

应力波入射充填节理的透射性能研究

刘亚强^{1,2}, 贾帅龙³, 李善伟^{1,2}

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市200092;2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司天津分公司,天津市300202;3.河北工程大学土木工程学院,河北邯郸056038]

摘要: 为了研究充填节理对不同频率应力波透射性能的影响,根据充填节理特性设计了不同厚度和强度的节理模型,并对不同频率应力波正入射岩体节理的现象开展模拟,研究了应力波在不同强度和宽度充填节理条件下的反射和透射规律。结果表明:对于不同强度和厚度的充填节理,随着应力波频率的增加,其透射系数均逐渐降低,充填节理起到“滤波”作用;随着频率的增加,透射系数衰减速率先快后慢,并逐渐趋于稳定,且充填节理强度越低、宽度越大,该现象越明显。

关键词: 应力波;充填节理;透射性能;UDEC

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)01-0229-05

0 引言

岩体是经过漫长的地质演变过程形成的,往往被节理、裂隙、软弱夹层等多种不连续的结构面所切割,当地震或爆破产生的应力波到达该结构面时,其传播规律将发生改变。为了研究应力波在岩体中的传播规律,许多学者进行了相关研究。刘婷婷等^[1]为了研究表面接触面积大小对应力波传播规律的影响,对不同接触面积的试样进行了冲击试验;陈昕等^[2]采用改进型霍普金森花岗岩压杆实验设备,研究了一维应力波在花岗岩人工节理处的传播规律,并对节理的动力学特性进行分析;杨仁树等^[3]为了研究节理材料对岩石动态力学性能的影响,通过霍普金森压杆装置对仿真节理材料岩体试件进行了冲击试验;Li等^[4-5]采用薄壳模型对应力波垂直入射和斜入射充填节理的现象进行理论分析,并与已有的理论和试验结果进行对比,验证了薄壳模型的合理性;赵坚等^[6]采用离散元和有限差分法研究了岩体节理对波传播的影响;王观石等^[7]采用连续介质的块体离散元程序(CDEM)分析了非线性变形结构面对应力波传播的影响;Huang等^[8]运用颗粒流软件PFC对应力波穿过充填节理的现象进行数值模拟;Zhu等^[9]采用离散元软件UDEC模拟了应力波穿过存在交叉节理组的岩体现象,发现节理力学和空间参数对应力波的透射性能影响很大;谢冰等^[10]通过UDEC软件

对10种粗糙程度的岩体节理进行模拟,分析了应力波通过粗糙节理时的传播规律;曾超等^[11]采用PFC软件研究了应力波随不同岩体节理厚度和面积变化的规律;刘婷婷等^[12]基于UDEC研究了节理厚度、节理间距、节理数量对应力波传播规律的影响;茹忠亮等^[13]采用UDEC研究了节理面几何形状和法向刚度对应力波衰减的影响规律;刘亚群等^[14]对爆破作用下岩质边坡的动态响应进行了模拟,并将模拟结果与实测结果进行对比,验证了离散元软件UDEC模拟方法的有效性。

应力波在岩体传播的过程中会产生衰减现象,应力波传播特性对频率具有一定的依赖,如何准确地表达应力波衰减与频率之间的关系是研究其传播规律的首要工作^[15]。由于充填节理特性的复杂性,目前针对不同频率应力波入射充填节理的影响研究较少。

本文基于离散元软件UDEC对应力波入射1组平行充填节理的传播特性进行研究,分析在不同频率下节理厚度和强度对应力波衰减的影响规律,以期对动态荷载下岩体工程安全性评价提供一定的参考。

1 UDEC模拟可行性的验证

1.1 物理模型

采用UDEC建立300 m×1 m的二维模型,验证UDEC模拟纵波(P波)在充填节理处传播的可行性,如图1所示。节理位置设在150 m处,监测点B和C分别设在x=100 m、200 m处。设置2条节理作为充填节理的两壁,并对其中的材料进行赋值来模拟充填节理,节理间距即为充填节理厚度。

收稿日期:2022-03-01

作者简介:刘亚强(1990—),男,硕士,工程师,主要从事桥梁设计工作。

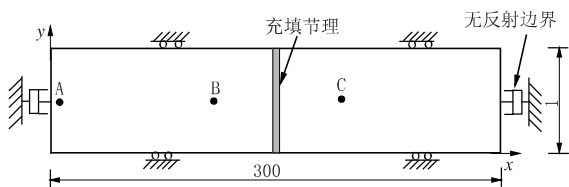


图 1 物理模型(单位:m)

1.2 数值模型建立

在离散元数值计算中,网格单元大小的划分决定着模型的计算精度,单元网格尺寸越小,则计算精度越高,但是耗时较长。为了使精度和耗时之间达到平衡,本文采用单元网格尺寸不大于波长的1/8~1/12^[16]。此外,为了准确模拟岩体中应力波的传播规律,单元网格中的应力波频率 f 应满足:

$$f \leq f_{\max} = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_p}{10 \Delta l} \tag{1}$$

式中: λ 为应力波波长,m; Δl 为岩体中三角形网格单元的最大长度,m; C_p 为纵波波速,m/s。

$$C_p = \sqrt{\frac{K+4G/3}{\rho}} \tag{2}$$

式中: K 为体积模量,GPa; G 为剪切模量,GPa; ρ 为岩体密度, kg/m^3 。

根据以上条件,岩体单元网格长度设为0.5 m;由于充填节理传播波速较低,其单元网格长度设为1 mm。

由于计算机内存的限制,计算模型只能设置为带边界的有限区域,应力波传播过程中在边界上会产生反射,影响数值模拟的准确性。为了排除此问题的干扰,采用 UDEC 提供的黏性(非反射)边界。模型左边和右面边界设为黏性边界,上下边界固定 y 方向位移(见图1)。

1.3 正弦波的加载

在 UDEC 模拟中,黏性边界上不能直接施加加速度时程曲线,应以应力时程曲线替代,否则会影响正弦波输入的正确性^[17]。为了解决该问题,将速度时程通过式(3)转化为应力时程,之后以应力时程曲线形式施加到边界上。

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) v_n \tag{3}$$

式中: σ_n 为施加的法向应力荷载,MPa; v_n 为输入质点的法向振动速度,m/s。

为了与理论结果对比,验证 UDEC 模拟应力波在充填节理中传播的有效性,节理厚度取值为2~10 mm。以半个周期的正弦波施加在左侧边界上,波的频率取为100 Hz,波幅为1 m。计算中,岩石和充填材料均采用线弹性模型,节理壁采用库伦滑动模型,不考虑岩体中应力波的衰减。在模拟中不考虑节理壁的

变形,因此节理壁刚度值和黏聚力应设置较大值以保证位移只发生在充填材料内部,节理壁刚度取值为100 GPa·m,黏聚力为1 000 MPa。岩石和充填材料的力学参数见表1^[3,11]。

表 1 岩体和充填材料力学参数

介质	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	P波波速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
岩石	2 800	51.8×10^3	27×10^3	5 600
材料 1	1 860	20.86×10^3	10.03×10^3	4 300
材料 2	1 720	16.5×10^3	7.61×10^3	3 900
材料 3	1 080	0.65×10^3	0.39×10^3	1 000
材料 4	1 700	48	20.2	210

1.4 结果对比分析

充填节理的透射系数 T 为透射波与入射波振幅的比值,其计算式为:

$$T = \frac{A_T}{A_1} \tag{4}$$

式中: A_1 代表入射应力波的振幅; A_T 代表透过充填节理后应力波的振幅。

透射系数计算值与理论值对比见表2。

表 2 透射系数计算值与理论值对比

充填节理厚度/mm	透射系数		偏差/%
	计算值	理论值	
2	0.978	0.980	0.204
4	0.953	0.967	1.460
6	0.920	0.923	0.326
8	0.883	0.884	0.113
10	0.846	0.835	1.300

由表2可知,随着充填节理厚度的增加,充填节理会耗散更多能量,透射系数逐渐降低,说明充填节理厚度对应力波的衰减不可忽略。同时,数值模拟结果与理论结果偏差最大值为1.460%,整体吻合较好,说明本文采用的计算模型和方法是可行的。

2 充填节理处不同频率应力波的传播规律研究

2.1 不同频率下充填节理对应力波传播的影响

充填节理采用表1中的材料4进行赋值,参数频率分别取值为50 Hz、100 Hz、500 Hz、1 000 Hz、1 500 Hz、2 000 Hz、2 500 Hz。由于充填节理界面处材料阻抗不同,因此,不同频率的应力波产生波的反射和透射也具有差异。

不同频率下,充填节理在测点B的反射波见图2;测点C的透射波见图3;透射系数见图4。

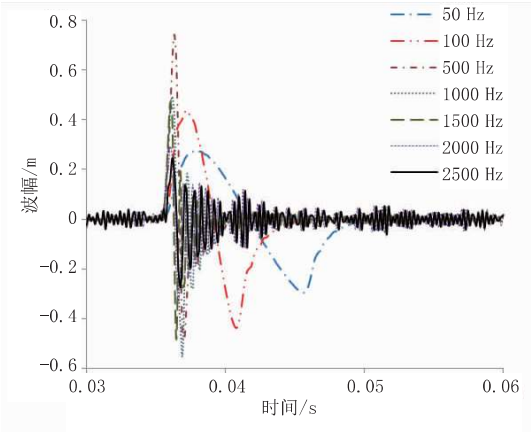


图 2 不同频率下充填节理在测点 B 的反射波

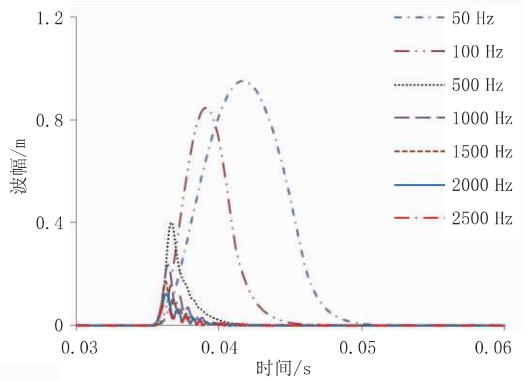


图 3 不同频率下充填节理在测点 C 的透射波

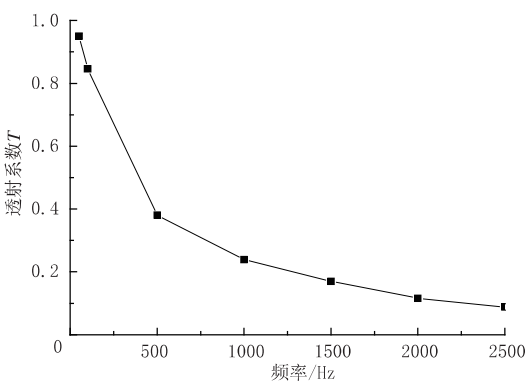


图 4 不同频率下充填节理的透射系数

由图 2 可以看出,以频率 1 000 Hz 为分界值,当应力波频率小于 1 000 Hz 时,测点 B 的反射波波幅随着频率增加而逐渐增大;当频率大于 1 000 Hz 时,波幅随着频率增加而减小。图 3 中,测点 C 的透射波波幅均随着应力波频率的增加而逐渐减小,说明充填节理对高频波具有明显的“滤波”作用。由图 4 可知,相同充填材料下,当频率较低时,其透射系数较大,波衰减较不明显;随着频率的增加,透射系数逐渐减小,且减小速率逐渐降低;当频率为 2 500 Hz 时,透射系数减小到 0.1 左右,该结果与 Li 等^[4]通过理论推导得出的规律一致。同时,可以看出频率 1 000 Hz 为分界值,当频率小于 1 000 Hz 时,透射系数衰减速率较快;当频率高于 1 000 Hz 时,透射系数的衰减速率

降低显著。这是因为高频率波在节理中多次发生反射与透射,消耗大部分能量,使透射波能量降低。因此,充填节理相当于一个高频“滤波器”,对高频波进行“过滤”,频率越高,“滤波”效应越明显。

2.2 充填节理强度对不同频率应力波传播的影响

为进一步分析不同强度充填节理下,应力波在节理岩体中的传播规律,充填材料的厚度取为 10 mm,分别采用 4 种材料进行模拟(见表 1),对不同材料下的应力波反射和透射规律进行分析。

在频率 500 Hz 下,不同充填节理在测点 B 的反射波见图 5,在测点 C 的透射波见图 6;在不同频率下各充填节理的透射系数见图 7。

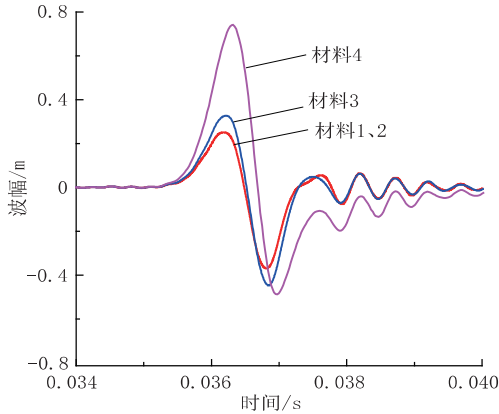


图 5 500 Hz 频率下不同充填节理在测点 B 的反射波

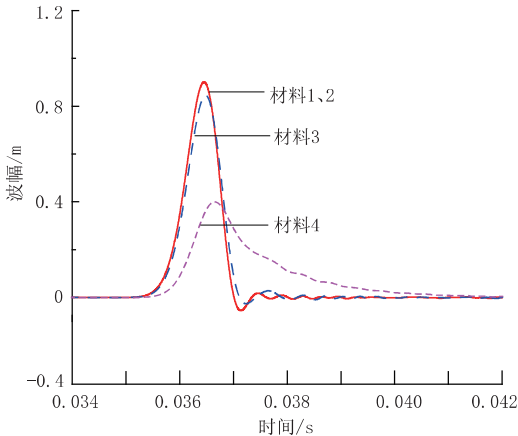


图 6 500 Hz 频率下不同充填节理在测点 C 的透射波

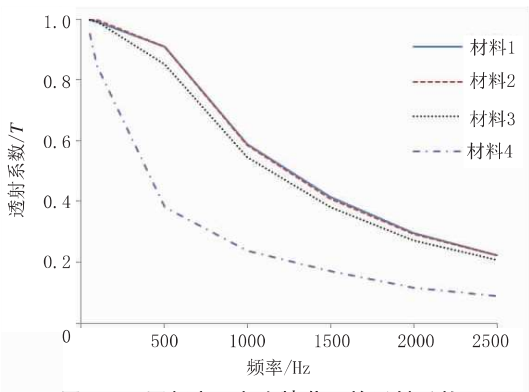


图 7 不同频率下各充填节理的透射系数

由图 5、图 6 可知,由于充填材料 1 和材料 2 的物理力学参数相近,两者在测点 B 的反射波和测点 C 的透射波基本一致;随着充填材料强度的降低,测点 B 的反射波幅值逐渐增大,而测点 C 的透射波幅值逐渐减小,说明在同一频率下,充填材料强度对透射系数影响较大。同时,由图 7 可知,4 种材料的透射系数均随着频率的增大而减小;在应力波频率较低时,强度较大的充填材料透射系数值接近 1,表明透射波的衰减不明显,但强度小的充填材料透射波幅值衰减明显,透射系数较低,“滤波”现象明显。这是因为不同波阻抗材料在界面处发生透射和反射现象时,反射波幅值随着充填材料波阻抗的减小而增大,透射系数则与之相反。当应力波频率较高时,应力波在充填节理中发生多次反射,导致透射波能量降低,表现为透射波波幅降低。同时,充填节理强度越低,透射系数的频率分界越明显。

2.3 充填节理厚度对不同频率应力波传播的影响

在图 1 的基础上,通过改变两节理间距来模拟充填节理的厚度,分析不同充填节理厚度对透射系数的影响规律,此时,充填节理采用材料 4 进行赋值。图 8、图 9 分别为在频率 500 Hz 下,不同厚度的充填节理在测点 B 的反射波和测点 C 的透射波;图 10 为不同充填节理厚度下的透射系数。

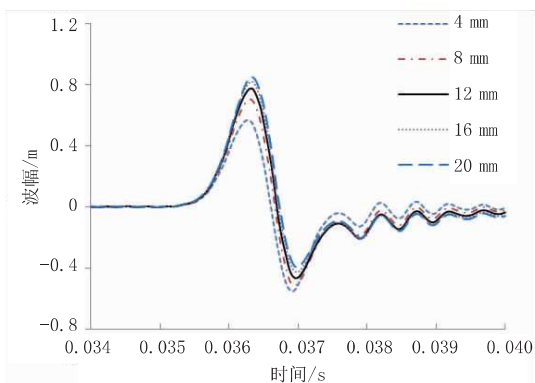


图 8 不同充填节理厚度下测点 B 的反射波

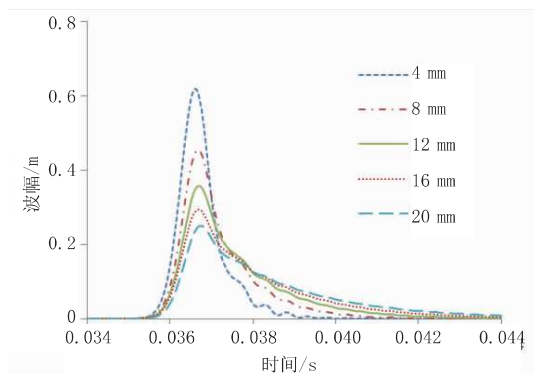


图 9 不同充填节理厚度下测点 C 的透射波

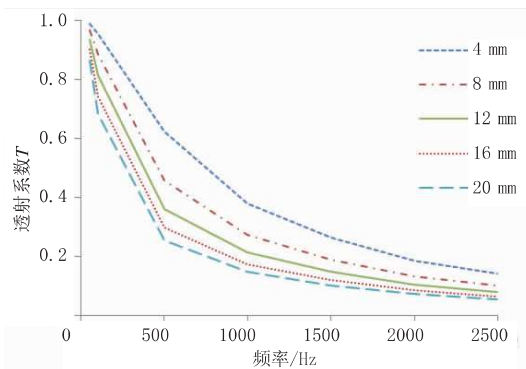


图 10 不同充填节理厚度下的透射系数

由图 8、图 9 可知,随着充填节理厚度的增加,测点 B 的反射波波幅逐渐增大,而测点 C 的透射波波幅逐渐降低。由图 10 可知,在不同充填节理厚度下,透射系数均随着应力波频率的增加而降低;在低频率下,当节理厚度为 4 mm 时,透射系数降低约 3.3%,透射波衰减幅度较小;当节理厚度为 20 mm 时,透射系数降低约 27.1%,透射波衰减幅度较大,说明节理厚度在低频率下影响较为明显。同时,1 000 Hz 如同一个频率分界值,当频率小于 1 000 Hz 时,各厚度节理的透射系数衰减速率相对较快,衰减速率随着节理厚度增大而增大;当频率大于 1 000 Hz 时,各厚度节理的透射系数衰减速率逐渐降低,并趋于稳定,节理厚度越大,该现象越明显。

3 结 语

(1)通过与等效波阻抗方法对比,得出数值模拟结果与理论结果基本一致,验证了 UDEC 模拟应力波传播的可行性。

(2)充填节理厚度一定时,随着应力波频率的增加,透射系数逐渐降低,节理的高频率“滤波”作用明显;存在一个频率分界值,当应力波的频率小于分界值时,透射系数衰减速率较快;当应力波的频率大于分界值时,透射系数的衰减速率逐渐降低并趋于稳定。

(3)不同频率下应力波的透射系数与充填节理强度有关,充填节理强度越大,其透射系数越大,且频率分界越明显。

(4)透射系数随着应力波频率的增加而降低,对厚度较大的充填节理,在低频率下,透射衰减速率较快,同时频率分界愈加明显。

参考文献:

- [1] 刘婷婷,李建春,李海波,等.接触面积对波传播规律及节理力学特性影响[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1749-1755.

- [2] 陈昕,李建春,任奋华,等.JMC 对应力波透射系数和节理比刚度影响的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(5): 957-963.
- [3] 杨仁树,王茂源,杨阳,等.充填材料对节理岩石动力学性能影响的模拟试验[J].振动与冲击,2016,35(12):125-131.
- [4] LI J C, WU W, LI H B, et al. A thin-layer interface model for wave propagation through filled rock joints [J].Journal of Applied Geophysics, 2013, 91(4): 31-38.
- [5] LI J C, LI H B, JIAO Y Y, et al. Analysis for oblique wave propagation across filled joints based on thin-layer interface model[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 102(2): 39-46.
- [6] 赵坚,陈寿根,蔡军刚,等.用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J].中国矿业大学学报,2002,31(2):111-115.
- [7] 王观石,李长洪,陈保君,等.应力波在非线性结构面介质中的传播规律[J].岩土力学,2009,30(12):3747-3752.
- [8] HUANG X L, QI S W, ANN W, et al. Numerical simulation of stress wave propagating through filled joints by particle model [J]. International Journal of Solids & Structures, 2015(69-70): 23-33.
- [9] ZHU J B, DENG X F, ZHAO X B, et al. A numerical study on wave transmission across multiple intersecting joint sets in rock masses with UDEC[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2013, 46(6): 1429-1442.
- [10] 谢冰,杨仁华,夏祥.粗糙节理对应力波透射率影响的数值分析[J].金属矿山,2012,41(7):38-41.
- [11] 曾超,曾亚武,赵凯.节理接触面积和厚度对应力波传播特性影响的颗粒流数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2018(1):134-139.
- [12] 刘婷婷,李新平,李海波,等.应力波在充填节理岩体中传播规律的数值研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(21):3552-3560.
- [13] 茹忠亮,蒋宇静.弹性纵波入射粗糙节理面透射性能研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):2535-2539.
- [14] 刘亚群,李海波,李俊如,等.爆破荷载作用下黄麦岭磷矿岩质边坡动态响应的 UDEC 模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21): 3659-3663.
- [15] 王观石,胡世丽,李志文,等.完整岩体对测井频率应力波的滤波特性[J].振动与冲击,2014,33(23):127-132.
- [16] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J].Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1973, 99(5): 421-427.
- [17] Itasca Consulting Group, Inc.. UDEC (Universal Distinct Element Code) user's manual [M].Version 6.0.Itasca: Itasca Consulting Group, Inc., 2014.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com