

# 截面短长轴比对椭圆钢管混凝土柱 抗爆性能影响

齐宝欣<sup>1,2</sup>, 刘雪微<sup>1</sup>, 任庆新<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 目的 研究椭圆钢管混凝土柱抗爆性能, 分析截面短长轴比对其抗爆性能的影响。方法 利用 LS-DYNA 有限元软件建立 TNT 炸药-空气-椭圆钢管混凝土柱-刚性地面整体三维实体有限元模型, 分别从短轴和长轴两个方向进行起爆设置, 探究椭圆钢管混凝土柱受爆炸荷载作用后冲击波传递特性。结果 与双向刚度相同的柱子相比, 椭圆钢管混凝土柱抗爆冲击波反射、衍射作用更为复杂; 椭圆钢管混凝土柱沿长轴迎爆的抗爆性能明显优于沿短轴方向; 绘制短长轴比-柱中侧向位移曲线, 根据短轴方向与长轴方向抗爆性能差异, 提出了设计宜采用的短长轴比为 0.6~1.0; 沿短轴向施加爆炸荷载时, 短长轴比设计值不应小于 0.4。结论 得出了不同短长轴比下构件破坏形态, 进一步提出了采用短长轴比 0.4~0.6 内的椭圆钢管混凝土柱时, 应采取加固措施。

**关键词** 短长轴比; 椭圆钢管混凝土柱; 抗爆性能; 变形规律; 动力响应

中图分类号 TU375.1 文献标志码 A

## Anti-blast Performance of the Ratio of Short and Long Axis of Elliptical Concrete Filled-Steel Tubular Column

QI Baoxin<sup>1,2</sup>, LIU Xuewei<sup>1</sup>, REN Qingxin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

**Abstract:** Investigate the explosion resistance of elliptical steel pipe concrete columns, and to solve the effect of short-long shaft ratio of cross-section on its explosion resistance. LS-DYNA finite element software was used to establish a TNT explosive-air-oval steel pipe concrete column-rigid

收稿日期: 2021-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878420); 辽宁省教育厅(服务地方)项目(lnfw202006); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1817)

作者简介: 齐宝欣(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事建筑结构抗爆性能等方面研究。

ground overall three-dimensional solid finite element model, and the detonation setting was carried out from the short axis and the long axis respectively, and the shock wave transmission characteristics of the oval steel pipe concrete column after being affected by the explosion load were explored. Compared with the columns with the same bi-directional stiffness, the explosion resistance shock wave reflection and diffraction of the elliptical steel pipe concrete column are more complicated; the explosion resistance of the elliptical steel pipe concrete column along the long axis is significantly better than that along the short axis direction; the short and long axis ratio-the lateral displacement curve in the column is drawn, and the short and long axis ratios suitable for design are proposed according to the difference between the explosion resistance of the short axis direction and the long axis direction. It is between 0.6 and 1.0; when the explosion load is applied along the short axis, the design value of the short and long axis ratio should not be less than 0.4. The failure patterns of different components under the short-to-long axis ratio are obtained, and it is further proposed that reinforcement measures should be taken when using oval steel pipe concrete columns with a short-to-long shaft ratio of 0.4 to 0.6.

**Key words:** ratio of short and long axis; concrete-filled elliptical steel tubular column; anti-blast influence; deformation law; dynamic response

近年来,椭圆钢管混凝土柱因其短长轴方向侧向刚度不同被广泛关注。其具有承载力高<sup>[1]</sup>、塑性和耐火性能好、延性好、沿长轴向流体阻力小等优点,被大量应用于机场航站楼、剧院、酒店等建筑结构中的承重构件<sup>[2-4]</sup>,未来可拓展应用于桥梁墩柱<sup>[5-6]</sup>。然而无论是人流吞吐量巨大的机场、大型公共场所,还是作为重要交通设施的桥梁,一旦受爆破袭击,将对结构和人民安全造成巨大危害。因此,研究椭圆钢管混凝土柱抗爆性能,对设计和安全使用具有重要意义。

随试验和模拟方法的不断改进,钢管混凝土柱抗爆研究逐渐深入。吴赛等<sup>[7-9]</sup>国内外学者从爆炸冲击波的产生与传播、构件材料动态力学性能、爆炸荷载作用下钢管混凝土柱动力响应、钢管混凝土柱跨中最大挠度以及损伤评估等几个方面进行了深入研究,在网格尺寸、刚性地面对爆炸冲击波反射作用规律、混凝土 HJC 模型参数<sup>[10-11]</sup>、简化等效单自由度法<sup>[12]</sup>等各方面综合优化了有限元软件中 LS-DYNA 数值模型。学者们将模拟与试验结合,分析爆炸作用力、套箍系数、截面形式、折合距离等与构件变形的关系,得出诸多因素下构件的抗爆能力变化。

目前对椭圆钢管混凝土柱的研究,主要体现在静力和拟静力<sup>[13]</sup>研究。H. Yang 等<sup>[14]</sup>研究表明,椭圆形钢管混凝土柱的力学性能介于圆形和方、矩形钢管混凝土之间,椭圆形钢管混凝土设计可参照现行的方、矩形钢管混凝土设计规范<sup>[15-16]</sup>。而圆、方截面柱抗爆对比结果表明,不同截面下爆炸冲击波反射、衍射作用差异明显<sup>[1]</sup>。因此,从短长轴比角度建立,开展其抗爆瞬时动力响应研究十分必要。为探究长短轴比对椭圆钢管混凝土柱抗爆性能影响,笔者运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立椭圆钢管混凝土柱抗爆的非线性有限元显式动力模型。通过改变椭圆钢管混凝土柱截面短长轴比,结合不同起爆位置、炸药量,输出应力云图和柱中位移-时程曲线,总结爆炸荷载作用后柱的破坏形态、爆炸冲击波作用规律,得出长短轴比对椭圆钢管混凝土柱抗爆性能影响规律,为椭圆钢管混凝土柱抗爆设计提供依据。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 材料模型及网格尺寸

运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建

立 TNT-空气-椭圆形钢管混凝土柱-刚性地面整体三维有限元模型。TNT 炸药、空气、椭圆形钢管和混凝土四部分采用正六面三维实体单元,刚性地面通过添加 \* RIGIDWALL- PLANAR 关键字进行设置<sup>[17]</sup>;空气域底面与构件相接且设置刚性地面,其余空气域边界设置无反射边界条件,依据文献<sup>[18]</sup>确定,空气域边界距离椭圆钢管混凝土柱距离为 0.6 m。通过添加任意拉格朗日-欧拉算法(ALE)关键字来实现炸药与构件间的流固耦合<sup>[7]</sup>。

椭圆钢管混凝土柱典型模型尺寸参照《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)<sup>[19]</sup>中常用圆截面钢管混凝土设计确定(见图 1)。钢管材料为 Q235,混凝土材料强度 C40。

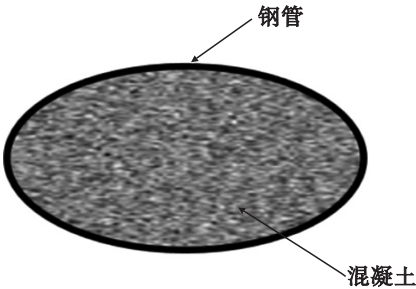


图 1 椭圆钢管混凝土柱截面  
Fig. 1 Section of elliptical concrete filled steel tubular column

混凝土承受大应变、高应变率和高压,采用 \* MAT-JOHNSON-HOLMQUIST-CONCRETE(\* MAT-111)材料模型;钢管采用模拟各向同性和运动硬化塑性的 \* MAT-PLASTIC-KINEMATIC(MAT3)模型,具体材料参数参照文献<sup>[20]</sup>。

椭圆钢管与混凝土采用共节点式实体单元网格划分;因空气域网格尺寸应小于炸药边长的 1/8<sup>[9]</sup>,为方便计算节点位置,将所有实体实际网格尺寸设定为 5 cm,炸药边长的 1/9。按照以上参数设置的整体模型如图 2 所示。

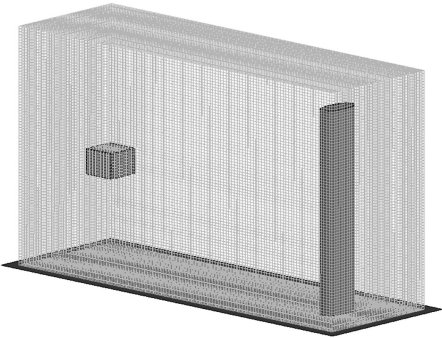


图 2 椭圆钢管混凝土柱抗爆模型  
Fig. 2 Anti explosion model of elliptical concrete filled steel tubular column

1.2 数值验证

为验证网格尺寸选择合理性和有限元模型建立方法正确性,参照文献<sup>[21]</sup>中 HGH3a 号圆钢管混凝土柱试验结果进行对比分析。图 3 为圆柱迎爆面柱中  $\delta$ - $t$  曲线,其中  $\delta$  为迎爆面柱中位移, $t$  为时间。数值模拟分析结果表明,跨中位移模拟值和试验值为 3.46 mm、3.44 mm,二者相对误差仅为 0.58%,在 1% 以内,误差很小,故笔者所选材料模型和网格尺寸选择适合,运用软件 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟研究的方法可行。

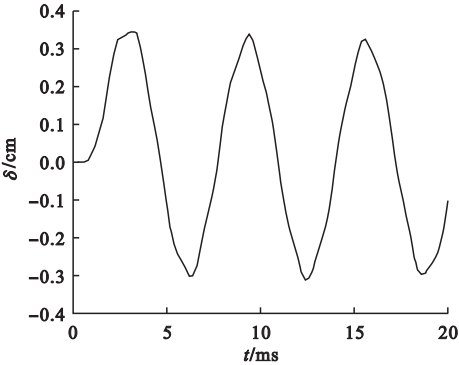


图 3 迎爆面柱中  $\delta$ - $t$  曲线  
Fig. 3 In front of blasting face pillar  $\delta$ - $t$  curve

2 椭圆钢管混凝土柱抗爆动力响应

2.1 爆炸冲击波

为探究椭圆钢管混凝土柱抗爆冲击波作用效应特性,对圆、方、椭圆钢管混凝土柱分别建模。构件参照《组合结构设计规范》

(JGJ138—2016)进行设计:圆钢管混凝土柱钢管外直径不宜小于 40cm,壁厚不宜小于 0.8 cm。将圆钢管混凝土柱作如下设置:外直径取为 42.2 cm,统一截面面积 1 413.7 cm<sup>2</sup>,钢管壁厚 1.07 cm,截面含钢率

9.8%。为使圆、方、椭圆钢管混凝土柱截面等效,按照上述截面面积、截面含钢率设置方、椭圆钢管混凝土柱截面含钢率 9.8%、柱高 3.6 m;圆形、方形、椭圆形钢管混凝土柱截面参数按表 1 进行设置。

表 1 截面参数

圆形(工况 1)		方形(工况 2)		椭圆形(工况 3)		
半径/cm	厚度/cm	边长/cm	厚度/cm	长轴半径/cm	短轴半径/cm	厚度/cm
21.2	1.07	37.6	0.94	30	15	1

按照上述方法建立模型,为便于观察构件变形,采用较大爆炸荷载,使其发生明显塑性变形,采用的炸药比例距离设置为  $Z = 0.62\text{ m/kg}^{1/3}$ ,输出柱抗爆塑性变形云图(见图 4),得到了 3 种截面柱表面爆炸冲击波传

递效应。不同截面形状对爆炸冲击波反射、衍射效应不同,导致了不同持时的冲击波绕射,笔者选取冲击波绕射情况最复杂的时间点进行研究。

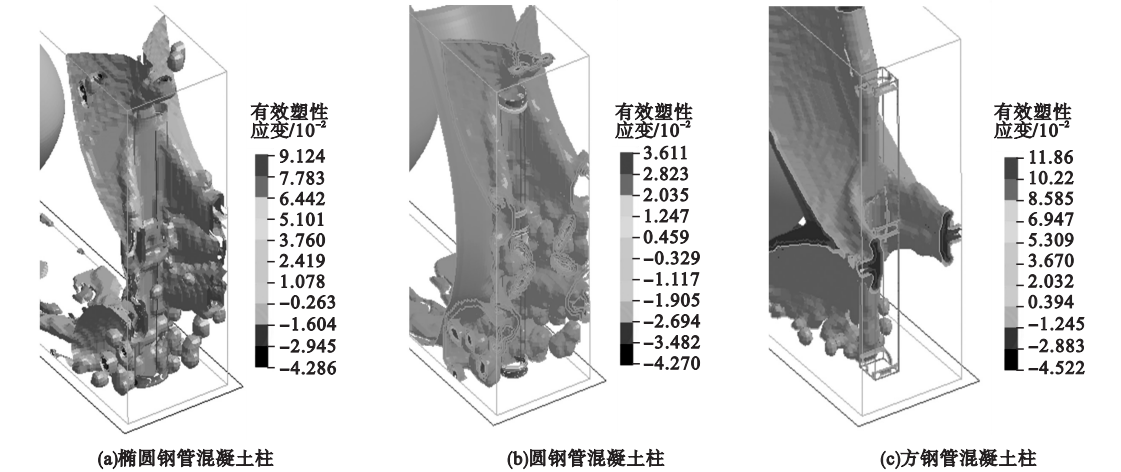


图 4 塑性应变云图

Fig. 4 Plastic strain contour plots

由图 4(a)和图 4(b)可知,爆炸冲击波在椭圆钢管混凝土柱背爆面发生了衍射,且衍射波强度弱于圆截面,说明爆炸冲击波在椭圆截面柱表面发生的绕射更少;冲击波在椭圆截面柱迎爆面发生的反射作用强于圆截面;与圆截面相比,椭圆柱端变形因冲击波综合作用而增大。由图 4(a)和图 4(c)可知,爆炸冲击波在椭圆钢管混凝土柱背爆面衍射强度强于方截面,说明椭圆截面柱侧面没有完全阻碍爆炸冲击波的绕射;冲击波在椭圆

截面柱迎爆面发生的反射作用弱于方截面;与方截面相比,没有角部阻挡效应,冲击波综合作用下椭圆柱侧面中部的变形较小。

综合以上可知,椭圆钢管混凝土柱边缘对爆炸冲击波绕射存在阻碍作用,阻碍大小介于圆、方截面柱之间。基于此得出,椭圆钢管混凝土抗爆性能介于圆、方钢管混凝土柱之间。

2.2 圆形、方形、椭圆形钢管混凝土柱抗爆对比

圆钢管混凝土柱抗爆变形云图见图 5。



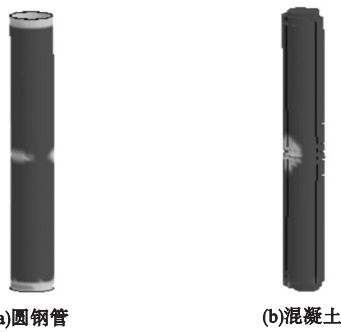


图5 圆钢管混凝土柱抗爆塑性应变云图

Fig.5 Contour plots of anti explosion plastic deformation of circular concrete filled steel tubular column

从图5中可以看出,柱端钢管抵抗冲击波作用产生的塑性变形最大,柱端塑性变形长度约占柱子总长度的1/32,其中柱底塑性变形较大,是由于在模拟中设置了刚性界面,用来模拟爆炸冲击波在地面回弹后对构件的影响;圆钢管混凝土柱柱中迎爆区域钢管发生塑性变形,塑性变形区域约占柱子总长度的1/32。圆钢管混凝土柱内部混凝土压碎区域较小,与外部钢管塑性变形区域相同,混凝土压碎主要发生在柱中和柱端,混凝土失效单元主要在混凝土表面;柱端混凝土表面周围压碎厚度较均匀;柱中迎爆面混凝土表面压碎区域约占构件长度的1/32,背爆面混凝土表面压碎区域约占构件长度的1/5;迎爆面混凝土碎裂深度大于背爆面。

方钢管混凝土柱抗爆时,构件塑性应变云图见图6。从图中可以看出,方钢管柱中迎爆面发生向外鼓曲变形,鼓曲区域约占构件总长度的1/4;方钢管柱端塑性变形较小,钢管柱端发生塑性变形的区域也较小,约占方钢管混凝土柱总长度的1/64。然而,方钢管混凝土柱内部混凝土压碎情况较为严重,混凝土迎爆面柱中大量混凝土被压碎,压碎区域约占构件总长度的3/7,背爆面压碎区域较小,约占方钢管混凝土柱总长的1/7;但是混凝土碎裂深度较大,混凝土碎裂深度最大处位于柱中,此处未失效混凝土截面面积约占构件截面面积的1/4;柱端混凝土表面

四周均有碎裂;在柱端距柱中1/5处迎爆面混凝土有明显开裂。

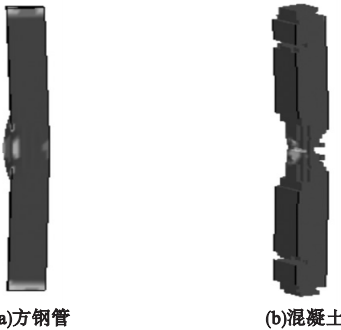


图6 方钢管混凝土柱抗爆塑性应变云图

Fig.6 Contour plots of anti explosion plastic deformation of square concrete filled steel tubular column

椭圆钢管混凝土柱抗爆塑性变形云图见图7。从图中可以看出,椭圆钢管混凝土柱抗爆动力响应较为复杂。椭圆钢管混凝土柱变形较大处依旧集中在柱中和柱端。椭圆钢管发生较大塑性变形的区域大小与内部混凝土碎裂区域基本吻合,椭圆钢管混凝土柱迎爆面凹陷背爆面鼓曲,柱身各单元位移均匀变化。

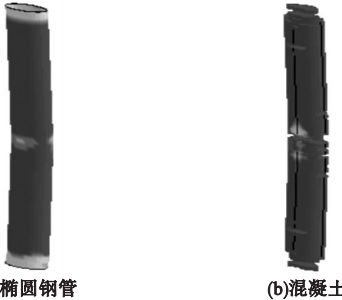


图7 椭圆钢管混凝土柱抗爆塑性应变云图

Fig.7 Contour plots of anti explosion plastic deformation of elliptical concrete filled steel tubular column

将椭圆钢管混凝土柱抗爆位移大小与圆、方钢管混凝土柱进行对比,结果见图8。由于方钢管混凝土柱迎爆面钢管鼓曲变形较大,迎爆面柱中单元位移-时程曲线不适合作为比较三种界面柱抗爆位移标准,因此将背爆面柱中单元位移作为对比数据,如图8所示,圆钢管混凝土柱柱中背爆面最大位移为2.81 cm,方钢管混凝土柱背爆面柱中最大位移为5.32 cm,椭圆钢管混凝土柱背爆面柱中最大位移为8.07 cm。

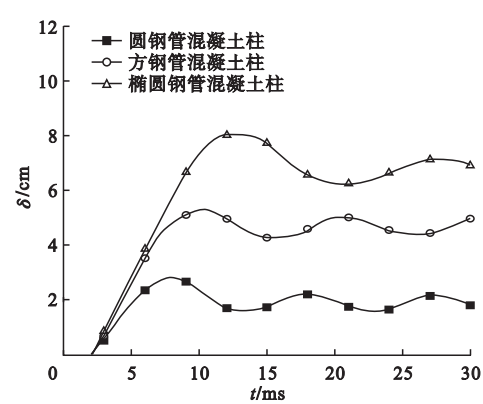


图8 钢管混凝土柱背爆面位移-时程曲线

Fig. 8 Displacement time history curves of back blasting surface of concrete filled steel tubular column

将椭圆钢管混凝土柱到达位移峰值所用时间与其余两截面柱对比:圆钢管钢管混凝土柱位移到达峰值所需要的时间为 8. 10 ms, 方钢管混凝土柱柱中单元到达位移峰值时间为 10. 20 ms, 椭圆钢管混凝土柱柱中单元到达位移峰值所用时间为 12. 60 ms。

2.3 起爆方向对构件变形影响

对上述工况 3 的椭圆钢管混凝土柱两个轴向抗爆性能进行研究。通过观察其爆炸冲击波产生的有效塑性应变情况,探究柱两方向迎爆时变形模式的不同。沿短轴方向进行起爆设置时产生的塑性应变如图 9 所示,沿长轴方向进行起爆设置产生的塑性应变如图 10 所示。

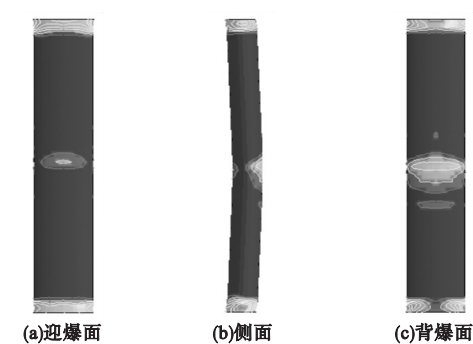


图9 短轴抗爆有效塑性应变云图

Fig. 9 Effective plastic strain contour plots of short axis blast resistance

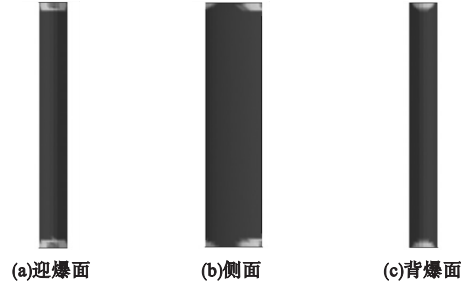


图 10 长轴抗爆有效塑性应变云图

Fig. 10 Effective plastic strain contour plots of long axis blast resistance

由图 9 和图 10 可知,椭圆钢管混凝土柱在不同方向爆炸冲击作用下产生的塑性变形情况差异较大。爆炸冲击波沿短轴方向施加时,柱整体产生了明显侧向位移,柱中发生了明显塑性变形;爆炸冲击波沿长轴方向施加时,产生的整体变形较小,柱中没有发生塑性变形。由此可见,短轴向抵抗爆炸冲击能力比长轴向弱很多。

3 短长轴比对椭圆钢管混凝土柱抗爆性能影响

3.1 短长轴比对柱中侧向位移的影响

笔者引入椭圆钢管混凝土柱横截面的短轴和长轴比  $AR$ ,通过改变短长轴比,探究椭圆钢管混凝土柱中侧向位移情况,模型参数见表 2。为便于观察位移变化,将构件均控制在塑性变形阶段,依旧沿短轴方向施加爆炸荷载,TNT 炸药边长 45 cm、质量为 149. 445 kg、爆心高度 1. 8 m、比例距离  $Z=0. 75$ 、爆心距 3. 98 m。

表 2 椭圆柱抗爆柱截面尺寸

Table 2 Section size of anti explosion column with elliptical columns

工况	钢管外短轴半径/cm	钢管外长轴半径/cm	AR	Z
1	21. 2	21. 2	1. 0	0. 75
5	20. 15	22. 35	0. 9	0. 75
6	19	23. 7	0. 8	0. 75
7	17. 75	25. 35	0. 7	0. 75
8	16. 4	27. 4	0. 6	0. 75
3	15	30	0. 5	0. 75
9	13. 4	33. 55	0. 4	0. 75
10	11. 6	38. 75	0. 3	0. 75

提取迎爆面柱中位移-时程曲线,得到不同短长轴比下构件位移变化情况如图 11 所示<sup>[6]</sup>。

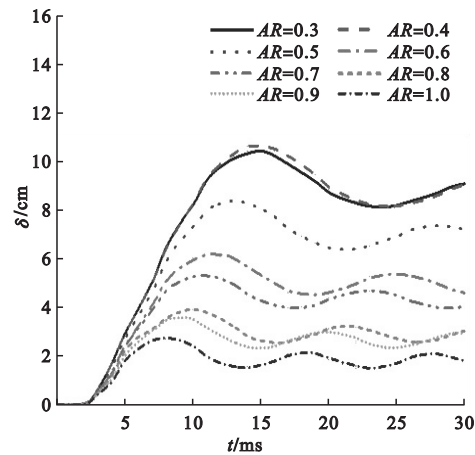


图 11 柱中  $\delta$ - $AR$  曲线

Fig. 11 The middle node of the column  $\delta$ - $AR$  curves

从图 11 可以看出,构件均处于塑性应变状态,柱中位移  $\delta$  整体上随  $AR$  减小而增大,迎爆面柱中位移峰值  $\delta_{\max}$  也随  $AR$  减小而增大,且  $AR$  减小时,柱中位移  $\delta_{\max}$  到达时间相对滞后,说明椭圆截面长短轴尺寸差异大时,迎爆面加大,会增加爆炸冲击波作用效应和持续时间。

图 12 为根据图 11 绘制的  $\delta_{\max}$ - $AR$  曲线。

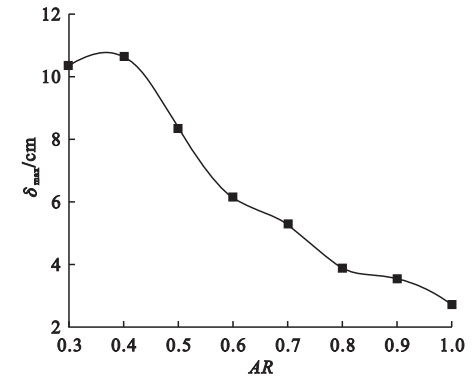


图 12 柱中  $\delta_{\max}$ - $AR$  曲线

Fig. 12 The middle node of the column  $\delta_{\max}$ - $AR$  curve

由图 12 可知, $AR$  取 0.8 ~ 1.0 时曲线斜率最小,此时构件截面短轴较长,截面短长轴比对爆炸冲击波传递影响最小; $AR$  取 0.6 ~ 0.8 时曲线变化较平缓,此时截面短轴长适中,爆炸冲击波传递受到一定阻碍; $AR$  取

0.4 ~ 0.6 时曲线斜率最大,位移峰值跨度较大,截面短轴较短,对爆炸冲击波阻碍作用加强; $AR < 0.4$  时出现下降段,截面短轴短到一定程度后,截面抵抗爆炸冲击波作用稍有加强,但冲击效应仍属较强。

综合以上可知,由短长轴比产生的尺寸效应存在一定的可接受范围,设计宜采用的短长轴比  $AR$  在 0.6 ~ 1.0。

3.2 短长轴比对破坏模式的影响

前文得出不同短长轴比下构件位移变化规律,但需结合构件破坏模式进行进一步分析,尤其对于  $AR < 0.4$  时产生的下降段值得关注。笔者建立表 3 所示工况,对椭圆钢管混凝土柱进行破坏模式研究。

表 3 椭圆柱短轴抗爆柱截面尺寸

Table 3 Section size of short axis anti explosion column of elliptical columns

工况	钢管外短轴 半径/cm	钢管外长轴 半径/cm	$AR$	$Z$
11	17.75	25.35	0.7	0.62
12	15.00	30.00	0.5	0.62
13	11.60	37.75	0.3	0.62

根据  $\delta_{\max}$ - $AR$  曲线选取代表性截面柱,除  $AR = 0.8 \sim 1.0$  外的三段趋势中各选一种工况,加大炸药量,起爆距离不变,起爆位置依旧在柱中沿短轴方向,为增大爆炸荷载作用,将比例距离  $Z$  由 0.75 变为 0.62,使之产生明显塑性变形,以研究椭圆钢管混凝土柱破坏模式。图 13 ~ 图 15 分别为  $AR = 0.7$ 、

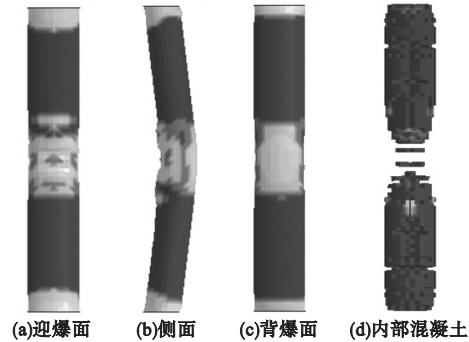


图 13  $AR = 0.7$  塑性应变云图

Fig. 13  $AR = 0.7$  plastic strain contour plots

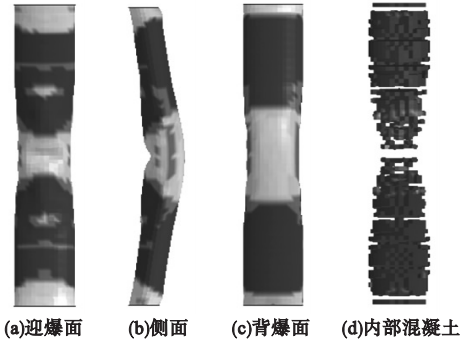


图 14 AR = 0.5 塑性应变云图

Fig. 14 AR = 0.5 plastic strain contour plots

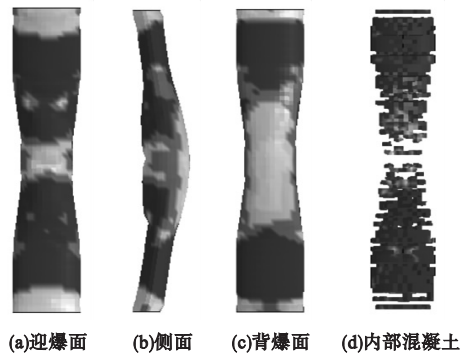


图 15 AR = 0.3 塑性应变云图

Fig. 15 AR = 0.3 plastic strain contour plots

$AR = 0.5$ 、 $AR = 0.3$  时,椭圆钢管混凝土柱抗爆塑性变形云图。对比 3 组云图可知,短轴越短,柱中鼓曲现象越明显,这种鼓曲来自于爆炸冲击波对柱侧冲切作用,并且随着短轴越短,冲切作用越强。

$AR = 0.7$  时,首先椭圆钢管混凝土柱最薄弱处在柱底,混凝土发生冲切破坏;其次在柱中的迎爆面发生明显凹陷,背爆面变形较小,内部混凝土柱中被压碎,压碎区域约占柱整体的  $1/5$ ;最后在柱底到柱中的  $1/3$  处,有小部分混凝土失效。

$AR = 0.5$  时,椭圆钢管混凝土柱最薄弱处依旧在柱底位置,柱底混凝土存在冲切破坏;柱中破坏情况发生改变,迎爆面凹陷变小,背爆面柱中变形范围扩大,钢管迎背爆面发生细微鼓曲、侧面随之发生细微收缩;柱中混凝土压碎情况加剧,主要压碎区域约占柱整体的  $1/2$ 。

$AR = 0.3$  时,椭圆钢管混凝土柱底存在

混凝土冲切破坏;柱中破坏情况明显改变,迎爆面凹陷明显变小,背爆面柱中变形范围进一步扩大,钢管迎背爆面皆发生明显鼓曲、侧面随之发生明显收缩;柱中混凝土压碎进一步加剧,压碎区域约占柱整体的  $3/5$ 。

综合爆炸荷载下不同短长轴比椭圆柱破坏模式可知,爆炸冲击波会对柱端和柱中产生冲切效应。尤其在  $AR < 0.4$  时,冲击波在迎爆面发生反射压碎混凝土,而后发生强行绕射,导致柱中侧面产生了严重冲切效应,钢管沿迎爆方向鼓曲,内部混凝土处于两向受拉一向受压状态,抗爆性能进一步大幅降低。因此椭圆钢管混凝土柱短长轴比  $AR$  不宜小于  $0.4$ 。

## 4 结 论

(1)与圆、方钢管混凝土柱相比,椭圆钢管混凝土柱抗爆冲击波反射、衍射作用更为复杂,椭圆钢管混凝土柱抗爆能力介于圆方钢管混凝土柱之间。椭圆钢管混凝土柱沿长轴方向作为迎爆面的抗爆性能明显优于沿短轴方向。

(2)在截面面积、截面含钢率相同的情况下,圆、椭圆钢管混凝土柱的钢管与内部混凝土整体性较好;圆钢管混凝土柱柱中产生的位移最小,其次是方钢管混凝土柱。位移最大的是椭圆钢管混凝土柱;圆钢管混凝土柱抗爆到达柱中单元位移峰值时间最短,方钢管混凝土柱次之,椭圆钢管混凝土柱到达最大位移所用时间最长。

(3)沿短轴向施加爆炸荷载时,通过迎爆面柱中应变,得出不同短长轴比下构件破坏形态,提出短长轴比不应小于  $0.4$ 。

(4)根据迎爆面柱中位移时程曲线,提出椭圆形钢管混凝土柱的抗爆设计宜采用的短长轴比为  $0.6 \sim 1.0$ 。采用短长轴比为  $0.4 \sim 0.6$  内的椭圆钢管混凝土柱时,应采取加固措施。



## 参考文献

- [1] UENAKA K. Experimental study on concrete filled elliptical/oval steel tubular stub columns under compression [J]. Thin-walled structures, 2014, 78(1): 131–137.
- [2] 孔祥峰, 陆纪明. 大型柱状玻璃幕墙安装实践研究: 以常州万豪酒店大堂椭圆柱为例[J]. 开封教育学院学报, 2018, 38(12): 276–279. (KONG Xiangfeng, LU Jiming. Research on the installation practice of large cylindrical glass curtain wall: Taking the oval column in the lobby of Changzhou marriott hotel as an example [J]. Journal of Kaifeng institute of education, 2018, 38(12): 276–279.)
- [3] 范龙尧, 陈选东, 李鸿. 柔性玻璃钢模板在钢筋混凝土圆柱及椭圆柱模板工程中的应用[J]. 建筑技术, 2007, 38(8): 590–592. (FAN Longyao, CEN Xuandong, LI Hong. Soft glass teel formwork used for RC cylinder and ellipse column [J]. Architecture technology, 2007, 38(8): 590–592.)
- [4] 姜虹宇. 国家大剧院超大椭圆柱的加工[J]. 石材, 2007, 12: 43–44. (JIANG Hongyu. Processing of super large elliptic column in national grand theatre [J]. Stone, 2007, 12: 43–44.)
- [5] 纪雪林, 田振国, 郝亚娟, 等. 椭圆柱绕流的理论研究[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(1): 89–94. (JI Xuelin, TIAN Zhenguo, HAO Yajuan, et al. Theory of elliptical cylinder flow [J]. Journal of Yanshan university, 2014, 38(1): 89–94.)
- [6] 李忠敏. 椭圆柱绕流流动及换热实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019. (LI Zhongmin. Experimental research on flow and heat transfer over elliptic cylinder [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2019.)
- [7] 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 Sai. Dynamic response and damage assessment of CFST columns subjected to blast loading [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
- [8] 张国焰. 钢管混凝土柱爆炸作用下应变率效应研究[D]. 广州: 广州大学, 2018. (ZHANG Guoyan. Strain rate effect study of CFST column under blast load [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.)
- [9] 卢红琴, 刘伟庆. 空中爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 31(19): 105–108. (LU Hongqin, LIU Weiqing. Research on numerical simulation of blast wave in air [J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science and engineering), 2009, 31(19): 105–108.)
- [10] DONG J, ZHAO J, ZHANG D, et al. Research on dynamic response of concrete-filled steel tube columns confined with FRP under blast loading [J]. Shock and vibration, 2019(7): 1–18.
- [11] 孟一. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁的试验及数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012. (MENG Yi. Experiment and numerical simulation study on reinforced concrete beam under impact loading [D]. Changsha: Hu'nan University, 2012.)
- [12] 余轩. 爆炸荷载作用下钢管混凝土柱侧向挠度分析与损伤评估[D]. 广州: 广州大学, 2019. (YU Xuan. Lateral deflection analysis and damage assessment of concrete-filled steel tube columns subjected to blast loading [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.)
- [13] 马贤峰. 椭圆钢管混凝土抗震性能试验与计算方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019. (MA Xianfeng. Research on seismic performance test and calculation methods of elliptical concrete filled steel tube [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.)
- [14] YANG H, LAM D, GARDNER L. Testing and analysis of concrete-filled elliptical hollow sections [J]. Engineering structures, 2008, 30(12): 3771–3781.
- [15] MC C F, GARDNER L, QIU W. Experimental study of slender concrete-filled elliptical hollow section beam-column [J]. Journal of constructional steel research, 2015, 113(1): 185–194.
- [16] DAI H, LAM D, JAMALUSDDIN N, et al. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression [J]. Thin-walled structures, 2014, 77(1): 26–35.
- [17] LST. LS-DYNA keyword user's manual version 971 [Z]. CA: Livermore Software Technology Company, 2020.
- [18] 李晓勇, 崔村燕, 陈景鹏, 等. LS-DYNA 软件开展爆炸冲击波计算时需考虑的问题[J]. 装备学院学报, 2014, 25(4): 79–84. (LI Xiaoyong, CUI Chunyan, CEN Jingpeng, et al. Several considerations when calculating the blast wave using LS-DYNA [J]. Journal of equipment academy, 2014, 25(4): 79–84.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of composite structures: JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [20] 李兴. CFRP 约束钢管混凝土圆柱抗爆性能的有限元分析[D]. 太原: 中北大学, 2019. (LI Xing. Finite element analysis of antiknock performance of CFRP confined filled steel cylindrical columns [D]. Taiyuan: North University of China, 2019.)
- [21] 薛建英, 刘玉存, 刘天生. 钢管混凝土结构构件抗爆性能的试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 786–790. (XUE Jianying, LIU Yucun, LIU Tiansheng. Experimental study on antiknock performance of concrete filled steel tube [J]. Journal of north university of China (natural science edition), 2011, 32(6): 786–790.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)