

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0901

连续屈服节理模型对剪切地震波传播的影响

崔 臻¹, 盛 谦¹, 冷先伦¹, 罗庆姿²

(1. 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;

2. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 地震波在跨越岩体中节理时的透反射特性是岩石地下工程抗震分析问题中的重要基础, 目前开展的研究工作中尚未有针对连续屈服 (CY) 非线性节理模型透反射特性的研究报导。在前人提出的非线性节理透反射系数时域递归法解答的基础上, 将这一方法拓展至 CY 模型。并采用 3DEC 离散元软件, 对比了 CY 模型的时域递归解与数值模拟结果的差异。在此基础上以时域递归解为手段, 辅以离散元数值模拟, 开展了 CY 模型的参数影响研究。最终比较了库仑 (MC) 模型与 CY 模型在正弦脉冲激励和真实地震动激励下表现的差异。结果表明: CY 模型的时域递归解与 3DEC 数值模拟结果显示了良好的一致性, 证明了时域递归解用以进行后续参数研究的合理性。法向应力、入射波幅值、节理初始刚度、节理间距等参数对 CY 模型具有显著影响。相比库仑模型, 连续屈服模型可以更好地反映地震波穿越节理时发生的复杂力学现象, 如切向刚度退化、抗剪强度劣化、法向应力依赖性、滞回现象等。研究成果可为岩石地下工程的抗震设计与分析工作提供一定参考。

关 键 词: 地震波传播; 非线性节理; 时域递归法; 连续屈服模型

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)04-1203-09

Transmission of S-wave across one joint using the continuously yielding model

CUI Zhen¹, SHENG Qian¹, LENG Xian-lun¹, LUO Qing-zi²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: It is important to consider an aseismic issue, which is that transfective properties of the seismic wave propagating through joints embedded in rock in underground rock engineering. However, there is very limited research on transfective properties by using the continuously yielding nonlinear joints model. In this paper, a continuously yielding (CY) model was developed based on the time-domain recursive method (TDRM) for S wave using a nonlinear Coulomb-slip (MC) model. Verification of TDRM-based results was conducted in comparison with the simulated results via 3DEC code. Meanwhile, the influence parameters were also discussed. Finally, the results from MC model and CY model were compared under an idealised impulse excitation and a real ground motion record, respectively. It can be seen that TDRM-based results show good agreement with the simulated results by 3DEC, which proves that TDRM is reliable to study the subsequent parameters. In addition, CY model is significantly influenced by parameters of normal stress, incident wave amplitude, initial joint stiffness and joint spacing, respectively. Compared with MC model, CY model can better describe complex joint behaviours in the wave propagation, such as tangential stiffness degradation, shear strength deterioration, normal stress dependence and the hysteresis effect. Therefore, research results can provide useful references for the seismic design and analysis of rock underground engineering.

Keywords: seismic wave propagation; nonlinear joint; time-domain recursive method; continuously yielding model

1 引 言

岩体区别于其他工程材料最大的特点之一即是由岩体中普遍发育的结构面所带来的非连续特性。非连续特性在多个方面影响着岩体的工程特性, 如

岩体破坏模式的结构效应、岩体等效力学参数的尺寸效应相关性、以及节理岩体中应力波的透反射现象。

地震波在节理处的透反射现象是岩石工程爆破和岩石工程抗震问题的基础^[1-2], 因此, 地震波在节

收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2015CB057905); 国家重点研发计划(No. 2016YFC0401803); 国家自然科学基金资助项目(No. 51779253, No. 41672319); 广东省自然科学基金-博士启动(No. 2016A030310345)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (2015CB057905), the National Key R & D Program of China (2016YFC0401803), the National Natural Science Foundation of China (51779253, 41672319) and the Guangdong Natural Science Foundation (2016A030310345).

第一作者简介: 崔臻, 男, 1986 年生, 博士(后), 副研究员, 主要从事岩土工程静动力稳定性评价方面的研究工作。E-mail: zcui@whrsm.ac.cn

理处的透反射现象一直是岩石力学中的研究热点之一。较多的学者已在这一课题开展了大量工作并取得了丰硕的成果。在这些成果中, Jones 等^[3]的位移非连续理论得到了较为广泛的承认和应用, 这一理论中节理处的非连续变形特性被作为波动方程中的位移边界条件, 通过假设节理处不同的不连续位移模型, 不同的节理本构模型可以得以考虑。由于其简单性和方便性, 线弹性节理模型的透反射特性首先得以研究^[4-7], 并得到广泛的应用。但是应当注意, 仅有当地震波的量值较小, 剪切应力导致的节理错动尚未出现非线性特性时, 线性的节理本构模型方才适用。较多的研究者均认为岩石节理的完整力学行为一般而言都是非线性的^[8-10], 因此, 线性节理模型只能被看作非线性节理模型的一个特例, 多数情况下研究中应该采用非线性节理模型, 特别是在地震、爆破等大幅值地震波会产生时。

国内外专家的专家学者在非线性节理模型的透反射性研究上也取得了丰富的研究成果, 如 Miller^[11]给出了 S 波在穿透有限抗剪强度的节理时的解析解; 赵坚等^[12]将这一成果推广至了非线性的 Barton-Bandis (BB) 模型; Li 等^[13]讨论了地震波穿越库仑滑动节理模型时的透反射问题。在位移非连续理论的基础上; Li 等^[14]提出了时域递归法 (time-domain recursive method, TDRM), 通过建立差分形式的应力波传播方程, 分析了应力波入射单条及平行节理时的透反射问题, 并在后续研究中^[15], 将这一理论拓展至了非线性节理模型。

受到以上研究工作的启示, 本文将把时域递归解从库仑滑动节理拓展至 Cundall 等^[16]提出的连续屈服节理 (continuously yielding, CY) 模型。获取的 CY 模型时域递归解将于 3DEC 软件中的数值模拟结果对比, 以说明其正确性。并在此基础上开展了 CY 模型的参数影响研究。最终, 还将比较 CY 模型和库仑滑动模型在简单波形和真实地震波作用下的表现差异性。

2 CY 模型透反射问题的时域递归解

2.1 CY 非线性节理模型

在讨论 CY 模型的透反射特性之前, 此处首先将对这一复杂的非线性节理模型进行简要介绍。

连续屈服模型模型是 Cundall 等^[16]针对岩体间的节理面通常具有的延性、应力相关性等复杂力学特性提出的一种非线性的节理接触模型。

增量形式的 CY 模型法向变形关系可以写为

$$\Delta\sigma_n = K_n \Delta u_n \quad (1)$$

其中, 法向刚度 K_n 按如下定义取得

$$K_n = a_n \sigma_n^{en} \quad (2)$$

式中: a_n 也可写作结构面初始刚度 K_{ni} ; en 为结构面法向刚度指数。式 (2) 表现了 CY 模型中法向变形特性的法向应力依赖性, 即法向应力越大, 结构面法向刚度也将随之变大。

对于切向变形, CY 模型可以体现出剪切变形中一些不可逆的非线性特性。增量形式的切向变形关系写作

$$\Delta\tau = FK_s \Delta u_s \quad (3)$$

切向刚度同样具有法向应力依赖性, 即

$$K_s = a_s \sigma_n^{es} \quad (4)$$

式中: a_s 也可写作结构面初始刚度 K_{si} ; es 为结构面切向刚度指数。

参数 F 为剪切变形中切向剪切刚度的控制参数, 与应力历史有关

$$F = \frac{1 - \tau / \tau_m}{1 - r} \quad (5)$$

式中: r 为一个初值为 0 的系数, 用来在循环加卸载中改变加载方向时储存弹性刚度。也就是说, 一旦剪切方向改变时, r 即被重新赋值为 τ / τ_m , 其中 τ_m 为当前的剪切强度, 即

$$\tau_m = \sigma_n \tan \varphi_m \operatorname{sgn}(\Delta u_s) \quad (6)$$

式中: sgn 为符号函数; φ_m 为节理当前的摩擦角, 与塑性剪切应变有关, 可表达为如下形式

$$\varphi_m = (\varphi_m^i - \varphi) \exp(-u_s^p / R) \quad (7)$$

式中: φ_m^i 为节理的初始摩擦角, 也即 φ_m 的初值; R 为节理的粗糙系数, 决定着节理当前摩擦角与 φ_m 塑性剪切应变 u_s^p 的关系; φ 为节理的本征摩擦角, 可以视作节理在没有任何起伏条件下的摩擦角。而塑性剪切应变 u_s^p 的定义为

$$\Delta u_s^p = (1 - F) |\Delta u_s| \quad (8)$$

从上文可见, CY 模型可以反映出如法向刚度对法向应力的依赖性 (见图 1(a)), 切向刚度对法向应力的依赖性 (见图 1(b)), 法向变形的非线性 (见图 1(c)), 切向变形的非线性、剪切刚度的退化、及剪切强度软化 (见图 1(d)) 等较多的节理复杂力学特性。

2.2 CY 模型透反射的时域递归解

在对 CY 模型的参数及特性简要介绍的基础上, 此处讨论地震波在跨越 CY 模型时的透反射特性。相比于爆破作用, 地震动力学研究中更关心 S 波, 因此, 本文将重点讨论 S 波入射的问题。同时,

由于 CY 模型在法向加载时为弹性, 因此, 其对于 P 波透反射系数问题与 BB 模型等其他非线性模型相仿。故简洁起见, 本文仅讨论最为特殊的 S 波垂直入射情况。对于更普遍的斜入射情况, 可将入射波分解之后, 分别进行研究。

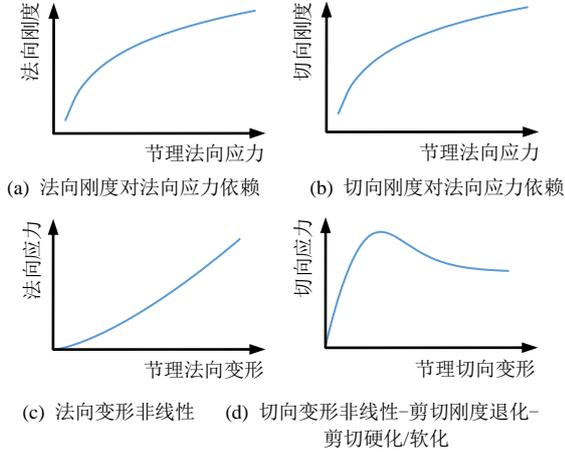


图 1 CY 模型的部分特性
Fig.1 Special characteristics of CY model

研究工作针对如图 2(a)的概念模型开展: 一条刚性节理水平发育在岩体中, 受到自下而上传播的 S 波入射, 水平向右定义为 x 向, 竖直向上定义为 z 向。岩体假定为弹性, 其力学特性由密度 ρ 、弹性模量 E 、泊松比 μ 三个参数控制。分析中暂不考虑岩体或节理的阻尼特性。同时假定节理厚度较小, 忽略不计。

当入射波 V_{Is} 跨越节理时, 会同时产生反射波 V_{Rs} 与透射波 V_{Ts} 。当考虑当前的节理为服从库仑剪切 (coulomb-slip, MC) 模型时, 其剪切强度为 τ_m 。当前问题为 Li^[15]给出的时域递归解的一种特殊情况, 差分形式求得的反射波与透射波可以写作

当 $|\tau| < |\tau_m|$ 时:

$$\left. \begin{aligned} V_{Ts(i)} &= \frac{2k_s \Delta t}{Z_s} (V_{Is(i-1)} - V_{Ts(i-1)}) + V_{Ts(i-1)} \\ V_{Is(i)} + V_{Rs(i)} &= V_{Ts(i)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

当 $|\tau| \geq |\tau_m|$ 时:

$$Z_s V_{Is(i)} + Z_s V_{Rs(i)} = n\tau_m - Z_s V_{Ts(i)} = \pm \tau_m \quad (10)$$

式中: k_s 为 MC 模型的剪切刚度; Δt 为时间步长; $Z_s = \rho C_s$ 为岩体对 S 波的阻抗, 其中 C_s 为岩体的剪切波速。当采用差分形式求得反射波与透射波的时程曲线后, 透反射系数可以表示为

$$T_{MCS} = \frac{\max |V_{Ts}|}{\max |V_{Is}|}, R_{MCS} = \frac{\max |V_{Rs}|}{\max |V_{Is}|} \quad (11)$$

而在试图将以上的时域递归解拓展至 CY 模型时, 最基本的原理即为: 将式 (9) 和式 (10) 中的常量抗剪强度 τ_m 替换为差分形式的抗剪强度 $\tau_{m(i)}$, 即当前时步的 $\tau_{m(i)}$ 与上一时刻的 V_{Is} 、 V_{Ts} 、 V_{Rs} 以及 CY 模型参数均有关。

当前时步中, 剪切变形增量可以写作

$$\Delta u_{s(i)} = (V_{Is(i-1)} + V_{Rs(i-1)} - V_{Ts(i-1)}) \Delta t \quad (12)$$

当求得当前时间步的剪切变形增量后, 本时间步的其他 CY 模型参数可以相应的求得:

$$F_{(i)} = \frac{1 - \tau_{(i-1)}/\tau_{m(i-1)}}{1 - r} \quad (13)$$

$$\Delta u_{s(i)}^p = (1 - F_{(i)}) |\Delta u_{s(i)}| \quad (14)$$

$$u_{s(i)}^p = \Delta u_{s(i)}^p + u_{s(i-1)}^p \quad (15)$$

$$\varphi_{m(i)} = (\varphi_m^i - \varphi) \exp(-u_{s(i)}^p / R) \quad (16)$$

$$\tau_{m(i)} = \sigma_n \tan \varphi_{m(i)} \operatorname{sgn}(\Delta u_{s(i)}) \quad (17)$$

利用以上的 CY 模型参数, 代入式 (9) 和式 (10), 即可求得当前时间步内的 $V_{Ts(i)}$ 和 $V_{Rs(i)}$, 最终, 更新当前时间步的剪切应力 $\tau_{(i)}$, 即可开始下一步求解。

$$\tau_{(i)} = \tau_{(i-1)} + F_{(i)} K_s \Delta u_s \quad (18)$$

按照以上的递归方式, 若入射波 V_{Is} 和节理的初始应力、速度条件是已知的话, 反射波 V_{Rs} 和透射波 V_{Ts} 即可由迭代解出。在计算过程中, 若取的时间步 Δt 足够小 (本文中采用值为 10^{-3} s), 可得到具有足够精度的解答。

2.3 对比验证

将时域递归法得到的 CY 模型的透反射系数与离散元软件 3DEC 软件^[17-18]中内置的 CY 模型计算得到透反射系数进行对比, 以验证时域递归法解答的正确性。

在离散元软件 3DEC 中建立了该问题的数值模型, 如图 2(b)所示。可变形离散元模型高 200 m, 长宽各为 10 m, 在模型中央水平发育一条结构面。岩体采用有限差分单元离散, 弹性本构模型。节理采用 CY 非线性模型。岩体与节理的力学参数如表 1 所示, 考虑到刚度在剪切波跨越节理过程中并不会改变, 故简化起见, 将 en 和 es 取为 0。分析中, 模型顶部设置人工吸收边界, 将地震波至模型底部输入。考察节理面在地震波下跨越时的剪切应力、剪切位移、以及节理入射侧 (点 A) 和透射侧 (点 B) 的速度波形。为了使得研究结果可以代表典型的地震作用, 输入的地震波选取频率为 2 Hz 的单位正弦剪切速度脉冲。

表1 岩体及节理力学参数
Table 1 Mechanical properties of rock and its joints

岩体			节理							
密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	$K_{ni}/(\text{MPa/m})$	en	$K_{si}/(\text{MPa/m})$	es	$\varphi/(\text{°})$	$\varphi_m/(\text{°})$	R	σ_n/MPa
2700	20	0.25	50	0	50	0	35	35	0.1	2

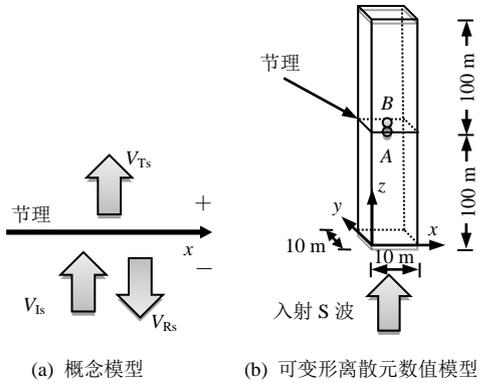


图2 S波垂直入射一条水平节理的概念与数值模型示意图
Fig.2 Conceptual and 3DEC model when a horizontal discontinuity subjected to the normally incident S-wave

为简洁起见，按照文献[15]的符号约定，简称节理入射侧的质点速度时程为 V^- ，透射侧的速度时程为 V^+ 。为了方便时域递归解与3DEC数值模拟结

果的对比，当在时域递归解中考虑地震波从边界传播至节理的过程时，采用了文献[15]的时移函数法进行处理。

不同法向应力条件下，时域递归法和3DEC软件得到的 V^- 和 V^+ 如图3(a)~3(d)所示。注意其中3DEC得到的 V^- 和 V^+ 直接为A点或B点的速度时程监测值，时域递归法得到的 V^+ 为 V_{Ts} ，而 V^- 等于 V_{Is} 与 V_{Rs} 的叠加，即 $V^- = V_{Rs} + V_{Is}$ ，如图3(e)~3(h)所示。从图中可见，入射波 V_{Is} 保持不变，而 V_{Rs} 在不同的法向应力条件下不尽相同，造成了 V^- 随法向应力量值变化而变化。不同法向应力条件节理面的剪切应力-剪切应变关系也在图3(i)~3(l)中给出。对比图3中时域递归解与3DEC计算值，显示出良好的符合程度。证明了时域递归解的适用性。因此，可以在参数研究中采用相对更为简便的时域递归解，避免大规模离散元数值模拟的计算量。

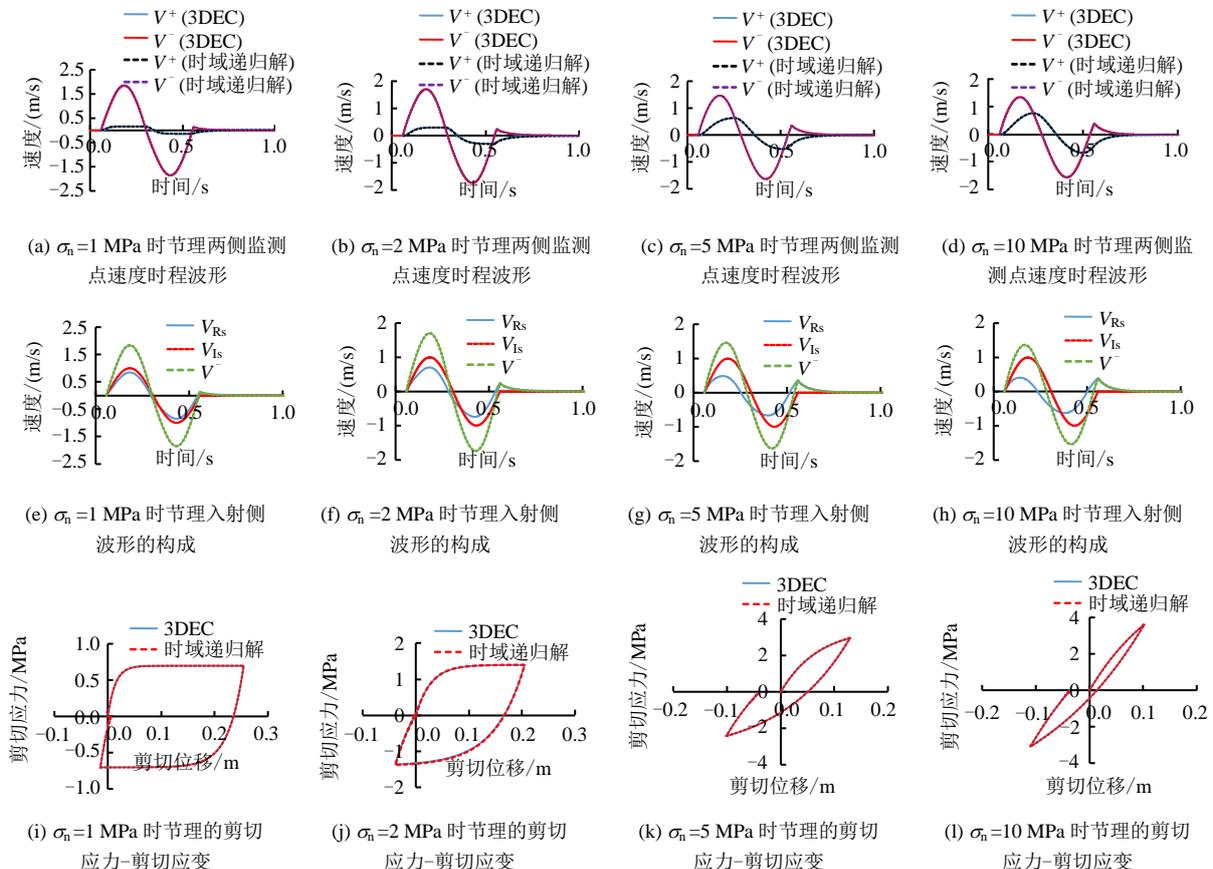


图3 CY模型的时域递归解与软件数值解的对比
Fig.3 Comparison of the TDRM-based results with the 3DEC results

3 参数研究

3.1 法向应力的影响

在图 2 的对比中，可初步发现法向应力水平对 CY 节理的透反射特性具有显著的影响。为了更好地理解这一影响，此处将采用时域递归解，进一步研究不同法向应力对下节理面透射系数 T_{CYS} 和反射系数 R_{CYS} 的变化。

图 4 给出了不同法向应力条件、不同地震波频率入射下透射系数与反射系数量值的变化。可见，对于不同频率的入射波，随 σ_n 增加， T_{CYS} 随之增加，而 R_{CYS} 随 σ_n 减少。在 σ_n 增加到一定程度时， T_{CYS} 和 R_{CYS} 变化速率减小。这一结果表明，节理在更高的法向应力条件下可以透射过更多入射波。同时，比较不同频谱入射地震波的透反射系数可以看到，在不同的法向应力状态下，较低频率的入射波都能透射过更多的量值，而相反被节理反射的量值更小。

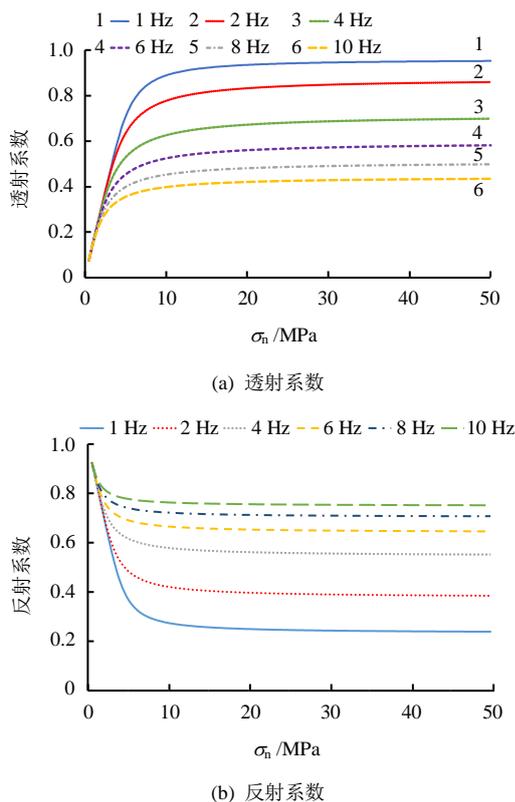


图 4 不同法向应力下节理的透反射系数变化
Fig.4 Variation of transmission and reflection coefficient under different normal stresses

3.2 入射波量幅值的影响

为了讨论入射波幅值对节理的透射系数 T_{CYS} 和反射系数 R_{CYS} 的影响，此处采用时域递归解，讨论了不同入射波幅值下节理面系数 T_{CYS} 和 R_{CYS} 的

变化。

图 5 给出了不同入射波幅值条件、不同地震波频率入射下透射系数与反射系数幅值的变化。可以看到，随着幅值的增加，节理强度的非线性特性得以不同程度体现，从而影响了节理的透反射系数，表现为： T_{CYS} 首先迅速减小，而后当入射波幅值大于 4 m/s 后，减少速率逐渐降低。相对应地， R_{CYS} 首先迅速增加，而后当入射波幅值大于 4 m/s 后，增加速率逐渐降低。对于入射波频率的影响，同样可以看到较低频率入射波透射性能更好。但是这一差异在入射波幅值大于 4 m/s 后变得不明显。

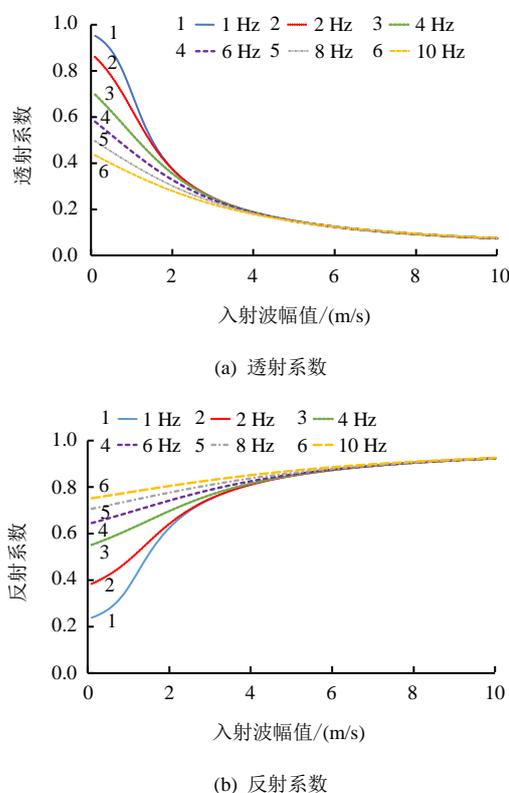


图 5 不同入射波幅值下节理的透反射系数变化
Fig.5 Variation of transmission and reflection coefficient under different incident wave amplitudes

3.3 节理初始刚度的影响

为了讨论节理初始刚度对 T_{CYS} 和 R_{CYS} 的影响，此处采用时域递归解，讨论不同初始刚度条件下 T_{CYS} 和 R_{CYS} 的变化。

图 6 给出了不同节理初始刚度条件、不同地震波频率下透射系数与反射系数量值的变化。可见节理初始刚度 K_{si} 增加时， T_{CYS} 随之增加，同时 R_{CYS} 减小。当 K_{si} 增加到一定程度时， T_{CYS} 和 R_{CYS} 将各自趋近一个常数值，在本例中， T_{CYS} 趋近于 0.74，而 R_{CYS} 趋近于 0.26。

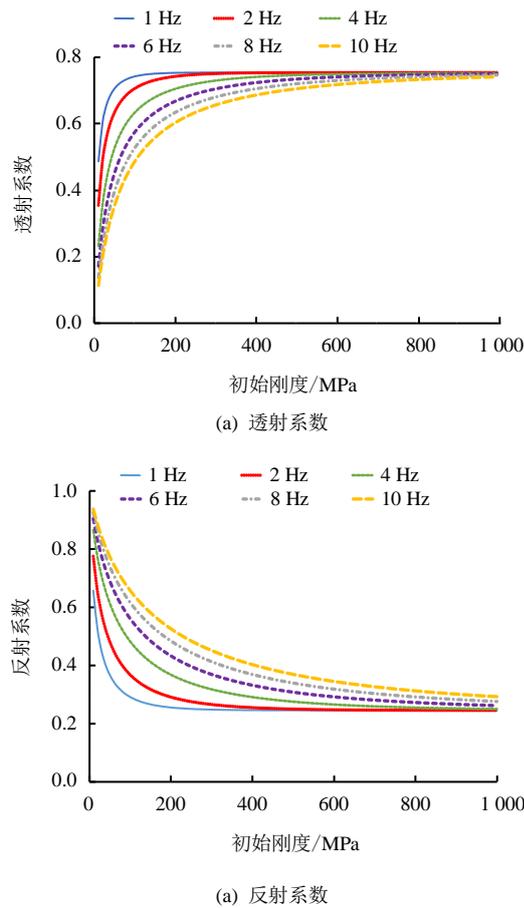


图6 不同节理初始刚度下的透、反射系数变化
Fig.6 Variation of transmission and reflection coefficients under different initial stiffness of joints

3.4 节理间距与波长之比的影响

在实际岩体中,节理一般较少单独出现,而多是呈近似于平行状成组出现。因此,讨论节理间距对地震波透射的影响也将有重要意义。但目前成组平行CY节理透射系数的理论解还尚待推导,因此,这里采用3DEC数值模拟讨论了节理间距与S波波长之比(规则化间距),以及节理的条数 N 的影响。由于2 Hz入射波作用下,节理间距与S波波长之比比较大时将导致数值模型尺寸急剧增加到不可接受的程度,因此,此处将入射波频率增加至10 Hz以避免上述问题。

计算结果如图7所示,可见平行成组的CY节理的透、反射特性与已被前人较多研究的平行成组的MC模型^[19-20]的透射特性基本一致,即随着规则化节理间距的增加,透射系数首先增加,随后逐渐减少,最终,稳定于一个常数值。而这个常数值则随着节理条数增加而减小。

4 CY与MC模型的比较

为了更直观地比较CY模型和更常用的MC模

型在地震波透射问题上表现的差异。这里将对两种模型在地震波透射问题上的结果进行直接比较。采用的CY模型的参数仍与前文保持一致。同时,为了保证可比较性,MC模型的参数取为 $K_s = 50 \text{ MPa}$, $c = 0$, 及 $\varphi = 35^\circ$ 。

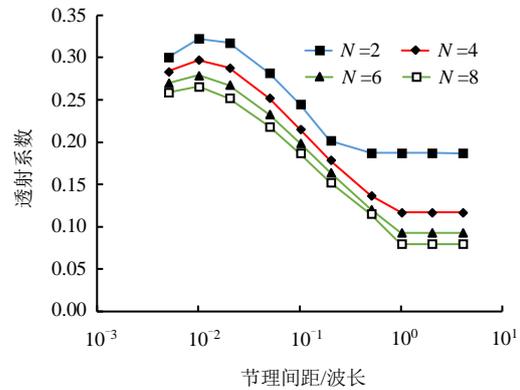


图7 节理间距与波长之比对透射系数的影响
Fig.7 Variation of transmission coefficient under different ratios of joint spacing to incident wavelength

4.1 受到正弦脉冲地震波入射时

首先,比较CY模型和MC模型在面对较为简单的正弦脉冲地震波入射时的差异,这一波形与前文采用的相一致,即频率2 Hz的单位正弦剪切速度脉冲。

采用两种模型计算得到的结果如图8所示。可见,在法向应力水平较低的情况下(见图8(a)~8(c)),CY模型和MC模型得到的结果差异并不大,二者得到的节理入射侧的波形 V^- 几乎完全一样;而CY模型得到的透射侧的波形 V^+ 相比MC模型得到的更为平滑,在最大量值上二者也基本相同。而对于节理的剪切应力-剪切变形曲线,虽然CY模型得到的曲线中体现出了一定程度的剪切刚度退化,但两种模型得到的曲线差异并不显著。

但当法向应力水平较高时(见图8(d)~8(f)),两种模型的差异将得以体现,CY模型得到的反射波 V^- 的最大值小于MC模型得到的反射波的最大值;同时CY模型得到的透射波 V^+ 最大值小于MC的透射波最大值,即此时MC模型的透射性大于CY模型。这种现象的原因来自于由于CY模型在剪切过程中持续产生的强度劣化所致。此外,还可见此时CY模型的剪切刚度退化也更明显——相比MC模型,CY模型的产生量值更大的剪切位移,和更大的滞回环(见图8(f))。

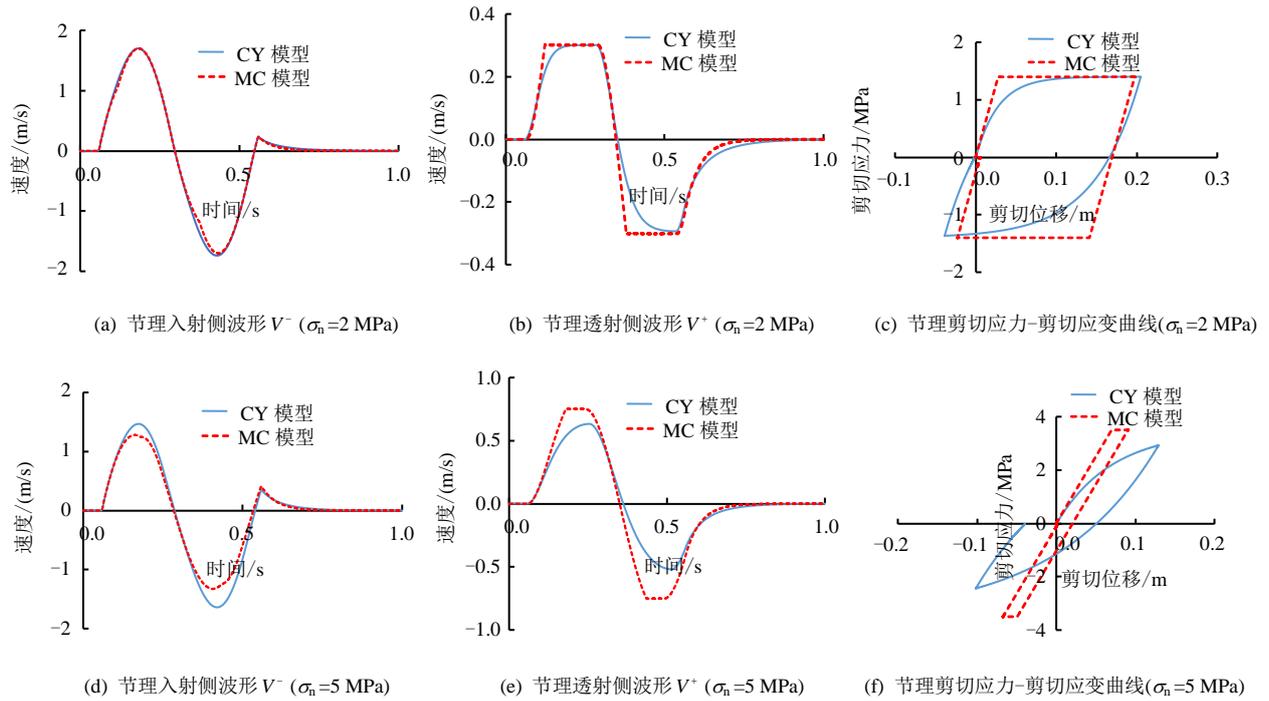


图 8 不同法向应力下 CY 模型与库仑模型的表现对比

Fig.8 Comparison of performances of MC model and CY model under different normal stress levels

4.2 受到真实地震动入射时

为了更深入比较两种节理本构模型的差异，此处将对在受到真实地震波激励时二者的表现。采用水工领域最常用的地震记录——Koyna 记录的水平分量（如图 9 所示）作为输入地震波。从 Koyna 记录的速度时程曲线上可以看到，相比波形简单的正弦脉冲，地震动是一种复杂的循环荷载，拥有一个峰值和若干量值较小的极值。在真实地震波入射条件下，MC 模型和 CY 模型得到的节理剪切应力时程曲线如图 10(a)所示，可见差异不大；但二者得到节理剪切位移时程曲线（见图 10(b)）差异较为明显，CY 模型得到的曲线在形态上与 MC 模型得到的曲线基本一致，但 CY 模型的剪切变形曲线量值

相对更大一些，这一现象的诱因仍旧为上文提到的 CY 模型在剪切变形过程中连续性的退化所致。

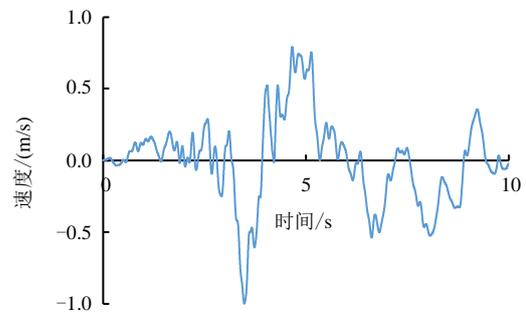


图 9 Koyna 地震的速度时程

Fig.9 Velocity-time history curves of Koyna record

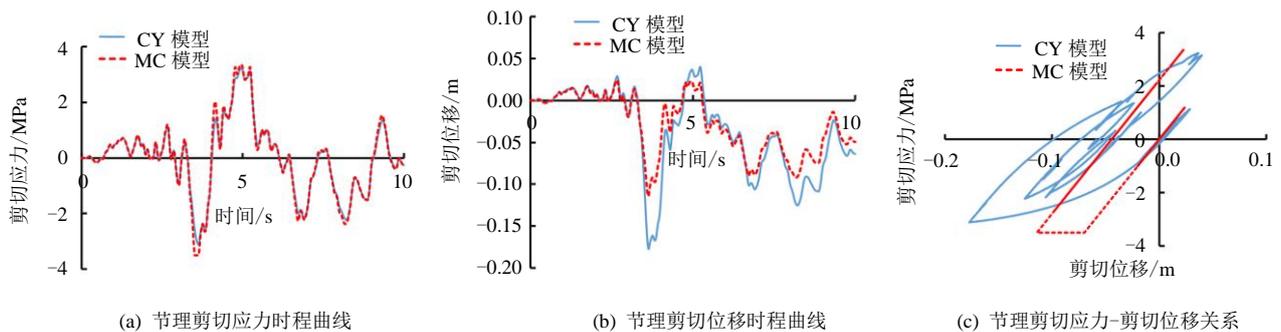


图 10 CY 模型与库仑模型在地震作用下的表现差异

Fig.10 Comparison of performances of MC model and CY model in seismic simulation

图 10(c)中的节理剪切应力-剪切位移曲线的差异更为显著。MC 模型的剪切应力-剪切应变曲线似乎仅受地震过程中峰值的影响,只形成了一个未封闭的滞回环。又由于 MC 模型中常数剪切刚度的假定,不能反映出地震波中蕴含的大量循环加-卸载过程。

而由于 CY 模型的力学特性既与应力历史相关也与加卸载状态有关,因此 CY 模型的剪切应力-剪切变形曲线既能体现出了地震波峰值所产生的大滞回环,又能体现地震波中量值较小的极值所产生的滞回环。因此,可以认为对于输入波形是地震波的复杂工况下,CY 模型的表现优于 MC 模型。

5 结 论

(1)将 Li 的时域递归解中的常数剪切强度替换为与上一时间步的入射波、反射波、透射波及模型的 CY 参数有关的瞬时剪切强度后,可以得到差分形式表述的入射波、反射波和透射波。推导的结果与 3DEC 数值模拟结果进行对比,显示了良好的一致性。证明了时域递归解用于进行后续参数研究的合理性。

(2)采用时域递归解,辅以数值模拟手段,开展了连续屈服模型关于法向应力、入射波量值、节理初始刚度、节理间距等参数的影响研究。研究结果显示,这些参数对连续屈服模型的透反射特性有显著的影响。

(3)相比库仑模型,连续屈服模型可以更好地反映地震波穿越节理时发生的复杂力学现象,如切向刚度退化、抗剪强度劣化、法向应力依赖性、滞回现象。

(4)本文讨论了连续屈服模型运用于地震动力学问题中的阶段性成果,更多的研究工作仍在进一步进行中,如斜入射问题、成组节理的透反射系数理论解等。

参 考 文 献

[1] BARLA G, MONACIS G, PERINO A, et al. Distinct element modelling in static and dynamic conditions with application to an underground archaeological site[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43(6): 877-890.

[2] CUI Zhen, SHENG Qian, LENG Xian-lun. Control effect of a large geological discontinuity on the seismic response and stability of underground rock caverns: A case study of the Baihetan #1 surge chamber[J]. **Rock**

Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(6): 2099-2114.

[3] JONES J P, WHITTIER J S. Waves at a flexibly bonded interface[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1967, 40: 905-909.

[4] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces[J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1980, 68(5): 1516-1521.

[5] PYRAK-NOLTE L J. Seismic visibility of fractures[D]. Berkeley: University of California, 1988.

[6] PYRAK-NOLTE L J. The seismic response of fractures and the interrelations among fracture properties[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1996, 33: 787-802.

[7] LI J C, MA G W. Analysis of blast wave interaction with a rock joint[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43(6): 777-787.

[8] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock fracture deformation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1983, 20(6): 249-268.

[9] CUI Zhen, SHENG Qian, LENG Xian-lun, et al. Analysis of the seismic performance of a rock joint with a modified continuously yielding model[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50(10): 113-123.

[10] MALAMA B, KULATILAKE PHSW. Models for normal fracture deformation under compressive loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40: 893-901.

[11] MILLER R K. The effects of boundary friction on the propagation of elastic waves[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1978, 68: 987-998.

[12] 赵坚, 蔡军刚, 赵晓豹, 等. 弹性纵波在具有非线性法向变形本构关系的节理处的传播特征[J]. **岩石力学与工程学报**, 2003, 22(1): 9-18.

ZHAO Jian, CAI Jun-gang, ZHAO Xiao-bao, et al. Transmission of elastic p-waves across single fracture with nonlinear normal deformation behavior[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 9-18.