

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901058

## 随机粗糙充填节理对S波传播影响的数值研究\*

刘 澜<sup>1,2</sup>, 李新平<sup>1,2</sup>, 孙吉主<sup>1</sup>, 刘婷婷<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程重点实验室,  
湖北 武汉 430070)

**摘要:** 充填节理对岩体的力学特性有着重要影响,节理面不规则引起的粗糙度使S波在节理岩体中的传播规律变得更加复杂。考虑节理接触面的随机粗糙度与充填材料的塑性变形,通过离散元方法对S波在充填节理岩体中的传播规律进行数值模拟,采用中线截距平均值与起伏均方根量化描述节理的随机粗糙度,分析了不同随机粗糙度下充填厚度与节理剪切强度对透射波形及透射系数的影响。结果表明,与平直节理不同,随机粗糙充填节理对不同入射波波幅下的S波传播规律影响更加明显。同一中线截距平均值下,节理起伏均方根越大,S波透射系数越大;同一节理起伏均方根下,中线截距平均值越小,S波透射系数越大。节理粗糙度对S波衰减规律的影响与充填厚度有着密切的关系。

**关键词:** 充填节理; 随机粗糙度; 充填厚度; S波; UDEC

**中图分类号:** TU45    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0385-09

## Numerical Study on the Effect of a Random Rough Filled Joint on S-wave Propagation

LIU Lan<sup>1,2</sup>, LI Xinpin<sup>1,2</sup>, SUN Jizhu<sup>1</sup>, LIU Tingting<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
2. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** A filled joint has an important influence on the mechanical properties of rock mass. The roughness caused by the irregularity of the joint surface makes the S-wave propagation in the jointed rock mass more complicated. Considering the random roughness of joint contact surfaces and the plastic deformation of the filled material, numerical study on the S-wave propagation in filled jointed rock mass by the discrete element method is carried out. The average value of midline intercept and the root mean square of fluctuation are used to quantitatively describe the random roughness of joints. The influence of filled thickness and shear strength of joints on transmission waveforms and transmission coefficients under different random roughness is analyzed. The results reveal that, unlike planar joints, the in-

\* 收稿日期:2019-01-28;修回日期:2019-04-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51774222)、国家自然科学基金青年项目(51609183)资助

作者简介:刘澜(1994—),女,硕士研究生。主要从事应力波在岩体中的传播规律方面的研究工作。

E-mail:Liulan19940506@163.com

通讯作者:刘婷婷(1988—),女,助理研究员,博士后。主要从事节理力学特性及应力波的传播规律等方面的研究工作。

E-mail:ttliu@whut.edu.cn

fluence of random rough filled joints on the S-wave propagation under different incident wave amplitudes is more obvious. When the average value of midline intercept of a joint is the same, the S-wave transmission coefficient increases with increasing root mean square of fluctuation. When the root mean square of fluctuation is the same, the S-wave transmission coefficient increases with decreasing average values of midline intercept. The effect of the roughness of a joint on the attenuation of S-wave is closely related to the filled thickness.

**Keywords:** filled joint; random roughness; filled thickness; shear wave; UDEC

## 引言

岩体中广泛存在着节理、裂隙等不连续结构面,这些结构面通常对岩体的力学行为起控制作用。在工程爆破、防震、超声波探测等岩土工程中,当应力波传到节理面时,会在节理面处发生透反射现象,造成应力波的衰减,对岩体安全性有着重要的影响。岩体中的节理常含有一定的充填物,这些充填物剪切强度较低且易发生大变形,导致应力波衰减增强,且充填物的厚度也会引起应力波传播的延迟,因此充填节理对应力波的传播规律影响更加复杂。国内外学者关于应力波在充填节理处的传播规律开展了一定的研究。

在理论分析上,J.C.Li等<sup>[1,3]</sup>、J.B.Zhu等<sup>[2]</sup>和L.F.Fan等<sup>[4]</sup>分别采用薄层模型、黏弹性模型和特征线法研究了应力波在充填节理处的传播规律。在实验方法上,J.C.Li等<sup>[5-6]</sup>采用改进的分离式霍普金森杆(SHPB)研究应力波在充填节理中的传播规律,发现透射系数受节理力学性质、入射波入射能量影响。孙冰等<sup>[7]</sup>采用5 mm厚的阳光板模拟节理,通过模型试验研究应力波在层状节理岩体中的衰减规律;数值模拟方面,X.Huang等<sup>[8]</sup>和刘婷婷等<sup>[9]</sup>分别采用PFC2D和UDEC模拟应力波在充填节理处的传播,均发现透射系数与充填厚度和入射波频率相关。

然而天然节理面表面是粗糙不平的,其中粗糙度是影响节理剪切力学性质的关键因素。关于节理的粗糙度,一些学者做了相关研究。理论与试验方面,采用SHPB技术和分形理论,李业学等<sup>[10]</sup>、鞠杨等<sup>[11]</sup>、Y. Ju等<sup>[12]</sup>研究了应力波在粗糙节理岩体中的传播特性;高文龙等<sup>[13]</sup>采用形貌参数描述结构面几何特征,研究了充填着软弱物质的结构面的力学性质;J.C.Li等<sup>[14]</sup>用不同长度的方柱凸起隔开的两光滑表面来模拟粗糙裂隙,发现薄层理论(TLIM)

可用于研究不同粗糙度和风化等级的裂缝;S.Nakagawa等<sup>[15]</sup>对锯齿形节理模型进行剪力作用下的波动试验,指出P波与S波入射受剪节理时会部分转换为带有粒子运动的波。数值模拟方面,采用规则锯齿状模拟节理粗糙表面,茹忠亮等<sup>[16]</sup>和T.Liu等<sup>[17]</sup>通过UDEC软件分别模拟了单一节理面和充填节理对应力波的衰减影响,均发现透射系数与节理面粗糙度有关;谢冰等<sup>[18]</sup>采用中线截距平均值与节理起伏均方根定义节理粗糙度,并研究粗糙节理对应力波透射率的影响。

综上所述,已有的研究通常将节理起伏表面看作规则的锯齿状,且较少考虑充填物与粗糙度的共同作用。岩体的变形与破坏往往由节理的剪切行为控制<sup>[19]</sup>。当剪切波在充填节理处传播时,不仅会发生透反射现象,同时可能会造成充填节理的滑移破坏。因此,剪切波与节理的相互作用会影响岩体与岩土工程的安全。本文采用随机的概念考虑粗糙度,定义参数中线截距平均值 $S_m$ 与起伏均方根 $R_q$ 量化描述节理面粗糙特性,考虑充填厚度、入射波波幅及节理剪切强度的影响,通过离散元数值模拟对S波在含随机粗糙充填节理岩体中的传播规律展开研究。研究结果可为地震和爆破应力波作用下的地下岩土工程安全评价提供参考和依据。

## 1 节理模型

### 1.1 随机粗糙节理模型

节理对岩体的力学性质有着重要影响,而节理的表面形态与其力学性质密切相关。在进行室内模型试验或数值分析时,规则的锯齿状被广泛用来模拟粗糙节理面<sup>[16-17,20]</sup>,然而天然的节理面往往凹凸不平、随机起伏,因此对天然节理表面形态进行量化描述是研究应力波在粗糙节理处传播规律的先决条件。节理表面形态是一个复杂的研究对象,高文龙等<sup>[13]</sup>用轮廓曲线的高度来表示节理的一维形

貌,如图1所示,它描绘了沿截面方向( $x$ 方向)上轮廓高度 $z$ 的起伏变化。

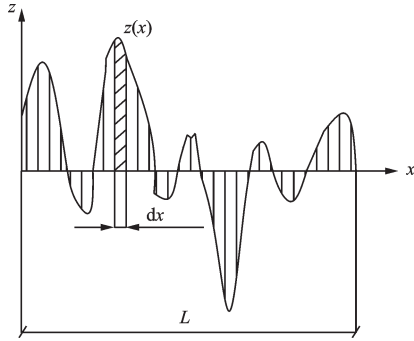


图1 节理起伏曲线  
Fig.1 Joint undulating curve

本文采用摩擦学理论中的两个参数:中线截距平均值 $S_m$ 以及起伏均方根 $R_q$ 来描述节理粗糙程度<sup>[18]</sup>,如图2所示。图2中线截距平均值 $S_m$ 即取样长度范围内,起伏曲线与中线交点各波形之间距离的算术平均值,如式(1)所示,反映节理不规则起伏的波长或间距,以及粗糙峰的疏密程度;起伏均方根 $R_q$ 为起伏曲线上各点和中线之间距离平方和平均值的平方根,如式(2)所示,当疏密程度相同时,其直接反映节理的粗糙程度。

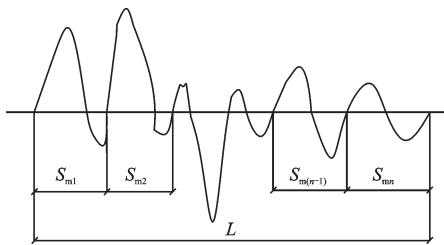


图2  $S_m$ 示意图  
Fig.2 Schematic view of  $S_m$

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (1)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{\int_0^L [z(x)]^2 dx}{L}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (2)$$

式中, $z(x)$ 为轮廓图形的分布函数; $L$ 为测量长度; $n$ 为测量点数; $z_i$ 为以中点为起点度量出的各测点起伏高度。

为考虑粗糙度对应力波传播规律的影响,采用 $S_m$ 和 $R_q$ 对粗糙度的大小进行描述。首先固定节理面的 $S_m$ 值,生成具有不同粗糙程度的随机节理,然后用python编程按式(2)算出 $R_q$ ,在 $S_m$ 为定值的情

况下, $R_q$ 可反映节理的粗糙程度,这样即可对不同粗糙节理进行量化。如图3所示,节理直线长度为1.2 m,在 $S_m$ 不变时增大 $R_q$ 或者当 $R_q$ 为定值时减小 $S_m$ ,节理均会更粗糙。

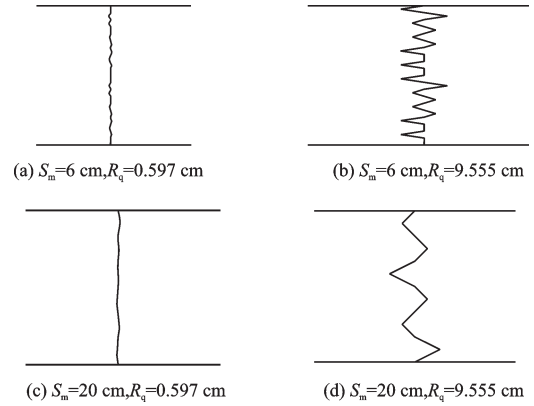


图3 随机粗糙节理示意图

Fig.3 Schematic view of random rough joint

## 1.2 随机粗糙充填节理模型

充填节理力学强度主要由表面形态、充填厚度、充填材料性质控制。在采用规则锯齿状来模拟粗糙节理的研究中,充填度(节理充填厚度与节理起伏差之比)被广泛用来讨论充填厚度与节理表面形态对充填节理剪切力学特性的影响<sup>[17,20-21]</sup>。R.E. Goodman<sup>[20]</sup>通过剪切试验发现充填度的大小直接影响节理强度。N.Phiem-wei等<sup>[21]</sup>在试验中发现随着充填度增加,剪切刚度降低。在考虑节理随机不规则表面形态的基础上,为了研究粗糙度与充填厚度对应力波传播规律的影响,定义充填比 $\lambda$ <sup>[13]</sup>为:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}} = \frac{h}{R_q} \quad (3)$$

式中, $h$ 为两侧节理壁之间的距离平均值; $R_{q1}$ 、 $R_{q2}$ 分别为两侧节理壁的起伏均方根, $R_q$ 称为综合粗糙度,当 $R_{q1} = R_{q2} = R_q$ 时,有

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2} R_q} \quad (4)$$

在本研究中,充填物两壁节理均取同一起伏均方根,故充填比按式(4)进行计算。两侧节理壁间距离平均值 $h$ 通过python编程算出。

## 2 数值模型

通过UDEC模拟应力波在节理处的传播规律已经是较为成熟和便捷的手段。UDEC模拟P波和

S波在单个节理<sup>[22-23]</sup>、多个节理<sup>[24]</sup>、充填节理<sup>[9]</sup>、规则锯齿状粗糙节理<sup>[16-17]</sup>处的传播规律已经得到了可靠的验证和较为系统的研究,因此本文不再进行验证。

为了研究S波在粗糙充填节理处的传播规律,在UDEEC中建立单个粗糙充填节理的岩体,如图4所示。模型尺寸为300 m×1.2 m,节理位置在x=140 m附近,充填节理两壁通过设置有一定间距的两条节理(节理A和节理B)来模拟,节理面间的充填材料赋予合理的材料参数。入射波监测点A设置在x=20 m处(y=0.6 m),距节理120 m左右,这样能避免入射波和反射波迭加。透射波监测点B设置在x=150 m处(y=0.6 m)。S波入射会引起y方向的振动,因此固定了上下边界x方向的位移,左右边界设置为无反射黏弹性边界。在岩体左边边界y方向上施加半个周期的正弦型应力波,频率为50 Hz,作用时间为0.01 s,波幅为1 m/s。为了满足计算精度,网格划分尺寸需小于波长的1/8~1/12<sup>[25]</sup>。因此,岩体中网格尺寸划分为2 m,充填材料因其波速较低,网格尺寸可划分为0.01 m。因为粗糙节理面是凹凸不平的轮廓线,若直接划分网格,在接近节理处的岩体部分网格会大小不均,所以为使计算更精确,生成节理C与节理D(网格划分完成后黏结起来不影响计算),分别位于x=139.5 m、x=140.5 m处,在x=139.5~140.5 m的岩体部分(R<sub>1</sub>和R<sub>2</sub>)网格尺寸设置为0.2 m。充填节理面(节理A和节理B)采用库伦滑移模型,岩石采用线弹性模型,充填材料强度比较低,甚至低于节理面剪切强度,因此采用莫尔库伦模型来考虑其剪切强度,参考相关研究<sup>[26-27]</sup>,充填材料剪切强度设置为1.4 MPa。充填节理采用位移应力连续模型,即不考虑节理面的变形,所以在以下的研究中均设置较大的节理面法向刚度和切向刚度以保证其不发生滑动。岩石和充填材料的力学参数参照相关研究<sup>[3,17]</sup>设置,见表1。本文主要侧重节理对应力波传播规律的影响,因此将岩石阻尼设置为0,从而忽略岩石材料对应力波衰减的影响。

在以往的研究中,透射系数定义为透射波波幅与入射波波幅的比值,而在库伦滑移模型中,透射波可能会被削减<sup>[17]</sup>。因此透射系数采用应力波能量定义<sup>[24]</sup>:

$$T = E_{tr}/E_{in} =$$

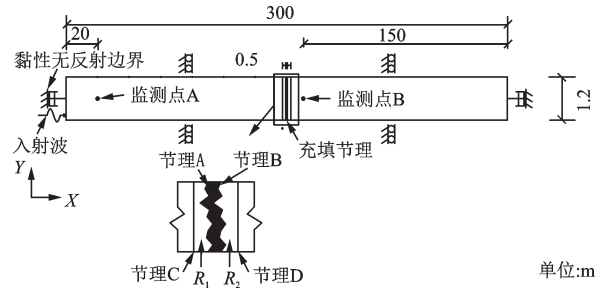


图4 S波穿过粗糙充填节理面的数值模型

Fig.4 Numerical model for S-wave propagation across rough, filled joint surfaces

表1 岩体和充填材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical properties of rockmass

介质	密度 $\rho/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模 量 $K/$ GPa	剪切模 量 $G/$ GPa	P波波 速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	S波波 速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
岩石	2 650	40	23	5 160	2 950
充填材料	1 700	0.06	0.028	240	130

$$\left( \int_{t_{tr}^0}^{t_{tr}^1} Z_s (v_{tr})^2 dt \right) / \left( \int_{t_{in}^0}^{t_{in}^1} Z_s (v_{in})^2 dt \right) = \left( \sum_{j=t_{tr}^0}^{j=t_{tr}^1} Z_s (v_{tr})^2 \Delta t \right) / \left( \sum_{j=t_{in}^0}^{j=t_{in}^1} Z_s (v_{in})^2 \Delta t \right) \quad (5)$$

式中,  $T$ 为透射系数;下标tr与in分别表示透射波与入射波;  $E_{tr}$ 与  $E_{in}$ 分别表示透射能量与入射能量;  $v_{tr}$ 与  $v_{in}$ 分别表示透射波与入射波的粒子振动速度;  $t_{tr}^0$ 与  $t_{tr}^1$ 分别表示透射波的起始时间与终止时间;  $t_{in}^0$ 与  $t_{in}^1$ 分别表示入射波的起始时间与终止时间;  $Z_s$ 为S波波阻抗,等于介质密度与S波波速的乘积。

## 3 结果分析

### 3.1 剪切强度对透射波的影响

考虑法向应力为2、5.7、15 MPa时<sup>[3]</sup>,与之相应的节理面(介于充填材料与岩石间)剪切强度  $\tau_s$ 分别设置为1.4、4.0、10.5 MPa,此时平直充填节理与粗糙充填节理的透射波形如图5所示。在图5(a)中,节理面平直,充填厚度固定为10 mm,由透射波形发现在不同的节理面剪切强度  $\tau_s$ 下,透射波均被削减,充填节理发生滑移,且透射波峰值相同,约为0.16 m/s,小于节理面剪切强度为1.4 MPa、充填材料为弹性时的透射波峰值0.18 m/s,说明考虑了塑性变形的充填材料,增大了S波衰减。当充填材料

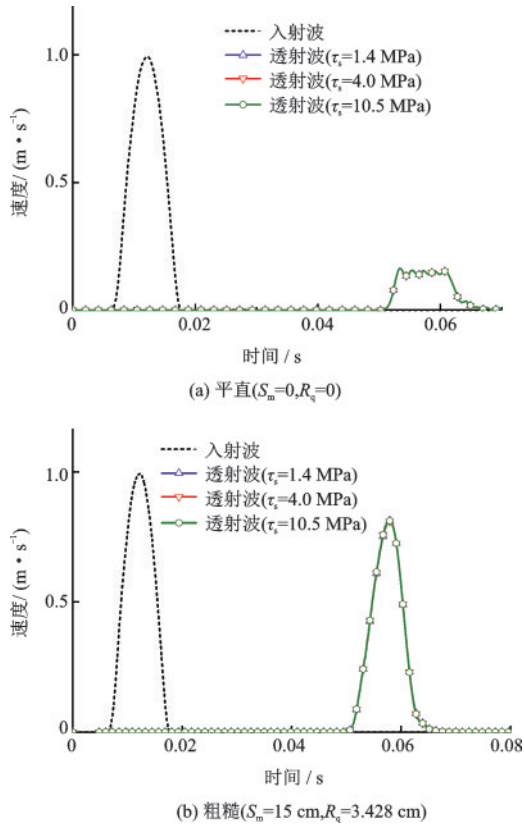


图5 节理面为不同剪切强度、不同粗糙情况时S波穿过充填节理的透射波形  
Fig.5 Transmission waves of an S-wave across a filled joint with varying shear strength and joint wall roughness

为弹塑性时,与不考虑充填材料内部破坏的结论不同<sup>[3]</sup>,充填节理的强度由充填材料与节理面的剪切强度共同决定,即小于两者中较低者,因此当充填材料剪切强度为1.4 MPa,而节理面剪切强度自1.4 MPa不断增加时,充填节理的整体强度均小于1.4 MPa,故透射波为同一波形。

图5(b)中,节理面为一随机粗糙表面,充填比为0.20(充填厚度为10 mm),随节理面剪切强度的增加,透射波峰值基本保持不变,且透射波未被削减,说明节理没有发生滑移,这是因为粗糙节理表面微凸体间的咬合力与摩擦力,使充填节理整体剪切强度增大,因此节理未发生滑移变形。

### 3.2 入射波波幅对透射波的影响

接下来的讨论中,节理面剪切强度均设置为4.0 MPa。入射波波幅是影响S波传播的一个重要因素,为考虑入射波波幅的影响,定义剪切应力比<sup>[28]</sup>:

$$\delta = \tau_{i\max} / \tau_s \quad (6)$$

式中,  $\tau_{i\max} = Z_S v_{i\max}$ 。  $\tau_{i\max}$  为入射波最大剪应力,  $v_{i\max}$  为入射波最大粒子振动速度,  $Z_S$  为S波波阻抗,  $\tau_s$  为节理面剪切强度。

剪切应力比  $\delta$  由0.5变化至4.5时,平直充填节理与粗糙充填节理的透射波波形如图6所示(入射波频率为50 Hz,作用时间为0.01 s)。图6(a)中平直节理的充填厚度为10 mm,图6(b)的粗糙节理中线截距平均值  $S_m$  为15 cm,节理起伏均方根  $R_q$  为0.597 cm,充填比为1.18(充填厚度为10 mm)。

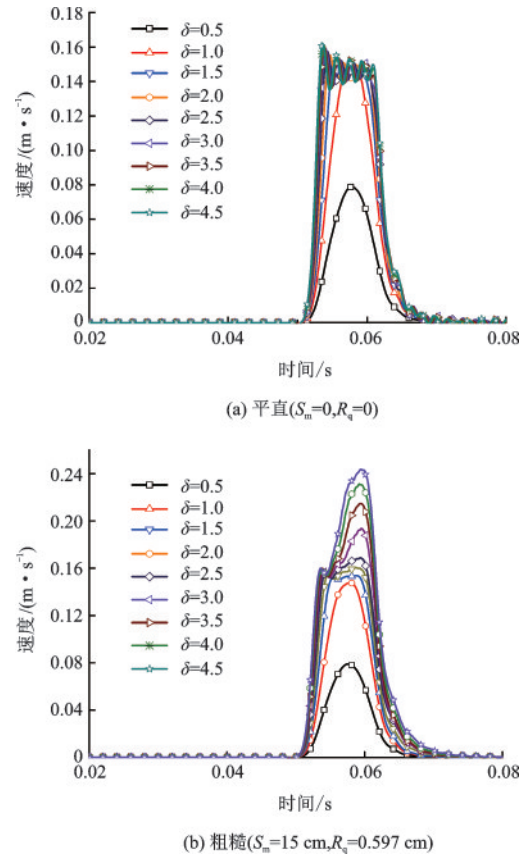


图6 不同剪切应力比、不同节理面粗糙情况时S波穿过充填节理的透射波形  
Fig.6 Transmission waves of an S-wave across a filled joint with varying shear stress ratio and joint wall roughness

如图6所示,当  $\delta$  超过1.0时,平直充填节理和粗糙充填节理的透射波波形都开始出现变化。对于平直充填节理,透射波出现了削减,且透射波的峰值不再改变,这表明在透射波被削减期间入射波波幅对透射波波形不再有影响,节理已发生滑移。当滑动发生时,透射波的最大值取决于节理剪切强度,与入射波波幅无关。对于粗糙充填节理,透射波在  $\delta$  超过1.0时开始变形,且随着剪切应力比  $\delta$  的增加,透射波峰值仍继续增加。相较平直节理,粗

糙节理对入射波波幅更敏感,因为粗糙节理凹凸不平的界面会引起应力集中,微凸体间咬合力与摩擦力作用也会影响节理剪切强度和应力位移关系,同时,粗糙的表面还会引起S-P波转换<sup>[15]</sup>,产生透射P波与反射P波,波的叠加改变了透射波形。因此节理粗糙程度影响着透射波形。

### 3.3 充填厚度对透射波的影响

不同充填厚度下S波穿过平直与粗糙节理时的透射情况如图7和图8所示。图7中入射波波幅为1 m/s,图8中入射波波幅为0.1 m/s。其中平直节理充填厚度由3 mm变化至120 mm,粗糙节理中线截距平均值 $S_m$ 为15 cm,节理起伏均方根 $R_q$ 为5.431 cm,充填比变化范围为0.04~1.30。

计算结果表明:在波幅为0.1 m/s时,平直节理与粗糙节理均未发生滑移,且透射波峰值随厚度的增加而降低,其中厚度相当时,粗糙充填节理的透射波峰值略高,这是因为节理面越粗糙,其微凸体

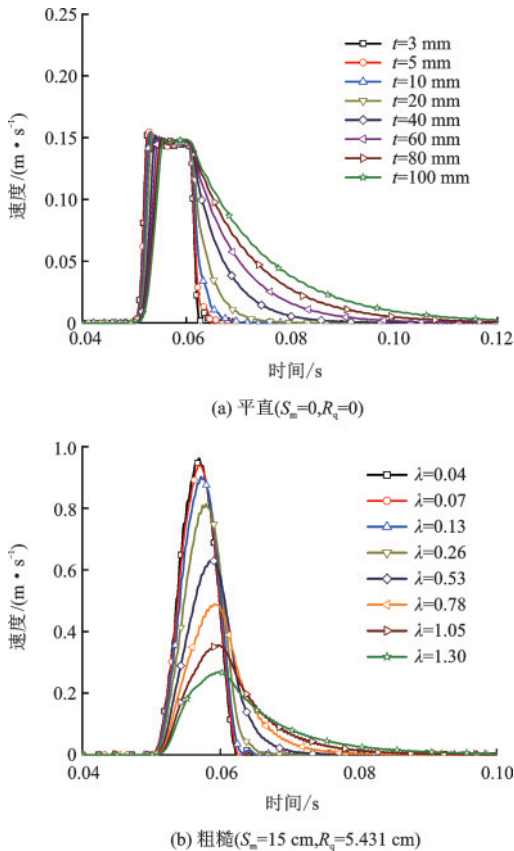


图7 不同充填厚度、不同节理面粗糙情况时波幅为1 m/s的S波穿过充填节理的透射波形

Fig.7 Transmission waves of an S-wave with 1m/s amplitude across a filled joint with varying filled thickness and joint wall roughness

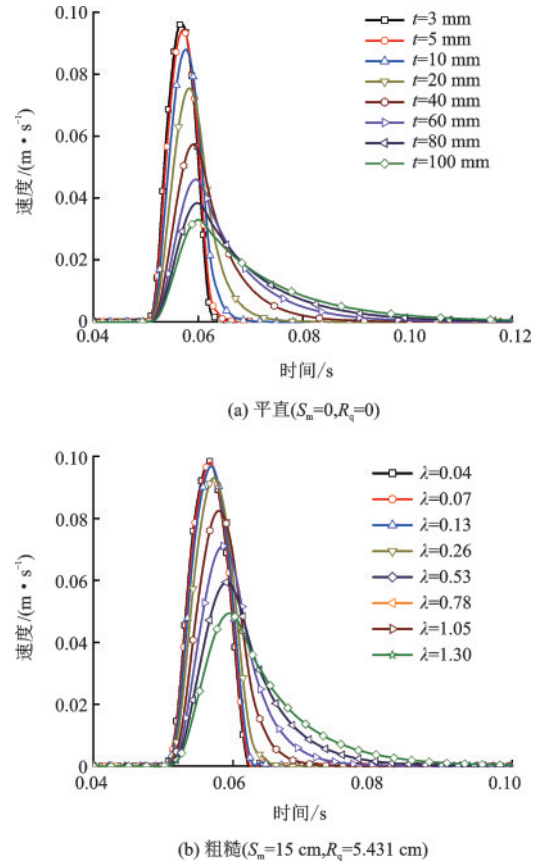


图8 不同充填厚度、不同节理面粗糙情况时波幅为0.1m/s的S波穿过充填节理的透射波形

Fig.8 Transmission waves of an S-wave with 0.1m/s amplitude across a filled joint with varying filled thickness and joint wall roughness

间的咬合力与摩擦越强,应力波更容易穿过节理。

当入射波波幅为1 m/s时,对于平直节理,不同充填厚度下透射波均被削减,节理发生了滑移,此时透射波峰值均约为0.15 m/s,由此可见当波幅大于一定值后,透射波波幅受到充填厚度的影响较小,但透射波的到达时刻与持续时间均随着充填厚度的增加而增加;而对于粗糙充填节理,透射波从未被削减,且随充填厚度增加,透射波峰值显著减小,这是因为粗糙充填节理表面微凸体的嵌锁作用增加了节理面强度,所以节理未发生滑移。故节理的粗糙度对S波传播规律有着明显的影响。

对于未发生滑移的平直节理与粗糙节理,充填厚度的增加使入射波衰减加大,主要原因是:①随着充填厚度增加,剪切刚度会降低<sup>[21]</sup>;②充填材料本身的低弹模和低强度,当充填物厚度越大,吸收和反射的应变能就越多,且会产生连续变形,引起应力波的衰减;③应力波在充填节理两个界面间的多重反射以及界面的变形均会影响应力波的传播

过程。另外,由于充填厚度增加,上下粗糙节理壁之间的嵌挤咬合作用减弱,应力波更不易穿过节理。

### 3.4 中线截距平均值 $S_m$ 与节理起伏均方根 $R_q$ 对透射系数的影响

分别取  $S_m$  为 6、8、10、12、15、20 cm, 经过多次试算, 每一  $S_m$  值对应  $R_q$  均取值为 0.597、1.520、2.420、3.428、5.431、7.413、9.555 cm, 生成不同粗糙度的随机节理。如图 4 所示, 记录监测点 A 与点 B 的粒子振动速度, 获取了 42 个不同粗糙节理对应的测点透射系数。本小节为计算简便, 采用节理充填厚度为 10 mm, 在数值模拟中体现为两节理壁横坐标相差 10 mm。

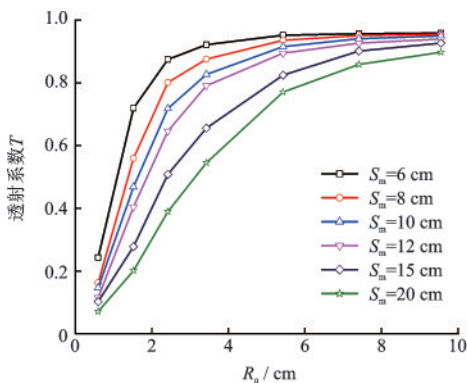
不同粗糙情况下充填节理的透射率变化情况如图 9 所示。计算结果表明:  $S_m$  与  $R_q$  两个参数共同影响着透射系数。由图 9 可知, 在同一  $S_m$  值下, 透射系数随节理起伏均方根  $R_q$  值增大而增加, 最大增加了 11.65 倍 ( $S_m=20$  cm), 最小增加了 2.95 倍 ( $S_m=6$  cm); 在同一  $R_q$  值下, 透射系数随中线截距平均值  $S_m$  的减小而增加, 最大增加了 2.58 倍 ( $R_q=1.520$

cm), 最小增加了 0.07 倍 ( $R_q=9.555$  cm)。由上述可得透射系数对  $R_q$  值变化更敏感,  $R_q$  不但与每一测点从中心到表面形态轮廓的高度偏差有关, 而且对较大和较小的高度值较为敏感, 所以它更能反映表面形态的离散性和波动性, 因此在理论上普遍被采用。实践中, 任一节理的一维形貌可用  $S_m$  与  $R_q$  共同量化表达。无论是固定  $S_m$  值逐渐增大  $R_q$  值, 还是固定  $R_q$  值逐渐减小  $S_m$  值, 节理均会更粗糙。越是粗糙的节理面, 其抗剪强度越大<sup>[29]</sup>, 对入射波衰减作用越小。且其微凸体间的咬合力与摩擦越强, 应力波更容易穿过节理, 因而透射系数越大, 以上现象与 T.Liu 等<sup>[17]</sup> 采用规则锯齿状节理的研究结论相一致, 也与李业学等<sup>[10]</sup> 基于分形损伤理论研究应力波穿越不规则节理时的透射规律符合, 即节理面越粗糙, S 波透射系数越大。

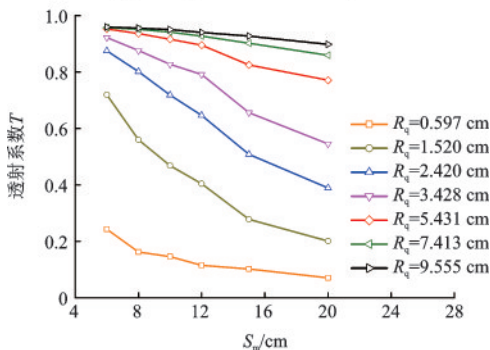
图 9(a) 中, 在  $R_q$  达到 3.4 cm 前, 曲线基本都呈线性增加趋势, 且  $S_m$  越小, 增加速度越快, 表明越是粗糙的节理, 透射系数增加速度越快; 超过此值, 进入非线性增加阶段, 表明当节理粗糙度增加至某特定值后, 透射系数增加速度越来越缓慢, 对其影响越来越小。图 9(b) 中, 透射系数降低幅度随着  $R_q$  的增大而减小, 在  $R_q$  为 9.6 cm 时, 随着  $S_m$  的增加, 透射系数降低幅度最小, 仅 6.4%, 曲线接近水平, 这说明当  $R_q$  值较大时, 变化  $S_m$  值所能引起的粗糙度变化很小, 同时对透射系数的影响也很小。

### 3.5 粗糙度和充填厚度对透射系数的共同影响

为了进一步研究粗糙度和充填厚度对 S 波传播的影响, 将节理面不同粗糙程度下透射系数与充填比  $\lambda$  (固定  $R_q=5.431$  cm) 的关系如图 10 所示。总的来说, 节理越粗糙, 充填厚度越小, 透射系数越大。但节理粗糙度对透射系数的影响与充填比密



(a) 不同  $S_m$  下透射系数  $T$  随着  $R_q$  变化曲线



(b) 不同  $R_q$  下透射系数  $T$  随着  $S_m$  变化曲线

图 9  $R_q$  与  $S_m$  对透射系数  $T$  的影响

Fig.9 The influence of  $R_q$  and  $S_m$  on transmission coefficient  $T$

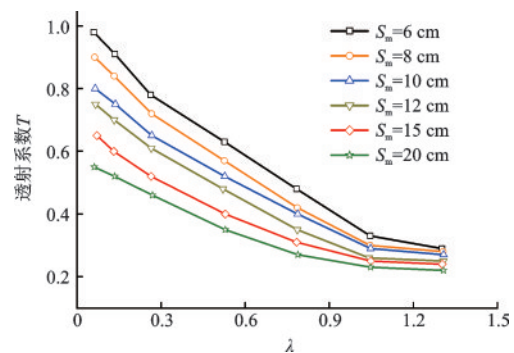


图 10 充填比与粗糙度对透射系数  $T$  的共同影响

Fig.10 The influence of filling ratio and roughness on transmission coefficient  $T$

切相关,当充填比较小时,随着节理粗糙度增加,透射系数增长很快,例如当充填比 $\lambda=0.06$ 时, $S_m$ 从20 cm降低到6 cm,透射系数增长了78%;当充填比较大时( $\lambda=1.31$ ),透射系数增长幅度很小(31%),最大值与最小值仅差0.07,说明此时粗糙度对透射系数影响较小。也就是说,当充填厚度足够大时,S波衰减主要取决于充填材料本身,而不是节理表面形态。造成以上现象的原因是当充填比较小时,节理强度受节理表面形态、充填物强度和岩壁强度的共同影响。当充填比较大时,节理强度主要由充填物强度控制<sup>[20]</sup>。另外,当粗糙节理壁被较厚的充填物隔开时,由粗糙表面咬合作用引起的S-P波转换效应变弱。因此,当充填比增加至超过某一特定值时,S波的衰减主要取决于充填材料本身;当充填比较小时,粗糙度和充填材料共同影响着S波的传播。

## 4 结 论

针对S波在含随机粗糙充填节理岩体中的传播衰减规律,采用中线截距平均值 $S_m$ 和起伏均方根 $R_q$ 量化描述粗糙节理,通过离散元方法生成不同粗糙度的随机节理,分析节理剪切强度、入射波波幅、节理充填厚度及粗糙度对透射波形及透射系数的影响,发现节理面的粗糙程度明显影响着S波的传播性质,具体结论如下:

(1)对于平直充填节理,透射波被削减,节理发生了滑移,而S波通过粗糙充填节理时,由于节理表面微凸体间的咬合力与摩擦力使充填节理整体剪切强度增大,透射波未被削减,节理未发生滑移破坏。

(2)对于平直充填节理,当剪切应力比超过1.0时,透射波被削减,之后入射波波幅继续增加,透射波波幅则基本不变。而对于粗糙充填节理,当剪切应力比大于1.0且继续增加时,透射波出现了削减,但波幅仍继续增加。相较平直节理,粗糙节理对入射波波幅的变化更敏感。

(3)当入射波波幅较大时(1 m/s),对于平直节理,透射波被削减,充填厚度的增加对透射波波幅基本无影响。

(4)中线截距平均值 $S_m$ 和起伏均方根 $R_q$ 可用于量化描述粗糙节理。节理越不规则或越粗糙(中线截距平均值越小或起伏均方根越大),透射系数越大,且 $R_q$ 对透射系数的影响更大。

(5)节理越平缓,充填厚度越大,透射系数越小。节理粗糙度对透射系数的影响与充填厚度密切相关。当充填比较小时(例如 $\lambda=0.06$ ),节理粗糙度显著影响S波的衰减,随着粗糙度增加,透射系数增加且增幅明显(78%)。当充填比较大时(例如 $\lambda=1.31$ ),透射系数增幅较小(31%)。此时S波的衰减主要由充填材料的力学特性决定,而非节理表面形态。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zhu J B, Zhao X B, Wu W, et al. Wave propagation across rock joints filled with viscoelastic medium using modified recursive method [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 86(11): 82-87.
- [3] Li J C, Liu T T, Li H B, et al. Shear wave propagation across filled joints with the effect of interfacial shear strength [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1-11.
- [4] Fan L F, Wong L N Y. Stress wave transmission across a filled joint with different loading/unloading behavior [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 60(8): 227-234.
- [5] Li J C, Ma G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46(3): 471-478.
- [6] Li J C, Ma G W, Huang X. Analysis of wave propagation through a filled rock joint [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2010, 43(6): 789-798.
- [7] 孙冰, 郭闪闪, 曾晟, 等. 应力波在层状节理岩体中的透反射与衰减规律 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(6): 828-832.  
Sun B, Guo Sh Sh, Zeng Sh, et al. Transmission and reflection and the attenuation law of stress wave in layered joint rock mass [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(6): 828-832. (in Chinese)
- [8] Huang X, Qi S, Williams A, et al. Numerical simulation of stress wave propagating through filled joints by particle model [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 69-70: 23-33.
- [9] 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(增2): 3552-3560.  
Liu T T, Li X P, Li H B, et al. Numerical study on stress wave propagation across filled joints [J]. *Chinese*

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (Sup 2):3552-3560. (in Chinese)
- [10] 李业学, 谢和平, 朱哲明, 等. 应力波穿越分形节理时的透反射规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1):120-129.  
Li Y X, Xie H P, Zhu Zh M, et al. Study on rules of transmission and reflection of stress wave across fractal joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1):120-129. (in Chinese)
- [11] 鞠杨, 李业学, 谢和平, 等. 节理岩石的应力波动与能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12):2426-2434. (in Chinese)  
Ju Y, Li Y X, Xie H P, et al. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12):2426-2434.
- [12] Ju Y, Sudak L, Xie H. Study on stress wave propagation in fractured rocks with fractal joint surfaces[J]. International Journal of Solids & Structures, 2007, 44(13):4256-4271.
- [13] 高文龙, 姜耀东, 湛川. 软弱结构面表面形态与充填度的力学特性研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1):127-131.  
Gao W L, Jiang Y D, Zhan Ch. The study of structural plane based on appearance and backfilling state[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1):127-131. (in Chinese)
- [14] Li J C, Li H B, Zhao J. Study on wave propagation across a single rough fracture by the modified thin-layer interface model [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 110:106-114.
- [15] Nakagawa S, Nihei K T, Myer L R. Shear-induced conversion of seismic waves across single fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(1):203-218.
- [16] 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.  
Ru Zh L, Jiang Y J. Research on transmission behaviors of rough joint surfaces with elastic P-wave incidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12):2535-2539. (in Chinese)
- [17] Liu T, Li X, Li J, et al. Numerical study on S-wave transmission across a rough, filled discontinuity[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(11):249.
- [18] 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.  
Xie B, Yang R H, Xia X. Numerical analysis on transmittivity of stress wave impacted by rough joint [J]. Metal Mine, 2012, 41(7):38-41. (in Chinese)
- [19] 唐志成, 夏才初, 肖素光. 节理剪切应力-位移本构模型及剪胀现象分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5):917-925.  
Tang Zh Ch, Xia C Ch, Xiao S G. Constitutive model for joint shear stress-displacement and analysis of dilation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5):917-925. (in Chinese)
- [20] Goodman R E. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1968, 94:637-660.
- [21] Phien-wei N, Shrestha U B, Rantucci G. Effect of infill thickness on shear behaviour of rock joints [C]//Rock joints: Proceedings of the International Conference on Rock Joints, 1990:289-294.
- [22] Lemos J V. A distinct element model for dynamic analysis of jointed rock with application to dam foundation and fault motion[D]. University of Minnesota, Minneapolis, 1987.
- [23] Zhao X B, Zhao J, Cai J G, et al. UDEC modelling on wave propagation across fractured rock masses [J]. Computers & Geotechnics, 2008, 35(1):97-104.
- [24] Cai J G, Zhao J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(4):661-682.
- [25] 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.
- [26] 许江, 瞿佳美, 刘义鑫, 等. 循环剪切荷载作用下充填物对结构面剪切特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5):1627-1637.  
Xu J, Qu J M, Liu Y X, et al. Influence of filling material on the behavior of joints under cyclic shear loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5):1627-1637. (in Chinese)
- [27] Indraratna B, Welideniya H S, Brown E T. A shear strength model for idealized infilled joints under constant normal stiffness [J]. Géotechnique, 2005, 55(3):215-226.
- [28] Zhao X B, Zhao J, Hefny A M, et al. Normal transmission of s-wave across parallel fractures with coulomb slip behavior [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(6):641-650.
- [29] Patton F D. Multiple modes of shear failure in rock [C]// Proceeding of the 1st Congress of International Society of Rock Mechanics, 1966:509-513.

(本文责编:周小潭)