

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.04.005

爆炸荷载作用下 FRP 管-混凝土-钢管组合柱 动态响应的数值模拟研究^{*}

费鸿禄 蒋安俊 杨智广
辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

[摘 要] 针对 FRP(纤维增强复合材料)管-混凝土-钢管组合柱的抗爆性能,采用非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟研究。分析了组合柱在爆炸荷载作用下的破坏形态、不同比例距离以及不同厚径比情况下的动态响应。结果表明:在爆炸荷载作用下,组合柱损伤程度明显降低;随着比例距离逐渐增大,FRP 材料组合柱的中部水平位移峰值显著降低;随着厚径比增大,组合柱刚度逐渐增强,组合柱中部水平位移峰值也显著降低。因此,该类组合柱具有优越的抗爆性能。可为该类型组合柱的抗爆设计以及进一步研究提供参考。

[关键词] FRP 管-混凝土-钢管组合柱;爆炸冲击荷载;动态响应;抗爆性能

[分类号] TU352.1

Numerical Simulation of Dynamic Response of FRP Pipe-concrete-steel Pipe Combination Columns Subjected to Explosive Loading

FEI Honglu, JIANG Anjun, YANG Zhiguang
College of Engineering Blasting, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

[ABSTRACT] In this paper, the nonlinear finite element software ANSYS/LS-DYNA was employed to simulate blast resisting performance of FRP (fiber reinforced compite) pipe-concrete-steel pipe combination column. Failure modes of the combination column exposure to blast shock loading, dynamic response of the combination column at different proportional distances, and the ratio of thickness to diameter were analyzed. The results show that under explosive shock loading, damage degree of the combination column is obviously decreased; with the increase of the proportional distances, the peak value of the middle part displacement of all kinds of combination columns significantly reduced; with the ratio of thickness to diameter increasing, stiffness of the combination column gradually increased, and the displacement peak in the middle of the combination column is significantly reduced. It is concluded that the combination column has excellent antiknock performance. It can provide reference for the further research with design of the FRP pipe-concrete-steel pipe combination column under blast loading.

[KEYWORDS] FRP pipe-concrete-steel pipe combination column; explosive impact load; dynamic response; blast resisting performance

引言

进入 21 世纪以来,国际社会的动荡以及极端组织的爆炸恐怖袭击,军事和普通建(构)筑物底层柱在爆炸荷载作用下极易产生较大的塑性变形,导致整个建(构)筑物连续倒塌,给人们生命财产带来严重威胁。纤维增强复合(FRP)材料具有高强轻质抗

腐蚀性能,逐渐广泛应用于国防工程和其他领域建(构)筑物的修复、加固以及新建。目前,FRP加固构件的抗爆性能成为国内外学者研究热点^[1-5]。陈忱等^[6]对FRP-钢管混凝土构件抗冲击性能进行研究,表明FRP的加固显著改善了构件抗冲击性能,对构件起到重要的防护作用。Morrill等^[7]对FRP加固的混凝土柱的抗爆性能进行了有限元模拟分析,并通过爆炸试验验证了模拟结果。潘金龙等^[8]对爆

^{*} 收稿日期:2018-03-11
作者简介:费鸿禄(1963 -),男,博士,教授,博导,主要从事工程爆破、地下工程教学和科研工作。E-mail:feihonglu@163.com
通信作者:蒋安俊(1992 -),男,硕士,主要从事爆破工程研究。E-mail:jianganjuan_cn@126.com

炸荷载下碳纤维增强复合 (CFRP) 材料加固圆柱的动态响应和破坏机理进行研究,表明 CFRP 加固后,圆柱在爆炸荷载作用下的侧向位移显著减小,圆柱的整体承载能力和抵抗局部破坏的能力得到有效提高。然而,目前对 FRP 管-混凝土-钢管组合柱在爆炸荷载作用下的动态响应和破坏机理的研究较少。

本文中,采用非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对 FRP 管-混凝土-钢管组合柱进行抗爆数值模拟。FRP 材料又包含了碳纤维增强复合 (CFRP) 材料和玻璃纤维增强复合 (GFRP) 材料。分析了 CFRP 材料和 GFRP 材料、不同厚径比的 FRP 管-混凝土-钢管组合柱在不同比例距离爆炸荷载下的破坏形态及其动态响应。这对 FRP 管-混凝土-钢管组合柱的抗爆设计及应用具有深远意义。

1 有限元数值模拟

数值模拟分析的精度依赖于描述物质的数值模型,选用合理的材料模型和准确的模型参数是取得准确模拟结果的关键^[9]。由于爆炸冲击动力的传播过程十分复杂,进行精确的解析分析十分困难。因此,有限元数值模拟分析软件 ANSYS/LS-DYNA 成为结构抗爆领域研究的主要手段^[9]。该方式不仅可以模拟整个爆炸过程,而且还可以还原整个爆炸作用过程。

1.1 有限元模型的建立

FRP 管-混凝土-钢管组合柱(以下简称“组合柱”)主要由 FRP 管、环形混凝土、钢管和核心混凝土组成。根据组合柱的组合形式,分别设计 4 种不同厚径比的 GFRP 管-混凝土-钢管组合柱和 CFRP 管-混凝土-钢管组合柱,在相同炸药量、不同爆炸距离的工况下分别进行数值模拟分析。爆破方案如图 1 所示;有限元模型如图 2 所示;模型尺寸如表 1 所示。表 1 的模型编号中,C 为碳纤维;G 为玻璃纤维;第二个数值代表组合柱直径;XX 代表 FRP 管厚度,分别取 3、5、7、9 mm。

在数值模型建立过程中,共采用空气、炸药、混凝土、钢管和 FRP 管 5 种材料,并分别定义为不同的部分。各材料的单元类型均采用三维实体单元 Solid164,网格划分采用映射网格划分方法,其中钢管和 FRP 管网格大小为 50 mm×50 mm×2 mm,其他材料网格大小为 50 mm×50 mm×50 mm。不同单元类型之间的链接采用共用节点形式,使其共同受力,共同变形。不考虑钢管与混凝土、FRP 管与混凝土之间的黏结滑移,采用完全接触算法^[9]。

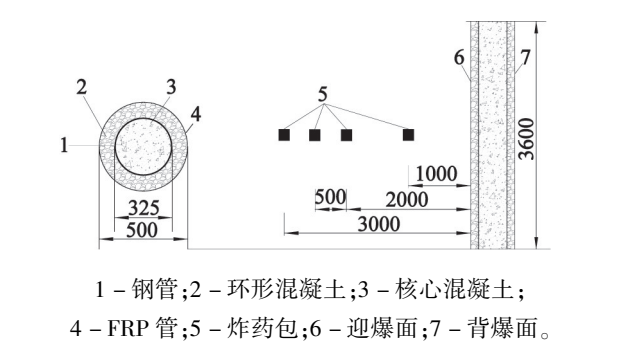


图 1 爆破方案示意图(单位:mm)

Fig.1 Blasting schematic diagram

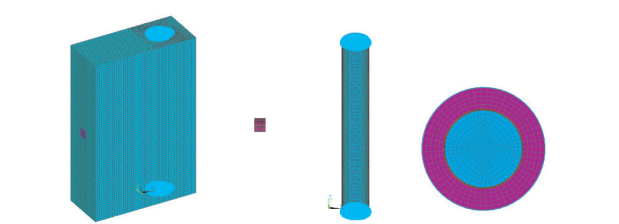


图 2 组合柱计算模型

Fig.2 Calculation model of the combination column

表 1 模型尺寸

Tab.1 Model dimension parameters

模型编号	FRP 管		钢管		柱高
	外径	壁厚	外径	壁厚	
C-500-XX	500	3、5、7、9	325	7	3 600
G-500-XX	500	3、5、7、9	325	7	3 600

为了能直观反映组合柱中各材料破坏形态,在材料模型中加入 * Mat_Add_Erosion 关键字^[8]。分析计算时,当某个单元应力或应变状态达到定义的标准值时,材料立即失效,不再参与后续计算。建模尺寸用 g-mm-ms 制。

1.2 材料模型以及参数确定

为了能够准确模拟组合柱在爆炸荷载作用下的动态响应,首先必须清楚组合柱各材料在爆炸荷载下的动态力学性能,其次就是合理选用本构模型。

研究表明^[10],结构材料在爆炸荷载等高应变率荷载作用下的特性与其在常规准静态荷载作用下相比有着本质区别,主要表现为应力、应变关系更复杂;同时,极限强度、延性、屈服强度、弹性模量、阻尼比以及内聚力等特征参数也均有不同程度的变化^[11]。所以,在数值模拟过程中,选取材料模型时必须考虑惯性效应以及应变率效应。

1.2.1 炸药材料模型与状态方程

炸药爆炸后,组合柱除了承受爆炸产生的冲击压力外,还要承受高速碎片撞击作用以及刚性地面

和周围建筑物对爆炸荷载的反射作用^[12]。因此,组合柱破坏形式及动态响应受爆距、冲击波峰值、材料模型等因素的影响较大,分析过程复杂。为了使研究分析过程能精确反映组合柱动态响应,只对炸药爆炸后产生的冲击荷载通过空气介质传递到组合柱所引起的动态响应进行分析。

在模拟炸药爆炸过程中,炸药采用 ALE 算法并应用流体力学理论^[12],即炸药采用关键字为 * Mat_High_Explosive_Burn 高能爆炸材料模型,根据关键字手册 LS-DYNA_971_Manual_K^[13]定义,其状态方程是 * EOS-JWL。该方程在模拟炸药爆轰过程中的压力为:

$$p=A(1-\frac{\omega}{R_1V})e^{-R_1V}+B(1-\frac{\omega}{R_2V})e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}。$$

(1)

式中: p 为爆轰压力; V 为相对体积; E 为单位体积内能; ω 、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 为材料常数。

炸药采用 TNT,各项参数如表 2 所示。JWL 爆炸状态方程参数如表 3 所示。

表 2 TNT 炸药材料参数

Tab.2 Material parameters of TNT

$\rho/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	p_{CJ}/MPa
1.63×10^{-3}	6 930	27 000

1.2.2 空气材料模型与状态方程

空气选用 * Mat_Null 材料模型^[13-14]。根据关键字手册,空气状态方程选用线性多项式方程 * Eos_Linear_Polynomial 来描述空气的动力状态,该状态方程表达式为:

$$p=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E。$$

(2)

$$\mu=\frac{1}{V}-1。$$

式中: p 为空气中爆炸波压力; E 为单位体积内能; V

为相对体积。
当表示空气模型时,该方程就可以改为 γ 状态方程

$$C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0;C_4=C_5=\gamma-1=0.4;$$

$$p=(\gamma-1)\frac{\rho}{\rho_0}E_0-(\gamma-1)\rho E_0。$$

(3)

式中: γ 为理想气体等熵绝热指数; ρ 为气体密度,取 $1.225\times10^{-6}\text{ g/mm}^3$; E_0 为初始比内能,取 0.25 J/mm^3 。

1.2.3 混凝土材料

在爆炸荷载作用下,混凝土材料动力学性能复杂多变。为了能综合反映混凝土材料在高应变率、高压效应以及损伤失效时的动态响应,选用专为混凝土承受高应变率、高压强荷载作用而设计的材料模型,即 * Mat_Johnson_Holmquist_Concrete 材料模型^[13,15],简称 J-H-C。其本构关系是:

$$\sigma^*=[A(1-D)+Bp^{*N}][1+C\ln(\dot{\varepsilon}^*)]。$$

(4)

$$\sigma^*=\frac{\sigma}{f_c'};p^*=\frac{p}{f_c'};$$

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon_p+\Delta\mu_p}{D_1(p^*+T^*)^{D_2}};T^*=\frac{T}{f_c'}。$$

式中: σ^* 为等效强度; p^* 为压力; f_c' 为准静态单轴抗压强度; σ 为实际等效应力; $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; A 、 B 、 N 、 C 为试验确定的常数; D 为损伤系数, $0\leq D\leq1$; D_1 、 D_2 为实验所得的损伤常数; $\Delta\mu_p$ 为塑性体积应变增量; $\Delta\varepsilon_p$ 为等效塑性应变; T 为最大静水压力; T^* 为最大抗拉静水压力。

混凝土材料的参数取值如表 4 所示。

1.2.4 钢管材料

在爆炸荷载作用下,钢管材料极限强度以及峰值应变随应变率的增强而明显增大。因此,在选择钢管材料模型和参数过程中要充分考虑钢材的应变率效应。

钢管选用 * Mat_Plastic_Kinematic^[13,16] 模型。

表 3 JWL 爆炸状态方程参数

Tab.3 Parameters of JWL explosive state equation

A	B	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-3})$	V_0
3.738×10^8	3.75×10^6	4.15	0.95	0.3	7.0×10^3	1

表 4 J-H-C 混凝土模型材料参数

Tab.4 Material parameters of J-H-C concrete model

$\rho/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$	G/MPa	A	B	C	N	f_c'/MPa	T/MPa	$\varepsilon_{\text{PSO}}/\text{ms}^{-1}$	$\varepsilon_{\text{FMIN}}$
2.2×10^{-3}	1.38×10^4	0.75	1.65	0.007	0.76	34.2	3.62	0.001	0.01
S_{FMAX}	p_{C}/MPa	U_{C}	p_{L}/MPa	U_{L}	D_1	D_2	K_1	K_2	K_3
7.0	11.4	7.43×10^{-4}	800	0.1	0.038	1.0	8.54×10^4	-3.9×10^5	2.08×10^5

该模型通过硬化参数来调整各向同性硬化和随动硬化的贡献^[8,17],客观反映钢管材料动态力学性能。而钢管材料抗拉、抗压屈服强度与应变率之间的联系,采用 Cowper-Symonds 模型进行反映,其屈服条件如式(5)所示:

$$\sigma_y = [1 + (\frac{\dot{\epsilon}}{C})^{\frac{1}{p}}](\sigma_0 + UE_p \epsilon_{eff})。$$

(5)

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变率; p 、 C 为应变率参数; σ_0 为初始屈服应力; $E_p = E_{tam} E / (E - E_{tam})$,为塑性硬化模量; ϵ_{eff} 为有效塑性应变; U 为硬化参数。数值模拟计算中,钢管的材料参数值如表 5 所示。

表 5 钢管材料参数

Tab. 5 Material parameters of steel pipe

$\rho / (g \cdot mm^{-3})$	E / MPa	泊松比	S_{IGY} / MPa	
7.85×10^{-3}	20.5	0.3	345	
E_{TAN} / MPa	β	C_{SR}	P_{SR}	ϵ_{FS}
1 180	0.276	40.4	5	0.25

1.2.5 FRP 材料

FRP 管是一种线弹性脆性材料,由具有高抗拉强度、脆性以及明显各向异性力学特性的纤维束二维正交平纹织造后,再浸渍高聚树脂并层层叠加,最后热压固化而形成,具有显著的各向正交异性力学特性。

基于其力学特性采用线弹性材料模型。其材料参数如表 6 所示^[13,18-19]。

2 数值模拟结果分析

对不同 FRP 材料、不同厚径比的 FRP 管-混凝土

表 6 FRP 的材料参数

Tab. 6 Material parameter of FRP

材料	$\rho / (g \cdot mm^{-3})$	E / MPa
CFRP 管	1.600×10^{-3}	235.0
GFRP 管	1.800×10^{-3}	100.7

土-钢管组合柱在不同比例距离爆炸荷载作用下的动态响应进行研究。根据模拟结果,首先从破坏形态入手,对破坏机理进行分析;根据 FRP 管厚度增大对组合柱中部位移峰值的影响、爆炸比例距离与组合柱中部位移的关系曲线以及钢管应变曲线对组合柱进行动态响应分析。

2.1 破坏形态分析

在数值模拟运算过程中,当 FRP 管-混凝土-钢管组合柱背爆面混凝土达到极限拉应力失效后,运算过程结束。FRP 管-混凝土-钢管组合柱模型的破坏形态如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,整根组合柱产生弯曲塑性变形,但弯曲程度不太显著,组合柱迎爆面中部有爆坑形成。在组合柱两个固定端,FRP 管与钢管局部发生塑性变形,混凝土部分单元达到极限应力状态而失效。在组合柱背爆面中部,混凝土单元达到极限应力状态后失效而出现裂纹。核心混凝土破坏形式与环形混凝土破坏形式相似,但是其破坏程度远远小于环形混凝土破坏程度。

由于组合柱各种材料都具有塑性变形特性,炸药爆炸后产生的冲击波最先达到组合柱迎爆面中部,冲击压力大于材料动态抗压强度,使材料产生塑性变形并形成爆坑。

冲击波在组合柱内部传播的过程中,迎爆面混凝土单元直接受到冲击作用,压应力达到极限状

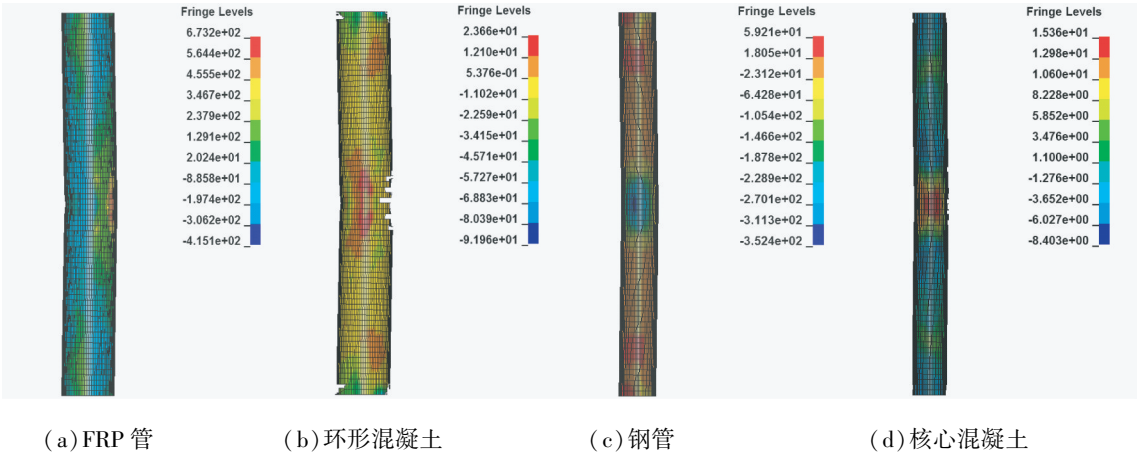


图 3 组合柱模拟破坏状态云图

Fig. 3 Simulation failure state diagram of the combination column

态而失效。冲击波继续传播,在组合柱背爆面,入射波压力脉冲头部的压缩加载波在混凝土和 FRP 管两种材料分界面处产生反射,与入射压力脉冲尾波相互作用形成拉应力,其拉应力达到材料动态断裂准则的拉应力值,导致背爆面混凝土受拉破坏。又由于混凝土抗拉强度远远小于抗压强度,因此,背爆面混凝土破坏程度比迎爆面混凝土破坏程度严重。此外,在组合柱背爆面,不仅有正面冲击波作用,同时还有冲击波在空气中传播时遇到圆柱形障碍物而产生绕流,在组合柱背爆面两侧分别形成涡流。涡流继续运动并相互碰撞,致使压力骤升,作用于组合柱背爆面,更是加强组合柱背爆面混凝土破坏程度。

环形混凝土破坏程度大于核心混凝土破坏程度,不仅仅只是因为核心混凝土受 FRP 管和钢管的双重约束保护。另一个原因是爆炸冲击波在分层介质中传播时,由于材料的波阻抗不同,将在两种材料的界面处产生反射和透射。当冲击波由钢管材料向混凝土材料传播时(高阻抗材料向低阻抗材料传播),入射冲击波将在两种材料的界面上发生卸载反射,反射波反作用于钢管材料,而透射波则去扰动未受扰动的混凝土材料区域;反之,当冲击波由混凝土材料向钢管材料传播时(低阻抗材料向高阻抗材料传播),反射波压力强度受到压缩增强,并作用于混凝土。同样,透射波压力强度也增大,并扰动未受扰动的钢管材料。在冲击波向组合柱核心传播过程中,冲击波经过多次卸载,其强度迅速衰减。因此,导致核心混凝土破坏程度与环形混凝土相比明显改善。从图 3 中可以看出,在 FRP 管和钢管的双重约束下,整个柱子破坏程度以及变形形态均不太显著,说明 FRP 管充分发挥了材料特性,提高了组合柱的抗爆性能。

土材料向钢管材料传播时(低阻抗材料向高阻抗材料传播),反射波压力强度受到压缩增强,并作用于混凝土。同样,透射波压力强度也增大,并扰动未受扰动的钢管材料。在冲击波向组合柱核心传播过程中,冲击波经过多次卸载,其强度迅速衰减。因此,导致核心混凝土破坏程度与环形混凝土相比明显改善。从图 3 中可以看出,在 FRP 管和钢管的双重约束下,整个柱子破坏程度以及变形形态均不太显著,说明 FRP 管充分发挥了材料特性,提高了组合柱的抗爆性能。

2.2 不同 FRP 管厚度

取比例距离 $Z = 0.215 \text{ m/kg}^{1/3}$, 根据模拟数据得到不同厚径比情况下,组合柱中部位移时程曲线如图 4 所示。另外,FRP 管厚度与组合柱中部位移的关系如图 5 所示。组合柱材料参数见表 1。

从图4中得出,两种不同FRP管组合柱中部位移时程曲线走向趋势近似,并且在组合柱最大位移峰值后呈现出弹性往复振动现象,这是由于两种材料的应力-应变关系曲线近似,呈线弹性,并且这两种材料的塑性残余变形很小,即使在发生较大变形后仍能部分恢复原状,所以呈现出弹性往复振动现

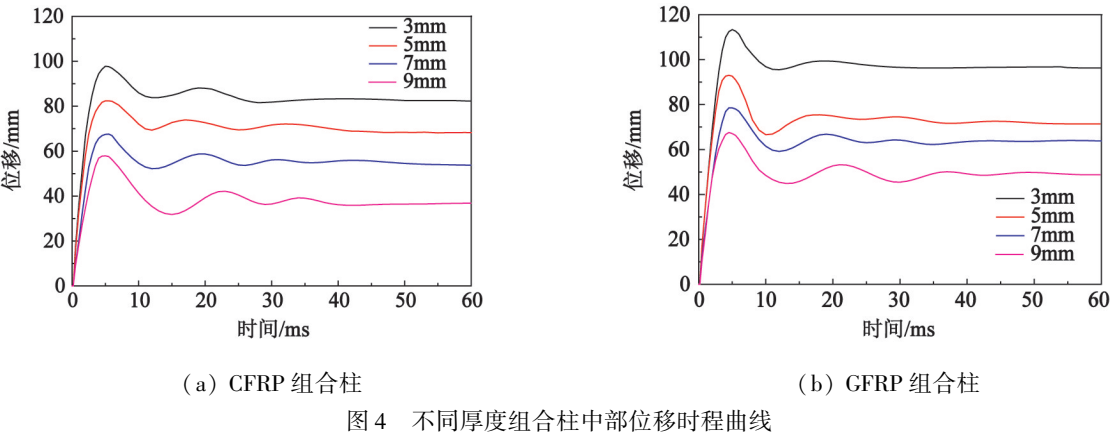


Fig.4 Displacement-time curves of middle part of the combination column with different thickness

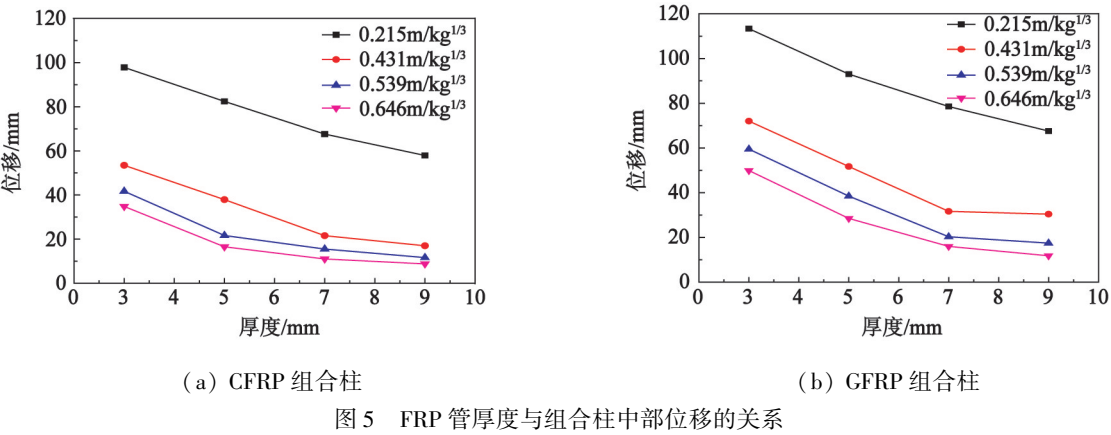


Fig.5 Relationship between thickness of FRP tube and middle part displacement of the combination column

象。随着 FRP 管厚度继续加大,组合柱塑性性能降低,最大位移峰值后呈现出的弹性性能更明显,因此在一定程度上提高了组合柱的抗爆性能。从图 4 中还能得出:CFRP 材料组合柱中部位移峰值比 GFRP 材料组合柱中部位移峰值小,说明 CFRP 材料组合柱的抗爆性能优于 GFRP 材料组合柱。

从图 5 中得出,在相同 FRP 管材的情况下,随 FRP 管厚径比增大,组合柱刚度逐渐增加,其抗爆动力性能得到不同程度增强,导致组合柱中部位移峰值逐渐减小。但当厚度大于 7 mm 后,组合柱中部位移峰值的减少程度不太显著。这是由于 FRP 管由具有高抗拉强度、高脆性以及明显的各向异性力学性能特征的 FRP 纤维束首先进行二维正交平纹织造,然后浸渍高聚树脂,再层层叠加并热压固化而形成。当粘贴层数超过一定厚度时,各 FRP 层不能一起有效地共同工作,因此,复合管的性能就不能完全发挥出来。

综上可知,CFRP 材料组合柱的抗爆性能优于 GFRP 材料组合柱,FRP 管厚度的增大对组合柱抗爆性能有一定提高,但二者呈非线性增长关系,当超

过一定厚度时,其抗爆性能不再明显地增强。

2.3 不同比例距离

保持 TNT 质量不变,爆炸距离分别取 1.0、2.0、2.5、3.0 m,对应的比例距离依次为 0.215、0.431、0.539、0.646 $\text{m/kg}^{1/3}$ 。分别进行数值模拟计算,得到不同 FRP 复合材料组合柱在不同比例距离下对应的中部位移峰值关系曲线,如图 6、图 7 所示。

从图 6 中可以看到,组合柱中部位移峰值随着比例距离的增加而快速衰减,而且该值减小幅度越来越大。

从图 7 中得出,当 CFRP 管和 GFRP 管厚度为 3 mm、比例距离为 0.215 $\text{m/kg}^{1/3}$ 时,组合柱中部位移峰值分别为 97.811、113.349 mm;当比例距离继续增大且达到 0.646 $\text{m/kg}^{1/3}$ 时,组合柱中部位移峰值分别降低为 34.810、49.894 mm。这是因为炸药在空气中爆炸后产生的冲击波阵面以超声速 D 向前传播,随着冲击波传播距离增加,波阵面不断被拉宽,波阵面面积增加;同时,冲击波正压区的空气不断受冲击压缩,并且产生不可逆的能量损失,使得单位面积波阵面上的能量急速减少。根据各组合柱位

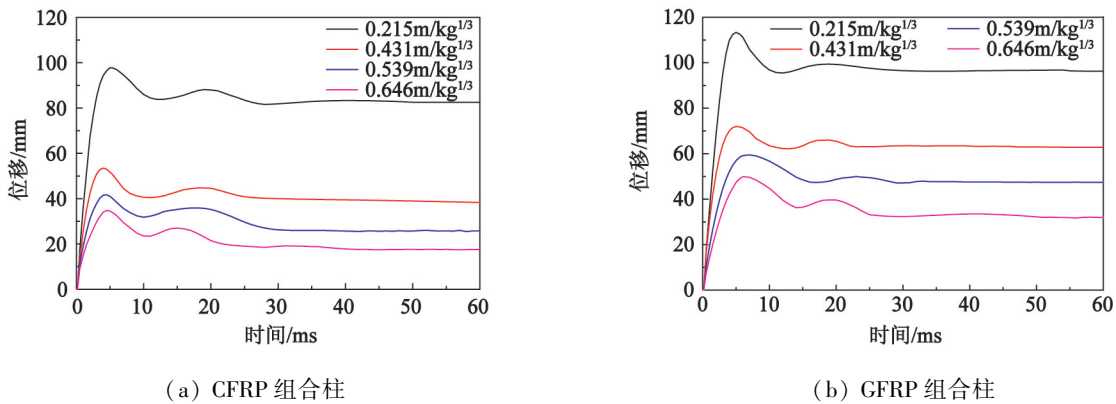


图 6 不同比例距离的组合柱中部位移时程曲线

Fig. 6 Displacement-time curves of middle part of the combination column with different proportional distance

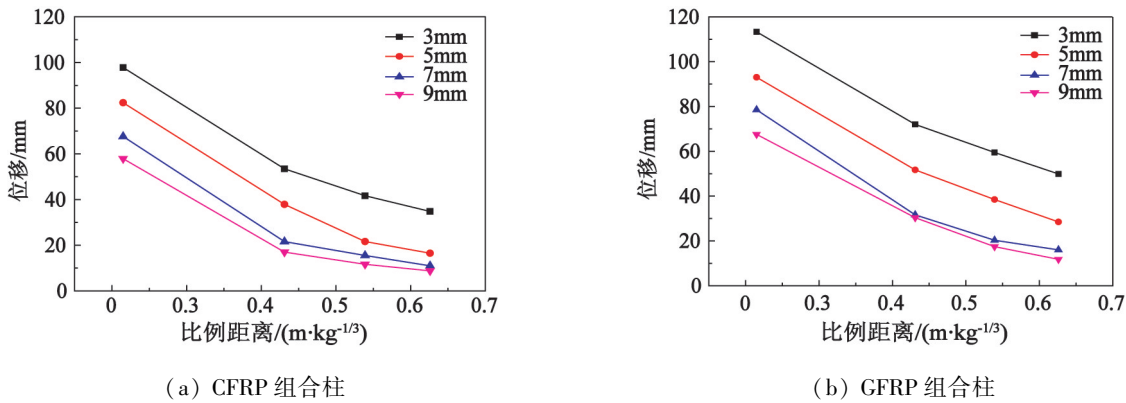


图 7 比例距离与组合柱中部位移的关系

Fig. 7 Relationship between proportional distance and the middle part displacement of the combination column

移峰值在不同比例距离情况下的变化得出:组合柱位移峰值随着比例距离的增大迅速衰减,且 CFRP 材料组合柱随比例距离的变化,其中部位移峰值明显优于 GFRP 材料组合柱。

2.4 钢管应变分析

钢管的破坏以钢材的拉伸应变达到极限拉应变为破坏准则。在比例距离为 0.2 m/kg^{1/3} 情况下,组合柱内钢管背爆面中部应变时程曲线如图 8 所示。

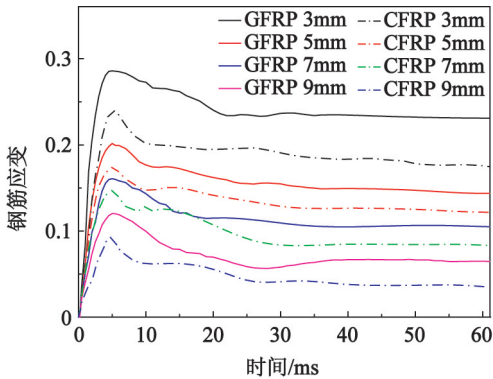


图 8 钢管背爆面中间应变时程曲线
Fig.8 Strain-time curves of the middle part of the back detonation face of steel pipe

从图 8 中可以得出,在爆炸荷载作用初期,钢管应变值呈线性增长,其发展趋势与中部位移时程曲线近似。

在相同 FRP 管材、不同厚径比情况下,组合柱背爆面中间位置钢管应变值随着厚径比增大明显降低。这是由于随着 FRP 管厚度的增加,FRP 管刚度相应增强,同时环箍效应也得到加强,改善了组合柱中钢管的受力情况,因此应变峰值相应地得到降低。

在不同 FRP 管、相同厚径比情况下,对图 8 中 CFRP 材料与 GFRP 材料分别加固组合柱内钢管中间位置应变峰值进行比较,可以看出前者应变明显小于后者。

这是由于 CFRP 材料力学性能优于 GFRP 材料,改善了混凝土和钢管受力情况。同样论证了 CFRP 管-混凝土-钢管组合柱的抗爆性能优于 GFRP 管-混凝土-钢管组合柱。

3 结论

利用非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了 FRP 管-混凝土-钢管组合柱在爆炸荷载作用下的数值模型,对该不同类型的组合柱在爆炸荷载作用下的动态响应进行分析,得到如下结论:

1) 由于 FRP 管和钢管分别对混凝土进行双重

约束,不仅降低了构件在爆炸荷载作用下的侧向位移,而且还降低了组合柱中环形混凝土与核心混凝土破坏程度,改善了组合柱总体变形,使整个构件的损伤程度明显减小。说明该类型组合柱具有良好抗爆性。

2) 通过对相同厚径比、不同 FRP 材料的组合柱中部位移峰值和钢管应变分别进行比较分析,得出 CFRP 管-混凝土-钢管组合柱内钢管中部位移峰值和应变峰值均明显小于 GFRP 管-混凝土-钢管组合柱,充分说明 CFRP 管-混凝土-钢管组合柱的抗爆性能优于 GFRP 管-混凝土-钢管组合柱。

3) 随着 FRP 管厚径比增加,组合柱刚度逐渐增强,组合柱中部位移峰值显著降低。说明 FRP 管厚度对组合柱抗爆性能有一定的提高,二者呈非线性增长关系,当超过一定厚度时,其抗爆性能不再明显地增强。

期望未来研究工作以此为理论基础,通过试验对组合柱在爆炸荷载作用下动态响应所存在的许多问题进一步深入研究。

参 考 文 献

[1] MOSALAM K M, MOSALLAM A S. Nonlinear transient analysis of reinforced concrete slabs subjected to blast loading and retrofitted with CFRP composites [J]. Composites Part B, 2001, 32(8): 623-636.

[2] WU C Q, OEHLERS D J, WACHL J, et al. Blast testing of RC slabs retrofitted with NSM CFRP plates [J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10(4): 397-414.

[3] RAZAQPUR A G, TOLBA A, CONTESTABILE E. Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates [J]. Composites Part B, 2007, 38(5/6): 535-546.

[4] 徐坚锋. CFRP 钢管混凝土柱抗爆动力响应研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.

XU J F. Analysis on the dynamic response of concrete filled CFRP-steel tube columns under explosive load [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.

[5] NAM J W, KIM H J, KIM S B. et al. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2009, 18(5): 461-490.

[6] 陈忱, 赵颖华. FRP 钢管混凝土构件抗冲击性能仿真分析 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(19): 197-201.

CHEN C, ZHAO Y H. Simulation for anti-impact performance of concrete-filled FRP-steel tubes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(19): 197-201.

- [7] MORRILL K B, MALVAR L J, CRAWFORD J E, et al. Blast resistant design and retrofit of reinforced concrete columns and walls [C]//Structures Congress. Nashville, Tennessee, US, 2004:1-8.
- [8] 潘金龙, 罗敏, 周甲佳. 爆炸荷载下 CFRP 加固圆柱的动力响应和破坏机理 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2010, 43(9):755-761.
- PAN J L, LUO M, ZHOU J J. Dynamic responses and failure mechanism of reinforced concrete cylindrical column wrapped with CFRP under blast loading [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2010, 43(9):755-761.
- [9] 吴赛. 爆炸荷载作用下钢管混凝土柱的动力响应及损伤评估 [D]. 西安:长安大学, 2015.
- WU S. Dynamic response and damage assessment of CFST columns subjected to blast loading [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [10] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. 材料动力学 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2017.
- [11] 唐彪. 钢筋混凝土墩柱的抗爆性能试验研究 [D]. 南京:东南大学, 2016.
- TANG B. Experimental investigation of reinforced concrete bridge piers under blast loading [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [12] 崔莹, 赵均海, 张常光, 等. 复式空心钢管混凝土柱抗爆性能及损伤研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(21):188-193, 216.
- CUI Y, ZHAO J H, ZHANG C G, et al. Explosion-resistance behavior and damage assessment of a duplex hollow CFST column subjected to blast loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(21):188-193, 216.
- [13] LS-DYNA keyword user's manual version 971 [M]. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2006.
- [14] 石少卿, 康建功, 汪敏, 等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [15] 张凤国, 李恩征. 大应变、高应变率及高压强条件下混凝土的计算模型 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3):198-202.
- ZHANG F G, LI E Z. A computational model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3):198-202.
- [16] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [17] 侯二永. 陶瓷间隙靶抗 12.7 mm 穿甲燃烧弹机理及性能研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
- HOU E Y. Investigation of mechanism and performance of spaced ceramic target under impact of 12.7 mm armor piercing projectile [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [18] 潘金龙, 周甲佳, 罗敏. 爆炸荷载下 FRP 加固双向板动力响应数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2011, 12(6):643-648.
- PAN J L, ZHOU J J, LUO M. Numerical simulations on dynamic responses of FRP strengthened reinforced concrete two-way slabs under blast loading [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(6):643-648.
- [19] 孔祥韶. 爆炸荷载及复合多层防护结构响应特性研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
- KONG X S. Research on the blast loading and the response of multi-layer protective structure [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.