

文章编号:1006-9941(2024)09-0972-14

接触爆炸下波纹钢-混凝土板复合结构水下防爆效果评价

曹克磊¹,付乔峰²,张建伟¹,黄锦林³,赵瑜^{1,2}

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045; 3. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635)

摘要: 为探究不同波纹钢-混凝土板复合结构的水下抗爆防护效果,采用有限元-光滑粒子流体动力学耦合算法(FEM-SPH)建立水下多介质耦合爆炸模型;设计不同波纹钢-混凝土板复合结构防护方案,探究不同复合结构防护层(含3,6,9,12 mm厚波纹钢复合结构、含30°,45°,60°,75°波纹钢复合结构和含10,30,50,70 mm波高波纹钢复合结构)的水下削波吸能效果,并提出耗能分担率对复合结构进行防护效果评价。研究表明:混凝土板迎爆面与背爆面的模拟结果与试验结果较为吻合,验证了水下接触爆炸模拟过程;不同复合结构防护方案下,含12 mm厚波纹钢复合结构、含75°波纹钢复合结构和含70 mm波高波纹钢复合结构防护方案较无防护方案测点峰值压力最大降幅为63.2%,60%和57.9%,最大防护率分别为63.2%,60.0%和57.9%,耗能分担率为69.48%,66.26%和63.51%;最优型式(厚度为12 mm/夹角为75°/波高为70 mm)复合结构的削波吸能效果及防护效果均显著优于单一因素影响下的复合结构。研究成果可为不同波纹钢-混凝土板复合结构在水下抗爆防护领域的应用提供理论基础。

关键词: 水下接触爆炸;波纹钢-混凝土板复合结构;削波吸能效果;防护效果评价

中图分类号:TJ55;O38

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2024032

0 引言

近年来,恐怖袭击、化工厂爆炸以及燃气管道爆炸等事件频繁发生,爆炸所产生的冲击波对水工混凝土结构的安全性和耐久性造成损害,严重威胁着人类生命和财产安全。对于结构抗爆而言,常见的爆炸袭击方式主要是空中和水中爆炸,且已有研究表明水下爆炸对结构的损伤要比空气爆炸下对结构的损伤更为严重^[1]。值得一提的是,现阶段对于水下混凝土结构防爆措施和防爆设计方面尚未有统一规范指导,有待深入研究为水下结构抗爆防护理论体系的建立奠定基础。因此,开展水下混凝土结构的防爆设计、抗爆防护机理和效果研究是十分必要的。

对于水下结构抗爆性能研究最直接的方式就是开展离心机试验或者水下爆炸试验,如李明等^[2]探究水下爆炸离心试验中冲击波荷载的传播特性;Li等^[3]探讨边界条件对水下爆炸作用下混凝土重力坝离心模型的影响;李旭等^[4]开展水下爆炸试验探究气泡与混凝土板的作用过程;Zhou等^[5]开展水下接触爆炸试验探究伴随钢板失效气泡的演化规律。通过离心机试验或者水下爆炸试验能够较好地获取水下爆炸荷载下结构的动力响应、破坏特征及毁伤模式,但上述方法因存在成本高、可控性难度大、危险性高、可重复性差等不足而限制其在该领域研究的广泛应用。鉴于此,国内外学者多采用数值模拟方法来研究爆炸荷载作用下结构的动力响应、毁伤过程等性能特征。对于普通混凝土结构而言,其在爆炸荷载作用下通常会产生颇为严重的损伤破坏,国内外学者多采用增设防护层的方式来提高被防护结构的抗爆性能,如张守旻等^[6]探究不同涂覆厚度聚脲涂层的沉箱码头在非接触爆炸下的毁伤特征;赵小华等^[7]开展水下爆炸试验探究高聚物层对混凝土板的防护性能;袁鹏程^[8]探究新型地聚物混凝土板的防护机理;Zhao等^[9]采用水下爆炸试验探究钢

收稿日期:2024-01-22;修回日期:2024-03-01

网络出版日期:2024-04-15

基金项目:国家自然科学基金(51979188);河南省高等学校重点科研项目(24A570002);天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室开放基金(HESS-2230);华北水利水电大学博士引进人才科研启动基金(40921)

作者简介:曹克磊(1990-),男,讲师,主要从事爆炸荷载下结构毁伤效应评估及防爆设计研究。e-mail: caokelei456@163.com

引用本文:曹克磊,付乔峰,张建伟,等.接触爆炸下波纹钢-混凝土板复合结构水下防爆效果评价[J].含能材料,2024,32(9):972-985.

CAO Ke-lei, FU Qiao-feng, ZHANG Jian-wei, et al. Evaluation of Underwater Explosion-proof Effect of Corrugated Steel-concrete Slab Composite Structure Under Contact Explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(9):972-985.

纤维掺量对混凝土板抗爆性能的影响;Wang等^[10]分析复合材料层合板夹芯板在水下爆炸荷载下的失效机理。通过上述研究发现,大多学者采用防护涂层或在混凝土中添加高强度材料的方式对普通混凝土结构进行加固,而采用复合结构对结构进行加固的方式却很少。此外,通过文献调研发现,波纹钢具有一定的抗爆性能^[11-12],但单一结构的消波吸能效果具有一定的局限性,且已有学者采用复合结构来提高其抗爆性能,如杨光瑞等^[13]采用聚异氰酸酯噁唑烷聚合物高分子材料(POZD)涂覆在波纹钢上以此来加固钢筋混凝土板,探究其抗爆性能及破坏机理;杨程风等^[14]开展波纹钢加固钢筋混凝土板的接触爆炸实验探究波纹钢加固钢筋混凝土板的抗爆性能,叶昕^[15]探究了双波纹钢板-混凝土组合剪力墙板的抗爆性能。

鉴于水利工程、海洋工程的快速发展,涉水建筑物数量越来越多,一旦遭受恐怖袭击爆炸将会带来巨大的损失,因此,本研究拟探究波纹钢-混凝土板复合结构加固水下结构的抗爆性能及防护效果,采用LS-DYNA中有限元-光滑粒子流体动力学耦合算法(FEM-SPH)建立波纹钢-混凝土板-墙面板三维精细化有限元模型,探究水下接触爆炸荷载下不同波纹钢-混凝土板复合结构的削波吸能效果,提出三种评价指标,评价不同波纹钢-混凝土板复合结构的防护效果,并从多角度对比分析最优型式下波纹钢-混凝土板复合结构的防护效果。研究结果可为水工结构抗爆防护设计及应用提供理论参考。

1 实验部分

1.1 水下爆炸试验及装置

本研究参考文献^[16]中水下爆炸试验,重现抗压强度为38 MPa混凝土板水下接触爆炸试验过程。试验中混凝土板长、宽、高尺寸分别为1000, 500, 60 mm,选用HRB400钢筋,保护层厚度为20 mm,纵向和横向钢筋直径均为6 mm,见图1。爆炸试验选择在直径和深度均为2 m的钢罐中进行,其中试验水深为1.8 m, TNT炸药量为6 g,且炸药位于板的中心位置,如图2所示。

1.2 水下多介质耦合仿真试验

1.2.1 仿真试验模型

基于FEM-SPH耦合算法原理^[17](图3),建立文献^[16]中水下混凝土板接触爆炸三维有限元模型,重现爆炸试验过程并将模拟结果与试验结果对比,验证本

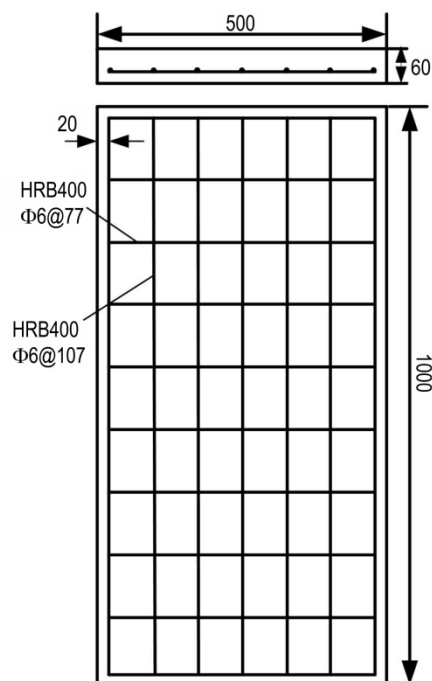


图1 混凝土板尺寸及钢筋布置图

Fig.1 Size of concrete slab and reinforcement layout

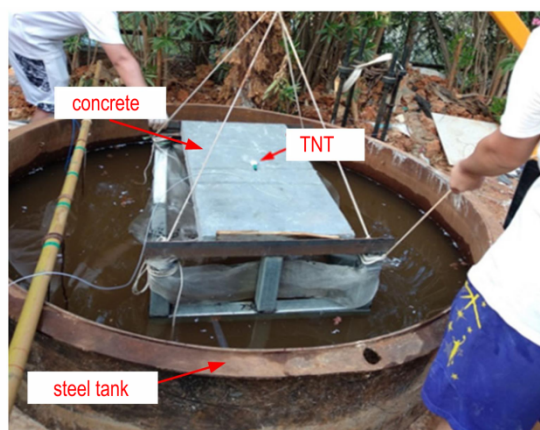


图2 水下接触爆炸试验图

Fig.2 Test diagram of underwater contact explosion

研究采用的水下多介质耦合爆炸模拟方法的有效性。因模型具有对称性,仅建立1/4仿真模型,如图4所示。模型中距爆源远处的混凝土板和远处水域采用实体单元模拟,钢筋采用Beam单元,仅炸药、距爆源近处的混凝土板(60 mm×60 mm×30 mm)和炸药周围200 mm的水体采用SPH粒子;混凝土板、钢筋和炸药网格尺寸均为5 mm,水体部分以5, 10, 20 mm从炸药中心向四周划分网格。此外,在模型对称面施加对称边界,底面和侧面施加固支边界,顶面施加无反射边界,以此来模拟试验中混凝土板位于钢罐中的环境;混凝土板放在钢架上,模型中在板两端施加固定约束。

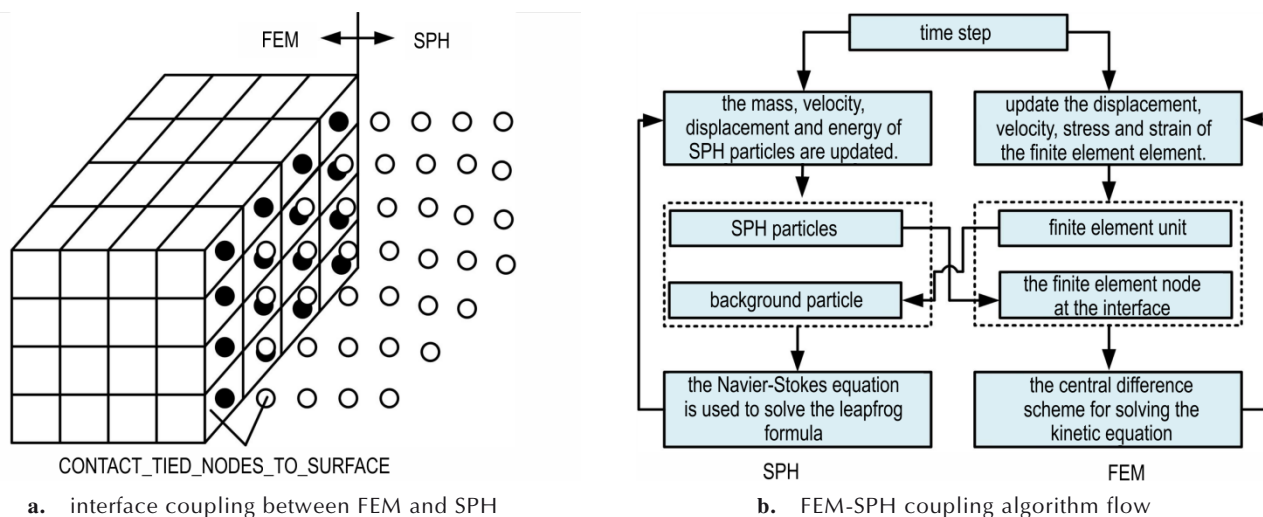


图3 FEM-SPH耦合算法原理

Fig.3 Principle of FEM-SPH coupling algorithm

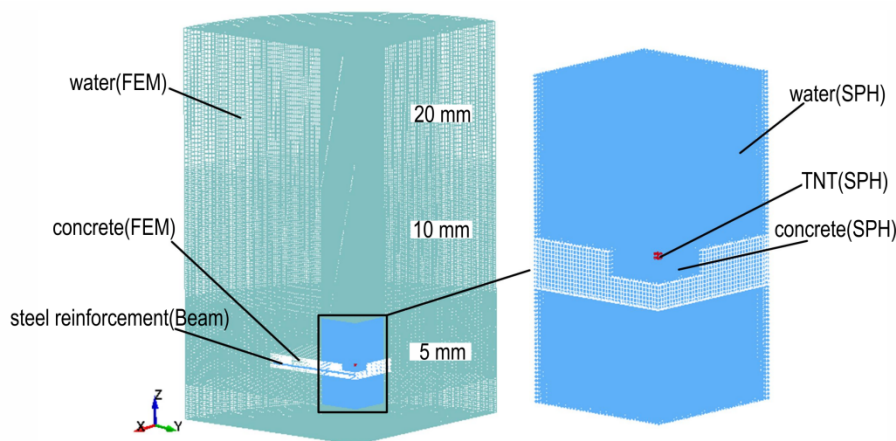


图4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

1.2.2 模型验证

将水下接触爆炸荷载下混凝土板的数值模拟结果与试验结果进行对比,结果如图5所示。由图5可知,混凝土板迎爆面模拟结果在爆源附近出现损伤并伴有局部单元失效,与试验结果中迎爆面具有微小损伤和轻微裂缝现象吻合较好;混凝土板背爆面模拟结果和试验结果均呈现出局部剥落现象,数值模拟结果中混凝土板背爆面剥落区尺寸为13 cm×18 cm与文献[16]的试验结果(12 cm×19 cm)基本一致,印证模拟方法的有效性和计算结果的准确性。综上所述,本研究采用的水下多介质耦合算法能够较好地表征水下接触爆炸荷载下混凝土损伤演化特征及失效模式等过程,可用于研究波纹钢-混凝土板复合结构的水下抗爆性能及防爆效果。

1.3 波纹钢-混凝土板复合结构防爆模拟

本研究拟定不同波纹钢-混凝土板复合结构防护方案并确定复合结构中各部分材料的模型参数,建立水下接触爆炸多介质耦合防爆模型,开展水下接触爆炸下波纹钢-混凝土板复合结构防爆模拟计算,探究水下接触爆炸条件下波纹钢-混凝土板复合结构防护层(简称复合结构防护层)对墙面板的防护效果。

1.3.1 波纹钢-混凝土板复合结构防爆模型建立

以1.2.2节中FEM-SPH耦合算法的有效性验证为基础,建立“复合结构-墙面板-炸药-水体”多介质耦合水下接触防爆模型,如图6所示。模型中距爆源远处的混凝土板、远处水域、波纹钢板和墙面板采用实体单元模拟,钢筋采用Beam单元,仅炸药、距爆源近处的混凝土板(150 mm×150 mm×50 mm)和炸药周围

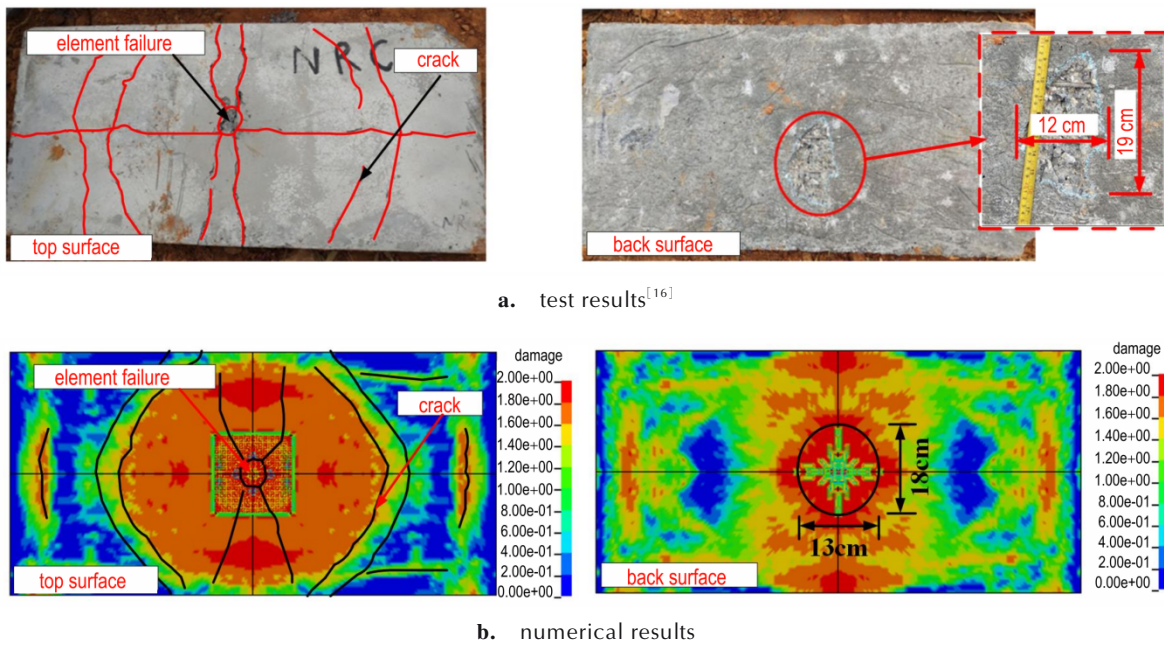


图5 混凝土板试验与数值模拟结果比较

Fig.5 Comparison of test and numerical simulation results of concrete slab

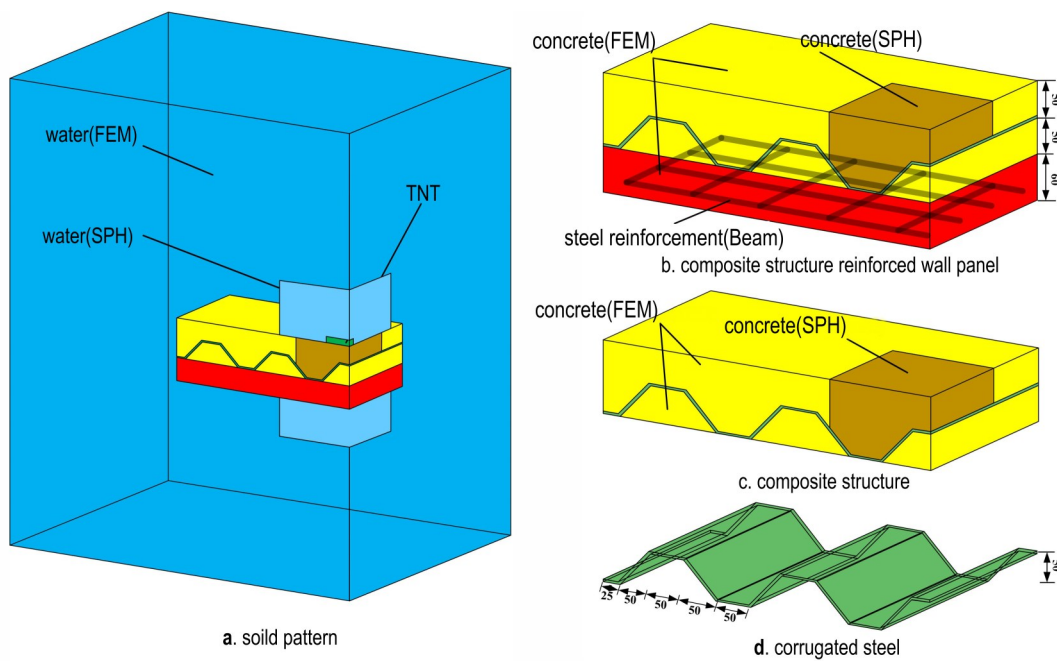


图6 波纹钢-混凝土板复合结构防爆模型

Fig.6 Explosion-proof model of corrugated steel-concrete composite structure

200 mm 的水体采用 SPH 粒子;混凝土板、波纹钢、钢筋和炸药网格尺寸均为 5 mm,水体网格沿远离炸药中心呈梯度分布(5, 10, 20 mm);模型中共有 1048410 个实体单元和 142790 个 SPH 粒子。混凝土 SPH 粒子和波纹钢采用 CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE 耦合,混凝土实体单元与波纹钢采用 CONTACT_AUTOMATIC_SUR-

FACE_TO_SURFACE_TIEBREA 进行耦合,混凝土和钢筋之间采用 CONSTRAINED_BEAM_IN_SOILD 耦合。此外,TNT 炸药当量为 120 g,水体外围边界为自由界面。

1.3.2 材料参数

TNT 炸药采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型和 *EOS_JWL 状态方程^[18],其表达式为:

$$\rho = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中, ρ 为爆轰压力, MPa; A 、 B 为材料压力参数, MPa; R_1 、 R_2 、 ω 为状态方程量纲系数; E_0 为单元体积的内能, $\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。数值模型中 $\rho=1.63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $A=373.77 \text{ MPa}$, $B=3.75 \text{ MPa}$, $R_1=4.15$, $R_2=0.9$, $\omega=0.35$, $E_0=8.9 \text{ GJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

水体采用 *MAT_NULL 模型和 *EOS_GRUNEISEN 状态方程^[19], 压缩材料的压力为:

$$\rho = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (2)$$

膨胀材料的压力为:

$$\rho = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (3)$$

式中, ρ_0 为初始密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; E 为内能, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$; μ 为相对体积; C 为 v_s-v_p 曲线的截距, $\text{m} \cdot \text{s}$; S_1 、 S_2 、 S_3 为 v_s-v_p 曲线斜率系数; γ_0 是系数; a 是一阶体积修正系数。数值模型中 $\rho_0=1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $C=2417 \text{ m} \cdot \text{s}$, $S_1=1.41$, $S_2=0$, $S_3=0$, $\gamma_0=1.0$, $a=0$ 。

波纹钢和钢筋采用能描述高应变率和高温下材料大变形及屈服应力变化的 JOHNSON-COOK 模型和 Gruneisen 状态方程^[20], 其表达式为:

$$\sigma_y = (A + B \varepsilon_p^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (4)$$

$$T^* = \frac{(T - T_{\text{room}})}{(T_{\text{melt}} - T_{\text{room}})} \quad (5)$$

式中, σ_y 为屈服应力, MPa; A 、 B 、 n 为参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 和参考温度 T_{room} 下的材料初始屈服应力、应变硬化模量和硬化指数, GPa; C 为材料应变率强化参数; ε_p 为有效塑性应变; m 为材料热软化参数; T_{room} 为室温, $^{\circ}\text{C}$; T_{melt} 为熔点, $^{\circ}\text{C}$ 。数值模型中 $A=0.345 \text{ GPa}$, $B=0.336 \text{ GPa}$, $n=0.42$, $C=0.026$, $m=1.4$, $T_{\text{melt}}=1720 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

混凝土采用 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 模型^[20], 并通过 *MAT_ADD_EROSION 关键字定义失效准则, 最大主应变取为 0.01^[21]。该模型可以自动生成参数, 只需将密度、泊松比、单轴抗压强度和压力-应变率提高系数关系曲线输入, 便可自动生成材料模型的其他参数和状态方程 *EOS_TABULATED_COMPACTON 的参数, 自动生成的参数将在 LS-DYNA 的 message 文件中。无侧限抗压强度、密度 ρ 和泊松比 γ 分别为 30 MPa、 $2.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 0.19。混凝土材料的应变率效应可用动力增大系数表示。

混凝土抗压强度动力增大系数 DIF_C :

$$\text{DIF}_C = \frac{f_d}{f_{cs}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_{cs}} \right)^{1.026\alpha}, & \dot{\varepsilon}_d \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ \gamma \left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_{cs}} \right)^{1/3}, & \dot{\varepsilon}_d > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中, f_d 和 f_{cs} 分别为动、静态抗压强度, MPa。 $\dot{\varepsilon}_{cs}$ 为静态压缩应变率, 300 s^{-1} 。 α 和 γ 为应变率系数。

混凝土抗拉强度动力增大系数 DIF_T :

$$\text{DIF}_T = \frac{f_t}{f_{ts}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_{ts}} \right)^{\delta}, & \dot{\varepsilon}_t \leq 1 \text{ s}^{-1} \\ \beta \left(\frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_{ts}} \right)^{1/3}, & \dot{\varepsilon}_t > 1 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中, f_t 和 f_{ts} 分别为应变率为 $\dot{\varepsilon}$ 时动抗拉强度和应变率为 $\dot{\varepsilon}_{ts}$ 时静抗拉强度, MPa。 β 和 δ 为应变率系数。

1.3.3 波纹钢-混凝土板复合结构防护方案设计

波纹钢具有一定的削波吸能效果, 但涉及波纹钢形状参数(波纹钢厚度、夹角、波高)变化对其抗爆性能影响方面的研究成果较少, 不利于其在结构抗爆防护设计方面的应用, 因此本研究通过设计波纹钢形状参数变化来探究其对波纹钢-混凝土板复合结构防护效果的影响。复合结构防护层中 4 种不同波纹钢厚度参数分别为 3, 6, 9 mm 和 12 mm, 4 种不同波纹钢夹角参数分别为 30° 、 45° 、 60° 和 75° , 以及 4 种不同波纹钢波高参数分别为 10, 30, 50 mm 和 70 mm, 其中分别将含 3 mm 厚波纹钢复合结构、含 45° 夹角波纹钢复合结构和含 50 mm 波高波纹钢复合结构作为对照组, 相关波纹钢截面见表 1。

1.4 不同波纹钢-混凝土板复合结构的水下削波效果

1.4.1 测点峰值压力曲线

为更好地探究水下爆炸条件下波纹钢-混凝土板复合结构防护层的削波效果, 在距炸药中心 200 mm 处不同部位选取 6 个典型测点 (S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 和 S_6), 用于对比分析不同波纹钢-混凝土板复合结构防护层对冲击压力波传播规律的影响。测点分布在复合结构上表面、墙面板上下表面、距墙面板下表面一定距离 (100, 200, 300 mm), 如图 7 所示。

文中仅列出了未加固、含 3 mm 厚度波纹钢、含 30° 夹角波纹钢和含 10 mm 波高波纹钢复合结构防护方案下各测点峰值压力曲线。不同防护方案下各测点峰值压力曲线如图 8 所示。由图 8a 可知, 未加固防护方案下测点 S_1 在 0.08 ms 时刻压力曲线开始发生突变, 到 0.10 ms 时达到峰值, 此刻峰值压力为 0.1282 GPa; 随

着爆炸冲击波向下传播,测点 S2,S3,S4,S5 和 S6 的压力分别在 0.13,0.16,0.21,0.27 ms 和 0.32 ms 时刻达到峰值,且最大峰值压力分别为 0.0927, 0.0481, 0.0311, 0.0295 GPa 和 0.0262 GPa,最大降幅为 79.6%,说明随着冲击波传播时间的增加,冲击波的峰值压力逐渐被削弱。由 8b 可知,爆炸冲击波在 0.08

ms 时刻传播至测点 S1,此时压力急剧增大,当计算至 0.11 ms 时压力达到最大;随着冲击波的传播,测点 S2,S3,S4,S5 和 S6 的峰值压力分别在 0.18, 0.19, 0.24, 0.29 ms 和 0.34 ms 达到最大,相较于未加固墙面工况下各测点达到峰值压力的时间均有延迟,主要有两部分原因:一是复合结构防护层会增加结构的

表 1 波纹钢截面

Table 1 Corrugated steel section

| pattern | scheme | cross section |
|-----------------------|--------|---------------|
| different thickness | 3 mm | |
| | 6 mm | |
| | 9 mm | |
| | 12 mm | |
| different angle | 30° | |
| | 45° | |
| | 60° | |
| | 75° | |
| different wave height | 10 mm | |
| | 30 mm | |
| | 50 mm | |
| | 70 mm | |

厚度,从而减缓冲击波到达时间;二是复合结构的结构形式具有一定的削波能力。由图 8c 可知,爆炸发生后,测点的压力曲线首先基本无变化,随后开始出现拐点且压力值瞬间达到最大;随着距爆源距离的增大,测

点的峰值压力逐渐减小,说明爆炸冲击波在水中传播,其自身的能量逐渐被耗散。由图 8d 可知,各测点的峰值压力分别为 0.1282, 0.0456, 0.0386, 0.0291, 0.0271 GPa 和 0.0241 GPa,说明距爆源的距离越远,测点受冲击波的影响就越小。

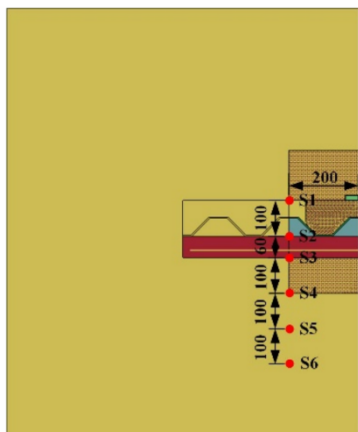
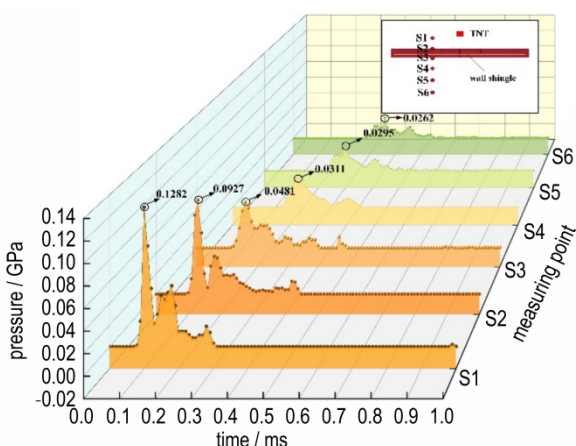


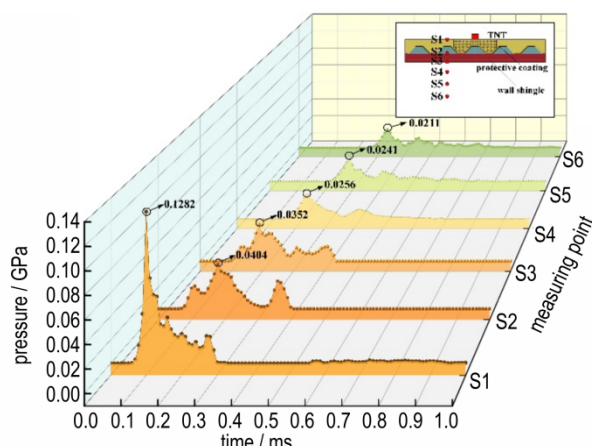
图 7 测点布置图
Fig.7 Measurement point layout

1.4.2 测点峰值压力

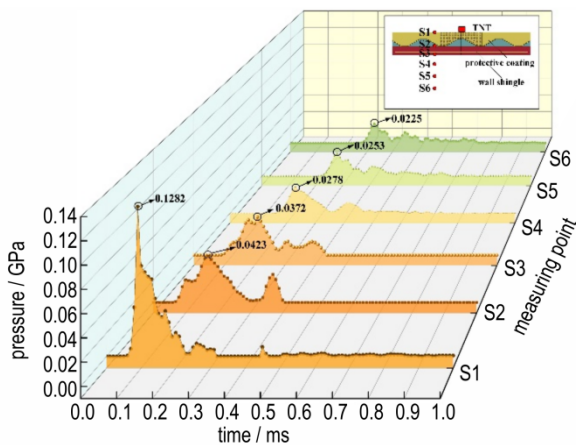
为进行不同波纹钢-混凝土板复合结构削波效果的研究,对含不同波纹钢厚度(3,6,9,12 mm)、不同波纹钢夹角(30°,45°,60°,75°)、不同波纹钢波高(10,30,50,70 mm)的复合结构进行数值模拟,得到不同测点峰值压力的结果如图 9 所示。由图 9 可知,未加固墙面板(RC)的各测点峰值压力均大于其他防护方案下各测点的峰值压力,且较含 12 mm 厚波纹钢复合结构、75°波纹钢复合结构和含 70 mm 波高波纹钢复合结构的峰值压力最大降幅分别为 63.2%,60%和 57.9%,说明增加复合结构防护层具有显著的削波



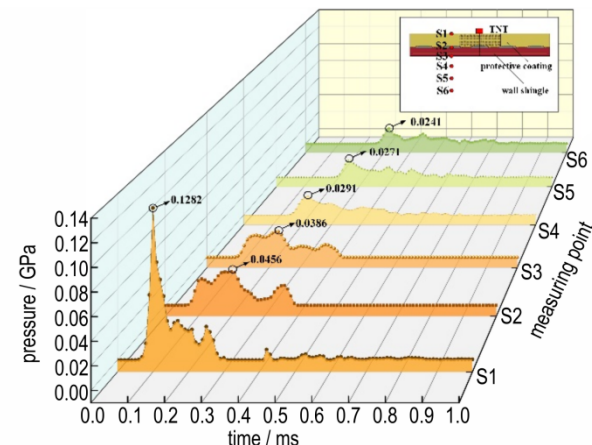
a. unreinforced wall panel



b. composite structure with 3 mm thick corrugated steel



c. corrugated steel composite structure with 30° angle



d. corrugated steel composite structure with 10 mm wave height

图 8 测点峰值压力曲线
Fig.8 Peak pressure curves of measuring point

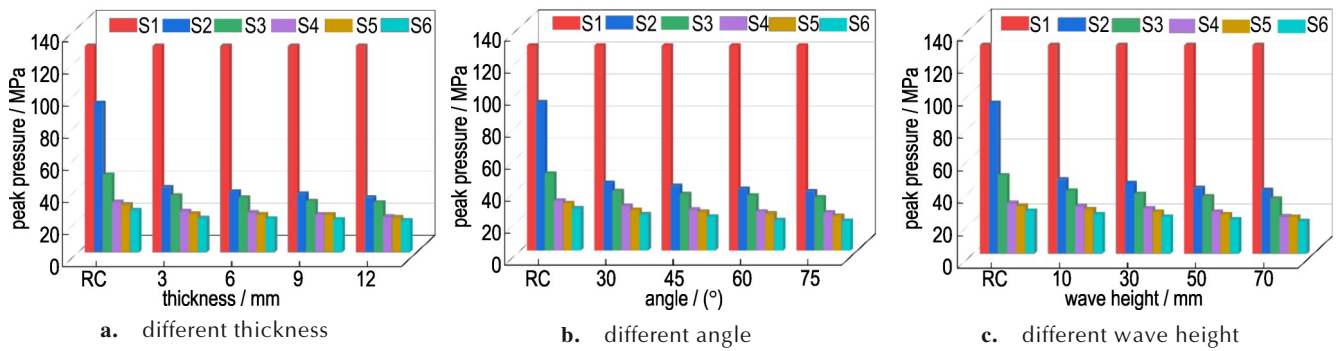


图9 测点峰值压力

Fig.9 Peak pressure of measuring point

效果。由图9a可知,随着波纹钢厚度的增大,各测点的峰值压力均在逐渐减小,其中含12 mm厚波纹钢复合结构防护方案下各测点的峰值压力均小于其余三种防护方案且最大降幅达15.6%,说明该防护方案对削弱爆炸冲击波的传播更为有效。由图9b可知,不同夹角波纹钢的复合结构防护方案下,爆炸冲击波的峰值压力均有不同程度的衰减,且爆炸冲击波的峰值压力在距爆源460 mm范围内衰减了78.0%~78.9%,说明采用不同夹角波纹钢的复合结构具有明显的削波效果,其中含75°夹角波纹钢复合结构防护方案下各测点峰值压力较含30°夹角波纹钢复合结构减小17.8%,表明复合结构中波纹钢夹角越大其削弱冲击波传播的能力越强。由图9c可知,随着复合结构中波纹钢波高的增大,各测点的峰值压力逐渐减小,且含70 mm波高波纹钢复合结构防护方案下各测点峰值压力较含10 mm波高波纹钢复合结构防护方案衰减程度分别为0%,14.5%,12.7%,21.6%,17.0%和16.6%,说明增加复合结构中波纹钢波高能够有效削弱爆炸冲击波传播。

2 结果与讨论

2.1 不同波纹钢-混凝土板复合结构的水下抗爆性能

2.1.1 复合结构的吸能效果

不同防护方案下复合结构总能量如图10所示。由图10a可知,随着波纹钢厚度的增大,复合结构总能量也在逐渐增大。含不同厚度波纹钢复合结构总能量分别为118.7,123.4,130.4 kJ和178.8 kJ,其中含12 mm厚波纹钢复合结构总能量较含3 mm厚波纹钢复合结构总能量提高了50.6%,说明增加复合结构中波纹钢厚度能有效提高复合结构的吸能效果。由图10b可知,复合结构总能量随着波纹钢夹角的增大而增大,含75°夹角波纹钢复合结构总能量相对于含30°夹角波纹钢复合结构提高了61.4%,说明增加波纹钢夹角也能有效提高复合结构的吸能效果。由图10c可知,不同波高波纹钢复合结构总能量分别为94.8,104.9,118.7 kJ和130.6 kJ,其中含70 mm波高波纹钢复合结构总能量较含10 mm波高波纹钢复合结构提高了37.8%,说明复合结构中波纹钢波高的增大能够显著提高复合结构的吸能效果。

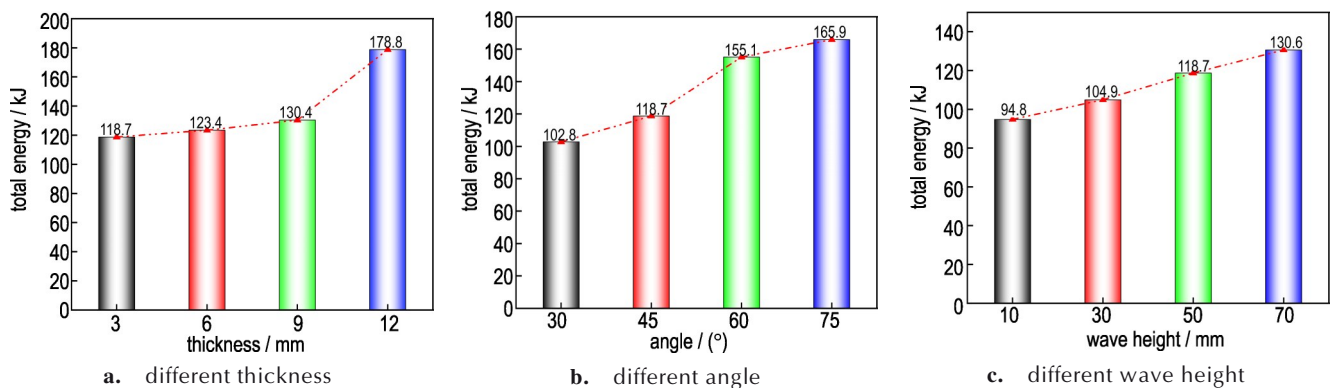


图10 复合结构总能量

Fig.10 Total energy of composite structure

2.1.2 复合结构的抗爆性能

为对比不同波纹钢-混凝土板复合结构抗爆性能的优越性,对复合结构的失效模式进行分析,研究仅列出了含3 mm厚度波纹钢复合结构、含30°夹角波纹钢复合结构和含10 mm波高复合结构的毁伤模式,各部分毁伤模式如图11所示。由图11a可知,爆炸发生后,复合结构的迎爆面受到爆炸压缩波作用而形成爆坑,在背爆面由于拉伸波的作用出现单元失效,最终呈现震塌剥落现象,剥落区的最大直径221 mm、宽度180 mm;波纹钢板跨中位置受到的损伤最大;墙面板的迎爆面部分与波纹钢板接触,在爆炸发生后,在波纹钢折角处会相互挤压,引起混凝土单元失效,形成裂缝。由图11b可知,爆炸冲击荷载下,复合结构背爆面

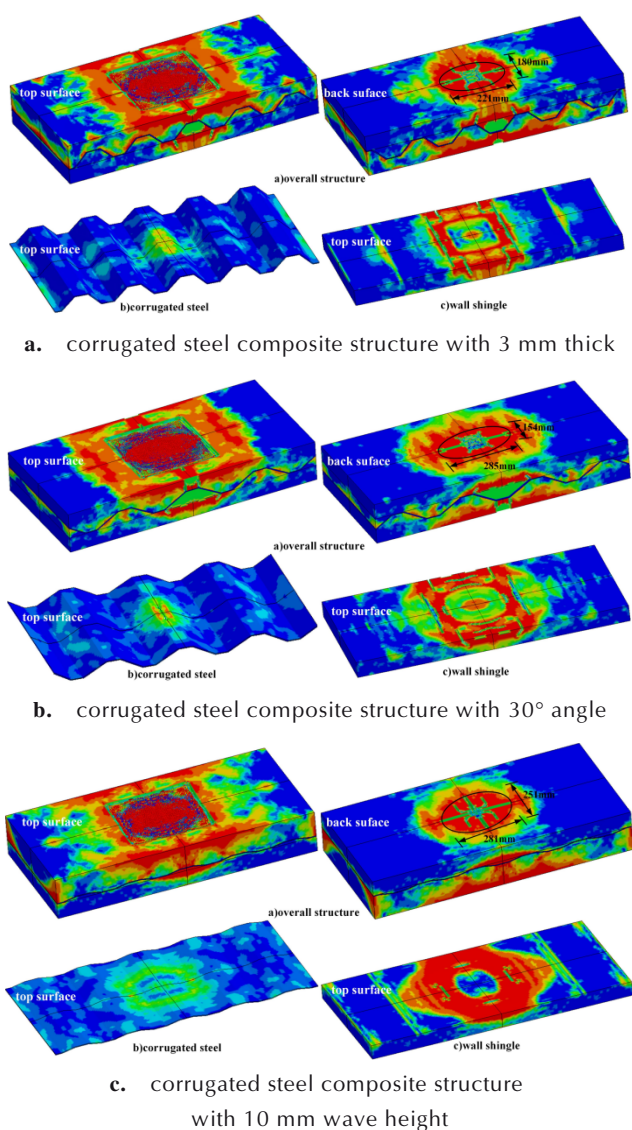


图11 复合结构毁伤模式

Fig.11 Damage mode of composite structure

剥落区的最大直径285 mm、宽度154 mm;墙面板迎爆面出现大量的裂缝。由图11c可知,复合结构迎爆面也出现爆坑,背爆面剥落区的最大直径281 mm、宽度251 mm;墙面板迎爆面仅发生较小的损伤,这是因为波纹钢波高较小接近于平钢板,导致折角处与墙面板的挤压作用小,但墙面板背爆面的损伤较严重。

2.2 不同波纹钢-混凝土板复合结构的防护效果评价

2.2.1 防护率

为进一步分析不同波纹钢-混凝土板复合结构防护层的防护效果,引入防护率指标评价不同防护方案的防护效果。防护率可定义为未加固墙面板时测点峰值压力 p 和加固后测点峰值压力 p_m 的差值与未加固时的比值^[22],其公式为:

$$\eta = \frac{p - p_m}{p} \quad (8)$$

不同防护方案的防护率如图12所示。由图12a可知,复合结构的防护率随复合结构中波纹钢厚度增大而逐渐增大,其中含12 mm厚波纹钢复合结构防护方案下S2测点防护率最大为63.2%,说明波纹钢厚度越大对爆炸冲击波的削弱效果越明显。由图12b可知,复合结构的防护率随复合结构中波纹钢夹角增大而增大,其中含75°夹角波纹钢复合结构防护方案下S2测点防护率最大为60.0%,说明复合结构对削弱水下爆炸冲击波的传播具有一定的作用,且含75°夹角波纹钢复合结构防护效果更为明显。由图12c可知,含70 mm波高波纹钢复合结构防护方案的防护率最大为57.9%,含30 mm波高波纹钢复合结构和含50 mm波高波纹钢复合结构防护方案的防护率次之,而含10 mm波高波纹钢复合结构防护方案的防护率最小,各测点最大差值分别为0%,6.9%,6.2%,12.9%,9.5%和8.8%,说明波纹钢波高的增大能够有效减少爆炸冲击波的传播进而达到削波减爆的效果。

2.2.2 耗能分担率

为分析波纹钢形状参数变化对复合结构防护效果的影响,进一步探究在多介质中墙面板、复合结构和水体耗散能量的比例,因此本研究提出一种新的指标:耗能分担率。记三部分的总能量之和为 E ,墙面板吸收的能量为 E_1 ,复合结构吸收的能量为 E_2 ,水体吸收的能量为 E_3 ,则公式为:

$$k_n = \frac{E_n}{E} \times 100\% = \frac{E_n}{E_1 + E_2 + E_3} \times 100\% \quad (9)$$

式中, k_n 为各部分吸收能量所占的比例, $n=1,2,3$ 。

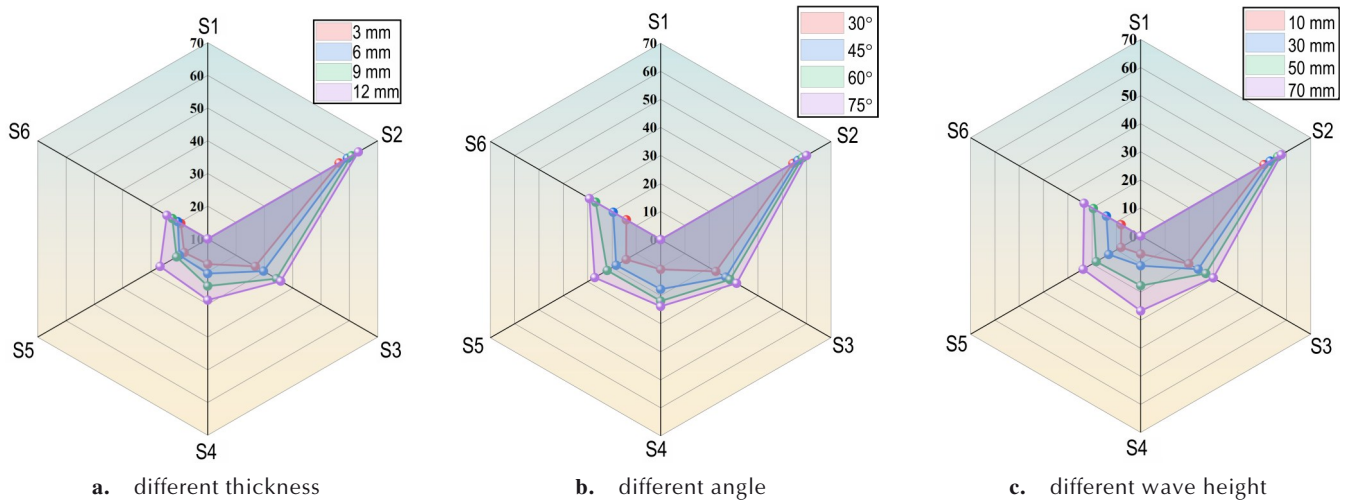


图 12 不同波纹钢-混凝土板复合结构的防护率

Fig.12 Protection rate of different corrugated steel-concrete composite structures

未加固墙面板的耗能主要由墙面板和墙体两部分承担,其中水体承担较多。增加不同波纹钢-混凝土板复合结构能够承担大部分的耗能,且含 12 mm 厚波纹钢复合结构、75°波纹钢复合结构和含 70 mm 波高波纹钢复合结构防护方案下耗能分担率分别为 69.48%, 66.26% 和 63.51%, 说明增加复合结构防护层能够有效提高其吸能效果。不同防护方案下各部分耗能分担率如图 13 所示。由图 13a 可知,在水下接触爆炸荷载下,各部分耗能分担率从大到小依次为复合结构、水体、墙面板。随着复合结构中波纹钢厚度的增大,复合结构的耗能分担率逐渐增大,含 12 mm 厚波纹钢复合结构耗能分担率较含 3 mm 波纹钢复合结构增大 7.86%, 而水体和墙面板的耗能

分担率均在逐渐减小,说明水下接触爆炸荷载下复合结构吸能占据主要地位,且波纹钢厚度的增大能够有效提高复合结构的吸能效果。由图 13b 可知,复合结构的耗能分担率随复合结构中波纹钢夹角的增大而增大,含 75°夹角波纹钢复合结构耗能分担率较其他三种防护方案分别增大了 7.54%, 5.00%, 1.21%, 而水体和墙面板的耗能分担率随复合结构中波纹钢夹角的增大而减小,说明波纹钢夹角的变化能够影响复合结构的吸能效果,且含 75°夹角波纹钢复合结构吸能效果最好。由图 13c 可知,含 70 mm 波高波纹钢复合结构耗能分担率较其他三种防护方案分别增大了 12.08%, 8.49%, 1.89%; 而水体和墙面板的耗能分担率随波纹钢波高的增加而减小。墙面板作为

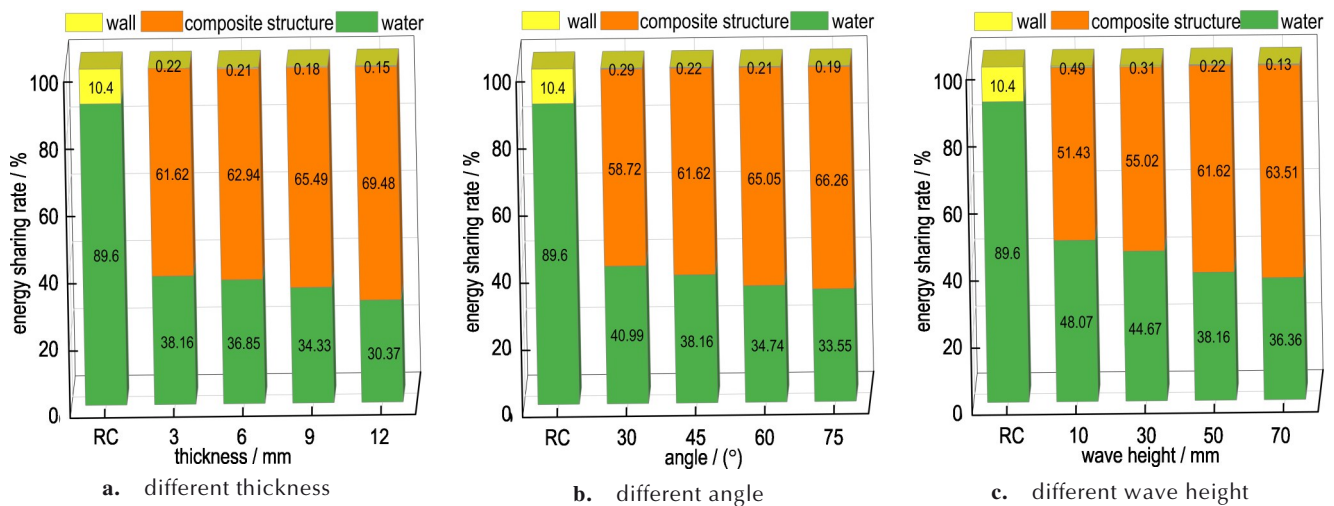


图 13 各部分耗能分担率

Fig.13 Energy consumption sharing rate of each part

被防护结构,仅吸收较小一部分能量且含70 mm波高波纹钢复合结构防护方案下墙面板耗能分担率为0.13%,进一步说明波纹钢波高越大,复合结构吸能效果越好。

2.2.3 墙面板失效体积率

为更好了解水下接触爆炸荷载下不同波纹钢-混凝土板复合结构防护层的防护效果,选用失效体积率为指标来评价不同复合结构的防护效果。失效体积率定义为被防护结构墙面板的失效单元体积与墙面板的单元总体积的比值^[23]。

本研究通过LS-DYNA软件了解结构失效单元的数量,依据不同网格尺寸计算出每个单元的体积,进而计算结构的总体失效体积,并将总体失效体积与结构总体积作比值,最终得到失效体积率。不同防护方案下墙面板失效体积率如图14所示。由图14可知,未加固墙面板失效体积率达4.53%,较含12 mm厚波纹

钢复合结构、75°夹角波纹钢复合结构和70 mm波高波纹钢复合结构防护方案下墙面板失效体积率最大差值分别为4.07%,4.06%和3.85%,说明增加复合结构防护层能够有效减小墙面板的损伤。由图14a可知,随着波纹钢厚度的增大,墙面板的失效体积率逐渐减小,其中含12 mm厚波纹钢复合结构防护方案下墙面板的失效体积率最小为0.46%,说明增加波纹钢厚度能够有效减少被防护结构的损伤程度。由图14b可知,不同防护方案下墙面板失效体积率分别为1.76%,1.65%,0.89%和0.47%,说明水下爆炸条件下含75°夹角波纹钢复合结构的防护效果最优。由图14c可知,随着波纹钢波高的增大,墙面板的失效体积率逐渐减小,其中含70 mm波高波纹钢复合结构防护方案下墙面板失效体积率最小仅为0.68%,说明增加波纹钢波高能够有效限制墙面板的损伤。

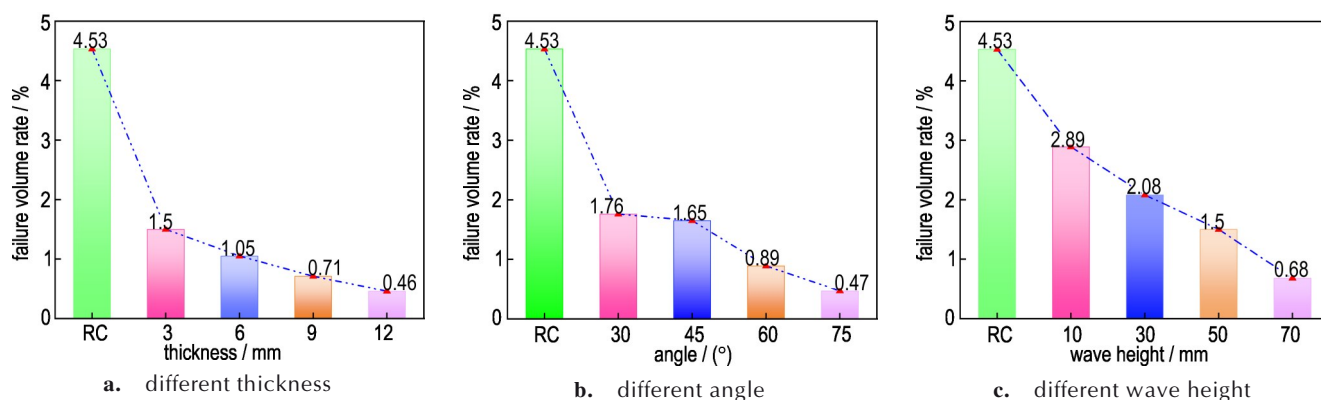


图14 墙面板失效体积率

Fig.14 Failure volume rate of wall panel

2.3 最优型式下波纹钢-混凝土板复合结构的防护效果

通过上述研究分析发现,在单一因素下,含12 mm厚波纹钢复合结构、75°夹角波纹钢复合结构和70 mm波高波纹钢复合结构的防护效果最好,因此综合以上三种因素的最优方案,模拟出最优型式下波纹钢-混凝土板复合结构的爆炸毁伤过程。

依据图7所设测点得出最优型式防护方案下各测点的峰值压力曲线如图15所示。由图15可知,各测点峰值压力分别为0.1282,0.0304,0.0252,0.0193,0.0172 GPa和0.0141 GPa,相对于单一因素下最优防护方案各测点峰值压力均有所降低,说明最优型式的防护方案能够更好地减少冲击波的传播。此外,最优型式下波纹钢-混凝土板复合结构总能量为

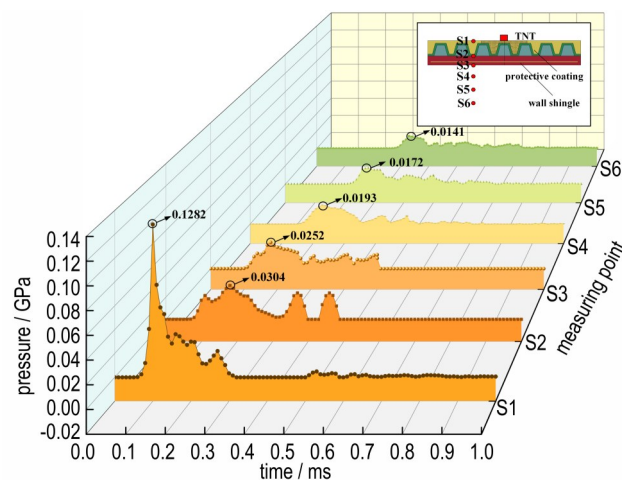


图15 最优型式防护方案下各测点峰值压力曲线

Fig.15 Peak pressure curves of each measuring point under the optimal type protection scheme

190.5 kJ,与单一因素下最优的防护方案相比,该防护方案下复合结构总能量分别增加了6.5%,14.8%和45.9%,说明最优型式防护方案具有较好的吸能效果。

单一因素的最优防护方案和最优型式防护方案下结构的毁伤模式如图16所示。由图16a可知,结构迎爆面形成爆坑,在背爆面呈现震塌剥落现象,剥落区的最大直径180 mm、宽度100 mm;由图16b可知,结构背爆面剥落区的最大直径185 mm、宽度105 mm;由图16c可知,复合结构迎爆面也出现爆坑,背爆面剥落区的最大直径181 mm、宽度105 mm;由图16d可知,墙面板背爆面剥落区的最大直径150 mm、宽度65 mm。综上可知,最优型式下复合结构防护方案能够有效降低被防护结构毁伤程度。

单一因素的最优防护方案和最优型式防护方案下复合结构的防护效果评价指标参数如表2所示。由表2可知,与单一因素下最优的防护方案相比,最优型

式防护方案下各测点防护率最大差值分别为4.0%,7.2%和9.3%,耗能分担率最大差值分别为2.34%,5.56%和8.31%,墙面板失效体积率最大差值分别为0.09%,0.10%和0.31%,说明最优型式下波纹钢-混凝土板复合结构具有更好的抗爆防护效果。

3 结论

利用LS-DYNA软件模拟不同波纹钢-混凝土板复合结构加固墙面板在水下接触爆炸下的损伤过程,对比分析不同防护层的防护效果,为后续研究提供理论参考。研究结论如下:

(1)揭示不同波纹钢-混凝土板复合结构的水下削波吸能效果。各测点的峰值压力随复合结构中波纹钢厚度(夹角、波高)增大而减小,而复合结构总能量随波纹钢厚度(夹角、波高)增大而增大;单一因素下,含

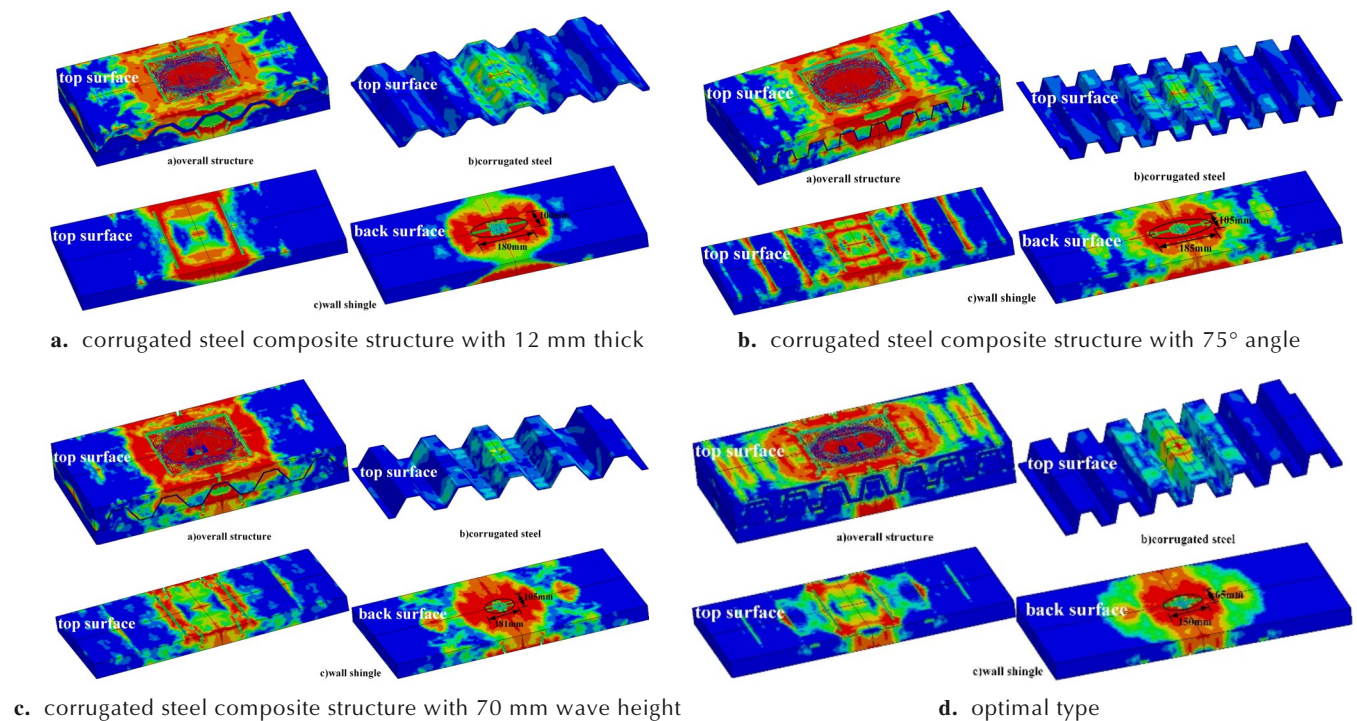


图16 不同防护方案下结构毁伤模式

Fig.16 Structural damage modes under different protection schemes

表2 不同评价指标参数

Table 2 Different evaluation indexes

| evaluating indicator | composite structure with 3 mm thick corrugated steel | corrugated steel composite structure with 75° angle | corrugated steel composite structure with 70mm wave height | optimal type |
|----------------------|--|---|--|--------------|
| protective ratio | 63.2% | 60.0% | 57.9% | 67.2% |
| energy sharing rate | 69.48% | 66.26% | 63.51% | 71.82% |
| failure volume rate | 0.46% | 0.47% | 0.68% | 0.37% |

12 mm 厚波纹钢复合结构、75°波纹钢复合结构和含 70 mm 波高波纹钢复合结构的水下削波效果最好。

(2) 对不同波纹钢-混凝土板复合结构的防护效果进行评价。复合结构的防护率、耗能分担率随波纹钢厚度(夹角、波高)增大而增大,而墙面板失效体积率随波纹钢厚度(夹角、波高)增大而减小;单一因素下,含 12 mm 厚波纹钢复合结构、75°波纹钢复合结构和含 70 mm 波高波纹钢复合结构的防护效果最好。

(3) 揭示最优型式下波纹钢-混凝土板复合结构的防护效果。与单一因素下最优的防护方案相比,最优型式防护方案下各测点峰值压力均降低,而复合结构总能量分别增加了 6.5%, 14.8% 和 45.9%;各测点防护率最大差值分别为 4.0%, 7.2% 和 9.3%, 耗能分担率最大差值分别为 2.34%, 5.56% 和 8.31%, 墙面板失效体积率最大差值分别为 0.09%, 0.10% 和 0.31%;建议选用最优型式的波纹钢-混凝土板复合结构进行抗爆防护设计。

参考文献:

- [1] YANG G, WANG G, LU W, et al. Cross-section shape effects on anti-knock performance of RC columns subjected to air and underwater explosions [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 252-266.
- [2] 李明, 张启灵, 李志. 吸能边界条件下水下爆炸离心试验中冲击波传播特性数值模拟[J]. 含能材料, 2023, 31(8): 820-831.
LI Ming, ZHANG Qi-ling, LI Zhi. Numerical simulation of shock wave propagation characteristics in centrifugal test of underwater explosion under energy-absorbing boundary conditions[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(8): 820-831.
- [3] LI Z, LEI D, HUANG Z. Effect of boundary conditions on the centrifugal model of concrete gravity dams subjected to underwater explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 157: 107902.
- [4] 李旭, 岳松林, 邱艳宇, 等. 近场水下爆炸气泡与混凝土组合板相互作用的试验研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(S1): 79-89.
LI Xu, YUE Song-lin, QIU Yan-yu, et al. Experimental study on the interaction between near-field underwater explosion bubbles and concrete composite slabs[J]. *Journal of Ordnance Engineering*, 2023, 44(S1): 79-89.
- [5] ZHOU Z, LIU J, WANG H, et al. Experimental and numerical investigation on cavitation collapse reloading and bubble evolution for close-in and contact underwater explosion [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 293: 116549.
- [6] 张守喆, 宗琦, 吕闹. 沉箱码头聚脲涂层抗爆防护毁伤效应数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(1): 162-168.
ZHANG Shou-yang, ZONG Qi, LYU Nao. Numerical simulation of anti-explosion protection damage effect of polyurea coating on caisson wharf[J]. *China Safety Production Science and Technology*, 2021, 17(1): 162-168.
- [7] 赵小华, 刘树参, 方宏远, 等. 水下接触爆炸下高聚物层对钢筋混凝土板的防护效果[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(12): 110-124.
ZHAO Xiao-hua, LIU Shu-shen, FANG Hong-yuan, et al. Protective effect of polymer layer on reinforced concrete slabs under underwater contact explosion [J]. *Explosion and impact*, 2023, 43(12): 110-124.
- [8] 袁鹏程. 爆炸荷载作用下新型地聚物混凝土板的动态响应与损伤破坏机理[D]. 广州: 广州大学, 2022.
YUAN Peng-cheng. Dynamic response and damage failure mechanism of new geopolymer concrete slab under explosion load [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [9] ZHAO H, ZHAO X, FANG H, et al. Experimental investigation of steel fiber reinforced concrete slabs subjected to underwater contact explosions[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281: 114664.
- [10] WANG H, QIU A, LONG S, et al. Effect of fluid - structure interaction on the underwater blast response and failure of composite panels[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 191: 111065.
- [11] YU S, WU H, ZHANG G, et al. Experimental study on anti-shallow-buried-explosion capacity of a corrugated steel-plain concrete composite structure[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 172: 104393.
- [12] LI H, WU H, WANG Z, et al. Experimental and numerical simulation of the propagation law of shock waves in corrugated steel-lined tunnels [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 168: 1019-1030.
- [13] 杨光瑞, 汪维, 杨建超, 等. POZD 涂覆波纹钢加固钢筋混凝土板抗爆性能[J]. 兵工学报, 2023, 44(5): 1374-1383.
YANG Guang-rui, WANG Wei, YANG Jian-chao, et al. Anti-explosion performance of reinforced concrete slabs strengthened with POZD coated corrugated steel[J]. *Journal of Ordnance*, 2023, 44(5): 1374-1383.
- [14] 杨程风, 闫俊伯, 刘彦, 等. 接触爆炸荷载下波纹钢加固钢筋混凝土板毁伤特征分析[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(5): 453-462.
YANG Cheng-feng, Yan Jun-bo, LIU Yan, et al. Analysis of damage characteristics of reinforced concrete slabs strengthened with corrugated steel under contact explosion load [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(5): 453-462.
- [15] 叶昕. 双波纹钢板-混凝土组合剪力墙抗爆性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
YE Xin. Research on anti-explosion performance of double corrugated steel plate-concrete composite shear wall plate [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [16] YANG G, WANG G, LU W, et al. Experimental and numerical study of damage characteristics of RC slabs subjected to air and underwater contact explosions [J]. *Marine Structures*, 2019, 66: 242-257.
- [17] ZHANG Z, QIANG F, GAO W. Coupling of smoothed particle hydrodynamics and finite element method for impact dynamics simulation [J]. *Engineering Structures*, 2010, 33(1): 255-264.
- [18] 寇晓枫, 王高辉, 卢文波, 等. 空气隔层对水下爆炸冲击波的缓冲效应[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 7-13.
KOU Xiao-feng, WANG Gao-hui, LU Wen-bo, et al. Buffering effect of air interlayer on underwater explosion shock wave [J]. *Vibration and shock*, 2017, 36(3): 7-13.
- [19] LU H and REN X. Computational investigation on damage of reinforced concrete slab subjected to underwater explosion [J].

- Ocean Engineering*, 2020, 195(C): 106671–106671.
- [20] 赵春风, 何凯城, 卢欣, 等. 弧形双钢板混凝土组合板抗爆性能数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(2): 140–153.
ZHAO Chun-feng, HE Kai-cheng, LU Xin, et al. Numerical study on blast resistance of curved double steel plate concrete composite slabs [J]. *Explosion and Impact*, 2022, 42 (2) : 140–153.
- [21] ZHAO C, HE K, ZHI L, et al. Blast behavior of steel-concrete-steel sandwich panel: Experiment and numerical simulation[J]. *Engineering Structures*, 2021, 246: 112998.
- [22] 张建亮, 夏志成, 周竞洋, 等. 密闭空间内三种防爆隔墙的减爆吸能效应分析[J]. 工程力学, 2017, 34(S1): 314–319.
ZHANG Jian-liang, XIA Zhi-cheng, ZHOU Jing-yang, et al. Analysis of explosion reduction and energy absorption effect of three kinds of explosion-proof partition walls in confined space [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(S1): 314–319.
- [23] 曹克磊. 碳纤维增强多孔混凝土复合材料静动态力学特性及其水下抗爆防护效果研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
CAO Ke-lei. Research on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced porous concrete composites and its underwater anti-explosion protection effect [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.

Evaluation of Underwater Explosion-proof Effect of Corrugated Steel-concrete Slab Composite Structure Under Contact Explosion

CAO Ke-lei¹, FU Qiao-feng², ZHANG Jian-wei¹, HUANG Jin-lin³, ZHAO Yu^{1,2}

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 3. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China.)

Abstract: In order to explore the underwater anti-explosion protection effect of different corrugated steel-concrete composite structures, the finite element-smoothed particle hydrodynamics (FEM-SPH) coupling algorithm was used to establish an underwater multi-media coupling explosion model. Different corrugated steel-concrete slab composite structure protection schemes were designed to explore the underwater wave cutting and energy absorption effects of different composite structure protection layers, including 3, 6, 9, 12 mm thick corrugated steel composite structure, 30°, 45°, 60°, 75° corrugated steel composite structure and 10, 30, 50, 70 mm wave height corrugated steel composite structure. The energy consumption sharing rate was proposed to evaluate the protection effect of the composite structure. The results show that simulation results of the front and back explosion surfaces of the concrete slab are in good agreement with experimental results, which verifies the simulation process of underwater contact explosion. Under different composite structure protection schemes, the peak pressure of the composite structure with 12 mm thick corrugated steel, the composite structure with 75° corrugated steel and the composite structure with 70 mm wave height is 63.2%, 60% and 57.9% lower than that of the unprotected scheme, respectively. The maximum protection rates are 63.2%, 60.0% and 57.9%, respectively, and the energy consumption sharing rates are 69.48%, 66.26% and 63.51%, respectively. The energy absorption effect and protection effect of the optimal composite structure with 12 mm thickness, 75° angle and 70 mm wave height are significantly better than those of the composite structure under the influence of single factor. The research results can provide a theoretical basis for the application of different corrugated steel-concrete composite structures in the field of underwater anti-explosion protection.

Key words: underwater contact explosion; corrugated steel-concrete slab composite structure; clipping energy absorption effect; protective effect evaluation

CLC number: TJ55;O38

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024032

Grant support: Nation Natural Science Foundation of China (No. 51979188), Key Scientific Research Project of colleges and universities of Henan Province (24A570002), State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation of Tianjin University (No. HESS-2230), High-Level Talent Research Start-up Project of North China University of Water Resources and Electric Power (No. 40921)

(责编: 高毅)