

文章编号: 1001-1455(2008)06-0507-08

# 垂直断层破碎带对 Rayleigh 波传播与 场地地震动反应的影响\*

刘晶波, 刘祥庆, 赵冬冬

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘要:** 采用基于时域粘弹性人工边界的 Rayleigh 波输入方法, 对具有不同宽度、不同剪切波速的垂直断层破碎带的场地进行了 Rayleigh 波作用下的动力时程反应分析, 研究了垂直断层的宽度与剪切波速变化对 Rayleigh 波传播及场地地震动反应的影响。计算结果表明: 在 Rayleigh 波入射一侧的中远场地面, 断层宽度与剪切波速的变化对地面峰值位移反应影响很小; 在 Rayleigh 波入射一侧的断层角点以及距角点较近处, 随着断层宽度的增大或剪切波速的减小, 峰值位移反应均增大; 在另一侧中远场地面的峰值位移反应随着断层宽度的增大或剪切波速的减小而减小, 且水平位移峰值减小的程度略大于竖向位移峰值。由此可以看到, 软弱的断层破碎带对通过的 Rayleigh 波有削弱作用, 且破碎带越宽或剪切波速越小削弱作用越明显。

**关键词:** 固体力学; 断层破碎带; 数值模拟; Rayleigh 波; 地震动; 动力时程分析; 位移幅值谱比

**中图分类号:** O347; P315

**国标学科代码:** 130 · 15

**文献标志码:** A

## 1 引言

地震中会产生各种类型的波, 如 P 波、S 波和面波等。Rayleigh 波等面波是地震波中的重要类型, 其能量分布一般限于距离半空间自由表面 2 倍 Rayleigh 波长范围的薄层内, 特别是在中远场情况下, Rayleigh 波等面波往往会成为主要成分, 其能量是占优势的<sup>[1]</sup>。

断层是场地地震反应研究考虑的主要因素之一, 断层与断层破碎带的性质、所处的位置及宽度等因素都可能对地震地面运动产生影响。因此, 研究这类场地的地震动力反应特性, 对评价场地地震安全性及对上部结构动力反应的作用与影响均具有重要意义。对于断层场地的研究, 目前有 3 种方式: 对真实断层在地震作用下的地面动力反应的观察研究、对断层模型的实验分析以及针对断层的数值模拟研究。数值模拟作为一种方便有效且可重复性较强的方法, 在断层场地研究中得到了广泛应用, 并取得了一定的成果<sup>[2-8]</sup>。

Rayleigh 波在传播过程中通过断层或断层破碎带时, 在断层界面处将产生反射和透射, 使 Rayleigh 波频谱特征等发生变化, 并改变场地地震动反应特性。对于这一变化, 从定性的角度分析认为, 断层对面波具有一定的隔震作用, 但仅从定性分析的角度讨论 Rayleigh 波入射情形下的断层效应尚不能完全了解断层对 Rayleigh 波传播的影响, 有必要借助定量分析深入了解断层对 Rayleigh 波传播的影响规律<sup>[8]</sup>。同时, 非发震断层场地条件是个多因素的综合条件, 由于非发震断层场地的复杂性, 很难做到模拟的全面性, 因此, 研究非发震断层的单一因素对场地地震动的影响是十分必要的<sup>[2]</sup>。

本文中采用基于时域粘弹性人工边界适用于有限元离散模型中使用的 Rayleigh 波输入方法<sup>[1]</sup>, 在其他条件不变的情况下, 分别对具有不同宽度及不同介质剪切波速的垂直断层破碎带的场地进行 Rayleigh 波作用下的动力时程反应分析, 研究垂直断层宽度的变化与介质剪切波速的变化对 Rayleigh 波传播以及对场地地震动反应的影响。

\* 收稿日期: 2007-05-17; 修回日期: 2007-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(50478014, 50678094); 国家自然科学基金重点项目(90715035)

作者简介: 刘晶波(1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

## 2 有限元模型与入射 Rayleigh 波

断层场地模型见图 1, 设矩形断层宽度为  $b$ , 断层介质剪切波速为  $c_s$ , 取断层高度为 80 m。采用粘弹性人工边界<sup>[9-11]</sup>将半无限空间问题转化为有限域求解, 引入人工边界后, 整体计算模型尺寸为  $(1500 \text{ m} + b) \times 800 \text{ m}$ 。选取的 Rayleigh 波在入射基准点的位移时程曲线如图 2 所示, 由断层左侧场地入射, 持续时间为 10 s, 水平与竖向峰值分别为 11.6、17.0 mm。分别对水平位移与竖向位移时程曲线做 Fourier 变换得到的幅值谱如图 3 所示, 可以看到, 入射 Rayleigh 波的频率主要集中在 8 Hz 以内。

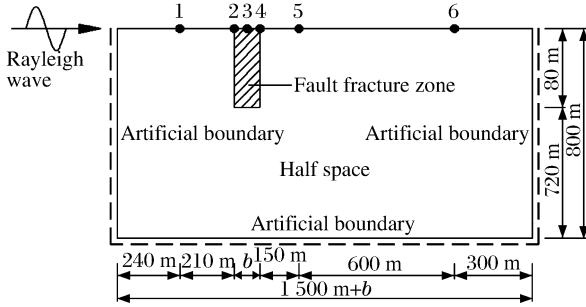


图 1 Rayleigh 波入射断层场地模型

Fig. 1 Analytical model of ground motion with fault under incident Rayleigh wave

准确实现波动输入的条件是, 在人工边界上施加的等效荷载应使人工边界产生与自由波场相同的位移、速度与应力。基于这一思想, 文献[1]通过将波动入射问题转化为波源问题实现了在粘弹性人工边界上入射 Rayleigh 波的直接输入。本文中采用文献[1]中的方法, 通过改变断层宽度  $b$  及断层的介质剪切波速  $c_s$  进行计算, 求得断层宽度与断层介质剪切波速的变化对 Rayleigh 波传播及对场地地震动反应的影响。考察的主要地震物理量为水平与竖向位移及相应的位移谱比。

## 3 断层宽度对 Rayleigh 波的影响

采用如图 1 所示的计算模型, 半无限空间介质与断层破碎带内介质均假设为匀质、各向同性, 计算参数取为: 半无限空间剪切波速  $c_s = 1.2 \text{ km/s}$ , 泊松比  $\nu = 0.25$ , 密度  $\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$ ; 断层破碎带剪切波速  $c_s = 120 \text{ m/s}$ , 泊松比  $\nu = 0.32$ , 密度  $\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$ 。由于入射 Rayleigh 波的频率集中在 8 Hz 以内, 因此可以计算得到入射 Rayleigh 波在半无限空间中的有效最短波长为 138 m。分别取断层宽度  $b = 0.2, 1.5, 3.0, 6.0, 9.0 \text{ m}$  进行计算, 在有限元计算时, 对计算模型采用四边形单元进行离散, 单元的大小根据波动有限元模拟的精度要求确定<sup>[12]</sup>。

### 3.1 位移时程计算结果

图 4 给出了断层宽度不同情况下地表面的水平与竖向绝对位移峰值, 图中水平坐标零点为计算模型的左侧边界点, 横坐标  $l$  为地表面距离左侧边界的水平距离。图 5 给出了不同地表观测点的水平与竖向位移反应时程曲线, 图中  $d_h$  和  $d_v$  分别表示水平与竖向位移, 地表观测点所在位置如图 1 中 1~6 点所示, 其中 2、3、4 点分别位于出露断层的左角点、中点和右角点处。

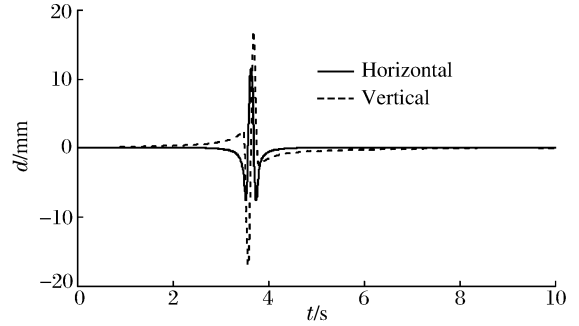


图 2 入射 Rayleigh 波在基准点的位移时程曲线

Fig. 2 Displacement time history of incident Rayleigh wave at base point

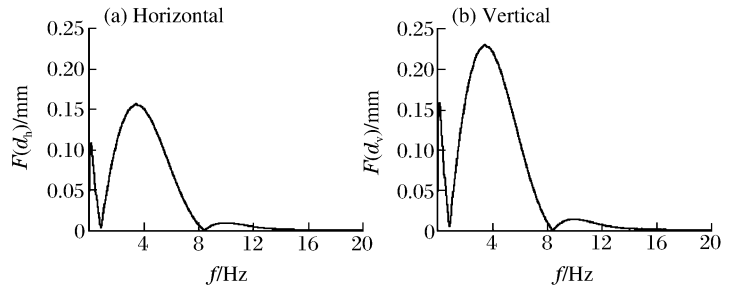


图 3 入射 Rayleigh 波位移幅值谱

Fig. 3 Displacement amplitude spectrums of incident Rayleigh wave

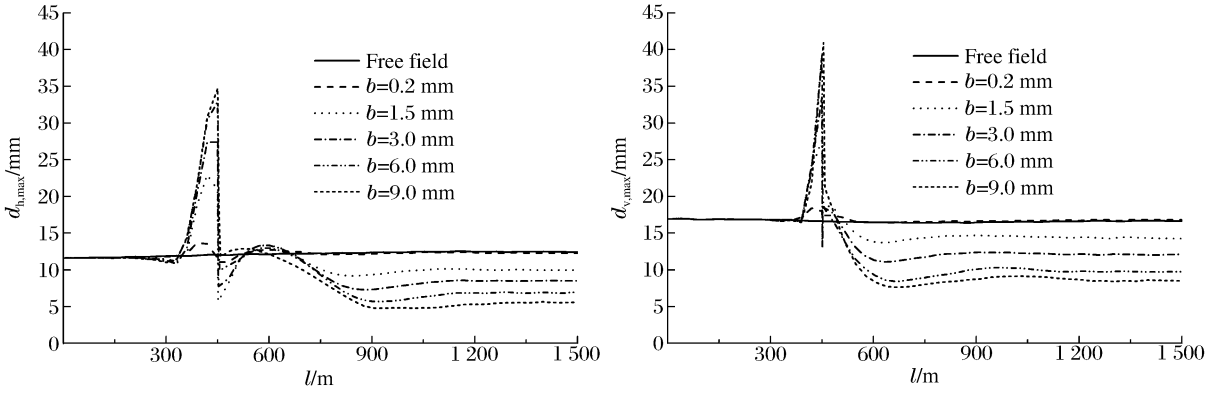


图 4 不同断层宽度情况地表水平与竖向位移峰值

Fig. 4 Peak horizontal and vertical displacement responses in various kinds of fault widths

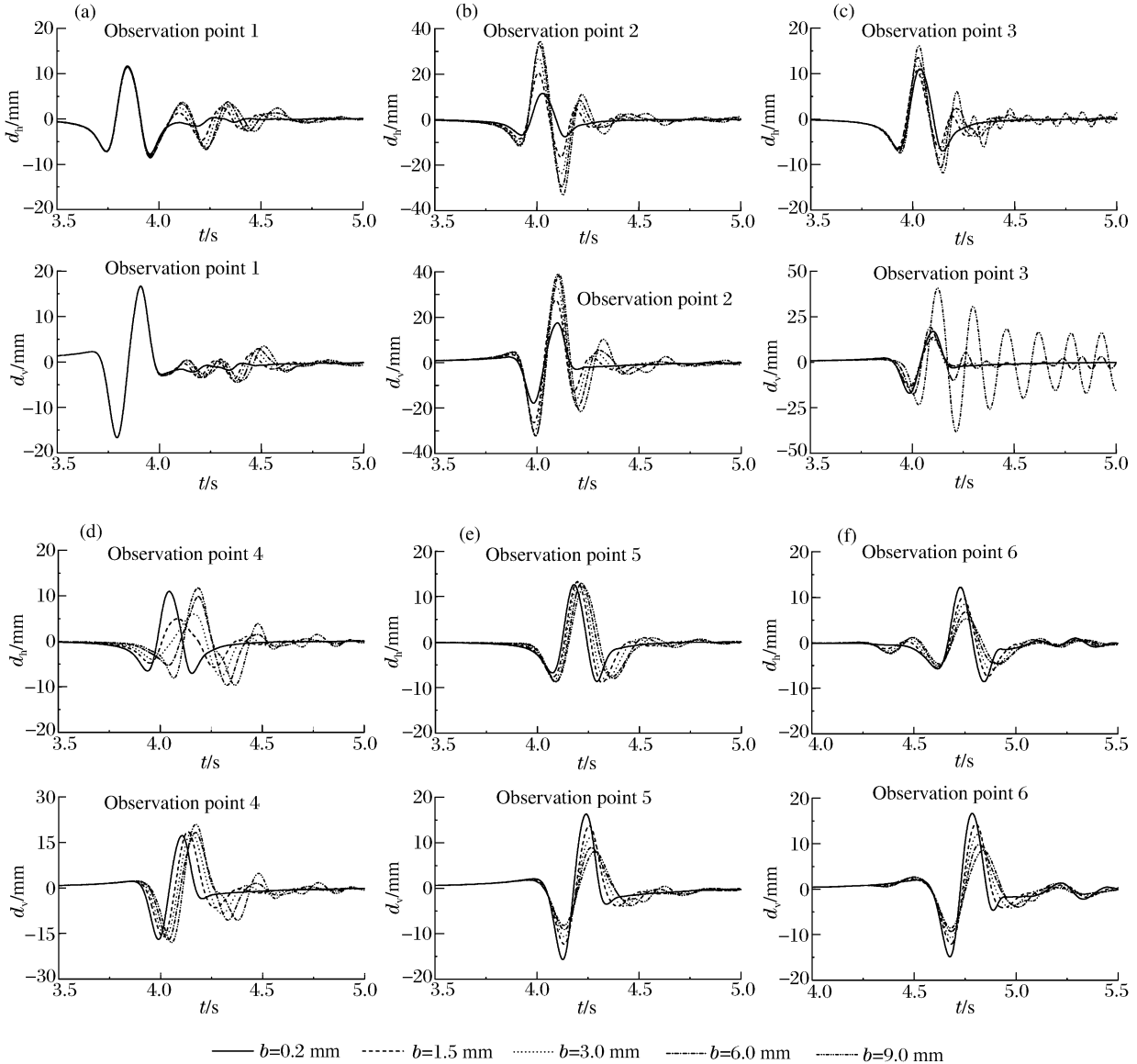


图 5 不同观测点水平与竖向位移时程曲线

Fig. 5 Horizontal and vertical displacement time histories of observation points

由图 4、5 可以看到:

(1) 在 Rayleigh 波入射一侧的中远场地面处,断层的存在以及断层宽度的变化对地面峰值位移反应影响很小。

(2) 在 Rayleigh 波入射一侧的断层角点以及断层左侧距离角点较近处的峰值位移反应则对断层宽度的变化较为敏感。随着断层宽度的增加,断层角点以及距离角点较近处(100 m 以内)的水平与竖向峰值位移反应均逐渐变大,这些部位对于 Rayleigh 波传播引起的位移反应较地表其他部位存在明显的放大作用。

(3) 在断层的中点位置,随着断层宽度的增大,水平与竖向位移峰值均呈现放大的趋势,尤其是在断层宽度为 9 m 时,竖向位移反应出现了类似于共振的振动反应。

(4) 在 Rayleigh 波越过断层之后,地面运动水平分量与竖向分量表现出了不同的变化规律。地表水平位移峰值在断层右侧较近处首先出现了一个波峰,而后随着距离的增大逐渐衰减至稳定值;而地表竖向位移峰值在断层右侧则逐渐衰减至稳定值。

(5) 断层右侧中远场地的峰值位移反应随着断层宽度的增加而减小;同时可以看到,水平位移减小的程度略大于竖向位移。

由此可以看到, Rayleigh 波等面波可能会引起断层及周围场地强烈的地震反应,因此建筑物的选址与设计应尽可能避开断层场地,而如果由于功能或客观条件限制不得不跨越断层的话,则需采取特殊的构造措施,以避免过大的水平与竖向位移反应对结构造成破坏。同时可以看到,软弱的断层破碎带对通过的 Rayleigh 波有削弱作用,且宽度越大削弱作用越明显。

### 3.2 位移幅值谱比计算结果

为反映断层宽度变化对 Rayleigh 波传播时频谱特性的影响,定义位移幅值谱比为

$$\gamma(d_h) = F(d_h)/F_0(d_h) \quad (1)$$

$$\gamma(d_v) = F(d_v)/F_0(d_v) \quad (2)$$

式中: $\gamma$  表示位移幅值谱比, $F(d_h)$ 、 $F(d_v)$  分别表示存在断层场地的水平与竖向位移幅值谱, $F_0(d_h)$ 、 $F_0(d_v)$  分别表示入射基准点的水平与竖向位移幅值谱。图 6 给出了观测点 1~6 在不同断层宽度情况下的位移幅值谱比计算结果,由于入射 Rayleigh 波频率主要集中在 8 Hz 以内,因此在图 6 中给出了 8 Hz 以内的计算结果。

由位移幅值谱比的计算结果可以看到:

(1) 在 Rayleigh 波入射一侧的中远场地表处,随着断层宽度的增加,位移幅值在部分频段被放大,而在部分频段被缩小。这个现象是由于 Rayleigh 波在断层界面处发生反射,反射波与入射波在入射一侧的中远场地表处发生干涉引起的。

(2) 在 Rayleigh 波入射一侧的断层角点处(观测点 2),随着断层宽度的增加,水平与竖向位移幅值在绝大部分频段被逐渐放大,使该处总体位移反应逐渐变大,这与位移时程计算结果是一致的。

(3) 在断层中点处(观测点 3),随着断层宽度的增大,水平位移分量在低频部分略有削弱,而在高频部分被逐渐放大。在断层宽度为 9 m 时, Rayleigh 波竖向分量在部分频段内被急剧放大,断层中点的竖向位移反应出现了类共振反应。为此,另外单独求解了宽度为 9 m 的断层破碎带的自振频率,可以求得断层破碎带的第 1 阶自振频率为 6.728 Hz,因此可以看到被放大的频段与断层破碎带的自振频率接近;在断层的右角点处(观测点 4),位移幅值在这些频段处也被放大。

(4) 在观测点 5 处,随着断层宽度的增加,水平位移分量在低频段部分被逐渐放大,而在高频段被逐渐削弱;竖向位移幅值谱比则随着宽度的增加而减小。

(5) 在断层右侧的中远场地表(观测点 6)处,随着断层宽度的增加,位移幅值在绝大部分频段均逐渐被削弱,因此可以推知该点的位移反应随着断层宽度的增加而减小,这与位移时程计算结果也是一致的。

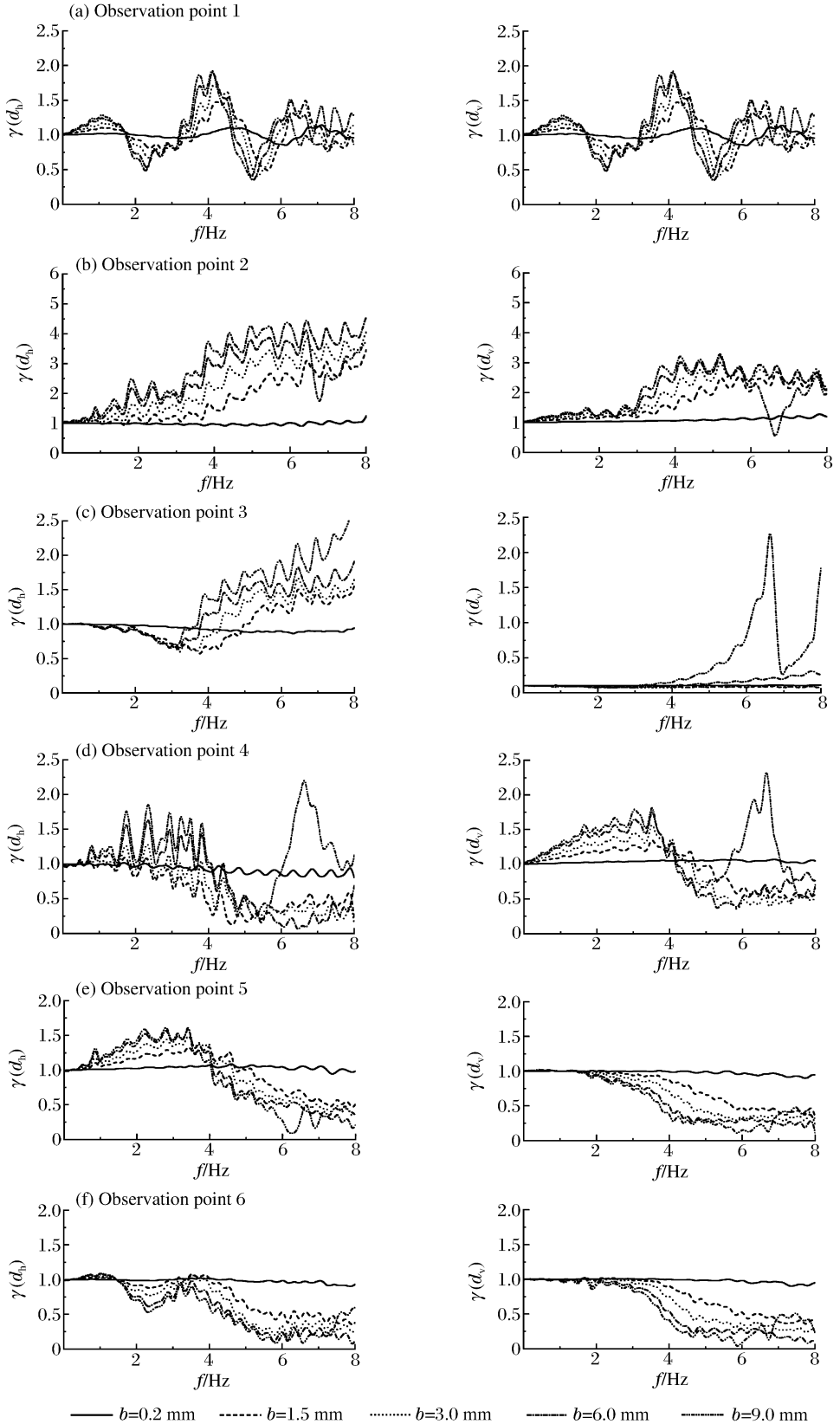


图 6 不同观测点水平与竖向位移幅值谱比

Fig. 6 Ratio of horizontal and vertical displacement amplitude spectra of observation points

## 4 断层介质剪切波速对 Rayleigh 波的影响

仍采用如图 1 所示的计算模型,半无限空间剪切波速、泊松比、密度,断层破碎带泊松比、密度均与第 3 节相同,固定断层宽度为 6 m,分别取断层介质剪切波速  $c_s=400, 240, 120, 60$  m/s,即断层介质剪切波速与半无限空间剪切波速的比值分别为 1/3、1/5、1/10、1/20 进行计算。

### 4.1 位移时程计算结果

图 7 给出了在每种断层介质剪切波速情况下地表面的水平与竖向绝对位移峰值,同时可以得到地表观测点 1~6 的水平与竖向位移反应时程曲线,限于篇幅,本文中不再给出。由图 7 结合位移反应时程曲线可以看到:

(1) 在 Rayleigh 波入射一侧的中远场地表处,断层破碎带剪切波速的变化对该处地面峰值位移反应影响很小。

(2) 在 Rayleigh 波入射一侧的断层角点以及距离角点较近处,断层剪切波速的变化对该处峰值位移反应影响显著。随着断层剪切波速的减小,断层角点以及距离角点较近处的水平与竖向峰值位移反应均有较大幅度的增加。

(3) 在断层的中点位置,随着断层剪切波速的减小,水平与竖向位移峰值均逐渐增大,尤其是在断层剪切波速为 60 m/s 时的竖向位移反应出现了类似于共振的振动反应。

(4) 在 Rayleigh 波越过断层之后,地面位移水平分量与竖向分量的变化规律与第 3 节中的分析结果一致。在断层右侧中远场地的峰值位移反应随着断层剪切波速的减小而减小,且水平位移峰值减小的程度略大于竖向位移峰值。

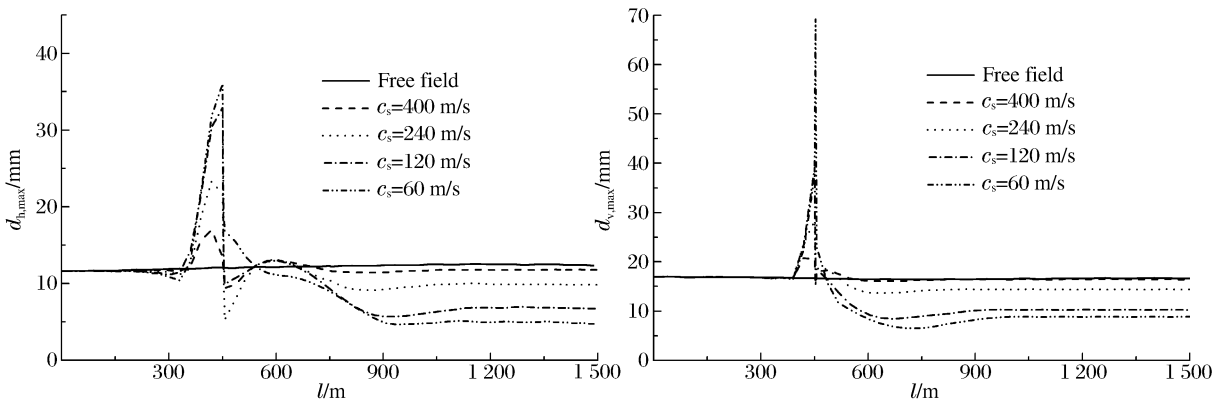


图 7 不同断层剪切波速情况地表水平与竖向位移峰值

Fig. 7 Peak horizontal and vertical displacement responses in various kinds of shear wave velocities of fault

### 4.2 位移幅值谱比计算结果

采用 3.2 节的方法,可以得到观测点 1~6 在不同断层介质剪切波速下的位移幅值谱比计算结果,限于篇幅,本文中不再给出。由位移幅值谱比的计算结果可以看到:

(1) 在 Rayleigh 波入射一侧的中远场地表面,随着断层剪切波速的减小,位移幅值在部分频段被放大,而在部分频段被缩小。

(2) 在 Rayleigh 波入射一侧的断层角点(观测点 2)处,随着断层剪切波速的减小,位移幅值在绝大部分频段被逐渐放大。

(3) 在断层中点(观测点 3)处,随着断层剪切波速的减小,水平与竖向位移幅值在大部分频段均被逐渐放大。在断层剪切波速为 60 m/s 时,竖向位移幅值在部分频段处被急剧放大,断层中点的竖向位移出现了类共振反应,同样可以求得此时断层破碎带的第 1 阶自振频率为 5.124 Hz,可以看到被放大的频段与此时断层破碎带的自振频率接近;在断层的右角点(观测点 4)处,这些频段亦被放大。

(4) 在观测点 5 处,随着断层剪切波速的减小,水平位移幅值在低频段部分被逐渐放大,而在高频段部分被逐渐削弱,竖向位移幅值则在大部分频段随着断层剪切波速的减小而逐渐被削弱。

(5) 在断层右侧的中远场地表(观测点 6)处,随着断层剪切波速的减小,位移幅值在绝大部分频段均逐渐被削弱。

## 5 结 论

断层产生的影响主要体现在两方面:

(1) 使 Rayleigh 波入射一侧断层角点及附近场地的动力反应明显增大;

(2) 软弱的断层破碎带对通过的 Rayleigh 波有削弱作用,使得在 Rayleigh 波越过断层后的另一侧中远场地面的峰值位移反应减小,而断层对 Rayleigh 波入射一侧中远场地面的影响则很小。

同时可以看到,断层的宽度变化和剪切波速变化所产生的影响主要表现在:

(1) 在 Rayleigh 波入射一侧的中远场地表面,断层宽度与剪切波速的变化对峰值位移反应的影响很小;

(2) 在 Rayleigh 波入射一侧的断层角点以及距角点较近处,随着断层宽度的增大或剪切波速的减小,峰值位移反应增大;

(3) 在另一侧中远场地面的峰值位移反应随着断层宽度的增大或剪切波速的减小而减小,且水平位移峰值减小的程度略大于竖向位移峰值。

由计算结果还可以看到,当断层破碎带自振频率与入射 Rayleigh 波频率接近时,在断层破碎带内,竖向位移幅值在部分频段处被急剧放大,断层破碎带内的竖向位移反应出现了类共振反应。

需要说明的是,上述结论是基于特定场地与特定的 Rayleigh 波得到的,对于不同的场地类型,以及不同的 Rayleigh 波,上述结论是否适用还需要开展更加广泛深入的研究。

## 参考文献:

- [1] 刘晶波,李彬. Rayleigh 波作用下地下结构的动力反应分析[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 132-135.  
LIU Jing-bo, LI Bin. Dynamic response analysis of underground structures during propagation of Rayleigh waves [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 132-135.
- [2] 任春,罗奇峰. 断层破碎带对非发震断层场地地震动的影响[J]. 地震研究, 2005, 28(2): 162-166.  
REN Chun, LUO Qi-feng. Effect of fault fracture zone on the ground motion of non-causative fault site[J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(2): 162-166.
- [3] 杨笑梅,王海涛,杨柏坡. 竖向断层对场地地面运动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 7-13.  
YANG Xiao-mei, WANG Hai-tao, YANG Bai-po. The influence of vertical cracks in fault sites on the ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 7-13.
- [4] 石玉成,陈丙午. 非发震断层的地震效应问题[J]. 西北地震学报, 1994, 16(1): 12-20.  
SHI Yu-cheng, CHEN Bing-wu. Effects of non-causative faults on earthquake damages[J]. Northwestern Seismological Journal, 1994, 16(1): 12-20.
- [5] 李山有,马强,武东坡,等. 断层场地地震反应特性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 32-37.  
LI Shan-you, MA Qiang, WU Dong-po, et al. Study on characteristics of seismic responses of fault sites[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(5): 32-37.
- [6] 温瑞智,周正华,孙平善,等. 断层场地地震动分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 21-27.  
WEN Rui-zhi, ZHOU Zheng-hua, SUN Ping-shan, et al. Ground motion analysis for near-fault site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(1): 21-27.
- [7] 李仕栋,罗奇峰. 不同倾角断层对场地动力放大效应的分析[J]. 地震研究, 2004, 27(3): 283-286.  
LI Shi-dong, LUO Qi-feng. Analysis of magnification effect of faults with various rake angles to site dynamic response[J]. Journal of Seismological Research, 2004, 27(3): 283-286.
- [8] 周正华,温瑞智,毛国滨,等. Rayleigh 波入射情形下的断层效应[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 1-6.

- ZHOU Zheng-hua, WEN Rui-zhi, MAO Guo-bin, et al. Effect of fault on ground motion in the case of incident Rayleigh wave[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006,26(5):1-6.
- [9] 刘晶波,吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报,1998,31(3):55-64.  
LIU Jing-bo, LÜ Yan-dong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998,31(3):55-64.
- [10] 刘晶波,李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学:E, 2005,35(9):966-980.  
LIU Jing-bo, LI Bin. A unified viscous-spring artificial boundary for 3-D static and dynamic applications[J]. Science in China: E, 2005,35(9):966-980.
- [11] 李彬,刘晶波. 粘弹性人工边界在 Marc 中的实现[C]//第十四届全国结构工程学术会议论文集第 I 册. 烟台:工程力学杂志社, 2005.
- [12] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 北京:科学出版社,2002.

## Effects of vertical fault fracture zones on the spreading of Rayleigh wave and ground motion

LIU Jing-bo<sup>\*</sup>, LIU Xiang-qing, ZHAO Dong-dong

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Dynamic time history analysis of ground motion with vertical fault fracture zones of different widths and shear wave velocities under Rayleigh wave was carried out by using the Rayleigh wave input method based on the viscous-spring artificial boundary. Influence of vertical fault fracture zones with various widths and shear wave velocities on the spreading of Rayleigh wave and ground motion was investigated. The results show variations of fault width and shear wave velocity have little effect in the mediate and far field on the incident side. Peak displacement response of the fault corner and the ground nearby on the incident side enlarges greatly with the increase of fault width or with the decrease of shear wave velocity of the fault. While in the mediate and far field on the other side, peak horizontal and vertical absolute displacements decrease gradually with the increase of fault width or with the decrease of shear wave velocity of the fault, and the horizontal displacement peak has a slightly decrease than that of vertical displacement peak. The results indicate the weak fault fracture zone weakens the Rayleigh wave and with the increase of fault width or with the decrease of shear wave velocity of the fault the weakening effect tends to be enhanced.

**Key words:** solid mechanics; fault fracture zone; numerical simulation; Rayleigh wave; ground motion; dynamic time history analysis; ratio of displacement amplitude spectrum

---

\* Corresponding author: LIU Jing-bo  
E-mail address: liujb@tsinghua.edu.cn  
Telephone: 86-10-62772988