

屏障隔振系统失效机理的探讨

邱 畅¹, 高广运¹, 岳中琦², 谭国焕²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 香港大学土木工程系, 香港)

摘要:屏障隔振是一种用来阻碍或改变外围振波向受保护区(屏蔽区)传播的工程方法, 由于其机理的探讨尚不深入, 工程实践中常出现隔振系统失效的现象. 本文假设屏障是埋入土介质的中厚弹性板, 采用薄层法分析了该弹性板在振波作用下的振动响应和屏蔽区内位移变化规律; 研究了影响屏障隔振效果的主要参量; 发现了使屏障隔振效率降低甚至失效的入射波全透射现象. 结果表明柔性屏障易发生波的全透射, 并指出了避免屏障失效的措施.

关键词:屏障隔振; 薄层法; 入射波全透射; 刚性屏障; 柔性屏障

中图分类号: TU 352.1⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2003)03-0198-06

0 引言

各类人工振源产生的振动公害在环境岩土工程中占有重要的位置. 如日本早在 20 世纪 70 年代振动公害达到顶峰, 目前虽有减少的趋势, 但仍占全部公害的 30%, 是典型的七大公害中最多的一种. 过去我国对于这一问题关注较少, 但随着人们生活水平的提高, 对环境质量的要求越来越高, 这一问题已引起了广泛的关注, 成为工程界面临的重要课题.

过去对于振动污染的治理常常采用设置橡胶垫片或弹簧等机械式方法, 但实际中经常出现由于隔振装置老化而失效的现象, 并且这种隔振装置大都较为昂贵. 振动污染实质是由于振源产生的弹性波沿地表传播所引起, 因此有学者提出通过在土介质中设置空沟或混凝土墙等屏障, 来改变振波的传播从而达到隔振的目的. 与其它隔振方法相比屏障隔振具有造价低、可作为结构一部分且不易损坏等优点. 屏障隔振系统按其组成形态可分为连续和非连续屏障^[1]. 连续屏障指屏障由连续的屏障整体组成, 如开口空沟或用泥浆、锯屑和砂子等的填充沟(包括混凝土刚性墙); 非连续屏障指屏障由间断的屏障单体组成, 如柱形排桩和排孔等. 由于理论分析困难, 非连续屏障通常等价于连续屏障处理^[2]. 工程中, 连续屏障通常设置较浅, 适于中高频振动; 非连续屏障可设置较深, 适于中低频振动.

Woods^[3]根据屏障隔振机理, 将其分为近场主动隔振和远场被动隔振, 前者主要针对体波, 后者要考虑面波的影响. 该观点在试验中得到证实, 被许多学者所接受. 尽管屏障隔振已被应用于实际工程中, 但受分析手段的限制, 有关隔振的理论研究很少. 这种理论分析的缺乏, 在实践中经常会出现屏障失效不起隔振作用的现象. 为了揭示屏障失效的原因, 本文假设屏障是埋入地下的中厚弹性板, 采用薄层分析法(TLM)研究该弹性板在体波作用下的振动响应和弹性板后隔振区的位移变化规律, 发现了使屏障隔振效率降低甚至失效的主要原因之一是入射波全透射现象. 针对目前工程中经常采用的刚性屏障和柔性屏障, 由于其隔振机理的不同, 本文提出在设计中应采用不同的设计准则以避免屏障隔振失效的发生.

1 理论分析

文献[4]研究了连续屏障的近场主动隔振, 在分析中假设 P 波相对于屏障为垂直入射, 即不需要考虑

收稿日期: 2002-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(50178056)、863 计划高速磁浮交通技术重大专项经费资助

作者简介: 邱畅(1975-), 男(汉族), 湖南株洲人, 博士, 现主要从事地下结构地震工程及振动防治的研究

弹性波在分界面的波型转换. 实际工程中, 尤其是近场主动隔振, 入射波相对屏障有一定的倾角, 弹性波遇到屏障将发生波型转换, 如图 1 所示. 因此文献[4]的理论分析采用的是一个相当简化的模型. 但在文章中得到一个有意义的参量, 本文定义为垂直入射全透射圆频率

$$\omega_v = j \sqrt{\frac{2-2\mu_{ms}}{1-2\mu_{ms}}} \pi v_{ms} / h_m \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中 μ_{ms} 为屏障的泊松比; v_{ms} 为屏障的剪切波波速; h_m 为屏障厚度. 垂直入射全透射圆频率的意义在于当垂直入射波频率与式(1)计算值相等时, 入射波产生全透射, 即屏蔽区振幅没有减小, 屏障不起隔振作用. 因此该参数对屏障隔振有重要意义.

如图 1 示, 研究平面简谐波入射到土介质—屏障—土介质构成的层状体系上. 假设土介质 1 和土介质 2 为具有相同性质的均质各向同性半无限弹性体; 屏障为均质各向同性中厚弹性板. 由于 P 波在边界 1 处发生反射和折射, 并且反射波与折射波均包含两种波型——SV 波和 P 波, 而折射波在边界 2 处又产生反射和折射. 因此对于图 1 所示的层状体系, P 波的入射将产生复杂的波场.

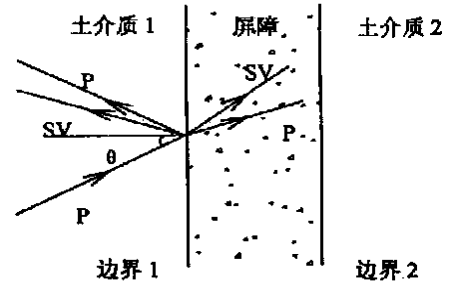


图 1 任意角度 P 波入射时的屏障系统

Fig. 1 Barrier under P-wave incidence with random angle.

1.1 薄层法简介

TLM (Thin-Layer Method) 方法由 Lysmer 研究层状介质中 R 波传播时提出^[5], Kausel 和 Peek 系统阐述了这种方法^[6], 随后被广泛应用于无损检测和地质力学中, 但直到近年这种方法才被用于地震工程和波的传播分析中. TLM 法的主要特点是在一个方向进行如同有限元法一样的离散, 而在另一方向采用傅立叶变换求解.

1.2 土介质—屏障—土介质层状体系求解

(1) 图 1 层状体系可视为两个半无限体中夹杂一个弹性层. 应用 TLM 可求出土介质 1—屏障—土介质 2 各分界面处位移幅值与力幅值间的关系, 具体如下:

土介质 1 为一向左无限延伸的半无限弹性体, 边界 1 的(即半无限体表面处)水平位移幅值 U 和竖向位移幅值 W 与水平力的幅值 P 和竖向力的幅值 R 之间的关系为

$$\begin{Bmatrix} P \\ iR \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_D \begin{Bmatrix} U \\ iW \end{Bmatrix} \quad (2)$$

\mathbf{K}_D 相当于有限单元法中的刚度矩阵, 表示边界 1 处位移与力幅值之间的关系, 根据 TLM 可表示为

$$\mathbf{K}_D = A_D k^2 + B_D k + C_D \quad (3)$$

式中 $k = (\omega \times \sin \theta) / v_{sp}$, 波数; $\theta =$ 入射角; ω 为入射波振动频率; v_{sp} 为土中纵波波速; A_D, B_D 和 C_D 的值见文献[5].

屏障可视为夹在两半无限体中的一弹性层, 其左右表面(边界 1 和边界 2)位移幅值与力幅值的关系为:

$$\mathbf{F}' = \mathbf{K}_M \times \mathbf{S}' \quad (4)$$

式中, $\mathbf{F}' = [P'_l, iR'_l, P'_b, iR'_b]'$; $\mathbf{S}' = [U'_l, iW'_l, U'_b, iW'_b]'$; U'_l, W'_l, P'_l 和 R'_l 分别代表边界 2 上的位移以及力的幅值; U'_b, W'_b, P'_b 和 R'_b 则代表了边界 1 处上述各项幅值. 刚度矩阵 \mathbf{K}_M 则可表示为

$$\mathbf{K}_M = A_M k^2 + B_M k + J_M - \omega M_M \quad (5)$$

式中, A_M, B_M, J_M 和 M_M 的值见文献[5].

土介质 2 为一向右无限延伸的半无限弹性体, 其刚度矩阵 \mathbf{K}_U 与向左延伸的半无限体的刚度矩阵 \mathbf{K}_D 相似, 只需将 \mathbf{K}_D 中非对角线上的元素变号就得到了 \mathbf{K}_U .

求出 $\mathbf{K}_D, \mathbf{K}_M$ 和 \mathbf{K}_U 后, 根据边界 1 和边界 2 上应力位移连续条件, 按有限单元法进行刚度矩阵的凝聚, 即可得土介质—屏障—土介质层状体系的总体刚度矩阵:

$$F = K \times S \quad (6)$$

式中, $F = [P_t, iR_t, P_b, iR_b]^T$; $S = [U_t, iW_t, U_b, iW_b]^T$; U_t, W_t, P_t 和 R_t 分别代表边界 2 上的水平和竖向位移以及水平和竖向外荷载的幅值; U_b, W_b, P_b 和 R_b 则代表边界 1 处上述各项幅值.

(2) 如图 1 示, 入射 P 波对屏障的作用, 可以转化为边界 1 上简谐外荷载 P_b 和 R_b [17]

$$\begin{Bmatrix} P_b \\ iR_b \end{Bmatrix} = \frac{I_D(1+t_D^2)}{4s_D t_D + (1-t_D^2)^2} K^D \begin{Bmatrix} 4s_D t_D A_p \\ 2is_D(1-t_D^2)A_p \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中 $I_D = \sin \theta$; $s_D = \text{ctg } \theta$; $t_D = \frac{D-2\mu_{ss}}{\sqrt{1-2\mu_{ss}} \sin^2 \theta} - 1$; μ_{ss} 为土介质的泊松比; A_p 为入射 P 波的振幅.

边界 2 上荷载 P_t 和 R_t 为 0. 将式(7)代入式(6)求解, 即可得到屏障后振幅与入射 P 波振幅间的关系.

2 屏障隔振与波的全透射现象分析

引入两个无量纲参数以描述屏蔽区的动力响应:

$$\text{无量纲频率:} \quad \omega_n = (\omega \times h_m) / v_{ms} \quad (8)$$

$$\text{土介质与屏障剪切波波速比:} \quad v_{bs} = v_{ss} / v_{ms} \quad (9)$$

对图 1 所示的层状体系, 为集中研究影响屏障隔振效果的主要参数——入射波无量纲频率 ω_n 、振波入射角 θ 、剪切波波速比 v_{bs} 和屏障厚度 h_m 等, 假设土与屏障的泊松比为 0.33, 且它们的密度相同. 这样假设是合理的, 因为前人研究都曾证明屏障的泊松比和密度对隔振效果几乎没有影响 [8]. 下面按刚性屏障和柔性屏障, 分析屏蔽区振幅变化规律. 刚性屏障指剪切波波速大于土介质剪切波波速的屏障, 即 $v_{bs} < 1$; 柔性屏障指剪切波波速小于土介质剪切波波速的屏障, 即 $v_{bs} > 1$. 为描述屏障隔振效果, 定义屏蔽区振幅比 $A_{RF} = \text{屏蔽区振幅} / \text{入射波振幅}$.

2.1 刚性屏障

2.1.1 v_{bs} 变化与隔振效果

图 2(a)、(b) 表明了当入射角 θ 取定值 ($\theta = 0^\circ$ 和 20°) 时 v_{bs} 变化对屏蔽区振幅比 A_{RF} 的影响. 由图可知: (1) 当 $v_{bs} \ll 1$, 无论入射角 θ 为多大都将获得显著的隔振效果; $v_{bs} \leq 0.1$ 时可获得 80% 的隔振效果; 而 $v_{bs} = 1$ 时将不起隔振作用. 因此 v_{bs} 是隔振屏障设计时重要的设计参数, 在选择刚性屏障材料时一般应满足 $v_{bs} \leq 0.1$. (2) 由图 2(a) 可知当无量纲频率等于一定值时屏障不起隔振作用, 即发生入射波的全透射现象, 但对于其它入射角度而言刚性屏障的入射波全透射现象并不明显 (图 2(b)).

2.1.2 入射角变化与隔振效果

图 2(c)、(d) 表明了当 v_{bs} 取定值时入射角变化对屏障隔振效果的影响. 刚性屏障一般采用混凝土材料, 相对一般土介质而言, $v_{bs} = 0.04 \sim 0.1$. (1) 当 $v_{bs} = 0.04$ 时 (图 2(c)), 除了垂直入射 ($\theta = 0^\circ$) 的情况外, 屏蔽区振幅随无量纲频率的增大迅速衰减至 0. 表明当屏障相对于土非常硬时, 只有当震波垂直入射且频率等于由式(1)确定的频率 (图 2(c) 中的峰值) 时才发生波的全透射. 但垂直入射波只占屏障隔振总入射波的很小部分, 因此波的全透射分量较少, 隔振效果很好. (2) 当 $v_{bs} = 0.1$ 时 (图 2(d)), 在入射角较小时将发生波的全透射, 但不同入射角对应发生全透射现象的频率是不同的, 因此以不同角度入射的波不可能在同一频率发生波的全透射现象, 全透射现象较弱.

综上所述, 对刚性屏障隔振而言, 其隔振效果一般可达 70% ~ 90%, 主要由土与屏障剪切波波速比 v_{bs} 控制; 在入射波频率等于由式(1)确定的频率时会发生波的全透射, 但透射波分量较少, 不会明显发生屏障隔振失效现象. 这一点以被过去的工程实践 [1] 以及近年来的试验研究 [2, 8] 所证实.

2.2 柔性屏障

2.2.1 v_{bs} 变化与隔振效果

图 3(a)、(b) 表明当入射角 θ 取定值 ($\theta = 0^\circ$ 和 20°) 时 v_{bs} 变化对 A_{RF} 的影响. 由图可知: (1) 当柔性屏障材料与土介质性质差异较大时 ($v_{bs} \gg 1$), 相对一般土介质而言, 若 $v_{bs} = 5 \sim 10$, 可得到 60% ~ 80%

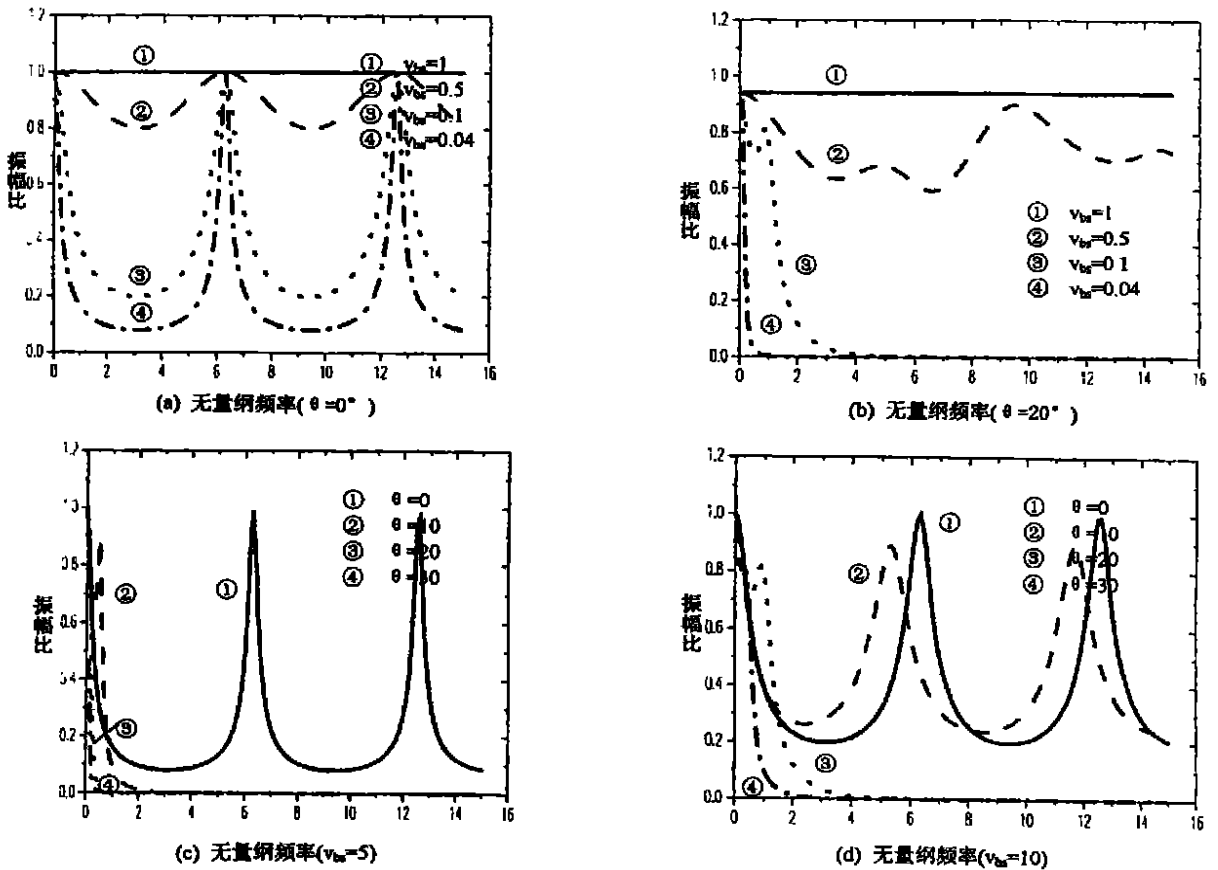


图2 刚性屏障的竖向振幅与无量纲频率关系

Fig. 2 Relationship between the vertical amplitude and dimensionless frequency in rigid barrier.

的隔振效果. 因此选择柔性屏障材料, 一般应满足 $v_{bs} \geq 5$. (2) 当无量纲频率接近某一值(式(1)确定)时, 对于柔性屏障而言波的全透射现象明显从而造成柔性屏障隔振的失效.

2.2.2 入射角变化与隔振效果

图3(c)、(d)表明当 v_{bs} 为定值 ($v_{bs} = 5$ 和 10) 时入射角变化对 A_{RF} 的影响. 由图可知: 入射角变化对柔性屏障屏蔽区内振幅的影响与刚性屏障完全不同. 以不同角度入射的波对应发生全透射现象的无量纲频率差别不大, 接近由式(1)确定的频率, 因此对于某一特定频率的振源当柔性屏障厚度选取不当时极易发生入射波的全透射, 从而造成屏障隔振效果极差甚至失效.

综上所述, 对柔性屏障近场主动隔振而言, 要控制土与屏障的剪切波波速比 v_{bs} , 当 $v_{bs} \geq 5$ 可达到 $60\% \sim 80\%$ 的隔振效果. 但柔性屏障易发生入射波的全透射现象, 使其隔振效果显著降低甚至失效, 因此设计时还应根据振源特性选择适当的屏障厚度, 以避免失效现象的发生.

3 结论

本文主要针对工程中出现的屏障隔振失效现象进行了探讨. 通过对问题进行一定的简化, 发现了使屏障近场隔振失效的波的全透射现象, 并根据刚性屏障与柔性屏障的不同提出了不同的设计原则. 主要结论如下:

(1) 当入射波频率等于屏障体系某一固有频率时, 屏障发生入射波的全透射现象从而造成隔振效果降低甚至失效. 本文定义该固有频率为垂直入射全透射频率, 由式(1)确定, 它取决于屏障厚度及其剪切波

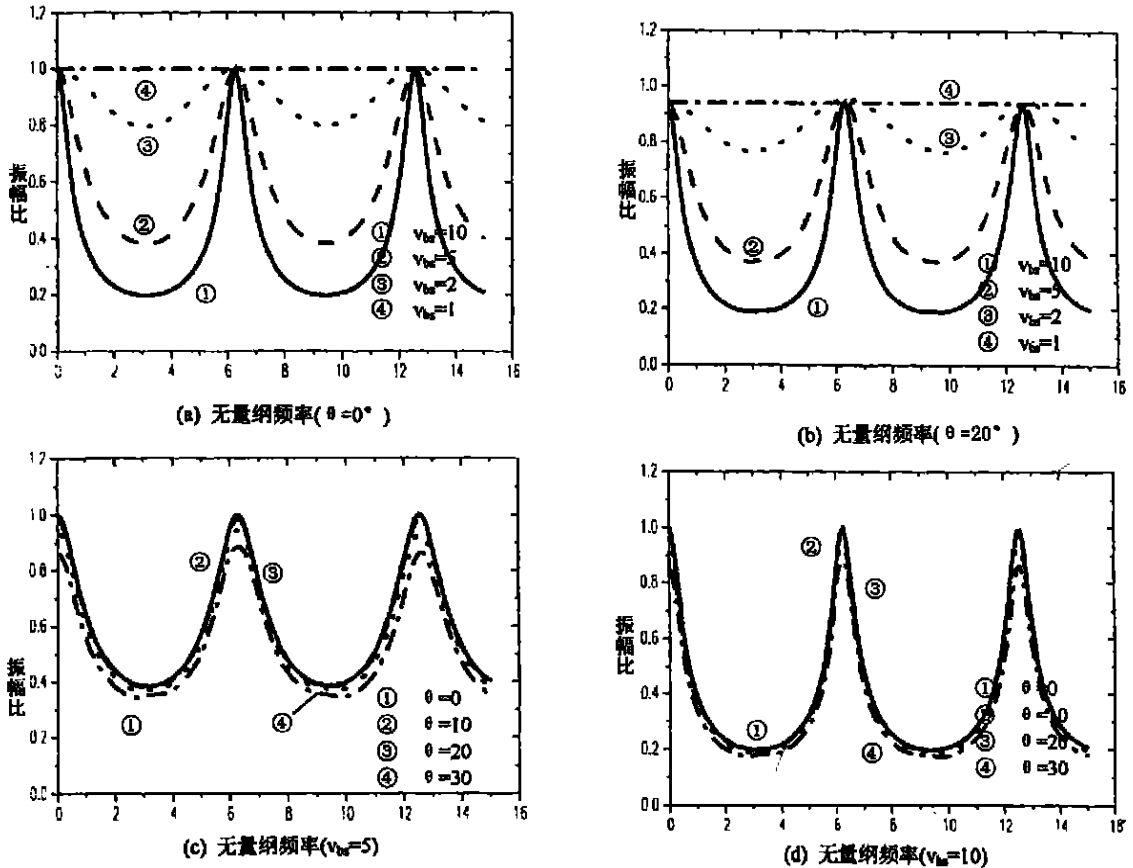


图 3 柔性屏障的竖向振幅与无量纲频率关系

Fig. 3 Relationship between the vertical amplitude and dimensionless frequency in flexible barrier.

波速。

(2) 柔性屏障易发生入射波的全透射。当入射波频率等于本文定义的垂直入射全透射频率时, 无论入射角 θ 和波速比 v_{bs} 为何值都将发生入射波全透射, 从而造成屏障的失效。因此在柔性屏障的设计中不但要选择适当的材料使得 $v_{bs} \geq 5$, 并且要选择适当的屏障厚度以避免全透射现象的发生而引起屏障失效。

(3) 刚性屏障不易发生入射波的全透射现象, 其隔振效果主要由 v_{bs} 控制, 当 $v_{bs} \leq 0.1$ 时, 隔振效果一般可达 70%~90%, 因此选择适当的隔振材料是刚性屏障设计的关键。

(4) 刚性屏障与柔性屏障的隔振机理不同, 柔性屏障隔振易出现入射波的全透射现象从而造成隔振的失败; 刚性屏障不会产生明显的入射波全透射, 故工程中应优先选用刚性屏障。

[参考文献]

- [1] 高广运. 非连续屏障地面隔振理论与应用(博士学位论文)[D]. 浙江大学, 1998. 62—81.
- [2] Kattis S E, Polyzos D, Beskos D E. Modelling of pile wave barriers by effective trenches and their screening effectiveness[J]. Soil Dynamics and Earthquake Eng., 1999, 18: 1—10.
- [3] Woods R D. Screening of surface wave in soils[J]. J. Soil Mech. And Found. Div. ASCE, 1968, 94(4): 951—979.
- [4] 木村薰, 小出忠南. 地震振动的遮断工法[J]. 土と基础, 1979, 27(8): 112—125.
- [5] Kausel E. The thin-layer method in seismology and earthquake engineering Wave Motion in Earthquake Engineering [M]. WIT, 2000. 193—214.

- [6] Kausel E, Peek R. Stiffness matrices for layered soils [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1981, 71(6): 1743—1761.
- [7] Wolf J P 著. 吴世明等译. 土—结构动力相互作用[M]. 北京:地震出版社, 1989. 122—156.
- [8] Ahmad S, Hussaini T M, Fishman K L. Investigation on active isolation of machine foundations by open trenches[J]. J Geotech. Eng. ASCE, 1996, 122(6): 454—467.

RESEARCH ON THE FAILURE MECHANISM OF BARRIER FOR ISOLATING VIBRATION

QIU Chang¹, GAO Guang-yun¹, YUE Zhong-qi², THAN Guo-huan²

(1. *The Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China;*

2. *The Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China*)

Abstract: Ground barrier system for isolating vibration is a geotechnical engineering method used to impede or change wave propagating into protected zone. Because limited research on mechanism of the barrier, the failures of the barrier occur sometime in practice. In this paper the theoretical analysis of soil and barrier system for isolating vibration is presented, in which the barrier is assumed to be an elastic plate of medium thickness embedded in elastic soil; and the thin layer method (TLM) is employed to examine dynamic response of the plate and ground vibration in protected zone under an incident wave. Some key parameters that influence the effect of barrier for isolating vibration are analyzed. A phenomenon of the wave completely transmitting through the barrier and causing failure of the barrier is found, and a circular frequency of the complete wave transmission is defined to explain this phenomenon. The theoretical result shows that the complete wave transmission occurs more easily in flexible barrier system than in rigid one. At the end the recommendation for improving barrier design to avoid failure is presented.

Key words: Barrier for isolating vibration; Thin layer method; Complete wave transmission; Rigid barriers; Flexible barriers