

钙质砂透射系数探究：波形耦合作用及梯度提升预测方法

邵国建, 毛泽辉, 苏宇宸, 焦泓程, 吕亚茹

(河海大学 力学与工程科学学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 应力波穿过材料前后的特征值变化是判断材料波衰减能力的重要依据, 可通过霍普金森杆 (split Hopkinson bar, 简称 SHPB) 试验中透射波幅值与初始入射波幅值的比值 (即透射系数) 进行表征。然而, 因透射系数与波形参数密切相关, 目前还难以建立透射系数的定量表征方法。以多孔、不规则、易破碎的钙质砂为研究对象, 通过物理试验和数值模拟相结合的方法, 探究了脉宽、平台段时程、上升沿速率、下降沿速率、应力峰值以及中心对称轴对钙质砂透射系数的影响, 发现透射系数随着应力波的脉宽和中心对称轴耦合作用、平台段时程和上升及下降沿速率耦合作用、脉宽和峰值应力耦合作用以及下降沿速率和脉宽耦合作用的响应明显, 而随峰值应力、上升沿与下降沿速率三者耦合作用的响应不明显。针对波形参数难以完全解耦, 提出了基于梯度提升算法的透射系数预测方法, 可有效表征多因素耦合问题。当训练样本达到 91 个时, 预测精度达到 96% 以上, 可以很好地建立波形参数与透射系数的映射关系, 为防护工程结构荷载设计计算提供参考依据。

关键词: 钙质砂; 透射系数; LS-DYNA 有限元; SHPB 冲击试验; 梯度提升算法

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 11-3661-12

Investigation into transmission coefficient of calcareous sand: waveform coupling effects and gradient boosting prediction method

SHAO Guo-jian, MAO Ze-hui, SU Yu-chen, JIAO Hong-cheng, LYU Ya-ru

(College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: The variation in characteristic values of stress waves before and after passing through a material serves as a critical basis for evaluating its wave attenuation capacity. This can be characterized by the ratio of transmitted wave amplitude to the initial incident wave amplitude (i.e., transmission coefficient) in SHPB tests. However, due to the close correlation between the transmission coefficient and waveform parameters, it remains challenging to establish a quantitative characterization method for the transmission coefficient. Therefore, this study focuses on porous, irregular, and fragile calcareous sand as the research object. By combining physical experiments with numerical simulations, we investigate the influence of pulse width, platform duration, rising edge rate, falling edge rate, peak stress, and the central axis of symmetry on the transmission coefficient of calcareous sand. It is found that the transmission coefficient responds significantly to the coupling effects of the pulse width and the central axis of symmetry of the stress wave, the coupling effects of the platform section duration and the rising and falling edge rates, the coupling effects of the pulse width and the peak stress, as well as the coupling effects of the falling edge rate and the pulse width. Conversely, the response to the coupled effects of peak stress, rising edge rate, and falling edge rate is not pronounced. Owing to the difficulty in completely decoupling these waveform parameters, a prediction method is proposed for the transmission coefficient based on the gradient boosting algorithm, which effectively addresses multi-factor coupling issues. When the number of training samples reaches 91, the prediction accuracy exceeds 96%, which can effectively establish the mapping relationship between waveform parameters and transmission coefficients, providing a reference basis for the load design and calculation of protective engineering structures.

Keywords: calcareous sand; transmission coefficient; LS-DYNA finite element; SHPB impact test; gradient boosting algorithm

收稿日期: 2024-12-24

录用日期: 2025-06-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 52279097, No. 51779264); 江苏高校“青蓝工程”。

This work was supported by the Natural Science Foundation of China (52279097, 51779264) and Jiangsu Province “Qing Lan Project”.

第一作者简介: 邵国建, 男, 1962年生, 博士, 教授, 主要从事岩土率相关理论及工程应用研究工作。E-mail: gjsiao@hhu.edu.cn

通讯作者: 吕亚茹, 女, 1987年生, 博士, 教授, 主要从事岩土率相关理论及工程应用研究。E-mail: yaru419828@163.com

1 引言

应力波穿过材料前后的特征值变化是判断材料波衰减能力的重要依据,可通过分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar,简称 SHPB)试验中透射波幅值与初始入射波幅值的比值(即透射系数)^[1-4]进行表征。当前已采用 SHPB 试验对混凝土、岩石等块状材料透射系数进行了大量研究^[5-11]。

对于散体材料而言(如砂土),其材料透射系数的研究相对较少^[12]。例如,Huang 等^[13]研究了不同幅值应力波在石英砂中的传播,发现颗粒破碎导致的能量消耗使得透射系数随着入射波幅值的增加而减少。Cui 等^[14]采用改良的 SHPB 装置通过能量吸收系数和透射系数定量表征了砂土在单次及重复冲击下的波传播特性。Chen 等^[15]通过中尺度数值模型分析了硅砂相对密度、脉宽与振幅对应力波衰减的影响,并提出了残余峰值应力、波速以及峰值应力速度随试样长度变化的衰减经验公式。Singh 等^[16]采用无量纲参数归一化实际距离,通过构建透射系数与无量纲参数间的映射关系,系统揭示了空气爆炸荷载作用下不同粒径范围干燥 Badarpur 砂的应力波衰减特性。此外,针对多孔、不规则、易破碎的海洋钙质砂^[17-21],魏久洪等^[22-23]通过对比不同应变率、密实度、含水率下钙质砂与石英砂的透射系数变化及能量吸收效率,发现钙质砂应力波衰减特性较之石英砂存在显著差异性。

为了得到砂土透射系数的量化表征方法,Lü 等^[24]基于大量 SHPB 试验,提出了钙质砂透射系数的半经验预测方程。于潇等^[25-28]结合试验和数值仿真结果,探究了脉宽、振幅、相对密实度、应变率及粒径等因素对波透射系数的影响,并提出了一种量化钙质砂透射系数的新方法。上述研究虽已建立了砂土透射系数的预测框架,但尚未系统研究透射系数与应力波参数之间的关系。

鉴于此,本文以钙质砂为研究对象,采用一维侧限单脉冲 SHPB 试验和 LS-DYNA 有限元模型,系统分析了入射波波形参数(应力波时程(脉宽)、平台段时程、应力波上升沿速率、下降沿速率、峰值以及波形)对透射系数的影响。针对波形参数难以解耦的问题,采用梯度提升算法训练试验和计算结果,提出一种精确可靠的透射系数预测方法。

2 基于 SHPB 物理试验的钙质砂透射系数及问题提出

2.1 透射系数的概念及前期研究成果

在 SHPB 试验中,透射系数可定义为^[1-4]

$$T_r = \frac{T_m}{I_m} \quad (1)$$

式中: T_r 为无量纲的透射系数; I_m 为入射杆中初始入射波幅值; T_m 为透射杆中透射波幅值。

基于此,Lü 等^[24]给出了不同长度试样下透射系数的半经验计算方法:

$$T_r = e^{-\beta \frac{x}{D}} \quad (2)$$

式中: x 为试样长度; D 为试样直径; β 为拟合得到的常数系数。所得半经验公式得到了试验结果的验证。

但该经验公式存在一定的局限性:其一,为了同时研究应力-应变特性,试样长度需满足 3~5 次的波反射,而不同工况下反射次数会影响透射系数的结果,如此确定的透射系数已不再表征试样的自身属性;其二,若增加试样长度以使其符合单脉冲传播的要求,那么 SHPB 冲击试验将难以测得透射波,数值模拟的情况亦是如此;其三,当试样长度足够长且满足单脉冲传播时,目前并没有通用规范来规定具体的取样长度,致使所得透射系数离散性极大,难以表述钙质砂的波衰减特性。

2.2 钙质砂透射系数的 SHPB 试验

针对上述局限性,以干燥的钙质砂为试验材料,对其中应力波的衰减进行了初步试验。

2.2.1 试验试样

试验所用钙质砂来源于我国南海某珊瑚岛礁,主要成分为 CaCO_3 。鉴于原始钙质砂样本中包含诸多大直径之珊瑚及贝类等物质,为控制其均匀性,试验前先将原样自然风干,再筛选钙质砂砂样,保留 0.18~1.18 mm 的粒径区间。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[29]中颗粒分析试验的筛分法测得筛选后钙质砂的颗粒曲线,见图 1。根据该规范进行钙质砂的相对密度试验,测得其最大和最小干密度分别为 1.389、1.049 g/cm^3 ,并以 90% 的相

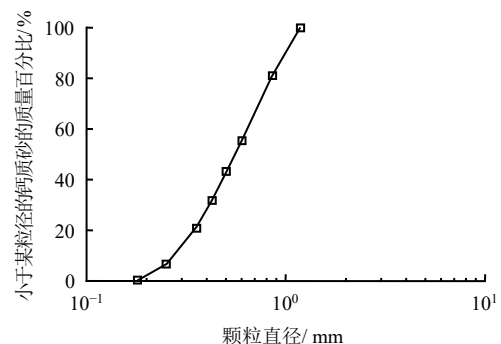


图 1 钙质砂的颗粒粒径

Fig.1 Particle size distribution of calcareous sand

对密度配置试验所需试件。钙质砂颗粒具体物理参数如表 1 所示。

表 1 钙质砂试样基本参数

Table 1 Basic parameters of calcareous sand specimens

G_s	D /mm	D_{50} /mm	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	D_r /%
2.81	0.18~1.18	0.55	1.86	0.95	1.389	1.049	90

注： G_s 为骨架密度； C_u 为不均匀系数； C_c 为曲率系数； e_{max} 为最大孔隙比； e_{min} 为最小孔隙比； D_r 为相对密度； D_{50} 为中值粒径。

2.2.2 试验装置及过程

试验利用改进后的 SHPB 试验装置进行一维侧限单脉冲 SHPB 试验。入射杆及透射杆均采用直径为 37 mm、长为 3 000 mm 的铝杆，子弹则采用直径为 37 mm、长为 600 mm 的铝杆。

钙质砂试样采用新型螺纹拼接式套筒、圆柱体铝垫块以及硅胶止水垫圈进行装配，通过将硅胶止水垫圈与套筒内壁预留凹槽配合，并将铝垫块推入挤压硅胶止水垫圈使其产生径向变形，从而抱紧铝垫块，达到限位作用，方便组装外螺纹试样仓中钙质砂试样的装配。随后通过少量多次称取定量钙质砂进行分层装样，装样时将试样轻轻锤击并辅以敲击侧壁以达到指定高度^[20]。最后重复上述步骤安装另一半套筒装置进行试验。

通过改变外螺纹试样仓长度来改变试验的试样长度，如图 2 所示。其中圆柱体铝垫块直径为 37 mm，长为 30 mm。由于考虑到摩擦的作用，故套筒内径略大于铝垫块和铝杆，为 37.1 mm，壁厚为 10 mm。试验所得初始波形曲线如图 3 所示。对比图 4 中曲线可知，与魏久淇等^[22]研究结果类似，增加套筒和垫块后的空打波形与杆件空打时的基本重合，故套筒和垫块对试验结果的影响可忽略不计。

2.2.3 试验结果及分析

本文分别开展了试样长度为 18、37、55、74、111 mm 共计 5 种不同试样长度的一维侧限单脉冲 SHPB 试验。鉴于实际装样时难免存在误差，导致

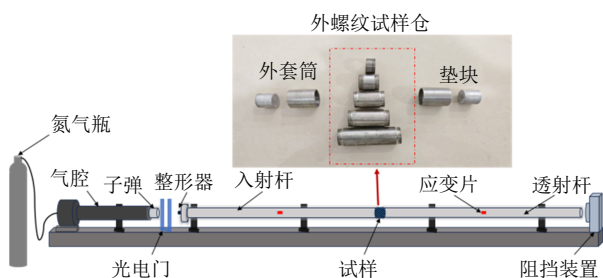


图 2 SHPB 试验装置及装样装置

Fig.2 Split Hopkinson pressure bar (SHPB) test device and sample loading device

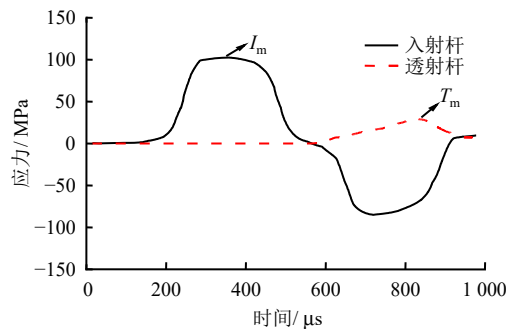


图 3 试验的初始波形曲线

Fig.3 Initial waveform curve of the experiment

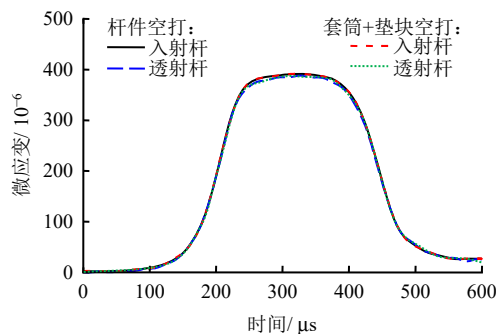


图 4 套筒与垫块的影响标定

Fig.4 Effects of calibration from steel sleeve and platens

试样装样后的实际相对密度偏离理想密度。为此，本文特选取实际相对密度与理想密度较为接近的 4~5 组重复试验予以展示，相关试验工况汇总归纳于表 2。

表 2 试验工况表

Table 2 Summary of SHPB tests

试验编号	试样长度 /mm	冲击速度 / (m · s ⁻¹)	入射波峰值 /MPa	透射波峰值 /MPa	透射系数
#01	18	12.34	99.75	20.39	0.204
#02	18	12.38	98.72	16.59	0.168
#03	18	12.61	100.20	14.86	0.148
#04	18	12.23	96.39	17.21	0.179
#05	37	12.24	106.75	11.42	0.107
#06	37	12.37	104.09	8.46	0.082
#07	37	12.26	102.22	9.66	0.095
#08	37	12.09	98.16	10.61	0.108
#09	37	12.61	103.32	11.53	0.112
#10	55	12.38	105.88	7.74	0.073
#11	55	12.53	109.27	7.49	0.069
#12	55	12.28	99.01	8.13	0.082
#13	55	12.58	94.29	8.12	0.086
#14	74	12.35	108.69	7.40	0.068
#15	74	12.22	105.31	7.09	0.067
#16	74	12.30	102.13	7.11	0.069
#17	74	12.67	94.65	6.54	0.069
#18	111	12.29	109.29	5.11	0.047
#19	111	12.14	104.21	4.47	0.043
#20	111	12.07	105.32	5.14	0.049
#21	111	12.69	99.53	4.73	0.048

根据试验结果并结合式(1)得到无量纲试样透射系数与试样长度的关系,如图5所示。可见,随试样长度的增加,其透射系数逐步降低,应力波衰减明显。试样长度为18 mm时,透射系数约为0.17;长度增至37 mm时,透射系数衰减至0.10左右;继续增加长度,透射系数衰减幅度逐渐变小,至111 mm时,透射系数已不足0.05。首先运用式(2)对试验结果予以拟合,见图5。发现通过短试样 SHPB 冲击试验拟合所得的试样透射系数与试样长度之间的关系式,无法有效表征单脉冲下的试验结果。因此,采用指数与常数项的关系式,重新构建了试样透射系数 T_r 与试样长度之间的关系:

$$T_r = y + Ae^{-\frac{x}{t}} \quad (3)$$

式中: y 、 A 、 t 为拟合得到的常数系数。通过该拟合公式,曲线调整后其相关系数 R^2 在 0.992 以上。拟合曲线同样绘于图 5 中。

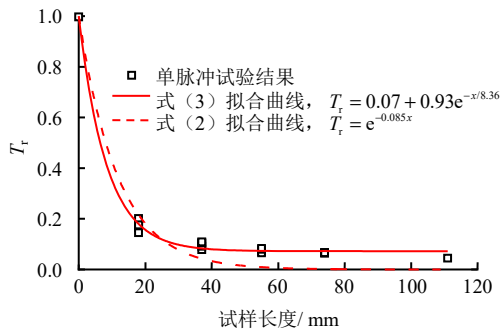


图5 透射系数随试样长度的变化

Fig.5 Variation of wave transmission coefficient with the length of the specimen

事实上,试样透射系数反映材料本身属性,不随试验和模拟技术的改变而改变。但已有研究表明,脉宽较短的入射波体现出了更理想的衰减效果,而振幅对应力波衰减效果不明显^[26]。故入射波的波形参数会显著影响透射系数。由于试验难以控制入射波上升沿、下降沿速率等波形参数,目前尚未系统得到波形参数对应力波传播衰减规律的影响。

3 钙质砂透射系数影响因素分析的数值模型

3.1 模拟工况的确定

2.2 节试验研究钙质砂透射系数时通过整形技术实现了梯形波加载, SHPB 冲击试验时可通过改变子弹长度、子弹形状、整形器材料、整形器形状及厚度等方式实现方波、梯形波、半正弦波等波形

加载^[29-31],但难以定量构建理想的波形曲线和绝对相同的试样条件。因此,本文在保证试样完全相同(本构及参数不变)的前提下,采用数值模拟的方法定量研究波形参数对透射系数的影响。

如图6所示,通过脉宽、应力上升沿速率、应力波峰值、平台段时程、应力下降沿速率以及波形对称与否6个参数确定入射波波形,通过数值模型对上述6个变量进行概化组合模拟,分析其对钙质砂透射系数的影响。设计计算方案时,因变量之间多存在耦合现象,任一变量改变都会导致其他变量的改变,故而难以实现单因素分析。具体模拟工况见表3,其中选取变量中可量化的某一项作为每组工况的区分项,即主要工况。

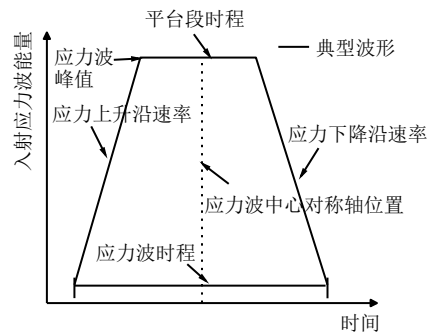


图6 典型的应力波波形曲线

Fig.6 Typical stress wave waveform curve

3.2 LS-DYNA 数值模型

采用 LS-DYNA 显示动力分析程序建立砂土 SHPB 试验的三维有限元数值模型,如图7所示。数值模型包括入射杆、透射杆、试样以及侧限套筒4部分,尺寸与物理试验完全相同。数值模型各部分均采用 Solid164 三维实体单元。模型共计 83 648 个单元,为提高计算精度,对试样部分网格划分较细,共包含单元数 5 868 个,其他部分网格划分较疏,数值模拟的计算模型见表4。采用 1/4 对称模型,以减少计算量。在对称面上设置对称约束,限制对称面上节点在法向的位移。Lü 等^[19]采用数值模拟的方法对子弹撞击入射杆所得入射波与杆端输入入射波进行了比较,两者基本一致。因此,本模型没有考虑子弹撞击入射杆的过程,直接在入射杆的单元节点上输入相应入射波。

模型接触面包括试样与入射杆接触、试样与透射杆接触、试样与侧限套筒接触、侧限套筒与入射杆和透射杆的接触。基于 SHPB 物理试验特点,采用适用于碰撞和自接触问题的 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 模型^[32]处理接触

表 3 模拟工况
Table 3 Numerical simulation operating conditions

A 组：应力峰值与上升沿及下降沿速率的影响							
编号	脉宽/ μs	平台段时程/ μs	上升沿脉宽/ μs	下降沿脉宽/ μs	应力峰值/MPa	中心对称轴位置对应的时程/ μs	试样长度/mm
#A-01	100	0	50	50	18	50	18、23、28、33、
#A-02	100	0	50	50	48	50	38、54、72、93、
#A-03	100	0	50	50	78	50	111、130、144
B 组：平台段时程与上升沿及下降沿速率的影响							
编号	脉宽/ μs	平台段时程/ μs	上升沿脉宽/ μs	下降沿脉宽/ μs	应力峰值/MPa	中心对称轴位置对应的时程/ μs	试样长度/mm
#B-01	200	0	100	100	78	100	38、54、72、93、
#B-02	200	100	50	50	78	100	111、130、144
#B-03	200	150	25	25	78	100	
C 组：脉宽及中心对称轴的影响							
编号	脉宽/ μs	平台段时程/ μs	上升沿脉宽/ μs	下降沿脉宽/ μs	应力峰值/MPa	中心对称轴位置对应的时程/ μs	试样长度/mm
#C-01	100	0	50	50	78	50	38、54、72、93、
#C-02	150	0	75	75	78	75	111、130、144
#C-03	200	0	100	100	78	100	
D 组：应力峰值及脉宽的影响							
编号	脉宽/ μs	平台段时程/ μs	上升沿脉宽/ μs	下降沿脉宽/ μs	应力峰值/MPa	中心对称轴位置对应的时程/ μs	试样长度/mm
#D-01	46	0	23	23	18	23	38、54、72、93、
#D-02	124	0	62	62	48	62	111、130、144
#D-03	200	0	100	100	78	100	
E 组：入射应力波的下降沿速率及脉宽的影响							
编号	脉宽/ μs	平台段时程/ μs	上升沿脉宽/ μs	下降沿脉宽/ μs	应力峰值/MPa	中心对称轴位置对应的时程/ μs	试样长度/mm
#E-01	100	0	50	50	78		38、54、72、93、
#E-02	150	0	50	100	78		111、130、144
#E-03	200	0	50	150	78		

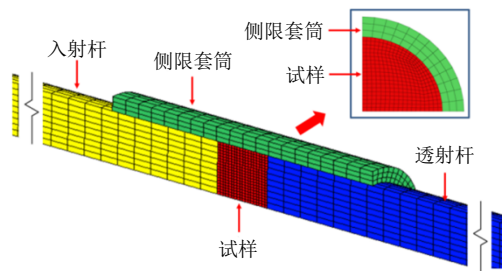


图 7 三维有限元数值模型

Fig.7 Three-dimensional finite element numerical model

表 4 数值模拟的计算模型
Table 4 Detailed settings of numerical model

模型部分	尺寸($D \times L$)/mm	单元类型	单元数/个
入射杆	37×2 000	Soild164	38 500
透射杆	37×2 000	Soild164	38 500
试样	37×18	Soild164	5 868
侧限钢套筒	37×94($\delta=10$)	Soild164	780

注：L 为试样长度； $\delta=10$ 表示侧限钢套筒厚度为 10 mm。

面的动态响应。依据一维应力波传播理论假设，设定无摩擦边界条件（摩擦系数为 0），消除摩擦效应对透射系数的干扰。

3.3 本构模型及参数

入射杆、透射杆以及侧限钢套筒均采用 *MAT_001 (ELASTIC) 本构模型，其中入射杆和

透射杆材料与物理试验一致，均设定为密度 $\rho = 2\,700\text{ kg/m}^3$ 、弹性模量 $E = 72\text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu = 0.32$ 的铝合金。侧限套筒设为密度 $\rho = 7\,900\text{ kg/m}^3$ 、弹性模量 $E = 205\text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu = 0.29$ 的钢材。

采用 *MAT_005 (SOIL & FOAM) 本构模型^[33]表征钙质砂的冲击力学行为，该本构模型可以根据试验数据精准反演材料的压缩特性，在岩土冲击动力学领域具有成熟应用基础。由于透射系数作为材料固有属性参数，其数值受本构模型及参数标定影响显著，但本研究聚焦于波形参数对透射系数的影响机制，故未开展多本构模型对比分析。图 8(a)为 SOIL & FOAM 本构模型静水压力-体积应变曲线示意图，模型假设加载和卸载曲线一致，冲击过程中试样体积不发生破碎，即体积破碎率 (volume crushing ratio, 简称 VCR) 为 1。屈服函数 Φ 由静水压力 P 、第二不变量 J_2 以及几个常数系数 (a_0 、 a_1 、 a_2) 描述：

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{3} \quad (4)$$

$$\Phi = J_2 - [a_0 + a_1 P + a_2 P^2] \quad (5)$$

$$P = (\sigma_x + 2\sigma_r)/3 = \sigma_x (1 + 2\xi)/3 \quad (6)$$

式中： σ_1 、 σ_3 分别为大、小主应力； S_{ij} 为偏应力； σ_x 为测得的轴向应力，在试样均匀化加载的条件下

与正应力相等, 在屈服时 $\sigma_s = \sigma_x$, σ_s 为屈服应力; σ_r 为侧限压力; ξ 为侧压力系数, 定义为 $\xi = \sigma_r / \sigma_x$, 并通过 SHPB 试验确定 $\xi = 0.495$ 。

模型中, 体积应变 ε_{kk} 由相对体积的自然对数表示。将计算开始时当前体积与初始体积的比率定义为相对体积。在压缩运动中, 压力为正, 体积应变为负^[34], 如下式所示:

$$\ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = \ln(1 - \varepsilon_{kk}) \quad (7)$$

式中: V 为试样瞬时体积; V_0 为试样初始体积。

模型共需 23 个输入参数, 即式 (5) 中的 a_0 、 a_1 、 a_2 以及 10 组应力与相对体积应变对应关系下的加卸载曲线 (EPS1~EPS10 以及 P1~P10), 所有输入参数均可由试验测试校准。由于本文采用载荷曲线标识符 (load curve ID, 简称 LCID) 表征加载曲线, 通过 10 组试验得到的应力-相对体积应变关系多段线性逼近理论结果^[35-36], 故本模型仅需对 a_0 、 a_1 、 a_2 这 3 个输入参数进行标定。

根据应变率为 610 s^{-1} 、相对密度为 90% 的钙质砂 SHPB 冲击试验所得应力时程曲线和应力-应变曲线, 转换为应力与体积应变的关系, 通过调整系数进行数值模型材料参数的标定, 钙质砂数值模型的材料参数如表 5 所示。标定前后应力-应变曲线, 如图 8(b)所示, 标定后的数值模型与试验结果呈现良好一致性, 其中轴向应变 12% 处的计算误差为 14%, 原因是 SOIL & FOAM 模型的本质是通过物理试验结果反向拟合本构模型参数, 文中采用 10 组试验数据拟合得到的参数可以很好表征材料的冲击压缩特性, 因数据点选取位置导致加载峰值点误差在 14% 左右, 均在合理范围内。

4 钙质砂透射系数影响因素的模拟结果分析

4.1 应力峰值与上升沿及下降沿速率的影响

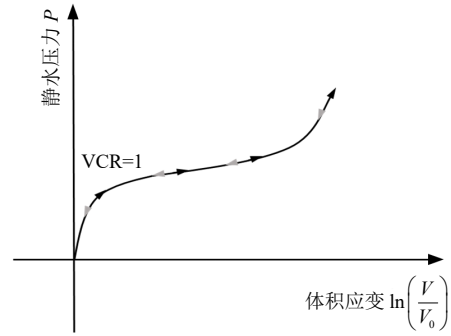
为了研究峰值应力与上升、下降沿速率对透射系数的影响, 计算了 18、48、78 MPa 3 种峰值应力下对称三角形入射波下的透射系数, 应力波对称中心轴位置对应的时程为 $60 \mu\text{s}$ 、脉宽为 $100 \mu\text{s}$ 、平台段时程为 $0 \mu\text{s}$, 如图 9(a)所示。结果发现在数值模

表 5 钙质砂数值模型材料参数

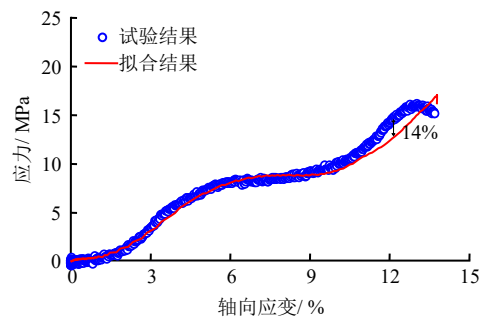
Table 5 Material parameters of the numerical model for calcareous sand

ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	G /MPa	K_u /MPa	a_0 /kPa	a_1 /kPa	a_2
1178	107.7	647.3	84.77	16.23	0.777

注: G 为试样剪切模量; K_u 为试样卸载体积模量。



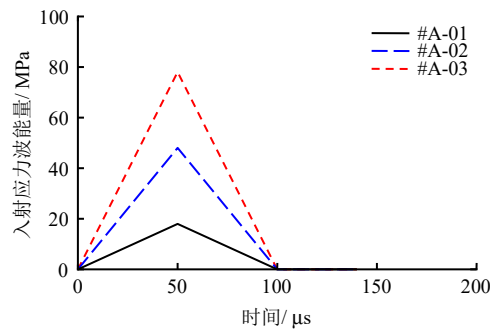
(a) 静水压力-体积应变曲线



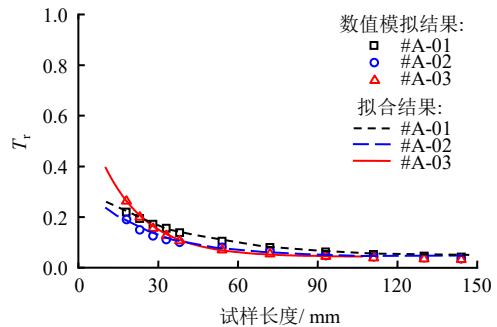
(b) 数值标定

图 8 MAT_005 材料本构模型及标定

Fig.8 MAT_005 material constitutive model and calibration



(a) 工况



(b) 透射系数随试样长度变化曲线

图 9 峰值应力与上升沿及下降沿速率的影响
Fig.9 Influences of peak stress and rising edge and falling edge rates

型上入射杆所得入射应力波和透射杆所得透射应力波与试验一致。共考虑 11 个试样长度，共计 33 种工况，见表 3。

图 9(b)为该工况下透射系数随试样长度的模拟结果及拟合曲线，由数值计算得到试样长度分别为 18、38、54、72、111 mm 的钙质砂透射系数分别为 0.220、0.144、0.099、0.081、0.054，与试验结果具有良好的一致性，印证了数值模型及模型参数的合理性。由于入射波形参数是多重变量耦合，且为了验证修订后的半经验式 (3) 是否适用于该复杂工况下透射系数与试样长度之间的关系表征，对数值结果进行拟合，曲线调整后其相关系数 R^2 在 0.979 以上。再次验证了半经验公式的可靠性。所有工况下的拟合参数见表 6。

表 6 拟合曲线相关参数
Table 6 Relevant parameters of fitted curves

组数	工况	A	t	y	R^2
A 组	#A-01	0.295	36.359	0.040	0.999
	#A-02	0.293	24.440	0.044	0.979
	#A-03	0.645	16.734	0.043	0.995
B 组	#B-01	1.179	28.541	0.076	0.999
	#B-02	0.851	54.543	0.048	0.997
	#B-03	0.894	120.534	-0.112	0.983
C 组	#C-01	0.352	27.269	0.041	0.993
	#C-02	0.889	25.730	0.066	0.999
	#C-03	1.179	28.541	0.076	0.999
D 组	#D-01	0.158	40.408	0.019	0.998
	#D-02	0.310	47.099	0.066	0.996
	#D-03	1.179	28.541	0.076	0.999
E 组	#E-01	0.894	120.534	-0.112	0.983
	#E-02	0.872	25.168	0.069	0.997
	#E-03	0.352	27.269	0.041	0.992

对比不同峰值应力下透射系数 3 条曲线可以发现，随着应力峰值的增加，不同长度试样的透射系数仅在线形变化段上有细微差别，随着试样长度的增加，3 种工况下钙质砂的透射系数偏差不断减小，直至完全重合，此现象与 Chen 等^[15]所得的研究结果相似。说明在应力波对称中心轴及脉宽相同的情况下，试样的峰值应力大小对试样透射系数的影响不明显。

4.2 平台段时程与上升沿及下降沿速率的影响

为了研究平台段时程对透射系数的影响，图 10(a)给出了 3 种平台段时程下的对称入射波形，即 0、100、150 μs ，控制应力波对称中心轴时程为 100 μs 、脉宽为 200 μs 、峰值应力为 78 MPa。随着平台段时程的改变，入射应力波由三角形波变为梯形波，入射应力波上升及下降沿速率随之改变。本节计算 7 个试

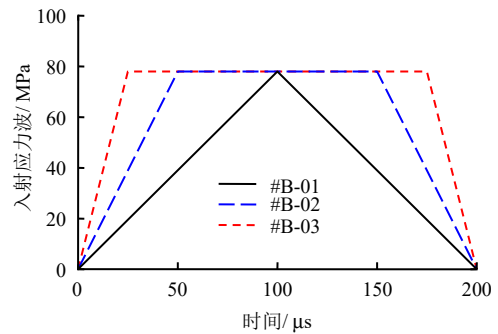
样长度，共计 21 种工况，具体见表 3。

图 10(b)为透射系数计算结果及拟合曲线。随着平台段时程的增加，入射应力波的上升、下降速率随之增加，透射系数不断增大，应力波衰减率不断降低，达到平缓状态所需的试样长度不断变长。随着试样长度的增加，钙质砂的透射系数逐渐降低，且拟合曲线的趋势随平台段时程的增加而变得平缓，逐渐趋于线性相关。与图 9(b)不同的是，3 条曲线的后段未呈现显著的平缓段态势，这表明平台段时程不仅对试样透射系数的大小产生影响，还会减缓透射系数随试样长度的变化趋势。

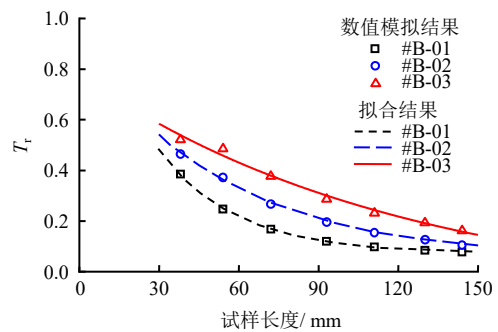
4.3 脉宽及中心对称轴的影响

图 11(a)通过将应力峰值控制在 78 MPa 且采用对称三角形波，研究了 100、150、200 μs 3 种脉宽以及 7 个试样长度与透射系数之间的关系，共计 21 种工况，详情见表 3。其中，上升沿、下降沿速率以及应力波对称轴 (t 分别为 50、75、100 μs) 会随着脉宽的改变而一同变化。

图 11(b)为该工况下透射系数随试样长度的结果及拟合曲线。随着入射应力波脉宽的增加，透射系数随试样长度的变化曲线出现上移，且在一定试样长度范围内，3 种工况下透射系数的变化幅度基本相同。例如，试样长度为 38 mm 时，3 种脉宽下



(a) 工况



(b) 透射系数随试样长度变化曲线

图 10 平台段时程与上升沿及下降沿速率的影响
Fig.10 Influences of plateau segment duration and rising and falling edge rates

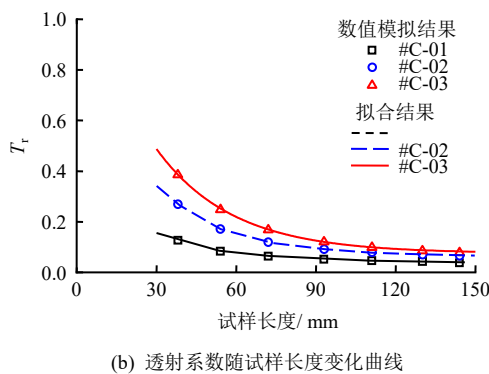
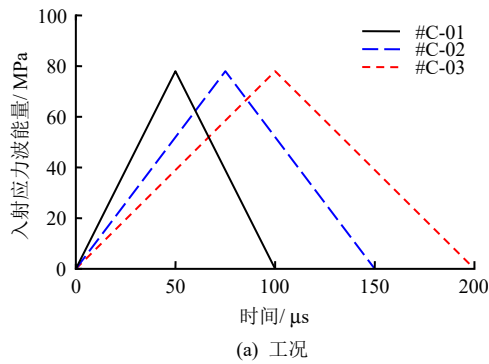


图 11 脉宽及中心对称轴的影响

Fig.11 Influences of pulse width and central axis of symmetry

的透射系数之比为 1.0:2.1:3.0; 当试样长度为 54 mm 时, 该比例为 1.0:2.1:2.9。此变化量随试样长度增加而减小, 如试样长度为 111 mm 和 144 mm 时, 三者之比分别为 1.0:1.63:2.0 和 1.0:1.64:2.0。说明脉宽对透射系数的影响近似呈线性关系, 而产生偏差的原因可能是入射应力波的上升沿、下降沿速率随脉宽改变所致。对比图 9(b)可说明, 相较于峰值应力以及上升沿、下降沿速率耦合作用对透射系数的影响, 脉宽与上升沿、下降沿速率的耦合作用对透射系数的影响更为显著。

4.4 应力峰值及脉宽的影响

为探究应力峰值与脉宽对透射系数的作用机制, 在保证入射应力波具有相同上升沿与下降沿速率的条件下, 模拟了应力峰值依次为 18、48、78 MPa 的对称三角形入射波, 其对称中心轴位置对应的时程分别设定为 23、62、100 μs 处, 同时脉宽分别设定为 46、124、200 μs , 如图 12(a)所示。共探究 7 个试样长度, 涉及 21 种工况, 具体见表 3。

图 12(b)呈现了该工况下透射系数随试样长度变化的实验结果。随着脉宽与峰值应力的增大, 在试样长度较短区间内, 透射系数随试样长度增长呈现明显上升态势; 但随着试样长度进一步增加, 钙

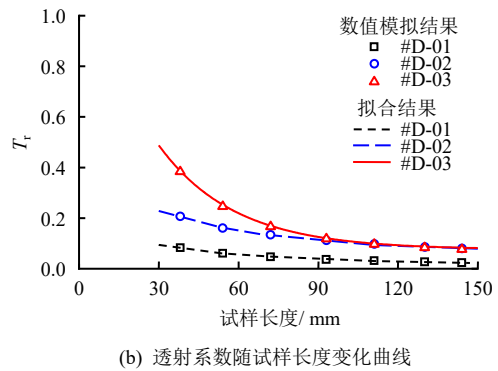
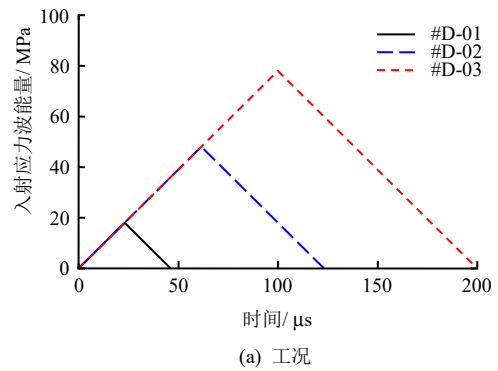


图 12 应力峰值及脉宽的影响

Fig.12 Influences of stress peak and pulse width

质砂的透射系数逐渐下降, 且 3 条曲线两两之间呈现出不同规律。对比应力峰值分别为 18、48 MPa 的工况拟合曲线, 可发现两者近乎平行, 由此推测应力峰值和脉宽的变化主要影响透射系数的具体数值, 而不改变其随试样长度变化的总体趋势。对比应力峰值 48、78 MPa 的工况曲线, 规律则有所不同。在曲线初始阶段, 两者存在显著差异, 但随着试样长度持续增加, 两条曲线逐渐趋于重合, 最终在试样长度达 111 mm 时完全重合。结合图 9(b)的分析, 可推测造成此现象的原因可能为: 在应力峰值与脉宽的比例未达特定阈值前, 脉宽是主导透射系数变化的关键因素, 主要影响曲线的数值水平; 而当该比例超过阈值后, 应力峰值成为决定曲线线形趋势的主导因素。

4.5 入射应力波的下降沿速率及脉宽的影响

为研究入射应力波的下降沿速率及脉宽对透射系数的影响, 图 13(a)展示了在固定应力峰值为 78 MPa 且保持入射波上升沿速率一致的条件下, 对 3 种不同下降沿速率下透射系数与试样长度之间关系的计算结果。在此设定下, 入射应力波形由常规的对称三角形波转变为不对称三角形波, 同时伴随着脉宽分别变为 100、150、200 μs 。共模拟 7 个试样长度, 21 种工况, 具体见表 3。

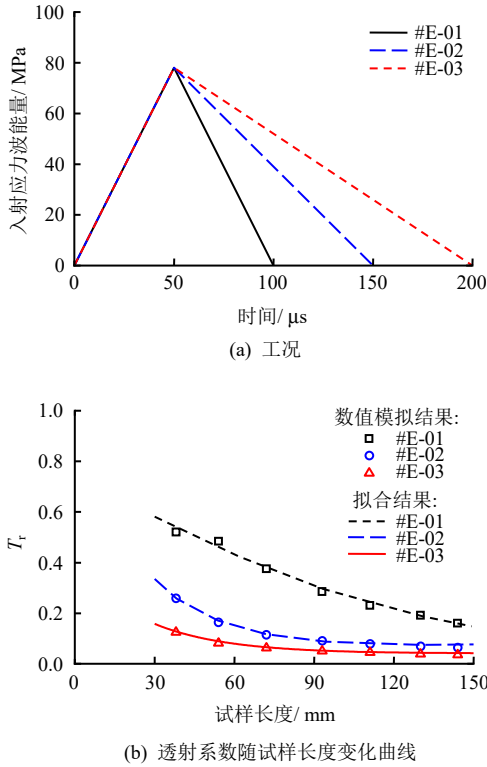


图 13 下降沿速率及脉宽的影响

Fig.13 Influences of falling edge rate and pulse width

图 13(b)呈现了该工况下透射系数随试样长度变化的曲线。可以发现，透射系数与入射波下降沿速率呈正相关关系。随着入射波下降沿速率降低，入射应力波由对称形态转变为不对称形态，此过程中透射系数显著下降，且曲线线性趋势亦发生明显变化。结合图 12(b)综合分析可推测：在入射应力波上升速率恒定条件下，透射系数变化趋势受应力峰值与脉宽共同影响。应力峰值和脉宽增加时，透射系数呈增大趋势；而当入射应力波下降沿速率减小且脉宽增加时，透射系数呈减小趋势。这清晰地表明，入射应力波下降沿速率相较于脉宽，对透射系数数值的影响更为显著，且二者对透射系数的影响呈相反态势。

5 基于梯度提升算法的透射系数预测

鉴于波形参数间难以解耦，无法得到某一变量对透射系数的影响。机器学习算法凭借其强大的非线性拟合与自适应学习能力，为解决多因素耦合问题提供了有效途径。例如，Yu 等^[37-38]运用多种机器学习方法，如反向传播神经网络（back propagation neural network, 简称 BPNN）、决策树（decision tree, 简称 DT）、随机森林（random forest, 简称 RF）、逻辑回归（logistic regression, 简称 LR）、岭回归（ridge regression, 简称 RR）、K 近邻算法（K-nearest

neighbors, 简称 KNN）、极端梯度提升（extreme gradient boosting, 简称 XGBoost）等，系统地揭示了多场耦合下氯离子在钢筋混凝土结构中的扩散规律及其对结构使用寿命的影响。作为集成学习方法，梯度提升算法通过叠加弱分类器提升预测精度，支持任意可微分损失函数与弱分类器，兼具灵活性与可释性。该算法以损失函数、弱分类器和加法模型为核心要素，通过迭代拟合残差、沿损失函数负梯度方向更新模型，逐步逼近最优解，在回归与分类任务中应用广泛^[39-41]。故本研究基于梯度提升算法对不同波形参数下钙质砂透射系数进行预测。首先输入前文计算与试验结果训练初始模型并计算梯度（残差），随后以梯度为目标训练新模型并与原模型加权组合，不断重复直至满足停止条件。其算法步骤主要分为以下 3 步：

(1) 通过最小化损失函数 $L(z_i, \gamma)$ 对所有的 N 个样本点求和来确定初始函数值。这里的 z 是一个变量，通过对 γ 的选择使得损失函数总和最小，从而确定初始函数 $f_0(x)$ ：

$$f_0(x) = \arg \min_{\gamma} \sum_{i=1}^N L(z_i, \gamma) \quad (8)$$

(2) 对于每个迭代步骤，从 $m=1 \sim M$ ，首先计算负梯度，具体如下：

$$\tilde{z}_i = -\frac{\partial L[z_i, f_{m-1}(x_i)]}{\partial f_{m-1}(x_i)}, i=1, 2 \dots N \quad (9)$$

其中，对于每个样本点 i ，计算损失函数 $L[z_i, f_{m-1}(x_i)]$ 对前一步得到的函数 $f_{m-1}(x_i)$ 的偏导数，并取负值得到 \tilde{z}_i 。这个值代表了当前模型在样本点 i 处的误差方向。通过最小化平方误差，用集成学习中的基础组件（基学习器） $h_m(x)$ 确定参数 ω 并拟合 \tilde{z}_i ，具体是对所有样本点的 $[\tilde{z}_i - h_m(x_i; \omega)]^2$ 求和，找到使得这个和最小的参数 ω_m ：

$$\omega_m = \arg \min_{\omega} \sum_{i=1}^N [\tilde{z}_i - h_m(x_i; \omega)]^2 \quad (10)$$

使用 Line search 确定步长 ρ_m ，通过最小化损失函数 L 来确定步长 ρ 的值，使得在当前迭代步骤中，损失函数在 $f_{m-1}(x_i)$ 的基础上加上步长与基学习器乘积后的结果最小：

$$\rho_m = \arg \min_{\rho} \sum_{i=1}^N L[z_i, f_{m-1}(x_i) + \rho h_m(x_i; \omega_m)] \quad (11)$$

将前一步的函数 $f_{m-1}(x_i)$ 加上步长 ρ_m 与基学习器 $h_m(x_i; \omega)$ 的乘积，得到新的函数 $f_m(x)$ ，用于

下一次迭代。

$$f_m(x) = f_{m-1}(x) + \rho_m h_m(x; \omega_m) \quad (12)$$

(3) 输出 $f_m(x)$ ，这个函数是经过多次迭代不断优化得到的结果，可以用于对未知数据进行预测等任务。

图 14 为透射系数预测结果。其中，图 14(a)为 97 组训练集、11 组测试集所得结果，与试验结果对比发现预测结果与试验结果较好吻合，准确率 Acc (accuracy) 达到了 96.2%。图 14(b)为 91 组训练集、17 组测试集所得结果，发现预测精度为 96.9%。由此可见，预测精度与样本数量并非正相关，且计算时间均小于 3 min，因此此处不再对计算效率进行讨论。两次预测的准确性均在 96% 以上，表明梯度提升算法能够较好的预测钙质砂的透射系数。

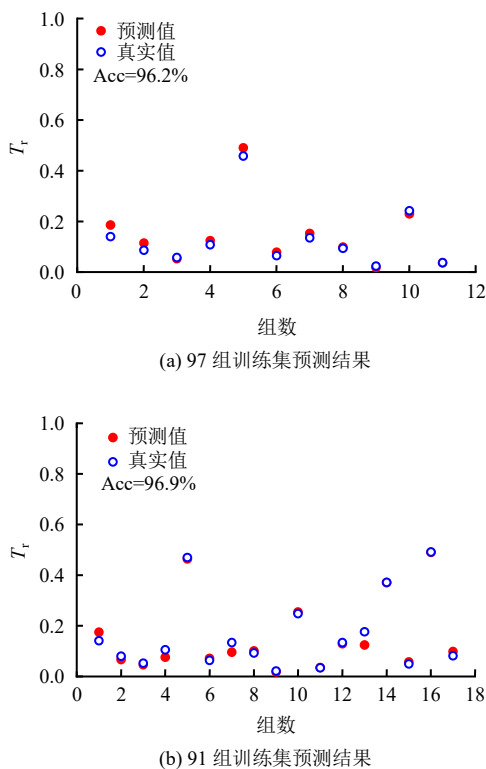


图 14 梯度提升算法所得透射系数预测值与真实值对比
Fig.14 Comparison of predicted values and true values obtained by gradient boosting algorithm

6 结论

本文基于 LS-DYNA 有限元程序，对钙质砂的透射系数进行模拟分析，研究了脉宽、平台段时程、上升沿速率、下降沿速率、应力峰值、应力波中心对称轴以及波形对透射系数的影响。针对参数无法解耦问题，采用梯度提升算法对钙质砂透射系数进

行了学习和预测。得出以下主要结论：

(1) 应力峰值在试样较短时对透射系数影响显著，随试样增长该影响差异渐趋消失；透射系数与平台段时程正相关，拟合曲线随试样长度增加趋于平缓；脉宽对透射系数影响近似线性，其增量随试样长度增长趋于稳定；当应力峰值与脉宽耦合作用时，在试样较短时脉宽为主导因素，随着试样长度增加应力峰值渐为主导因素；入射应力波形态改变或保持上升沿速率不变仅下降沿速率变化均会改变透射系数随试样长度的变化趋势。

(2) 针对多波形因素耦合作用下透射系数的变化，对透射系数随长度对数下降的半经验计算方法进行了修正，使透射系数的估算结果能够适用多波形因素耦合变化，拟合曲线调整后其相关系数 R^2 均在 0.979 以上，可以较好的表征其内在关系。

(3) 针对入射应力波波参数间难以解耦问题，提出了基于梯度提升算法的钙质砂透射系数预测方法。结果表明，当训练集为 91 个时，预测精度达到 96% 以上，说明该模型可以有效地从训练数据中学习波形参数与透射系数间的复杂关系，从而对透射系数进行准确的预测，为工程设计计算提供透射系数估算方法。

(4) 通过对波形参数与钙质砂透射系数关联性的系统研究，得以剖析在多种不同冲击条件（即不同的应力波波条件）下，何种透射系数可被遴选为设计参数。且波形参数的影响规律，可以应用于其他土体，使用时仅需对该土体开展一组 SHPB 冲击试验标定其参数，预测所得透射系数是防护工程结构荷载设计计算的重要依据。

参考文献

- [1] KOLSKY H. Stress waves in solids[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1964, 1(1): 88-110.
- [2] 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.
- [3] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(5): 1516-1521.
- [4] LI N N, ZHOU Y Q, LI H B. Experimental study for the effect of joint surface characteristics on stress wave propagation[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(3): 50-65.
- [5] 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.
- CHEN Xin, LI Jian-chun, REN Fen-hua, et al. Experimental study on the influence of JMC on stress wave transmission coefficient and joint specific stiffness[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(5): 957-963.
- [6] LI J C, LI N N, LI H B, et al. An SHPB test study on wave propagation across rock masses with different contact area ratios of joint[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2017, 105: 109-116.
- [7] LI J C, RONG L F, LI H B, et al. An SHPB test study on stress wave energy attenuation in jointed rock masses[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(2): 403-420.
- [8] 张雨霏, 李建春, 闫亚涛, 等. 基于 SHPB 试验的粗糙节理面动态损伤特征研究[J]. **岩土力学**, 2021, 42(2): 491-500.
- ZHANG Yu-fei, LI Jian-chun, YAN Ya-tao, et al. Study on dynamic damage characteristics of rough joint surface based on SHPB test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 491-500.
- [9] 任宪奔, 赵鹏铎, 李晓彬, 等. 改进型手性周期结构覆盖层的抗冲击性能研究[J]. **振动与冲击**, 2017, 36(15): 142-145.
- REN Xian-ben, ZHAO Peng-duo, LI Xiao-bin, et al. Study on the impact resistance of improved chiral periodic structure coating[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2017, 36(15): 142-145.
- [10] 郭东明, 闫鹏洋, 凡龙飞, 等. 喷层混凝土-围岩组合体波动特性及动力特性研究[J]. **振动与冲击**, 2018, 37(24): 85-91.
- GUO Dong-ming, YAN Peng-yang, FAN Long-fei, et al. Study on wave characteristics and dynamic characteristics of shotcrete-surrounding rock composite[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2018, 37(24): 85-91.
- [11] 刘鑫, 许宏发, 范鹏贤, 等. 围压下岩石填充裂隙对应力波衰减规律的试验研究[J]. **岩土力学**, 2021, 42(8): 2099-2108.
- LIU Xin, XU Hong-fa, FAN Peng-xian, et al. Experimental study on attenuation law of stress wave in rock-filled fissures under confining pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2099-2108.
- [12] 吴琳, 吕亚茹, 张申, 等. 砂土 SHPB 冲击试验与数值模拟研究进展及问题探讨[J]. **岩土力学**, 2024, (11): 1-20.
- WU Lin, LÜ Ya-ru, ZHANG Shen, et al. Research progress and discussion on SHPB impact test and numerical simulation of sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, (11): 1-20.
- [13] HUANG X L, QI S W, XIA K W, et al. Propagation of high amplitude stress waves through a filled artificial joint: An experimental study[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2016, 130: 1-7.
- [14] CUI P, SU T, LIU L, et al. Characteristics of compression wave propagation and energy absorption effects in dry sandy soil[J]. **Scientific Reports**, 2024, 14: 31625. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80525-9>
- [15] CHEN L, YUAN J Y, YU X, et al. Experimental and mesoscale analysis on wave propagation induced by impact in dry silica sand[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2023, 180: 104698-104712.
- [16] SINGH R, CHAKRABORTY T. Experimental and numerical investigation of badarpur sand subjected to air-blast loading[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2024, 185: 104845-104859.
- [17] LÜ Y R, HU J M, ZHANG D D, et al. Particle breakage of calcareous sand from low-high strain rates[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2024, 16(12): 5249-5263.
- [18] LÜ Y R, LI X, FAN C F, et al. Effects of internal pores on the mechanical properties of marine calcareous sand particles[J]. **Acta Geotechnica**, 2021, 16(10): 3209-3228.
- [19] LÜ Y R, WU L, SU Y C. SHPB experiments and FDM-DEM coupled simulations on calcareous sand under uniaxial to triaxial deformation[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2023, 181: 104751-104767.
- [20] 吕亚茹, 丁思超, 李欣, 等. 钙质砂循环剪切特性及抗剪强度弱化机制[J]. **岩石力学与工程学报**, 2024, 43(11): 2811-2822.
- LÜ Ya-ru, DING Si-chao, LI Xin, et al. Cyclic shear characteristics and shear strength weakening mechanism of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(11): 2811-2822.
- [21] 陈宾, 邓坚, 胡杰铭, 等. 钙质砂一维蠕变变形破碎特性宏微观试验研究[J]. **岩土力学**, 2022, 43(7): 1781-1790, 1853.
- CHEN Bin, DENG Jian, HU Jie-ming, et al. Macroscopic and microscopic experimental study on fractal fragmentation characteristics of calcareous sand during one-dimensional compression creep[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(7): 1781-1790, 1853.
- [22] 魏久淇, 吕亚茹, 刘国权, 等. 钙质砂一维冲击响应及吸能特性试验[J]. **岩土力学**, 2019, 40(1): 191-198.
- WEI Jiu-qi, LÜ Ya-ru, LIU Guo-quan, et al. Experimental study on one-dimensional impact response and energy absorption characteristics of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 191-198.
- [23] 魏久淇, 王明洋, 邱艳宇, 等. 钙质砂动态力学特性试验研究[J]. **振动与冲击**, 2018, 37(24): 7-12.

- WEI Jiu-qi, WANG Ming-yang, QIU Yan-yu, et al. Experimental research on dynamic mechanical properties of calcareous sand[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2018, 37(24): 7-12.
- [24] LÜ Y R, CHARLES W W Ng, WANG Y. Evaluation of wave dissipation in sand under impact loading[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2019, 145(9): 06019007.
- [25] 于潇, 陈力, 方秦. 珊瑚砂中应力波衰减规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1520-1529.
- YU Xiao, CHEN Li, FANG Qin. Experimental study on attenuation law of stress wave in coral sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(6): 1520-1529.
- [26] YU X, CHEN L, FANG Q, et al. Determination of attenuation effects of coral sand on the propagation of impact-induced stress wave[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2019, 125: 63-82.
- [27] 于潇, 陈力, 方秦. 一种量测松散介质对应力波衰减效应的实验方法及其在珊瑚砂中的应用[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 44-52.
- YU Xiao, CHEN Li, FANG Qin. An experimental method for measuring the attenuation effect of stress wave in loose medium and its application in coral sand[J]. **Engineering Mechanics**, 2019, 36(1): 44-52.
- [28] YU X, CHEN L, ZHOU B K, et al. Discussion of "Evaluation of wave dissipation in sand under impact loading" by LÜ Ya-ru, CHARLES W W Ng, WANG Yuan[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2021, 147(2): 07020028.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50123-2019 Standard for Geotechnical Testing Methods [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [30] XU P. Effect of projectile head style on high g acceleration waveform of Hopkinson bar calibration system[J]. **Journal of Measurement Science and Instrumentation**, 2015, 6(1): 1-6.
- [31] 果春焕, 周培俊, 陆子川, 等. 波形整形技术在Hopkinson杆实验中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(6): 880-887.
- CUO C H, ZHOU P J, LU Z C, et al. Application of pulse shaping technique in Hopkinson bar experiments[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2015, 35(6): 881-887.
- [32] ROKHY H, MOSTOFI T M, OZBAKKALOGLU T. Calibration of different constitutive material models for Vosges sandstone due to its application in rock-cutting processes[J]. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2022, 44(10): 468-486.
- [33] 董凯, 任辉启, 阮文俊, 等. 爆炸冲击下珊瑚砂动态本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(4): 88-99.
- DONG Kai, REN Hui-qi, RUAN Wen-jun, et al. Dynamic constitutive model of coral sand under explosion impact[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2021, 41(4): 88-99.
- [34] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual: volume II: material models: version 971R6.0. 0[Z]. [S. 1.]: Livermore Software Technology Corporation, 2012.
- [35] 王维国, 陈育民, 刘汉龙, 等. 基于 SPH-FEM 耦合法的土体爆炸效应数值研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2104-2110.
- WANG Wei-guo, CHEN Yu-min, LIU Han-long, et al. Numerical simulation of explosion in soil based on a coupled SPH-FEM algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 2104-2110.
- [36] 王维国, 陈育民, 杨贵, 等. 湿砂场地爆炸成坑效应的现场试验与数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 68-75.
- WANG Wei-guo, CHEN Yu-min, LIU Han-long, et al. Field test and numerical simulation of cratering effect of explosion in wet sand site[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(1): 68-75.
- [37] YU X R, HU T Y, KHODADADI N, et al. Predictive and experimental assessment of chloride ion permeation in concrete subjected to multi-factorial conditions using the XGBoost algorithm[J]. **Journal of Building Engineering**, 2024, 98: 111041-111061.
- [38] YU X R, LI J H, YU Y, et al. Advancing service life estimation of reinforced concrete considering the coupling effects of multiple factors: Hybridized physical testing and machine learning approach[J]. **Journal of Building Engineering**, 2024, 84: 108476-10850.
- [39] WU Z X, ZHU M F, KANG Y, et al. Do we need different machine learning algorithms for QSAR modeling? A comprehensive assessment of 16 machine learning algorithms on 14 QSAR data sets[J]. **Briefings in Bioinformatics**, 2020, 22(4): 1-17.
- [40] NATEKIN A, KNOLL A. Gradient boosting machines, a tutorial[J]. **Frontiers in Neuroinformatics**, 2013, (7): 21-42.
- [41] ZHU F, WU X P, LU Y J, et al. Strength estimation and feature interaction of carbon nanotubes-modified concrete using artificial intelligence-based boosting ensembles[J]. **Buildings**, 2024, 14(1): 134-155.