DOI: 10.11883/bzycj-2023-0440

冲击波在水土交界面透射和反射压力的计算*

严富怀[1], 岳松林[1], 邱艳宇[1], 王明洋[1], 何　勇[2]
（1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 江苏 南京 210007;
2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094）

摘要： 冲击波在水土交界面的透射、反射压力计算尚缺乏可靠的计算理论, 利用质量守恒方程、动量守恒方程以及水、土的状态方程, 分别推导得到冲击波在水、土介质中传播的 Hugoniot 关系以及 *p*-*u* 曲线, 进而从理论上解析得到冲击波在水土交界面处的透射和反射压力。分别建立了水中自由场、水-土分层介质场的二维数值计算模型, 其中水、土参数与理论推导时采用的三相介质饱和土计算模型中的参数保持一致。计算结果表明, 水土交界面透射、反射压力的理论解与数值解具有高度的一致性。采用 80 g TNT 炸药, 距离水土交界面 0.1～0.9 m(比例爆距为 0.232～2.089 m/kg$^{1/3}$)爆炸时, 得到的透射、反射压力的理论解与数值解误差均小于 7%, 根据解析解得出反射压力与水中入射压力之比, 反射压力系数在 1.6～1.8 范围内; 距离水土交界面 0.5 m 时, 饱和土的含气量在 0～10% 范围内变化, 得到的透射、反射压力的范围为 63.8～70.0 MPa, 此时其反射压力系数在 1.55～1.70 范围内。推导得出的冲击波在水土交界面透射、反射压力的计算方法, 物理意义明确、计算精度高, 可为开展水下爆炸对水底土中工程结构的毁伤评估提供理论基础。

关键词： 水土交界面; 冲击波传播; 理论计算; 透射压力; 反射压力
中图分类号： O382.1　　**国标学科代码：** 1303520　　**文献标志码：** A

Calculation of shock wave transmission and reflection pressures at water-soil interface

YAN Fuhuai[1], YUE Songlin[1], QIU Yanyu[1], WANG Mingyang[1], HE Yong[2]
（1. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact*, *Army Engineering University of PLA*, *Nanjing* 210007, *Jiangsu*, *China*;
2. *School of Mechanical Engineering*, *Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *Jiangsu*, *China*）

Abstract: There is a lack of reliable calculation theory for the transmission and reflection pressures of shock waves at the water-soil interface. Using the mass conservation equation, momentum conservation equation, and the equations of state of water and soil, the Hugoniot relationship and *p*-*u* curve of the propagation of shock waves in water and soil medium are derived, and then the transmission and reflection pressures of the shock wave at the water-soil interface can be analyzed theoretically. Two-dimensional numerical models of the free field in water and water-soil layered medium field are established, in which the water and soil parameters are consistent with those in the three-phase medium saturated soil model used in the theoretical derivation. The calculation results show that the theoretical and numerical solutions of the water-soil interface transmission and reflection pressures are highly consistent. When using 80 g TNT explosives and exploding at 0.1–0.9 m from

* **收稿日期：** 2023-12-24；**修回日期：** 2024-03-19
基金项目： 爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室基金（LGD-SKL-202201）
第一作者： 严富怀（2000—　），男，博士研究生，13101890239@163.com
通信作者： 岳松林（1987—　），男，博士，副教授，硕士生导师，yuesonglin163@163.com

the water-soil interface (proportional burst distance of 0.232–2.089 m/kg$^{1/3}$), the error of the theoretical and numerical solutions for transmission and reflection pressures is less than 7%, and the coefficient of the reflection pressure is in the range of 1.6–1.8 according to the analytical solution of the reflection pressure and the ratio of the incident pressure in the water. When exploding at 0.5 m from the water-soil interface and the gas content of the saturated soil varies in the range of 0–10%, the transmission and reflection pressures are 63.8–70.0 MPa, and the reflection pressure coefficients are in the range of 1.55–1.70 at this time. The calculation method for the shock wave transmission and reflection pressure at the water-soil interface has a clear physical meaning and high precision and can provide a theoretical basis for the soil damage assessment of engineering structures in submerged soil caused by underwater explosions.

Keywords: water-soil interface; shock wave propagation; theoretical calculation; transmission pressure; reflection pressure

水中爆炸时，冲击波在水土交界面处会产生反射和透射现象，其透射、反射系数的大小与冲击波强度以及水和土介质的参数有关。研究冲击波在水土介质中的传播规律，是开展埋藏于水土交界面以下结构爆炸毁伤评估和抗爆设计的基础。

关于爆炸波在土、水等单一介质中的传播已有大量研究成果。在饱和土中的爆炸荷载计算方面，钱七虎等[1-2]通过饱和土中气、液、固单相介质的压力-密度关系推导得到了三相介质的压力-密度方程，进而分析了爆炸波在饱和土中的传播规律，发现空气含量对饱和土中爆炸波的衰减存在很大影响。穆朝民等[3-6]通过试验研究了高饱和度饱和砂中爆炸波的传播规律，发现爆炸冲击波在饱和土中传播时会出现流体动力区并形成冲击波，建立了饱和土双线性递增硬化本构关系，确定了由冲击波向弹性波转换的分界压力。在水中爆炸荷载计算方面，Cole[7]通过质量和冲量守恒关系以及 Tait 等熵状态方程，给出了水下爆炸冲击波入射压力计算方法。王爱兴[8]通过有限元模拟对水下爆炸冲击波传播进行了研究，探究了爆炸冲击波在水下爆炸近区的传播规律以及影响其传播的因素。

关于介质界面对冲击波传播的影响，已有不少学者开展了一定的研究。Kedrinskii[9]结合两相介质模型研究了水-空气交界面规则反射区域内空化带的发展对稀疏波参数的影响。赵凯[10]运用弹性波理论研究了分层防护层对爆炸波的衰减和弥散，并通过试验验证了分层防护层对爆炸波的影响，但该理论是基于弹性波范围，对塑性波并不适用。张涛等[11]以弹性应力波在界面处的传播分析为基础，结合冲击波基本关系式，对冲击波在不同介质界面的传播过程进行了理论推导，但此方法是基于一维弹性波假设，与实际情况下的冲击波传播之间存在误差。Wang 等[12]研究了不同表面边界下激波的传播特性，发现当激波冲击自由表面时会在周围形成空化效应。

针对水土交界面对反射压力的影响，学者们也开展了一定的试验和理论研究。顾文彬等[13-17]通过试验和数值模拟方法研究了浅层水中爆炸水底的影响以及多个装药情况下水中冲击波的相互作用，探究了不同水底对水中爆炸压力的影响，发现水底介质对水底反射冲击波峰值压力存在较大影响。杨莉等[18]研究了沉底装药时水下爆炸冲击波的传播规律，发现冲击波在水底具有强反射现象，叠加后的冲击波峰值压力高于入射面峰值压力。Wardlaw 等[19]研究了弹性、刚性等边界条件下冲击波反射的荷载现象，发现刚性边界会导致冲击波荷载增大。严泽臣等[20]通过理论计算研究了刚性壁面水下爆炸冲击波的反射压力，揭示了水下爆炸冲击波反射压力系数范围为 2.00～4.49，但实际中并不存在刚性壁面。目前，对交界面反射压力的研究，一方面是通过弹性波假设来推导计算，另一方面是假设为刚性壁面，这与实际情况不符，因此，亟需一种适用于非刚性面的冲击波传播的理论计算模型。

为了解决冲击波在水土交界面透射、反射压力计算的难题，本文中，通过质量守恒方程、动量守恒方程以及水、土介质的状态方程，推导适用的理论计算模型。利用 LS-DYNA 软件分别建立水中自由场、水-土分层介质场的二维数值模型，水、土参数与理论推导时采用的三相介质饱和土计算模型中的参数保持一致，以期为研究水土交界面冲击波的传播以及后续荷载的计算提供参考。

1　冲击波在水土交界面透射和反射压力的理论推导

图 1 给出了冲击波在水中的入射以及在水土交界面的透射和反射示意图，其中 p、ρ、D、u 分别为介质的压力、密度、冲击波速度和质点速度，下标 0、i、r、t 分别表示无扰动状态、入射冲击波阵面、反射冲击波阵面和透射冲击波阵面。

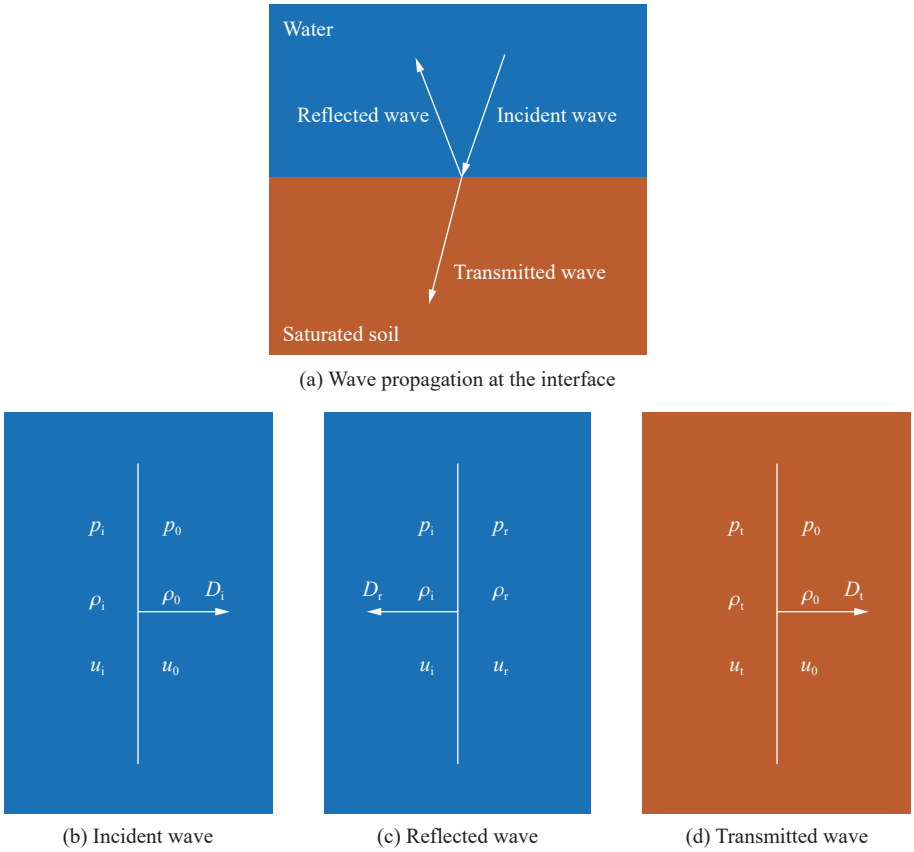


图 1　爆炸波在水土交界面的透射和反射示意图

Fig. 1　Schematic diagrams of ransmission and reflection of blast wave at the water-soil interface

对于介质的状态方程，介质的压力和质点速度可以采用速度-压力（u-p）方程表示：

$$u=\frac{c_0}{2S}\left(\sqrt{1+\frac{4Sp}{\rho_0 c_0^2}}-1\right) \tag{1}$$

式中：c_0 为压力为零时介质中的声速，S 为经验参数。根据文献 [21] 中水的参数，可得水的 u-p 方程：

$$u=\frac{c_0}{3.84}\left(\sqrt{1+\frac{7.68p}{\rho_0 c_0^2}}-1\right) \tag{2}$$

为了得到土的 u-p 方程，对于图 1 中的透射波，建立质量守恒方程：

$$\rho_0(D_t-u_0)=\rho_t(D_t-u_t) \tag{3}$$

由于初始状态下 u_0=0，式 (3) 可以简化为：

$$\rho_0 D_t=\rho_t(D_t-u_t) \tag{4}$$

透射波的动量守恒方程为：

$$p_t - p_0 = \rho_0 D_t u_t \tag{5}$$

假设土的 D-u 形式状态方程为：

$$D_t = c_0 + S u_t \tag{6}$$

将式 (6) 代入式 (4), 得到：

$$\rho_0 (c_0 + S u_t) = \rho_t (c_0 + S u_t - u_t) \tag{7}$$

化简得到：

$$u_t = \frac{(\rho_t - \rho_0) c_0}{\rho_0 S - \rho_t S + \rho_t} \tag{8}$$

将式 (8) 代入动量守恒方程式 (5), 可得：

$$p_t - p_0 = \rho_0 \left[c_0 + S \frac{(\rho_t - \rho_0) c_0}{\rho_0 S - \rho_t S + \rho_t} \right] \frac{(\rho_t - \rho_0) c_0}{\rho_0 S - \rho_t S + \rho_t} \tag{9}$$

简化为 S 的一元二次方程：

$$(p_t - p_0)(\rho_t - \rho_0)^2 S^2 - 2\rho_t (p_t - p_0)(\rho_t - \rho_0) S + \rho_t^2 (p_t - p_0) - \rho_t \rho_0 (\rho_t - \rho_0) c_0^2 = 0 \tag{10}$$

求解式 (10), 舍弃无效解, 得到有效解为：

$$S = \frac{\rho_t}{\rho_t - \rho_0} + c_0 \sqrt{\frac{\rho_t \rho_0}{(p_t - p_0)(\rho_t - \rho_0)}} \tag{11}$$

钱七虎等[1-2] 提出的饱和土中的状态方程：

$$\rho_t = \rho_0 \left\{ \alpha_1 \left(\frac{p_t}{p_0} \right)^{-\frac{1}{k_1}} + \alpha_2 \left[\frac{k_2 (p_t - p_0)}{\rho_2 c_2^2} + 1 \right]^{-\frac{1}{k_2}} + \alpha_3 \left[\frac{k_3 (p_t - p_0)}{\rho_3 c_3^2} + 1 \right]^{-\frac{1}{k_3}} \right\}^{-1} \tag{12}$$

式中：k_1、k_2 和 k_3 为相应组分的熵指数，α_1、α_2 和 α_3 为气体、液体和固体的组分含量，ρ_1、ρ_2 和 ρ_3 为组分密度，ρ_0 和 p_0 分别为土的初始密度和压力，c_2 和 c_3 分别为液体和固体中的声速。

将式 (11) 代入式 (1), 可得土的 u-p 方程：

$$u = \frac{c_0}{2\left[\frac{\rho_t}{\rho_t - \rho_0} + c_0 \sqrt{\frac{\rho_t \rho_0}{(p_t - p_0)(\rho_t - \rho_0)}} \right]} \left\{ \sqrt{1 + \frac{4p}{\rho_0 c_0^2} \left[\frac{\rho_t}{\rho_t - \rho_0} + c_0 \sqrt{\frac{\rho_t \rho_0}{(p_t - p_0)(\rho_t - \rho_0)}} \right]} - 1 \right\} \tag{13}$$

式中：ρ_t 根据式 (12) 得出。为将式 (13) 与式 (2) 绘图得到水和土的 u-p 曲线，向式 (2)、式 (12) 和式 (13) 中代入表 1 中的参数，其中水的参数根据表 2 得到，土的参数参考钱七虎等[1-2] 提出的参数。表中：c_1、c_2 和 c_3 分别为饱和土中压力为零时气体、液体和固体中的声速，S_0 为 u_s-u_p 曲线斜率的系数，c 为冲击波速度 u_s 和质点速度 u_p 的截距，γ_0 为 Grüneisen 系数，α 为对 γ_0 的一阶体积修正，S_1、S_2、S_3 为 u_s-u_p 曲线斜率的系数，E_0 为单位体积内能。

表 1　土的状态方程参数

Table 1　Equation of state parameters of the soil

c_1/(m·s^{-1})	c_2/(m·s^{-1})	c_3/(m·s^{-1})	ρ_0/(kg·m^{-3})	ρ_1/(kg·m^{-3})	ρ_2/(kg·m^{-3})	ρ_3/(kg·m^{-3})
340	1 500	4 500	2 210	1.2	1 000	2 650
α_1	α_2	α_3	k_1	k_2	k_3	S_0
0.001	0.3	0.699	1.4	3.0	3.0	1.92

表 2　水的参数

Table 2　Parameters of water

ρ/(kg·m^{-3})	c/(m·s^{-1})	γ_0	α	S_1	S_2	S_3	E_0/Pa
1 025	1 520	0.28	0	1.92	0	0	0

绘制的土和水的 *u*-*p* 曲线如图 2 所示(压力取值范围为 0～10 GPa)。

冲击波传播至水土交界面处，已知水土交界面处水介质中的入射压，如图 3 中标识入射压处，则做一条关于入射压处质点速度的对称线，即为水的反射 *u*-*p* 曲线，其与土的 *u*-*p* 曲线交点处的压力，即为反射压，如图 3 所示。对于交界面处的透射压，交界面处粒子的速度已知，根据土的 *u*-*p* 状态方程曲线，得到的压力即为透射压。由图 3 可以解析出水土交界面的透射、反射压力，为进一步了解此计算方法的精确度，结合数值模拟进行深入研究。

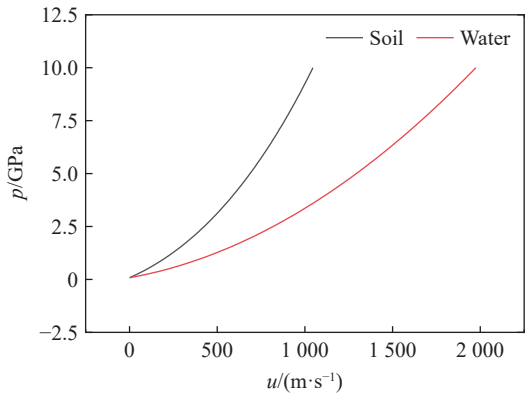


图 2　土和水的 *u*-*p* 曲线

Fig. 2　*u*-*p* curves for soil and water

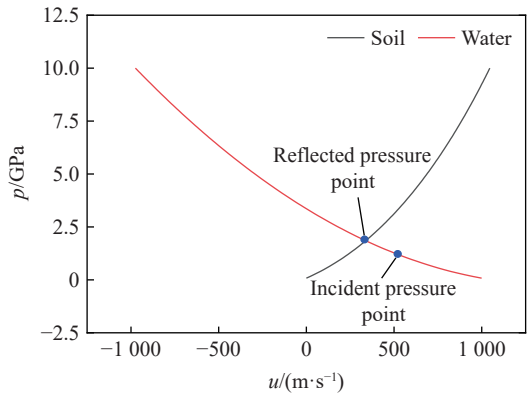


图 3　水土交界面的反射压力

Fig. 3　Reflected pressure at the water-soil interface

2　数值模型

2.1　数值求解器

显式非线性有限元程序 LS-DYNA 在动力分析方面具有有效性。在 LS-DYNA 中，常用的求解器有拉格朗日、欧拉和任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)求解器。拉格朗日求解器适用于描述固体材料。在有限元模拟中，结构网格随着物理材料发生移动和变形。然而，拉格朗日方法的主要缺点是不能处理大变形问题。在欧拉法中，数值网格在空间上是固定的，物质在网格中流动，由于网格是固定的，当发生大的变形或流动时，不存在网格畸变问题，因此，欧拉法通常适用于描述流体和气体的行为。然而，对于不同的材料，欧拉法跟踪计算的成本较高。ALE 方法结合了拉格朗日和欧拉求解器的最佳特征，结构的网格随物理材料移动和变形。本文中，炸药、水和饱和土采用多材料 ALE 求解。采用 LS-DYNA 多材料组合(ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP)将炸药、水和饱和土的材料指定为多材料。

2.2　材料模型

2.2.1　水材料模型

水材料选用 9 号材料模型 MAT_NULL 以及 4 号状态方程 EOS_GRÜNEISEN，该状态方程适用于高压条件，因此，可用于模拟爆炸过程中水被高度压缩的过程。其中流体单元在受压状态下的应力为：

$$p=\frac{\rho_0 c^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{\alpha}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2}+(\gamma_0+\alpha\mu)E_0 \tag{14}$$

式中：ρ_0 为初始密度，$\mu=\rho/\rho_0-1$。本文中，水的材料参数和状态方程参数均参考文献 [21]，设置如表 2 所示。

2.2.2　TNT 材料模型

在 LS-DYNA 中选取的炸药为 TNT，选用 8 号材料模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN，该模型可用于模拟烈性炸药的爆炸过程。选用 2 号材料状态方程 EOS_JWL，其中压力表示为：

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 V}\right)\mathrm{e}^{-R_1 V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 V}\right)\mathrm{e}^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V'} \tag{15}$$

式中：A、B 为计算系数，R_1、R_2、ω 为描述炸药特性的无量纲常数，V 为相对体积。TNT 的材料及状态方程参数参考文献 [21]，如表 3 所示，表中：p_{CJ} 为 C-J 爆轰压力。

表 3　炸药参数

Table 3　Parameters of the explosive

ρ/(kg·m^{-3})	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1 583	19.4	307	3.898	4.485	0.79	0.3	6.968 4

2.2.3　饱和土材料模型

土是由固体颗粒、水、空气组成的三相介质，完全饱和土可以简化为固体颗粒和孔隙水组成的两相介质。由于土的力学特性非常复杂，尤其在高速率爆炸荷载下，更难预测其行为，因此，选择合适的饱和土模型对模拟的准确性至关重要。在 LS-DYNA 中，选择 5 号材料模型 MAT_SOIL_AND_FOAM 模拟饱和土，该模型需要输入土体的密度、弹性模量、剪切模量、屈服函数系数以及材料的应力-体积应变曲线[22]，当体积破碎选项为 0 时，材料的加卸载过程遵循黑色箭头，当体积破碎选项为 1 时，材料的加卸载遵循红色箭头，即输入曲线，如图 4 所示。

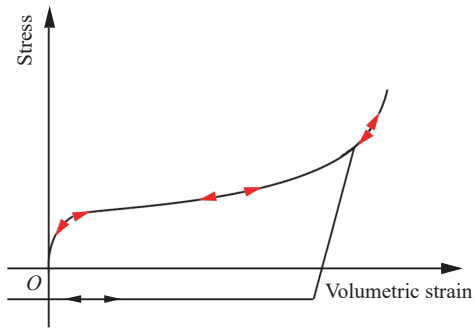


图 4　应力-体积应变曲线[22]

Fig. 4　Stress-volumetric strain curve[22]

MAT_SOIL_AND_FOAM 模型的主要参数可以根据式 (12) 得出，其中弹性模量 $E=\rho c^2=7.392\ 98$ GPa，体积模量 K 的取值根据式 (12) 绘出的应力-体积应变曲线得出，如图 5 所示。图 5 中拟合的方程为 Tait 方程，该物态方程适用于许多固体材料，其压力与体积应变的关系[23] 表示为：

$$p = p_0 + \frac{K\left[(1-\varepsilon_v)^{-n}-1\right]}{n} \tag{16}$$

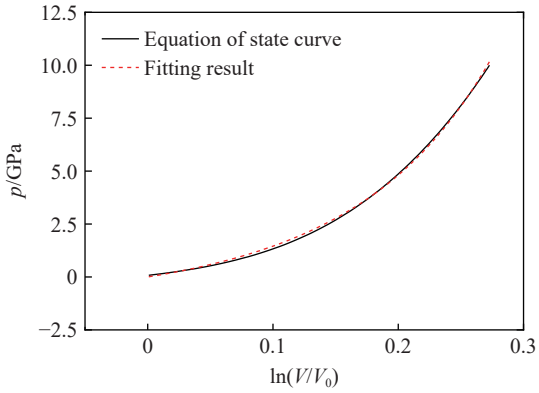


图 5　饱和土的应力-体积应变曲线

Fig. 5　Stress-volume strain curves of saturated soil

式中：n 为材料常数，ε_v 为体应变，p_0 为标准大气压，K 为体积模量。拟合得到的物态方程为：

$$p = 1.01\times10^5 + \frac{9.658\ 83\times10^9[(1-\varepsilon_v)^{-6.436\ 92}-1]}{6.436\ 92} \tag{17}$$

式中：p 的单位为 Pa。由式 (18) 可以求得体积模量 K=9.658 83 GPa。根据剪切模量 G 与弹性模量 E 和体积模量 K 的关系式：

$$G=\frac{3KE}{9K-E} \tag{18}$$

可以求得剪切模量为 2.693 GPa。

MAT_SOIL_AND_FOAM 模型允许自定义体积应力-应变曲线，可以在其中输入 10 个应力-应变点来确定一条体积应力-应变曲线。利用表 4 中的参数 p_1～p_{10} 及 ε_1～ε_{10} 来定义该曲线，这 10 个点的值根据式 (12) 得到。表中：a_0、a_1、a_2 为屈服函数系数，ρ 为饱和土的密度，G 为土的剪切模量，p_c 为拉伸断裂的压力截止值，p_1～p_{10} 为 10 个应力点的应力，ε_1～ε_{10} 为 10 个应力点对应的体积应变。

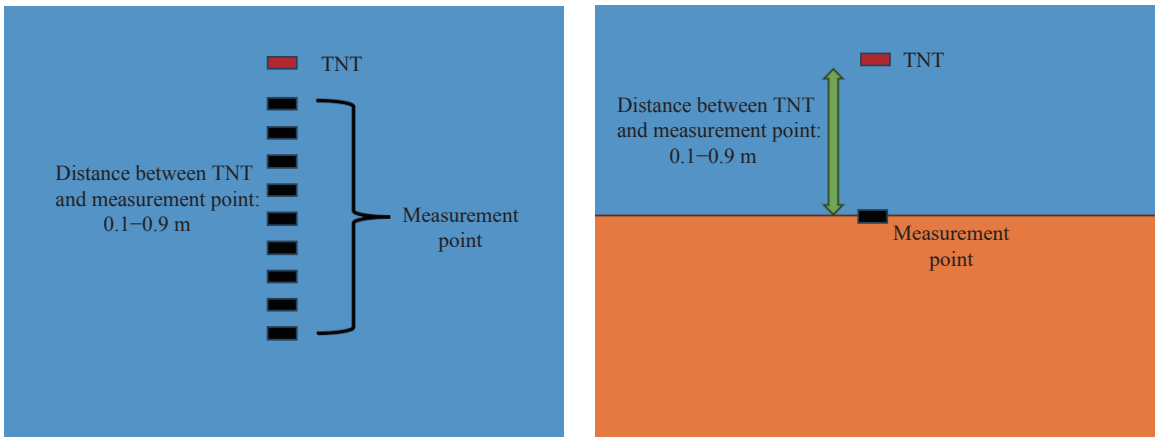
表 4　饱和土参数

Table 4　Saturated soil parameters

ρ/(kg·m^{-3})	G/MPa	K/MPa	a_0/MPa^2	a_1/MPa	a_2	p_c/MPa	ε_1	ε_2
2 210	2 693	9 659	3.339×10^{-7}	0.225 1	3.794	-6.9×10^{-3}	0	–0.001 868
ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	ε_9	ε_{10}	p_1/MPa
–0.003 276	–0.004 649	–0.005 887	–0.008 206	–0.009 398	–0.010 043	–0.012 787	–0.014 439	0
p_2/MPa	p_3/MPa	p_4/MPa	p_5/MPa	p_6/MPa	p_7/MPa	p_8/MPa	p_9/MPa	p_{10}/MPa
7.2	16.8	26.4	35.2	52	60.8	65.6	86.4	99.2

2.2.4　模型建立

如图 6 所示，对纯水工况和水土交界面工况分别建立模型。有限元分析中采用的参数依据表 2～4 所述，模型尺寸为 2 m×2 m，每个单元均为 0. 25 cm×0. 25 cm 的正方形。模型边界设置为无反射边界。采用 80 g、长径比为 1∶1 的柱形 TNT 炸药，距离水土交界面 0.1～0.9 m。



(a) Pure water　　(b) Water and soil

图 6　纯水和水土交界面模型及测点布置

Fig. 6　Pure water and water-soil interface models and measurement point layout

为验证模型水中自由场爆炸波传播的正确性，采用 Zamyshlyaev 等[24] 给出的水下爆炸冲击波峰值压力计算公式：

$$p_{\mathrm{m}}=\begin{cases}44.1\left(\dfrac{W^{1/3}}{R}\right)^{1.5} & 6\leqslant\dfrac{R}{r_0}<12\\[2ex] 52.4\left(\dfrac{W^{1/3}}{R}\right)^{1.13} & 12\leqslant\dfrac{R}{r_0}<240\end{cases} \tag{19}$$

式中：p_{m} 为自由场冲击波峰压，MPa；W 为装药量，kg；R 为测点到药包中心距离，m；r_0 为炸药的半径，m。

为选择合适网格，对二维水中自由场爆炸进行网格收敛性分析，选择炸药当量为 80 g TNT，得到 0.5 m 爆距处的冲击波峰值压力的网格敏感性分析如图 7 所示。可以看出，冲击波压力在网格尺寸逐渐减小时收敛，模拟中网格尺寸为 0.20、0.15、0.10 cm 时计算时长分别是网格尺寸为 0.25 cm 时的 1.51、3.50、10.00 倍，且当网格尺寸为 0.25 cm 时，峰值压力接近收敛值。综合考虑运算精度及计算成本，采用 0.25 cm 网格进行模拟。

采用 80 g TNT 炸药在纯水模型中计算得到不同距离处的压力-时间曲线如图 8 所示。根据式 (19) 和模拟得出冲击波峰值压力，可以计算出炸药当量为 80 g 时两者的偏差，如表 5 所示。从表 5 可以看出，计算结果与模拟结果的相对偏差均在 15% 以内，因此，采用二维纯水模型计算水介质中的入射压是可行的。

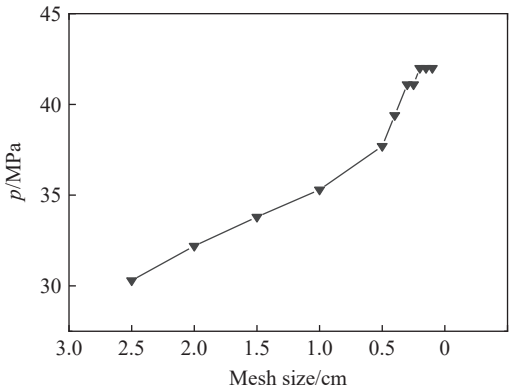


图 7　网格敏感性分析

Fig. 7　Grid sensitivity analysis

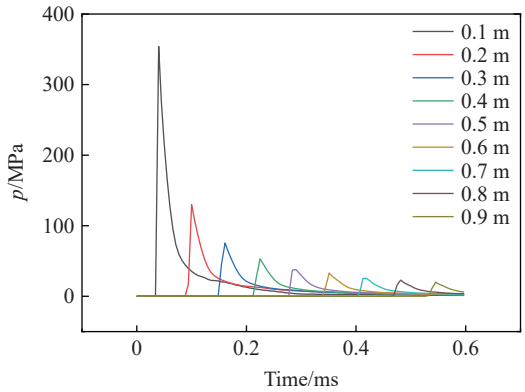


图 8　水中自由场应力-时间曲线

Fig. 8　Free-field stress-time curves in water

根据第 1 节中的理论方法，计算得到 80 g TNT 当量下距爆源 0.5 m 处水土交界面处的反射压，如图 9 所示。

表 5　80 g TNT 对应不同爆距下的水中自由场峰值压力及偏差

Table 5　Free-field peak pressures and their deviations in water at different burst distances for 80 g TNT

爆距/m	计算结果/MPa	模拟结果/MPa	偏差/%
0.1	394.44	354.01	−10.3
0.2	124.74	132.66	6.3
0.3	78.73	78.90	0.2
0.4	56.88	54.44	−4.3
0.5	44.20	41.24	−6.7
0.6	35.97	32.98	−8.3
0.7	30.22	27.27	−9.8
0.8	25.99	23.05	−11.3
0.9	22.75	19.88	−12.6

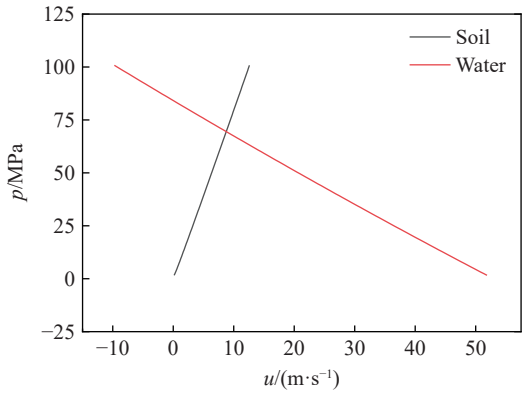
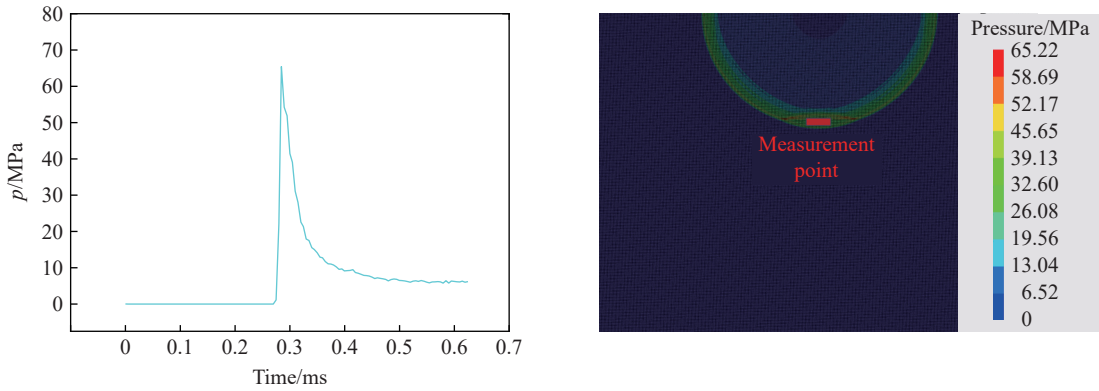


图 9　水土交界面的反射压力

Fig. 9　Reflected pressure at the water-soil interface

由图 9 可得，水土交界面反射压的解析解为 68.80 MPa。数值模拟计算得到水土交界面的反射压为 68.62 MPa，水土交界面的压力时程曲线及压力云图如图 10 所示。

以解析解计算结果为基准，数值模拟结果与解析解计算结果相比误差小于 1%，由此可知，两者在计算冲击波在水土交界面上的透射、反射压力具有高度一致性。



(a) Soil-water interface pressure-time curves　　(b) Pressure nephogram

图 10　水土交界面压力时程曲线及压力云图

Fig. 10　Soil-water interface pressure-time curves and pressure nephogram

3　初始条件对水土交界面透射和反射压力的影响

3.1　不同爆距下理论与模拟的透射和反射压力

为了更准确地研究模型的准确度，将 80 g TNT 当量下爆距分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 m 时的入射压力、理论反射压力、模拟反射压力进行比较，结果如表 6 所示。

表 6　不同爆距下的理论和模拟反射压力、偏差及反射系数

Table 6　Theoretical and simulated reflection pressures, deviations, and reflection coefficients at different blast distances

爆距/m	比例爆距/(m·kg$^{-1/3}$)	入射压力/MPa	反射压力			反射系数
			理论值/MPa	模拟值/MPa	相对偏差/%	
0.1	0.232	354.01	632.8	589.90	–6.8	1.788
0.2	0.464	132.66	228.8	229.50	0.3	1.730
0.3	0.696	78.90	133.6	133.60	0	1.693
0.4	0.928	54.44	91.6	91.21	–0.4	1.683
0.5	1.160	41.24	68.8	68.82	0.2	1.668
0.6	1.392	32.98	54.4	53.49	–1.7	1.649
0.7	1.625	27.27	45.1	43.79	–3.0	1.654
0.8	1.857	23.05	37.6	36.75	–2.3	1.631
0.9	2.089	19.88	32.4	31.42	–3.1	1.630

由表 6 可以看出，在不同爆距下，反射压力的理论计算结果与模拟结果的相对偏差均小于 7%，说明本文中提出的理论模型和数值模型用于计算冲击波在水土交界面上的透射、反射压力时具有计算精度高、一致性好等优点，可为后续的水下爆炸对水底土中结构的毁伤评估提供理论基础。

3.2　不同含气量下理论与模拟的透射和反射压力

饱和土中气体体积分数是影响爆炸波传播的重要因素，且在气体高饱和度时影响更加显著[1]。为了研究饱和土中气体体积分数对水土交界面透射、反射压力的影响，选取 TNT 当量为 80 g，距离水土交界面爆距为 0.5 m 的工况进行理论分析，此时的入射压为 41.24 MPa，气体体积分数在 0～10% 之间，得到的气体体积分数对水土交界面透射、反射压力的影响如图 11 所示。从图 11 可以看出，饱和土中的气体体积分数在 0～10% 范围内时，该工况下水土交界面的透射、反射压力的范围为 63.8～70.0 MPa，此时其反射压力系数在 1.55～1.70 之间，说明高饱和度饱和土中气体体积分数对水土交界面的透射、反射压力具有较大影响。

4 结　论

通过质量守恒、动量守恒以及水、土的状态方程建立了冲击波在水土交界面透射、反射压力的解析解理论模型以及二维数值模型，得到以下主要结论。

(1) 理论推导的解析解和根据解析解使用的参数建立的有限元模型适用于进行冲击波在水土交界面透、反射压力的分析。通过理论推导得到的解析解和数值模拟在 80 g TNT、0.5 m 爆距工况下的误差小于 1%，说明两者一致性较好。

(2) 通过改变爆距来比较理论计算与数值模拟的结果，在 0.1～0.9 m（比例爆距为 0.232～2.089 m/kg$^{1/3}$）时误差均小于 7%，说明本文中提出的理论计算方法具有较高的精度，冲击波在水土交界面的反射系数在 1.6～1.8 之间，经水土交界面后爆炸产生的荷载增加较大，在进行水底结构响应分析时应重视冲击波经水土交界面后的压力的增长，为后续的水下爆炸对水底土中结构的动态响应研究提供了理论依据。

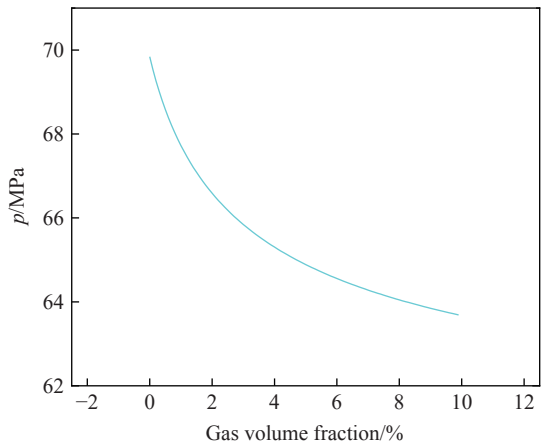


图 11　气体体积分数对水土交界面透射、反射压力的影响

Fig. 11　Effect of gas volune fraction on transmission and reflection pressures at the water-soil interface

(3) 通过理论计算来讨论改变含气量对水土交界面透、反射压力的影响，此时采用的工况为 TNT 当量 80 g，距离水土交界面爆距为 0.5 m，对应位置的入射压为 41.24 MPa，在含气量为 0～10% 的范围内，得到的透射、反射压力的范围为 63.8～70.0 MPa，此时其反射系数在 1.55～1.70 之间，说明饱和土的饱和度对于水土交界面透射和反射压力具有较大影响，在实际应用中应重视土体的饱和度。

参考文献：

[1] 钱七虎, 王明洋. 三相介质饱和土自由场中爆炸波的传播规律 [J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 97–104.
QIAN Q H, WANG M Y. Propagation of explosive wave in the free-field of three-phase saturated soil [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(2): 97–104.

[2] 钱七虎, 王明洋, 赵跃堂. 三相饱和水土中爆炸波在障碍物上的反射荷载 (Ⅰ) [J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 225–230.
QIAN Q H, WANG M Y, ZHAO Y T. Reflecting loading from the obstacle for explosive wave in three-phase saturated soil (Ⅰ) [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(3): 225–230.

[3] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 爆炸波在高饱和度饱和土中传播规律的研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 875–880. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.03.051.
MU C M, REN H Q, LI Y C, et al. Propagation laws of blast wave in saturated soils with high saturation degree [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 875–880. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.03.051.

[4] 穆朝民, 齐娟, 辛凯. 高饱和度饱和土中结构对爆炸波反射规律的实验研究 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 224–227. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2010.05.045.
MU C M, QI J, XIN K. Exoerimental studies on reflection law of blast wave on structuerin saturated soil with high degree of saturation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 224–227. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2010.05.045.

[5] 穆朝民, 齐娟, 辛凯. 高饱和度饱和砂中爆炸波传播规律的自由场实验研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(5): 87–86, 96. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdxb.2010.05.001.
MU C M, QI J, XIN K. The Free-field experimental study on blast wave propagation in saturated sand with high degree of saturation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(5): 87–86, 96. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdxb.2010.05.001.

[6] 穆朝民, 齐娟, 辛凯. 高饱和度饱和土中爆炸波的传播特性 [J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 18–23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4764.2010.01.004.
MU C M, QI J, XIN K. Characteristics of blast wave propagation in saturated soil with high degree of saturation [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(1): 18–23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4764.2010.01.004.

[7] COLE R H. Underwater explosions [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948.

[8] 王爱兴. 水下爆炸冲击波近区传播规律及防护方法研究 [D]. 武汉: 长江科学院, 2010: 13–33.

[9] KEDRINSKII V K. Negative pressure profile in cavitation zone at underwater explosion near free surface [J]. Acta Astronaut, 1976, 3(7): 623–632.

[10] 赵凯. 分层防护层对爆炸波的衰减和弥散作用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008: 19–35.

[11] 张涛, 庄铁栓, 伍俊, 等. 冲击波在不同物态介质界面传播的理论分析 [J]. 防护工程, 2023, 45(5): 28–35. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2023.05.005.
ZHANG T, ZHUANG T S, WU J, et al. Theoretical analysis of shock wave propagation at different medium interfaces [J]. Protective Engineering, 2023, 45(5): 28–35. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2023.05.005.

[12] WANG G H, ZHUANG S R, YU M, et al. Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries [J]. Applied Ocean Research, 2014, 46: 40–53. DOI: 10.1016/j.apor.2014.02.003.

[13] 顾文彬, 叶序双, 张朋祥, 等. 浅层水中爆炸水底影响的试验研究 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2001, 2(2): 55–58. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2001.02.013.
GU W B, YE X S, ZHANG P X, et al. Experimental studies of bottom influence in shallow-layer water explosion [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(2): 55–58. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2001.02.013.

[14] 顾文彬, 阳天海, 叶序双, 等. 单个装药浅层水中沉底爆炸的数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2000, 1(3): 51–55. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2000.03.011.
GU W B, YANG T H, YE X S, et al. Numerical simulation of single charge explosion on seabed in shallow water [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000, 1(3): 51–55. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2000.03.011.

[15] 顾文彬, 叶序双, 刘文华, 等. 界面对浅层水中爆炸冲击波峰值压力影响的研究 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2001, 2(5): 61–63. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2001.05.015.
GU W B, YE X S, LIU W H, et al. Peak pressure investigation of exploding wave influenced by interfaces in shallow -layer water [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(5): 61–63. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2001.05.015.

[16] 顾文彬, 马海洋, 唐勇, 等. 水底对浅水中装药爆炸效果的影响 [J]. 爆破, 2003, 20(4): 88–92. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2003.04.029.
GU W B, MA H Y, TANG Y, et al. Influence of water bottom on the explosion effect of shallow-layer water charging [J]. Blasting, 2003, 20(4): 88–92. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2003.04.029.

[17] 顾文彬, 孙百连, 阳天海, 等. 浅层水中沉底爆炸冲击波相互作用数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2003, 4(6): 64–68. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2003.06.015.
GU W B, SUN B L, YANG T H, et al. Numerical simulation of explosive shockwave interaction in shallow-layer water [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2003, 4(6): 64–68. DOI: 10. 3969/j.issn.1009-3443.2003.06.015. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2003.06.015.

[18] 杨莉, 汪玉, 杜志鹏, 等. 沉底装药水下爆炸冲击波传播规律 [J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 100–104. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.01.018.
YANG L, WANG Y, DU Z P, et al. Research on shock wave propagation of underwater explosion of bottom charge [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 100–104. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.01.018.

[19] WARDLAW A B, LUTON J A. Fluid-structure interaction mechanisms for close-in explosions [J]. Shock and Vibration, 2015, 7(1): 265–275. DOI: 10.1155/2000/141934.

[20] 严泽臣, 岳松林, 邱艳宇, 等. 水下爆炸冲击波反射压力计算方法的改进 [J]. 兵工学报, 2024, 45(4): 1196–1207. DOI: 10.12382/bgxb.2022.1037.
YAN Z C, YUE S L, QIU Y Y, et al. Improvement on the calculation method of shock wave reflected pressure in underwater explosion [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(4): 1196–1207. DOI: 10.12382/bgxb.2022.1037.

[21] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. TrueGrid 和 LS-DYNA 动力学数值计算详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 251–260.

[22] LS-DYNA keyword user's manual [Z]. LSTC, 2017.

[23] 文祝, 邱艳宇, 紫民, 等. 钙质砂的准一维应变压缩试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(3): 033101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0015.
WEN Z, QIU Y Y, ZI M, et al. Experimental study on quasi-one-dimensional strain compression of calcareous sand [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(3): 033101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0015.

[24] ZAMYSHLYAEV B V, YAKOVLEV Y S. Dynamic loads in underwater explosion: AD 757183 [R]. Washington DC: Naval Intelligence Support Center, 1973.

(责任编辑　蔡国艳)