文章编号：1000-5773(2009)05-0360-07

水下爆炸冲击波在含吸收层结构中的传播规律的数值模拟*

李顺波[1,2]，东兆星[1,2]，齐燕军[1,2]，孙 舒[1,2]

（1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，江苏徐州 221008；
2. 中国矿业大学建筑工程学院，江苏徐州 221116）

摘要：利用 ANSYS/LS-DYNA 软件，对水下爆炸冲击波在含有吸收层的多层结构中的传播规律进行了数值模拟。结果表明：冲击波在吸收层中的衰减是由泡沫材料自身的本构引起的；在含泡沫材料吸收层的结构中峰值压力仅为不含吸收层的 14%，冲击波传播波形发生改变；在含有泡沫混凝土的多层结构中应力波峰值的下降幅度比含泡沫铝的大，但冲击波传播波形的变化不是很明显；泡沫混凝土中的总能量大于泡沫铝中的总能量，因此泡沫混凝土作为防护吸收层要优于泡沫铝。

关键词：冲击波；吸收层；数值模拟；泡沫混凝土；泡沫铝

中图分类号：O383.1 **文献标识码**：A

1 引 言

随着科学技术的发展，人们不断研制出各种新型武器，其破坏威力也越来越大，这对地下工程的防护提出了更高的要求。因此，在地下工程的抗冲击防护结构的选型方面，为了充分发挥结构的弹塑性变形能力，并增加结构的承载能力，使结构体系在瞬时爆炸荷载下能够吸收更多的冲击能量，往往在两层结构中间夹一层刚度很小的弹塑性材料，即采用带软回填层的复合结构体系[1]。这种结构的优点是：硬层能抗击近距离的爆炸波作用，发挥其强度和刚度效应；软层一般由多孔泡沫材料组成，波阻抗低，强度与刚度低，变形大，在吸收爆炸波能量的同时起到削波、改变波形及增加波的脉宽的作用[2]。在该领域学者们做了很多研究，例如：在冲击速度大于弹道极限的条件下，对三明治板的能量分配和夹心为泡沫铝的三明治梁的变形与失效机制进行了研究，提出了一种测量泡沫铝夹心板的剪切模量的方法[3-5]。

2 数值模拟

2.1 模型的建立

采用 ANSYS/LS-DYNA 中 8 节点单元建立实体模型。模型采用半径为 1 000 mm、高为1 500 mm 的圆柱体。从外到内的介质分层分别为水、混凝土、吸收层、混凝土、水，其中：吸收层厚度为 50 mm，内部水层厚度为 350 mm，其它介质分层厚度为 200 mm。吸收层介质采用泡沫铝和泡沫混凝土。炸药采用 15 g 的 TNT，置于水下 750 mm 处。模型的示意图如图 1 所示。考虑到该结构具有对称性，为了节约计算机时，取模型的 1/4 进行计算。计算时，采用 cm-g-μs 单位制。

* **收稿日期**：2009-01-05；**修回日期**：2009-02-22
作者简介：李顺波(1985－)，男，硕士研究生，主要从事岩石动力学研究. E-mail：lshunbo@126.com
通讯作者：东兆星(1966－)，男，教授，主要从事岩石动力学研究. E-mail：dongzx1966@163.com

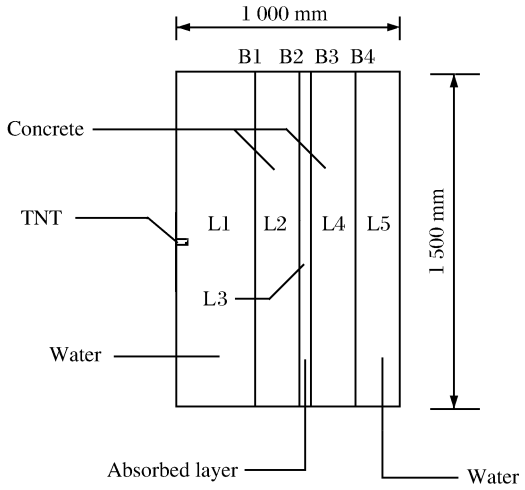


图 1　多层介质结构示意图

Fig. 1　Sketch of the multi-layer structure

2.2　数值模拟参数与状态方程

炸药采用 JWL 状态方程

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

式中:p 为爆轰产物的压力,v 为比容,E_0 为单位体积炸药的初始内能,A、B、R_1、R_2、ω 为 JWL 状态方程的参数,由实验确定。表 1 列出了 TNT 炸药的主要参数[6],其中:ρ 为炸药密度,v_d 为爆速,p_CJ 为 CJ 爆轰压力。

表 1　TNT 炸药的主要参数

Table 1　The main parameters of TNT explosive

ρ/(g/cm^3)	v_d/(m/s)	p_CJ/(GPa)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω	E_0/(GPa)
1.63	6 930	20.60	373.8	3.75	4.15	0.9	0.35	6.0

混凝土采用 Johnson-Holmquist-Concrete(JHC)动态损伤模型。该模型可以较好地描述混凝土等脆性材料在大应变、高应变率和高围压下材料损伤失效的动态响应[7]。归一化等效应力 σ^* 为

$$\sigma^*=[a(1-D)+bp^{*N}](1-c\ln\varepsilon^*) \tag{2}$$

式中:a 为归一化内聚强度;D 为损伤因子($0\leqslant D\leqslant 1$);b 为归一化压力硬化系数;$p^*=p/f'_\mathrm{c}$ 为归一化压力,其中 p 为实际压力,f'_c 为混凝土准静态单轴压缩强度;N 为压力硬化指数;c 为应变率系数;$\varepsilon^*=\varepsilon/\varepsilon_0$ 为无量纲的应变率,其中 ε 为实际应变率,ε_0 为参考应变率。损伤因子 D 由等效塑性应变和塑性体积应变累加得到

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon_\mathrm{p}+\Delta\mu_\mathrm{p}}{D_1(p^*+T^*)^{D_2}} \tag{3}$$

式中:$\Delta\varepsilon_\mathrm{p}$ 为等效塑性应变增量;$\Delta\mu_\mathrm{p}$ 为等效体积应变增量;D_1 和 D_2 为损伤常数;$T^*=T/f'_\mathrm{c}$,其中 T 为混凝土最大抗静水压力。表 2 列出了 JHC 模型中混凝土的主要参数[7-8],其中:S_max 为最大无量纲强度,G 为剪切模量,$\varepsilon_{f_\mathrm{min}}$ 为损伤常数,p_c 为材料的压实压力,μ_c 为体积应变,k_1、k_2、k_3 为材料常数,p_l 为破坏压力,μ_l 为体积应变极值。

水的状态方程均采用 Grüneisen 方程[9]

$$p_\mathrm{w}=\frac{\rho_0 d^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}}+(\gamma_0+a\mu)e_0 \tag{4}$$

式中：p_w 为压力；$\mu=\rho_0/\rho-1$，其中 ρ_0 为水的初始密度，ρ 为扰动后水的密度；d 为激波速度-粒子速度曲线的截距，且 $d=0.148$；S_1、S_2、S_3 为激波速度-粒子速度曲线斜率的系数，且 $S_1=1.75$，$S_2=S_3=0$；γ_0 为 Grüneisen 系数，且 $\gamma_0=0.4934$；a 为 γ_0 的一阶体积修正；e_0 为单位质量的内能。

表 2 JHC 模型中混凝土材料参数

Table 2 Material parameters used in JHC model for concrete

ρ/(g/cm^3)	a	b	N	c	f'_c/(GPa)	S_{max}	G/(GPa)	D_1	D_2
2.440	0.79	1.60	0.61	0.007	0.048	7.0	14.86	0.04	1.0
$\varepsilon_{f_{min}}$	p_c/(GPa)	μ_c/(GPa)	k_1/(GPa)	k_2/(GPa)	k_3/(GPa)	p_l/(GPa)	T/(GPa)	μ_l	
0.01	0.016	0.001	85	−171	208	0.08	0.004	0.1	

泡沫铝与泡沫混凝土均采用可压缩性泡沫材料模型(Crushable-Foam-Model)[9]，屈服应力与体积应变关系如图 2 所示。从图中可以看出：泡沫铝和泡沫混凝土从 1 点卸载到拉应力中止值 2 点，然后卸载到 3 点，最后加载到 4 点，重新加载过程将继续沿原来的加载曲线上升。泡沫铝和泡沫混凝土的主要参数列于表 3[2,10-11]，其中：E 为杨氏模量，ν 为泊松比，σ_{cr} 为弹性极限，δ 为阻尼系数。

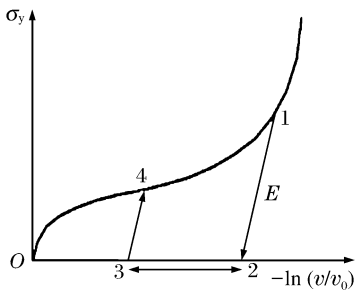


图 2 屈服应力与体积应变关系曲线

Fig. 2 Relation between yield stress and volume strain

假定弹性模量为常数，且修正的应力假定为弹性特性，则试应力

$$\sigma_{ij}^{\text{trial}}=\sigma_{ij}^{n}+E\dot{\varepsilon}_{n}^{n+1/2}\Delta t^{n+1/2} \tag{5}$$

检查试应力主值 $\sigma_i^{\text{trial}}(i=1,3)$ 是否超过屈服应力 σ_y，如果超过，则其值按比例回到屈服面

$$\sigma_i^{n+1}=\sigma_y\frac{\sigma_i^{\text{trial}}}{|\sigma_i^{\text{trial}}|}\qquad \sigma_y<|\sigma_i^{\text{trial}}| \tag{6}$$

表 3 泡沫铝和泡沫混凝土的主要参数

Table 3 The main parameters of foam aluminum and foam concrete

Material	ρ/(g/cm^3)	E/(MPa)	ν	σ_{cr}/(MPa)	δ
Foam aluminum	0.80	500	0.21	15.0	0.2
Foam concrete	0.72	270	0.18	6.0	0.2

3 结果与讨论

为了方便叙述，将模型中的分层介质按照从里到外的顺序进行编号，分别为：L_1、L_2、L_3、L_4、L_5；并设 L_1 和 L_2 的界面为 B_1，L_2 和 L_3 的界面为 B_2，L_3 和 L_4 的界面为 B_3，L_4 和 L_5 的界面为 B_4(见图 1)。不含吸收层的情况也按照有吸收层的情况进行编号。

水中冲击波的峰值压力 p_m 为[12]

$$p_m=k(m_e^{1/3}/R)^{\alpha} \tag{7}$$

式中：m_e 为装药量，R 为距爆心的距离，k、α 为经验系数。对于 TNT 炸药，$\alpha=1.13$，$k=52.27$ MPa。若 $R=0.20$ m、$m_e=15$ g，则由(7)式可得峰值压力 p_m 为 66 MPa。利用 LS-DYNA 软件，结合图 1 所示的计算模型，可以获得压力-时间曲线，见图 3。从图中可以看出，模拟计算得到的峰值压力为74 MPa，与经验公式得到的结果相差 11%。

3.1　冲击波压力在吸收层中的衰减规律

对吸收层为泡沫混凝土和泡沫铝两种不同情况进行了数值模拟,得到了 B_2 右面单元的压力-时间曲线,如图 4 所示。从图中可以看出,爆炸冲击波经过水和混凝土的衰减后进入吸收层,吸收层为泡沫铝时的冲击波初始峰值明显大于吸收层为泡沫混凝土时的初始峰值,大约高出 33%。这主要是由于吸收层(泡沫混凝土或泡沫铝)的波阻抗与混凝土的波阻抗的差异引起的,并且波阻抗差异越大吸收层和混凝土层之间的接触面的反射波能量就越大。进一步观察图 4 还可以发现:无论吸收层是泡沫混凝土还是泡沫铝,冲击波在吸收层中的传播都发生了变化,并且冲击波峰值的上升时间逐渐增大;冲击波在泡沫混凝土中的衰减趋势要明显强于在泡沫铝中的衰减趋势;600 μs 后,泡沫混凝土中的冲击波衰减得很快,逐渐趋于零。因为混凝土的波阻抗大于吸收层(泡沫混凝土或泡沫铝)的波阻抗,所以冲击波由混凝土层进入吸收层时反射应力扰动和入射应力扰动方向相反,透射应力扰动幅值弱于入射应力扰动幅值。而泡沫混凝土的波阻抗小于泡沫铝的波阻抗,冲击波进入泡沫混凝土时的反射扰动要大于进入泡沫铝时的反射扰动,由于入射波的总强度是一样的,因此泡沫混凝土的透射波强度小于泡沫铝的,泡沫混凝土的初始峰值相对较小。

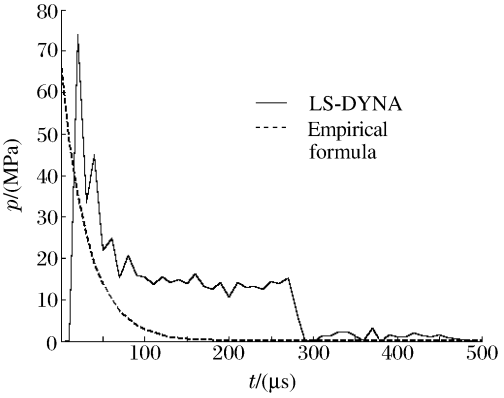


图 3　通过 LS-DYNA 和经验公式计算得到的冲击波压力-时间曲线

Fig. 3　Shock-wave pressure-time curve calculated by LS-DYNA and empirical formula

吸收层中心单元的压力随时间的变化关系如图 5 所示。从图中可以看出:冲击波在泡沫混凝土和泡沫铝中都出现了压应力的双峰现象,并且泡沫混凝土和泡沫铝的初始峰值差基本保持不变;与图 4 中的波形相比,冲击波的形状没有很大的差别。这是由于冲击波在泡沫铝中传播时,其衰减过程主要是由泡沫铝的本构特性决定的[13]。泡沫材料变形一般经历 3 个阶段:弹性段、屈服段和压实段。在屈服段,应力一般随形变的增大而缓慢增加,有时甚至保持不变;但在压实段,应力将随形变的增加而显著增大,从而导致正向波形出现双峰结构。

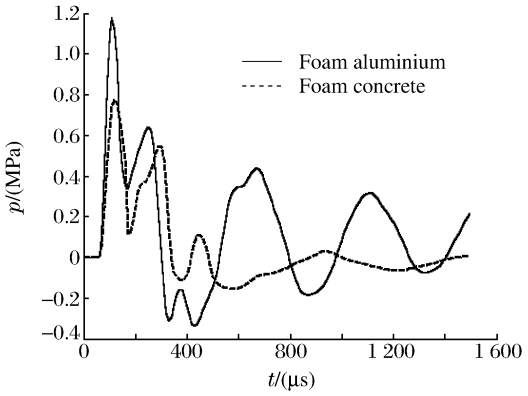


图 4　B_2 右面单元压力-时间曲线

Fig. 4　Pressure-time curves in the right unit of B_2

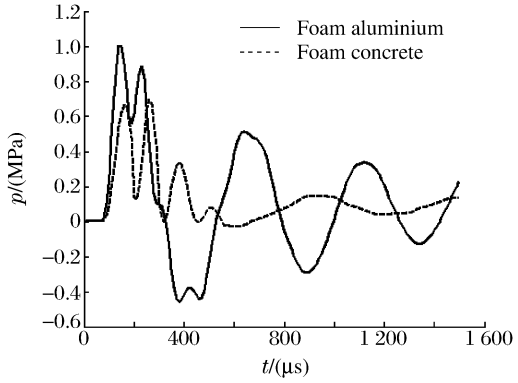
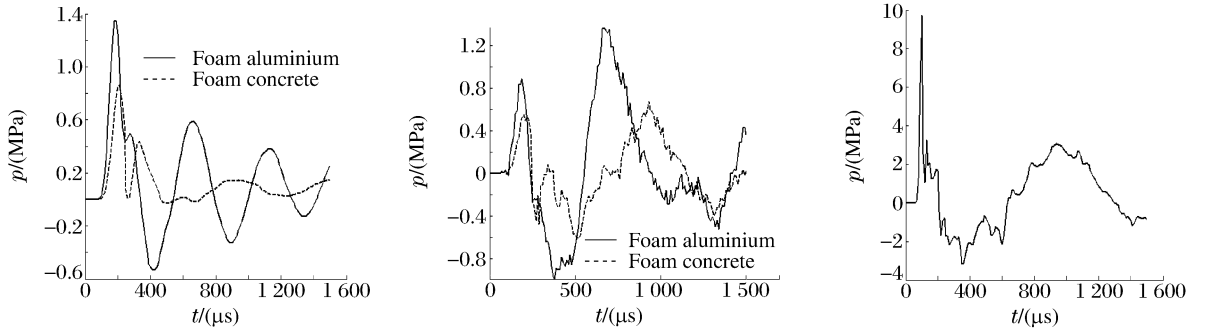


图 5　吸收层中压力-时间曲线

Fig. 5　Pressure-time curves in the absorbed layer

图 6 为 B_3 界面左右单元的压力-时间曲线。从图中可以看出,冲击波在两种泡沫介质中的初始峰值明显大于图 4 和图 5 中的初始峰值。这是由于泡沫材料的波阻抗小于混凝土的波阻抗,当冲击波从吸收层(泡沫混凝土或泡沫铝)进入混凝土层时,反射应力扰动和入射应力扰动方向相同,产生反射加载现象。将图 6(a)与图 4、图 5 中的冲击波波形进行对比,可以看出波形的总体衰减趋势基本一致,只是在出现峰值的次数上存在差别。从图 6(b)可以看出:当冲击波由吸收层进入混凝土层时,混凝土中出

现锯齿状波形,这是因为吸收层材料的存在导致应力波在该层中不断出现透射与反射。进一步观察图 6(b)可知,在含有泡沫混凝土或泡沫铝吸收层的结构中混凝土的冲击波峰值压力分别为0.6 MPa和1.4 MPa,含有泡沫混凝土时的峰值压力为含有泡沫铝时的 43%。从图 6(c)可以看出,冲击波在无吸收层结构中的峰值压力为 10 MPa。对比可知,吸收层对于冲击波的吸收和衰减起着重要作用,并且泡沫混凝土对冲击波的吸收和衰减作用要优于泡沫铝。



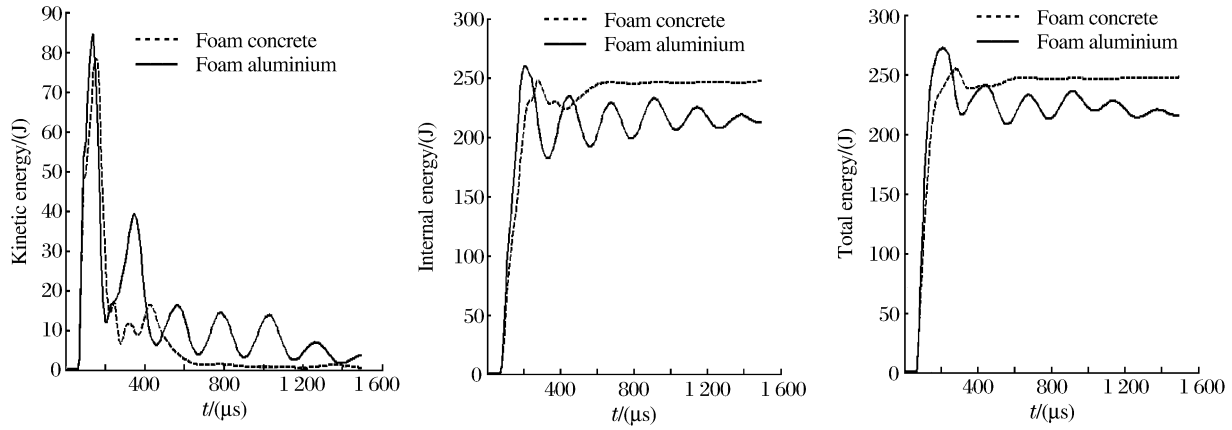
(a) The left unit of B_3 with absorbed layer (b) The right unit of B_3 with absorbed layer (c) The right unit of B_3 without absorbed layer

图 6 B_3 左右单元压力-时间曲线

Fig. 6 Pressure-time curves in the left and right unit of B_3

3.2 冲击波能量在吸收层中的衰减规律

吸收层中能量随时间的变化关系如图 7 所示,其中图 7(c)中的总能量为图 7(a)中的动能和图 7(b)中的内能之和。由图 7(a)的动能-时间曲线可以看出,随着时间的增加,泡沫铝的动能要大于在泡沫混凝土的动能,并且两者到达峰值的时间基本相同。这是由于冲击波在吸收层中传播时,泡沫铝的压力始终大于泡沫混凝土的压力,而冲击波的波速与冲击波的压力是相关的,因此泡沫铝的动能要大些。从图 7(b)可以看出:泡沫铝和泡沫混凝土的内能上升速率不同,前者速率明显高于后者;随着时间的增加,两者的内能将趋于一个恒定值。这是因为泡沫材料在压力的作用下不断被压缩,由于泡沫材料自身的本构关系会引起压力的不断衰减,因此当泡沫材料进入压实阶段后,就不再吸收内能,从而达到一个恒定值。由图 7(c)可知:随着时间的增加,泡沫铝和泡沫混凝土的总能量也将趋于一个恒定值;泡沫铝中总能量的震荡时间较长,而泡沫混凝土中总能量的震荡时间较短,600 μs 后总能量就不再变化;泡沫铝的总能量峰值比泡沫混凝土的大,这与前面的冲击波压力-时间曲线的结果一致;泡沫混凝土吸收的总能量大于泡沫铝吸收的总能量,说明泡沫混凝土作为防护层要优于泡沫铝,这与前面的结论一致。



(a) Kinetic energy (b) Internal energy (c) Total energy

图 7 吸收层中的能量变化曲线

Fig. 7 Energy-time curves in the absorbed layer

4 结　论

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件,对水下爆炸冲击波在含有吸收层结构中的传播规律进行了数值模拟。通过与经验公式得到的结论进行对比,发现两者差别不大,说明数值模拟结果是准确可靠的。数值模拟结果表明:冲击波由"软"材料进入"硬"材料时,冲击波在反射加载的作用下,峰值增大,这与理论计算结果一致;吸收层能够有效地减小爆炸冲击波的应力峰值,降低自由表面的拉伸应力波峰值,从而削弱由拉伸应力引起的局部破坏;泡沫铝和泡沫混凝土作为吸收层时,对应力波的传播特性影响不同,两者相比,在含有泡沫混凝土的多层介质结构中应力波的强度下降更大,但对冲击波传播的波形影响不是很明显。进一步分析结果表明,泡沫混凝土中的总能量大于泡沫铝中的总能量,泡沫混凝土的压力峰值小于泡沫铝的压力峰值,因此水下爆炸时泡沫混凝土作为防护吸收层要优于泡沫铝。

References:

[1] Wu X Y, Zhao Y X, Ren H Q, et al. On Basic Way to Dramatically Increase the Bearing Capacity of Underground Engineering in Rock Mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 261-265. (in Chinese)
吴祥云,赵玉祥,任辉启,等. 提高岩体中地下工程承受动载能力的技术途径 [J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):261-265.

[2] Dong Y X, Feng S S, Li X L. Numerical Analysis of Propagation Characteristics of Explosive Wave in the Hard-Soft-Hard Sandwich Media [J]. Journal of Ballistic, 2007, 19(3): 59-63. (in Chinese)
董永香,冯顺山,李学林. 爆炸波在硬-软-硬三明治介质中传播特性的数值分析 [J]. 弹道学报,2007,19(3):59-63.

[3] Skvortsov V, Kepler J, Bozhevolnaya E. Energy Partition for Ballistic Penetration of Sandwich Panels [J]. Int J Impact Eng, 2003, 28(7): 697-716.

[4] Yu J L, Wang X, Wei Z G, et al. Deformation and Failure Mechanism of Dynamically Loaded Sandwich Beams with Aluminum-Foam Core [J]. Int J Impact Eng, 2003, 28(3): 331-347.

[5] Wada A, Kawasaki T, Minoda Y, et al. A Method to Measure Shearing Modulus of the Foamed Core for Sandwich Plates [J]. Composite Structures, 2003, 60(4): 385-390.

[6] Ma G W, Hao H, Zhou Y X. Modeling of Wave Propagation Induced by Underground Explosion [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(3-4): 283-303.

[7] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Pressures [A]//Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics [C]. Quebec, Canada, 1995: 591-600.

[8] Zhang F G, Li E Z. A Computational Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressure [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 198-202. (in Chinese)
张风国,李恩征. 大应变、高应变率及高压强条件下混凝土的计算模型 [J]. 爆炸与冲击,2002,22(3):198-202.

[9] Hallquist J O. LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001: 200-201.

[10] Wang D H, Liu D S, Du Y L, et al. Numerical Simulation of Anti-Blasting Mechanism and Energy Distribution of Composite Protective Structure with Foam Concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6): 562-567. (in Chinese)
王代华,刘殿书,杜玉兰,等. 含泡沫吸能层防护结构爆炸能量分布的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击,2006,26(6):562-567.

[11] Tian Z M, Qian Q H, Wu B X. Study of Underground Circle Shape Structure under High Pressure and Blasting Dynamic Load [J]. Special Structure, 1997, 14(3): 40-43. (in Chinese)
田志敏,钱七虎,吴步旭. 大压力爆炸动载作用下地下复合圆形结构研究 [J]. 特种结构,1997,14(3):40-43.

[12] Cole P. Underwater Explosions [M]. Princeton: Princeton University Press, 1948.

[13] Wang Y G, Hu S S, Wang L L. Shock Attenuation in Aluminum Foams under Explosion Loading [J]. Explosion

and Shock Waves,2003,23(6):516-521. (in Chinese)
王永刚,胡时胜,王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(6):516-521.

Numerical Simulation on Propagation of Underwater Blast Shock Wave in Absorber Structure

LI Shun-Bo[1,2], DONG Zhao-Xing[1,2], QI Yan-Jun[1,2], SUN Shu[1,2]

(1. *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou* 221008, *China*;
2. *School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou* 221116, *China*)

Abstract: The underwater blast shock wave in absorber structure was numerically simulated by ANSYS/LS-DYNA. The results showed that the shock waves decay in the absorption foam layer due to the effect of the constitutive of the foam material, and the peak pressure of the stress wave in the multi-layer structure containing foam concrete has a greater decline than that with foam aluminum, but this has little impact on shock wave transmission. The shock peak pressure in the protective structure with absorbed layer is only 14% of that without an absorbed layer. Further analysis showed that the total energy of foam concrete is higher than that of foam aluminum, indicating foam concrete is superior to foamed aluminum as the absorbed layer in protective structure.

Key words: shock wave; absorbed layer; numerical simulation; foam concrete; foam aluminium