

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.022

爆炸荷载作用下不同抗剪连接件 组合梁动力响应及破坏模拟分析*

孙炳鑫¹, 王晓磊¹, 马文彪¹, 刘 强², 刘世勇³

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640;
3. 中冶节能环保有限责任公司, 北京 100088)

摘 要: 桥梁结构多采用含有抗剪连接件的组合梁, 由于意外事故可能导致汽车爆炸冲击对桥梁结构造成损伤, 同时一些废弃桥梁有必要进行爆破拆除。基于此背景, 有必要对含有抗剪连接件的桥梁结构进行爆炸分析。首先应用 ABAQUS 参照已有文献的爆炸试验验证了考虑高应变率相关混凝土本构、钢材本构的流固耦合模型的合理性, 然后对爆炸荷载作用下波形钢板、开孔钢板及栓钉抗剪连接件的组合梁进行流固耦合数值模拟分析, 研究三种不同抗剪连接件组合梁的破坏模式。结果表明: 在 2 kg 球形 TNT 炸药爆炸荷载作用下, 爆炸直接冲击导致组合梁连接件内侧混凝土失效删除, 外侧混凝土剥落, 临近爆点左右两侧混凝土产生较大塑性损伤。钢板类连接件破坏主要集中在圆孔与榫的连接处, 爆炸过程中, 栓钉连接件顶部受冲击显著, 底部发生剪切破坏。对于钢板类连接件, 混凝土榫内添加钢筋可有效减小钢板开孔处损伤。栓钉组合梁位移最小, 爆炸峰值过后由于栓钉为柔性连接件, 与混凝土共同作用, 爆炸峰值过后振速最小, 吸能效果较好。而钢板类连接件为刚性连接件, 抗冲击能力强, 峰值振速较低。研究结果可为桥梁结构及其他工程结构抗爆及爆破拆除提供借鉴意义。

关键词: 爆炸荷载; 抗剪连接件; 流固耦合

中图分类号: O383

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)01-0152-07

Dynamic Response and Failure Simulation of Composite Beams with Different Shear Connectors under Blast Load

SUN Bing-xin¹, WANG Xiao-lei¹, MA Wen-biao¹, LIU Qiang², LIU Shi-yong³

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology,
Guangzhou 510640, China; 3. Energy-saving and Environmental Protection, Ltd., MCC,
Group, Beijing 100088, China)

Abstract: Composite beams containing shear connectors are mostly used in bridge structures. Accidents may cause damage to the bridge structure due to vehicle explosion impact. At the same time, some abandoned bridges must be demolished by blasting. Based on this background, it is necessary to conduct an explosion analysis of a bridge structure containing shear connectors. First, ABAQUS was used to verify the rationality of the fluid-solid coupling model considering the high strain rate-related concrete constitutive and steel constitutive with reference to the explosion test in the existing literature. Then, the fluid-solid coupling numerical simulation was carried out for the composite beams with corrugated steel plates, perforated steel plates and bolted shear connectors under the action of explosion load, and the failure modes of the composite beams with three different shear connectors were studied. The results show that under the blast load of 2 kg spherical TNT, the concrete inside the composite beam connector is deleted, the concrete outside is spalling, and the concrete on the left and right sides near the explosion point has a large

plastic damage. The damage of the steel plate connector is mainly concentrated at the joint of the round hole and tenon. During the explosion, the top of the stud connector is significantly impacted, and the bottom is sheared. For steel plate connectors, the addition of steel bars in the concrete tenon can effectively reduce the damage at the opening of the steel plate. The displacement of the bolted composite beam is the smallest. After the explosion peak, because the bolt is a flexible connector and interacts with concrete, the vibration speed is minimum and the energy absorption effect is good. The steel plate connector is a rigid connector with strong impact resistance and low peak vibration velocity. The research results can provide reference for anti-blasting and blasting demolition of bridge structures and other engineering structures.

Key words: explosion load; shear connection; fluid-solid interaction

钢-混凝土组合结构由于能充分发挥混凝土和钢材各自的优点,已在桥梁工程和其他工程实践中得到广泛的应用^[1],钢与混凝土能够共同承受荷载主要是靠焊在钢材上的抗剪连接件(PBL、栓钉等)与上部混凝土连接成整体实现的^[2],已有学者对不同抗剪连接件钢混组合结构进行静载推出试验,宋瑞年对开孔和无孔 2 类波形钢板剪力键试件^[3],进行推出试验和数值模拟参数研究,得出波形钢板剪力键承载力计算公式并验证了其准确性。薛东焱采用有限元软件模拟含有贯穿钢筋开孔板连接件静载推出试验^[4],得出 PBL 抗剪连接件的极限抗剪承载力与钢筋屈服强度、直径和长度的关系表达式。汪劲丰对 5 组 24 个含有不同直径和高度栓钉的试件进行推出试验^[5],获得了栓钉在不同直径和高度下的荷载-滑移曲线和破坏模式,建立了栓钉连接件长径比为 4.5~13.2 时,栓钉连接件发生剪断破坏时的抗剪承载力计算式。但工程结构除承受静荷载外,还可能承受偶然的爆炸冲击动荷载^[6]。已有研究表明^[7],钢-混凝土组合结构比普通钢筋混凝土结构的抗爆性能优异。当前,钢-混凝土组合结构的抗爆性能研究已成为爆破工程的研究热点^[8],Zhao Zhu 对未含有抗剪连接件的钢混组合桥梁进行汽车爆炸数值分析^[9],得出在桥梁抗爆设计中应以抗弯

承载力和抗剪承载力为控制指标。曲艳东等对含有 J 型连接件的钢混组合板在 TNT 炸药量为 50~100 kg 爆炸冲击作用下进行数值模拟分析^[10],结果表明:炸药量和爆距是影响组合板破坏形态的关键因素。Lingzhao Meng 介绍了常用的抗剪连接件^[11],并对含有螺栓连接件的钢混凝土钢夹层壳体进行了数值模拟分析,数值结果表明:背面钢板较厚的曲面 SCS 夹层壳体表现出较好的抗爆性能,当矢跨比超过 0.16~0.25 时,曲壳的破坏更为严重。

由于进行爆炸试验比较复杂且具有一定的危险性,而数值模拟已成为研究爆炸问题经济有效的研究方法^[12-15]。鉴于当前对钢混组合结构多集中于静载推出试验研究,而对爆炸荷载作用下组合结构多集中于单一连接件,对不同抗剪连接件的钢混凝土组合结构在爆炸荷载作用下的性能研究较少。本文利用 ABAQUS 有限元软件,研究含有波形抗剪连接件、PBL 抗剪连接件、栓钉连接件的组合梁在爆炸荷载作用下的动力响应及破坏形式。

1 有限元模型的建立

1.1 模型验证

由于爆炸是强烈的非线性,混凝土参数采用考虑率相关的 JH2 本构模型^[16],参数如表 1。

表 1 JH-2 参数^[16]
Table 1 JH-2 parameters^[16]

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G/GPa	A	B	n	C	
2440	14.86	0.79	1.6	0	0.007	
m	ε_0	$S_{\max}$	T/GPa	$\varepsilon_{f\min}^{\text{pl}}$	$\varepsilon_{f\max}^{\text{pl}}$	$P_{\text{HEL}}/\text{MPa}$
0.61	1	7	0.00354	0.001	1	48
D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	HEL/MPa	
0.04	1	85	-171	208	80	

收稿日期:2021-09-05

作者简介:孙炳鑫(1994-),男,硕士研究生,主要从事钢筋混凝土结构研究,(E-mail)1030658153@qq.com。

通讯作者:王兆磊(1983-),男,博士、副教授,主要从事钢筋混凝土结构研究,(E-mail)wangsanshi2003@163.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51708317);河北省教育厅基金项目(QN2019108)

混凝土尺寸为 2000 mm × 400 mm × 120 mm。其中炸药采用方形 TNT 炸药,质量为 2 kg, TNT 采用 Lee Tarver 建立的普遍采用的“Jones Wilkins-Lee”(JWL)状态方程^[17]。这个方程正确地再现了爆轰后气体膨胀的现象。

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

式中: P 为静水压力; V 为比体积; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和

ω (绝热常数) 为常数, 其值已通过动态实验确定。本研究使用的 TNT 特性如表 2 所示。其中 V_{C-J} 、 e_{C-J} 、 P_{C-J} 和分别表示 $C-J$ 爆速、能量和压力。

表 2 TNT 参数方程

Table 2 TNT parametric equation

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A/kPa	B/kPa	R_1	R_2	ω	$V_{C-J}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$e_{C-J}/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	P_{C-J}/kPa
1.63	373 770 000	3 747 100	4.15	0.9	0.35	6930	6 000 000	21 000 000

空气采用理想气体状态方程(EOS)。在理想气体中,内能是温度的函数。因此,具有均匀初始条件的气体的状态方程可以写成

$$\gamma = 1 + \frac{R}{C_V} \quad (2)$$

式中: p 为静水压力; ρ 为密度; e 为比内能; γ 是绝热指数, 定义为

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (3)$$

式中: R 表示通用气体常数; γ 除以特定气体的有效分子量; C_V 是恒定体积下的比热; e 为比内能。表 3 显示了本研究所用空气的特性^[18]。

表 3 空气参数

Table 3 Air parameters

γ	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	θ/K	$C_V/(\text{J} \cdot \text{kgK}^{-1})$	$e/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$
1.4	1 225 000	288	717.6	206 800

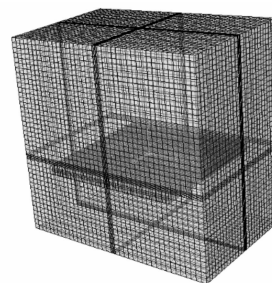
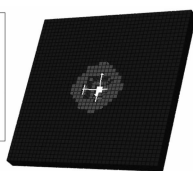
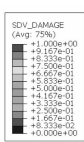
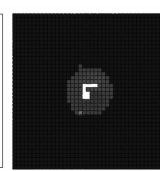
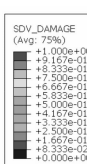


图 1 流固耦合模型

Fig. 1 Fluid-solid interaction model



(a) 迎爆面对比
(a) Head-on contrast



(b) 背爆面对比
(b) Back burst contrast

图 2 P0-1 试验与模拟结果对比^[19]

Fig. 2 Comparison of P0-1 testand simulation results^[19]

对比试验与模拟结果,试验得到爆坑直径为 295 mm,模拟结果混凝土爆坑失效删除单元 6 个,因此爆坑直径为 300 mm,误差为 1.6%,背爆面震塌面积为 550 mm × 530 mm 且几乎贯穿,模拟结果显示背爆面混凝土损伤区域 12 个网格,约 600 mm × 600 mm。跨中混凝土单元删除显示已经贯穿,由于试验中四边固定临空状态,在爆炸过程中可能存在晃动,使爆炸威力分散,故没有完全贯穿。而模拟中理想边界四边固定不动,造成模拟结果相比较实际试验要严重一些。综合来看采用流固耦合算法同样可较好的模拟爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的动态响应,验证了流固耦合模型的合理性。

钢筋被模拟为各向同性、线弹性和应变硬化。它与热软化塑性有关。钢的压缩量与压力水平近似成正比。因此,弹性响应由线性状态方程定义。压力水平取决于体积模量 K 和压缩密度 ρ 的函数

$$P = K\mu \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (5)$$

塑性响应由 Johnson 和 Cook 应变硬化、应变率有效和压力软化材料本构定律定义^[20]。屈服强度 Y

$$Y = [\sigma_0 + B_s(\varepsilon^P)^{ns}][1 + C_s \log_p^*][1 - T_H^{ms}] \quad (6)$$

$$T_H = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} + T_{room}} \tag{7}$$

式中: T 为材料温度; T_{melt} 为熔化温度; T_{room} 为室温。
本研究中使用的钢筋性能如表 4 和表 5 所示^[20]。

表 4 钢筋性能(线性状态方程)
Table 4 Properties of steel
(LINEAR EQUATION OF STATE)

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/ kPa	室温/ K	比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$)	λ
钢	7.800	1.998	300	477	0
-	-	-	-	-	-

表 5 钢筋性能(JC 强度模型)
Table 5 Steel Properties(JC STRENGTH MODEL)

材料	G	f_y	B	n	C	m	T_{melt}
钢	81 800 000	1.998	2.7	0.31	0.014	1.03	1793
-	-	-	-	-	-	-	-

栓钉、钢板选用弹塑性模型,文献[21]进行了高温下钢螺栓双角钢连接的分析,计算了 ST14 钢材螺栓节点在动载下的性能,本文同样参照该参数,损伤准则采用柔性损伤。根据文献[22]拟合出的断裂应变与应力三轴试验结果的最佳曲线,曲线如图 3。

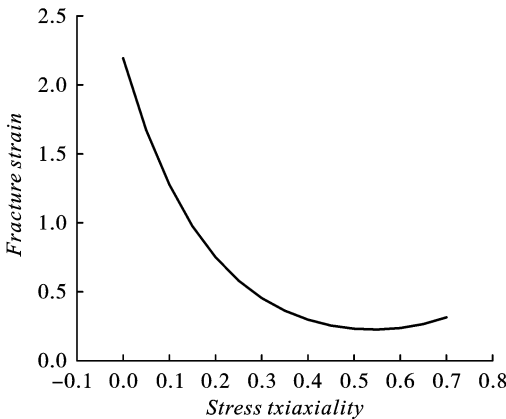


图 3 断裂应变与应力三轴试验结果的最佳曲线拟合
Fig. 3 Best curve fitting of fracture strain
and stress triaxial test results

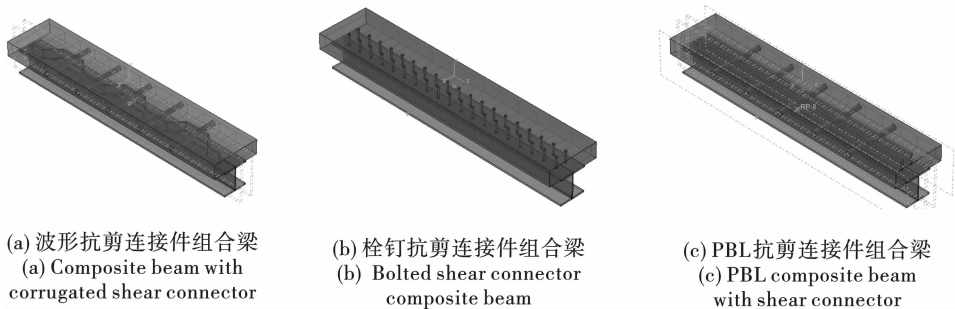


图 5 三种连接件组合梁
Fig. 5 Three kinds of connectors combined beam

1.2 边界条件及网格划分

由于爆炸是强烈的动态非线性问题,选用动力显示分析步骤,为进一步得到相对准确计算结果,不进行质量缩放,由于爆炸现象持续时间极短,所以时间选用较短时间 0.001 s,打开几何大变形。对于欧拉体与拉格朗日体采用通用接触,接触属性默认,混凝土与钢梁采用面面接触,摩擦系数选为 0.4,法向硬接触。栓钉、钢板下表面与钢梁绑定,钢筋、栓钉、钢板内置入混凝土中,混凝土棒与钢板之间空洞接触和混凝土与钢梁接触属性保持一致。TNT 炸药位于混凝土上方 0.2 m 处,由于网格质量对 CEL 分析结果影响较大,本文研究重点在拉格朗日部件,欧拉体部分适当细化选用与拉格朗日体尺寸接近,混凝土、钢板、栓钉部件结构比较复杂,局部进行加密处理,类型均选用 C3D8R。图 4 给出了波形抗剪连接件组合梁流固耦合模型。

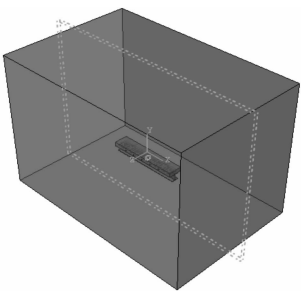


图 4 流固耦合模型
Fig. 4 Fluid-solid coupling model

三种类型抗剪连接件模型如图 5 所示。

1.3 结果分析

炸药爆炸的动态整体效果过程如图 6 所示(以栓钉组合梁为例),炸药正下方的混凝土破坏严重,向左右两侧扩展。

选取炸药正下方迎爆面中心点,绘制三种抗剪键组合梁的位移情况图 7,开孔钢板位移最大,在爆炸过程中钢板连接件位移持续增加,而栓钉总体位移较小,且位移无明显增加。

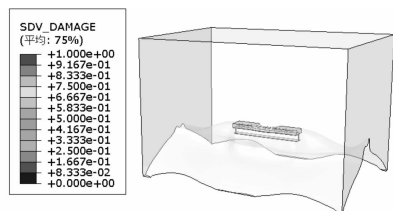


图6 整体效果

Fig. 6 Overall effect

由位移云图8,可以发现混凝土的剥落集中连接件外侧。对于开孔连接件,混凝土棒起到一定的抗冲击作用,模拟结果图9发现波形板中的棒位移比开孔板中棒的位移大,并且炸药正下方棒破坏最为严重,观察三种连接件的应力图10可以发现应力变化值比较接近,钢板类连接件破坏主要集中在圆孔与棒的连接处,栓钉破坏主要集中在上部。根部出现剪切破坏。绘制三种组合梁混凝土迎爆面中点速度时程曲线图11,提取数据发现0.00012 s时

速度达到最大值,其中栓钉峰值速度最大,开孔钢板和波形钢板峰值速度接近,在随后的时间,栓钉组合梁混凝土速度迅速下降,由于钢板为刚性连接件,抗冲击能力较强,但峰值过后,栓钉为柔性连接件,与混凝土共同作用,吸能效果较好。因此速度降为最小。

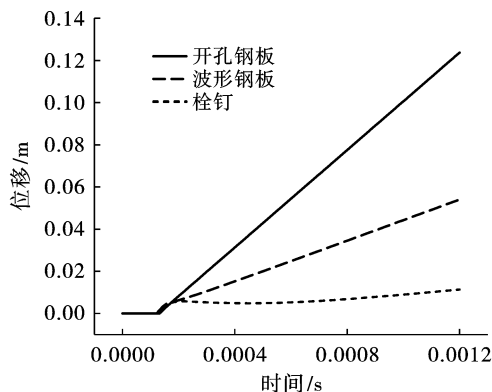


图7 三种连接件组合梁位移

Fig. 7 Three kinds of joint beam displacement

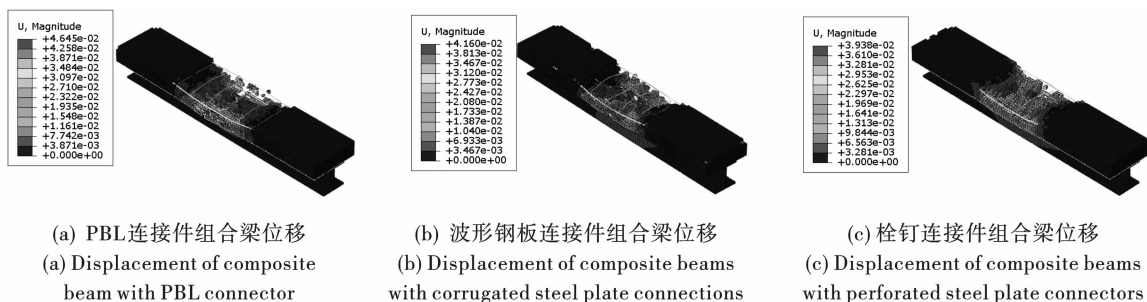
(a) PBL连接件组合梁位移
(a) Displacement of composite beam with PBL connector(b) 波形钢板连接件组合梁位移
(b) Displacement of composite beams with corrugated steel plate connections(c) 栓钉连接件组合梁位移
(c) Displacement of composite beams with perforated steel plate connectors

图8 组合梁位移

Fig. 8 Displacement of composite beam

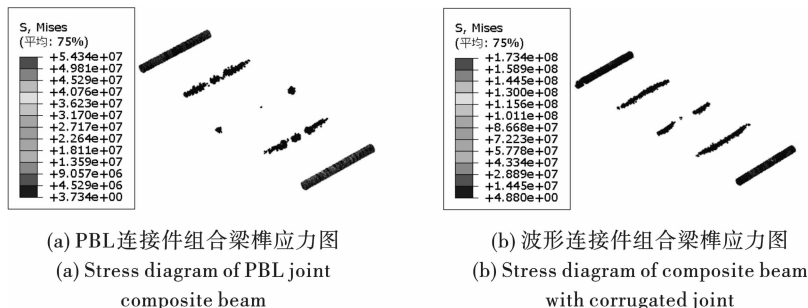
(a) PBL连接件组合梁棒应力图
(a) Stress diagram of PBL joint composite beam(b) 波形连接件组合梁棒应力图
(b) Stress diagram of composite beam with corrugated joint

图9 棒应力云图

Fig. 9 Stress nephogram of concrete tenon

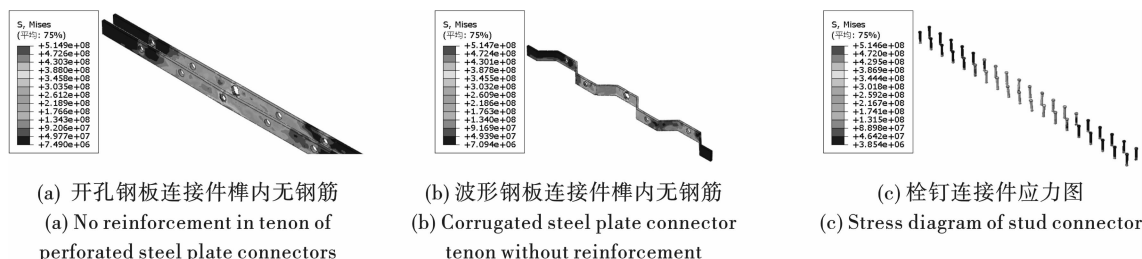
(a) 开孔钢板连接件棒内无钢筋
(a) No reinforcement in tenon of perforated steel plate connectors(b) 波形钢板连接件棒内无钢筋
(b) Corrugated steel plate connector tenon without reinforcement(c) 栓钉连接件应力图
(c) Stress diagram of stud connector

图10 三种连接件应力云图

Fig. 10 Stress nephogram of three kinds of connectors

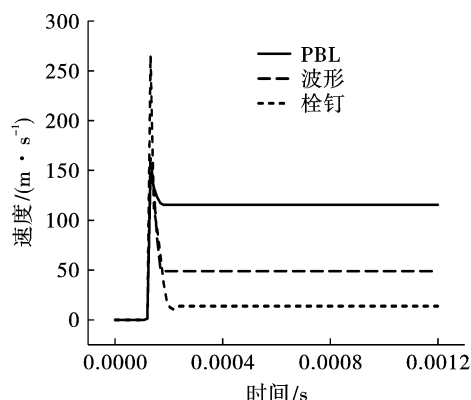


图11 三种连接件速度响应曲线图

Fig. 11 Velocity response of three kinds of connectors

通过对开孔钢板中间三个榀内加入直径为

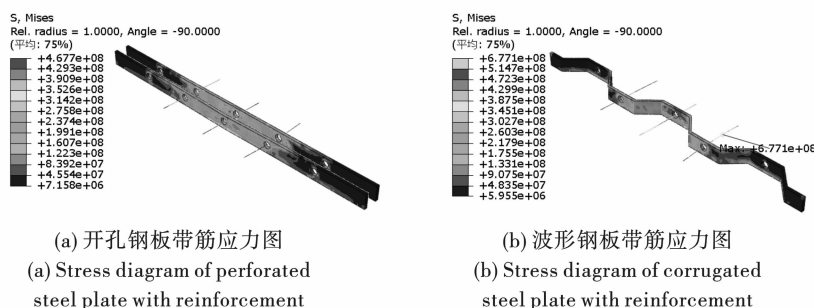


图12 带筋应力图

Fig. 12 Stress diagram with reinforcement

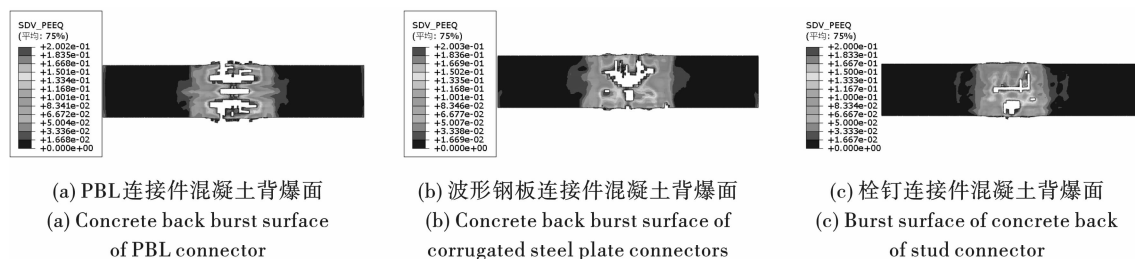


图13 三种连接件混凝土背爆面

Fig. 13 Back blasting face of concrete with three kinds of connectors

(2)爆炸直接冲击导致组合梁连接件内侧混凝土失效删除,外侧混凝土剥落,爆炸产生的应力波沿爆心向左右两侧传播,造成临近爆点混凝土产生较大塑性损伤。

(3)含有波形钢板和PBL开孔此类刚性连接件组合梁在承受爆炸峰值振速较小,栓钉此类柔性连接件组合梁峰值振速较大,由于栓钉数量较多导致反射拉伸波减小,吸能较好,峰值过后振速最小并且位移最小。三种连接件应变接近但破坏形态不同,栓钉顶部受到直接冲击,底部受剪,开孔连接件破坏集中在开孔处。另外混凝土榀内添加贯通钢筋可有效降低开孔连接件开孔处的变形。

0.004 m 钢筋,对比图 10 与图 12 在榀内加钢筋云图,圆孔处的破坏程度降低。观察背爆面混凝土塑性破坏云图 13,混凝土破坏失效删除部分主要集中在不包含连接件的部分。其中栓钉组合梁破坏区域较少。

2 结论

(1)采用流固耦合方法建立的数值模型经过与试验对比能真实反映爆炸荷载作用下结构的真实动态响应。选取合适的钢材以及混凝土本构关系,正确定义边界条件和构件间的约束接触作用,并结合实验结果开展数值模拟验证,能确保模拟方法的有效以及合理性。

参考文献 (References)

- [1] 吴丽丽, 琚祥凯, 吕步凡, 等. 考虑滑移效应的钢板-混凝土组合板刚度分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 59-65.
- [1] WU Li-li, JU Xiang-Kai, Lü Bu-fan, et al. Stiffness analysis of steel plate-concrete composite slab considering slip Effect[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(3): 59-65. (in Chinese)
- [2] 聂建国, 刘明, 叶列平. 钢-混凝土组合结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 75-88.
- [3] 宋瑞年, 占玉林, 赵人达, 等. 嵌入式波形钢板剪力键推出试验及数值分析[J]. 中国公路学报, 2019,

- 32(5):92-103.
- [3] SONG Rui-nian,ZHAN Yu-lin,ZHAO Ren-da,et al. Push-out test and numerical analysis of embedded shear connectors with corrugated steel plates[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(5):92-103. (in Chinese)
- [4] 薛东焱,黄杨成,宛青云,等. 贯穿钢筋对开孔板连接件抗剪承载力影响的非线性分析[J]. 工业建筑,2020,50(11):65-70.
- [4] XUE Dong-yan,HUANG Yang-cheng,WAN Qing-yun,et al. Nonlinear analysis of the effect of through reinforcement on shear capacity of perforated plate connections[J]. Industrial Construction,2020,50(11):65-70. (in Chinese)
- [5] 汪劲丰,张爱平,王文浩. 栓钉高度对栓钉连接件抗剪性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(11):2076-2084.
- [5] WANG Jin-feng,ZHANG Ai-ping,WANG Wen-hao. Effects of stud height on shear behavior of stud connectors[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2020,54(11):2076-2084. (in Chinese)
- [6] 田志敏,章峻豪,江世永. 钢板混凝土复合梁在爆炸荷载作用下的损伤评估研究[J]. 振动与冲击,2016,35(4):42-48.
- [6] TIAN Zhi-min,ZHANG Jun-hao,JIANG Shi-yong. Damage assessment of steel-concrete composite beam subjected to blast loading[J]. Journal of Vibration and Shock,2016,35(4):42-48. (in Chinese)
- [7] ASIM Abbas,MOHAMMAD Adil,NAVEED Ahmad,et al. Behavior of reinforced concrete sandwiched panels (RCSPs) under blast load[J]. Engineering Structures,2019,181(FEB. 15):476-490.
- [8] QU Yan-dong,LIU Wan-li,MUSA Gwarzo,et al. Parametric study of anti-explosion performance of reinforced concrete T-shaped beam strengthened with steel plates[J]. Construction and Building Materials,2017,156:692-707.
- [9] ZHU Zhao,LI Yuan,HE Shuan-hai,et al. Analysis of the failure mechanism of multi-beam steel-concrete composite bridge under car explosion[J]. Advances in Structural Engineering,2019,23(3):1-11.
- [10] 曲艳东,秦彦帅,于跃,等. 爆炸荷载作用下钢-混凝土-钢组合板的动态响应数值模拟[J]. 高压物理学报,2021,35(2):136-144.
- [10] QU Yan-dong,QIN Yan-shuai,YU Yue,et al. Numerical simulation of dynamic response of steel-concrete-steel composite slab under blast loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2021,35(2):136-144. (in Chinese)
- [11] MENG Ling-zhao,WANG Yong-hui,ZHAI Xi-mei. Modeling and dynamic response of curved steel-concrete-steel sandwich shells under blast loading[J]. International Journal of Steel Structures,2020,20(5):1663-1681.
- [12] WU Jun,ZHOU Yi-ming,ZHANG Rui,et al. Numerical simulation of reinforced concrete slab subjected to blast loading and the structural damage assessment[J]. Engineering Failure Analysis,2020,118:104926.
- [13] QU Yan-dong,LI Xin,KONG Xiang-qing,et al. Numerical simulation on dynamic behavior of reinforced concrete beam with initial cracks subjected to air blast loading[J]. Engineering Structures,2016,128:96-110.
- [14] 王尧鑫,龙仁荣,张庆明,等. 双层复合材料爆炸圆筒内爆载荷作用变形特征数值模拟[J]. 兵工学报,2020,41(S2):189-199.
- [14] WANG Yao-xin,LONG Ren-rong,ZHANG Qing-ming,et al. Numerical simulation analysis of deformation characteristics of double layered metal plastic cylindrical shells under internal explosive loading[J]. Acta Armamentarii,2020,41(S2):190-200. (in Chinese)
- [15] 李正鹏,曲艳东. 爆炸荷载作用下焊缝区附近埋地X70钢管的动力响应分析[J]. 高压物理学报,2020,34(3):126-133.
- [15] LI Zheng-peng,QU Yan-dong. Dynamic response analysis of buried X70 steel pipe near weld zone under blast loads[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2020,34(3):126-133. (in Chinese)
- [16] CHAHMI Oucif,LUTHFI Muhammad Mauludin. Numerical modeling of high velocity impact applied to reinforced concrete panel-ScienceDirect[J]. Underground Space,2018,4(1):1-9.
- [17] LEE E L,TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids,1980,23(12):2362-2372.
- [18] CODINA R,AMBROSINI D,de BORBÓN F. Experimental and numerical study of a RC member under a close-in blast loading[J]. Engineering Structures,2016,127:145-158.
- [19] 汪维,杨建超,汪剑辉,等. POZD涂层方形钢筋混凝土板抗接触爆炸试验研究[J]. 爆炸与冲击,2020,40(12):14-23.
- [19] WANG Wei,YANG Jian-chao,WANG Jian-hui,et al. Experimental research on anti-contact explosion of POZD coated square reinforced concrete slab[J]. Explosion and Shock Waves,2020,40(12):14-23. (in Chinese)
- [20] JOHNSON G R,COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics,1983,21:541-548.
- [21] HANTOUCHE E G,ABBOUD N H,MOROVAT M A,et al. Analysis of steel bolted double angle connections at elevated temperatures[J]. Fire Safety Journal,2016,83(Jul.):79-89.
- [22] ABOUTALEBI F H,BANIHASHEMI A. Numerical estimation and practical validation of Hooputra's ductile damage parameters[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,75(9-12):1701-1710.