

分层岩土介质中的爆炸地冲击横向传播规律

孙善政¹, 王 炜¹, 刘 渊¹, 卢 浩², 赖 杰¹

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025;

2. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘 要: 基于连续介质应力波传播理论分析了分层岩土介质中爆炸地冲击波的反射机理, 结合数值模拟计算结果, 探究了爆点所在层中入射波、反射 P 波、反射 SV 波的叠加演化机制, 参数化分析了不同的岩土介质参数对叠加波峰值的影响规律及机理。结果表明: 推导得到的空气-岩土介质特殊工况下岩土介质中叠加波的计算方法与数值计算结果吻合较好; 爆点所在层中临近介质界面处叠加波峰值远大于入射波, 而距界面较远的位置, 由于反射波的传播路径距离远大于入射波, 叠加波的峰值与入射波相同, 但会出现明显的二次波峰; 在爆点所在层中临近介质界面处, 随着距爆点距离的增加, 叠加波峰值与入射波峰值的比值先增加而后趋于稳定, 稳定的峰值比与相邻介质的波阻抗相关, 峰值比的区间为 (1.60, 1.98)。

关键词: 岩土工程; 地冲击传播规律; 数值模拟; 分层岩土介质; 叠加演化

中图分类号: O382

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)06-012-11

Transverse Propagation Law of Explosion Ground Shock in Layered Geotechnical Medium

SUN Shanzheng¹, WANG Wei¹, LIU Yuan¹, LU Hao², LAI Jie¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi;

2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu)

ABSTRACT: First, the reflection mechanism of explosion ground shock wave in layered geotechnical mediums was analyzed based on the theory of continuous medium stress wave propagation. Then, the superposition evolution mechanism of incidence wave, reflected P wave and reflected SV wave in the layer where the explosion point is located was explored combined with the results of numerical simulation. Furthermore, the influence law and mechanism of different geotechnical medium parameters on the peak value of superposed wave were analyzed. Results showed that the derived calculation method of superposed wave in air-geotechnical medium under special working conditions is in good agreement with the numerical calculation result. The peak value of the superposed wave at the interface of the adjacent medium in the layer where the explosion point is located is much larger than the that of incident wave. Since the propagation dis-

收稿日期: 2024-06-04

基金项目: 火箭军工程大学青年基金 (2023QN-B024)

第一作者: 孙善政 (1997—), 男, 讲师, 博士, 主要从事地下防护工程毁伤效应分析及评估研究。E-mail: ss359057543@163.com

引用格式: 孙善政, 王炜, 刘渊, 等. 分层岩土介质中的爆炸地冲击横向传播规律[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (6): 12-22.

tance of the reflected wave is much larger than that of the incident wave, the peak value of the superposed wave is the same as that of the incident wave at a far distance from the interface, but there is an obvious secondary peak. At the interface of the adjacent medium in the layer where the explosion point is located, as the distance from the explosion point increases, the ratio of the peak value of the superposed wave to the peak value of the incident wave increases and then becomes stable. The stable peak ratio is related to the wave impedance of the adjacent mediums, and the range of the peak ratio is 1.60 to 1.98.

KEYWORDS: geotechnical engineering; ground shock propagation law; numerical simulation; layered geotechnical medium; superposition evolution

国防工程和关键基础设施的安全是国家总体安全的重要组成部分, 随着工程建设的快速发展, 国防工程和关键基础设施建设向着深地下发展, 且经常穿越多层岩土介质。这些地下工程往往面临着高精度武器打击或偶然爆炸威胁, 为了开展地下工程抗爆优化设计和毁伤评估工作, 必须理清爆炸地冲击在分层岩土介质中的传播规律。

岩土介质中的爆炸冲击波传播规律是岩土力学领域的一个经典问题, 近几十年来, 国内外众多学者开展了大量的理论分析、试验和数值模拟研究。对于单一岩土介质中的爆炸冲击波传播规律, 王明洋等^[1-3]对土中爆炸波的传播规律进行了系统研究, 推导了饱和土、非饱和土中平面弹塑性应力波、冲击波、球面弹塑性应力波、冲击波传播的简化模型解析解; 潘亚豪等^[4]运用模型试验和数值计算, 探究了钙质砂中爆炸冲击波的传播规律, 拟合了爆炸冲击波峰值随传播距离的衰减公式; Lang 等^[5]构建了岩石的黏弹塑性本构模型, 推导了应力波传播的解析解并开展了试验验证, 提出了应力波衰减系数的应变率效应; 杨潘磊等^[6]开展了岩石中柱状装药爆炸数值模拟计算, 结合现有理论分析了岩体中应力波的时空衰减规律和叠加规律。

多层介质爆炸冲击波传播过程中会在介质界面处发生反射、透射作用。目前, 国内外针对多层介质中一维应力波的传播规律开展了理论和试验研究, 认为波阻抗是影响波反射、透射的关键参数。Tian 等^[7]基于改进经典应力波传播理论中反射矩阵和介质阻抗矩阵, 提出广义反射矩阵, 将经典理论算法推广至复杂多层介质中应力波透射、反射数值计算中; 王礼立等^[8]基于应力波传播理论, 将介质界面视为加、卸载边界, 推导了弹塑性材料中非线性应力波传播规律; Li 等^[9]通过霍普金森压杆试验, 探究了岩石中软弱结构面

波阻抗和倾角对冲击波经过结构面透射系数的影响规律; 王爱文等^[10]基于 Snell 定律, 推导了应力波斜入射情况下三介质两结构面梯度围岩中的波场分解, 发现两介质波阻抗差异的增大会导致界面透射系数的减小。

可以发现, 目前单一岩土介质中冲击波的传播规律和参数计算较为成熟, 岩石结构面上的应力波斜反射、透射波场也有所研究, 但多层岩土介质中爆炸地冲击在相邻介质界面处反射、透射作用研究成果较少。基于此, 本文运用理论分析和数值模拟计算方法, 分析分层岩土介质中爆炸冲击波在介质交界面处的反射现象, 以及爆点所在层入射波与反射波的叠加演化机制和传播规律。

1 分层岩土介质中爆炸地冲击斜反射机理

图1为典型地下结构受爆炸作用的示意图。可以发现: 地下拱结构受顶爆作用时地冲击波的传播方向与分层介质交界面垂直, 拱结构大多在某一单一介质内, 仅需要考虑波在分层介质中传播时的正入射透射作用; 而竖井结构受侧爆作用则明显不同, 分层介质交界面与波的传播方向呈现一定角度, 波传播至分层界面时会发生斜反射、透射, 需要考虑爆点所在层入射波与反射波的叠加演化; 同时, 竖井结构穿越多层介质, 还需要考虑相邻地层透射波的传播规律。

因此, 厘清分层岩土介质中爆炸地冲击的横向传播特征, 特别是分层介质交界面处的斜入射波反射、透射机理, 就显得尤为重要。本文主要分析其中的斜反射机理和爆点所在层中叠加波的分布特征。

1.1 反射波的特征与性质

图2给出了应力波在不同介质分界面处斜入射的机理示意图, 当入射 P 波 (纵波) 以与交界面

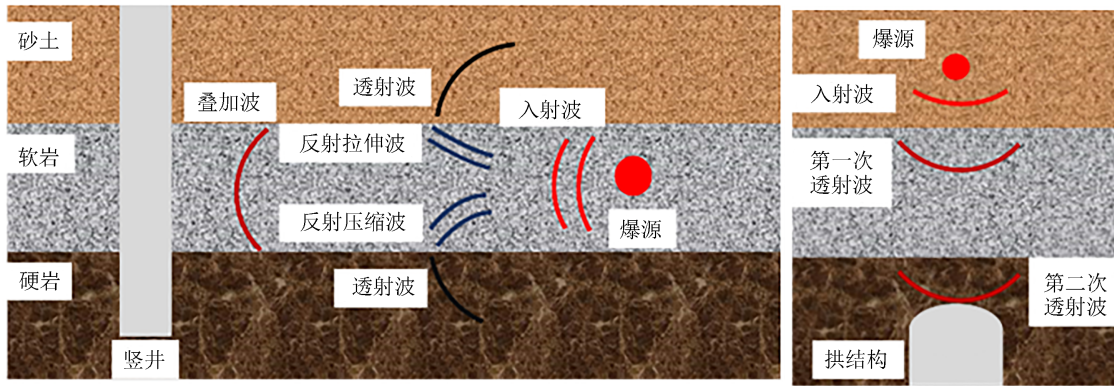


图 1 地下结构受爆炸作用

Fig. 1 Underground structure subjected to explosion

夹角 θ 斜入射时, 会产生与交界面夹角 θ 的反射 P 波, 以及夹角 φ 的反射 SV 波 (垂直偏振横波)。

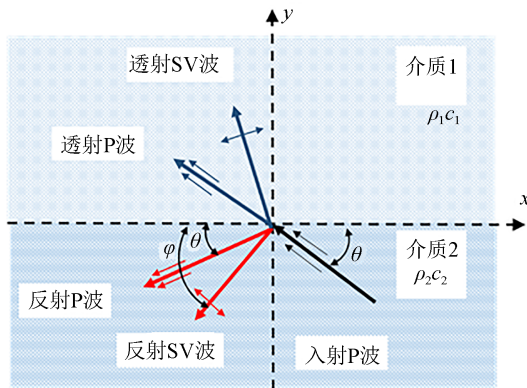
图 2 介质界面波的反射透射示意^[11]Fig. 2 Reflection and transmission of medium interface wave^[11]

图 2 中: ρ_1 、 ρ_2 分别为介质 1 和介质 2 的密度; c_1 、 c_2 分别为介质 1 和介质 2 的弹性纵波波速。

第 i 层介质内横波和纵波波速分别为

$$a_i = \sqrt{\frac{\lambda_i + 2\mu_i}{\rho_i}}$$

$$b_i = \sqrt{\mu_i / \rho_i}$$

式中: a_i 、 b_i 分别为第 i 层介质的纵波波速和横波波速; λ_i 、 μ_i 为第 i 层介质的 Lamé 常数; ρ_i 为第 i 层介质的密度。

认为介质界面之间只存在轻微震动, 则界面上的介质是连续的, 根据 Snell 定律^[11], x 轴上各波前振动速度相同, 则有

$$\frac{a_1}{\cos \theta_1} = \frac{b_1}{\cos \varphi_1} = c_x$$

式中: θ_1 、 φ_1 分别为入射 P 波和反射 SV 波与第 1、第 2 层介质交界面的夹角; c_x 为波在 x 方向上的速度分量。

忽略平面外的偏振波, 以空气-岩体特殊工况分析冲击波由硬介质向软介质传播时产生的反射 P 波和 SV 波的性质。图 3 给出了该特殊工况下波的反射情况。

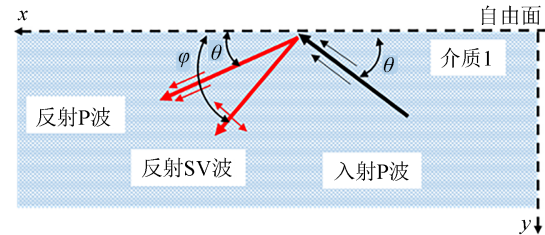


图 3 岩土介质自由面处波反射示意

Fig. 3 Wave reflection of geotechnical medium at free surface

此时, 可以将入射 P 波的位函数写为

$$u^p(t) = f\left(t - \frac{x \cos \theta - y \sin \theta}{a_1}\right) \quad (1)$$

由于除内反射外, 反射并不会改变波的振动特性^[11], 因此, 反射 P 波和 SV 波可以写为

$$\begin{cases} u_r^p(t) = Af\left(t - \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{a_1}\right) \\ u_r^{sv}(t) = Bf\left(t - \frac{x \cos \varphi + y \sin \varphi}{b_1}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为反射 P 波的系数; B 为反射 SV 波的系数; x 和 y 分别为横、纵坐标值。

在交界面 $y=0$ 处 (空气侧), 应力分量均为零, 即有边界条件

$$\tau_{yy} \Big|_{y=0} = 0$$

$$\tau_{yx} \Big|_{y=0} = 0$$

式中: τ_{yy} 和 τ_{yx} 分别为介质内正应力和剪应力。即

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} (u^p + u_r^p) + (1 - 2 \frac{b_1^2}{a_1^2}) \frac{\partial^2}{\partial x^2} (u^p + u_r^p) -$$

$$2 \frac{b_1^2}{a_1^2} \frac{\partial^2 u_r^{SV}}{\partial x \partial y} = 0$$

$$\frac{\partial^2 u_r^{SV}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 u_r^{SV}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (u^p + u_r^p) = 0 \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)可以得到两个反射系数A、B:

$$A = \frac{4\sqrt{\xi_1^2 - 1}\sqrt{\xi_2^2 - 1} - (\xi_1^2 - 2)^2}{4\sqrt{\xi_1^2 - 1}\sqrt{\xi_2^2 - 1} + (\xi_1^2 - 2)^2}$$

$$B = \frac{4\sqrt{\xi_2^2 - 1} - (\xi_1^2 - 2)}{4\sqrt{\xi_1^2 - 1}\sqrt{\xi_2^2 - 1} + (\xi_1^2 - 2)^2}$$

式中: $\xi_1 = 1/\cos\varphi$; $\xi_2 = 1/\cos\theta$ 。

图4给出了P波反射系数A和SV波反射系数B随入射角度的变化情况。

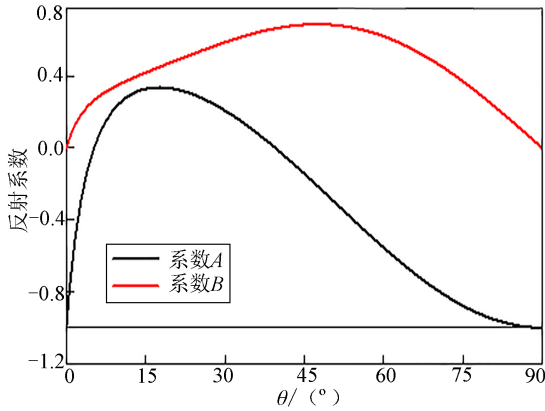


图4 反射波系数随入射角变化曲线

Fig. 4 Variation curves of reflected wave coefficients with incidence angles

由图4可以发现:当入射角 θ 为 90° ,即垂直入射时, $A=-1$, $B=0$,说明此时仅存在反射P波,且为拉伸波;当角度范围在 40° 至 5.1° 时,反射P波变为压缩波;当角度小于 5.1° 时,反射P波再次变为拉伸波,而反射SV波则一直为压缩波。对于从软介质中传播至硬介质时产生的反射波,目前研究则较为明确:反射P波和SV波均一直为压缩波。

1.2 爆点层中叠加波的计算

本文模拟分析中涉及的炸药、空气、钢筋混凝土爆点所在层任意位置的爆炸地冲击波应为入射波以及反射P波和SV波叠加,即

$$P(t) = P_i(t) + P_{r,1}^p(t) + P_{r,1}^{sv}(t) + P_{r,2}^p(t) + P_{r,2}^{sv}(t)$$

式中: P 为叠加波; $P_{r,1}^p$ 、 $P_{r,1}^{sv}$ 分别为爆点所在层与上侧砂土层之间的反射P波和SV波; $P_{r,2}^p$ 、 $P_{r,2}^{sv}$ 分别为爆点所在层与下侧硬岩层之间的反射P波和SV波。

如图5所示,为了简化分析,分析软岩层中接近上侧砂土层位置处的叠加波。 $P_{r,1,x}^{sv}$ 、 $P_{r,1,x}^p$ 分别为 $P_{r,1}^{sv}$ 、 $P_{r,1}^p$ 在 x 方向上的分量; L_1 为爆点到测点的直线距离; L_2 为爆点到纵波反射点的距离; L_3 为纵波反射点到测点的距离; L_4 为爆点到横波反射点的距离; L_5 为横波反射点到测点的距离。

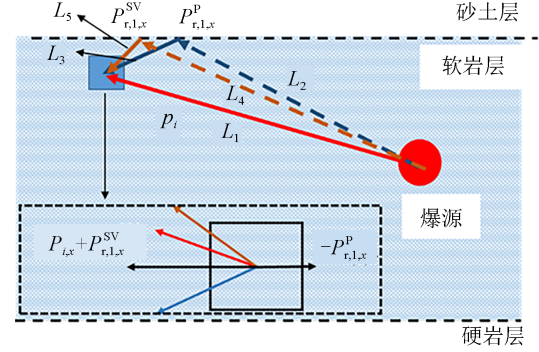


图5 爆点所在层某点叠加波

Fig. 5 Superimposed wave of a point in the layer where the explosion point is located

此时,由于爆点所在层与下侧硬岩层之间的反射P波和SV波距分析位置较远,经过衰减后对叠加波的影响较小,此时叠加波可写为

$$P(t) = P_i(t) + P_{r,1}^p(t) + P_{r,1}^{sv}(t) \quad (4)$$

$$P_i(t) = \begin{cases} P_{i,\max}(t - t_a)/t_r, & t_a \leq t \leq t_r + t_a \\ P_{i,\max} \exp\left(\frac{-\alpha(t - t_r - t_a)}{t_a}\right), & t_r + t_a < t \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{i,\max}$ 为入射波峰值; t_a 为地冲击波到达时间; t_r 为升压时间。 $P_{i,\max}$ 及 t_r 与介质参数相关,可按照TM5-855-1手册计算^[12]。 t_a 等于应力波传播距离比波速,即

$$t_a = L_1/a_r$$

式中: a_r 为软岩层纵波波速。

$P_{r,1}^{sv}(t)$ 和 $P_{r,1}^p(t)$ 时程曲线表达式与式(5)相似,只是反射P波和SV波的峰值分别为 $AP_{i,\max}$ 、 $BP_{i,\max}$,应力波达到时间分别为

$$t_{a,r}^p = (L_2 + L_3)/a_r$$

$$t_{a,r}^{sv} = L_4/a_r + L_3/b_r$$

式中: $t_{a,r}^p$ 为反射P波到达时间; $t_{a,r}^{sv}$ 为反射SV波到达时间; b_r 为软岩层横波波速。

2 有限元计算模型及验证

2.1 模型设置

如图6所示,开展分层介质和单一介质中爆炸

数值模拟计算,对比分析分层岩土介质中爆炸地冲击横向传播特征。其中:分层介质由上至下设置砂土层、软岩层和硬岩层,3层介质厚度均为1 m,宽度为2 m。球形TNT装药量为1 kg,置于软岩层中间位置,单一介质均为软岩介质,其他设置与分层介质模型相同。装药中心为坐标原点,平行于分层介质交界面为 x 轴。

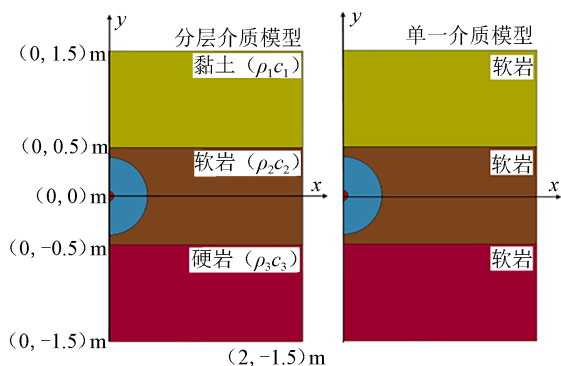
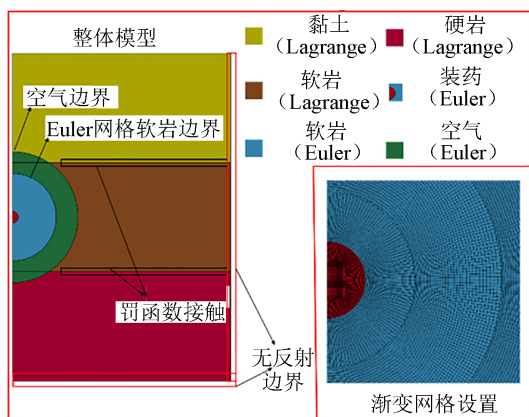


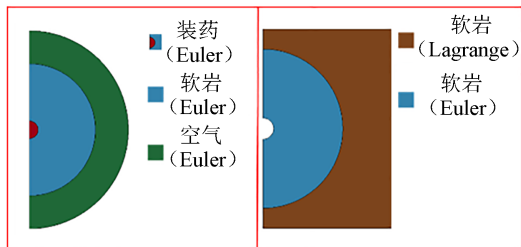
图6 有限元计算工况

Fig. 6 Finite element calculation conditions

有限元计算采用二维轴对称模型,如图7所示,共6个部分。



(a) 整体模型及网格渐变设置



(b) Euler网格及与Lagrange网格的连接

图7 有限元计算模型

Fig. 7 Finite element calculation model

为了更加真实地模拟分层介质中爆炸地冲击波的传播过程,数值模拟中采用以下设置。

1) 爆源及附近土体和空气采用 Euler 网格,

Euler 网格土体介质边界为比例爆距 $\bar{R} = 0.4 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, 空气介质边界 $\bar{R} = 0.6 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。该方法可以计算爆炸近区爆轰波,也可以合理模拟爆源附近土介质大变形。

2) Euler 网格外的软岩介质及黏土、硬岩介质采用 Lagrange 网格, Lagrange 网格软岩和 Euler 网格软岩边界对齐,与 Euler 网格空气重合,两者之间设置流固耦合算法。3层介质之间设置罚函数接触,该设置可以合理模拟介质之间的相互作用和界面运动。

3) 在模型外侧和硬岩介质底面设置无反射边界,使能量直接穿透,避免应力波在计算域边界反射。

4) 通过两次 1:3 的网格渐变,使模型由 3 mm 正方形网格组成,保证整体模型网格均匀,提高计算精度。

2.2 材料本构及参数

炸药为 TNT 装药,采用 MAT_HIGH_EXPLOSION-EBURN 模型及 EOS_JWL 状态方程。空气建模采用 MAT_NULL 模型及 EOS_GRU-NEISEN 状态方程。TNT 炸药和空气的参数取值较为成熟,根据以往数值计算与实验的对比验证,参数按照文献[13]取值,如表1、表2所示。

表1 TNT装药参数

Tab. 1 TNT charge parameters

参数	取值
材料密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.3
爆速 $D_{\text{cl}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	6 500
C-J 压力 $p_{\text{cl}} / \text{Pa}$	2.85×10^{10}
系数 OMGE	0.35
单位内能 E_0 / Pa	7×10^9

表2 空气材料模型参数

Tab. 2 Air material model parameters

参数	取值
材料密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.3
黏性参数 $/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	2×10^{-5}
初始内能 E_0 / Pa	2.5×10^5
初始相对体积 V_0	1

本文主要研究岩土介质中的地冲击波传播规律,可以采用 *MAT_MOHR-COULOMB 模型描述材料的动力学行为,黏土、软岩和硬岩的材料参数如表3至表5所示。该工况下,黏土-软岩波阻抗比为0.04,硬岩-软岩波阻抗比为1.18。

表 3 黏土材料模型参数

Tab. 3 Clay material model parameters

参数	取值
材料密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 600
剪切模量 G/Pa	2.5×10^7
泊松比 ν	0.2
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	20.06
黏聚力 c/Pa	1.42×10^5

表 4 软岩材料模型参数

Tab. 4 Soft rock material model parameters

参数	取值
材料密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500
剪切模量 G/Pa	9.5×10^9
泊松比 ν	0.2
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	54.45
黏聚力 c/Pa	3.09×10^6

表 5 硬岩材料模型参数

Tab. 5 Hard rock material model parameters

参数	取值
材料密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500
剪切模量 G/Pa	1.34×10^{10}
泊松比 ν	0.2
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	57.78
黏聚力 c/Pa	6.96×10^6

2.3 模型验证

为了验证有限元模型的有效性,开展了黏土和混凝土中封闭爆炸数值模拟计算,与现有文献给出的介质内爆炸冲击波峰值随比例爆距的衰减规律公式进行对比,如图8、图9所示。

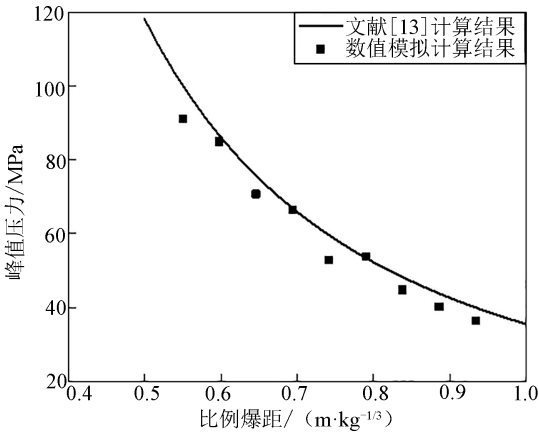


图 8 混凝土中爆炸冲击波峰值对比

Fig. 8 Comparison of peak values of explosion shock waves in concrete

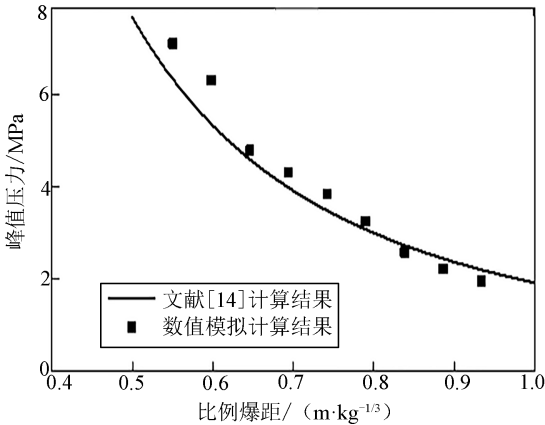


图 9 黏土中爆炸冲击波峰值对比

Fig. 9 Comparison of peak values of explosion shock waves in clay

由图8、图9可以看出,本文有限元计算的黏土、混凝土介质爆炸产生的冲击波峰值与现有文献给出的结果吻合程度较高,证明该模型对于软、硬介质内爆炸冲击波传播过程计算有效。

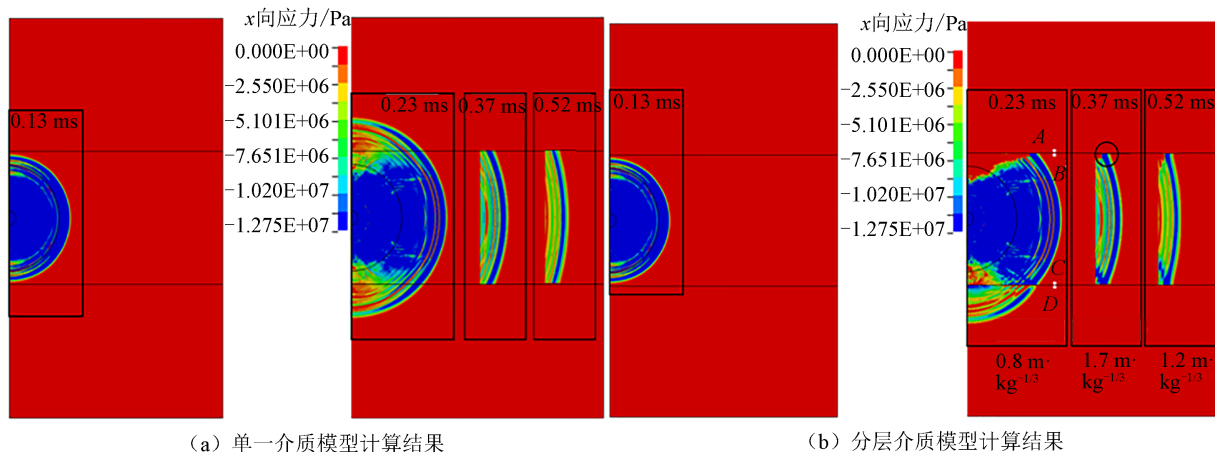
3 分层岩土介质中爆炸地冲击横向传播特征

3.1 地冲击横向传播现象

根据计算结果分析分层岩土介质中爆炸地冲击横向传播特征,图10给出了两个有限元计算不同时刻的压力云图。图中,单一介质模型计算结果即为入射波的 x 向分量分布,多层介质计算模型计算结果为叠加波的 x 向分量分布。

由图10(a)可以发现,单一介质模型计算结果波阵面呈较为均匀的圆弧面,在0.37 ms、0.52 ms时波阵面仍较为均匀。但由图10(b)可以发现,在0.13 ms时,地冲击波仅在软岩介质中传播,波阵面为较为均匀的圆弧面;在0.23 ms时,地冲击波传播至上下层介质,由软岩层介质传播至黏土层中属于由硬介质传播至软介质,经过界面透射波峰值大幅衰减,加之土体的阻尼较大,点A处(土体中)波峰值为点B处(软岩中)的1%。由软岩层介质传播至硬岩层中属于由软介质传播至硬介质,波的透射程度高,点D处(硬岩中)波峰值为点C处(软岩中)的10%,其中A至D点的 x 轴坐标为0.5 m。

由图10(b)可以发现,在0.37 ms和0.52 ms时,软岩层中地冲击波分别传播至比例爆距 $1.2\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 和 $1.7\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 位置处,此时软岩层中波阵面



(a) 单一介质模型计算结果

(b) 分层介质模型计算结果

图 10 两种模型计算的不同时刻压力云图

Fig. 10 Pressure nephograms calculated by two different methods at different times

不再呈现均匀的圆弧面。在图中黑色圆圈标记的位置，即软岩层中接近上下层介质位置处，出现了小范围直线段。由前文分析可知，这是由于介质交界面处复杂的反射引起的。后续将对这种现象进行详细的定量分析和机理解释。

3.2 爆点所在层叠加波时程规律分析

为了分析入射波与反射 P 波、SV 波的叠加演化规律，图 11 给出了 $x = 1.2$ m 处不同 y 坐标位置的叠加波 x 分量时程曲线。

分析图 11 可以发现，不同测点位置的叠加波时程曲线体现出了不同的特征。如图 11 (a)、(e)，由于测点靠近介质交界面，入射波与反射波的传播路程（图 5 中的 L_1 、 $L_2 + L_3$ 、 $L_4 + L_5$ ）基本相同，叠加波仅出现 1 个峰值，即为 3 种波的峰值叠加。而随着测点距交界面的距离变远，入射波传播路径距离小于反射波的传播路径距离，图 11 (b)、(c)、(d) 中反射波波峰在叠加波时程曲线中表现为二次峰值，且测点距交界面距离越远，二次峰值出现的时间越晚。此外，在测点接近上侧黏土层时，如图 11 (a) 在 0.5 ms 处，多层介质中的叠加波明显小于单一介质中的入射波，这是由于叠加波中的反射 P 波为拉伸波。

3.3 爆点所在层地冲击峰值分布规律

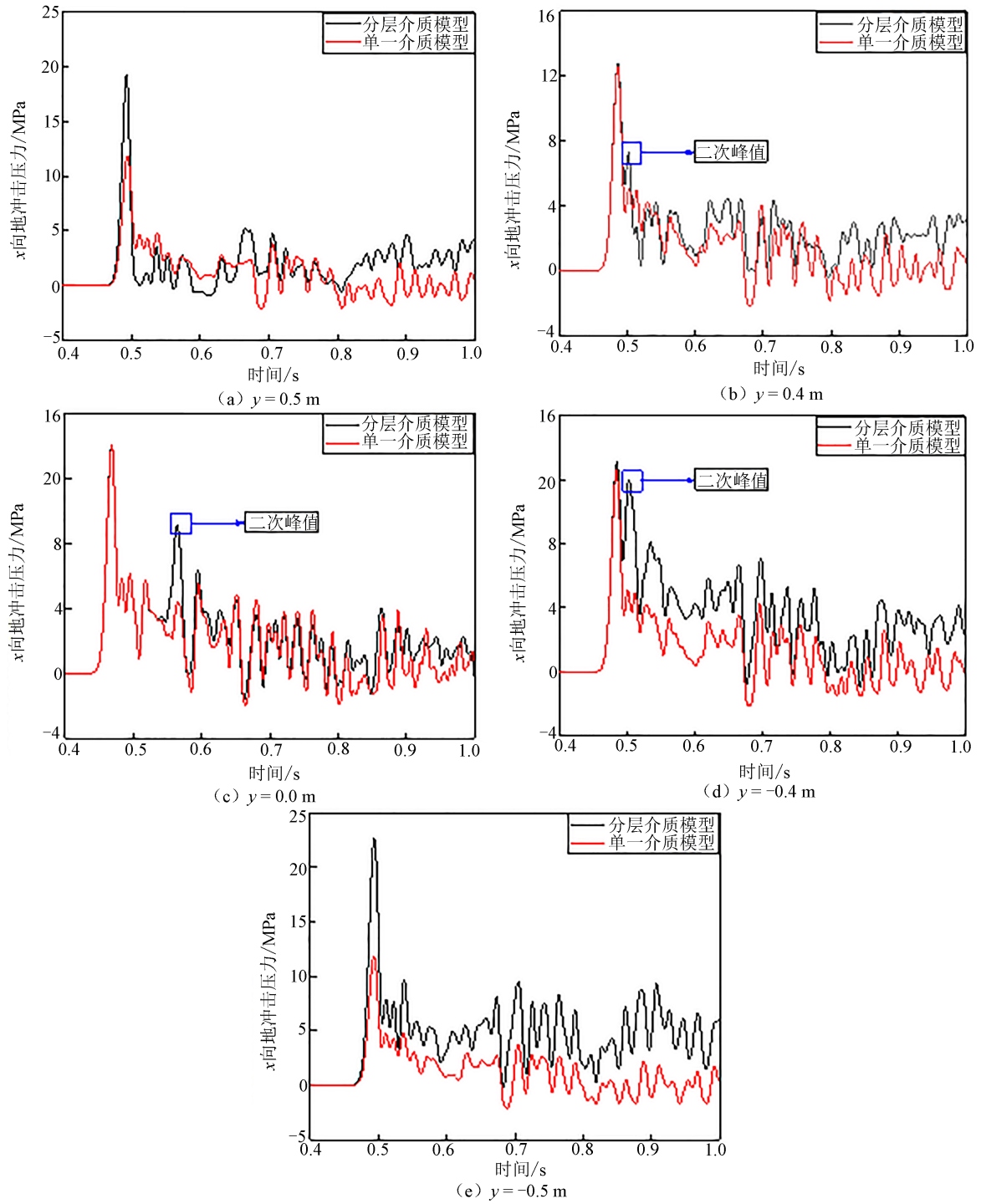
为了更加直观地分析分层介质中爆炸地冲击横向传播规律，对不同 x 坐标（爆距）处爆点所在层不同 y 坐标（深度）处爆炸地冲击 x 向分量峰值进行了分析，图 12 给出了 x 坐标为 0.2 m 和 1.6 m 处冲击波峰值的分布情况。

由图 12 (a) 可以发现，当 $x = 0.2$ m（入射角为 68.2° ）时，单一介质模型与分层介质模型在

y 坐标 -0.5 m 至 0.5 m 范围（爆点所在层）内冲击波峰值分布几乎一致，仅在分界面附近处存在不同但差异不大。这是由于当入射角度 θ 较大时，反射 P 波和 SV 波的 x 分量较小，对叠加波的影响也较小，叠加波与入射波几乎相同。在 y 坐标 0.48 m 至 0.5 m 范围内，即临近爆点所在层与上侧黏土层界面附近处，分层介质中应力波 x 分量峰值小于单一介质模型计算结果，这是由于此时反射 P 波为拉伸波，使得叠加波压应力小于入射波。在 y 坐标 -0.47 m 至 -0.5 m 范围内，即临近下侧硬岩层界面附近处，分层介质中应力波 x 分量峰值大于单一介质模型计算结果。这是由于此时反射 P 波及 SV 波均为压缩波，使得叠加波压应力大于入射波。

由图 12 (b) 可以发现，当 $x = 1.6$ m（入射角为 17.3° ）时，单一介质模型与分层介质模型计算结果的差异更为明显，存在差异的范围也更大，但在 y 坐标 -0.3 m 至 0.37 m 范围内两者计算结果仍相同。这是由于入射角较小时反射 P 波和 SV 波的 x 分量对叠加波的影响增大，但距离介质分层界面较远处，入射波的峰值出现时间与反射波的峰值出现时间差异较大，反射波虽然会影响叠加波的时程规律，但不会改变压力峰值。另外，在爆点所在层与上下两侧介质交界面附近，叠加波的 x 分量峰值均远大于入射波。这是由于此时两侧反射 P 波和 SV 波均为压缩波，使得叠加波的压缩波大于入射波。

综上所述，爆点所在层叠加波 x 向分量峰值与入射波的差异主要体现在介质交界面处，且在不同 x 坐标位置处，由于入射角不同，使得反射 P 波的性质以及反射 P 波和 SV 波的 x 分量大小不同，

图 11 叠加波 x 分量时程曲线Fig. 11 Superposed wave x -direction component time history curves

因此,使叠加波的 x 分量峰值与入射波的差异也不同。为了分析不同 x 坐标处叠加波 x 分量峰值的规律,图 13 给出了软岩-黏土交界面和软岩-硬岩交界面处叠加波 x 分量峰值与入射比 x 分量峰值比随 x 坐标的变化规律。

图 13 表现出的趋势也证明了前述分析:在软岩-黏土交界面处,属于硬介质向软介质传播情

况,在入射角度较小时,由于反射拉伸 P 波的存在,峰值比小于 1,即叠加波小于入射波;而在软岩-硬岩交界面处,属于软介质向硬介质传播,反射 P 波与 SV 波均为压缩波,峰值比均大于 1;随着入射角度的增大,两个界面处的峰值比均增大,软岩-硬岩交界面处峰值比大于软岩-黏土交界面,二者最终分别稳定在 1.90 和 1.72 左右。

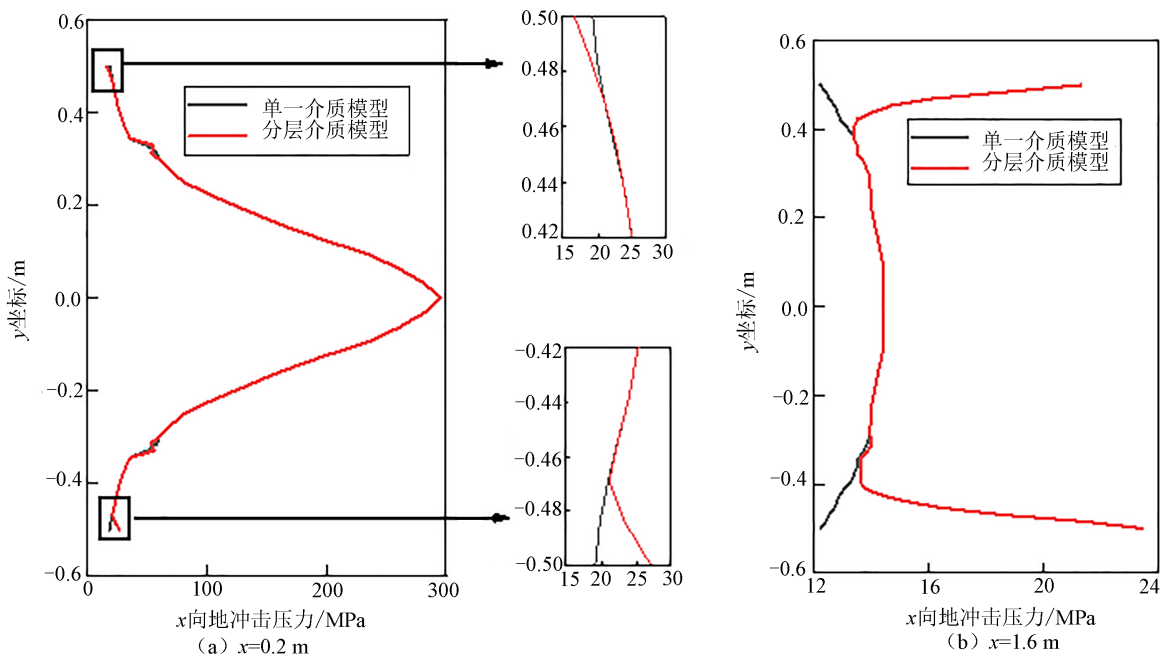


图 12 爆炸地冲击x向分量峰值分布

Fig. 12 Peak value distributions of x-direction component of explosion ground shock

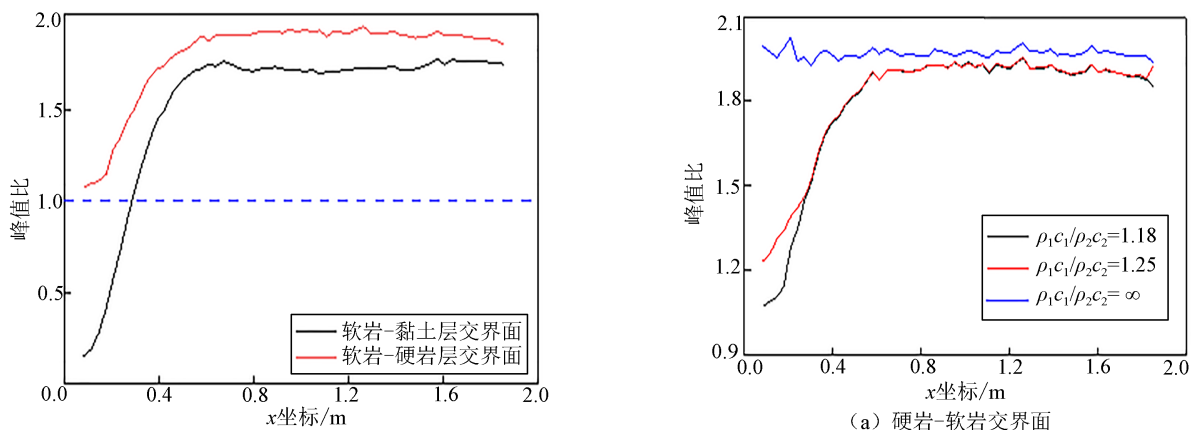


图 13 峰值比随x坐标的变化规律

Fig. 13 Variations of the peak ratio with x-coordinate

4 岩土介质参数对叠加波峰值的影响

前文分析了分层岩土介质中爆点所在层爆炸地冲击波的叠加演化机制以及分布规律和机理。由现有研究可知,介质波阻抗 ρc 是影响介质中应力波传播的重要参数,介质间的波阻抗比也是影响界面波反射透射的重要参数。因此,需要进一步讨论介质间波阻抗比对爆点所在层叠加波峰值的影响。

通过改变数值模拟计算模型中岩土介质的密度 ρ 和剪切模量 G 来改变不同介质之间的波阻抗,图 14 给出了不同波阻抗情况下硬岩-软岩界面和

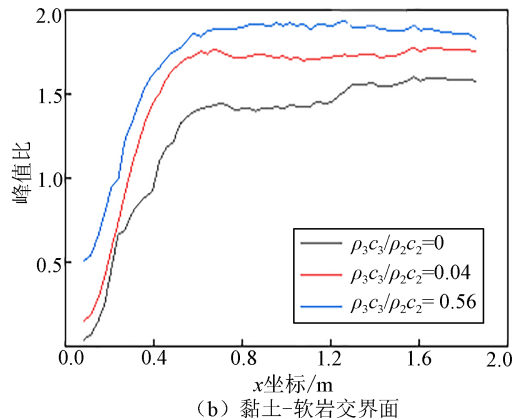


图 14 不同波阻抗比下的峰值比

Fig. 14 Peak ratios under different wave impedance ratios

黏土-软岩界面处叠加波x分量峰值与入射比x分量峰值的比值。图中: $\rho_1 c_1$ 、 $\rho_2 c_2$ 、 $\rho_3 c_3$ 分别为

硬岩层、软岩层和黏土层的波阻抗比; $\rho_3 c_3 / \rho_2 c_2$ 为零代表软岩层上侧为空气自由面; $\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2$ 为无穷大代表软岩层下侧为刚性壁面。

分析图 14 可以发现, 大部分情况下均出现峰值比随 x 坐标增加 (入射角度的减小) 而增加且趋近于稳定的现象, 其机理已经在前文进行了讨论。但波阻抗比无穷大的工况下, 峰值比随 x 坐标几乎无变化, 稳定在 1.98 左右, 这是由于刚壁面处产生完全反射, 反射系数较大接近于 2, 且不会产生界面相对横向位移, 使得即使在入射角较大时峰值比也较大。波阻抗比为零时出现了峰值比先略微减小而后增大的情况, 这是由于当软岩层上侧为自由面时, 一定范围内 (图示工况为 x 坐标在 0.7 m 至 1.2 m 范围内) 软岩层临空面处会出现较为明显的介质位移, 使得地冲击波压力减小。

由图 14 (a) 可以发现, 在硬岩-软岩交界面处, 峰值比均大于 1, 并且随着波阻抗比的增大, 峰值比也会略微增加, 波阻抗比由 1.18 增加至无穷大时, 稳定的峰值比由 1.90 增加至 1.98。由图 14 (b) 可以发现, 峰值比随着波阻抗比的增大而增大, 波阻抗比由 0 增大至 0.56 时, 稳定的峰值比由 1.60 增加至 1.89。

为了验证前文理论分析中给出的叠加波幅值计算方法, 图 15 给出了空气-软岩-硬岩工况下式 (4) 计算结果与数值模拟计算结果的对比。

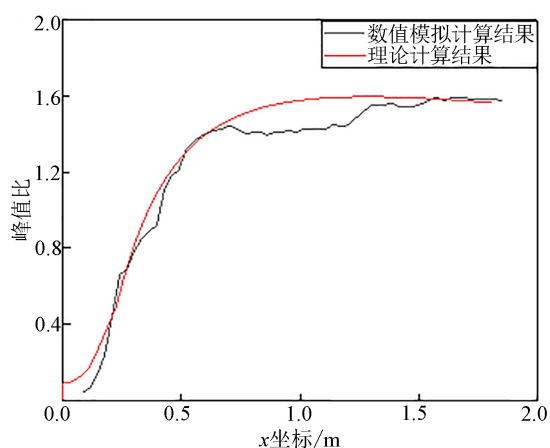


图 15 理论计算与数值模拟的对比

Fig. 15 Comparison between theoretical calculation results and numerical simulation results

可以发现, 理论计算与数值模拟计算结果吻合程度较好, 但在 x 坐标 0.7 m 至 1.2 m 范围内出现较大差异, 这是由于理论计算中未考虑介质位移而导致的。

5 结论

本文综合使用理论分析和数值模拟计算的方法, 分析了分层岩土介质中爆炸地冲击横向传播规律和机理, 阐明了爆点所在层中入射波、反射 P 波、反射 SV 波的叠加演化机制, 参数化分析了不同的岩土介质参数对叠加波峰值的影响规律及机理, 并初步给出了特殊工况下叠加波时程计算方法。主要得出以下结论。

1) 推导了空气层岩土介质特殊工况下岩土介质中叠加波的计算方法。该方法计算结果与数值模拟计算结果吻合程度较好, 可以作为后续研究的理论基础。

2) 爆点所在层中叠加波的峰值和波形与测点位置相关。在临近介质交界面处, 入射波与反射波到达时间相近, 叠加波峰值远大于入射波; 在距交界面较远的位置, 反射波的传播路径距离较大, 到达时间晚于入射波, 叠加波的峰值与入射波相同, 但会出现明显的二次波峰。

3) 在爆点所在层临近介质交界面处, 随着距爆点的距离增加, 叠加波峰值与入射波峰值的比值先增加而后趋于稳定, 稳定的峰值比与相邻介质的波阻抗比相关, 峰值比区间为 1.60 至 1.98。

本文得到的结论可以为岩土介质中竖井结构这一类受横向爆炸地冲击作用结构的荷载计算、抗爆优化设计和毁伤评估等工作提供理论支撑, 但介质之间滑移对交界面地冲击反射作用影响机制和复杂地层中叠加波的定量描述问题仍需要进一步研究。

参考文献

- [1] 王明洋, 钱七虎. 颗粒介质的弹塑性动态本构关系研究[J]. 固体力学学报, 1995(2): 175-180.
WANG M Y, QIAN Q H. A study on the elastoplastic dynamic constitutive law of granular medium[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 1995 (2): 175-180.
- [2] 王明洋, 钱七虎. 爆炸波作用下准饱和土的动力模型研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 103-110.
WANG M Y, QIAN Q H. Study on dynamic model for quasi-saturated soil under explosive wave [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 103-110.
- [3] 赵跃堂, 钱七虎, 王明洋. 爆炸波作用下三相饱和土

- 本构研究[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(1): 28-34.
- ZHAO Y T, QIAN Q H, WANG M Y. Study on constitutive relation for three-phase saturated soil under explosion wave[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(1): 28-34.
- [4] 潘亚豪, 宗周红, 钱海敏, 等. 钙质砂介质中爆炸波传播规律的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(5): 86-98.
- PAN Y H, ZONG Z H, QIAN H M, et al. Experimental study on blast propagation in calcareous sand[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(5): 86-98.
- [5] LANG L, SONG K I, ZHAI Y, et al. Stress wave propagation in viscoelastic-plastic rock-like materials[J]. Materials, 2016, 9(5): 377.
- [6] 杨潘磊, 唐雷虎. 柱状药包爆破应力波时空衰减规律[J]. 现代矿业, 2020, 36(3): 31-35.
- YANG P L, TANG L H. Stress wave attenuation law of cylindrical charge blasting based on space-time attenuation[J]. Modern Mining, 2020, 36(3): 31-35.
- [7] TIAN J Y. Generalized reverberation matrix formulation for wave propagation in multilayered medium[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2010, 23(3): 189-199.
- [8] 王礼立, 任辉启, 虞吉林, 等. 非线性应力波传播理论的发展及应用[J]. 固体力学学报, 2013, 34(3): 217-240.
- WANG L L, REN H Q, YU J L, et al. Development and application of the theory of nonlinear stress wave propagation[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 34(3): 217-240.
- [9] 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.
- [10] 王爱文, 孙郑齐, 潘一山, 等. 梯度围岩结构应力波透射模型与传播衰减规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1969-1984.
- WANG A W, SUN Z Q, PAN Y S, et al. Transmission model and propagation attenuation law of stress wave in gradient surrounding rock structure[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1969-1984.
- [11] САВАРЕНСКИЙ Е Ф, Сейсмическая волна[M]. Москва: Сейсмический Издательство, 1997: 297-308.
- [12] Headquarters, Department of the Army. Fundamentals of protective design for conventional weapons: TM5-855-1[S/OL]. 1986[2024-07-15]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1019/ML101970069>.
- [13] 孙善政, 卢浩. 侧向爆炸作用下土中钢-混凝土竖井结构破坏模式研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(14): 64-75.
- SUN S Z, LU H. Failure mode of a steel-concrete shaft structure in soil under the action of lateral explosion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(14): 64-75.
- [14] 高矗, 孔祥振, 方秦, 等. 混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(12): 66-78.
- GAO C, KONG X Z, FANG Q, et al. Numerical study on attenuation of stress wave in concrete subjected to explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(12): 68-80.