

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210421002

# 爆炸冲击作用下节段拼装桥墩反射超压分布规律分析\*

张于晔<sup>1</sup>, 许凯<sup>1</sup>, 周广盼<sup>1</sup>, 袁万城<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 分析桥墩在爆炸冲击作用下的反射超压是研究其动态响应的基础。采用 ANSYS/LS-DYNA 建立节段拼装桥墩受爆的三维实体分离式模型, 并通过既有试验来验证建模方法的可靠性。以桥墩结构形式、节段数目、爆炸比例距离及爆心高度等为设计变量, 分析其对节段拼装桥墩冲击波反射超压分布规律的影响。研究表明: 爆炸冲击作用下节段拼装桥墩的反射超压分布规律与整体现浇桥墩有显著差别; 在桥墩节段数目及爆心高度不变的情况下, 桥墩反射超压随比例距离的减小而增大; 当爆炸高度接近桥墩接缝时, 接缝位置处会产生相当大的反射超压; 基于分析数据, 拟合得到不同比例距离爆炸作用下节段拼装桥墩和整体式桥墩反射超压分布的简化计算公式, 可为研究桥墩受爆的动态响应及其抗爆设计提供参考。

**关键词:** 节段拼装桥墩; 爆炸冲击; 反射超压; 分布规律; 简化计算

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1358-08

## Analysis on the Distribution Characteristics of Reflective Overpressure of Precast Segmental Piers under the Impact of Explosion

ZHANG Yuy<sup>1</sup>, XU Kai<sup>1</sup>, ZHOU Guangpan<sup>1</sup>, YUAN Wancheng<sup>2</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;  
2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The analysis of the reflective overpressure of bridge piers under blast impact is fundamental to understanding their dynamic response. ANSYS/LS-DYNA was used to establish the three-dimensional solid-separated model of the precast segmental piers subjected to explosion, and the reliability of the modeling method has been verified by existing tests. The structural form of the piers, the number of segments, the explosion proportional distance, and the height of the detonation center on the distribution law of the reflected overpressure of precast segmental piers were analyzed in detail. The results show that the distribution of reflected overpressure of segmented bridge piers under blast impact is significantly different from that of monolithic cast-in-place piers. The reflected overpressure increases with the decrease of proportional distance when the number of segments and the detonation height of the piers are constant. When the explosion height is close to the joints of the piers, considerable re-

\* 收稿日期: 2021-04-21; 修回日期: 2022-10-08

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0112300)、国家自然科学基金项目(52278188)、江苏省自然科学基金项目(BK20211196, BK20200494)资助

作者简介: 张于晔(1986—), 男, 副教授, 博士。主要从事桥梁抗震与抗冲击研究。E-mail: zyy@njust.edu.cn

flection overpressure will be generated at the joints. The simplified calculation formulas for the reflected overpressure distribution of the precast segmental piers and the monolithic piers under the explosion at different proportional distances are obtained by fitting the analysis data. This study can provide a reference for studying the dynamic response of bridge piers and their anti-explosion design.

**Keywords:** precast segmental piers; explosion shock; reflective overpressure; distribution law; simplified calculation

## 0 引言

近年来,易燃易爆物品运输逐渐增多,其在运输过程中易发生爆炸,对桥梁等交通基础设施的安全性造成威胁。此外,在全球范围内的恐怖主义活动不断加剧,重要的桥梁成为恐怖主义爆炸袭击的潜在目标。桥墩作为桥梁结构的重要承载构件,其抗爆性能直接关系到桥梁体系的安全性。因此,亟需开展桥墩构件的抗爆研究。

在结构的爆炸冲击方面,D.Karagiozova等<sup>[1]</sup>深入研究了在冲击作用下的圆柱壳体的动力特性与响应规律,表明屈服应力高的圆柱壳在冲击作用下耗能能力更强。阎石等<sup>[2]</sup>研究了建筑群爆炸波能量衰减和超压空间分布规律,确定了与破坏程度密切相关的典型超压影响范围。孙珊珊等<sup>[3-4]</sup>进行了大比例钢管混凝土墩柱静爆试验,得到了钢管混凝土墩柱柱面爆炸荷载的反射超压分布规律,对比研究了各经验公式的预测差异与适用性。E.B.Williamson等<sup>[5]</sup>指出地面爆炸时,在远距离爆炸条件下,作用在桥墩上的爆炸荷载可近似成均布荷载,而近距离爆炸条件下,桥墩上的爆炸荷载可近似为三角形荷载。以上可以看出大部分的桥墩抗爆研究主要集中在整体式桥墩上,对节段拼装桥墩研究很少。同时节段拼装桥墩凭借其施工速度快、干扰小等诸多优点,广泛用于工程实践中。但是由于节段拼装桥墩墩身的不连续性,存在接缝处抗剪能力较弱的问题。桥墩作为桥梁结构竖向承载力的主要构件,对于爆炸荷载的敏感性大,且研究爆炸荷载在墩柱上的分布规律是分析爆炸荷载作用下桥梁结构动态响应的前提,因此有必要研究爆炸作用下节段拼装桥墩冲击波反射超压分布规律。

基于ANSYS/LS-DYNA建立圆形截面预制节段拼装桥墩的三维实体分离式模型,通过参照试验的实测数据来验证该三维分离式模型的准确性。在此基础上,讨论了节段数目、比例距离、桥墩体系

和爆心高度等关键设计参量对圆形截面预制节段拼装桥墩冲击波反射超压的影响。通过对爆炸冲击作用下整体式和节段拼装桥墩反射超压分布对比分析,研究此类节段拼装式桥墩反射超压分布规律及其关键影响因素,可为今后装配式桥墩的抗爆设计与研究提供计算依据。

## 1 数值模型建立

### 1.1 计算模型和计算方法

目前对节段拼装桥墩的抗爆试验还没有统一尺寸标准,但根据美国太平洋地震工程研究中心的桥墩尺寸统计,抗震试验桥墩直径多为40~50 cm。因此本文桥墩模型尺寸确定为圆形截面,直径为0.5 m,墩身高为3 m。墩身分3、4、5节段,节段长度分别为1 m、0.75 m、0.6 m。根据装配式混凝土结构技术规程<sup>[6]</sup>,桥墩混凝土等级为C40。箍筋直径8 mm,间距10 cm,纵筋直径18 mm,混凝土保护层厚度为5 cm。采用ANSYS/LS-DYNA作为计算工具,在数值模拟中采用方形炸药,等效TNT装药量为20、30、40 kg,并且放置在自由空气场当中。计算模型如图1所示。

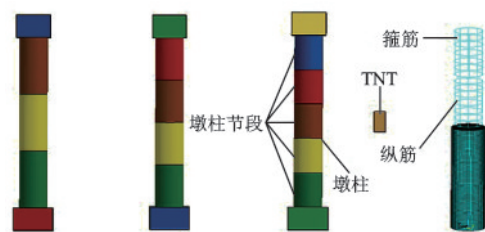


图1 桥墩受爆有限元模型

Fig.1 Finite element model for analyzing pier responses to explosive loads

对爆炸冲击等动力系统的分析需要对质量和边界条件等效处理,最好是建立全桥模型来进行研究。然而本文主要侧重点在桥墩,且上部结构模型参数具有较大的离散型,只能对模型进行简化处理。为模拟节段拼装桥墩的边界条件,根据文献<sup>[5,7]</sup>

对钢管混凝土墩柱的抗爆试验及对船撞击桥墩的模拟结果,模型采用简化的盖梁与基础,墩柱边界条件设为底端固定、顶端铰接。为防止节段间混凝土的相互渗透,采用面面自动接触算法控制。根据J.Li等<sup>[8]</sup>的研究,节段间静摩擦因数取1.0,动摩擦因数取0.8,指数衰减因数取0.5。桥墩在建模过程中参考相关文献<sup>[9-10]</sup>将上部结构的荷载考虑为墩身设计轴压的20%施加在桥墩顶部。单元类型采用SOLID164,为六面体单元。为避免网格的严重畸变,炸药和空气单元采用欧拉算法,使用二阶精度方法进行计算<sup>[7]</sup>。

为得到爆炸荷载沿墩身分布情况,在桥墩迎爆面上设置了31个测点。该31个测点从墩底到墩顶均匀间隔分布,每个测点为一个单元,单元所受的爆炸荷载即为测点处爆炸荷载。在平面坐标中将31个测点的数据连成光滑曲线,以此方式量化得到桥墩上的爆炸荷载。

表2 爆轰产物的JWL状态方程系数

Table 2 JWL equation of state coefficient of detonation product

炸药	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	爆压/GPa	爆速/(cm·us <sup>-1</sup> )	JWL状态方程系数				
				A/GPa	B/GPa	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	ω
TNT	1.64	21.0	0.693	371.2	3.231	4.15	0.95	0.3

注:A、B、R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、ω为LS-DYNA中需要用户输入的参数<sup>[10]</sup>

### 1.3 模型验证

为检验本文中数值模拟方法的准确性,选取文献中的试验来进行验证,试验布置如图2所示。该试件为一个圆形截面钢管混凝土墩柱<sup>[4]</sup>,柱高1800mm,钢管外径273mm,壁厚7mm,内填C40细实混凝土。炸药安置高度0.9m,爆心与试件水平距离1.6m,炸药当量3kg,比例距离Z=1.1m/kg<sup>1/3</sup>(Z=R/W<sup>1/3</sup>,其中R为爆心距,W为炸药TNT当量)。试验中边界条件可以看作墩底固定,墩顶铰接。

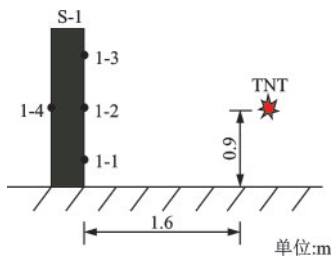


图2 测点布置

Fig.2 Arrangement of monitoring points

### 1.2 材料模型和状态方程

参考张于晔等<sup>[9]</sup>的研究,采用材料模型\*MAT\_NULL并结合状态方程\*EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL对空气进行模拟。空气材料模型及状态方程的各项参数见表1。LS-DYNA对TNT提供了高能炸药材料\*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN用于爆炸分析,并与JWL状态方程联用,来描述爆炸产物压力-体积关系。对于TNT材料模型及状态方程的参数取值见表2。另外,采用\*INITIAL\_DETONATION控制起爆时间。

表1 空气材料各项参数

Table 1 List of material parameters

ρ <sub>0</sub> /(kg·m <sup>-3</sup> )	C <sub>(0-3)</sub> , C <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> , C <sub>5</sub>	E/(J·m <sup>-3</sup> )
1.3	0	0.4	2.5E-6

注:ρ<sub>0</sub>为空气密度,C<sub>0-6</sub>为线性多项式状态方程系数,E为单位参考体积上的初始内能

表3列出了试验和模拟分析所得到的各测点的超压峰值。通过两者比较,在迎爆面及背爆面超压峰值的试验数据与模拟数据基本吻合,误差分别为5.08%、1.56%、8%、0.22%。数值模拟结果与试验结果误差较小,可以说明本文所建立的数值模型的准确性。

表3 各测点反射超压峰值对比

Table 3 Comparison of peak reflective overpressure at each measuring point

测点	1-1	1-2	1-3	1-4
试验数据	1.364	6.202	1.350	0.448
模拟数据	1.298	6.30	1.250	0.447
误差/%	5.08	1.56	8	0.22

### 1.4 模拟工况

通过改变桥墩体系、节段数目、爆炸比例距离以及爆炸作用点的高度来研究这些参数对节段拼装桥墩与整体式桥墩在爆炸荷载作用下冲击波反射超压的分布规律,计算工况见表4。

表4 模拟工况

Table 4 Simulated conditions

工况	爆心高度/m	节段长度/m	节段数目	爆炸距离/m	炸药当量/kg	比例距离/( $m \cdot kg^{-\frac{1}{3}}$ )
1~3	1.5	1	3	1	20/30/40	0.368/0.322/0.292
4~7	1.5	1	3	1.5/2/2.5/3	20	0.553/0.737/0.921/1.105
8~10	1.5	0.75	4	1	20/30/40	0.368/0.322/0.292
11~16	1.5	0.75	4	1.5/2/2.5/3/3.5/4	20	0.553/0.737/0.921/1.105/ 1.289/1.474
17~19	0.2	0.75	4	1	20/30/40	0.368/0.322/0.292
20~22	0.85	0.75	4	1	20/30/40	0.368/0.322/0.292
23~25	1.5	0.6	5	1	20/30/40	0.368/0.322/0.292
26~29	1.5	0.6	5	1.5/2/2.5/3	20	0.553/0.737/0.921/1.105
30~32	1.5	整体式		1	20/30/40	0.368/0.322/0.292
33~38	1.5	整体式		1.5/2/2.5/3/3.5/4	20	0.553/0.737/0.921/1.105/ 1.289/1.474

对比工况 8~16, 工况 30~38, 分别研究爆炸比例距离对节段拼装桥墩, 整体式桥墩冲击波反射超压的影响。对比工况 1~29, 研究节段数目的影响。对比工况 8~10、17~22, 研究爆心高度的影响。

## 2 结果分析

### 2.1 不同参数对反射超压分布的影响

#### 2.1.1 比例距离

爆炸比例距离是影响节段拼装桥墩受爆炸破坏的重要因素, 其控制参数为爆炸距离和炸药当量。首先通过控制炸药当量来改变比例距离。图 3 给出了工况 8~10 的模拟结果, 当爆炸距离为 1m, 当量分别为 40, 30, 20 kg, 比例距离分别为 0.292, 0.322, 0.368  $m/kg^{1/3}$  时, 爆心高度处反射超压峰值分别为 154.1, 137.57, 85.6 MPa, 相比当量为 20 kg 时,

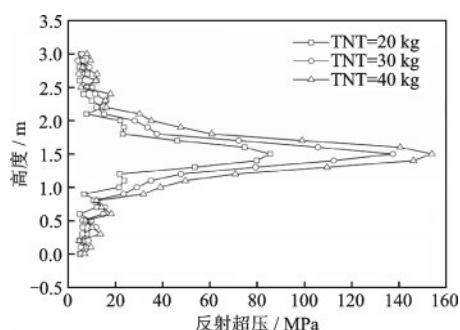


图3 不同炸药当量下节段拼装桥墩反射超压分布  
Fig.3 Reflective overpressure distribution of lower section assembled pier with different explosive equivalent

反射超压峰值分别增大了 80%、60.9%。由此可得, 在上述比例距离范围内, 随着炸药当量的增大, 节段拼装桥墩相同位置处冲击波反射超压随之增大。

通过改变水平距离来控制爆炸比例距离的变化, 计算结果如图 4 所示。当炸药当量为 20 kg, 距离分别为 1、1.5、2 m 时, 比例距离分别为 0.368、0.553、0.737  $m/kg^{1/3}$ 。此时爆心高度处反射超压峰值分别为 85.6, 45.9, 30.1 MPa。相比距离为 2 m 时, 反射超压增大 184.4%、52.5%。在上述比例距离范围内, 随着爆炸距离的减小, 节段拼装桥墩相同位置处冲击波反射超压增大。

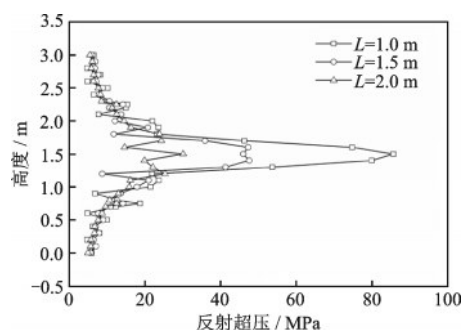


图4 不同爆炸距离下节段拼装桥墩反射超压分布  
Fig.4 Distribution of reflective overpressure of the lower section of the assembled pier at different explosion distances

基于工况 8~16 计算所得数据, 表 5 列出不同比例距离下节段拼装桥墩反射超压的峰值。从表中可知, 当比例距离为 0.3~1.5  $m/kg^{1/3}$  时, 随着比例距离的减小, 节段拼装桥墩相同位置处冲击波反射超压增大。

表5 不同比例距离下节段拼装桥墩反射超压峰值对比

Table 5 Comparison of peak reflectance overpressure of assembled piers under different proportional distances

比例距离/(m·kg <sup>-1/3</sup> )	0.292	0.322	0.368	0.553	0.737	0.921	1.105	1.289	1.474
反射超压/MPa	154.1	137.57	85.6	45.97	30.11	28.09	21.94	17.7	14

2.1.2 爆心高度

爆心高度即炸药中心离地面的距离,本文研究了爆心高度对节段拼装桥墩反射超压的影响,不同爆心高度下节段拼装桥墩的超压峰值见表6。当爆心高度为0.2 m时,在比例距离为0.292、0.322、0.368 m/kg<sup>1/3</sup>下,桥墩所受超压峰值分别为137.5、127.5、81.65 MPa。当爆心高度为1.5 m时,桥墩所受超压峰值分别为154.1、137.6、85.6 MPa。由计算结果可知,爆心高度为0.2 m时桥墩超压峰值比爆心高度为1.5 m时分别减小12.1%、8.0%、4.8%。值得注意的是,爆心高度为0.2 m及0.85 m时,其距桥墩节段接缝较远,而爆心高度为1.5 m时,其高度与节段接缝平齐,此时的桥墩反射超压峰值明显大于前两种情况。由此可见,爆心高度与桥墩节段接缝高度接近时,由于节段拼装桥墩接缝处的不连续性,会造成此处的反射超压偏大,可能导致节段拼装桥墩产生较严重的局部损伤,此时接缝处需重点防护。

表6 不同爆心高度下节段拼装桥墩超压峰值

Table 6 Peak value of reflected overpressure of assembled piers under different heights of explosion center

单位:MPa			
爆心高度/m	比例距离/(m·kg <sup>-1/3</sup> )		
	0.292	0.322	0.368
0.2	137.5	127.5	81.7
0.85	138.6	126.5	82.0
1.5	154.1	137.6	85.6

2.1.3 节段数目

节段数目是影响节段拼装桥墩变形性能和力学性能的重要参数,因此在爆炸冲击作用下,有必要考虑不同节段数目对桥墩所受反射超压的影响。表7列出了爆心高度1.5 m时,不同比例距离下,3、4、5节段的桥墩所受反射超压峰值。

在上述比例距离范围内,节段数目对于节段拼装桥墩反射超压影响很小,节段数目对反射超压的影响可以忽略不计。但当比例距离为0.292 m/kg<sup>1/3</sup>时,4节段的桥墩爆心位于接缝处,4节段爆心高度处的反射超压会略大于3、5节段。该现象是由于节

表7 不同节段数目下桥墩反射超压峰值对比

Table 7 Comparison of peak reflectance overpressure of piers with different numbers of segments

单位:MPa			
比例距离/(m·kg <sup>-1/3</sup> )	节段数目		
	3	4	5
0.292	143.9	154.1	149.86
0.332	131.9	137.57	135.78
0.368	82	85.6	84.6
0.553	46.43	45.97	46.91
0.737	30.11	30.11	33.31
0.921	27.27	28.09	30.9
1.105	23.34	21.94	24.22

段拼装桥墩接缝位置处的薄弱和不连续性造成的反射超压的偏大。

2.2 整体式桥墩与节段拼装桥墩反射超压分布

考虑到节段拼装桥墩存在接缝,其为变形和受力的薄弱处。为了之后计算保留安全余量,节段拼装与整体式桥墩的对比将使用在爆心高度处有接缝的工况数据。由于整体式和节段拼装桥墩反射超压的主要区别在爆心高度处,因此以下将着重比较该位置的反射超压。

本文在截面形状、纵筋配筋率、混凝土强度相同的条件下,通过改变爆炸比例距离,分析不同桥墩体系对爆炸反射超压的影响。另外,因为整体现浇桥墩一般不设置初始预应力,所以只对节段拼装桥墩施加初始预应力,但保证构件恒载相同。

节段拼装桥墩和整体式桥墩反射超压变化趋势是相近的,两者的主要区别在于距离爆心高度处的超压峰值。见表8,在比例距离为0.292、0.332、0.368、0.553 m/kg<sup>1/3</sup>时,整体式桥墩反射超压峰值分别为136.1、122.6、79.0、44.8 MPa,相比于节段拼装桥墩的反射超压峰值154.1、137.6、85.6、46 MPa,节段拼装桥墩超压峰值分别大12.9%、12.2%、8.3%、2.7%。由此可知,当比例距离为0.292~0.553 m/kg<sup>1/3</sup>时,节段拼装桥墩反射超压大于整体式。而当比例距离超过0.553 m/kg<sup>1/3</sup>时,整体式反射超压大于节段式,

表8 不同比例距离下整体式与节段拼装桥墩反射超压峰值对比

Table 8 Comparison of peak reflectance overpressure between monolithic and segmental piers under different proportional distances 单位:MPa

比例距离/(m·kg <sup>-1/3</sup> )	0.292	0.332	0.368	0.553	0.737	0.921	1.105	1.289	1.474
整体式	133.9	122.6	79.0	44.8	38.2	35.1	23.8	16.7	13
节段式	154.1	137.6	85.6	46	30.1	28.1	22	17.7	14
相差比例/%	15.1	12.2	8.3	2.7	-21.2	-20	-7.8	6	7.7

然后随着比例距离不断变大,两者峰值的差距逐渐缩小。总体而言,在爆炸比例距离较小时,由于节段拼装桥墩在接缝处截面的不连续,其反射超压峰值明显大于整体式桥墩;比例距离逐渐增大后,由于反射面处爆炸冲击作用趋于平缓,两类桥墩的反射超压峰值差距逐渐减小。在桥墩爆炸响应分析时,由于爆炸比例距离较小时会产生更大的结构损伤,而此时节段拼装桥墩与整体式桥墩的反射超压差距明显,所以不宜按照整体式桥墩的反射超压分布规律来推测和计算节段拼装桥墩的反射超压。

### 3 桥墩反射超压简化计算方法

对于爆炸冲击作用及其反射超压的计算方法,目前已有相关研究<sup>[11]</sup>。J.Henrych<sup>[12]</sup>、C.Wu等<sup>[13]</sup>、王赞等<sup>[14]</sup>等针对不同类型的结构在爆炸作用下的反射超压分布,提出了相应的计算方法。然而针对桥墩在爆炸作用下反射超压分布规律的研究尚不多见,对于节段拼装桥墩的相关研究则更少。因此有必要研究此类桥墩受爆反射超压的简化计算方法,为相关设计提供参考。

#### 3.1 单参数下超压分布的简化计算公式

为了提出桥墩反射超压的计算公式,对表8中整体式与节段拼装桥墩不同比例距离下反射超压计算结果进行分析,采用MATLAB拟合得到爆心高度处反射超压随比例距离变化的公式。

整体式桥墩爆心高度处反射超压可表示为:

$$P_z = 22.81Z^{-1.408} \quad (0.3 \leq Z \leq 1.5) \quad (1)$$

节段拼装桥墩爆心高度处反射超压可表示为:

$$P_z = 18.57Z^{-1.705} \quad (0.3 \leq Z \leq 1.5) \quad (2)$$

式中, $P_z$ 为桥墩迎爆面爆心高度处的反射超压,MPa; $Z$ 为桥墩迎爆面与爆心间的水平比例距离,m/kg<sup>1/3</sup>。

通过上式得到桥墩爆心高度处的反射超压之

后,结合反射超压分布的模拟结果,采用MATLAB拟合,并经过简化与整合,得到桥墩纵向反射超压 $P_h$ 与桥墩高度的关系式,如图5所示。

整体式桥墩纵向反射超压分布简化计算拟合公式可表示为:

$$P_h = P_z(-22.02h^3 + 23.38h^2 - 8.287h + 0.945) \quad (0.3 \leq Z \leq 0.5, 0 \leq h \leq 0.55) \quad (3)$$

$$P_h = P_z(-3.185h^3 + 6.719h^2 - 4.297h + 0.973) \quad (0.5 < Z \leq 1.0, 0 \leq h \leq 0.55) \quad (4)$$

$$P_h = P_z(1.892h^3 - 1.758h^2 - 0.8535h + 0.921) \quad (1.0 < Z \leq 1.5, 0 \leq h \leq 0.55) \quad (5)$$

节段拼装桥墩纵向反射超压分布简化计算拟合公式可表示为:

$$P_h = P_z(-25.04h^3 + 25.44h^2 - 8.527h + 0.983) \quad (0.3 \leq Z \leq 0.5, 0 \leq h \leq 0.55) \quad (6)$$

$$P_h = P_z(0.928h^3 + 1.734h^2 - 2.584h + 0.924) \quad (0.5 < Z \leq 1.0, 0 \leq h \leq 0.55) \quad (7)$$

$$P_h = P_z(0.859h^3 - 0.361h^2 - 1.233h + 0.902) \quad (1.0 < Z \leq 1.5, 0 \leq h \leq 0.55) \quad (8)$$

式中, $P_z$ 为桥墩迎爆面爆心高度处反射超压,MPa; $P_h$ 为比例高度为 $h$ 处的反射超压,MPa; $Z$ 为桥墩迎爆面与爆心间的水平比例距离,m/kg<sup>1/3</sup>; $h$ 为比例高度,表示计算点到爆心高度处的垂直距离与炸药当量的比值,m/kg<sup>1/3</sup>。

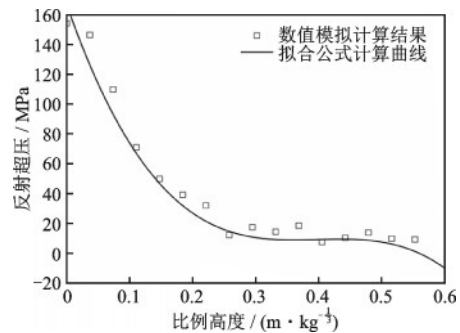


图5 节段拼装桥墩纵向反射超压计算结果拟合

Fig.5 Fitted calculation results of longitudinal reflection overpressure of segmental bridge piers

### 3.2 计算方法准确性验证

为进一步验证拟合公式的准确性,增加了三组不同比例距离爆炸作用下的节段拼装桥墩分析工况,见表9。对三组工况下的桥墩反射超压进行数值模拟计算,并将模拟结果与拟合公式计算结果进行对比。节段拼装桥墩反射超压的模拟与拟合公式计算结果如图6所示。从图中可以看出,除比例距离 $Z=0.461\text{ m/kg}^{1/3}$ 外,拟合公式计算结果与数值分析结

果吻合良好,在 $Z=0.461\text{ m/kg}^{1/3}$ 时,由于反射超压随比例高度变化幅度较大,拟合公式计算结果与数值分析结果误差相对较大,但尚在可接受范围。总体而言,反射超压简化公式的计算精度较高。

需要指出的是,本文研究的节段拼装桥墩爆炸反射超压简化计算方法主要基于数值分析数据与理论推导得到。今后在条件允许的情况下,可通过试验实测节段拼装桥墩的受爆反射超压,进一步验证该简化方法并开展进一步的抗爆研究。

表9 数值模拟验证工况

Table 9 Numerical simulation validation cases

工况	爆心高度/m	节段长度/m	节段数目	爆炸距离/m	炸药当量/kg	比例距离/( $\text{m/kg}^{1/3}$ )
1	1.5	0.75	4	1.25	20	0.461
2	1.5	0.75	4	2.25	20	0.829
3	1.5	0.75	4	3.25	20	1.197

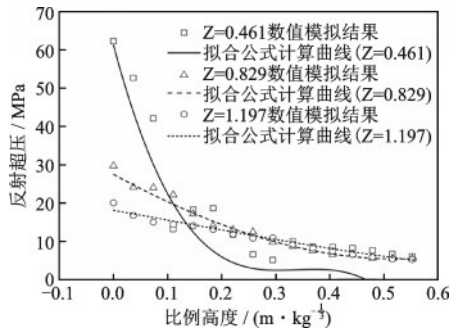


图6 节段拼装桥墩反射超压模拟与计算结果对比

Fig.6 Comparison of simulation and calculation results of segmental piers

## 4 结论

本文基于LS-DYNA对整体式和节段拼装桥墩冲击波反射超压分布规律开展数值研究,综合考虑了爆心高度、比例距离、桥墩结构形式和节段数目等因素,对爆炸作用下节段拼装桥墩冲击波反射超压的分布规律进行分析,主要结论有:

(1)在桥墩节段数目及爆心高度一定的情况下,随着爆炸比例距离的减小,节段拼装桥墩冲击波反射超压随之增大。节段数目对于节段拼装桥墩反射超压影响较小,而爆心高度接近接缝位置时,接缝处会产生相当大的反射超压。

(2)当比例距离在 $0.3\sim 0.553\text{ m/kg}^{1/3}$ 时,节段拼装桥墩反射超压峰值大于整体式桥墩,当比例距离超过 $0.553\text{ m/kg}^{1/3}$ 时,整体式桥墩的反射超压峰值

逐渐接近直至稍大于节段式桥墩。随着比例距离的变大,两者的差值逐渐缩小。

(3)提出了整体式和节段拼装桥墩受爆反射超压的简化计算方法,并基于数值分析结果验证了其精度。该简化计算方法可为今后研究爆炸冲击作用下桥墩的动态响应及其抗爆设计提供参考。

### 参考文献:

[1] Karagiozova D, Marcilio A. Transition from progressive buckling to global bending of circular shells under axial impact-PartI: Experimental and numerical observations [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41: 1565-1580.

[2] 阎石,毕加亮,齐宝欣.考虑典型密集建筑群影响的爆炸超压空间分布规律分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 203-208.  
Yan S, Bi J L, Qi B X. Analysis of spatial distribution law of explosion overpressure considering the influence of typical densely packed buildings[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38 (2): 203-208. (in Chinese)

[3] 孙珊珊.爆炸荷载下钢管混凝土柱抗爆性能研究[D]. 西安:长安大学, 2013.  
Sun S S. Research on anti-explosion performance of Concrete-filled steel Tubular columns under explosive load [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)

[4] 孙珊珊,赵均海,张常光.爆炸荷载下钢管混凝土墩柱

- 柱面压力分布研究[J]. 爆破, 2018, 35(2): 12-18.
- Sun S S, Zhao J H, Zhang C G. Research on cylinder pressure distribution of concrete filled steel tube piers under explosion load [J]. *Blasting*, 2018, 35(2): 12-18. (in Chinese)
- [5] Williamson E B, Bayrak O, Williams G, et al. Blast-resistant highway bridges: design and detailing guidelines[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.
- [6] 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [7] Sha Y, Hao H. Laboratory tests and numerical simulations of barge impact on circular reinforced concrete piers[J]. *Engineering Structures*, 2013, 46: 593-605.
- [8] Li J, Hao H, Wu C. Numerical study of precast segmental column under blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2017, 134: 125-137.
- [9] 张于晔, 杨旭, 冯君. 节段拼装桥墩在爆炸冲击作用下的破坏模式和损伤评估研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(23): 225-233.
- Zhang Y Y, Yang X, Feng J. Failure mode and damage assessment of segmental assembled piers under blast impact [J]. *Journal of Vibration and Impact*, 2020, 39(23): 225-233. (in Chinese)
- [10] 杨旭, 张于晔, 张宁. 爆炸冲击作用下预制节段拼装桥墩的动态响应与损伤分析[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(3): 035104.
- Yang X, Zhang Y Y, Zhang N. Dynamic response and damage analysis of precast segmental bridge piers under blast impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(3): 035104. (in Chinese)
- [11] 刘晓峰, 年鑫哲, 王希之, 等. 冲击波反射超压沿刚性墙面的分布规律[J]. *工程爆破*, 2015, 21(5): 28-31.
- Liu X F, Nian X Z, Wang X Z, et al. Distribution law of shock wave reflection overpressure along rigid wall [J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(5): 28-31. (in Chinese)
- [12] Henrych J. The dynamics of explosion and its use [M]. Amsterdam: Elsevier, 1979.
- [13] Wu C, Hao H. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(6): 699-717.
- [14] 王赞, 蒋志刚, 胡平. 空中爆炸大跨度桥梁冲击波荷载初探 [C] // 第18届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2009: 206-210.
- Wang Y, Jiang Z G, Hu P. Preliminary study on shock wave load of airborne explosive long-span Bridges [C] // Proceedings of the 18th National Academic Conference on Structural Engineering. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2009: 206-210. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)