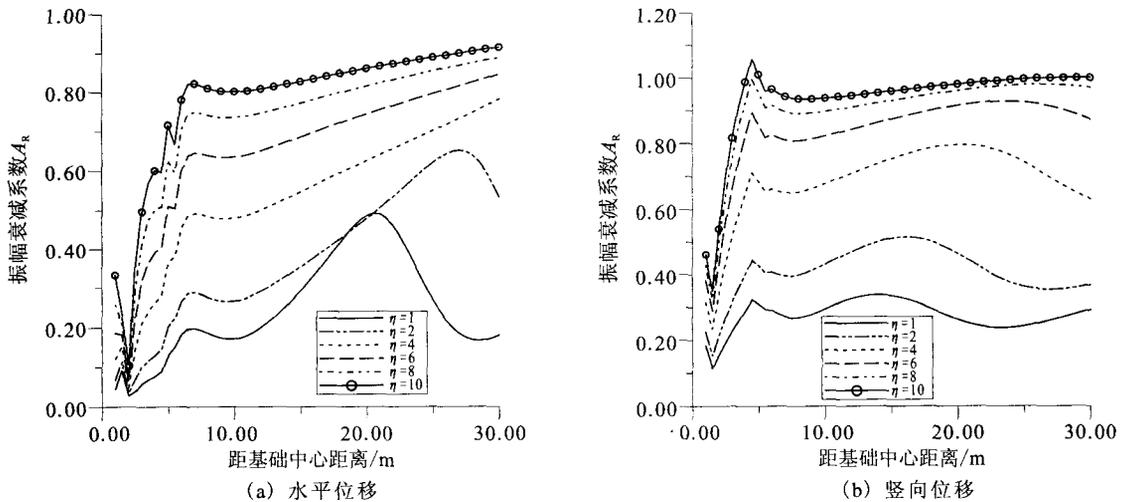


图 7 不同 η 值时 Gibson 地基 (a) 径向位移和 (b) 竖向位移振幅衰减系数随距离变化曲线

Fig. 7 Curves of A_R for Gibson ground (a) radial displacement and (b) vertical displacement with different η values.

3.4 土体竖向非均匀特性对隔振效果的影响

图7表示 $W=0.5$ 、 $T=0.2$ 、 $H=0.05$ 、 $H=0.05$ 不同 η 值时沿测线的地表径向位移和竖向位移振幅衰减系数随距离的变化曲线。从图中可以发现,不同 η 值时沿测线的地表径向位移和竖向位移振幅衰减系数变化很大;随着 η 值的增大总体说位移振幅衰减系数都在增大;且当 η 值较小时,位移振幅衰减系数增加幅度较大;当 η 值逐渐变大时,其相应的位移振幅衰减系数增幅在逐渐减小。本算例说明,对于竖向非均匀介质,其参数对 WIB 隔振体系的隔振效果有较大影响,在隔振设计实践中必须予以充分的重视。

4 结论

(1) 薄层法半空间格林函数的边界元法是分析土与结构动力相互作用的一种有效的数值分析手段。尤其是在求解成层状或竖向不均匀土体(如 Gibson 地基)中波的传播问题时,由于采用了薄层法层状半空间的格林函数,只需在土与结构交界面进行离散,即可模拟任意多层场地,且大大缩减了计算时间,提高了计算效率。

(2) 在 Gibson 地基中采用 WIB 隔振可以取得较好的隔振效果。对于 WIB 的隔振设计应保证弹性隔板具有合理的宽度才能得到理想的隔振效果;增加弹性隔板的厚度和提高其弹性模量是提高隔震效果最有效的两种措施,但也要注意,其隔振效果的增加幅度是随着厚度和模量的增加而递减的,所以应该结合具体工程设计需要,考虑经济性和可行性等综合选取合理的厚度和模量。

(3) 地基的分层参数和非均匀特性对 WIB 的

隔振效果有显著的影响,设计时应充分重视根据地层实际分布情况具体分析。

[参考文献]

- [1] 高广运,彭争光,李伟,等. 三维层状地基空沟主动隔振分析[J]. 西北地震学报,2006,28(3):210-215.
- [2] 高广运,彭争光,张梦芳,等. 层状地基空沟被动隔振分析[J]. 西北地震学报,2009,31(2):115-120.
- [3] Schmid G, Chou N, Le R. Shielding of structures from soil vibrations[A]//Proceedings of Soil Dyn. and Earth. Eng. V [C]. USA. San Francisco:Computational Mechanics Publications, 1992: 651-662.
- [4] Takemiya H, Jiang Jian-qun. Wave impeding effect by buried rigid block and response reduction of dynamically excited pile foundation[J]. Structural Eng. and Earth. Eng., 1993, 10(3):149-156.
- [5] Takemiya H, Fujiwara A. Wave propagation/impediment in a stratum and wave impeding block (WIB) measured for SSI response reduction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1994, 13: 49-61.
- [6] Peplow A T, Jones C J C, Petyt M. Surface vibration propagation over a layered elastic half-space with an inclusion[J]. Applied Acoustics, 1999, 56:283-296.
- [7] 国家标准《隔振设计规范》GB50463-2008[S]. 北京:中国计划出版社出版,2008.
- [8] Leung K L, Beskos D E, Vardoulakis I G. Vibration isolation using open or filled trenches[J]. Comput. Mech., 1990, (7):137-48.
- [9] Kausel K. The Thin-Layer Method in seismology and earthquake engineering. Wave Motion in Earthquake Engineering [M]. Southampton, Boston: WIT Press, 2000:193-213.
- [10] 李伟. 层状地基 WIB 主动隔振分析[D]. 同济大学,2005.
- [11] 王贻荪. 地面波动分析若干问题[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(2):56-67.