

往复荷载下承插式管道接口弯曲力学性能试验研究

赵 优¹, 朱 德¹, 任雪振²

(1. 焦作工贸职业学院, 河南 焦作 454550; 2. 中德新亚建筑材料有限公司, 河南 新密 452300)

摘要:为分析往复加载方式下的不同加载速率对承插式柔性接口弯曲力学性能的影响规律,文章进行了 DN200 mm 和 DN300 mm 两种管径在弯曲作用下球墨铸铁管道承插式柔性接口逐级往复加载试验,对比不同管径和不同加载速率对接口处力学性能的影响。结果表明:管道柔性接口在不同加载速率逐级往复荷载作用下弯矩-接口转角曲线趋势相同,每个加载等级的滞回曲线重合性较好;管道直径的变化对接口极限转角大小影响较大,管径越大,接口胶圈直径增加,导致接口处的密封胶圈与外管壁接触面积增多,两种管径的横向极限转角位移基本稳定在 4°~5°;得到两种管径每个加载等级第一次往复加载的滞回曲线面积,对比发现相同加载速率管径越大能量消耗越大,但加载等级在 0~72 mm(0°~4°)内能量消耗无明显差别。

关键词:往复加载; 极限转角位移; 力学性能

中图分类号: TU990.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)12-0024-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.12.156

Experimental study on the bending mechanical properties of
plug-in pipeline interfaces under reciprocating loadsZHAO You¹, ZHU De¹, REN Xuezheng²

(1. Jiaozuo Vocational College of Industry and Trade, Jiaozuo 454550, Henan, China;

2. Zhongde Xinya Building Materials Co., Ltd., Xinmi 452300, Henan, China)

Abstract: To analyze the influence of different loading rates under reciprocating loading methods on the bending mechanical properties of the socket flexible interface, stepwise reciprocating loading tests were conducted on ductile iron pipes with DN200mm and DN300mm pipe diameters under bending. The effects of different pipe diameters and loading rates on the mechanical properties of the interface were compared. The experimental results show that the bending moment interface angle curve of the flexible pipeline interface has the same trend under different loading rates and step by step reciprocating loads, and the hysteresis curves of each loading level have good overlap; The variation of pipeline diameter has a significant impact on the maximum turning angle of the interface. The larger the pipe diameter, the larger the diameter of the interface rubber ring, resulting in an increase in the contact area between the sealing rubber ring at the interface and the outer pipe wall. The lateral ultimate angular displacement of the two pipe diameters is basically stable at 4° to 5°; Obtain the hysteresis curve areas for the first reciprocating loading of two different pipe diameters at each loading level. Comparison shows that the larger the pipe diameter at the same loading rate, the greater the energy consumption. However, there is no significant difference in energy consumption within the loading level of 0~72 mm(0°~4°).

Key words: reciprocating loading; ultimate angular displacement; mechanical properties

地震作用是工程抗震设计的基础研究工作,直接影响工程建设期成本以及运行维护期的结构安

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078125, 51578217)

作者简介: 赵 优(1995—),女,助教,硕士研究生,从事岩土工程方面的研究。

全^[1], 而且地震发生时断层周围的地面运动变形更加剧烈^[2]。地下管道是城市供水、燃气、热力以及排污等生命线工程的重要组成部分, 随着城市现代化和大型化的发展, 在自然灾害, 特别是在强烈地震袭击下, 生命线系统的地震破坏和由此产生的次生灾害, 给城市人民的的生活和生命财产安全带来严重危害^[3]。最早的城市地下管网震害可追溯到上世纪初: 1906 年美国旧金山地区 8.3 级地震, 3 条主要输水管道遭到破坏, 诱发城市配水管网严重破坏, 消防设施阻断严重, 严重影响人们正常生活^[4]。通过管道震害调查资料可知, 管道接口相对于管体本身而言较弱, 较易发生破坏^[5-6], 国内外学者对其进行了广泛的分析与研究。

韩阳等^[7-9]对承插式球墨铸铁管道进行了系统的轴向拉拔和横向弯曲的试验研究, 分析了管道内有无水压、管道直径等其他因素对柔性接口的力学性能影响, 得出了有水压的接口抗震性能较好于无水压, 管径越大接口的抗震效果越显著等结论。WHAM 等^[10]对常用接口和改进的接口进行了有覆土条件轴向拉拔试验研究和无覆土纯弯曲试验研究, 分析管-土相互作用及柔性接口弯曲力学性能, 并且结合有限元数值分析, 提出了接口渗漏仅取决于胶圈的应力分布, 与加载路径无关。钟紫兰等^[11-14]进行了承插式球墨铸铁管道接口的拟静力轴向加载和横向加载试验, 讨论轴向和横向两种加载方式, 以及分析有水压条件下是否加压条件下, 接口在复杂荷载效应下的力学特征, 得出加载方式对接口的力学性能影响较小, 柔性接口的抵抗拉伸位移主要取决于承口深度。震害作用机理极其复杂, 为更加符合真实的接口作用机理, 采用分段式管道在横向荷载弯曲作用下接口往复载荷的研究是非常有必要的。

本试验研究通过对国内市政供水常用的管径 DN200 mm 和 DN300 mm 球墨铸铁柔性管道接口进行往复荷载下的不同加载速率弯曲试验, 得出管道接口在往复荷载下弯曲作用的弯矩与转角 ($M-\theta$) 曲线, 分析讨论加载速率的变化以及管径大小变化对接口处受力状态的影响, 以期可为球墨铸铁管道胶圈柔性接口抗震设计理论和方法提供参考依据。

1 试验方案

1.1 试件制作

试验采用新兴铸管集团有限公司提供的 DN200 mm 和 DN300 mm 两种不同管径的球墨铸铁管为研究对象, 两根管均由盘承长管、盘插长管及密封胶圈 3 个部分组成。通过带有球铰接头的自制卡箍外连作动器对接口处施加横向荷载, 进而实现承插式球墨铸铁管道胶圈柔性接口受弯变形, 结合往复加载拟定加载方案使作动器连接电脑自动化改变推进方向, 可以实现自动化逐级往复加载。为使管道端部约束更符合真实工况, 文章摒弃了传统试验的端部自由约束, 利用管道两端分别外接一组短管的方式实现了端部的有限转动约束, 接口弯曲产生的转角主要是由长管接口与两组短管的接口共同承担, 如图 1 所示。管道接口转角位移和弯矩计算简化示意, 如图 2 所示。

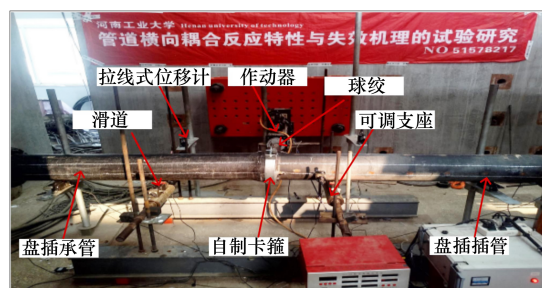


图 1 管道试件加载现场

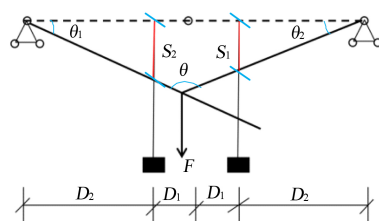


图 2 弯矩及转角转化

试验装置清单: 盘承长管、盘插长管及密封胶圈 3 部分主要试验材料、管道一端连接反力墙另一端连接反力架作为水平固定装置, 底部采用架设带有滑道式横撑作为管道竖向支撑固定装置、加载系统是通过自主设计的折返式伺服电钢作动器 (量程 50 kN, 加载速率范围为 0.5 ~ 5 mm/s, 并可实现施加单调以及往复荷载两种加载方式)、测量仪器采用拉压力传感器 (蚌埠大洋压力传感器有限公司生产, 量程为 5 t 的拉线式位移计)、数据采集系统通

过数据采集箱与静态应变仪连接,最终通过采集箱连接电脑,实现试验所有数据达到同步采集组成。

承插式管道接口的弯矩(M)通过式(1)进行计算转化,接口处产生的转角(θ)通过式(2~4)进行转化并通过倾角仪进行校核。

$$M = \frac{F \times (2D_1 + 2D_2)}{4} \quad (1)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{S_1}{D_2}\right) \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{S_2}{D_2}\right) \quad (3)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (4)$$

式中: F 为作动器施加的力值,kN; D_1 为设置拉线位移计与中间长管接口水平距离,mm; D_2 为支座与拉线式位移计之间的水平值,mm; S_1 、 S_2 分别为支座两侧 D_1 和 D_2 对称位置处拉线位移计测量值,mm, θ_1 和 θ_2 分别为两端支座短管接口转角,(°); θ 为中间长管道接口的转角,(°)。

1.2 试验加载方案

往复加载拟定加载方案为:加载速率分别为0.5、1.0、2.5 mm/s,以速率0.5 mm/s为例绘制位移时程曲线,1.0、2.5 mm/s位移时程曲线只是加载时间有所不同,加载位移峰值与速率0.5 mm/s一致,如图3所示。加载位移从36、72、108 mm逐渐增加至144 mm,每组峰值位移连续往复两次。具体试验加载工况如表1所示。

2 试验结果

2.1 管径 200 mm 逐级往复加载试验结果

0.5 mm/s 速率下 DN200 mm 接口横向逐级往复加载试验的 $M-\theta$ 曲线如图4(a)所示。由图4(a)

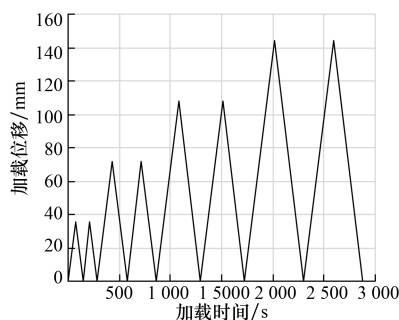


图3 0.5 mm/s 速率下 DN200 mm 接口横向逐级往复加载试验 $M-\theta$ 曲线

表1 加载工况

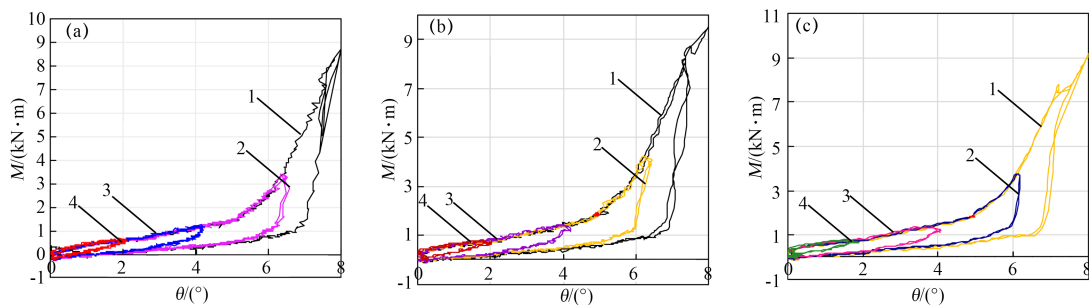
工况编号	加载模式	管径/mm	加载速率/(mm·s ⁻¹)
1			0.5
2	往复	200/300	1.0
3			2.5

可知,在加载初期即接口转角达到2°以前接口弯矩随着接口转角位移的增加,基本为线性增加,并且在推力卸载阶段,接口弯矩同样基本与接口转角呈现线性减少。随后加载等级的增大,接口弯矩与接口转角之间的变化曲线区域饱满,且在加载等级为6°的过程时,接口转角在5.2°出现弯矩骤增现象。

1.0 mm/s 和 2.5 mm/s 速率下 DN200 mm 接口横向逐级往复加载试验的 $M-\theta$ 曲线如图4(b)和4(c)所示。由图4(b)和4(c)可知与加载速率为0.5 mm/s 同样出现接口弯矩在接口转角为5.2°左右出现骤增,并且相同加载等级随加载速率对接口弯矩基本一致,表明加载速率在接口转角位移为5.2°之前,对接口弯矩影响较小。

2.2 管径 300 mm 逐级往复加载试验结果

0.5、1.0、2.5 mm/s 速率下 DN300 mm 接口横向逐级往复加载试验的 $M-\theta$ 曲线如图5所示。



速率/(mm·s⁻¹): (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.5

极限转角/(°): 1—8; 2—6; 3—4; 4—2。

图4 不同加载速率下 DN200 mm 逐级往复加载试验 $M-\theta$ 曲线

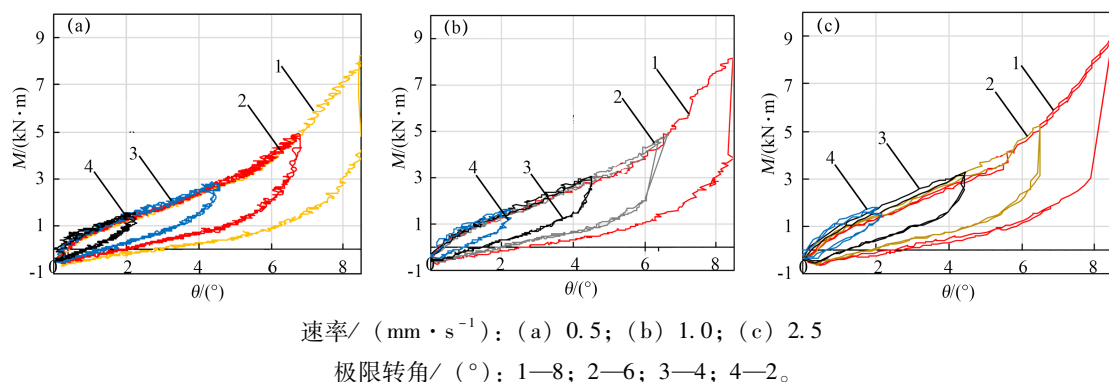


图5 不同加载速率下 DN300 mm 逐级往复加载试验 $M-\theta$ 曲线

需要说明的是由于接口转角是通过拉线式位移计所采集的位移大小换算得出,所以出现了与预定加载等级有略微不同。从图5可以看到在前期两个加载等级即接口转角为 2° 和 4° ,滞回曲线并不是表现的饱满,并且在每个加载等级进行的两次加载试验所得到的结果基本吻合,这一点说明了试验的可重复性较好。在卸载阶段, 2° 和 4° 两个加载等级的接口弯矩与接口转角之间,基本是线性减少。随着加载等级的增大,在加载等级为 6° 和 8° 时,滞回曲线饱满度有所增加。还可以看出, 6° 和 8° 两个加载等级与前两个加载等级有所不同的是,在卸载阶段时接口弯矩随着接口转角的减小,出现先突然骤减至一定数值后,再趋于线性减少,这一现象在加载等级为 8° 减少更为明显,并且在加载等级 6° 和 8° 时,接口出现了胶圈与管壁剧烈撕裂声响,但试验结束后胶圈只是有略微表面起毛并未出现损坏现象,可以看出胶圈具有较好的抵抗挤压变形能力和自恢复效果。

3 分析与讨论

3.1 加载速率接口的骨架曲线的影响

图6(a)为不同加载速率下 DN200 mm 每个加

载等级转角位移所对应的接口弯矩曲线。可以看出3种速率下接口的骨架曲线总体趋势基本相同,接口转角在 5.2° 之前加载速率对接口弯矩影响较小, 5.2° 以后主要是由于承插管壁碰撞,属于刚性体之间的相互摩擦,故出现结果弯矩突然骤增。

图6(b)为3种不同加载速率下 DN300 mm 逐级往复加载的接口骨架曲线,可以看到不同加载速率对在接口转角为 $0^\circ \sim 4^\circ$ 之间对接口的弯矩基本无影响, $2^\circ \sim 4^\circ$ 有所差别,但3种加载速率结果基本吻合,在 5.8° 以后随着加载速率增加,接口弯矩有所差别,但曲线整体趋势比较一致,并且随着加载等级的增加接口弯矩随之增加,并未出现刚度退化现象。

3.2 耗能能力分析

利用 oringe 分析软件,计算往复加载下各加载等级的滞回曲线面积,得到每个等级滞回环面积与转角的关系曲线(图7)。图7(a)为 DN200 mm 各加载等级的滞回曲线面积可以看到在接口弯曲角度在 2° 、 4° 加载等级下,耗能能力与加载速率的相关性不太明显,说明加载速率对胶圈在 $0^\circ \sim 4^\circ$ 变形内的能耗影响较小,接口弯曲转角变形超过

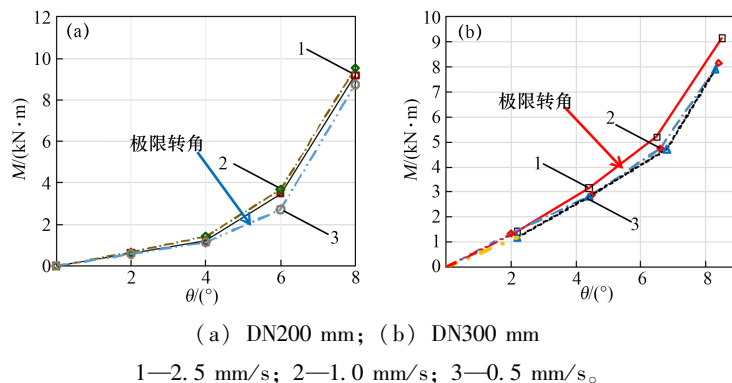


图6 不同管径逐级往复加载骨架曲线

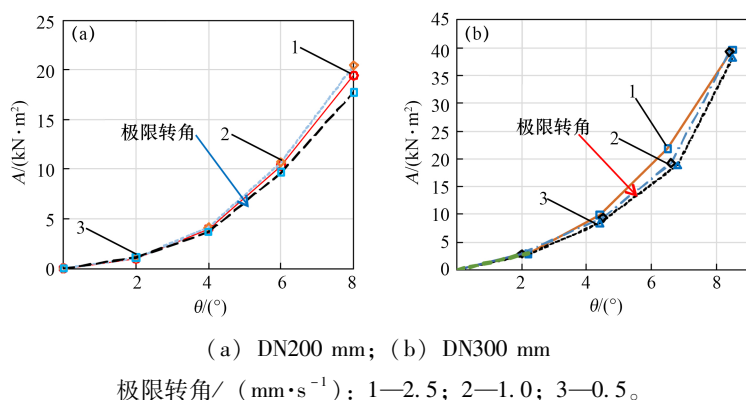


图 7 不同管径逐级加载滞回曲线面积与转角 ($A-\theta$)

接口管壁碰撞阶段后能量消耗逐渐增大,且随着速率增大而增大。图 7(b)为 DN300 mm 各加载等级的滞回曲线面积不同加载速率下接口的耗能关系。从图 7(b)可以看出,在加载等级较小阶段即 2°和 4°阶段,接口耗能与接口转角位移曲线基本重合,说明了加载速率对弯曲作用下接口的耗能能力基本无影响,但随着接口转角位移增加,可以看到在接口达到接触转角位移时,接口耗能的大小随着加载速率增加有所变化,并且在接触转角位移之后加载速率对接口的耗能大小影响明显增加。还可以看到接口的耗能能力随着接口转角位移增加而逐渐增大,这一点说明了柔性接口具有较好的抗震性能以及胶圈可恢复能力较好。

对比图 7(a)、(b)可以发现, DN300 mm 每个加载速率所对应的滞回曲线面积比 DN200 mm 型更大一些,说明大管径比小管径的能耗更多,由此可知,管径大小与管道抵抗抗震变形能力有直接关系,接口抵抗抗震变形能力随管道直径大小增大而有所提升,结合试验结果建议接口转角位移不超过 4°抵抗抗震变形能力最佳。分析其原因,主要是由于管道直径增加,接口处的密封胶圈与外管壁接触面积增多,在横向弯曲过程中受到盘插长管相对运动的摩擦力以及克服胶圈的挤压变形能力有所上升引起的。加载等级为 36、72 mm 时,两种管径滞回曲线面积基本重合,说明加载速率及管径的改变对胶圈在 0~72 mm 往复加载等级变形内的能耗基本无影响,当加载等级超过 72 mm 时能量消耗逐渐增加。

4 结 论

(1) 管道柔性接口在不同加载速率逐级往复

荷载作用下弯矩-接口转角曲线趋势相同,每个加载等级的滞回曲线重合性较好,表明胶圈可恢复特性能力较好,横向弯矩峰值随加载速率的增大而增大,分析原因是由于加载速率增加导致胶圈和管壁之间摩擦力升高。

(2) 管道直径的变化对接口极限转角大小影响较大。管径越大,接口胶圈直径增加,导致接口处的密封胶圈与外管壁接触面积增多,这里在横向弯曲过程中受到盘插长管相对运动的摩擦力以及克服胶圈的挤压变形能力有所提高引起的。管径的改变并没有直接影响接口极限转角位移的活动区域,两种管径的横向极限转角位移基本稳定在 4°~5°。

(3) 利用 origin 分析软件计算了两种管径每个加载等级第一次往复加载的滞回曲线面积,对比发现相同加载速率管径越大能量消耗越大,但加载等级在 0~72 mm(0°~4°)内能量消耗无明显差别。

参考文献:

- [1] 薛烈,陈亮.中国与孟加拉国规范关于地震作用计算的对比研究[J]. 工程建设,2023,55(12):21-26.
- [2] 王燕航,刘浪.近断层桥梁抗震的人工合成地震动[J/OL]. 工程建设,1-8[2024-05-16].
- [3] 孙绍平.国外生命线地震工程的研究概况[J]. 地震工程动态,1984(1):8-13.
- [4] MATSUHASHI M, TSUSHIMA I, FUKATANI W, et al. Damage to sewage systems caused by the Great East Japan Earthquake, and governmental policy[J]. Soils and Foundations, 2014, 54(4): 902-909.
- [5] 韩阳.城市地下管网系统的地震可靠性研究[D]. 大连:大连理工大学,2003.

(下转第 34 页)

- [6] 张景奎,刘长顺,罗居刚,等. 农田水利工程装配式薄壁混凝土结构强度检测方法研究[J]. 混凝土世界, 2021(6):61-63.
- [7] 白军营,高颀. 薄壁小型构件混凝土强度试验方法及影响因素试验研究[J]. 混凝土世界,2020(2):79-83.
- [8] 钻芯法检测混凝土强度技术规程:JGJ/T 384—2016 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [9] 曹俊峰,徐利剑,戴国强. 钻芯法检测农田水利工程预制薄壁构件混凝土强度探讨[J]. 江西水利科技, 2019,45(6):425-427;434.
- [10] 原有芬. 小直径钻芯法在检测薄壁构件强度中的应用[J]. 东北水利水电,2019,37(1):58-60.
- [11] 谭弘,孙圣. 中小直径钻芯法在水利薄壁构件强度检测中的应用[J]. 科学技术创新,2024(7):128-131.

(上接第 28 页)

- [6] 侯本伟,徐倩怡,张亚波,等. 土体参数随机场中承插式地下直线管道地震响应分析[J/OL]. 工程力学, 1-13[2024-05-16].
- [7] 韩阳,李冠潮,李东桥,等. 管道承插式柔性接口轴向力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2020, 40(5):8.
- [8] 李冠潮,韩阳,任雪振. 往复荷载下管道承插式柔性接口力学性能试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2020,29(1):5.
- [9] HAN Y, DUAN JF, CHEN JH (2016). An experimental study on the mechanical capability of a rubber gasket joint in a ductile cast iron pipeline under stretch-bending [J]. Pipelines 2016; ASCE, 23-30.
- [10] WHAN, BRAD PARKER, O'ROURKE, et al. Jointed pipeline response to large ground deformation[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2016, 7(1):1-11.
- [11] 钟紫蓝,张亚波,李锦强,等. 球墨铸铁管道接口弯曲性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(9): 143-150.
- [12] 钟紫蓝,赵鑫,张亚波,等. 强震作用下跨断层管道柔性接口抗震加固研究[J]. 世界地震工程,2024, 40(1):25-33.
- [13] 张亚波,钟紫蓝,李锦强,等. 球墨铸铁供水管道承插式接口力学性能试验及失效概率预测模型[J]. 工程力学,2024,41:1.
- [14] ZHONG Z, FILIATRAULT A, AREF A. Numerical simulation and seismic performance evaluation of buried pipelines rehabilitated with cured-in-place-pipe liner under seismic wave propagation. Earthquake Engineering & Structural Dynamics[J], 2017, 46(5):811-829.