

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.011

# GFRP 后锚固混凝土板抗爆性能及损伤评估研究

霍文龙<sup>1,2</sup>, 王泉华<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 采用数值模拟方法, 借助 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了 GFRP 后锚固混凝土板有限元数值模型, 并结合已有物理试验结果验证了任意 Lagrange-Euler (ALE) 算法的有效性, 分析比较了共节点方式、CONSTRAIN\_BEAM\_IN\_SOLID 模型和 CONTACT\_1D 模型模拟黏结滑移行为的差异, 揭示了不同黏结滑移模式模拟的 GFRP 后锚固混凝土板的破坏机理, 探讨了 GFRP 配筋率、板厚和 TNT 当量对 GFRP 后锚固混凝土板破坏模式的影响及混凝土板失效体积率和能耗分摊率的变化规律, 并构建了 GFRP 后锚固混凝土板的损伤分级预测曲线。结果表明: ALE 算法可以较好地模拟 GFRP 筋后锚固混凝土板的爆炸过程; 不同黏结滑移模式模拟的 GFRP 后锚固混凝土板的破坏过程及破坏机理相似, 但最终破坏模式不同; 提高 GFRP 配筋率和混凝土板的厚度可以有效地降低 GFRP 筋的轴向力、混凝土板的失效体积率, 提高混凝土板的能量分摊率及其整体抗爆承载能力; 损伤分级预测曲线可用于评估 TNT 当量和板厚的变化对损伤的影响。

**关键词:** 混凝土板; GFRP 筋; 后锚固; 抗爆性能; 损伤评估

中图分类号: TV312

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)02-0088-10

## Research on blast resistance performance and damage assessment of GFRP post anchored concrete slabs

HUO Wenlong<sup>1,2</sup>, WANG Xiaohua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China;  
2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** This paper presents a finite element numerical model of GFRP post anchored concrete slabs (GFRP-PACS) using ANSYS/LS-DYNA software and the Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) algorithm's effectiveness is validated through physics experiment results. A comparative analysis of bond-slip behavior simulations among the share node, CONSTRAIN\_BEAM\_IN\_SOLID and CONTACT\_1D methods reveals distinct failure mechanisms under different models while maintaining similarity in the overall simulation process. The study investigates the effects of GFRP reinforcement ratio, concrete slab thickness, and TNT weights on the failure mode, failure volume rate, energy sharing rate, and blast resistance bearing capacity of GFRP-PACS. A damage grading prediction curve for GFRP-PACS is established to assess the impact of material parameters on structural performance. The results indicate that the ALE algorithm can effectively simulate the explosion process of GFRP-PACS. While simulations using different bond-slip models exhibit similar failure processes, they yield distinct final failure modes. Increasing the reinforcement ratio and the thickness of the concrete slab can effectively reduce the axial force in the GFRP bar, and the failure volume rate of the concrete slab, and improve the energy sharing rate and overall blast resistance bearing capacity of the concrete slab. The damage grading prediction curve can assess the impact of changes in TNT weight and slab thickness on the damage.

**Key words:** concrete slab; GFRP bar; post anchored; blast resistance performance; damage assessment

钢筋在长期服役过程中常因锈蚀问题导致钢筋混凝土结构的承载力大幅度降低<sup>[1]</sup>。纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)具有强度高、抗腐蚀性好等优点, 作为钢筋的替代品已大量应用于混凝土结构工程的加固、修复中<sup>[2-3]</sup>, 其中玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced polymer, GFRP)应用较为广泛。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52109163)

**作者简介:** 霍文龙(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事混凝土结构抗爆研究。E-mail: hwl@tju.edu.cn

**引用本文:** 霍文龙, 王泉华. GFRP 后锚固混凝土板抗爆性能及损伤评估研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 88-97.

HUO Wenlong, WANG Xiaohua. Research on blast resistance performance and damage assessment of GFRP post anchored concrete slabs [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2): 88-97.

然而,混凝土建筑物在服役过程中遭受地震、爆炸、碰撞等动荷载可能会发生严重破坏,造成巨大损失,提高既有混凝土结构的承载力对延长其服役寿命具有重要意义。

后锚固是加固既有混凝土结构的有效方法之一,该方法通过机械锚固或者化学锚固对原结构进行加固补强<sup>[4-5]</sup>,其中化学锚固具有固化时间快、施工灵活和便捷等优点,是较为常用的加固技术之一<sup>[6]</sup>。目前,关于 GFRP 后锚固混凝土板的抗爆性能研究较为匮乏,现有成果主要集中在新浇混凝土结构的抗爆特性研究方面,如 Rajput 等<sup>[7-11]</sup>分别研究了 GFRP 筋增强混凝土结构的动力响应,认为 GFRP 筋可以增强新浇混凝土结构的抗爆性能,采用 GFRP 筋通过后锚固技术对既有混凝土结构进行加固补强,对提高既有混凝土结构的抗爆性能具有积极作用。

损伤评估是评价混凝土板抗爆性能的重要内容之一。针对混凝土板的抗爆性能评估研究,Wang 等<sup>[12]</sup>和韩泽斌等<sup>[13]</sup>通过爆炸试验分别研究了 TNT 当量和 GFRP 混合配筋率对混凝土板抗爆性能的影响,并采用爆炸恢复指数评估了混凝土板的爆炸恢复能力,结果表明 TNT 当量影响混凝土板的破坏模式,混凝土板由整体弯曲破坏变为局部穿孔破坏,混合配筋下混凝土板的恢复能力较强,但并未探究板厚对抗爆性能的影响,也忽略了对混凝土板的损伤评估。鉴于爆炸荷载作用下混凝土结构发生破坏的复杂性,采用经验方程评估爆炸荷载下混凝土结构的局部损伤具有重要意义。Masahiro 等<sup>[14]</sup>提出了一组与厚度和 TNT 当量相关的经验方程,并根据爆炸引起的总剥落损伤深度快速评估了钢筋混凝土板的损伤程度<sup>[15]</sup>。之后,Liu 等<sup>[16-17]</sup>和 Peng 等<sup>[18]</sup>对经验方程进行了改进,以适用于高强度或超高强度的钢筋混凝土板。然而,现有加筋增强混凝土板的损伤评估经验方程是基于正常强度或超高强度钢筋混凝土推导而来的,这些经验方程虽然在一定程度上可以为研究 GFRP 后锚固混凝土板的抗爆性能提供参考,但直接用于评估 GFRP 后锚固混凝土结构损伤的适用性有待深入研究。因此,探究 GFRP 后锚固混凝土板的爆炸毁伤效应并建立损伤预测模型,对提高既有混凝土结构的抗爆性能研究具有现实意义。

为此,本文通过 ANSYS/LS-DYNA 软件研究了爆炸荷载作用下 GFRP 后锚固混凝土板的抗爆性能,分析了 3 种黏结滑移模式模拟黏结滑移行为的差异,揭示了其破坏机理,探讨了配筋率、板厚和 TNT 当量对破坏模式的影响,分析了混凝土板失效体积率和能耗分摊率的变化规律,并构建了损伤分级预测曲线,以期为提高既有混凝土结构的抗爆性能提供参考。

## 1 研究方案

通过物理试验方法开展 GFRP 后锚固混凝土板抗爆性能研究不仅耗费大,且数据采集较为困难,仅开展少量试验研究则结果的准确性难以保证。而数值模拟方法不仅可以重现试验过程,还可以捕捉试验过程中难以捕捉的细节。因此,本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件开展 GFRP 后锚固混凝土板的抗爆性能研究。相关研究<sup>[12-13,19-20]</sup>表明,TNT 当量( $W$ )、板厚( $T$ )及配筋率是影响 GFRP 后锚固混凝土板抗爆性能的主要因素,本文试验中 TNT 当量设计为 0.168、0.468、1.000、1.830 kg 4 种药量,板厚设计为 0.12、0.15、0.18、0.20、0.23、0.25 m 6 种尺寸。GFRP 筋的直径为 8 mm,间距为 95 mm,箍筋间距为 196 mm,边距为 20 mm,沿混凝土板厚度方向将 GFRP 筋分别设计为 1、2、3 层,配筋率可参照 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》计算得出,6 种板厚下 3 种配筋层数的混凝土板对应的配筋率分别为 0.5%~1.0%、1.0%~2.1%、1.5%~3.2%。GFRP 后锚固混凝土板的设计方案如图 1 所示。

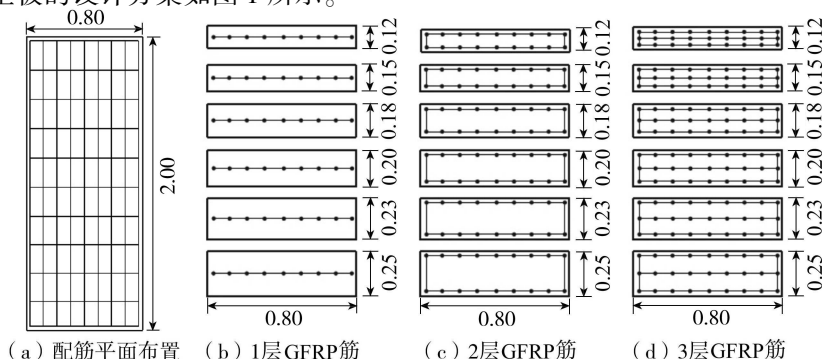


图1 板厚及配筋层数设计示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of slab thickness and reinforcement layer design(unit:m)

## 2 数值模拟

### 2.1 模型参数及验证

通过单轴压缩试验测得混凝土的抗压强度为 11.39 MPa。基于室内试验开展 GFRP 锚杆-混凝土拉拔试验以标定数值模型参数,试验中锚杆直径为 8 mm,锚孔直径为 20 mm,锚固长度为 80 mm,采用环氧植筋胶锚固锚杆和混凝土,通过万能试验机进行拉拔试验(3组),加载速率为 1 mm/min,得到拉拔荷载-滑移曲线如图 2(a)所示,试件的破坏模式如图 2(b)所示。拉拔数值模型具有对称性,只需建立 1/4 有限元数值模型,如图 2(c)所示。数值模型中的 GFRP 筋和混凝土分别采用 truss 单元和实体单元模拟,混凝土采用 \* MAT\_CSCM<sup>[21]</sup> 描述,模型参数为:抗压强度 11.39 MPa,骨料粒径 20 mm。GFRP 筋采用 \* MAT\_ELASTIC<sup>[21]</sup> 描述,模型参数为:密度 2 100 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 42.5 GPa,不考虑应变率效应。环氧黏结剂采用 MAT\_ISOTROPIC\_ELASTIC\_PLASTIC<sup>[17]</sup> 描述,模型参数为:密度 1 600 kg/m<sup>3</sup>,剪切模量 2 GPa,塑性硬化模量 0.8 GPa,体积模量 2.2 GPa,泊松比 0.38。目前模拟锚筋与混凝土界面间黏结滑移行为的模型主要有 \* CONTACT\_1D 模型和 \* CONSTRAIN\_BEAM\_IN\_SOLID(CBIS) 模型<sup>[22-27]</sup>,这两种模型的主要区别是划分单元网格的方法不同,在 \* CONTACT\_1D 模型中需要单元节点对应但节点不能连接;CBIS 模型允许单元节点不对应,其详细设置可见用户手册。在数值模拟中,CBIS 模型的黏结-滑移曲线可通过 \* Define\_Function 使用 AXFOR 参数直接定义,CONTACT\_1D 模型标定参数如下:ERR 为 0.004 m, SIGC 为 13 MPa, GB 为 22.4 GPa/m, SMAX 为 0.001 m, EXP 为 0.5。两种模型标定计算结果如图 2(a)所示。由图 2(a)可知,数值模拟结果与试验结果较为接近,因此可用于后文数值模拟研究。

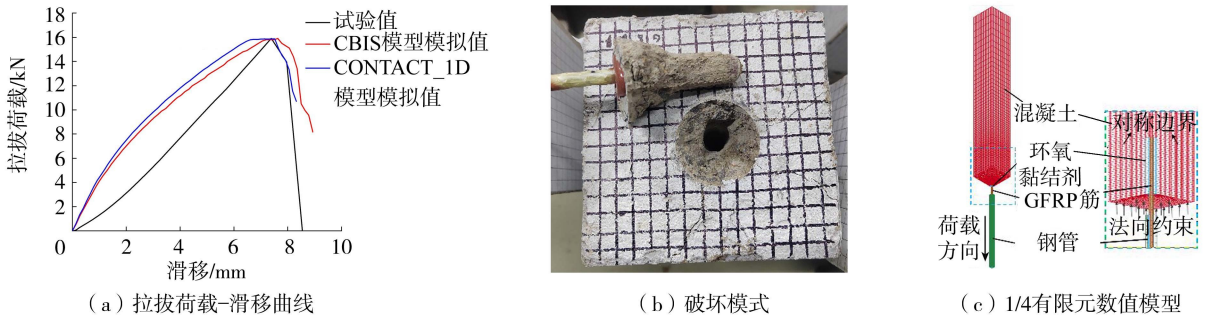


图 2 GFRP 锚杆混凝土拉拔试验及有限元数值模型

Fig. 2 Pull-out experiment and finite element model of GFRP anchored concrete

### 2.2 全耦合爆炸模型验证

爆炸荷载作用下结构的动态响应及其破坏是一个复杂的物理过程,在有限元分析技术中,任意 Lagrange-Euler(ALE)算法充分结合了 Lagrange 算法和 Euler 算法的优势,可以有效地描述流固耦合的动态相互作用及网格的大变形问题<sup>[28]</sup>。为了验证 ALE 算法的有效性,建立如图 3 所示的 TNT 炸药、空气、钢筋混凝土板全尺寸三维有限元模型对文献[29]中正常强度钢筋混凝土板的爆炸试验进行了数值模拟。

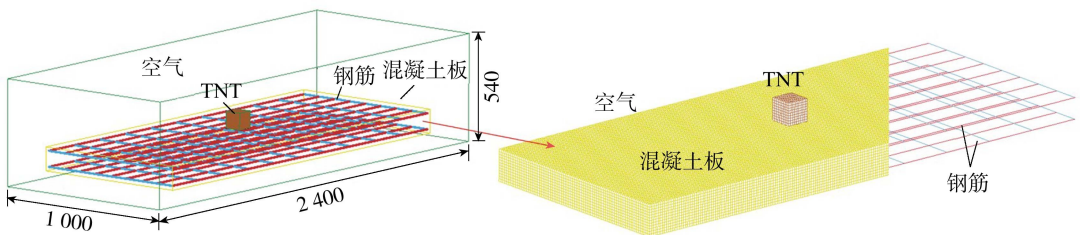


图 3 有限元模型(单位:mm)

Fig. 3 Finite element model(unit:mm)

当单元损伤因子大于 0.75 时,一般认为该区域出现宏观损伤;当单元损伤因子大于 0.99 时,则认为该部位出现了贯穿性破坏,混凝土板出现大量宏观裂缝损伤区域<sup>[30-31]</sup>。图 4 为文献[29]钢筋混凝土板爆炸试验的数值模拟结果,可以看出,爆炸荷载作用下混凝土板上、下表面的破坏直径分别为 44 cm 和 82 cm,而文

献[29]试验中混凝土板上、下表面的破坏直径分别为 46 cm 和 82 cm,数值模拟结果与试验结果高度一致,验证了 ALE 算法的准确性和可靠性。因此,上述数值模型可以合理地模拟爆炸荷载作用下 GFRP 后锚固混凝土结构的动力响应和损伤破坏。

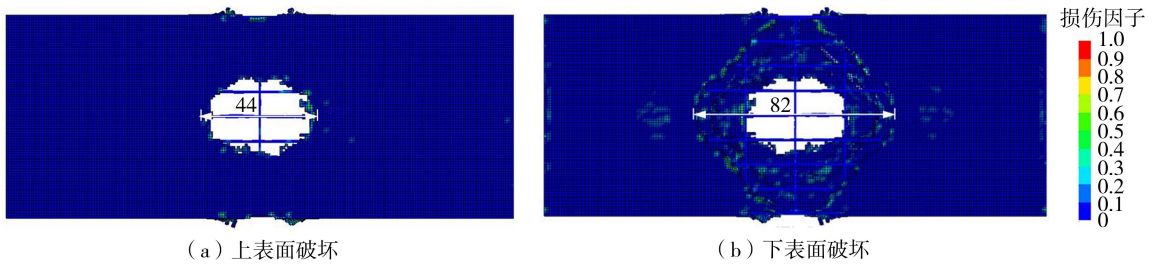


图 4 数值模拟结果(尺寸单位:cm)

Fig.4 Numerical simulation results(unit of size:cm)

### 2.3 黏结滑移模式对破坏模式的影响

将拉拔模拟试验标定的模型材料参数及黏结滑移试验标定的参数赋予 GFRP 后锚固混凝土板,开展对 GFRP 后锚固混凝土板的爆炸冲击数值模拟,比较共节点方式、CRIS 模型和 \*CONTACT\_1D 模型模拟黏结滑移行为的差异,并对混凝土板的破坏演化过程和最终破坏模式进行分析,旨在确定能够准确模拟爆炸荷载作用下 GFRP 后锚固混凝土板破坏模式的黏结滑移模型。

图 5 给出了不同黏结滑移模式模拟的 GFRP 后锚固混凝土板的破坏演化过程及破坏模式。由图 5 可知,混凝土板中部出现成坑破坏之前,不同黏结滑移模式模拟的混凝土板上、下表面的破坏直径和裂缝走向大致相同,最终破坏模式差异较大,其中共节点方式与 CBIS 模型模拟的混凝土板最终破坏模式基本相同,而 CONTACT\_1D 模型模拟的 GFRP 筋变形更明显,混凝土板上、下表面出现大面积破坏,混凝土板的破坏程度

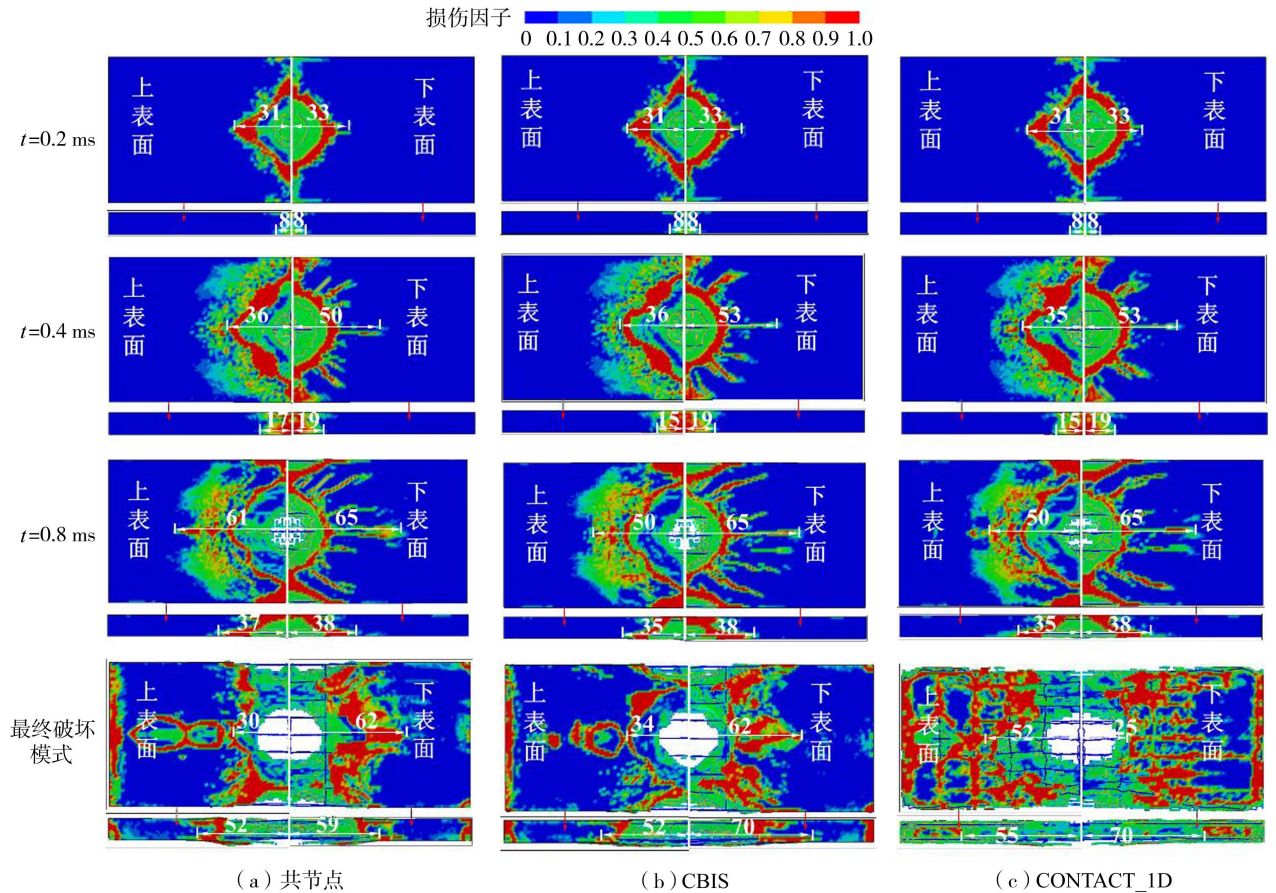


图 5 不同黏结滑移模式下破坏演化过程及破坏模式(尺寸单位:cm)

Fig.5 Failure evolution process and failure modes under different bond-slip models (unit of size:cm)

更高,其最终破坏范围和裂缝走向与共节点方式和 CBIS 模型存在较大差异。由图 5 还可知,靠近爆源的 GFRP 筋变形较大,远离爆源的 GFRP 筋变形较小,这是由于在动态荷载条件下,界面间的黏结滑移沿 GFRP 筋长度方向没有足够的时间进行全面传递,因此距爆源较远的黏结滑移行为并未得到体现。此外,对 GFRP 后锚固混凝土板通过共节点方式建立数值模型的过程较为复杂,采用 CBIS 模型建立数值模型不需要单元节点对应即可满足模拟计算要求,还可以提供准确可靠的数值模拟结果。

### 3 不同影响因素下抗爆性能研究

#### 3.1 配筋率与板厚对破坏模式的影响

图 6 为 TNT 当量为 0.168 kg、板厚为 0.23 m 时不同配筋率下混凝土板的破坏模式。由图 6 可知,爆炸荷载下混凝土板上表面出现成坑破坏,下表面形成反射拉伸波导致混凝土板产生拉伸破坏。当板厚相同时,1 层 GFRP 筋的混凝土板上、下表面的损伤破坏直径大于 2 层 GFRP 筋的破坏直径,这是由于 GFRP 筋布置在混凝土板中间,对混凝土板上、下表面的加固约束作用较弱,导致混凝土板出现较大面积的破坏;GFRP 筋分别布置在混凝土板上、下两侧提高了对混凝土的加固约束作用,因此混凝土板的破坏直径减小。当 GFRP 筋为 3 层时,混凝土板上表面的破坏直径不变,下表面的破坏直径减小,表明提高 GFRP 配筋率可进一步增强混凝土板的抗爆性能。图 7 为 TNT 当量为 0.168 kg、不同板厚下 2 层 GFRP 筋的 GFRP 后锚固混凝土板的破坏模式。由图 7 可知,混凝土板上、下表面的破坏直径随着板厚的增加逐渐减小,并且混凝土板由穿孔破坏逐渐变为内部塑性损伤,塑性损伤范围逐渐变大,下表面拉伸破坏的深度逐渐变浅,这表明增加板厚可以提高混凝土板抵抗爆炸破坏的能力。

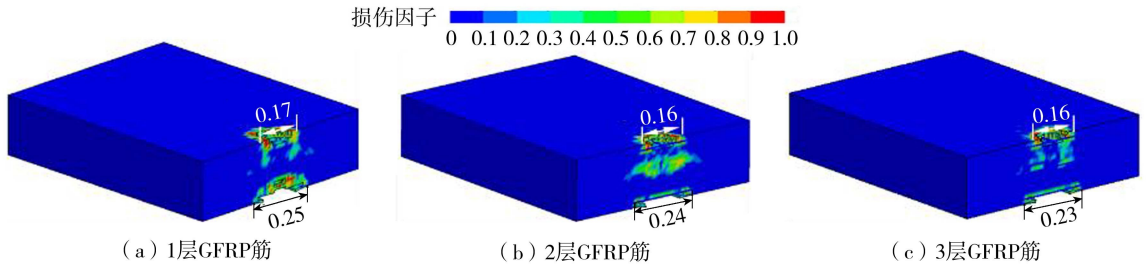


图 6 不同配筋率下的破坏模式(尺寸单位:m)

Fig. 6 Failure modes under different reinforcement ratios (unit of size: m)

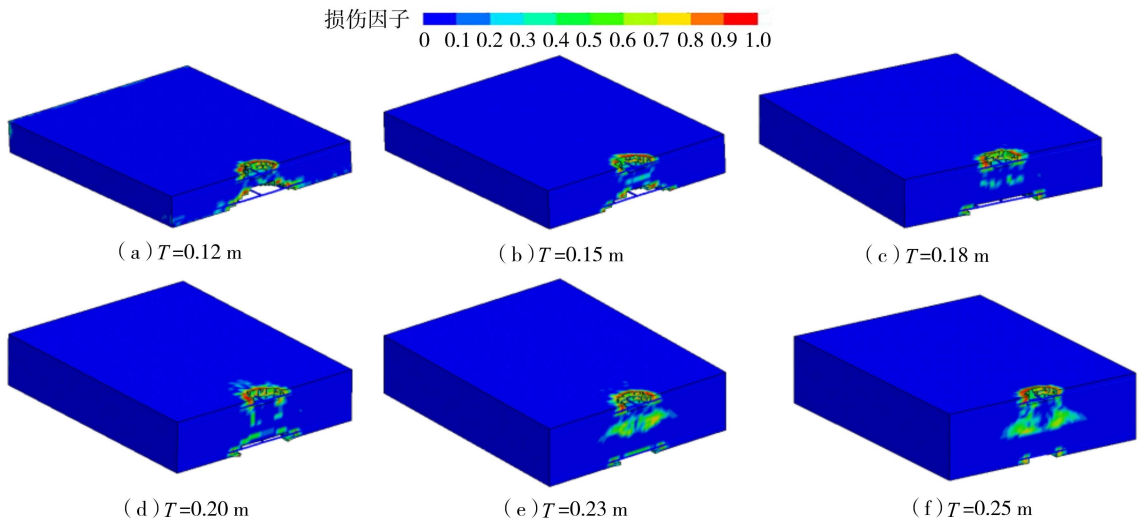


图 7 不同板厚下的破坏模式

Fig. 7 Failure modes under different slab thicknesses

图 8 为不同配筋率下 GFRP 筋轴向力分布。由图 8 可知,所有 GFRP 筋的中间部位均产生向下的位移。当 TNT 当量为 0.168 kg、板厚为 0.23 m、GFRP 筋为 1 层时,GFRP 筋的轴向力为 0.67 kN。与 1 层 GFRP 筋相比,2 层和 3 层 GFRP 筋的轴向力有所增大,分别为 1.31 kN 和 0.78 kN,这是由于 GFRP 筋布置在混凝土

板的中间位置,爆炸荷载作用下混凝土板上、下表面的破坏范围较大,在混凝土发生破坏时吸收了大量爆炸冲击能量,因此 GFRP 筋的轴向力较小;而 GFRP 筋为 2 层和 3 层时,GFRP 筋在混凝土板两侧的加固约束作用较强,减小了混凝土板的破坏面积,因此 2 层和 3 层 GFRP 筋的轴向力比 1 层大。此外,与 2 层 GFRP 筋相比,3 层 GFRP 筋可以进一步降低 GFRP 筋的轴向力,这表明提高配筋率可以有效地降低混凝土板中 GFRP 筋的轴向力。此外,由图 8 还可知,在炸药周围的混凝土板上表面 GFRP 筋的轴向力较大,变形较小,而下表面 GFRP 筋的轴向力和变形均较大。

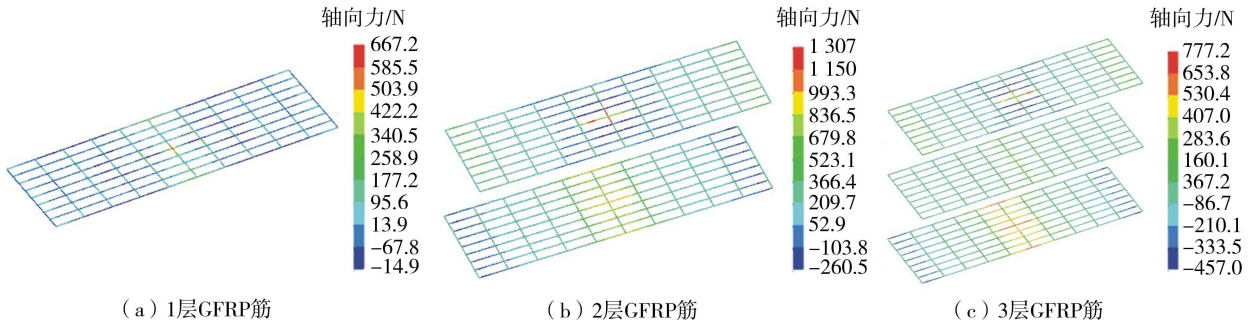


图 8 不同配筋率下的 GFRP 筋轴向力分布

Fig. 8 Axial force distribution of GFRP bar under different reinforcement ratios

图 9 为不同板厚下 GFRP 筋轴向力分布。由图 9 可知,当 TNT 当量为 0.168 kg、GFRP 筋为 2 层时,在相同的配筋率下 6 种板厚的 GFRP 筋最大轴向力分别为 2.65、1.77、1.59、1.44、1.31、1.15 kN,即不同板厚的 GFRP 筋轴向力逐渐降低。从 GFRP 筋的轴向力分布看,不同厚度的混凝土板其炸药周围及下表面 GFRP 筋的轴向力较大,表明 GFRP 筋的受力范围主要分布在破坏部位的周围。综上所述,配筋率和板厚不仅影响 GFRP 筋轴向力的大小,而且对其应力分布范围影响明显。

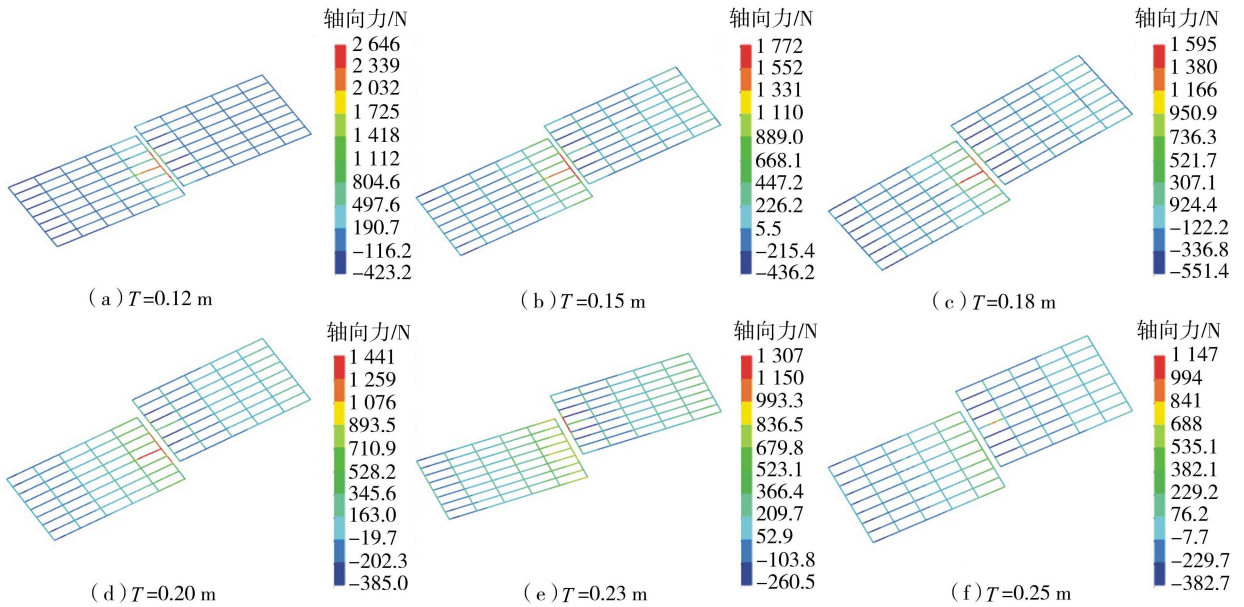


图 9 不同板厚下的 GFRP 筋轴向力分布

Fig. 9 Axial force distribution of GFRP bar under different slab thicknesses

### 3.2 TNT 当量对破坏模式的影响

图 10 为板厚 0.23 m 不同 TNT 当量下 GFRP 后锚固混凝土板的破坏模式。由图 10 可知,TNT 当量为 0.168 kg 时,混凝土板上、下表面的破坏面积减小,混凝土板内部出现塑性损伤;当 TNT 当量为 0.468 kg 时,混凝土板的破坏直径变大,爆炸坑深度变深;当 TNT 当量为 1.000 kg 时,混凝土板上、下表面的破坏范围及爆炸坑直径进一步加大,下表面产生大面积拉伸破坏;当 TNT 当量为 1.830 kg 时,混凝土板上、下表面形成穿孔破坏,下表面拉伸破坏的范围继续变大。这些现象可解释为:混凝土板遭受爆炸荷载时,冲击波由混凝土板上表面向周围及下表面传播,当冲击荷载超过混凝土的动态抗压强度时,混凝土板的上表面出现成坑破

坏,之后透射波到达混凝土板下表面以拉伸波的形式反射,当拉伸应力超过混凝土的动态抗拉强度时,拉伸波导致混凝土板下表面形成拉伸破坏,甚至发生破碎断裂。当成坑破坏和拉伸破坏相交时形成“穿孔破坏”。可见,随着 TNT 当量的增大,GFRP 后锚固混凝土板的破坏范围逐渐变大。

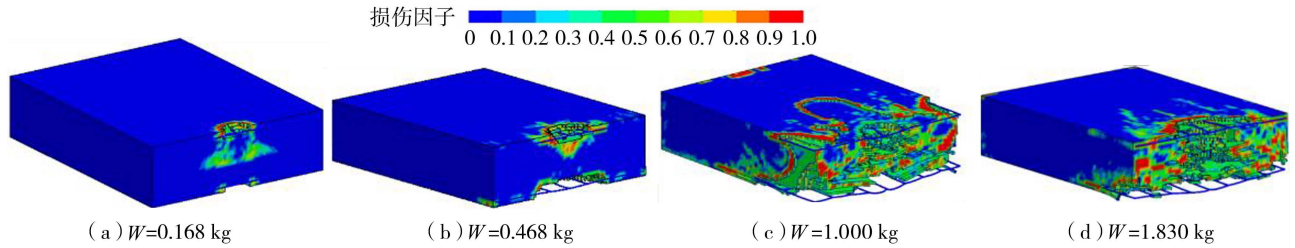


图 10 不同 TNT 当量下的破坏模式

Fig. 10 Failure modes under different TNT weights

### 3.3 失效体积率

爆炸荷载导致混凝土板发生成坑破坏,甚至穿孔破坏。为了量化配筋率和板厚对 GFRP 筋后锚固混凝土板抗爆性能的影响,采用失效体积率作为评价指标<sup>[32]</sup>评估其抗爆性能。失效体积率定义为混凝土板的破坏单元体积与混凝土板的单元总体积之比。

表 1 为 TNT 当量为 0.468 kg 时不同配筋率和板厚下 GFRP 后锚固混凝土板的失效体积率。由表 1 可知,当板厚为 0.12 m 时,混凝土板的失效体积率较大,为 3.20%~3.32%;随着板厚的增加,混凝土板的失效体积率逐渐降低。当板厚为 0.25 m 时,混凝土板的失效体积率为 1.45%~1.55%,约为板厚为 0.12 m 时的一半。此外,当板厚相同时,混凝土板的失效体积率随 GFRP 配筋率的增加而减小。由此表明提高板厚和 GFRP 配筋率可以降低混凝土板的失效体积率。

### 3.4 能量分摊率

GFRP 后锚固混凝土板的能量耗散主要由混凝土板和空气共同承担,其中空气分摊的能量较多。为了分析不同配筋率和板厚下 GFRP 后锚固混凝土板对爆炸能量耗散的差异,采用能量分摊率作为评价指标量化不同配筋率和板厚下混凝土板的耗能特征。混凝土板能量分摊率定义为混凝土板分摊的能量与总能量之比。

表 2 为不同配筋率和板厚下 GFRP 后锚固混凝土板的能量分摊率。由表 2 可知,当板厚为 0.12 m 时,不同配筋率下混凝土板的能量分摊率相近,表明配筋率对较薄混凝土板能量分摊率的影响较小;当板厚为 0.25 m 时,混凝土板能量分摊率的差异趋于明显,1 层 GFRP 筋时混凝土板的能量分摊率较小,2 层 GFRP 筋时次之,3 层 GFRP 筋时混凝土板的能量分摊率最高。此外,随着板厚的增加,其能量分摊率逐渐提高。可见,增加板厚和 GFRP 配筋率可以提高混凝土板分摊爆炸冲击能量的能力。

## 4 损伤标准及参数研究

在爆炸荷载作用下 GFRP 后锚固混凝土板上表面的损伤主要为成坑破坏,下表面形成拉伸破坏。为了量化爆炸荷载下 GFRP 后锚固混凝土板的损伤,基于损伤评价标准评估不同参数下混凝土板的损伤<sup>[33]</sup>,以生成损伤分级图,并建立用于快速评估 GFRP 后锚固混凝土板的损伤预测方程。关于混凝土板的损伤分级划分,Liu 等<sup>[17]</sup>和 Mcvay<sup>[34]</sup>根据混凝土板剥离后的总损伤深度  $H$ (上、下表面损伤深度之和)将混凝土板的损伤划分为 3 级:轻微损伤  $H < T/3$ ,中等损伤  $T/3 \leq H < 2T/3$ ,严重损伤  $H \geq 2T/3$ 。

基于混凝土板的损伤标准对数值模拟结果进行统计分析时,虽然通过提高损伤分级边界数据点的密度

表 1 不同配筋率和板厚下的失效体积率

Table 1 Failure volume rate under different reinforcement ratios and slab thicknesses

板厚/m	失效体积率/%		
	1 层 GFRP 筋	2 层 GFRP 筋	3 层 GFRP 筋
0.12	3.32	3.28	3.20
0.15	2.78	2.72	2.71
0.18	2.08	2.02	1.90
0.20	1.96	1.90	1.86
0.23	1.63	1.61	1.55
0.25	1.55	1.52	1.45

表 2 不同配筋率和板厚下的能量分摊率

Table 2 Energy sharing rate under different reinforcement ratios and slab thicknesses

板厚/m	能量分摊率/%		
	1 层 GFRP 筋	2 层 GFRP 筋	3 层 GFRP 筋
0.12	0.56	0.56	0.57
0.15	0.58	0.58	0.59
0.18	0.60	0.61	0.61
0.20	0.60	0.61	0.61
0.23	0.59	0.61	0.61
0.25	0.59	0.62	0.63

能够获取精确的损伤分级边界,但完全依靠数值模拟结果确定损伤分级边界数据点的计算工作量极大,实现较为困难,通过函数拟合的方法<sup>[19]</sup>拟合分级损伤数据点可得到 GFRP 后锚固混凝土板损伤分级的边界曲线(即损伤分级预测曲线),结果如图 11 所示。由图 11 可知,在爆炸过程中,厚度越大的混凝土板表现出的抗爆能力越高,TNT 当量增加会导致混凝土板产生更显著的损伤。通过数据拟合分别得到 1、2、3 层 GFRP 筋后锚固混凝土板的板厚与 TNT 当量之间的损伤分级预测曲线,损伤分级预测曲线满足对数函数关系:

$$T = \alpha \ln W + \beta \quad (0.12 \text{ m} \leq T \leq 0.25 \text{ m}) \quad (3)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  为常数。

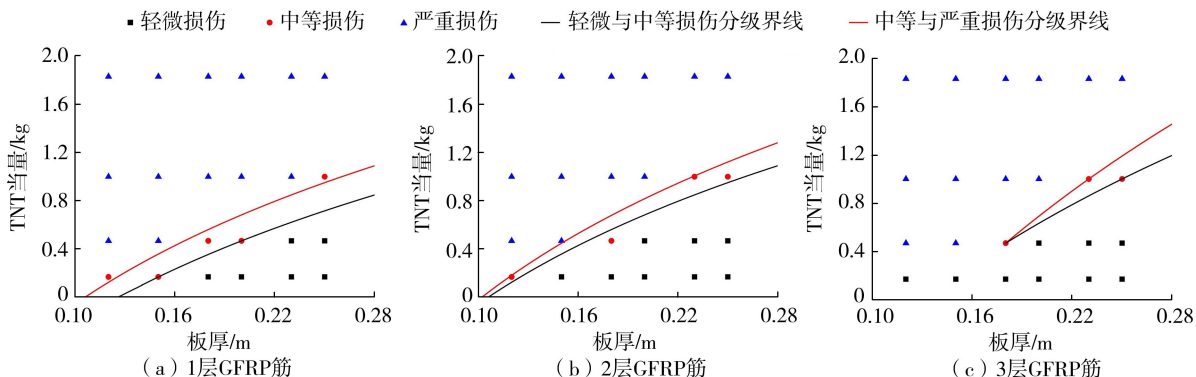


图 11 不同 TNT 当量与板厚的损伤分级预测曲线

Fig. 11 Prediction curves of damage level under different TNT weights and slab thicknesses

由图 11 还可知,当 TNT 当量为 0.168 kg 时,提高配筋率使得不同厚度混凝土板的损伤级别由中等损伤变为轻微损伤;当 TNT 当量为 1.000 kg 时,混凝土板的损伤级别由严重损伤变为中等损伤,这表明提高配筋率可以降低混凝土的损伤级别。不同配筋率 GFRP 后锚固混凝土板的损伤分级预测曲线拟合参数见表 3。观察表 3 可知,配筋率对损伤分级预测曲线的两个常数值有正相关影响,这是由于较高的配筋率显著提高了混凝土板抵抗损伤的能力。

表 3 不同配筋率下损伤分级预测曲线拟合参数

Table 3 Fitting parameters of damage level prediction curve under different reinforcement ratios

配筋层数	损伤分级	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
1 层	轻微与中等损伤	2.39	1.49	0.99
	中等与严重损伤	2.72	1.51	0.99
2 层	轻微与中等损伤	2.72	1.52	0.96
	中等与严重损伤	3.14	1.72	0.99
3 层	轻微与中等损伤	3.49	2.30	0.99
	中等与严重损伤	4.56	3.31	0.99

注: $R^2$  为决定系数。

## 5 结 论

a. 验证了 ALE 算法的有效性。ALE 算法可以较好地模拟钢筋混凝土板的爆炸过程,钢筋混凝土板上、下表面的模拟破坏结果与试验结果基本一致,表明 ALE 算法可以模拟 GFRP 后锚固混凝土板的爆炸过程。

b. 比较了共节点方式、CBIS 模型和 CONTACT\_1D 模型模拟黏结滑移行为的差异。不同黏结滑移模式模拟的 GFRP 后锚固混凝土板破坏过程及破坏机理相似,最终破坏模式不同,采用 CONTACT\_1D 模型模拟黏结滑移行为时混凝土板的破坏更严重。采用 CBIS 模型模拟 GFRP 筋与混凝土间的黏结滑移行为不仅具有较高的准确性,还可以提高建模效率。

c. 探讨了 GFRP 配筋率、板厚和 TNT 当量对 GFRP 后锚固混凝土板破坏模式的影响。提高 GFRP 配筋率和板厚可以有效地降低 GFRP 筋的轴向力、混凝土板的失效体积率,提高混凝土板的能量分摊率及其整体抗爆承载能力。

d. 基于混凝土板的损伤评价标准,构建了 GFRP 后锚固混凝土板的损伤分级预测曲线;该预测曲线可用于评估 TNT 当量和板厚变化对 GFRP 后锚固混凝土板损伤的影响,为混凝土结构抗爆性能的研究提供参考。

## 参考文献:

- [1] EL MAADDAWY T A, SOUDKI K A. Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(1): 41-47.
- [2] 王海涛, 马明磊, 许国文, 等. 预应力 CFRP 绞线和钢筋混合配筋混凝土梁的抗弯性能[J]. 河海大学学报(自然科学版),



- 2024,52(3):58-63. (WANG Haitao, MA Minglei, XU Guowen, et al. Flexural behavior of concrete beams reinforced by hybrid prestressed CFRP strands and steel rebars[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 58-63. (in Chinese))
- [3] 王海涛,陈磊,许国文,等. BFRP管约束再生混凝土圆柱轴压试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 77-83. (WANG Haitao, CHEN Lei, XU Guowen, et al. Axial compressive experiments of recycled concrete cylinders confined by BFRP tube[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 77-83. (in Chinese))
- [4] CHEN Zhao. Non-concrete breakout failure modes of concrete mechanical anchors in tension-a literature review[J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: 130222.
- [5] VITA N, SHARMA A, HOFMANN J. Bonded anchors with post-installed supplementary reinforcement under tension loading-experimental investigations[J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113754.
- [6] UPADHYAYA P, KUMAR S. Pull-out capacity of adhesive anchors; an analytical solution[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015, 60: 54-62.
- [7] RAJPUT A, KAUSHIK A, IQBAL M A, et al. Non-linear FE investigation of subsurface tunnel with gfrp protection against internal blast[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 172: 104423.
- [8] EL-GAMAL S, ALSHAREEDAH O. Behavior of axially loaded low strength concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals[J]. Engineering Structures, 2020, 216: 110732.
- [9] LIU Sanfeng, ZHOU Yinzi, ZHOU Jiannan, et al. Blast responses of concrete beams reinforced with GFRP bars; experimental research and equivalent static analysis[J]. Composite Structures, 2019, 226: 111271.
- [10] LIU Sanfeng, ZHOU Yinzi, ZHENG Qing, et al. Blast responses of concrete beams reinforced with steel-GFRP composite bars[J]. Structures, 2019, 22: 200-212.
- [11] ZHOU Yinzi, LIU Sanfeng, FENG Jiang, et al. Improved finite difference analysis of dynamic responses of concrete members reinforced with FRP bars under explosion[J]. Composite Structures, 2019, 230: 111518.
- [12] WANG Wei, ZHANG Duo, LU Fangyun, 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] 韩泽斌, 屈文俊. GFRP-钢筋混合配筋混凝土板的抗爆性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6718-6728. (HAN Zebin, QU Wenjun. Explosion resistance of hybrid GFRP-steel reinforced concrete slab[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(12): 6718-6728. (in Chinese))
- [14] MASAHIRO M, HIDEAKI T, TAKASHI I, et al. Damage of reinforced concrete slabs subjected to contact detonations[J]. Journal of Structural Engineering A, 2000, 46(3): 1787-1797.
- [15] MCVAY M K. Spall damage of concrete structures[M]. Vicksburg: Department of the Army, 1988.
- [16] LIU Jian, LI Jun, FANG Jianguang, et al. Investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions with a calibrated K&C model[J]. Engineering Structures, 2022, 255: 113958.
- [17] LIU Jian, LIU Cheng, XU Shenchun, et al. G-UHPC slabs strengthened with high toughness and lightweight energy absorption materials under contact explosions[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104138.
- [18] PENG Yun, WU Chengqing, LI Jun, et al. Mesoscale analysis on ultra-high performance steel fibre reinforced concrete slabs under contact explosions[J]. Composite Structures, 2019, 228: 111322.
- [19] WEI Jie, LIU Cheng, LIU Jian, et al. Investigations on geopolymer-based seawater sea-sand high performance concrete slabs reinforced with basalt FRP bars under direct contact explosions[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134538.
- [20] CAO Kelei, FU Qiaofeng, ZHANG Jianwei, et al. Study on the protection mechanism and damage grade prediction of different corrugated steel concrete composite structures under underwater contact explosion[J]. Ocean Engineering, 2024, 292: 116520.
- [21] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [22] WEI Jie, LI Jun, WU Chengqing, et al. Hybrid fibre reinforced ultra-high performance concrete beams under static and impact loads[J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112921.
- [23] SHI Yanchao, LI Zhongxian, HAO Hong. Bond slip modelling and its effect on numerical analysis of blast-induced responses of RC columns[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2009, 32(2): 251-267.
- [24] WEI Jie, LI Jun, WU Chengqing, et al. Experimental and numerical study on the impact resistance of ultra-high performance concrete strengthened RC beams[J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115474.
- [25] WEI Jie, LI Jun, WU Chengqing, et al. Impact resistance of ultra-high performance concrete strengthened reinforced concrete beams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 158: 104023.
- [26] QIAN Haimin, LI Jun, ZONG Zhouhong, et al. Behavior of precast segmental utility tunnel under ground surface explosion; a

numerical study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 115: 104071.

- [27] FAN Wei, YUAN Wancheng, YANG Zhi, et al. Dynamic demand of bridge structure subjected to vessel impact using simplified interaction model[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16(1): 117-126.
- [28] LANGRAN-WHEELER C, RIGBY S E, CLARKE S D, et al. Near-field spatial and temporal blast pressure distributions from non-spherical charges; horizontally-aligned cylinders[J]. *International Journal of Protective Structures*, 2021, 12(4): 492-516.
- [29] LI Jun, WU Chengqing, HAO Hong, et al. Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 93: 62-75.
- [30] LI Qi, WANG Gaohui, LU Wenbo, et al. Failure modes and effect analysis of concrete gravity dams subjected to underwater contact explosion considering the hydrostatic pressure[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 85: 62-76.
- [31] CHUNG Y S, MEYER C, SHINOZUKA M. Modeling of concrete damage[J]. *Structural Journal*, 1989, 86(3): 259-271.
- [32] 曹克磊. 钢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.
- [33] THILAKARATHNA H M I, THAMBIRATNAM D P, DHANASEKAR M, et al. Numerical simulation of axially loaded concrete columns under transverse impact and vulnerability assessment[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(11): 1100-1112.
- [34] MCVAY M K. Spall damage of concrete structures[M]. Vicksburg: Department of the Army, 1988.

(收稿日期: 2024-05-23 编辑: 熊水斌)

(上接第 46 页)

- [13] DUNCAN J M. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses[R]. Berkeley: University of California, 1980.
- [14] 曹艺凡, 岑威钧, 邓成发, 等. 土石坝加高工程老坝防渗墙施工时机优选[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(5): 87-93. (CAO Yifan, CEN Weijun, DENG Chengfa, et al. Optimization of construction timing of cut-off wall of old dam in an earth-rockfill dam heightening project[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(5): 87-93. (in Chinese))
- [15] 蔡新, 郭兴文, 沈培良, 等. 软土地基三维固结分析及其工程应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(5): 27-32. (CAI Xin, GUO Xingwen, SHEN Peiliang, et al. Three dimensional consolidation analysis of soft soil foundation and its application[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2001, 29(5): 27-32. (in Chinese))
- [16] 李涛, 高健. 软土地基固结 Neumann 随机有限元分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(4): 444-449. (LI Tao, GAO Jian. Neumann stochastic finite element analysis for consolidation of soft soil foundation[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(4): 444-449. (in Chinese))
- [17] 李平, 金奕潼, 赖建英, 等. 负压条件下土体渗流固结特性研究综述[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 115-121. (LI Ping, JIN Yitong, LAI Jianying, et al. Review of research on characteristics of seepage-induced consolidation of soil under negative-pressure reinforcement conditions[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(2): 115-121. (in Chinese))
- [18] 沈振中, 岑威钧, 徐力群, 等. 工程渗流分析与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [19] 陈祖煜, 陈立宏, 孙平. 非线性强度指标边坡稳定安全系数取值标准的研究[J]. *水力发电*, 2004, 30(2): 17-20. (CHEN Zuyu, CHEN Lihong, SUN Ping. An investigation on the allowable factors of safety in slope stability analysis using nonlinear strength parameters[J]. *Water Power*, 2004, 30(2): 17-20. (in Chinese))
- [20] 王路军, 李锐, 叶源新. 水力吹填堤坝危险水力条件和防渗墙受力分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(4): 426-431. (WANG Lujun, LI Rui, YE Yuanxin. Analysis of dangerous hydraulic conditions of hydraulic fill dam and impervious wall under impact of tidal action[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(4): 426-431. (in Chinese))
- [21] 高玉峰, 王迪, 张飞. 三维土质边坡稳定性分析方法研究现状与展望[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(5): 456-464. (GAO Yufeng, WANG Di, ZHANG Fei. Current research and prospects of 3D earth slope stability analysis methods[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(5): 456-464. (in Chinese))
- [22] 陈祖煜, 孙平, 张幸幸. 关于饱和软土地基堤坝边坡稳定分析总应力法的讨论[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(12): 1-8. (CHEN Zuyu, SUN Ping, ZHANG Xingxing. Discussion on total stress method for stability analysis on slope of embankment and dam on saturated soft soil foundation[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(12): 1-8. (in Chinese))
- [23] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 387-395.
- [24] 国家能源局. 碾压式土石坝设计规范: NB/T 10872—2021[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.

(收稿日期: 2024-07-05 编辑: 刘晓艳)