

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0058

考虑岩体应力的结构面中应力波传播特性分析

柴少波, 周 涛, 田 威, 井彦林, 史杰辉

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 应力波在含结构面岩体中的传播一直是岩石动力学的一个重要课题。深部岩体应力会影响岩体结构面的力学特性, 进而影响应力波的传播规律。基于时域递归分析方法, 首先对考虑岩体应力情况下应力波与非线性岩体结构面的相互作用进行了分析, 推导出了波的传播方程。研究中假定岩体结构面法向满足非线性双曲变形模型 (Barton-Bandis 模型, 简称 B-B 模型), 切向满足库仑滑移模型。其次, 对一些特殊情况, 如结构面水平或垂直分布、波阵面水平分布等, 进行了计算模型和波的传播方程的简化分析。通过对比, 发现岩体应力对应力波的传播特性有明显的影响。最后, 参数研究分析了岩体应力特性、节理特性及入射波频率等对透、反射系数的影响规律。

关 键 词: 应力波; 波传播; 岩体应力; 岩体结构面; 透反射系数

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 增刊 1-0184-09

Analysis of stress wave propagation through a rock structural plane considering rock mass stresses

CHAI Shao-bo, ZHOU Tao, TIAN Wei, JING Yan-lin, SHI Jie-hui

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: Wave propagation across rock masses containing structural planes has been an important subject of rock dynamics. The stresses of deep rock mass will affect the mechanical properties of rock structural plane, and then affect the stress wave propagation across rock mass. Based on the time domain recursive analysis method (TDRM), quantitative analysis for the interaction between stress wave and a nonlinear rock structural plane is carried out in this study, so as to deduce the wave propagation equation. The deformation of the rock structural plane is assumed to satisfy the Barton-Bandis model (B-B model) in the normal direction and satisfy the Coulomb slip model in the tangential direction. For some special cases, such as horizontal or vertical distribution of structural plane and horizontal distribution of wave front, the calculation model and wave propagation equation are simplified. Through comparison, it is found that the rock mass stresses have obvious influence on wave propagation characteristics. Parametric studies about the effects of rock mass stresses characteristics, joint characteristics and incident wave frequency on stress wave transmission and reflection coefficients are finally conducted.

Keywords: stress wave; wave propagation; rock mass stresses; rock structural plane; transmission and reflection coefficients

1 引 言

岩体是构成地壳的基本物质之一, 在复杂的地质作用下天然岩体中有大量的结构面。这些结构面会使得岩体呈现不连续、各项异性等特征, 继而对岩体工程产生显著的影响^[1]。目前, 我国岩石力学与工程发展不断向深部进军, 这也使得岩土工程研究面临着巨大的挑战^[2]。克服复杂地质环境和高岩

体应力条件, 研究深部岩体中应力波传播对地下工程岩体的稳定性和安全开挖意义重大。

现有的对应力波传播规律的理论研究方法主要有等效连续介质和不连续介质的方法^[3]。等效连续介质的方法是将不连续岩体等效为连续介质开展研究, 而不连续介质的方法主要是针对岩体的不连续性开展分析。例如, Pyrak-nolte^[4]、Cook^[5]、李夕兵^[6]、卢文波^[7]等基于位移不连续理论, 先后推导得出

收稿日期: 2021-01-11

修回日期: 2021-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41902277); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (No.2019JQ-689); 西安市科协青年人才托举计划项目 (No.095920201327)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41902277), the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province (2019JQ-689) and the Young Talent Promotion Project of Xi'an Association for Science and Technology(095920201327).

第一作者简介: 柴少波, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事应力波传播及岩石动力学等方面的研究工作。E-mail: shbchai@chd.edu.cn

同特性的单个节理中波传播的透反射系数解析解。Zhao 等^[8-9]基于特征线法和位移不连续理论, 建立应力波垂直通过单个或一组平行节理的传播方程。俞缙等^[10-11]提出双重非线性弹性介质概念, 研究了非线性 P 波在单个和一组节理的双重非线性弹性岩体中传播。Li 等^[12-17]结合波阵面的动量守恒理论和位移不连续方法, 提出了应力波在单节理中传播的时域递归分析法 (time domain recursive analysis method, 简称 TDRM), 并在时域范围内经过理论推导得到了 P 波和 S 波在线弹性节理中的传播方程。该方法可以扩展应用于不同波型、不同节理非线性因素方面的研究; 时域方法避免了复杂的数学运算, 例如傅里叶变换和傅里叶逆变换。之后, 学者们^[18-21]将时域递归法推广到分析不同类型应力波在具有不同变形特性的节理岩体中的传播规律, 得到了丰硕成果。同时, 也反映出该方法在分析不连续面中的波动问题时的有效性。

然而, 上述研究并未考虑岩体应力的影响。天然岩体中含有岩体应力, 会对工程开挖、岩体动力响应分析等产生影响。特别地, 深部岩体中应力环境是由自重应力、构造应力、局部应力、温差应力和剥蚀应力等构成的^[22-23], 其应力分布规律非常复杂, 工程中常采用反演方法得到局部位置处的分布规律^[24-25]。岩体应力的分布大小、分布以及相对于节理的相对位置均会直接影响到节理的刚度、闭合量等因素, 使节理呈现不同的力学特性, 影响应力波的传播规律。因此, 考虑岩体应力特性, 丰富这方面的理论研究将会给工程实践带来更为准确的理论支撑。李新平^[26]、Liu^[27]等针对地应力下柱面波、剪切波在节理岩体中传播特性做了初步研究工作, 为分析深部岩体中的应力波传播的研究提供了参考。

本文主要分析了考虑岩体应力情况下平面应力波在具有法向非线性结构面中的传播规律。采用时域递归分析法 (TDRM) 分析了应力波与结构面的相互作用, 建立了考虑岩体应力的结构面中应力波的传播方程, 并且给出透、反射系数的表达式。最后, 通过参数研究, 分析了应力波频率、结构面深度、初始法向刚度和最大允许闭合量等参数对波传播以及透反射系数的影响。本文研究成果有望丰富应力波在节理岩体中传播规律的研究, 并为深部条件下岩体工程的稳定性分析和安全性评价提供科学依据和参考。

2 理论推导

2.1 问题的描述

岩体应力以自重应力和构造应力为主要组成部

分^[22-23]。其中, 构造应力由垂直天然地应力 σ_v 和水平地应力 σ_h 构成。 σ_v 大致等于其上层岩体自重应力, 随岩层深度呈线性增大。 σ_h 受岩体自重、岩层断裂运动和岩体的力学性质等因素影响, 相对于 σ_v 更加复杂。根据 Brown 和 Hoek^[28]绘制的世界各国平均水平应力与垂直应力的比值随深度 H 变化的规律图, 水平地应力和垂直地应力的比值——水平应力系数 k ($100/H + 0.3 \leq k \leq 1500/H + 0.5$), 随结构面所处深度 H 增大而逐渐减小。观察图中系数 k 的分布规律, 发现在深度 H 为 $0 \sim 1000$ m 范围内, k 值大致在 $(1, 2)$ 之间, 从而可假设 $k = 2 - H/1000$, 随深度增加近似线性递减。

图 1 为考虑岩体应力的 z - O - x 平面示意图。由于本研究中的岩体范围较小, 故不考虑模型尺寸所引起的岩体应力的变化。假定岩体中含有一结构面, 结构面与水平方向的夹角为 θ 。在未受到应力波扰动时, 天然结构面处于竖直应力和水平应力分别为 σ_v 和 σ_h 的岩体应力环境中。因此, 对于结构面而言, 所受到的初始法向应力 σ_0 和初始切向应力 τ_0 可根据图 1 中的几何关系求得。

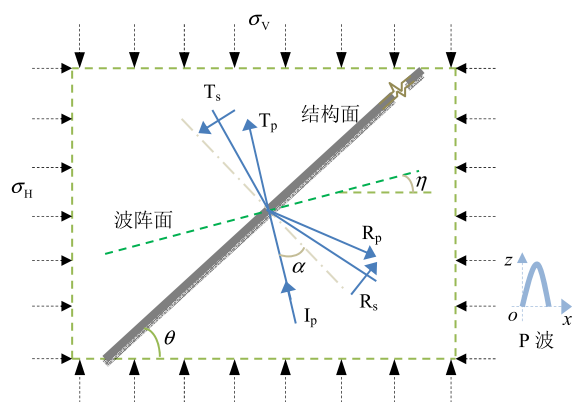


图 1 波在结构面岩体中的传播示意图

Fig.1 Schematic diagram of wave propagation in rock mass containing a structural plane

$$\sigma_0 = \sigma_v \cos^2 \theta + \sigma_h \sin^2 \theta \quad (1)$$

$$\tau_0 = \sigma_v \cos \theta \sin \theta - \sigma_h \cos \theta \sin \theta \quad (2)$$

入射波为半正弦平面波, 波阵面与水平方向的夹角为 η , 则入射角 $\alpha = \theta - \eta$ 。一般情况下, 当一组平行的平面 P 波 (图中表示为 I_p) 入射结构面岩体时会发生透射和反射, 形成透射的 P、S 波 (图中表示为 T_p 、 T_s) 和反射的 P、S 波 (图中表示为 R_p 、 R_s)。当 P 波平行于结构面入射时, 会产生全反射, 只有反射 P 波形成。

2.2 应力波与结构面的相互作用分析

根据图 1, 当任意一簇入射波以入射角 α 入射结构面时, 入射波与结构面、波阵面将构成一个微小单元体, 如图 2 所示。AC 为 I_p 的波阵面, 直线 AB 表示结构面的左界面, 结构面两侧微元面上的应力状态可在图中表示。

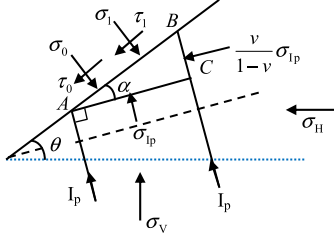


图 2 入射波和结构面相互作用微元示意图

Fig.2 Schematic diagram of an element body considering wave and joint interaction

BC 侧的应力为 $\frac{v}{1-v}\sigma_{ip}$, 其中 σ_{ip} 为入射波应力, v 为泊松比。 σ_1 和 τ_1 分别为结构面左界面上由入射波 I_p 引起的正应力和切应力。在该微元上根据力的平衡条件可得结构面法向和切向分别满足:

$$(\sigma_1 + \sigma_0)AB - \sigma_{ip} \cos \alpha AC - \frac{v}{1-v} \sigma_{ip} \sin \alpha BC - \sigma_v \cos^2 \theta AB - \sigma_H \sin^2 \theta AB = 0 \quad (3)$$

$$(\tau_1 + \tau_0)AB - \sigma_{ip} \sin \alpha AC + \frac{v}{1-v} \sigma_{ip} \cos \alpha BC - \sigma_v \sin \theta \cos \theta AB + \sigma_H \sin \theta \cos \theta AB = 0 \quad (4)$$

由 $AC = AB \cos \alpha$, $BC = AB \sin \alpha$, 式 (3)、(4) 可以分别简化为

$$\sigma_1 - \sigma_{ip} \cos^2 \alpha - \frac{v}{1-v} \sigma_{ip} \cos \alpha \sin \alpha = 0 \quad (5)$$

$$\tau_1 - \sigma_{ip} \cos \alpha \sin \alpha + \frac{v}{1-v} \sigma_{ip} \cos \alpha \sin \alpha = 0 \quad (6)$$

引入 Snell 定律, 即

$$\sin \beta / \sin \alpha = c_s / c_p = \sqrt{\frac{1-2v}{2(1-v)}} \quad (7)$$

式中: α 和 β 分别为 P 波和 S 波的出射角, c_i ($i = p, s$) 为波速。将式 (7) 代入式 (5)、(6), 可得

$$\sigma_1 = \sigma_{ip} \cos(2\beta), \quad \tau_1 = \sigma_{ip} \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha \quad (8)$$

同样地, 透、反射波与结构面、波阵面也均可构成

微小单元体, 按照式 (3) ~ (8) 的方法也可得到其他几组应力的值, 其结果均与文献[12-17]中一致。

由此可知, 应力波传播至结构面时所引起的结构面上的附加应力与原岩应力大小无关。因此, 在采用 TDRM 方法分析结构面中的应力波传播过程时可不考虑岩体应力影响。然而, 岩体应力的存在会使得结构面上的总应力产生变化, 继而影响到结构面的变形特性。按照论文[12-17]中的方法, 可表示出结构面左侧总的法向应力 σ^- 和切向应力 τ^- , 右侧总的法向应力 σ^+ 和切向应力 τ^+ :

$$\sigma^- = \sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = z_p \cos(2\beta) \cdot v_{ip} + z_p \cos(2\beta) \cdot v_{Rp} - z_s \sin(2\beta) \cdot v_{Rs} + (\sigma_v \cos^2 \theta + \sigma_H \sin^2 \theta) \quad (9)$$

$$\tau^- = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha \cdot v_{ip} - z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha \cdot v_{Rp} - z_s \cos(2\beta) \cdot v_{Rs} + (\sigma_v - \sigma_H) \sin \theta \cos \theta \quad (10)$$

$$\sigma^+ = \sigma_0 + \sigma_4 + \sigma_5 = z_p \cos(2\beta) \cdot v_{Tp} + z_s \sin(2\beta) \cdot v_{Ts} + (\sigma_v \cos^2 \theta + \sigma_H \sin^2 \theta) \quad (11)$$

$$\tau^+ = \tau_0 + \tau_4 + \tau_5 = z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \cot \alpha \cdot v_{Tp} - z_s \cos(2\beta) \cdot v_{Ts} + (\sigma_v - \sigma_H) \sin \theta \cos \theta \quad (12)$$

式中: σ_n 和 τ_n ($n = 2, 3, 4, 5$) 分别表示结构面左界面上由反射 P、S 波和透射 P、S 波引起的正应力和切应力; z_i ($i = p, s$) 为波阻抗, 即 $z_p = \rho c_p$ 和 $z_s = \rho c_s$, ρ 为波传播的岩石密度; v_{ip} 为入射 P 波引起的质点速度; v_{Rp} 和 v_{Rs} 为反射 P、S 波引起的质点速度; v_{Tp} 和 v_{Ts} 为透射 P、S 波引起的质点速度。

结构面左侧质点振动法向速度 v_n^- 、切向速度 v_t^- , 右侧的法向速度 v_n^+ 和切向速度 v_t^+ 分别为

$$v_n^- = \cos \alpha \cdot v_{ip} - \cos \alpha \cdot v_{Rp} + \sin \beta \cdot v_{Rs} \quad (13)$$

$$v_t^- = \sin \alpha \cdot v_{ip} + \sin \alpha \cdot v_{Rp} + \cos \beta \cdot v_{Rs} \quad (14)$$

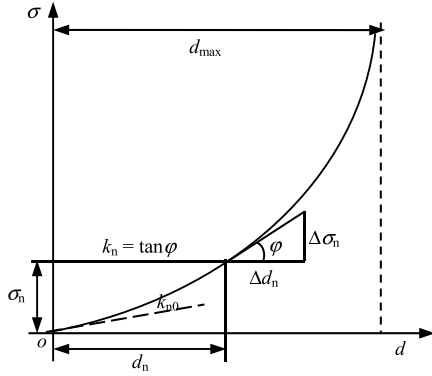
$$v_n^+ = \cos \alpha \cdot v_{Tp} + \sin \beta \cdot v_{Ts} \quad (15)$$

$$v_t^+ = \sin \alpha \cdot v_{Tp} - \cos \beta \cdot v_{Ts} \quad (16)$$

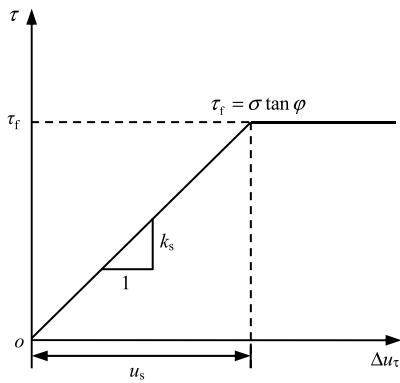
2.3 结构面模型

结构面采用图 3 所示模型, 具有法向非线性双曲变形特性和切向线性滑移变形特性。结构面满足位移不连续边界条件, 即结构面两侧应力连续, 位

移不连续。应力连续可表示为



(a) 法向双曲非线性模型（即 Barton-Bandis 模型，简称 B-B 模型）



(b) 切向库仑滑移模型

图 3 结构面模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of rock structural plane model

$$\sigma^- = \sigma^+ = \sigma, \quad \tau^- = \tau^+ = \tau \quad (17)$$

假设结构面的法向本构关系满足 B-B 模型，如图 3(a)所示，其中 d_n 为结构面法向闭合量； σ_n 为法向有效应力； $d_{\max}$ 为结构面的最大允许闭合量； k_{n0} 为初始应力作用下的结构面法向刚度。 σ_n 、 d_n 满足如下关系：

$$d_n = u_n^- - u_n^+ = \Delta u_n = \frac{\sigma}{k_{n0} + (\sigma / d_{\max})} \quad (18)$$

切向满足库仑滑移模型（见图 3(b)）：结构面在受剪未破坏之前，其位移是由结构面的剪切刚度 k_s 控制的，当结构面的剪应力 τ 大于其抗剪强度 τ_f ，发生剪切破坏，即

$$\left. \begin{aligned} u_\tau^- - u_\tau^+ = \Delta u_\tau = \frac{\tau}{k_s}, \quad \text{当 } |\Delta u_\tau| \leq u_s \\ \tau = \tau_f = \sigma \tan \varphi, \quad \text{当 } |\Delta u_\tau| > u_s \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中： u_n^- 和 u_τ^- 分别为结构面下界面的法向和切向位移； u_n^+ 和 u_τ^+ 为结构面上界面处的法向和切向位移。

σ 和 τ 分别是法向应力和剪切应力； φ 为结构面内摩擦角； Δu_n 为结构面法向位移； Δu_s 为结构面剪切位移； u_s 为 τ_f 所对应的剪切位移值。将式 (18) 对时间 t 求微分，可推导得到结构面左右界面处应力 (σ 和 τ) 和粒子振动速度 (v_n 和 v_τ) 之间的关系，即

$$v_{ni}^- - v_{ni}^+ = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\sigma}{k_{n0} + (\sigma / d_{\max})} \right) \approx \frac{\partial \sigma}{\partial t} \cdot \frac{k_{n0}}{(k_{n0} + \sigma / d_{\max})^2} \cdot \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\Delta t} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{\tau i}^- - v_{\tau i}^+ &= \frac{1}{k_s} \frac{\partial \tau}{\partial t} \approx \frac{1}{k_s} \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{\Delta t}, \quad \text{当 } |\Delta u_\tau| \leq u_s \\ \tau_{i+1}^+ &= \sigma_{i+1}^+ \tan \varphi, \quad \text{当 } |\Delta u_\tau| > u_s \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

2.4 波的传播方程

基于波阵面的动量守恒，可以建立波阵面上应力与质点振动速度的关系。本文沿用文献[12-17]中的 TDRM 方法，推导了考虑岩体应力作用下含单个非线性法向变形的岩石结构面中应力波的传播方程。当 $|\Delta u_\tau| \leq u_s$ ，该方程用矩阵形式可以表示为

$$\begin{bmatrix} v_{Rp} \\ v_{Rs} \end{bmatrix}_i = -\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} v_{lp i} + \mathbf{B}^{-1} \mathbf{C} \begin{bmatrix} v_{Tp} \\ v_{Ts} \end{bmatrix}_i \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} v_{Tp} \\ v_{Ts} \end{bmatrix}_{i+1} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{D} v_{lp i} + \mathbf{C}^{-1} \mathbf{E} \begin{bmatrix} v_{Rp} \\ v_{Rs} \end{bmatrix}_i + \mathbf{C}^{-1} \mathbf{F} \begin{bmatrix} v_{Tp} \\ v_{Ts} \end{bmatrix}_i \quad (23)$$

其中：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) \\ z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) & -z_s \sin(2\beta) \\ -z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha & -z_s \cos(2\beta) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) & z_s \sin(2\beta) \\ z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha & -z_s \cos(2\beta) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\sigma_i = z_p \cos(2\beta) \cdot v_{lp i} + z_p \cos(2\beta) \cdot v_{Rp i} - z_s \sin(2\beta) \cdot v_{Rs i} + (\sigma_v \cos^2 \theta + \sigma_H \sin^2 \theta) \quad (27)$$

$$k_{ni} = (k_{n0} + \sigma_i / d_{\max})^2 / k_{n0} \quad (28)$$

$$\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} k_{ni} \Delta t \cos \alpha \\ k_s \Delta t \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} -k_{ni} \Delta t \cos \alpha & k_{ni} \Delta t \sin \beta \\ k_s \Delta t \sin \alpha & k_s \Delta t \cos \beta \end{bmatrix} \quad (30)$$

$F_i =$

$$\begin{bmatrix} -k_{ni}\Delta t \cos \alpha + z_p \cos(2\beta) & -k_{ni}\Delta t \sin \alpha + z_s \sin(2\beta) \\ -k_s \Delta t \sin \alpha + z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha & k_s \Delta t \cos \beta - z_s \cos(2\beta) \end{bmatrix} \quad (31)$$

当 $|\Delta u_\tau| > u_s$, 结构面两侧相互滑动, 结构面上的剪应力满足式(21)第2式。反射波方程与式(22)

$$C_1 = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) & z_s \sin(2\beta) \\ z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha - z_p \cos(2\beta) \tan \varphi & -z_s \cos(2\beta) - z_s \sin(2\beta) \tan \varphi \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$D_{li} = \begin{bmatrix} k_{ni}\Delta t \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$E_{li} = \begin{bmatrix} -k_{ni}\Delta t \cos \alpha & k_{ni}\Delta t \sin \beta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$F_{l(i)} =$

$$\begin{bmatrix} -k_{ni}\Delta t \cos \alpha + z_p \cos(2\beta) & -k_{ni}\Delta t \sin \alpha + z_s \sin(2\beta) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

一致, 透射波方程则表示为

$$\begin{bmatrix} v_{Tp} \\ v_{Ts} \end{bmatrix}_{i+1} = C_1^{-1} D_{li} v_{lpi} + C_1^{-1} E_{li} \begin{bmatrix} v_{Rp} \\ v_{Rs} \end{bmatrix}_i + C_1^{-1} F_{li} \begin{bmatrix} v_{Tp} \\ v_{Ts} \end{bmatrix}_i + C_1^{-1} G \tau_0 \tan \varphi \quad (32)$$

其中:

式(34)~(36)中 k_n 仍然为变量, 应由式(27)、(28)计算。当 P 波传播至结构面时, 透射系数 (k_{Tp} 和 k_{Ts})、反射系数 (k_{Rp} 和 k_{Rs}) 可由下式计算:

$$k_{Ti} = \frac{\max |v_{Tk}|}{\max |v_{lk}|}, k_{Ri} = \frac{\max |v_{Rk}|}{\max |v_{lk}|} \quad (i = p, s) \quad (38)$$

3 特例分析

3.1 特例 1 ($\theta = 0^\circ$, $\eta = 0^\circ$)

如图 4(a)所示, 结构面深度为 H , 处于水平方向。当 $\eta = 0^\circ$, 此时 $\alpha = 0^\circ$, 即应力波垂直向上入射结构面, 入射 P 波, 反射 P 波、S 波和透射 P 波、S 波之间的关系可参照已有文献^[12]中的相关描述。

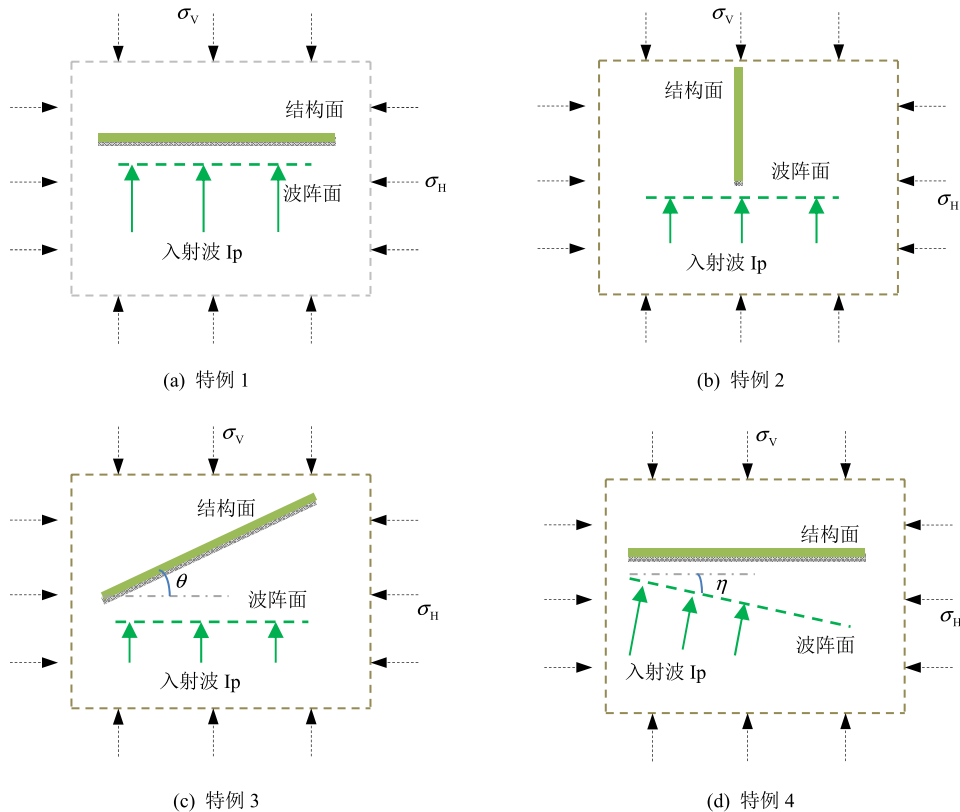


图 4 4 种特例对应的示意图

Fig.4 Schematic diagrams of four special cases

3.2 特例 2 ($\theta = 90^\circ$, $\eta = 0^\circ$)

结构面为垂直方向,如图 4(b)所示。当 $\eta = 0^\circ$,此时 $\alpha = 90^\circ$,即 P 波平行于结构面入射。P 波传播至结构面时,只有反射 P 波产生。文献^[12]中描述了这种特殊情况下入射 P 波、反射 P 波的关系。

3.3 特例 3 ($\theta \neq 0^\circ$, $\alpha = \theta$)

如图 4(c)所示,应力波波阵面与水平面平行,向上传播至一倾斜结构面。该结构面与水平面夹角为 θ ,由几何关系可得入射角 $\alpha = \theta$,与其倾角大小相等。应力波透反射规律和结构面倾角大小的关系将在第 4.2 节参数分析中详细讨论。

3.4 特例 4 ($\theta = 0^\circ$, $\alpha = \eta$)

如图 4(d)所示,结构面在水平方向上,应力波波阵面与水平面夹角为 η ,即 $\theta = 0^\circ$, $\alpha = \eta$,改变波阵面倾角会直接影响入射角。与特例 3 相似,最终改变量都是入射角的大小,规律可参见 4.2 节。

4 参数分析与讨论

参数研究包括岩体应力特性、结构面倾角、刚度和入射波频率等因素对透、反射系数的影响。入射波选取速度幅值为 1 的半正弦波,表达式为

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= \sin \omega t \quad (0 \leq t \leq T/2) \\ V_0 &= 0 \quad (t > T/2) \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

参数研究时岩体泊松比 ν 取 0.2,岩石密度 ρ 取 2 650 kg/m³,纵波传播速度 c_p 为 5 830 m/s,横波传播速度 c_s 为 2 940 m/s。

4.1 岩体应力大小的影响

结构面处竖向地应力可表示为 $\sigma_v = \rho g H$,为了研究岩体应力对波传播的影响,将结构面的深度 H 作为变量,研究深度与透反射系数的关系。在研究深度对应力波传播规律的影响时, H 取值范围在 0~600 m 之间,对应的水平应力系数 k 由 2 线性递减至 1.4。计算时,结构面最大闭合量 $d_{\max}$ 取为 10 mm,初始法向刚度为 $k_{n0} = 1.3$ GPa/m,切向刚度为 $k_s = 0.7$ GPa/m。分别针对 $\theta = 30^\circ$ 、 $\eta = 15^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$ 、 $\eta = 30^\circ$ 两种情形进行分析,计算结果如图 5 所示。

图 5 中,随深度 H 增加,反射系数 k_{Rp} 和 k_{Rs} 先逐渐减小,后趋于稳定状态。其中反射系数 k_{Rp} 变化幅度较大,在埋深较小时变化明显;在深度 H 超过 300 m 时, k_{Rp} 值趋于稳定。相反,透射系数 k_{Tp} 和 k_{Ts} 随深度 H 增大而呈逐渐增大的趋势。主要原因在于,当岩体应力增大时,节理趋于闭合,其刚度增大,应力波传播过程中的能量损失较小,继

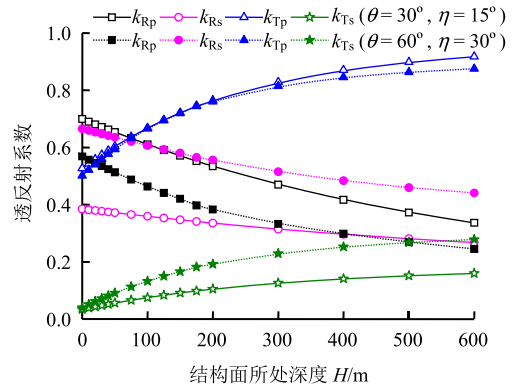


图 5 不同深度岩体应力下的透反射系数
Fig.5 Transmission and reflection coefficients under different depths with different rock mass stresses

而透射系数增大、反射系数减小。两种情形下透、反射系数随 H 的变化趋势基本一致,但对应的值略有差别。因结构面分布角度不同,由岩体应力引起的结构面处的法向应力和切向应力均不同,造成结构面刚度的变化不同,继而导致透反射系数值有差别。

4.2 结构面倾斜角度的影响

在分析结构面倾斜角度对透反射系数的影响时,取结构面的埋置深度为 $H = 200$ m,法向初始刚度为 $k_{n0} = 2$ GPa/m,切向刚度为 $k_s = 0.3$ GPa/m。其他参数与 4.1 节一致。分别针对 $\eta = 0^\circ$ 和 $\eta = 30^\circ$ 两种情形进行分析,计算结果如图 6 所示。

当应力波波阵面与水平面夹角为 0° 时,入射角大小等于结构面倾角,结果如图 6(a)所示,可以发现,透、反射系数随入射波入射角度的改变均有明显的变化。反射系数 k_{Rs} 的值高于透射系数 k_{Ts} ,均随着结构面倾角增大先增大后减小,在结构面倾角 $\theta = 45^\circ$ (即入射角为 45°)附近时,取得最大值。 k_{Rp} 和 k_{Tp} 曲线在 $[5^\circ, 70^\circ]$ 内随倾角增大而减小,在倾角接近 90° 时发生突变, k_{Rp} 增大, k_{Tp} 减小。可见,在应力波与结构面接近平行时,有利于减弱应力波透射效应,促使应力波被反射至周围岩体中去。在应力波接近垂直入射结构面时, k_{Rs} 和 k_{Ts} 值相对于 k_{Rp} 和 k_{Tp} 很小,也就是说,结构面处产生的应力波以纵波为主,几乎不会产生剪切横波。

如图 6(b)所示,对于 $\eta = 30^\circ$,仅计算了结构面倾角 $\theta > 30^\circ$ 的情形。倾角从 35° 增加至 85° ,同时应力波入射角会从 5° 增加至 65° 。可以发现,与图 6(a)相似,结构面倾角在 $[35^\circ, 85^\circ]$ 内(入射角在 $[5^\circ, 65^\circ]$), k_{Rp} 和 k_{Tp} 曲线随倾角增大近似线性减小,同时 k_{Rs} 和 k_{Ts} 值均随着结构面倾角增大先增大后减小,在结构面倾角 $\theta = 75^\circ$ (即入射角为 45°)附近

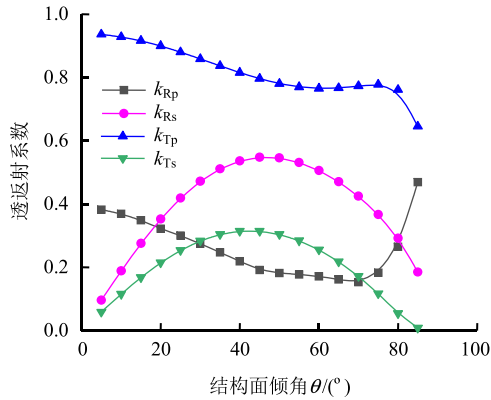
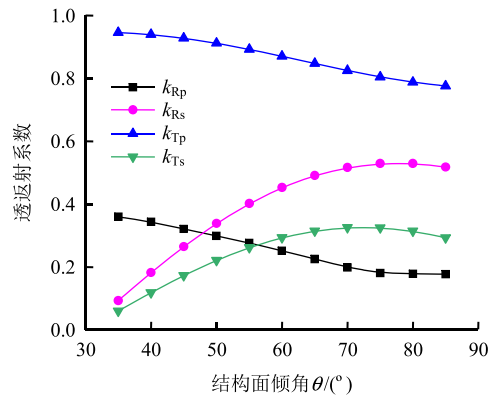
(a) $\eta = 0^\circ$ (b) $\eta = 30^\circ$

图6 不同结构面倾斜角度下的透反射系数

Fig.6 Transmission and reflection coefficients under different inclination angles of structural plane

时,取得最大值。因此,可以通过适当增大应力波入射角度,减弱应力波在结构面中透射能量。

4.3 入射波频率的影响

透反射系数随入射波频率的关系如图7所示。入射波频率范围取(50, 1 000) Hz, 计算中取结构面倾角为 45° , 波阵面与水平面夹角为 20° , 即应力波入射角为 25° , 结构面深度为 200 m, 最大允许闭合量为 10 mm, 初始法向刚度为 $k_{n0} = 1.3 \text{ GPa/m}$, 切向刚度为 $k_s = 0.7 \text{ GPa/m}$ 。

从图7可以看出,透射系数 k_{Tp} 的值高于 k_{Ts} 。 k_{Tp} 和 k_{Ts} 随频率的增大有明显下降的趋势,下降速率在波频率超过 400 Hz 左右时变缓慢。而入射波的频率对反射系数 k_{Rp} 和 k_{Rs} 的影响非常相似。当增大入射波频率时, k_{Rp} 和 k_{Rs} 先迅速增加,尤其是在 $f < 400 \text{ Hz}$ 的范围内。当频率 f 在相对较高的值(超过 400 Hz)时,反射系数缓慢地增加。以上规律反映了高频率的应力波更难在结构面中传播。换句话说,频率较高时透射效率较低,反映了岩石节理对高频的滤波效果。表明:在考虑岩体应力作用时,入射

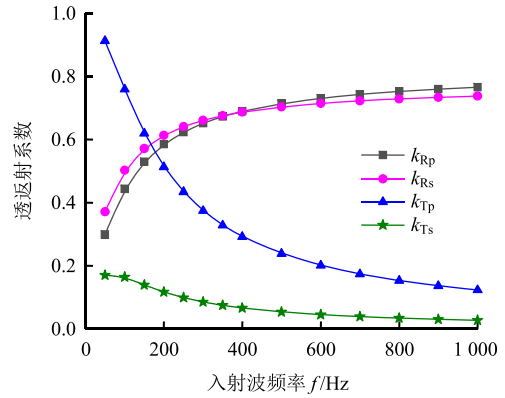


图7 透反射系数随入射波频率的变化曲线

Fig.7 Relation curves of transmission and reflection coefficients vs. frequency of incident wave

波频率仍然存在“通低频、阻高频”的效应。

4.4 结构面初始法向刚度的影响

本节将研究结构面初始刚度大小对应力波传播规律的影响。计算中取入射波频率取为 100 Hz, 其他参数与 4.3 节中一致。透反射系数随初始法向刚度 k_{n0} 的变化曲线如图8所示。从曲线中可以发现,反射系数 k_{Rp} 和 k_{Rs} 随 k_{n0} 增大先增大后减小,在 $k_{n0} = 0.9 \text{ GPa/m}$ 附近, k_{Rp} 和 k_{Rs} 均取得最大值。与它们相反,透射系数 k_{Tp} 和 k_{Ts} 随着 k_{n0} 增大先减小后增大,在刚度 $k_{n0} = 1.25 \text{ GPa/m}$ 附近同时取得最小值。

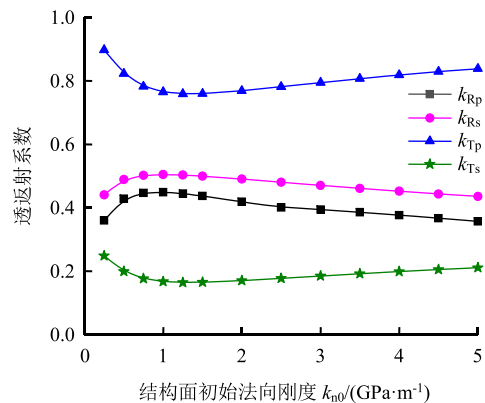


图8 透反射系数随结构面初始法向刚度的变化曲线

Fig.8 Relation curves of transmission and reflection coefficients vs. initial normal stiffness of structural plane

4.5 结构面最大允许闭合量的影响

结构面最大允许闭合量研究范围为 $0 \sim 5 \text{ mm}$, 计算中取入射波频率取为 100 Hz, 其他参数与 4.3 节中一致, 得到透反射系数与结构面最大允许闭合量的关系曲线, 如图9所示。赵法锁等^[29]认为随结构面结合程度的减弱, 最大允许闭合量逐渐增大。当闭合量大于 5 mm 时, 就会形成充填型的结构面。

Zhao 等^[8]在研究弹性纵波在具有非线性正变形特性的单裂隙中的传播规律时, 针对 $d_{\max} < 1 \text{ mm}$ 的结构面提出法向 B-B 模型分析波的传播规律。本节探讨地应力下结构面最大允许闭合量对应力波传播影响的问题时, 暂不考虑 $d_{\max} > 1 \text{ mm}$ 对 B-B 模型的适用性问题。在研究结构面最大允许闭合量对应力波传播影响时, 必然会与实际结构面的变形特性有一定的差异, 本文暂不探讨。

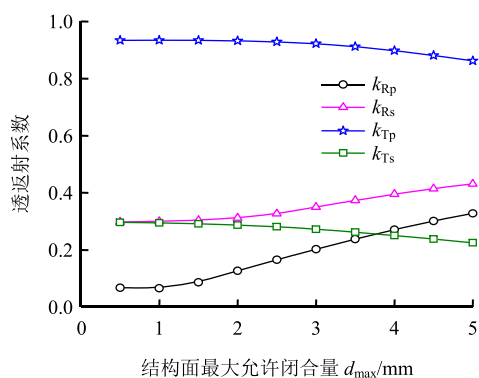


图 9 透反射系数随结构面最大允许闭合量的变化曲线

Fig.9 Relation curves of transmission and reflection coefficients vs. maximum allowable closure of structural plane

图 9 显示了透反射系数与最大允许闭合量的变化曲线。可以发现, 最大闭合量由 0~5 mm 的变化过程中, 透反射系数都发生了显著的变化。随着结构面最大允许闭合量增大, 反射系数 k_{Rp} 和 k_{Rs} 逐渐增大。相反, 透射系数 k_{Tp} 和 k_{Ts} 逐渐减小。由式 (28) 可以发现, 当固定其他参数时, 法向刚度 k_n 随 $d_{\max}$ 增大逐渐减小, 从而入射波在结构面中传播能量损耗越大, 透射系数减小, 反射系数增大, 这与 4.1 节中变化规律一致。可见, 在一定范围内, $d_{\max}$ 增大能显著削弱入射 P 波的透射效应, 减小对附近岩体稳定性的影响。

5 结 论

(1) 应力波入射结构面时所引起的结构面上的应力增量与原始岩体应力大小无关, 其与存在的岩体应力共同改变岩体结构面上总应力大小, 进而会改变结构面的变形特性, 影响应力波传播特性。

(2) 结构面所处深度 (即岩体应力大小) 对结构面中的应力波的透反射系数有明显影响。随着岩体应力的增大, 透射系数增大、反射系数明显减小。可见高岩体应力会使得结构面的能量耗散越小, 有利于应力波透射。

(3) 应力波在结构面中的传播特性明显受到结构面倾角和波阵面角度的影响, 但透反射系数的变化规律主要受入射角的影响。若波阵面与主应力方向一致, 则结构面倾角为 45° 时, 对应反射系数最大。若波阵面与主应力方向不一致, 则波阵面倾角、结构面倾角以及应力分布情况共同影响应力波的传播特性。

(4) 在考虑岩体应力作用时, 入射波频率仍然存在“通低频、阻高频”的高频滤波效应。此外, 结构面刚度以及结构面的最大允许闭合量对应力波在结构面上的透反射特性有明显影响, 其影响规律也会受到岩体应力的影响。

参 考 文 献

- [1] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
XIA Cai-chu, SUN Zong-qi. Joint mechanics of engineering rock mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [3] PERINO A, ZHU J B, LI J C, et al. Theoretical methods for wave propagation across jointed rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6): 799-809.
- [4] PYRAK-NOLTE L J, MYER L R, COOK N G W. Transmission of seismic waves across single natural fractures[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B6): 8617-8638.
- [5] COOK N G W. Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3): 198-223.
- [6] 李夕兵. 论岩体软弱结构面对应力波传播的影响[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(4): 334-342.
LI Xi-bing. Influence of the structural weakness planes in rock mass on the propagation of stress waves[J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(4): 334-342.
- [7] 卢文波. 应力波与可滑移岩石界面间的相互作用研究[J]. 岩土力学, 1996, 17(3): 70-75.
LU Wen-bo. A study on interaction between stress wave and slipping rock interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(3): 70-75.
- [8] ZHAO J, CAI J G. Transmission of elastic P-wave across single fracture with a nonlinear normal deformation

- behavior[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2001, 34(1): 3-22.
- [9] 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.
- [10] 俞缙, 关云飞, 肖琳, 等. 弹性纵波在不同非线性法向变形行为节理处的传播[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6): 589-594.
- YU Jin, GUAN Yun-fei, XIAO Lin, et al. Transmission of elastic P-wave across single fracture with different nonlinear normal deformation behaviors[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science)**, 2007, 8(6): 589-594.
- [11] 俞缙, 赵晓豹, 赵维炳, 等. 改进的岩石节理弹性非线性法向变形本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1316-1321.
- YU Jin, ZHAO Xiao-bao, ZHAO Wei-bing, et al. Improved nonlinear elastic constitutive model for normal deformation of rock fractures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(9): 1316-1321.
- [12] 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.
- [13] LI J C, MA G W, ZHAO J. Stress wave interaction with a nonlinear and slippery rock joint[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(3): 493-500.
- [14] LI J C, MA G W, ZHAO J. Analysis of stochastic seismic wave interaction with a slippery rock fault[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2011, 44(1): 85-92.
- [15] LI J C, LI H B, MA G W, et al. A time-domain recursive method to analyze transient wave propagation across rock joints[J]. **Geophysical Journal International**, 2012, 188(2): 631-644.
- [16] LI J C. Wave propagation across non-linear rock joints based on time-domain recursive method[J]. **Geophysical Journal International**, 2013, 193(2): 970-985.
- [17] CHAI S B, LI J C, ZHANG Q B, et al. Stress wave propagation across a rock mass with two non-parallel joints[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49: 4023-4032.
- [18] 刘婷婷, 李建春, 李海波, 等. 应力波通过非线性平行节理的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1610-1617.
- LIU Ting-ting, LI Jian-chun, LI Hai-bo, et al. Energy analysis of stress wave propagation across parallel nonlinear joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1610-1617.
- [19] 柴少波, 李建春, 李海波. 柱面波在节理岩体中的传播特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 523-530.
- CHAI Shao-bo, LI Jian-chun, LI Hai-bo. Propagation characteristics of cylindrical wave in joint rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(3): 523-530.
- [20] WANG Rui, HU Zhi-ping, ZHANG Dan, et al. Propagation of the stress wave through the filled joint with linear viscoelastic deformation behavior using time-domain recursive method[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50(12): 3197-3207.
- [21] CHAI Shao-bo, TIAN Wei, ZHAO Jun-hai. Study of the cylindrical wave propagation across a single rock joint with nonlinear normal deformation[J]. **Waves in Random and Complex Media**, 2019(4): 1-21.
- [22] OBERT L, DUVALL W L. Rock mechanics and the design of structures in rock[M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [23] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CAI Mei-feng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [24] 裴书锋, 赵金帅, 于怀昌, 等. 考虑洞室岩体应力型破坏特征的局部地应力反演方法及应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4093-4104.
- PEI Shu-feng, ZHAO Jin-shuai, YU Huai-chang, et al. Inversion method for local in situ stress considering stress-induced damage of cavern surrounding rock and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(12): 4093-4104.
- [25] 蒙伟, 何川, 陈子全, 等. 岭回归在岩体初始地应力场反演中的应用[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1156-1169.
- MENG Wei, HE Chuan, CHEN Zi-quan, et al. Application of ridge regression in the inversion analysis of the initial geo-stress field of rock masses [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(4): 1156-1169.
- [26] 李新平, 董千, 刘婷婷, 等. 地应力下柱面应力波在节理岩体中传播规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 1): 3121-3131.
- LI Xin-ping, DONG Qian, LIU Ting-ting, et al. Research on propagation law of cylindrical stress wave in jointed rock mass under in-situ stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(Suppl.1): 3121-3131.
- [27] LIU T T, LI X P, ZHENG Y, et al. Study on S-wave propagation through parallel rock joints under in situ stress[J]. **Waves in Random and Complex Media**, 2020(2): 1-24.
- [28] BROWN E T, HOEK E. Technical note trends in relationships between measured in situ stress and depth[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1978, 15(4): 211-215.
- [29] 赵法锁, 李相然. 工程地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- ZHAO Fa-suo, LI Xiang-ran. Engineering geology[M]. Beijing: Geology Press, 2002.