

# 空中和水中爆炸时钢筋混凝土板动态响应对比分析

孔祥清, 赵倩, 曲艳东, 章文姣

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 锦州 121001

**摘要** 利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立钢筋混凝土板在不同介质中(空中和水中)爆炸的数值模型, 在对比分析爆炸冲击波在空气中和水下传播特性的基础上, 研究了空中和水中爆炸冲击波对钢筋混凝土板动态响应及损伤程度的影响, 并对对比分析了不同炸药量及起爆距离对钢筋混凝土板在空气中和水下爆炸时动态响应的影响规律。研究表明, 在近爆区域内, 爆炸冲击波在空气中和水下的传播特性存在较大的差异: 在空中的传播速度较水下快, 并且冲击波压力在空中衰减较水下快; 但水下爆炸冲击波压力峰值较空中爆炸大很多, 对钢筋混凝土板的潜在破坏能力较强。两种介质中爆炸时钢筋混凝土板的破坏形态对比分析, 发现无论是迎爆面还是背爆面, 同等炸药量及起爆距离下水下爆炸时混凝土板损伤程度均较空中爆炸时大。

**关键词** 钢筋混凝土板; 空中爆炸; 水下爆炸; 冲击波传播特性; 动态响应

日常生活中意外爆炸及恐怖事件的不断发生, 使工程结构发生严重的损伤甚至毁灭性坍塌, 对重大建筑物结构的安全构成严重威胁。工程结构遭受爆炸冲击荷载的主要介质有空中爆炸和水中爆炸, 但是由于空气和水这两种介质的物理属性存在较大差异, 且爆炸产物与炸弹周围介质的相互作用效应不同, 导致结构在空气中和水下的动态响应、破坏特征及相应的防护设计均存在较大差异<sup>[1-2]</sup>。因此研究结构在空气中和水下爆炸荷载作用下的动态响应对于提高结构的抗爆性能具有重要意义。

爆炸荷载具有传播速度快、峰值压力大、作用时间短等特点, 导致爆炸荷载作用下的结构动态响应是一个复杂的物理过程, 其中包括炸药的起爆过程, 爆炸冲击波在介质中的传播过程, 介质与结构相互作用及结构响应过程等。近年来, 国内外学者对爆炸荷载作用下结构在不同介质中的动态响应及冲击波的传播过程开展了一系列的研究, 发现在相同炸药量及起爆距离下, 在空中或水下爆炸时, 产生冲击波的传播特性有所差异, 同时结构的动态响应也不一样。如宁心等<sup>[3]</sup>对空中和水中爆炸冲击波的传播速度和物理参数等进行了对比研究, 发现冲击波在水下传播时峰值压力和冲量要明显高于空中。Librescu 等<sup>[4]</sup>对各向异性夹层板在空气中和水下爆炸荷载作用下的动力响应进行了数值模拟研究, 发现平板在水下爆炸时破坏程度更严重。张社荣等<sup>[5-7]</sup>通过数值模拟的方法对空中和水中爆炸时冲击波传播特性及重力坝动态响应进行了对比分析, 研究表明, 水下爆炸冲击波传播压强

峰值及冲量均较空中爆炸大很多, 对结构的潜在破坏能力较强。近年来随着人防、水利水电以及海岸工程等兴起, 钢筋混凝土结构因其优异的力学性能和较高的质量密度成为当前工程结构抗爆设计的首选。目前, 国内外研究人员关于钢筋混凝土结构在爆炸荷载作用下的动态响应已经做了大量的研究<sup>[8-14]</sup>, 但是由于问题的复杂性, 关于不同介质中爆炸时钢筋混凝土结构与介质的相互作用及其动态响应的对比分析较少。

本研究以钢筋混凝土板为例, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对其在不同介质(空气和水)中爆炸时结构的动态响应进行数值模拟。对比分析爆炸冲击波在空气中和水下的传播过程及相应的峰值压力; 同时研究钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下与两种介质的相互作用和动态响应。并在此基础上研究不同炸药量和不同起爆距离对空中和水中爆炸时钢筋混凝土板动态响应的影响规律。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 有限元模型

以钢筋混凝土板结构为研究对象, 炸药类型为 TNT, 计算模型如图 1 所示。板取工程结构中常规尺寸: 1.3 m×1.0 m×0.12 m。钢筋采用双层配筋, 受力钢筋直径为 10 mm, 中心距离 100 mm, 分布钢筋直径为 10 mm, 中心距离 200 mm, 保护层厚度选择 25 mm, 试件的混凝土材料抗压强度为 48 MPa, 钢筋采用 HPB235, 其屈服强度为 560 MPa。模型钢筋

收稿日期: 2015-06-24; 修回日期: 2015-12-07

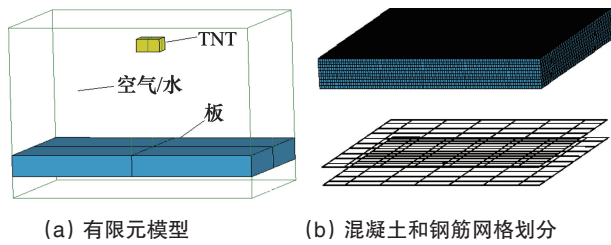
基金项目: 国家自然科学基金项目(11302093, 11302094); 辽宁省教育厅优秀人才项目(LJQ2015047, LJQ2014063)

作者简介: 孔祥清, 副教授, 研究方向为混凝土结构抗爆性能, 电子邮箱: xqkong@lnut.edu.cn

引用格式: 孔祥清, 赵倩, 曲艳东, 等. 空中和水中爆炸时钢筋混凝土板动态响应对比分析[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 279-286; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.039

混凝土板长边自由,短边采用简支约束模型单向板。

有限元模型如图 1(b)所示,钢筋采用梁单元 Beam 161,混凝土采用实体单元 Solid 164。钢筋与混凝土采用分离式共节点,实现二者间的黏结,不考虑二者间的黏结滑移。空气、水单元数为 149760,混凝土单元数为 20800,钢筋单元数为 904,炸药单元数为 150。炸药、空气和水采用实体单元 Solid 164,多物质 ALE 算法;钢筋和混凝土单元采用 Lagrange 算法。利用流固耦合的方式进行计算,实现爆炸产物对板的作用。为节省计算时间,通过施加对称边界条件,取 1/4 板进行计算。



(a) 有限元模型 (b) 混凝土和钢筋网格划分

图 1 数值计算模型

Fig. 1 Simulation model

## 1.2 材料模型及参数确定

混凝土力学性能复杂,因此采用 HJC 模型<sup>[15]</sup>,HJC 模型综合考虑了大应变、高应变率、高压效应。 $\rho$ 为混凝土密度, $f'_c$ 为屈服强度, $G$ 为混凝土切变模量, $E$ 为混凝土弹性模量, $T$ 为最大拉伸静水压力, $EF_{min}$ 为极限塑形应变, $SF_{max}$ 为归一化最大强度, $\mu_{crush}$ 为破坏体积应变, $P_{ush}$ 为压溃点的压力, $P_{lock}$ 为压实点的压力, $\mu_{lock}$ 为压实点的体积应变, $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 为压力常数, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $N$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 为混凝土材料常数。各个参数取值如下: $\rho=2.400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , $f'_c=0.048 \text{ GPa}$ , $G=45.7 \text{ GPa}$ , $E=14.86 \text{ GPa}$ , $T=0.04 \text{ GPa}$ , $EF_{min}=0.01$ , $SF_{max}=7.0$ , $P_{ush}=0.016 \text{ GPa}$ , $\mu_{crush}=0.001$ , $P_{lock}=0.8$ , $\mu_{lock}=0.1$ , $K_1=85 \text{ GPa}$ , $K_2=-171 \text{ GPa}$ , $K_3=208 \text{ GPa}$ , $A=0.79$ , $B=1.60$ , $C=0.007$ , $N=0.61$ , $D_1=0.04$ , $D_2=1.0$ 。混凝土材料利用 MAT\_ADD\_EROSION 关键字,采用最大失效应变准则,考虑混凝土材料的应变率效应,混凝土的失效应变取为 0.0018。

在爆炸荷载作用下,钢筋会产生高应变率。钢筋采用 Plastic Kinematic 模型<sup>[16]</sup>,其中  $\rho_s$ 为钢筋密度, $E_s$ 为钢筋弹性模量, $\nu$ 为钢筋泊松比, $\sigma_s$ 为屈服强度, $\epsilon_{cs}$ 极限应变, $C$ 、 $P$ 为应变率参数。参数取值: $\rho_s=7.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , $E_s=230 \text{ GPa}$ , $\nu=0.3$ , $\sigma_s=0.56$ , $\epsilon_{cs}=0.25$ , $C=40$ , $P=5$ 。

炸药在空中爆炸时,产生的爆炸产物为高温高压物质。爆炸产物在空中膨胀,能够强烈的压缩空气,形成爆炸空气冲击波。在数值模拟中,一般对气体的描述采用 Mat-Null 材料模型和线性多项式气体状态方程<sup>[17]</sup>:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (1)$$

式中, $P$ 为爆轰压力; $E_0$ 为内能, $E_0=0.25 \text{ MPa}$ ;  $C_0$ ~ $C_6$ 为状态方程参数: $C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0$ , $C_4=C_5=0.4$ ; $\mu$ 为压缩比, $\mu=1/V_0-1$ ,

$V_0$ 为相对体积, $V_0=1.0$ ;空气的密度取为  $1.29 \text{ g/cm}^3$ 。

炸药在水介质中爆炸时瞬间释放的能量会形成的高温高压状态的、超过周围水介质静水压力的爆炸气体,形成水中冲击波,产生气泡脉动现象。水介质中采用 Gruneisen 状态方程<sup>[17]</sup>:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a\mu^2}{2} \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1)\mu - S_2\mu^2/(\mu + 1) - S_3\mu^3/(\mu + 1)^2 \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E, \mu \geq 0$$

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E, \mu < 0 \quad (2)$$

式中, $C$ 为  $v_s-v_p$  曲线截距, $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 为  $v_s-v_p$  曲线斜率系数, $C=0.1647$ , $S_1=2.56$ , $S_2=1.986$ , $S_3=1.2268$ , $\rho$ 为初始密度  $1.000 \text{ g/cm}^3$ , $E$ 为内能。

炸药采用能够很好的描述炸药爆炸产生的爆轰压强与相对体积关系的 JWL 状态方程<sup>[17]</sup>:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

式中, $P$ 为爆炸产生的压强, $V$ 为单位体积装药产生的爆轰产物的体积, $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 和  $\omega$ 是 JWL 状态方程材料参数,其中  $A=7.43 \times 10^2 \text{ GPa}$ , $B=3.747 \text{ GPa}$ , $R_1=4.15$ , $R_2=0.95$ , $\omega=0.30$ 。TNT 炸药初始密度  $\rho=1.630 \text{ g/cm}^3$ ,单位体积的初始内能  $E=6.0 \times 10^3 \text{ MJ/m}^3$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同介质中爆炸冲击波传播特性对比分析

图 2 和图 3 分别给出了空中爆炸和水中爆炸时爆炸冲击波的传播过程。模型中炸药量为 2.0 kg,起爆距离(炸药中心起爆点到板顶部中心)为 0.6 m。由图 2 可以看出,空中爆炸时爆炸冲击波近似为内部稀疏区、外部压缩区的双层球状。当  $0 < t < 160 \mu\text{s}$ ,冲击波在空中从爆心开始以球形波阵面形式向四周传播;当  $t=160 \mu\text{s}$  时,压缩波经空气介质到达板顶面(图 2(b));当  $160 \mu\text{s} < t < 240 \mu\text{s}$ ,压缩波经空气进入板内透射,并且向相反方向运动,在板底部形成强拉伸波,产生反射现象(图 2(b)~(d));当  $240 \mu\text{s} < t < 300 \mu\text{s}$ ,拉伸波到达板顶部,第二次压缩波开始传播;当  $300 \mu\text{s} < t < 340 \mu\text{s}$ ,第二次压缩波透射到达板底部,第二次拉伸波开始传播(图 2(e)~(f))。对比图 2 和图 3 可知,爆炸冲击波在两种介质中传播规律大体相似,均以球形波阵面的形式向四周传播,但在传播速度和反射等方面存在区别。爆炸冲击波在水下以能量扰动的形式向前推进<sup>[18]</sup>,到达板上端中央位置的时间迟于空中冲击波到达时间,且中间部位有一部分冲击波滞后(图 3(e));在  $t=340 \mu\text{s}$  时(图 3(f)),水下冲击波开始反射,四周冲击波继续向下扩散,中间部位冲击波向上逐渐变大。爆炸冲击波在空中传播到达板的时间较在水下早,这是因为在近爆区域,空气的压缩性比水大,空中的爆炸冲击波几乎是以炸药爆炸的速度传播。

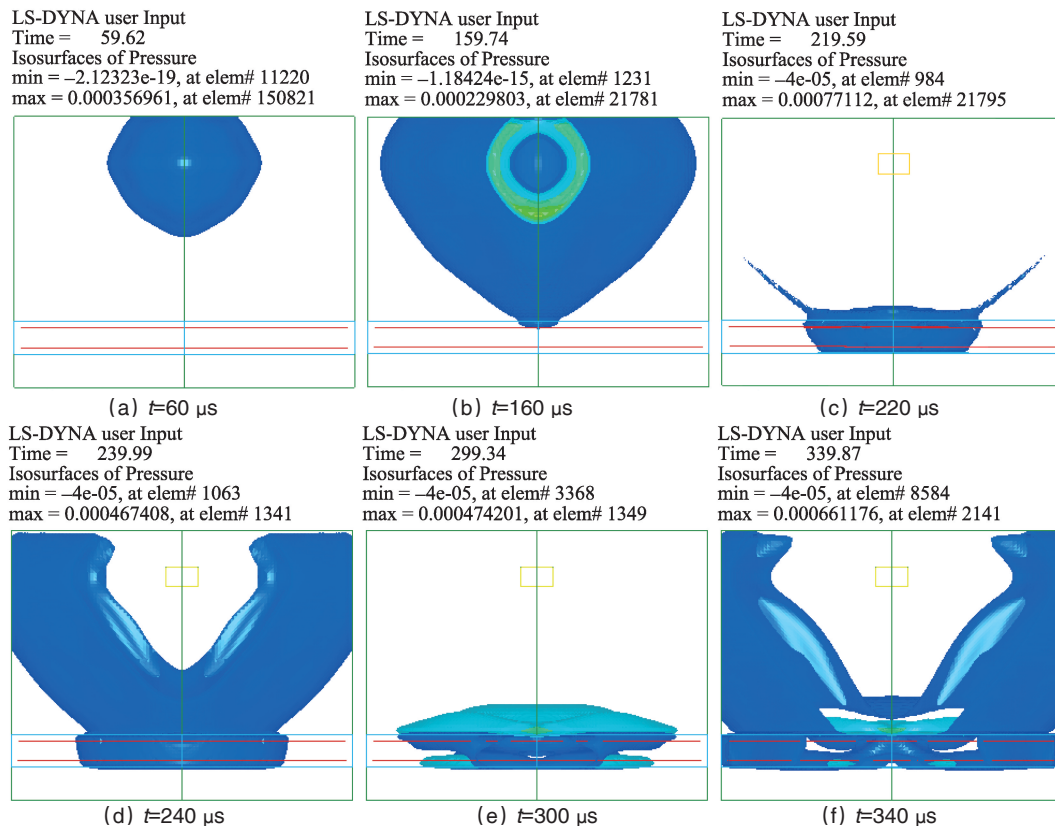


图2 空中爆炸冲击波传播过程

Fig. 2 Propagation of explosive air shock wave

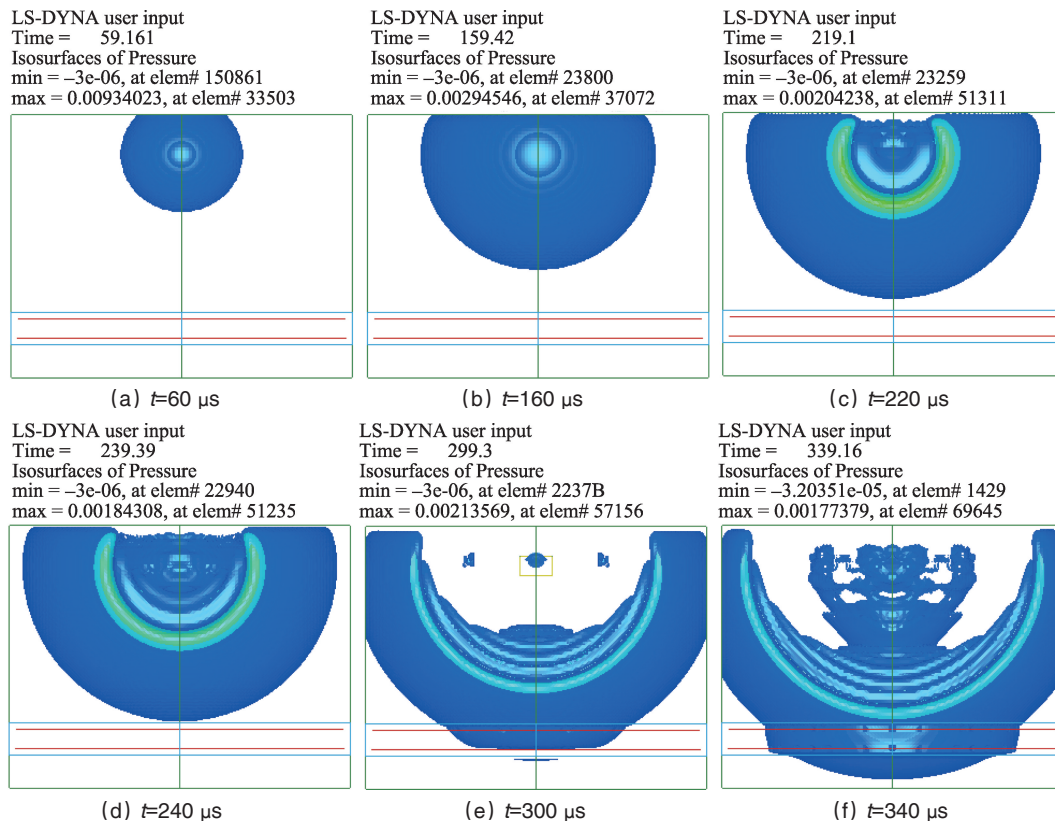


图3 水下爆炸冲击波传播过程

Fig. 3 Propagation of explosive water shock wave

为了进一步分析爆炸冲击波在不同介质中的传播特性,取介质中某一点,对比分析其典型压力时程曲线。在此取距炸药中心起爆点 0.2 m(图 4)处的计算点为研究目标,图 4(a)和(b)分别给出了该点在空中和水下的爆炸冲击波的典型压力时程曲线。由图 4(a)可知,空中爆炸时,空气压力时程曲线分为了正压区和负压区(以标准大气压为界线);压力在冲击波传播到目标计算点时达到峰值(峰值压力为 12.86 MPa),随后以指数形式衰减到标准大气压,接着进入负压区,且衰减速率越来越慢。由图 4(b)可知,水下爆炸压力时程曲

线变化规律与空中爆炸规律相似,压力瞬间达到峰值(峰值压力为 424.21 MPa),然后以指数形式衰减,且衰减速度逐渐降低。对比两者的峰值压力可知,在取距炸药中心起爆点 0.2 m 处,水下爆炸的压力峰值约是空中爆炸压力峰值的 32.98 倍,可见同等炸药量水下爆炸冲击波压力峰值远远大于空中爆炸,故水下爆炸时产生的冲击波强度大于在空中爆炸时产生的冲击波,这表明着水下爆炸对钢筋混凝土结构的潜在破坏能力较强。

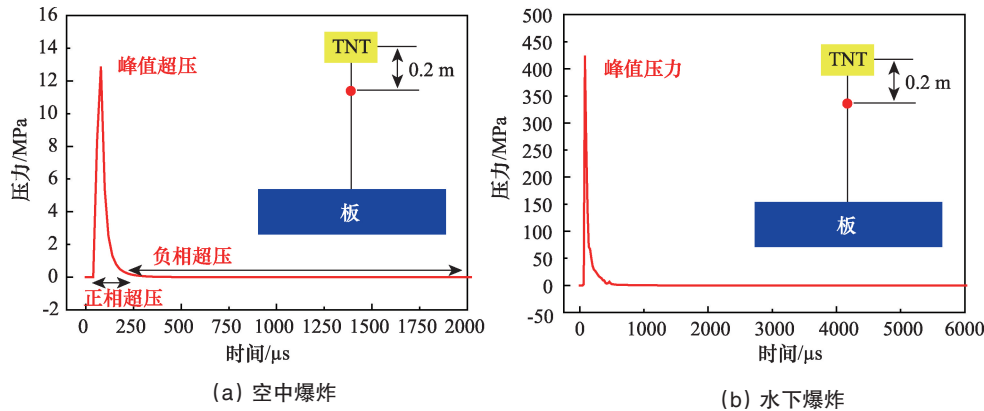


图 4 距爆心 0.2 m 处的压力时程曲线

Fig. 4 Typical free pressure time history at a location 0.2 m from the charge center

爆炸产生的冲击波会瞬时产生峰值,随后呈指数形式下降。故可根据冲击波峰值压力经验公式验证数值模型的可靠性。选取起爆点正下方空气/水介质中 5 个不同位置计算点,分别为距炸药中心起爆点 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m(图 5),把这些点处由数值模型得到的压力峰值与经验公式的经验值进行对比。空中爆炸时,其冲击波压力峰值经验值可由经典的 Henrych J 经验公式<sup>[19]</sup>得出;水下爆炸时,其冲击波压力峰值经验值可根据 Cole 经验公式<sup>[20]</sup>推出。图 5 为起爆点下 5 个不同位置计算点的压力峰值数值模拟计算值与经验值对比曲线。可以看出,数值模拟计算值与经验公式吻合较好。在距起爆点相同位置处,水下的峰值压力明显大于空中相应位置的峰值压力值,且随着距爆心距离的增加,峰值压力逐

渐减小。统计发现水下爆炸冲击波峰值平均压力远高于空中爆炸平均压力,约是其 23.93 倍(经验平均比值为 26.93 倍),主要由于冲击波在空中(空气压缩性较水的压缩性大且密度小于水的密度)传播时能量能够大量且快速地在空中耗散。由图 5 还可以看出,两种介质下的峰值压力都随着与距炸药中心起爆点距离的增大而降低,空中冲击波压力峰值从 1 点至 5 点,依次下降了 72.8%、79.8%、90%、90.5%,而水下冲击波压力峰值依次下降了 51.25%、67.6%、75.9%、84.5%,由此可以看出冲击波压力在空中衰减较水下快。

## 2.2 空中和 underwater 爆炸时钢筋混凝土板动态响应对比分析

Mises 等效应力可以有效的确定模型中最危险的区域,区域数值大,表示应力状态欠佳,是材料容易破坏、变形较大的地方。图 6(a)~(c)和(d)~(f)为空中和 underwater 爆炸荷载作用下板迎爆面的有效应力云图对比。对比分析可以看出,两种介质下等效应力均沿板迎爆面均呈中心对称分布(图 6(a)、(d))。并由图 6(a)~(c)可知,空中爆炸时,在爆炸荷载作用下,压缩应力波在板的迎爆面产生损伤破坏,板迎爆面出现受压破坏现象(图 6(a));随后,板迎爆面跨中出现混凝土土压碎区(图 6(b)和(c))。与水下爆炸相比,板迎爆面在空中爆炸时出现裂缝的时间早于水下爆炸(图 6(b)、(e)),这主要是由于在近爆区域,空中的爆炸冲击波几乎是以炸药爆炸的速度传播,而由于水的压缩性小,密度大等物理原因,水下冲击波传播速度小于在空气中。但是随着时间的增加,板在 underwater 爆炸时的破坏形态较空中严重,如图 6(c)所示,空中爆炸时

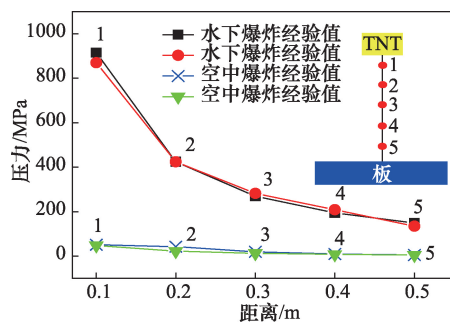


图 5 空中和 underwater 各计算点压力峰值对比

Fig. 5 Comparison of the peak pressure at measuring points in the air or the water

板迎爆面贯穿裂纹不明显;而水下爆炸时(图6(f))跨中出现明显的主裂缝,并沿着与轴线45°方向,出现明显的贯穿裂缝。

图7(a)~(c)和(d)~(f)为空中和水下爆炸时板背爆面的有效应力云图对比。可以看出,在空中爆炸时(图7(a)~(c)),压缩应力波在板的迎爆面同样产生损伤破坏,并传播至板的背爆面形成强拉伸波,使背爆面混凝土出现裂缝(图7

(a));随着时间增加,塑形区域逐渐扩展,在混凝土板底面产生一条主裂缝,并且裂缝沿45°开展;板背爆面出现受拉破坏的裂缝,表现出明显的双向弯曲(图7(b)和(c))。而在水下爆炸时(图7(d)~(f)),冲击波传到板上,作用到板中心区域,导致板开裂破坏(图7(e));且该破坏形态不断向板内部扩展,压缩应力波传播至背爆面时反射形成强拉伸波,产生损伤拉伸破坏,形成贯穿性裂缝(图7(f))。

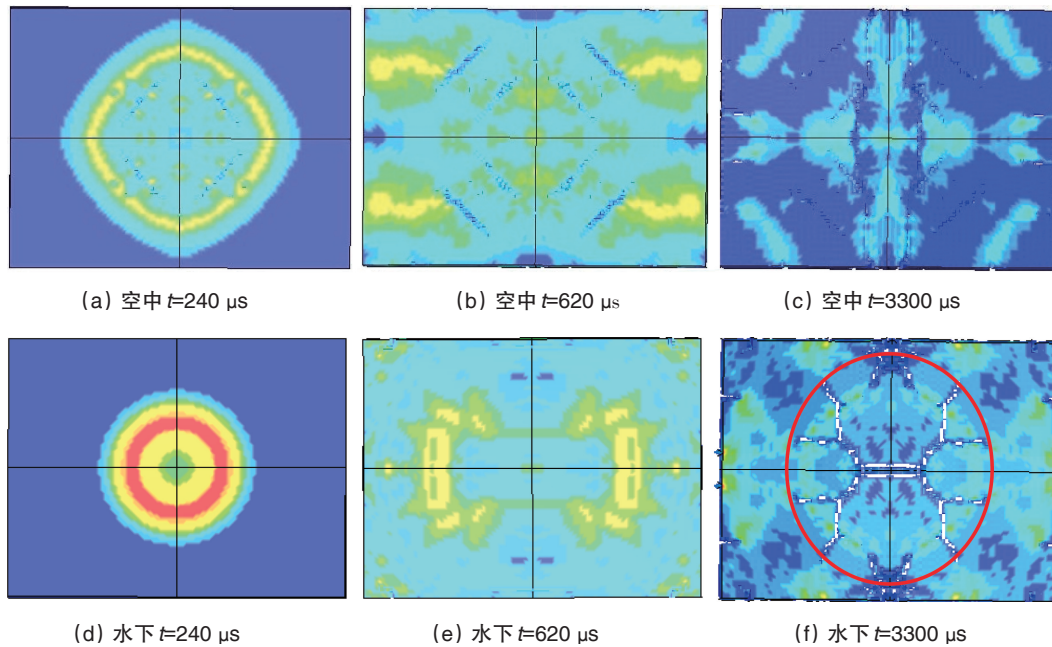


图6 板迎爆面有效应力云图

Fig. 6 Effective stress contour on the upper surface of the dam subjected to explosions

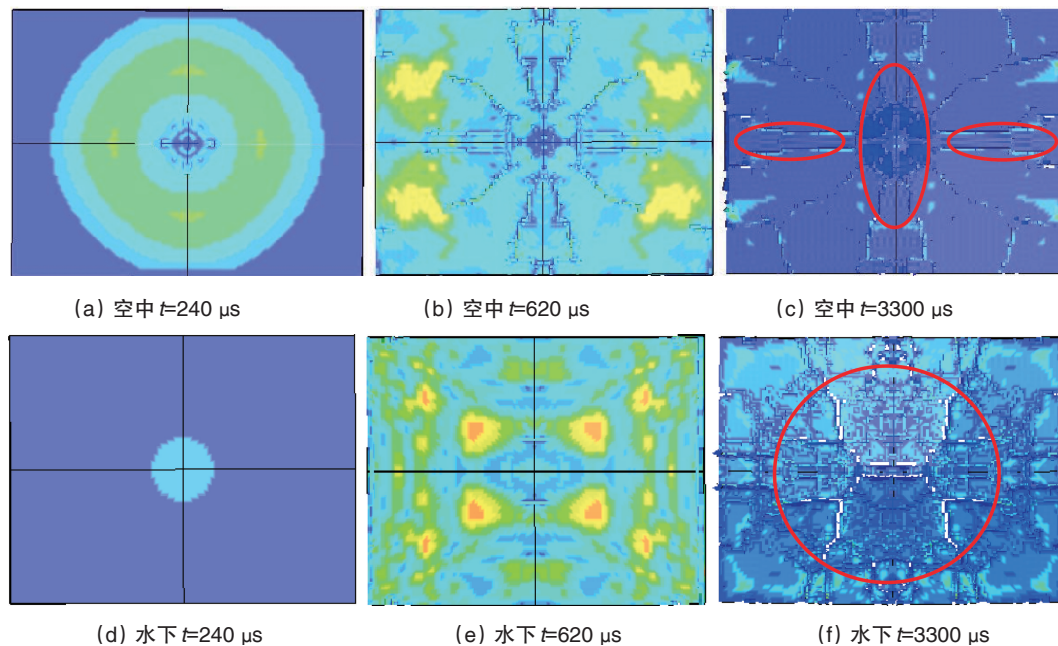


图7 板背爆面有效应力云图

Fig. 7 Effective stress contour on the bottom face of the dam subjected to explosions

通过上述对比分析可知,无论是迎爆面还是背爆面,在水下爆炸冲击荷载作用下混凝土板的破坏明显较相同炸药量下空中爆炸时严重。水下爆炸产生的冲击波对板的破坏作用强于空中的爆炸,更易造成板的破坏,对可能遭受空中和水下两种不同爆炸方式的结构,应着重注意水下爆炸时结构的动态响应。

为了进一步分析钢筋混凝土板在空中及水下爆炸的动态响应,在钢筋混凝土板迎爆面不同位置处取3个计算点(图8中插图),对比分析空中和水下爆炸荷载作用下混凝土板上各计算点处的压力时程曲线,如图8所示。可以看出:在空中和水下爆炸时,各计算点压力均是在爆炸开始后瞬间达到峰值。在空中爆炸时(图8(a)),爆炸作用时间约为2000  $\mu\text{s}$ ,之

后各计算点压力曲线趋于平缓。而在水下爆炸时(图8(b)),爆炸时间持续较空中长,约为6000  $\mu\text{s}$ ,且水下压力曲线峰值不断波动并出现多峰,峰值逐渐减小,6000  $\mu\text{s}$ 后开始趋于平缓。这主要是由于水下爆炸时冲击波的透射、散射,波阵面后的水域中将有能量的扰动进而对板反复作用,从而导致压力曲线出现波动和多峰现象<sup>[18]</sup>。并且由图8还可以看出,在空中爆炸荷载作用下,板上3个计算点的压力峰值分别为:23.69、23.59、81.31 MPa,比水下相同点的压力峰值分别高7.61、62.35、19.58 MPa。此外需要注意的是,由于爆炸冲击波能量到达板迎爆面后,一部分能量用于冲击波反射(此时冲击波未达到1、2点),其余能量向板四周传播,故两种介质中板中心3点的压力峰值均大于1、2点的压力峰值。

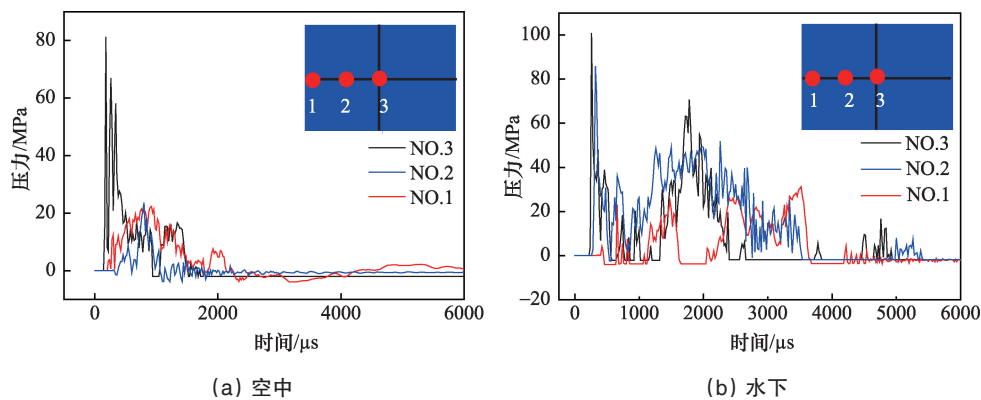


图8 板迎爆面上各测点的压力时程曲线

Fig. 8 The time history curve of pressure at measurement points in the slab

### 2.3 不同炸药量和起爆距离下空中和水下爆炸时钢筋混凝土板动态响应对比分析

上述关于钢筋混凝土板在不同介质中爆炸时的动态响应均基于相同炸药量(2.0 kg)和起爆距离(0.6 m)下,接下来进一步分析不同炸药量及不同起爆距离对两种介质中爆炸时钢筋混凝土板动态响应的影响。

首先保持其他参数不变,炸药量分别为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 kg,分析不同炸药量下钢筋混凝土板在空中及水下爆炸时,板迎爆面中心点压力峰值的变化规律,结果如图9所示。可以看出,不同炸药量下水下爆炸时板迎爆面中心点的压力峰值均大于空中爆炸时。两种介质中,随着TNT炸药量的增加,爆炸冲击波能量增加,对板的冲击力增强,导致压力峰值均逐渐增大。统计不同炸药量下空中及水下爆炸时板中心点压力峰值,如表3所示。可以看出,当炸药量由0.5 kg增加到2.5 kg时,水下爆炸荷载作用下板中心点峰值压力由48.61 MPa增加为152.92 MPa,增幅为2.14倍;而空中爆炸板中心点峰值压力由7.63 MPa增加为115.93 MPa,增幅为14.19倍。由此可见,同样条件下空中爆炸时峰值压力随着炸药量增加而增加的幅度较大,这主要是由于在近爆区域,空中的爆炸冲击波几乎是以炸药爆炸的速度传播,而由于水的

压缩性小、密度大及形成脉动气泡等原因,水下冲击波传播速度小于空中。此外,由表1中不同炸药量下空中和水下爆炸时板中心点压力峰值的相差倍数对比还可以看出,炸药量改变时,峰值压力相差倍数不同。如在0.5 kg炸药量下,空中与水下爆炸时板中心点峰值压力相差6.37倍,而在2.5 kg炸药量下,峰值压力相差倍数为1.32倍。故由此可见,同样起爆距离下,炸药量越小时,不同介质中爆炸时冲击波峰值压力相差越大。

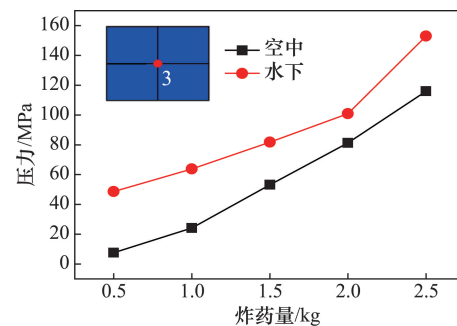


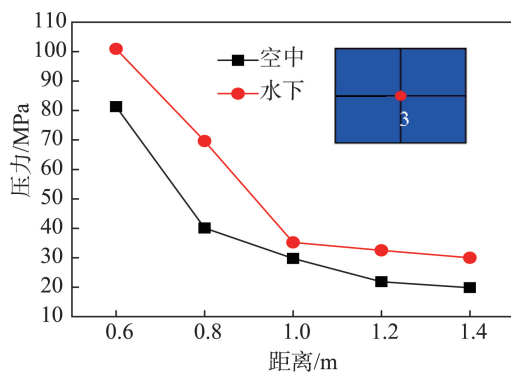
图9 不同炸药量下空中和水下爆炸时板中心点压力峰值

Fig. 9 Pressure at slab center during the air and water blasts with different TNT masses

**表1 不同炸药量下空中及水下爆炸时板中心点压力峰值**  
**Table 1 Pressure at slab center during in the air and water blasts with different TNT masses**

炸药量/kg	水下压力峰值/MPa	空中压力峰值/MPa	相差倍数
0.5	48.61	7.63	6.37
1.0	63.75	24.12	2.64
1.5	81.78	53.15	1.53
2.0	100.89	81.31	1.24
2.5	152.92	115.93	1.32

保持其他参数不变,在起爆距离分别为0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 m时,分析不同起爆距离下钢筋混凝土板在空中及水下爆炸时,板迎爆面中心点压力峰值的变化规律(图10)。可以看出,不同起爆距离下水下爆炸时板迎爆面中心点的压力峰值均大于空中爆炸。两种介质中,随着起爆距离的增加,压力峰值逐渐减小,但是减少幅度均逐渐变缓,原因是由起爆距离增加时,爆炸冲击波能量减少,对板迎爆面的冲击力减弱而导致的。统计不同起爆距离下空中及水下爆炸时板中心点压力峰值,如表2所示。



**图10 不同起爆距离下空中和水下爆炸时板中心点压力峰值**

**Fig. 10 Pressure at slab center blast during the air and water blasts at different distances**

**表2 不同起爆距离下空中及水下爆炸时板中心点压力峰值**  
**Table 2 Pressure at slab center blast during the air and water blasts at different distances**

起爆距离/m	水下压力峰值/MPa	空中压力峰值/MPa	相差倍数
0.6	100.89	81.31	1.24
0.8	69.64	40.10	1.74
1.0	35.19	29.79	1.18
1.2	32.53	21.85	1.49
1.4	29.99	19.85	1.51

可以看出,当炸药量由0.6 m增加到1.4 m时,水下爆炸荷载作用下板中心点峰值压力由100.89 MPa减少为29.99 MPa,减小幅度为0.7倍;而空中爆炸板中心点峰值压力由81.31 MPa减少为19.85 MPa,减小幅度为0.75倍。这表明,同样条件下不同介质中爆炸时峰值压力随着起爆距离的增加而减小的幅度相差不大。而且,随着起爆距离的改变,空中和水下爆炸时板中心点压力峰值的相差倍数变化也不明显,比如起爆距离为0.6 m时,空中与水下爆炸时板中心点峰值压力相差1.24倍,而1.4 m时,峰值压力相差倍数为1.51倍。由此可见,在近爆区域内,改变起爆距离,不同介质中爆炸时冲击波峰值压力相差倍数变化不大。

### 3 结论

利用LS-DYNA软件,采用流固耦合的方法对钢筋混凝土板在空中和水下爆炸荷载作用下的动态响应进行了数值模拟,对比分析了爆炸冲击波在空中和水下的传播特性,并进一步研究了两种介质下爆炸冲击波对钢筋混凝土板动态响应。研究发现,炸药量及起爆距离均相同情况下,爆炸冲击波在空中和水下的传播特性存在较大的差异:在空中的传播速度较水下快,并且冲击波压力在空中衰减较水下快;但水下爆炸冲击波压力峰值较空中爆炸大很多,对结构的潜在破坏能力较强。在空中和水下爆炸时,压力时程曲线变化规律相似,压力瞬间达到峰值,随后以指数形式衰减;并与相应的经验公式进行了对比分析,验证了数值计算的可靠性。对两种介质中爆炸时钢筋混凝土板破坏形态对比发现,冲击波传播至板底面时,发生反射形成强拉伸波,导致板底面出现损伤拉伸破坏;无论是迎爆面还是背爆面,水下爆炸冲击荷载作用下的混凝土板损伤破坏程度较同等炸药量及起爆距离下空中爆炸荷载作用时大,对可能遭受空中和水下两种不同爆炸方式的结构,应着重注意水下爆炸下的抗爆设计。最后,通过对比分析不同起爆距离及不同炸药量下空中和水下爆炸时钢筋混凝土板的动态响应可知,同样起爆距离下,炸药量越小时,不同介质中爆炸时冲击波峰值压力相差越大;而在近爆区域内,同样炸药量下改变起爆距离,不同介质中爆炸时冲击波峰值压力相差倍数变化不大。该相关研究成果可为空中和水下等不同介质中爆炸时钢筋混凝土结构的抗爆防护设计提供一定的参考依据。

### 参考文献(References)

[1] 谭继可, 潘金玉, 杨慧, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的动力响应分析[J]. 长江大学学报, 2013, 10(13): 114-116.  
 Tan Jike, Pan Jinyu, Yang Hui, et al. Analysis on dynamic response of reinforced concrete slab subjected to under explosion[J]. Journal of Yangtze University, 2013, 10(13): 114-116.

[2] 陈舸, 王龙侃, 祝祥刚, 等. 水下爆炸荷载作用下加筋板的动态响应分析[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(2): 280-283.  
 Chen Ge, Wang Longkan, Zhu Xianggang, et al. Analysis on dynamic response of stiffened panels subjected to underwater explosion[J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22(2): 280-283.

- [3] 宁心, 李晓炎, 杨志焕, 等. 水下冲击波和空气冲击波传播速度及物理参数的对比研究[J]. 解放军医学杂志, 2004, 29(2): 97-99.  
Ning Xin, Li Xiaoyan, Yang Zhihuan, et al. A comparative study on the propagation speed and physical parameters of underwater blast wave and air blast wave[J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2004, 29(2): 97-99.
- [4] Librescu L, Oh S Y, Hohe J. Dynamic response of anisotropic sandwich flat panels to underwater and in-air explosions[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(13): 3794-3816.
- [5] 张社荣, 王高辉, 王超, 等. 水下爆炸冲击荷载作用下混凝土重力坝的破坏模式[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5): 501-507.  
Zhang Sherong, Wang Gaohui, Wang Chao, et al. Failure mode analysis of concrete gravity dam subjected to underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5): 501-507.
- [6] 张社荣, 孔源, 王高辉. 水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(13): 148-153.  
Zhang Sherong, Kong Yuan, Wang Gaohui. Comparative analysis on propagation characteristics of shock wave induced by underwater and air explosions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(13): 148-153.
- [7] 张社荣, 孔源, 王高辉. 水下和空中爆炸时混凝土重力坝动态响应对比分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 47-54.  
Zhang Sherong, Kong Yuan, Wang Gaohui. Dynamic responses of a concrete gravity dam subjected to underwater and air explosions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17): 47-54.
- [8] 郭樟根, 曹双寅, 王安宝, 等. 爆炸荷载作用下外贴FRP加固钢筋混凝土双向板试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 91-97.  
Guo Zhanqen, Cao Shuangyin, Wang Anbao, et al. Experimental study on performance of FRP strengthened RC two-way slabs under explosion load[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 91-97.
- [9] 陈万祥, 严少华. CFRP加固钢筋混凝土梁抗爆性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 1-9.  
Chen Wanxiang, Yan Shaohua. Experimental study of RC beams strengthened with CFRP under blast loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 1-9.
- [10] 龚顺风, 邓欢, 朱升波, 等. 近爆作用下钢筋混凝土板动态破坏的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 21-24.  
Gong Shunfeng, Deng Huan, Zhu Shengbo, et al. Numerical simulation for dynamic failure of a reinforced concrete slab under close-in explosion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 21-24.
- [11] Gancha Tanapornraweekit, Nicholas Haritos, Priyan Mendis. Behavior of FRP-RC Slabs under Multiple Independent Air Blasts[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2010, 25(5): 433-440.
- [12] Wang W, Zhang D, Lu F, et al. Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 27: 41-51.
- [13] 胡毅亭, 贾宪振, 饶国宁, 等. 水下爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(2): 134-139.  
Hu Yiting, Jia Xianzhen, Rao Guoning, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave and bubble pulse[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 134-139.
- [14] 丁旭权, 周盼. 水下爆炸作用下板的动态响应分析[J]. 中国水运, 2014, 14(1): 332-334.  
Ding Xuquan, Zhou Pan. Analysis on dynamic response of underwater explosion loading[J]. China Water Transport, 2014, 14(1): 332-334.
- [15] 张志刚, 李姝雅, 廖红建. 爆炸荷载下碳纤维布加固混凝土板的抗弯性能研究[J]. 应用力学学报, 2008, 25(1): 150-153.  
Zhang Zhigang, Li Shuya, Liao Hongjian. Flexural resistance of concrete plate strengthened with CFRP under explosive loading[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(1): 150-153.
- [16] 潘金龙, 周甲佳, 罗敏. 爆炸荷载下FRP加固双向板动力响应数值模拟[J]. 解放军理工大学学报, 2011, 12(6): 643-648.  
Pan Jinlong, Zhou Jiajia, Luo Min. Numerical simulations on dynamic responses of FRP strengthened reinforced concrete two-way slabs under blasting loading[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2011, 12(6): 643-648.
- [17] 时党勇. 基于ANSYS/LS-DYNA8.1进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
Shi Danyong. Based on ANSYS/LS-DYNA8.1 explicit dynamic analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [18] 张婧, 王春雨, 施兴华. 远场水下爆炸结构动态响应的数值模拟方法研究[J]. 爆破, 2014, 31(3): 118-139.  
Zhang Jing, Wang Chunyu, Shi Xinghua. Numerical analysis method of structure dynamic response subjected to far-field underwater explosions[J]. Blasting, 2014, 31(3): 118-139.
- [19] Henrych J, Major R. The dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [20] Cole R H. Underwater explosions[M]. New York: Dover Publications, 1956.

## Dynamic responses of a concrete slab subjected to air and underwater explosions

KONG Xiangqing, ZHAO Qian, QU Yandong, ZHANG Wenjiao

Department of Civil & Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China

**Abstract** The numerical simulation models for explosions in air and water are established by using the finite element software ANSYS/LS-DYNA. The explosion shock wave speeding characteristics in different media are compared, and the dynamic responses of the reinforced concrete slab in a typical air explosion and an underwater explosion are investigated. Furthermore, the dynamic response of the air and underwater explosive loads is analyzed in the cases with different amounts of explosive and at different initiation distances. It is shown that the explosion shock wave propagation is faster in the air than in the water; and the shock wave pressure is more quickly attenuated in the water. But the pressure peak of the shock wave in the water is larger than in the air. An underwater explosion may cause a significant damage to the concrete slab. The dynamic response of a concrete slab subjected to an underwater explosion is significantly higher than that for an air blast with the same mass of charge, both on the surface and on the back of blasting.

**Keywords** reinforced concrete slab; air explosion; water explosion; shock wave speeding characteristics; dynamic response

(编辑 傅雪)