

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.026

爆炸荷载下桥墩挂板防护性能研究*

周宏元^{1,2}, 张雪健¹, 王小娟¹, 周后湛¹

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为研究挂板对桥墩在爆炸荷载作用下的防护性能, 利用 ANSYS/LS-DYNA 建立钢筋混凝土板爆炸数值模型并验证其有效性, 对有无挂板防护空心截面桥墩数值模型在爆炸下的响应与破坏进行分析比较, 通过观察应力波的传播过程、桥墩的破坏形态以及背爆面位移, 进一步讨论挂板面板厚度、芯层密度及芯层厚度等关键参数对挂板爆炸防护效果的影响。研究表明: 安装挂板可显著减轻桥墩在爆炸荷载下的损伤; 当挂板面板厚度从 1 cm 增加到 3 cm、芯层厚度从 10 cm 增加到 30 cm, 桥墩背爆面位移显著降低; 在一定范围内, 挂板防护性能随芯层密度的增大而提高, 对轻质挂板应用于桥墩爆炸防护具有一定指导意义。

关键词: 挂板; 桥墩; 爆炸荷载; 抗爆性能

中图分类号: O383

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2021)02-0175-09

Anti-blast Performance of Cladding on Bridge Pier under Explosive Loading

ZHOU Hong-yuan^{1,2}, ZHANG Xue-jian¹, WANG Xiao-juan¹, ZHOU Hou-zhan¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the protection performance of the cladding on a bridge pier under explosion loading, a numerical model of reinforced concrete slab under explosion was established with ANSYS/LS-DYNA and its validity was verified. Using this numerical model, the response and failure modes of a hollow rectangular section pier with and without cladding under explosion loading were analyzed and compared. The propagation process of stress wave, the failure mode of pier and the displacement of the pier surface opposite to explosion were observed. Meanwhile, the influence of the thickness of the cladding, the density and thickness of the core layer on the protective effect to the pier under explosion were further discussed. The results show that the damage degree of the pier under explosion can be significantly reduced by the attached cladding. When the thickness of the cladding increased from 1 cm to 3 cm and the thickness of the core layer increased from 10 cm to 30 cm, the displacement of the pier surface opposite to explosion decreased obviously. Within certain limits, the protection effectiveness increased with core density. This study can facilitate the application of lightweight cladding on pier protection against explosion.

Key words: pier; cladding; explosion loading; protective effectiveness

桥梁在交通系统中发挥着重要作用,在恐怖袭击和意外事故导致爆炸作用下发生损伤或垮塌的情况时有发生。桥梁设计虽然考虑了风荷载、地震荷载、车辆撞击荷载等因素,但通常未考虑爆炸荷载作用下的响应和防护。

为研究各种桥墩在爆炸荷载下的响应和可能的优化形式,国内外研究者对典型的钢筋混凝土桥墩、矩形空心截面桥墩、双层钢管填充混凝土桥墩、预制拼装桥墩、箱形梁桥等在爆炸荷载下的变形和破坏模式进行了研究^[1,2]。在桥墩爆炸防护方面,使用FRP加固既有桥墩^[3],可使其相较传统桥墩具有更大整体刚度,减轻其破坏程度,具有较好的抗爆性能,Zong等人对新型结构形式的桥墩在爆炸荷载作用下的响应与破坏模式进行了研究^[4],发现钢管与混凝土组合的新型桥墩截面形式可以显著提高桥墩的抗爆性能。

随着材料研究的发展,将轻质挂板安装于结构表面降低结构在爆炸荷载作用下的损伤已成为一种新型防护方法^[5],受到了越来越多的关注,且相关人员对其防护性能的机理进行了研究,将挂板在爆炸荷载下的响应分为三个阶段^[6]。此类挂板由面板和密度较低、易压缩、吸能效率较高的多孔材料或轻质结构芯层构成,可吸收部分爆炸能量,降低传递到被保护结构的能量从而达到防护效果,在建筑结构爆炸防护领域取得了一定成果,然而在桥梁爆炸防护领域未见报道,且挂板在受爆炸荷载破坏后,可直接对其更换,降低了桥墩维修的时间成本和经济成本。

研究使用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,通过试验验证过的数值建模方法建立桥墩受爆炸荷载模型,对爆炸荷载作用下安装挂板与否两种情况下桥墩的损伤进行对比,并对影响挂板防护性能的重要因素进行参数分析,所得结论对挂板在桥墩爆炸防护中的应用具有一定指导意义。

1 数值模型的试验验证

1.1 试验介绍

由于爆炸试验场地及试验安全性的限制,及有限元技术的飞速发展,本文采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对使用挂板进行桥墩抗爆的效果进行研究。

为验证本文中数值模型的合理性与模拟精度,建立数值模型模拟文献[7]中的试验,并将模拟结果与试验对比。爆炸试验如图1所示,钢筋混凝土板尺寸为 $6\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.3\text{ m}$,混凝土立方体抗压强度为 37 MPa 。所用钢筋屈服强度为 500 MPa ,极限抗拉强度为 600 MPa ,弹性模量为 210 GPa ,沿混凝土板双层布置,沿长度方向布置钢筋直径 16 mm ,间隔 140 mm ;宽度方向钢筋直径 10 mm ,间隔 150 mm ;上下两层钢筋之间用直径 8 mm 的箍筋连接。钢筋混凝土板放置于用钢管固定的木柱上,且基础为较坚硬的土地,在几次爆炸试验后沉降较小。试验中TNT装药质量为 25 kg ,尺寸为 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,通过钢管架固定位置,炸药中心距板顶部 450 mm 。



图1 爆炸试验图

Fig. 1 Test set-up

1.2 材料模型

爆炸试验数值模型中涉及的主要材料包括炸药、空气、混凝土和钢。炸药材料采用高能炸药模型 HIGE _ EXPLOSIVE _ BURN 和 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程,等熵表达式为

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

式中: P 为爆轰压力; $V = v/v_0$ 为相对体积, v 为爆轰产物体积, v_0 为炸药初始体积; E_0 为初始内能密度; A 、 B 、 R_1 、 R_2 与 ω 为由试验得到的与炸药性质有关的参数,各参数见表1。

空气采用材料模型 MAT_NULL 和线性状态方程 LINEAR_POLYNOMIAL 进行模拟,其线性多项式状态方程为

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

式中: P 为爆轰压力; E_0 为初始内能密度; μ 代表空气压缩程度; C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 均为常数,各个参数见表2。

收稿日期:2021-02-01

作者简介:周宏元(1981-),男,博士、教授、博导,从事极限荷载下的结构防护、结构轻量化的教学和科研工作,(E-mail) hzhou@bjut.edu.cn。

通讯作者:王小娟(1982-),女,博士、副教授、硕导,从事吸能材料及结构损伤识别研究,(E-mail) xiaojuanwang@bjut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(51808017、51778028);北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放课题(KFJJ20-02M);北京市教委科技计划一般项目(KM201810005019)

表 1 炸药参数

Table 1 Parameters of explosive

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa	V
1630	371.2	3.231	4.15	0.95	0.3	7.0	1.0

表 2 空气参数

Table 2 Parameters of air

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/Pa
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^5

在爆炸冲击等强动载作用下,混凝土需要考虑应变率效应。本模拟采用 73 号 K&C 模型 MAT_CONC-RETE_DAMAGE 模拟混凝土材料,通过输入动力增大系数(DIF)与应变率的曲线来考虑混凝土的应变率效应。混凝土抗压强度动力增大系数可以通过以下公式计算^[8]

$$\begin{cases} DIF = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} = 0.0419(\lg \dot{\epsilon}_d) + 1.216, & \dot{\epsilon}_d \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ DIF = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} = 0.8988(\lg \dot{\epsilon}_d)^2 - 2.8255(\lg \dot{\epsilon}_d) + 3.4907, & \dot{\epsilon}_d > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}_d$ 为应变率; f_{cd} 为混凝土在应变率为 $\dot{\epsilon}_d$ 时的动态抗压强度; f_{cs} 为混凝土静态抗压强度,应变率与动力增大系数关系如图 2 所示。输入的混凝土材料模型参数如表 3 所示。计算过程中,通过添加 MAT_ADD_EROSION 关键字来删除失效的混凝土单元。通过设置最大失效应变来定义混凝土单元失效,但是由于材料失效单元应变与有限元模型的单元尺寸及应变率有关,虽然选取最大失效应变的失效准则已在数值模拟中广泛应用,但其取值还未达成统一,本文选取 0.001 作为混凝土单元的失效应变^[2]。

表 3 混凝土参数

Table 3 Parameters of concrete

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	v	f_c/MPa
2500	0.2	30

钢筋采用随动塑性材料模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC,通过 Cowper-Symonds 模型中的参数 C 和 P 来考虑应变率的影响,输入的钢筋材料模型参数如表 4 所示^[2]。

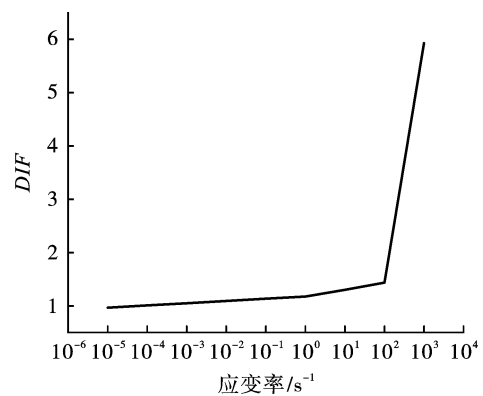


图 2 混凝土应变率与动力增大系数的关系
Fig. 2 Relationship between dynamic increasing factor and strain rate of foam concrete

表 4 钢参数

Table 4 Parameters of steel

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	v	σ_y/MPa	C	P
7800	210	0.33	500	40	5

1.3 有限元模型

建立的钢筋混凝土板爆炸试验模型如图 3 所示,其中混凝土、空气与炸药采用 SOLID164 单元,钢筋采用 BEAM161 单元^[2],由于爆炸时间相较于结构响应时间极短,钢筋与混凝土采用共节点处理。为消除空气边界反射对计算结果的影响,建立较大的空气域,尺寸为 620 cm × 200 cm × 230 cm,钢筋单元尺寸为 3.5 cm,混凝土单元尺寸为 3.75 cm,空气单元尺寸 3.6 cm,网格尺寸对模拟结果的影响在文献[2]中已进行详细讨论,本模拟各材料单元网格尺寸选取同文献[2]。空气域未在图 3 中显示,其边界设置为无反射边界。通过约束混凝土板下方沿宽度方向边缘的两条棱 XYZ 方向的位移来模拟木桩对混凝土板的支撑作用。通过关键字 SET_PART_LIST 将空气与炸药设置为一个 PART 集合,将钢筋与混凝土设置为一个 PART 集合,然后通过关键字 ALE_MULTIMATERIAL_GROUP 和 CONSTRAIN_

LANGRANGE_IN_SOLID 实现流固耦合。TNT 装药质量为 25 kg, 尺寸为 0.3 m × 0.3 m × 0.2 m。

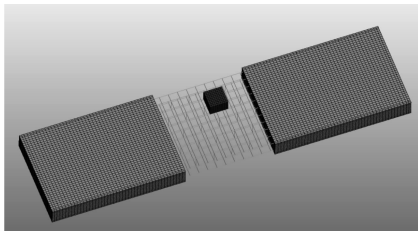


图3 钢筋混凝土板爆炸试验有限元模型

Fig. 3 Numerical model of a reinforced concrete slab subjected to an explosion

1.4 数值模型验证

通过对比爆炸试验与数值模拟中钢筋混凝土板的破口形状与尺寸, 及超压峰值来验证数值模型的合理性与计算精度。试验中使用高速摄像机记录混凝土板响应, 并通过图像处理获得混凝土剥落面积。图4为钢筋混凝土板在爆炸后的破坏情况, 经计算, 钢筋混凝土板正面菱形破口面积为 0.43 m²。

图5为模拟中钢筋混凝土板的破坏情况, 通过 ANSYS/LS-DYNA 中的 Measure 工具测量菱形破口

面积。通过测量, 数值模拟中钢筋混凝土板顶部破口面积为 0.45 m², 与试验结果相差 4.6%。



图4 爆炸后钢筋混凝土板破坏情况

Fig. 4 Damage of concrete slab after blast

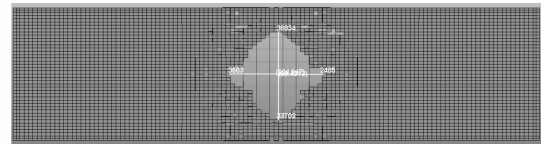


图5 数值模拟中钢筋混凝土板破坏情况

Fig. 5 The numerically simulated concrete slab damage after blast

enrych 计算空气冲击波超压峰值的公式为^[9]

$$P_{so} = \begin{cases} \frac{1.40717}{Z} + \frac{0.55397}{Z^2} - \frac{0.03572}{Z^3} + \frac{0.000625}{Z^4}, & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\ \frac{0.61938}{Z} - \frac{0.03262}{Z^2} + \frac{0.21324}{Z^3}, & 0.3 \leq Z \leq 1 \\ \frac{0.0662}{Z} + \frac{0.405}{Z^2} + \frac{0.3288}{Z^3}, & 1 \leq Z \leq 10 \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{so} 为超压峰值, MPa; Z 为比例距离。

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (5)$$

式中: R 为测点与炸药中心的距离, m; W 为等效 TNT 质量, kg。

选择距装药中心 0.45 m 的单元提取其超压时程曲线, 如图6所示, 峰值超压为 22.5 MPa。根据公式计算出的超压峰值为 23.82 MPa, 相差 5.5%。通过对比试验与数值模拟钢筋混凝土板破口形状和尺寸, 及超压峰值模拟值与经验公式的差距可知, 本研究中的数值模型可合理模拟钢筋混凝土结构在比例距离为 0.05 ~ 0.3 范围内爆炸荷载下的变形与破坏特征, 数值模拟得到的钢筋混凝土板的破口形状、尺寸以及反射超压峰值与试验结果吻合较好。

2 桥墩的爆炸响应和挂板防护

2.1 数值模型

从上述爆炸试验可以看出爆炸荷载会对钢筋混

凝土板产生较大破坏, 为减小其损伤, 使用挂板对其进行防护。根据文献[2, 10]中的钢筋混凝土空心截面桥墩缩尺模型及相关规范[11]建立桥墩模型, 由钢筋混凝土板模拟结果可以看出, 第1节中使用的建模方法可以有效预测爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的破坏模式和程度, 空心截面矩形桥墩是由四块钢筋混凝土板改变其边界条件拼接而成的结构, 其几何尺寸和配筋如图7所示。空心柱高 6 m, 外部轮廓尺寸为 200 cm × 150 cm, 内部空心截面尺寸为 120 cm × 70 cm, 柱头尺寸为 223 cm × 173 cm × 76 cm。采用的混凝土强度等级为 C40, 纵向钢筋直径 38 mm, 横向钢筋直径 20 mm, 全高加密, 间距为 10 cm, 混凝土保护层厚度为 40 mm。

根据图7建立桥墩数值模型。为分析挂板的爆炸防护效果, 需研究对比工况。建立的数值模型如图8所示, 其中1为桥墩, 2为炸药, 3为轻质挂板。图8(a)为无挂板防护桥墩受爆炸荷载作用模型示意图, 图(b)为安装挂板防护桥墩受爆炸荷载作用

模型示意图。

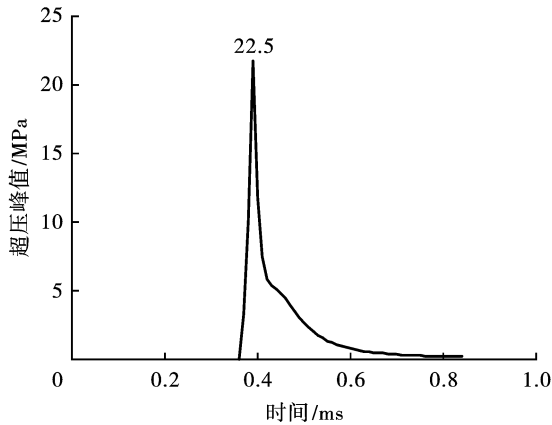


图 6 距炸药中心 0.45 m 自由场超压时程曲线
 Fig. 6 Free field overpressure time history at 0.45 m from the explosion center

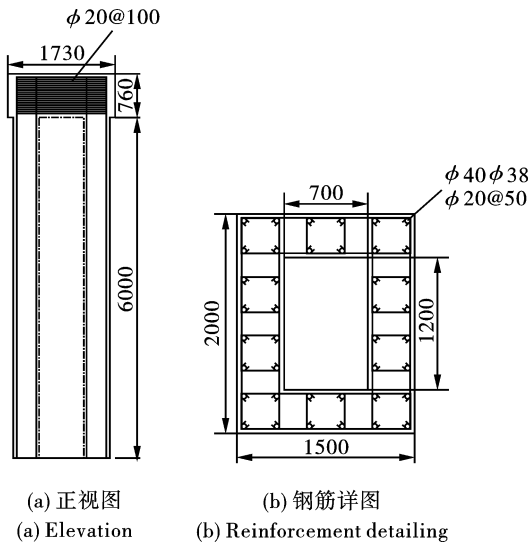


图 7 桥墩结构图(单位:mm)
 Fig. 7 Structural details of the pier(unit:mm)

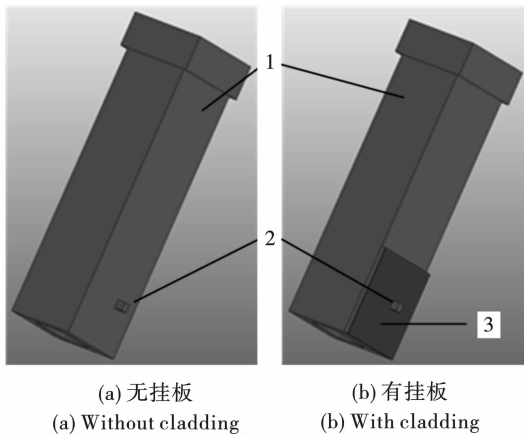


图 8 有挂板两种情况下桥墩受近爆作用数值模型
 Fig. 8 Numerical model of a pier with and without cladding subjected to a near-field explosion

轻质挂板由钢面板和芯层组成,芯层采用可压缩泡沫宏观等效模型,输入的应力应变曲线为泡沫混凝土芯层准静态压缩试验的试验结果^[12],挂板与桥墩通过自动面面接触关键字 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_CONTACT 考虑其相互作用。炸药质量为 30 kg,方形装药,炸药中心距桥墩表面 15.3 cm,炸药中心距地面 100 cm,比例距离为 0.05,可通过 1.3 节中模拟方法较好预测桥墩在爆炸荷载下的响应和破坏。炸药和空气参数同表 1 和表 2。为实现爆炸冲击波与桥墩的耦合,建立尺寸为 328 cm × 860 cm × 318 cm 空气域,空气域未在图中显示。模型中钢筋使用 Beam161 单元,其余使用 Solid164 单元,混凝土材料模型为 73 号 K&C 模型,抗压强度为 40 MPa。钢筋材料模型为 MAT_PLASTIC_KINEMATIC,屈服强度为 392 MPa,其余参数与表 4 相同。空气边界为无反射边界,考虑基础对桥墩的约束作用,桥墩底部节点约束全部自由度,考虑桥墩上部结构对桥墩的约束作用,柱头约束入射冲击波方向的水平位移。

2.2 结果对比分析

2.2.1 无挂板桥墩爆炸响应

在无挂板防护作用的情况下,应力波在桥墩迎爆面的传播过程如图 9 所示。可以看出,在 $t = 40 \mu s$ 时,爆炸冲击波开始作用于桥墩表面,正对炸药的桥墩表面混凝土因冲击波超压超过极限抗压强度而剥落,桥墩面板出现小的爆坑,混凝土包裹的钢筋露出。爆炸冲击波进入空心桥墩内部,并随后作用于背爆面,冲击波在空气中的传播过程如图 10 所示(沿炸药中心水平切面)。从图 10 可以看出,爆炸冲击波在桥墩面板处发生反射和绕射,并在桥墩面板出现爆坑之后进入空心桥墩内部继续传播,随后到达桥墩背板,首先在背板中心处出现应力集中。冲击波到达背板后向两侧继续传播,在背板和侧板交界棱处出现应力集中并发生发射,随后背板中心处出现第二次应力集中。桥墩的最终破坏情况如图 11,正对炸药中心的混凝土破坏最严重,出现较大爆坑,混凝土基本全部剥离,且在爆坑周围出现多条向四周延伸的裂纹。在桥墩侧面,靠近迎爆面的部分混凝土剥离,混凝土破坏面呈弧形,也出现多条向四周延伸的裂纹。桥墩背爆面相对破坏较小,与炸药同一高度处也出现了爆坑,中心混凝土剥离,内部钢筋露出,裂纹向四周延伸。

2.2.2 安装挂板桥墩爆炸响应

安装挂板防护桥墩在受到爆炸荷载作用时,冲击波首先作用于挂板面板,芯层吸收一部分能量后

通过荷载传递将芯层压缩力作用于桥墩。挂板由厚度为 1 cm 的钢面板和厚 10 cm 的芯层组成,芯层为泡沫混凝土填充蜂窝,泡沫混凝土是指以水泥,粉煤灰和其它掺合料为主要原料,采用物理和化学方法,将气泡引入到胶凝材料中,凝结硬化后制成的具有大量孔隙的轻质多孔混凝土,蜂窝为铝制商用蜂窝。由于单独泡沫混凝土在压缩作用下极易压碎,且在高速冲击下会产生碎片对周围的人产生巨大的威胁,而单独蜂窝在压缩下过早的屈曲使其优势不能充分发挥,将泡沫混凝土填充在蜂窝内可显著提高两者各自的性能。如图 12(a)所示,准静态压缩下芯层实测应力应变曲线如图 12(b)所示。桥墩的破坏情况如图 13 所示,对比图 11 可以看出,在有挂板防护

作用下,桥墩的损伤程度显著降低。使用 Measure 对正对炸药的桥墩爆坑面积进行测量。无挂板防护桥墩迎爆面混凝土剥落面积约为 44 200 cm²,安装挂板情况下,相同位置混凝土剥落面积约为 22 550 cm²,面积减小了 49%。挂板的防护机理为:爆炸冲击波首先作用于挂板面板,面板获得动能,随后面板开始对泡沫芯层进行压缩。在压缩过程中,挂板传递给桥墩的荷载为芯层压溃力,因而在挂板破坏前传递给桥墩的荷载较小。在近场爆炸荷载作用下,轻质挂板发生局部破坏,在破坏过程中,挂板通过钢面板的塑性变形、断裂和芯层压缩吸收了大量能量,因而减轻被保护桥墩的损伤。

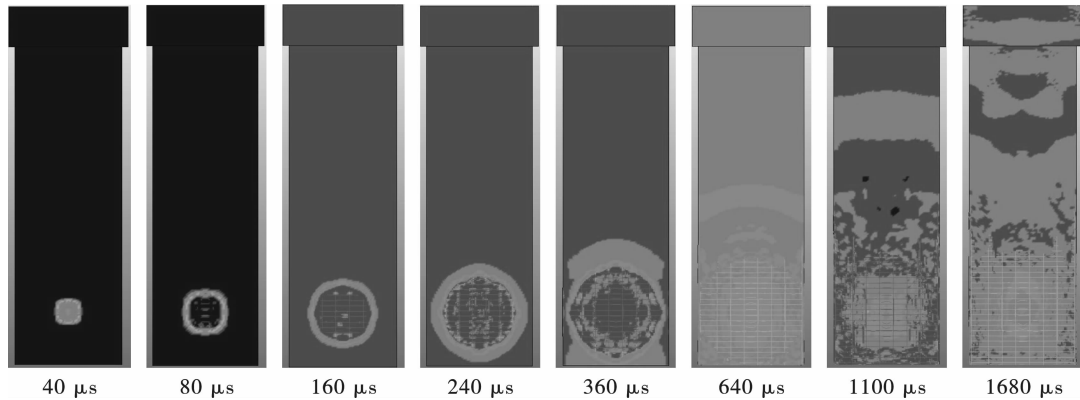


图 9 应力波在桥墩迎爆面的传播

Fig. 9 Stress wave propagation in the directly loaded front panel

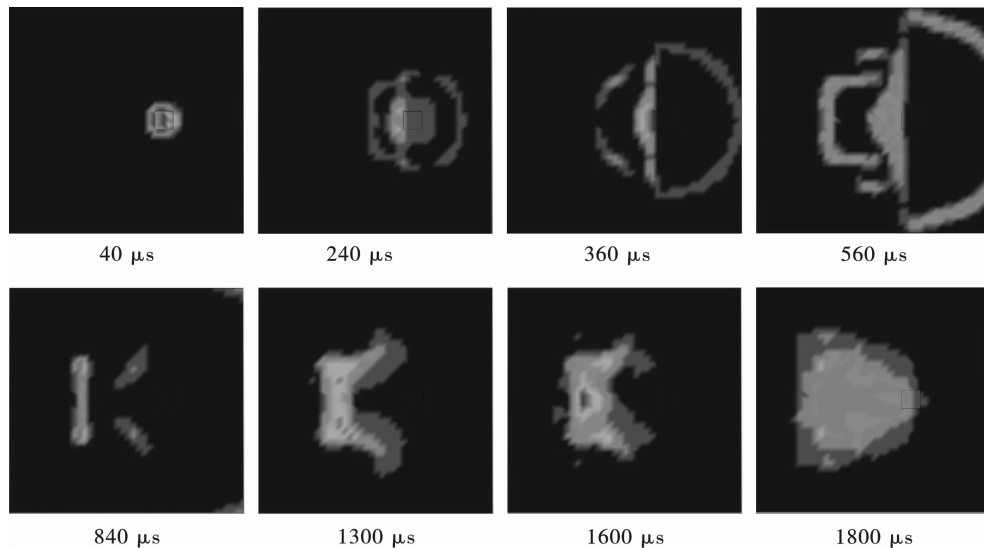


图 10 冲击波在空气中传播过程

Fig. 10 Shock wave propagation in air

3 挂板防护性能参数分析

为深入研究近爆作用下挂板对桥墩的防护效

果,需进行参数分析,对比不同面板厚度、芯层密度、芯层厚度等情况下桥墩的破坏程度。所有计算工况中,炸药中心距桥墩表面的位置保持不变,均为

15.3 cm,炸药中心距地面 1 m,且 TNT 装药质量均 为 30 kg。参数分析计算工况如表 5 所示。

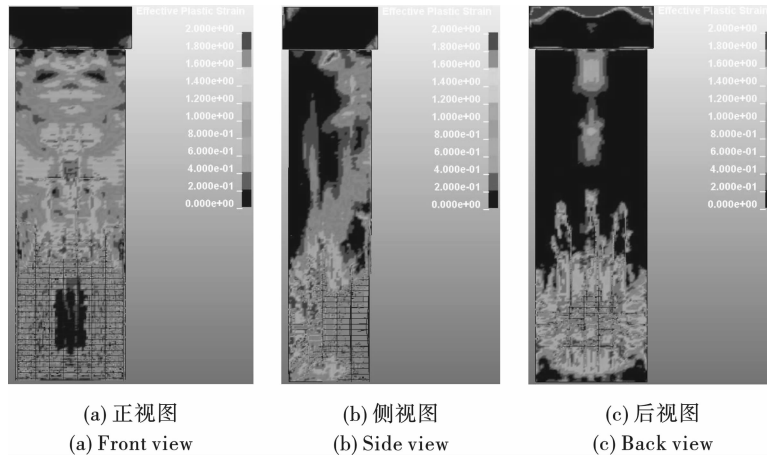


图 11 无挂板桥墩破坏情况
Fig. 11 Damage of pier without cladding

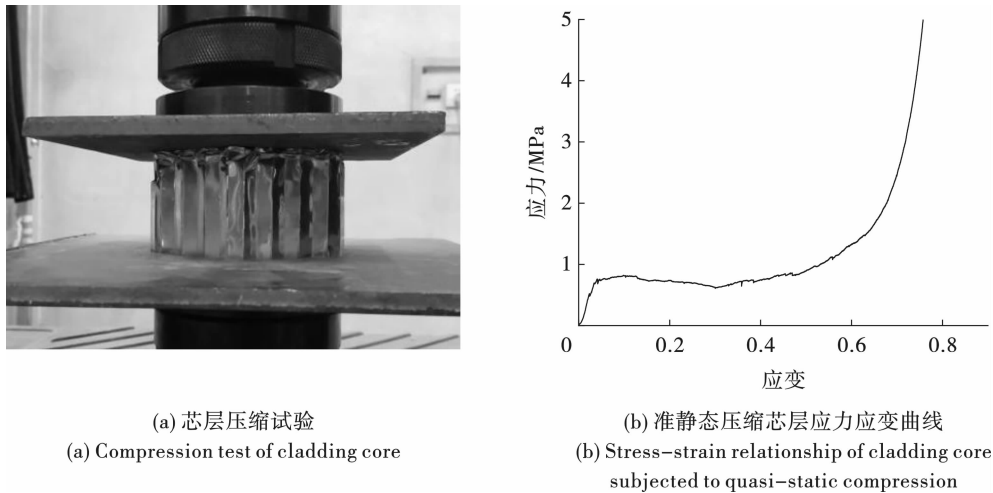


图 12 芯层准静态压缩试验
Fig. 12 Test of quasi-static compression

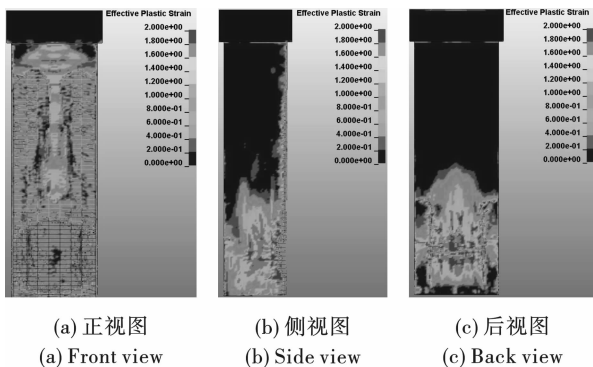


图 13 有挂板桥墩破坏情况
Fig. 13 Damage of pier with cladding

工况 1 为无挂板防护的情况,为对比工况,其他工况通过与工况 1 计算结果进行对比研究挂板防护性能。工况 2~4 为挂板面板厚度对挂板爆炸防护性能的影响,工况 2、5、6 为挂板芯层密度

对挂板爆炸防护性能的影响,工况 2、7、8 为芯层厚度对挂板爆炸防护性能的影响。计算结果通过桥墩破坏程度以及背爆面位移对挂板防护性能进行评估。

表 5 计算工况
Table 5 Conditions of analysis

工况	面板厚度/cm	芯层厚度/cm	芯层密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	/	/	/
2	1	10	450
3	2	10	450
4	3	10	450
5	1	10	700
6	1	10	900
7	1	15	450
8	1	20	450

3.1 面板厚度的影响

保持炸药当量 30 kg, 芯层厚度 10 cm 及泡沫混凝土芯层密度为 450 kg/m^3 不变, 分别对面板厚度为 1 cm、2 cm、3 cm 的情况进行模拟, 观察三种情况下桥墩的破坏情况。由于桥墩迎爆面的破坏情况均较严重, 对比效果不明显, 选择桥墩背爆面的响应情况对挂板防护效果进行分析。由于背爆面响应与损伤主要集中在桥墩下部, 在分析其动力响应时重点选取桥墩背爆面下部, 从桥墩背爆面中间位置底部每隔 0.25 m 取一个观测点, 通过测点位移来评估桥墩的响应。背爆面观测点位移与面板厚度的关系如图 14 所示。可以看出, 观测点位移随着挂板面板厚度的增加而降低, 且均小于无挂板情况。说明挂板面板越厚 (即挂板质量越大), 在爆炸荷载作用下对桥墩的防护效果越好。但在实际中需考虑成本与施工等因素, 选择合适的面板厚度以达到理想的防护效果。

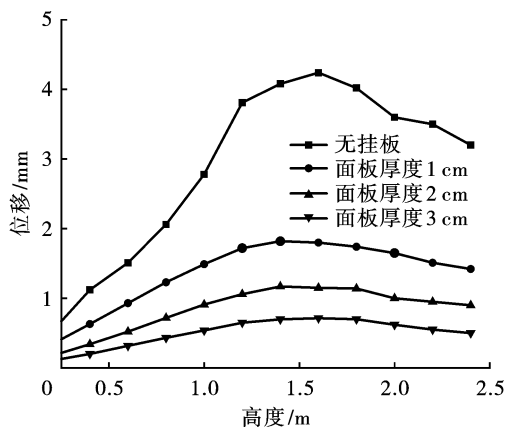


图 14 背爆面测点位移与面板厚度关系

Fig. 14 Relationship between concerned points displacement at back panel and face plate thickness

3.2 挂板芯层密度的影响

保持炸药当量 30 kg, 芯层厚度 10 cm 及面板厚度 1 cm 不变, 使用三种密度芯层准静态压缩下测得的应力应变曲线进行模拟, 应力应变曲线如图 15 所示。对比桥墩背爆面测点位移随挂板芯层密度变化的情况如图 16 所示, 芯层密度为 450 kg/m^3 时测点位移最小, 说明其破坏最轻。芯层密度为 700 kg/m^3 和 900 kg/m^3 时相较于无挂板防护的情况测点位移降低, 但均比芯层密度为 450 kg/m^3 的情况有所增加, 说明芯层密度为 700 kg/m^3 和 900 kg/m^3 时桥墩的破坏均比芯层密度为 450 kg/m^3 时严重。由以上结果可以看出, 芯层在压缩过程中吸收了大量能量,

使传递给桥墩的能量降低, 可有效降低桥墩损伤。但桥墩损伤与芯层密度的关系并不单调, 所以在使用挂板进行桥墩爆炸防护时, 需合理选择芯层强度。

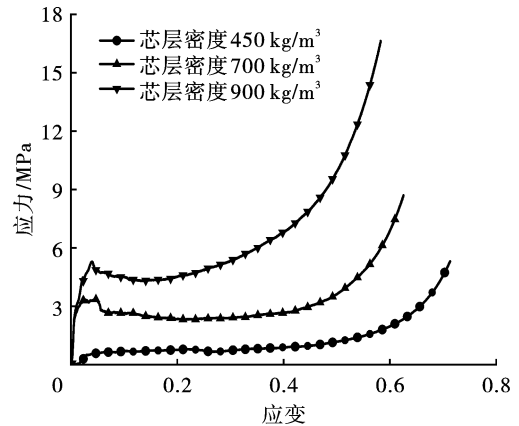


图 15 不同密度芯层准静态压缩应力应变曲线

Fig. 15 Stress-strain relationship of cladding core with different density subjected to quasi-static compression

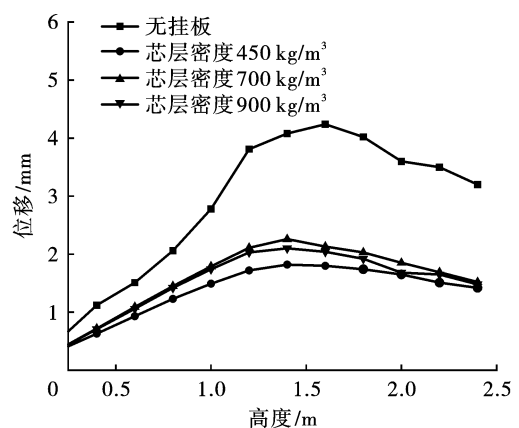


图 16 背爆面测点位移与芯层密度关系

Fig. 16 Relationship between concerned points displacement at back panel and core density

3.3 挂板芯层厚度的影响

保持炸药当量 30 kg, 芯层密度 450 kg/m^3 及面板厚度 1 cm 不变, 对比芯层厚度为 10 cm、15 cm、20 cm 三种情况下桥墩背爆面测点位移与芯层厚度关系如图 17 所示, 可以看出, 桥墩背爆面测点位移随着芯层厚度的增大而减小。原因是芯层厚度越大, 其在压缩过程中吸收的爆炸能量越多, 传递到桥墩的能量就越小。且在芯层压缩过程中, 作用于桥墩的作用力为其压溃力, 远低于爆炸荷载峰值和混凝土压缩强度。在实际工程中, 需综合考虑经济和空间等因素, 芯层厚度需合理设计以达到理想的防护效果。

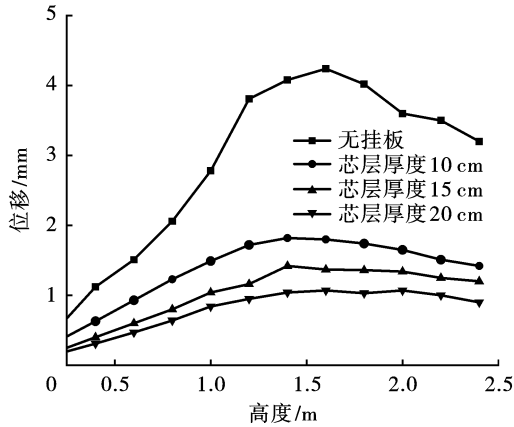


图 17 背爆面测点位移与芯层厚度关系

Fig. 17 Relationship between concerned points displacement at back panel and core thickness

4 结论

应用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立数值模型,对比模拟结果与试验结果验证建模方式有效性与计算精度。采用已验证建模方式建立桥墩抗爆数值模型,通过参数分析对面板厚度、芯层密度及芯层厚度对挂板抗爆性能的影响进行分析,得出以下主要结论:

(1) 安装挂板可有效减轻桥墩在爆炸荷载下的损伤。

(2) 爆炸荷载下桥墩挂板的防护性能随面板厚度、芯层厚度的增大而提高;但其防护性能并不随着密度的升高而提高,芯层密度过高会降低其防护性能。

参考文献 (References)

- [1] THIAGARAJAN G, KADAMBI A V, ROBERT S, et al. Experimental and finite element analysis of doubly reinforced concrete slabs subjected to blast loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 16: 63-71.
- [2] 邱文白. RC 矩形空心截面桥墩柱抗爆性能研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016: 22-48.
- [2] QIU W B. Research on the resistance of RC piers with rectangular hollow section subjected to blast loading[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016: 22-48. (in Chinese)
- [3] JIANG X, KOLSTEIN M H, BIJLAARD F S K. Experimental and numerical study on mechanical behavior of an adhesively-bonded joint of FRP-steel composite bridge under shear loading[J]. Composite Structures, 2014, 108: 387-399.
- [4] HAN L H, HUANG H, ZHAO X L. Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns under cyclic loading [J]. Thin-walled Structures, 2009, 47(6): 668-680.
- [5] 张旭红,王志华,赵隆茂. 爆炸荷载作用下铝蜂窝夹芯板的动力响应[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(4): 356-360.
- [5] ZHANG X H, WANG Z H, ZHAO L M. Dynamic responses of sandwich plates with aluminum honeycomb cores subjected to blast loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(4): 356-360. (in Chinese)
- [6] ZHU F, ZHAO L M, LU G X, et al. Structural response and energy absorption of sandwich panels with an aluminum foam core under blast loading[J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 11: 525-536.
- [7] FOGLAR M, KOVAR M. Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks [J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 59: 18-28.
- [8] LIU L, ZONG Z, TANG B, et al. Damage assessment of an RC pier under noncontact blast loading based on P-I curves [J]. Shock and Vibration, 2018, Article ID 9204036: 1-12.
- [9] 杨欣,石少卿,程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值计算[J]. 爆破, 2008, 25(1): 112-117.
- [9] YANG X, SHI S Q, CHENG P F. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the air[J]. Blasting, 2008, 25(1): 112-117. (in Chinese)
- [10] 韩强,周雨龙,杜修力. 钢筋混凝土矩形空心桥墩抗震性能[J]. 工程力学, 2015(3): 28-40.
- [10] HAN Q, ZHOU Y L, DU X L. Seismic performance of reinforced concrete rectangular hollow bridge columns[J]. Engineering Mechanics. 2015(3): 28-40. (in Chinese)
- [11] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)
- [12] ZHOU H Y, ZHANG X J, WANG X J, et al. Response of aluminum honeycombs filled with foam concrete subjected to quasi-static and dynamic compression[J]. Composite Structures, 2020, 239: 1-11.