

应力波在充填节理岩体中传播规律的数值研究

刘婷婷^{1,2,3}, 李新平^{1,2}, 李海波³, 李建春³, 罗 忆^{1,2}

(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;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要:通过离散元数值模拟对应力波在含一组平行充填节理岩体中的传播规律开展研究,并应用等效介质模型对应力波在含多条小间距充填节理岩体的传播规律进行分析。首先,通过数值模拟结果与理论结果的对比,验证 UDEC 模拟应力波在单个充填节理处的传播规律的可行性。然后将 UDEC 模型进行扩展研究应力波在含一组平行充填节理的岩体中的传播规律,并对充填厚度、节理间距、节理数量展开参数分析。研究发现,随着充填厚度的增加,对于不同的节理间距和数量,透射系数均减小,而节理数量对透射系数的影响与节理间距有关。存在 2 个临界值将节理间距对透射系数的影响规律划分为 3 个不同区间,当节理间距足够大时,透射系数趋于稳定,且稳定值与节理数量呈指数函数关系。最后,当节理间距较小时,采用一维等效介质多条充填节理进行分析,并对入射波频率、充填材料特性、充填厚度以及节理数量展开了参数分析对比,结果表明一维等效介质可用于简化应力波在多个小间距的充填节理中的传播计算。

关键词:岩石力学; 充填节理; 应力波; 数值模拟; 透射系数

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)增 2-3552-09

Numerical study on stress wave propagation across filled joints

LIU Tingting^{1,2,3}, LI Xinpin^{1,2}, LI Haibo³, LI Jianchun³, LUO Yi^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China; 2. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The discrete element simulations were conducted to investigate the wave transmission across a set of parallel filled joints. In addition, the equivalent medium model was used to analyze the wave transmission across multiple filled joints with small space. Firstly, the feasibility of UDEC was verified through the comparative analysis of results of numerical simulation and two theoretical methods. Subsequently, the numerical simulation was extended to investigate the wave transmission across a set of parallel filled joints. Moreover, the parametric analysis for the effects of filled thickness, joint space and number on transmission coefficients was carried out. The results revealed that the transmission coefficient decreases with increasing the filled thickness, which is not affected by joint space and number. However, the influence of joint number on transmission coefficient is related to joint space. Note that the influence of joint space on transmission coefficient can be divided into three different ranges by two critical values. Transmission coefficient tends to be stable when the joint space is large enough. And

收稿日期: 2016-07-11; **修回日期:** 2016-09-30

基金项目: 中国博士后面上基金项目(2015M582289); 国家自然科学基金青年基金项目(51609183)

Supported by China Postdoctoral Science Foundation(Grant No. 2015M582289) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51609183)

作者简介: 刘婷婷(1988-), 女, 博士, 2009年毕业于郑州大学水利水电工程专业, 现任助理研究员, 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: tliu@whut.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0829

the stable value in exponential function with joint number. Finally, the equivalent medium model was used to analyze the wave transmission across multiple filled joints with small space. Then, the effect of relevant parameters such as incident wave frequency, filled material properties, filled thickness and joint number on wave transmission was carried out. The results show that the equivalent medium model can be used to describe wave transmission across multiple filled joints with small space.

Key words : rock mechanics ; filled joints ; stress wave ; numerical simulation ; transmission coefficient

1 引 言

自然界的岩体中包含大量的不连续结构面，如裂纹、节理或者断层等。在地下工程或边坡工程中，当地震或者爆炸产生的应力波传播到岩体中的不连续结构面处时，会发生透射、反射、衰减和时间延迟，对工程安全有重要的影响。基于位移不连续理论(DDM)，M. Schoenberg 等^[1-6]采用特征线法和递归分析法研究了应力波类型、入射角度、节理数量和间距对应力波传播规律的影响。非充填节理模型包括线弹性模型和非线性模型，如 Barton-Bandis 模型^[7]和库伦滑移模型^[8]。对于不连续模型，节理的变形特性参数(如节理刚度)对应力波的衰减有重要影响。

岩体中的节理，往往含有一定的充填物，如泥、砂或岩石碎屑等。充填物的低强度和大变形特性会改变结构面的力学特性以及整个岩体的强度，增加工程岩体的不稳定性。由于应力波在充填节理内部发生多重透反射和充填材料与岩石材料的差异，充填节理对应力波的作用更加复杂。此外，由于厚度不可忽略，充填节理也会引起应力波传播的时间延迟。针对应力波在充填节理处的传播规律，国内外一些学者开展了大量研究。在理论分析上，假设充填节理壁两侧的应力和位移均连续，J. B. Zhu 等^[9]和 J. C. Li 等^[10]分别采用黏弹性模型和线弹性薄层模型研究了充填节理的厚度影响。L. F. Fan 等^[11]发现加卸载作用下充填节理力学特性的不同对应力波传播有着重要影响。李夕兵^[12]基于等效波阻抗法，发现应力波在软弱夹层处的衰减规律与夹层厚度密切相关。在实验方法上，J. Li 等^[13-14]通过改进霍普金森杆(SHPB)研究了应力波在单个和两个充填节理处的传播规律，发现充填厚度和充填材料的特性以及入射波的属性均会对影响透射系数。

基于数值模拟，赵 坚等^[15-26]对应力波在含节理岩体中的传播规律展开了研究。如：赵 坚和陈春根^[15]采用 UDEC 和 Auto-dyna-2D 相结合的方法模拟了爆炸波在非充填节理岩体中的传播。X. B. Zhao

等^[16]通过 UDEC 数值模拟，发现应力波在含多条节理岩体中的传播规律与节理数量以及节理间距有着重要的关系。茹忠亮和蒋宇静^[18]发现节理面的粗糙度的增加会引起法向刚度的增加，从而减小应力波的衰减。周 剑等^[17]研究了应力波穿越不同产状的大型结构面的传播规律。J. B. Zhu 等^[19-20]对应力波在含有交叉非充填节理岩体中透射规律展开了研究，发现入射角度和节理间的交叉角度均会影响应力波的衰减规律。此外，石 崇等^[21-22]用 3DEC 模拟了二维波穿过节理面的透射规律。王观石等^[23]和张秀丽等^[24]分别基于连续介质的离散元方法(CDEM)和不连续变形分析方法(DDA)对应力波在非充填节理处的传播规律进行了研究。J. Zhao 等^[25]和 X. Huang 等^[26]分别采用颗粒流方法(PMM)和 PFC^{2D} 对应力波在单个充填节理处的传播规律进行了研究，均发现透射系数与充填节理的厚度以及充填材料力学特性密切相关。

综上所述，已有的研究主要侧重于无填充节理或单个充填节理对应力波传播规律的影响，而对于多个充填节理的作用研究较少，但自然岩体中充填节理往往也会成组出现，因为试验上操作较为困难，且多个充填节理的影响因素更为复杂，应力波会在充填节理壁及多个节理间发生多重透反射，采用数值模拟时一种便捷准确的方法。本文通过 UDEC 对应力波在含一组平行充填节理处的传播规律进行研究，分析充填厚度、节理间距和数量对应力波衰减规律的影响，此外，对于节理间距较小的情况，提出了一维等效模型对含多组充填节理岩体进行描述，研究应力波的传播规律，并验证其合理性。研究成果可为地震荷载或者爆破荷载等动态作用下的大型岩体工程安全性评价提供一定的理论基础和计算方法。

2 UDEC 模拟应力波在充填节理处传播规律的验证

通过与实验数据或者理论结果的对比，UDEC 模拟应力波在非充填节理处传播规律的可行性已经

得到了验证^[15-20]。如赵 坚等^[15-16]和 H. B. Li 等^[20]对 P-波在含单个或一组平行线弹性和非线性非充填节理岩体传播规律进行了验证；J. B. Zhu 等^[19]通过与现场数据进行对比，验证了 UDEC 模拟应力波在含交叉节理岩体中的传播规律。但是，在这些研究中，节理往往被考虑为非连续模型，不考虑充填厚度和节理刚度等对应力波传播规律的影响。而对于有充填厚度(含有充填材料)的节理，应力位移连续模型比非连续模型更适合(见图 1^[10])。对于应力位移连续模型，节理壁两侧应力位移连续，充填材料的物理特性如波速、密度对应力波传播特性有重要影响。

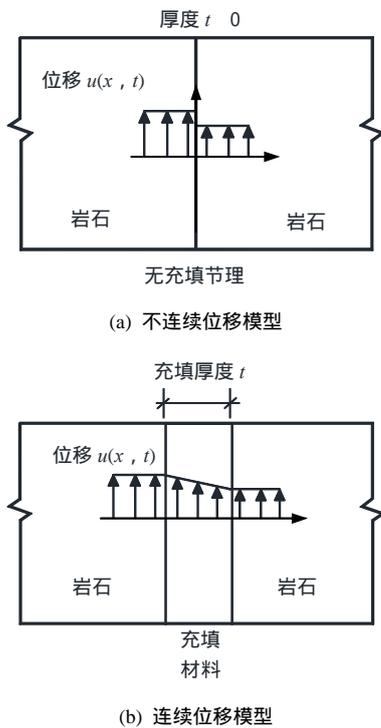


图 1 充填节理模型示意图^[10]

Fig.1 Schematic view of the filled joint^[10]

2.1 理论计算方法

(1) 薄层理论

基于特征线法，将充填节理看作薄层(TLIM)，J. C. Li 等^[10]得到应力波通过单个充填节理的传播方程，其中应力波通过一个节理壁的速度和应力满足：

$$v^+(x_i, t_{j+1}) = v^-(x_i, t_{j+1}) = Av^+(x_{i-1}, t_j) + Bv^+(x_{i-1}, t_j) + C[\sigma^+(x_{i-1}, t_j) - \sigma^-(x_{i+1}, t_j)] \quad (1)$$

$$\sigma^+(x_i, t_{j+1}) = \sigma^-(x_i, t_{j+1}) = z^+v^+(x_i, t_{j+1}) - z^+v^-(x_{i+1}, t_{j+1}) + \sigma^+(x_{i-1}, t_j) + \sigma^-(x_{i+1}, t_j) \quad (2)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} A &= z^- / (z^- + z^+) \\ B &= z^+ / (z^- + z^+) \\ C &= 1 / (z^- + z^+) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $v^-(x_i, t_{j+1})$ ， $v^+(x_i, t_{j+1})$ 分别为节理壁两侧的粒子振动速度； $\sigma^-(x_i, t_{j+1})$ ， $\sigma^+(x_i, t_{j+1})$ 为节理壁两侧的应力； z^- ， z^+ 分别为节理壁前后的材料的波阻抗，如对于第一个节理壁， z^- 为岩体的波阻抗， z^+ 为充填材料的波阻抗。波阻抗为材料密度与波速的乘积。

(2) 等效波阻抗方法

基于应力和速度连续，李夕兵^[12]通过等效波阻抗方法，求出了应力波在单一夹层的传播透射系数：

$$T = \frac{2Y}{z_0 + Y} \quad (4)$$

式中： Y 为多层岩体等效波阻抗，对于单个夹层的等效波阻抗可按下式求得

$$Y = \frac{z_0 \cos \gamma + jz_1 \sin \gamma}{\cos \gamma + j(z_0 / z_1) \sin \gamma} \quad (5)$$

式中： j 为虚数单位； $\gamma = 2\pi t / \lambda$ ； z_0 ， z_1 分别为岩石和充填材料的波阻抗； t 为节理厚度； λ 为波长。

透射系数对应幅值为

$$T^2 = \frac{4[1 + (z_1 / z_0)^2 \tan^2 \gamma]}{4 + (z_0 / z_1 + z_1 / z_0)^2 \tan^2 \gamma} \quad (6)$$

2.2 UDEC 模型

为了验证 UDEC 模拟纵波(P 波)在充填节理处的传播规律的有效性，建立 300 m × 1 m 的杆状模型，如图 2 所示。因为模拟的是 P 波的入射，上下边界固定了 y 方向的位移。为了消除人工边界的反射影响，左边和右边边界为无反射黏弹性边界。节理位置在 $x = 130$ m 处，入射波和反射波监测点分别在 $x = 10$ ，134 m 处。采用设置两条节理(相当于充填节理的两壁)，并对其中的材料赋值不同的材料属性来模拟充填节理，2 条节理的间距即为充填节理的厚度。从左边边界施加半个周期的入射正弦波，频率为 100 Hz，波幅为 1 m/s。为了满足计算精度，网格划分尺寸与波长的比值要小于 1/8 ~ 1/12^[15]。因此，岩体中网格尺寸划分为 2 m，而充填节理中由于充填材料的波速较低，其波长也更小，因此其中网格尺寸划分为 0.01 m。为了与理论结果更好的对比，节理厚

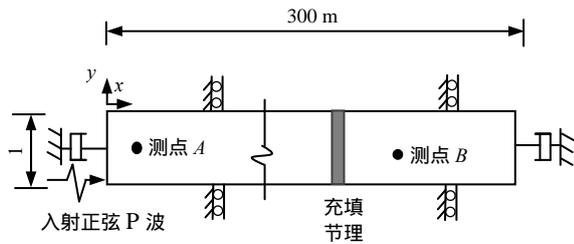


图 2 应力波穿过单个充填节理计算模型

Fig.2 Numerical model for stress wave propagation across a single filled joint

度取值为 1~10 mm。节理壁采用库伦滑移模型，岩石和充填材料均采用线弹性模型。值得说明的是，因为充填节理采用的位移应力连续模型，即不考虑节理壁的变形，所以在下面的研究中，节理壁的刚度值和黏聚力设置较大以保证充填节理的位移发生在充填材料内部，其中节理壁刚度为 100 GPa/m，黏聚力为 1 000 MPa。岩石和充填材料的力学参数如表 1 所示，波速和密度与 J. C. Li 等^[10]相同。岩石和充填材料的波阻抗分别约为 1.57×10^7 和 3.57×10^5 kg/(m²·s)，岩石和充填材料中波长分别为 56 和 2.1 m，则 γ 取值范围为 0.003~0.029 9。

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 ρ / (kg · m ⁻³)	体积模 量 K / MPa	剪切模 量 G / MPa	P 波波速/ (m · s ⁻¹)	S 波波速/ (m · s ⁻¹)
岩石	2 800	51.8×10^3	27×10^3	5 600	3 100
充填材料	1 700	48	20.2	210	110

2.3 结果对比分析

透射系数定义为透射波幅与入射波幅的比值。关于透射系数与充填厚度的关系，数值模拟结果与理论结果对比如图 3 所示。由图中结果看出，随着节理厚度的增加，透射系数减小，且减小幅度增加，

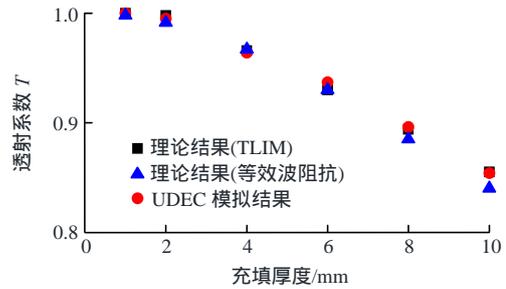


图 3 充填厚度对透射系数影响的理论结果与数值结果对比
Fig.3 Comparisons of effect of joint space on transmission coefficient between numerical and theoretical results

说明充填节理的厚度对应力波衰减作用随着厚度的增加更为明显，不可忽略。填充材料弹性模量较低时，随着厚度的增加，充填节理吸收和耗散的能量更多，滤波效应更强，因此透射系数更小。数值模拟结果与 2 种理论结果吻合的较好，说明可采用 UDEC 对应力波在充填节理处的传播规律进行研究。等效波阻抗的结果比 TLIM 和 UDEC 结果略小。

3 应力波在一组平行充填节理处的传播规律研究

3.1 节理厚度的影响

为了进一步研究应力波在含一组充填节理岩体中的传播规律，在图 2 模型的基础上建立如图 4 所示的模型。考虑到节理的分布，模型的尺寸增大为 600 m × 1 m，边界条件、入射波的频率和幅值与上节相同。分析参数包括充填厚度、节理间距及数量。充填厚度为：2, 4, 6, 8, 10, 12 mm；定义量纲一参数 ζ 为节理间距与波长的百分比， ζ 的取值范围为 2%~60%；节理数量取值范围为 2~10。

图 5(a)和 5(b)分别表示 $\zeta = 2\%$ ，50%时，不同数量下透射系数与充填厚度的关系。显然，与单个节理相同，对于不同数量和间距下的多个充填节理，厚度的增加均会加大入射波的衰减。间距越大，厚

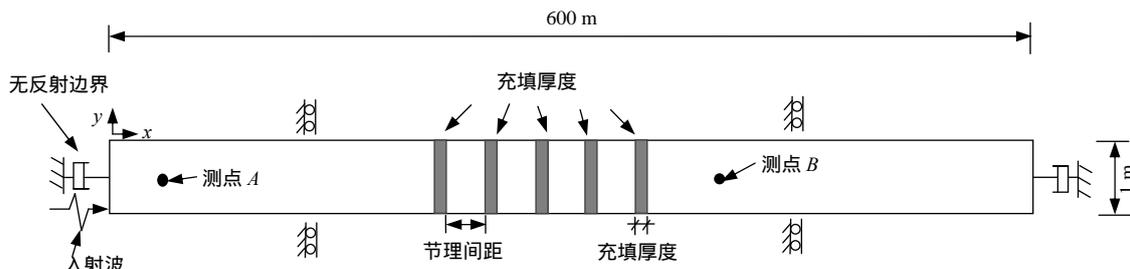
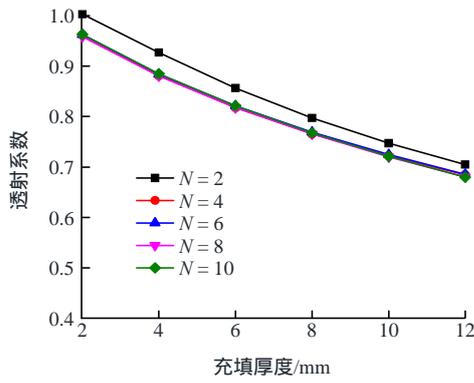
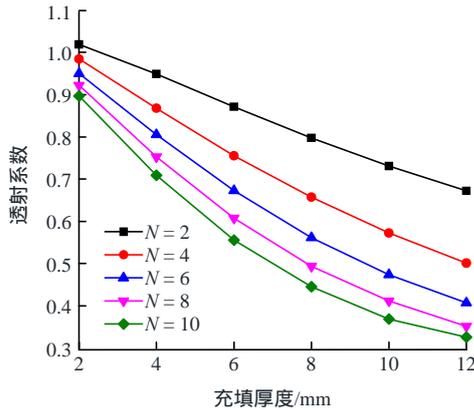


图 4 应力波穿过多个充填节理计算模型

Fig.4 Numerical model for stress wave propagation across multiple filled joints



(a) 间距为入射波长的 2%



(b) 间距为入射波长的 50%

图 5 透射系数与间距和充填厚度关系

Fig.5 Relationships between filled thickness and transmission coefficient

度和数量的影响作用越明显，当 $\xi = 2\%$ 时，充填厚度由 2 mm 增加到 12 mm 时，透射系数降低约 26%，而节理数量的影响较小；当 $\xi = 50\%$ 时，透射系数最大降低了 67% ($N = 10$)，最小降低了 33% ($N = 2$)。当应力波在含多个节理岩体中传播时，透射波是由入射波在节理间发生多重透反射得到的不同时间到达的波叠加所成。根据上述现象推测，当入射波波长远大于充填节理间距时，应力波的衰减规律主要与充填材料及充填厚度有关，而节理数量的变化引起的多重透反射的作用较小，对应力波的到达时间影响较小。

3.2 充填节理间距的影响

图 6 表示充填厚度为 4 mm 时不同充填节理数量下透射系数与 ξ 的关系。可以发现，对于一组平行充填节理，间距比的影响作用与非充填节理基本相似^[5, 16, 27]，节理数量的增加会加大入射波的衰减。间距比存在 2 个临界值 ξ_{thr} 和 ξ_{cri} 。随着间距比 ξ 的增加，透射系数先增加到一个临界值 T_{thr} ，然后减小至一个近似稳定值 T_{cri} ，对应的间距比分别为 ξ_{thr} 和 ξ_{cri} 。值得注意的是，在 $\xi < \xi_{thr}$ 时，节理数量的影响较小，

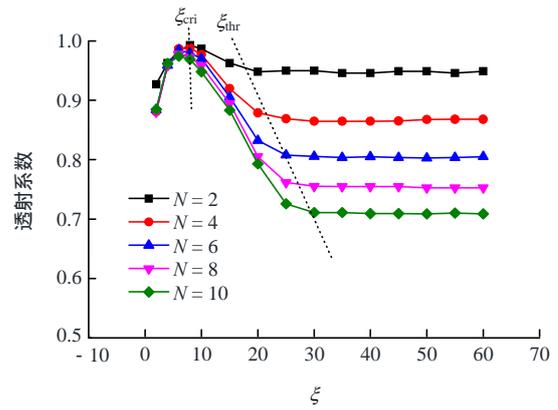


图 6 透射系数与 ξ 关系

Fig.6 Relationships between ξ and transmission coefficient

而随着间距比继续增加，节理数量的影响开始变得明显，随着节理数量的增加，透射系数逐渐减小，但是减小幅度略有降低。

为了研究节理间距较大时，节理数量对透射系数的影响，将 T_{cri} 与节理数量 N 的关系绘于图 7 所示，为了更好地讨论两者的关系，增加更多数量的充填节理，充填厚度均为 4 mm。采用下式所示的指数函数进行拟合：

$$T_{cri} = T_0 + A \left(1 - e^{-\frac{N}{B}} \right) \quad (7)$$

式中： T_0 ， A 和 B 均为拟合参数。

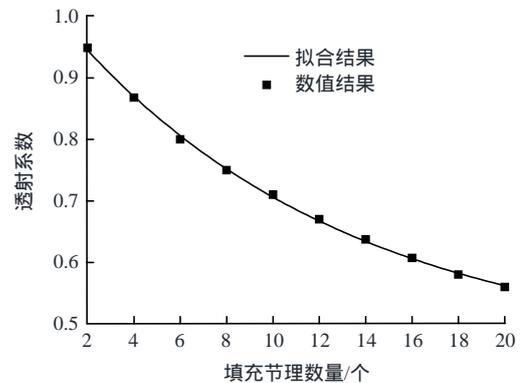


图 7 T_{cri} 与节理数量的关系

Fig.7 Relationships between T_{cri} and joint number

拟合结果为

$$T_{cri} = 1.03 - 0.584 \left(1 - e^{-\frac{N}{12}} \right) \quad (8)$$

拟合程度较高，相关系数等于 99.9%。说明充填节理间距比较大时，透射系数基本不受间距比 ξ 影响时，趋于稳定值 T_{cri} ，可用指数形式对应力波通过多个充填节理的透射系数进行预估。

3.3 充填节理与相应等效刚度无充填节理的对比

J. C. Li 等^[10]通过入射波、透射波与充填节理两侧的应力应变关系,反推得到充填节理的变形特性,充填节理的应力和闭合量计算公式分别为

$$\sigma(t) = \frac{E_r}{2c_r} [v_1(t - \Delta t) + v_R(t) + v_T(t)] \quad (9)$$

$$u(t) = \int_0^t [v_1(t - \Delta t) - v_R(t) - v_T(t)] dt \quad (10)$$

式中： v_1 , v_T , v_R 分别为经过单个充填处的入射波、透射波和反射波,计算方法按式(1), (2)。

非充填节理的法向刚度定义为应力与法向闭合量的比值,由式(9), (10)即可得到对应充填厚度的非充填节理的相应等效法向刚度。根据计算发现法向刚度与厚度相关,随着厚度的增加,刚度减小。经过计算,对于 $t = 4, 8$ mm,反推计算出的法向刚度分别为 9.64 和 19.2 GPa/m。为了考虑厚度的影响,将一组充填厚度分别为 4, 8 mm 与相应刚度的非充填节理对透射系数的影响进行对比分析,结果见图 8,从图中结果发现,对于采用等效刚度的非充填节理,同样存在两个临界值 T_{thr} 和 T_{cri} ,对应的间距比分别为 ξ_{thr} 和 ξ_{cri} 。节理充填厚度和数量的增加均会使 ξ_{thr} 增加和 T_{thr} 减小。随着节理厚度的增加, ξ_{cri} 和对应的 T_{cri} 均会减小,而节理数量对 ξ_{cri} 和对应的 T_{cri} 值影响较小。

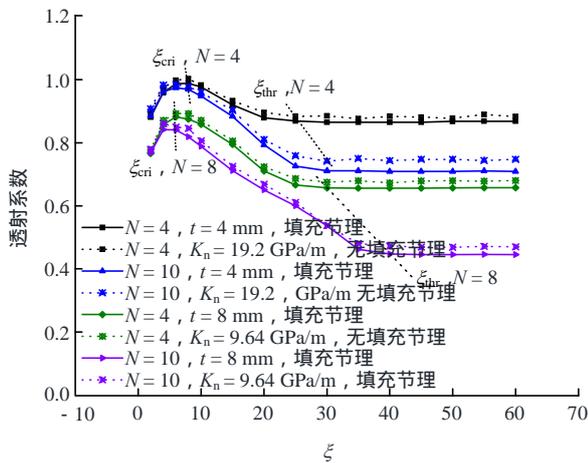


图 8 充填节理和等效无充填刚度对透射系数的影响

Fig.8 Comparison of filled joint and nonfilled joint on transmission coefficient

对于一组平行节理,与等效刚度的非充填节理相比,充填节理的透射系数偏小。究其原因,充填节理由于充填材料和厚度的作用,会加大对入射波的衰减作用。当 ξ 小于 ξ_{cri} 即节理间距较小时,有无充填对透射系数的影响区别较小,但随着间距的增

加,区别开始变大,有充填厚度的情况下, T_{cri} 值减小, ξ_{cri} 增加,说明应力波在充填节理内部的多重反射以及充填材料的低波速特性会影响应力波的传播过程和衰减程度。

4 等效介质模型

在前面的计算中,当节理间距较小时,节理数量的影响不明显。一些学者认为当入射波长远大于节理间距时,可采用等效介质的方法计算应力波在节理岩体中的传播过程^[1,3]。J. Zhao 等^[27]认为,对于含有一组平行非充填节理,当应力波传播时,岩体的变形主要由节理和岩石共同引起,其中节理的位移即为应力与节理刚度的比值。而在对充填节理对应力波传播规律的影响规律分析中,采用的是应力位移连续模型。所以含多条充填节理的岩体,其变形等于岩石和充填材料的变形之和,即等效介质的应变发生在岩石和充填材料内部,节理两侧岩石与充填材料的接触面的位移忽略不计。图 9 为等效介质计算示意图。等效介质范围选用第一条充填节理的左侧到第 N 条充填节理的右侧,这里取 $N = 6$ 。

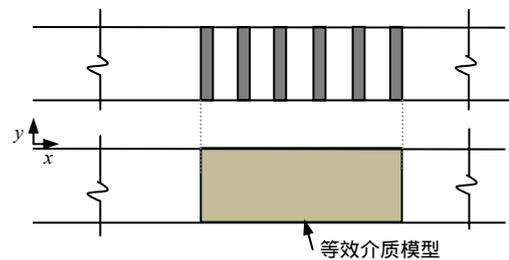


图 9 等效介质计算示意图

Fig.9 Schematic view of the equivalent medium

所以等效介质的位移计算公式为

$$\Delta u = \frac{\sigma(N-1)s}{E_r} + \frac{\sigma Nt}{E_f} \quad (11)$$

该等效介质的弹性模量和密度可分别计算为

$$E_e = \frac{\sigma}{\varepsilon_e} = \frac{\sigma[(N-1)s + Nt]}{\Delta u} = \frac{\sigma[(N-1)s + Nt]}{\frac{\sigma(N-1)s}{E_r} + \frac{\sigma Nt}{E_f}} = \frac{E_r E_f [(N-1)\xi\lambda_p + Nt]}{E_r (N-1)\xi\lambda_p + E_f Nt} \quad (12)$$

$$\rho_e = \frac{m}{v} = \frac{\rho_r(N-1)s + \rho_f Nt}{(N-1)s + Nt} = \frac{\rho_r(N-1)\xi\lambda_p + \rho_f Nt}{(N-1)\xi\lambda_p + Nt} \quad (13)$$

式中： E_e , ρ_e 分别为等效介质的弹性模量和密度；

ϵ_e 表示等效介质的应变； s, t 分别为节理间距和厚度； λ_p 为 P 波在岩石中传播的波长；下标“r”，“f”分别表示岩石和充填材料，即 E_r, ρ_r 分别为岩石的弹性模量和密度。显然，当节理间距比 ξ 趋向 0 时，等效介质的弹性模量和密度近似等于充填材料的弹性模型和密度。

4.1 节理间距的影响

图 10 为采用充填节理模型和等效介质模型计算的透射系数与间距比的关系曲线，其中入射波频率为 100 Hz。显然当 $\xi < 5\%$ 时，2 种计算方法得到的透射系数相差较小，等效介质法计算的透射系数稍小。说明当充填节理间距比较小时，可以采用等效介质的方法对含多组节理的岩体区域进行估算对应力波传播的影响。而随着节理间距继续增加，两种方法的差异变大，等效介质模型计算的透射系数偏大，而充填节理的透射方法减小。说明当节理间距太大时，等效介质模型不再适用，此时计算出的等效介质模量偏大，透射系数偏大。因此，对于节理间距较小的含平行充填节理的岩体，可以应用于等效介质的方法对透射波进行分析。

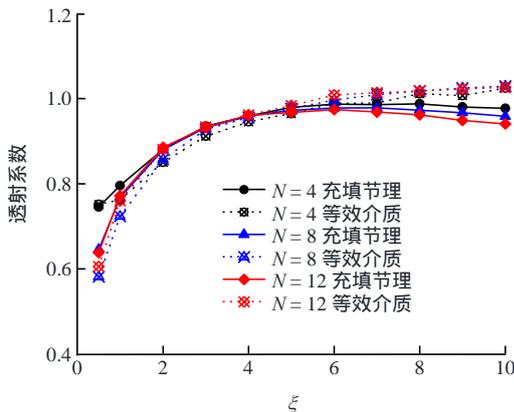


图 10 2 种计算方法下透射系数与 ξ 的关系

Fig.10 Relationships between ξ and transmission coefficient based on two models

4.2 入射波频率与充填厚度的影响

入射波的频率往往也决定着其在充填节理岩体中的衰减规律，为了研究不同频率入射波下等效介质模型是否适用，讨论了 4 种频率下充填节理和等效介质模型的透射系数与充填厚度的关系，其中节理间距固定为波长的 3%，节理数量 N 均为 12，入射波波幅为 1 m/s，计算结果如图 11 所示。显然，两种计算方法的结果基本吻合较好，随着节理厚度的增加，透射系数近似线性减小。当厚度较小时 ($t < 10$ mm 时)，等效介质模型的计算结果与应力波直接在含一组平行充填节理岩体中传播的透射系

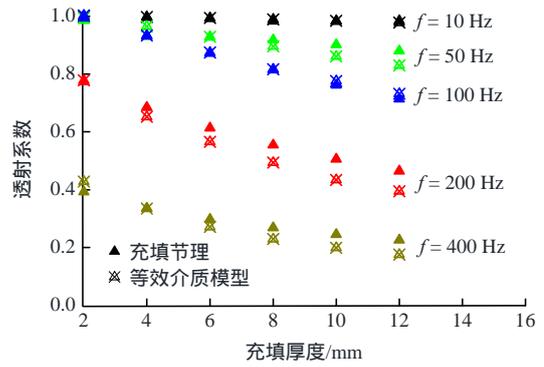


图 11 2 种计算方法下透射系数与频率和厚度关系

Fig.11 Relationships between ξ and transmission coefficient based on two models

数相同，而当厚度较大时，2 种模型的计算结果差异增加，等效介质模型下得到的透射系数偏小。因此，当应力波入射频率和节理间距均不大时，可以采用等效介质模型对应力波在该区域的传播进行分析。在实际工程中，也可以通过测量得到的入射波和透射波对一定区域的岩体的质量和节理分布情况进行反推评测。

4.3 充填材料的力学特性的影响

充填材料的大变形往往加大应力波的衰减，其波速的大小同时会影响应力波的传播时间和过程，而对于线弹性材料，波速和弹性模量满足关系式： $E = \rho c_p^2$ ，在下面的研究中，假设充填材料的密度不变，通过改变充填材料的弹性模量来研究两种模型下充填材料的特性对应力波传播的影响。定义无量纲参数 δ 为岩石弹性模量与充填材料弹性模量的比值，研究 δ 对透射系数的影响，计算结果如图 12 所示。岩石的参数设置与节 4.2 相同，入射波为 100 Hz 的半个周期的正弦波，波幅值为 1 m/s，充填节理间距比为 3%，充填厚度为 4 mm。

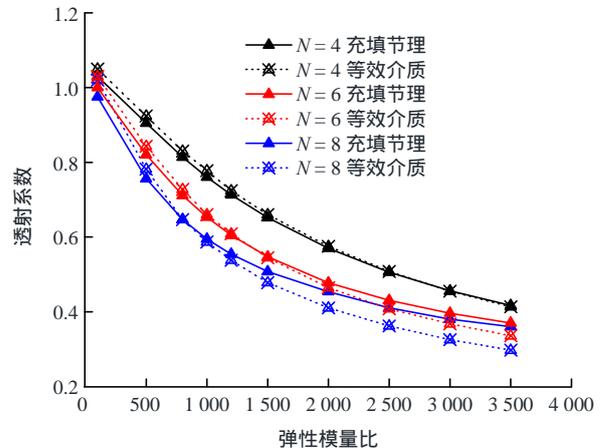


图 12 2 种计算方法下透射系数与频率和厚度关系

Fig.12 Relationships between ξ and transmission coefficient based on two models

从图 12 可以看出,随着 δ 的增加,透射系数非线性减小,但减小幅度逐渐降低,说明充填材料的弹性模量越小,对应力波衰减作用更强。随着节理数量的增加,相同 δ 条件下,透射系数略有降低,对于小间距的充填节理,应力波的衰减主要受到充填材料的属性影响。2 种模型的计算结果在 δ 较小时基本相同,而当 δ 较大时,对于数量较多的充填节理,等效介质模型计算的结果偏小。

5 结 论

分析应力波在充填节理处的传播规律时,应力位移连续模型可描述充填节理的力学特性,若已知充填材料的波速和密度,即可展开分析。本文通过离散元模拟方法对应力波在含一组平行充填节理岩体中的传播规律进行了研究,同时提出了等效介质模型对应力波在含多条小间距充填节理岩体的传播规律进行分析,得到以下结论:

(1) 通过与薄层理论^[10]和等效波阻抗^[12]的方法对比,建立模型,验证了离散元软件 UDEC 模拟应力波在充填节理处的传播规律的可行性。

(2) 随着充填厚度的增加,对于不同的节理间距和数量,透射系数均减小。而节理数量对透射系数的影响与节理间距有关,当节理间距较小时,节理数量的影响较小;当节理间距较大时,随着节理数量的增加,透射系数显著减小。

(3) 节理间距与波长比 ξ 存在 2 个临界值 ξ_{thr} , ξ_{cri} , 当间距比小于 ξ_{thr} 时,随着节理间距的增加,透射系数逐渐增加到峰值 T_{thr} , 当 ξ 由 ξ_{thr} 增加到 ξ_{cri} 时,透射系数逐渐减小,当 $\xi > \xi_{\text{cri}}$ 时,随着间距的增加,透射系数趋向稳定值 T_{cri} 。采用指数形式对 T_{cri} 和节理数量的关系进行了拟合,拟合结果较好。

(4) 采用等效介质模型对小间距充填节理岩体进行分析,当充填节理间距小于入射波长的 5% 时,等效介质模型能得到较准确的透射系数。随着入射波频率和充填厚度的增加或者充填材料弹性模量的减小,透射系数减小。当充填节理充填厚度越小或充填材料弹性模量越大时,等效介质模型越适用。当充填厚度大于 8 mm 以上时,等效介质模型计算的结果偏小。

参考文献(References):

[1] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip

interfaces[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(5): 1516–1521.

[2] PYRAK-NOLTE L J, MYER L R, COOK NGW. Transmission of seismic waves across single natural fractures[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B6): 8617–8638.

[3] PYRAK-NOLTE L J, MYER L R, COOK N G W. Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B7): 11345–11358.

[4] COOK NGW. Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3): 198–223.

[5] CAI JG, ZHAO J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 661–682.

[6] LI J C, LI H B, MA G W, et al. A time-domain recursive method to analyse transient wave propagation across rock joints[J]. Geophysical Journal International, 2012, 188(2): 631–644.

[7] BARTON N. Rock mechanics review, the shear strength of rock and rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1976, 13(2): 255–279.

[8] MILLER R K. An approximate method of analysis of the transmission of elastic waves through a frictional boundary[J]. Journal of Applied Mechanics, 1977, 44(4): 652–656.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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 and Mining Sciences, 2013, 60(8): 227–234.

[12] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 360–365. (LI Xibing. Rock dynamics: fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014: 360–365. (in Chinese))

[13] LI J, MA G, HUANG X. Analysis of wave propagation through a filled rock joint[J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2010, 43(6): 789–798.

[14] WU W, LI J C, ZHAO J. Seismic response of adjacent filled parallel rock fractures with dissimilar properties[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 96(3): 33–37.

[15] 赵 坚, 陈寿根. 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): 4–8. (ZHAO Jian, CHEN Shougen,

- CAI Jungang , et al. Simulation of blast wave propagation in jointed rock mass using UDEC[J]. Journal of China University of Mining and Technology , 2002 , 31(2) : 4–8.(in Chinese))
- [16] ZHAO X B , ZHAO J , CAI J G , et al. UDEC modelling on wave propagation across fractured rock masses[J]. Computers and Geotechnics , 2008 , 35(1) : 97–104.
- [17] 周 剑,张路青,胡瑞林,等. 大型结构面产状影响下应力波传播规律研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2011 , 30(4) : 769–780. 780.(ZHOU Jian ,ZHANG Luqing ,HU Ruilin ,et al. Study of rules of stress waves propagation under various attitudes of large-scale fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 , 30(4) : 769–780.(in Chinese))
- [18] 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) :2 535–2 539. 539.(RU Zhongliang ,JIANG Yujing. Research on transmission behaviors of rough joint surfaces with elastic P-wave incidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2008 ,27(12) :2 535–2 539.(in Chinese))
- [19] 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 and Rock Engineering , 2013 , 46(6) : 1 429–1 442.
- [20] LI H B , LIU T T , LIU Y Q , et al. Numerical modeling of wave transmission across rock masses with nonlinear joints C[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering , 2016 , 49(3) : 1 115–1 121.
- [21] 石 崇,徐卫亚,周家文. 二维波穿过非线性节理面的透射性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007 ,26 (8) :1 645–1 652.(SHI Cong ,XU Weiya ,ZHOU Jiawen. Research on transmission behaviors of nonlinear joints with 2D wave propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(8) : 1 645–1 652.(in Chinese))
- [22] 雷卫东,ASHRAF M H,滕 军,等. 二维波穿过单节理的透射率特性及其隐含意义[J]. 中国矿业大学学报,2006 ,35(4) : 492–497.(LEI Weidong ,ASHRAF M H ,TENG Jun ,et al. Characteristics of transitivity for a single joint in 2D wave propagation and implications[J]. Journal of China University of Mining and Technology , 2006 , 35(4) : 492–497.(in Chinese))
- [23] 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) : 3 747–3 752.(WANG Guanshi ,LI Changhong ,CHEN Baojun ,et al. Propagation law of stress wave in nonlinear structural surface medium[J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 , 30(12) : 3 747–3 752.(in Chinese))
- [24] 张秀丽,焦玉勇,刘泉声,等. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学,2008 ,29(3) : 717–721.(ZHANG Xiuli ,JIAO Yuyong ,LIU Quansheng ,et al. Numerical study on effect of joints on blasting wave propagation in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics , 2008 , 29(3) : 717–721. (in Chinese))
- [25] ZHAO J , SUN L , ZHU J B. Modelling P-wave transmission across rock fractures by particle manifold method(PMM)[J]. Geomechanics and Geoengineering , 2012 , 7(3) : 175–181.
- [26] 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.
- [27] ZHAO J , ZHAO X B , CAI J G. A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behaviour[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2006 , 43(5) : 776–788.