

doi: 10.7690/bgzd.2024.12.013

接触爆炸下全尺寸钢筋混凝土墙的毁伤特性

张亚洲, 石广豪, 贾鑫, 黄正祥
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对典型民用高层建筑中的钢筋混凝土墙, 对足尺寸的钢筋混凝土墙进行不同装药量的接触爆炸试验研究。通过 3 次接触爆炸试验, 观察钢筋混凝土墙在不同装药量下的局部破坏模式和破坏特征, 分析装药量对钢筋混凝土墙局部毁伤效应的影响; 通过矫正之后的数值仿真模型对钢筋混凝土墙爆炸毁伤区域尺寸、钢筋的变形情况进行定量、定性的分析。结果表明: 钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸与炸药质量的立方根成线性关系; 随着混凝土强度的增加, 钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸均有减小; 钢筋混凝土墙毁伤区域中压缩坑、贯穿坑毁伤程度受钢筋的影响较小, 随着混凝土墙体中钢筋强度和直径的增加, 崩落坑的尺寸出现减小。

关键词: 钢筋混凝土墙; 接触爆炸; 毁伤分析; 数值计算; 毁伤规律

中图分类号: TJ51+5 **文献标志码:** A

Damage Characteristics of Full-scale Reinforced Concrete Walls Subjected to Contact Explosion

Zhang Yazhou, Shi Guanghao, Jia Xin, Huang Zhengxiang
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In view of the reinforced concrete wall in a typical civil high-rise building, the contact explosion tests with different charges were carried out on the full-size reinforced concrete wall. Through three contact explosion tests, the local failure modes and failure characteristics of the reinforced concrete wall under different explosive charges were observed, and the influence of explosive charge on the local damage effect of the reinforced concrete wall was analyzed. Through the corrected numerical simulation model, the damage area size of the reinforced concrete wall and the deformation of the steel bar were quantitatively and qualitatively analyzed. The results show that there is a linear relationship between the damage size of reinforced concrete wall and the cube root of the mass of explosive, and the damage size of reinforced concrete wall decreases with the increase of concrete strength; The damage degree of compression pit and penetration pit in the damage area of reinforced concrete wall is less affected by the steel bar. With the increase of the strength and diameter of the steel bar in the concrete wall, the size of the caving pit decreases.

Keywords: reinforced concrete wall; contact explosion; damage analysis; numerical calculation; damage law

0 引言

在过去的几十年中, 局部战争和恐怖袭击事件频繁发生。一些重要的基础设置, 如政府大楼、大使馆大楼可能成为恐怖爆炸袭击的目标, 因此了解建筑物在爆炸载荷作用下的结构响应至关重要。特别是随着建筑物高度的增加, 许多高层建筑开始采用钢筋混凝土墙作为传统砌体墙的替代品; 因此, 有必要研究钢筋混凝土墙在爆炸载荷作用下的毁伤效应。

近年来, 学者对钢筋混凝土结构在爆炸载荷作用下的毁伤效应进行了大量研究, 系统探讨了爆炸载荷作用下钢筋混凝土结构的损伤破坏与装药量、爆炸距离和结构特性的关系。王辉明等^[1]通过 4 次爆炸试验, 观测了钢筋混凝土梁在不同装药量下的局部破坏模式和破坏特征, 根据试验结果, 对钢筋

混凝土梁进行了损伤等级划分。Yang 等^[2]通过试验与数值仿真相结合的方法, 采用量纲分析理论建立了损伤区域跨度的半经验方程, 获取损伤区域的饱和值。Tang 等^[3]针对钢筋混凝土梁在近距离爆炸作用下的损伤效应, 采用 AUTODYN 和 LS-DYNA 进行了数值模拟, 基于数值模拟结果进行了量纲分析, 推导了钢筋混凝土梁的损伤特征与支座间距的关系。

Dua 等^[4]结合试验与数值仿真, 分析钢筋混凝土柱在爆炸载荷作用下的毁伤效应, 采用剩余承载力作为钢筋混凝土柱的损伤指标。结果表明, 相较于方形钢筋混凝土柱, 矩形钢筋混凝土柱损伤更低, 特别是长宽比大于 2 时, 矩形钢筋混凝土柱的损伤程度明显降低。Mejía 等^[5]通过试验和数值仿真相结合对钢筋混凝土柱在爆炸载荷作用下的毁伤

收稿日期: 2024-06-20; 修回日期: 2024-07-20

第一作者: 张亚洲(1990—), 男, 江苏人, 硕士。

效应进行研究，结果表明钢筋混凝土柱被破坏过程为：混凝土保护层被破坏、横向钢筋受剪、纵向钢筋弯曲以及混凝土核心部分被完全破坏。在炸药当量超过 500 g 时，钢筋混凝土柱横向钢筋布置类型对最终损坏有明显影响，并且轴向载荷可以提高钢筋混凝土柱的抗爆强度。Yuan 等^[6]对圆形和方形截面钢筋混凝土柱桥梁进行试验和数值仿真研究，测量爆炸载荷作用下钢筋混凝土柱的毁伤响应。对于 2 个立柱，靠近炸药的近端和侧面的保护层混凝土受到严重损坏，而远端表面的水泥保护层几乎完好无损。

Yue 等^[7]通过冲量理论对钢筋混凝土板在接触爆炸载荷作用下的局部损伤进行预测，同时提出反映了爆炸源和材料阻力的综合性质的无量纲系数。Ning 等^[8]研究了混凝土板在不同距离处承受 1.5 kg B 炸药爆炸载荷的情况，建立爆炸载荷作用下冲击波超压峰值、冲击波能量、装药质量和防区外距离的破片模型。Kumar 等^[9]通过 ABAQUS 仿真与试验结合，研究表明，随着装药量的增加，板坯的单向弯曲变得更加明显，另一方面随着距离的增加，板坯的局部破坏转变为整体变形。

Wei 等^[10]在试验的基础上，对爆炸载荷作用下的砌体墙毁伤效应进行仿真参数研究，以评估材料强度、边界条件和墙厚度对无筋砖砌墙爆炸响应的影响，结果表明，边界条件和壁厚对爆炸响应有显著的影响，而材料强度的影响较小。Chiquito 等^[11]在 4 次足尺寸试验中测试了 3 种不同改造方案，并与对照的非增强砌体墙进行比较，收集墙体的不同毁伤指数进行毁伤评估。结果表明，玻璃纤维板很大程度上能增强墙体抗爆性能，碳纤维板次之，采用纤维砂浆增强的效果不佳。Zhu 等^[12]建立了砌体墙的详细微观数值模型，预测近距离爆炸载荷作用下无筋粘土砖砌体墙和聚脲增强粘土砖砌体墙的非线性动力响应，数值模拟结果与现场试验结果吻合较好。

通过对前人研究总结发现，针对爆炸载荷作用下建筑物的毁伤研究，在梁、板、柱、砌体墙结构方面，已经存在大量研究内容。但现有针对民用建筑物中的钢筋混凝土墙爆炸毁伤研究较少，特别是全尺寸钢筋混凝土墙爆炸毁伤研究。因此，有必要对全尺寸钢筋混凝土墙在爆炸载荷作用下的毁伤效应进行研究。

笔者开展全尺寸钢筋混凝土墙接触爆炸局部破

坏效应试验。参考工程中常用的钢筋混凝土墙的结构尺度范围，设计并且制作典型钢筋混凝土墙原型构件。进行 3 种不同 TNT 当量接触爆炸试验，研究墙体局部损伤特征。在经过矫正的数值仿真模型的基础上，考虑炸药质量、钢筋混凝土墙强度、钢筋直径及钢筋强度对接触爆炸毁伤区域尺寸的影响。

1 试验与数值模型验证

1.1 试验设计

首先设计 3 面全尺寸的钢筋混凝土墙，以分析炸药接触爆炸作用在砖墙上造成损伤破坏面积的大小；同时，结合实际工程应用，进行不同当量的 TNT 接触爆炸试验。3 面钢筋混凝土墙的长宽高 3 个方向的尺寸为 6 750 mm×4 100 mm×300 mm，墙体通过埋深底面的方式进行固定，墙体埋深为 1 000 mm，整面墙体采用强度为 C30 的混凝土浇筑而成，墙体配筋方案如图 1 所示，钢筋采用 HRB400 带肋钢筋，墙体迎爆面纵筋直径为 16 mm，墙体背爆面钢筋直径为 12 mm，箍筋直径为 14 mm，墙体在长度、宽度、厚度 3 个方向上保护层的厚度为 50 mm×75 mm×30 mm。

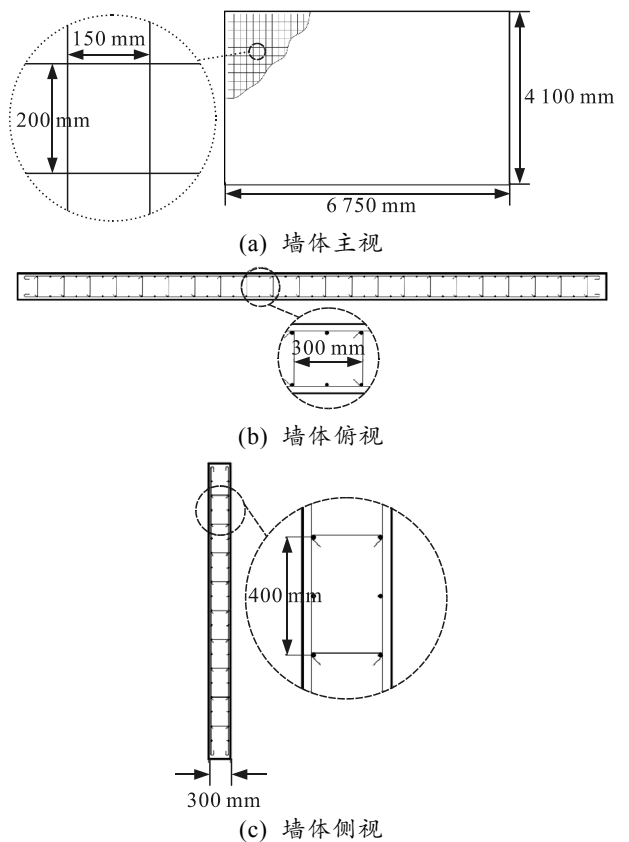


图 1 墙体配筋

墙体整体试验布置如图 2 所示，模拟墙体竖直

放置状态，同时保证墙体放置稳定。为精确描述接触爆炸载荷作用下墙体的毁伤，在墙体上建立如图 2 所示笛卡尔坐标系： X 代表墙体长度方向， Y 代表墙体的高度方向， Z 代表墙体的厚度方向。

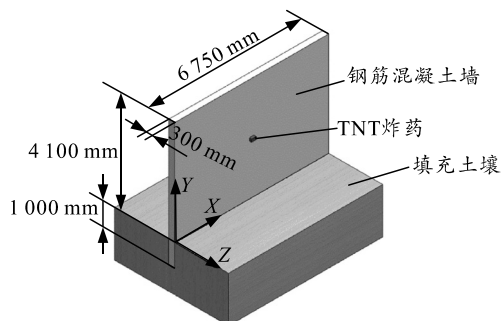


图 2 钢筋混凝土墙接触爆炸试验布局

1.2 试验工况

钢筋混凝土墙爆炸试验现场设计如图 3 所示，试验采用 TNT 装药，在 TNT 装药顶部放置雷管引爆 TNT。单块 TNT 装药的质量为 200 g，尺寸为 100 mm×50 mm×25 mm，每次试验的 TNT 装药重量为 200 g 的整数倍，避免对单块 TNT 装药进行切割，以保证试验的安全性。TNT 装药采用棉线和橡皮泥固定在墙面上进行接触爆炸。3 面墙体分别用 1、10 和 20 kg 不同质量的 TNT 装药进行试验。试验结束之后，按照图 4 所示的尺寸测量墙体毁伤区域的尺寸。最终测量结果如表 1 所示。

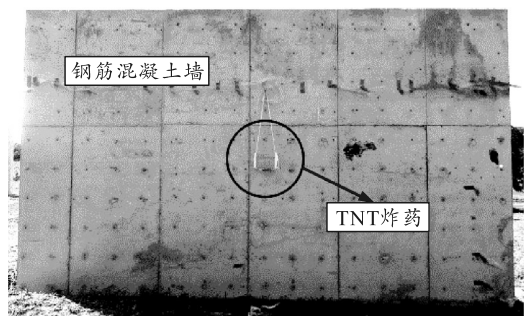


图 3 试验现场布置

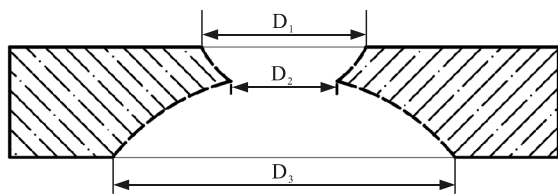


图 4 钢筋混凝土墙毁伤尺寸

表 1 钢筋混凝土墙接触爆炸试验结果

TNT/kg	D_1 /mm	D_2 /mm	D_3 /mm	迎爆面 钢筋	背爆面 钢筋
1	385	0	0	无断裂	无断裂
10	860	536	1 170	断裂	无断裂
20	1 125	630	1 286	断裂	断裂

1.3 数值仿真描述

在钢筋混凝土结构爆炸毁伤领域，数值仿真模型被认为是这类研究有力的研究工具。通过试验结果表明，接触爆炸损伤区域尺寸大小随着 TNT 装药质量而变化。然而，接触爆炸下钢筋混凝土墙的损伤演变是一个复杂的问题。此外，损伤区域尺寸还受到众多其他因素的影响。笔者利用有限元程序 LS-DYNA 建立了数值模型，从而阐明了其他因素的影响规律。

1.3.1 数值仿真建模方法

建立如图 5 所示的钢筋混凝土墙接触爆炸数值仿真模型，使用带有单个积分点的 20 mm 立方体实体单元来建模混凝土，使用 20 mm 长的梁单元来建模钢筋，此处约束钢筋和混凝土单元之间的加速度和速度。使用欧拉单元模拟炸药和空气，并使用任意拉格朗日-欧拉方法实现了它们与混凝土单元的相互作用，该方法可以模拟爆轰产物与钢筋混凝土墙之间的相互作用。

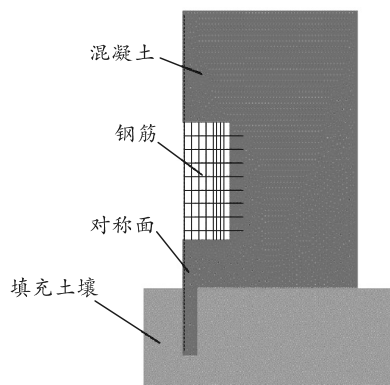


图 5 数值仿真模型

1.3.2 数值仿真材料模型

为获得爆炸荷载下混凝土性能的可靠预测，反映高应变率下混凝土材料性能特征的适当模型至关重要。笔者采用 Malvar 模型，即 LS-DYNA 中 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 模型，该模型是 Malvar 等^[13-14]在伪张量模型的基础上改进的。文献[2]利用该模型模拟了钢筋混凝土柱在爆炸作用下的动力响应，得到了一些优化结果。材料模型参数的输入非常简单。通过输入混凝土密度、泊松比、单轴抗压强度、应变率曲线和单位换算系数，可以自动生成模型参数。有关参数生成函数的详细介绍，如文献[13-14]所示。笔者使用破坏应变来定义混凝土的破坏。动态增长系数(DIF)用于表示应变率对混凝土抗压强度和抗拉强度的影响，并根据 CEB 提

供的经验函数进行定义^[15]。具体参数如表 2 所示。

表 2 混凝土 KC 模型参数

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	A_0/MPa	RSIZE/MPa	UCF	LCRATE	Failure strain
2 300	-30	39 370	145	723	0.02

静态屈服应力:

$$\sigma_y = [1 + (\dot{\epsilon}/C)^{1/P}] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中: σ_0 为静态屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C 和 P 为 Cowper-Symonds 模型系数; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变; E_p 为塑性硬化模量, 最终确定好的参数如表 3 所示。

表 3 钢筋材料参数

$\rho(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	σ/MPa	E_s/MPa	f_s
7 800	207	0.3	400	1 100	0.092

数值仿真模型中, 空气由线性多项式 EOS 建模, 具体的压力与能量的关系如下^[2]:

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

式中: $C_0 \sim C_6$ 为多项式方程系数; $\mu = \rho/\rho_0$, 为当前密度和初始密度的比值; E 为单位体积的初始内能。空气的密度取值为 $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$, E 的取值为 0.235 MPa 。

钢筋混凝土墙上的载荷由 LS-DYNA 中的爆炸模型产生。TNT 炸药模型采用 JWL(jones - wilkins - lee)状态方程进行建模, 该状态方程由化学爆炸中化学能产生的压力。具体状态方程如下^[2]:

$$p = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v} \right) e^{-r_1 v} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v} \right) e^{-r_2 v} + \frac{\omega e}{v} \quad (3)$$

式中: p 为静水压力; v 为比体积; e 为比内能; $C_1, r_1, C_2, r_2, \omega$ 为材料常数。TNT 炸药 JWL 方程常数如表 4 所示^[2]。

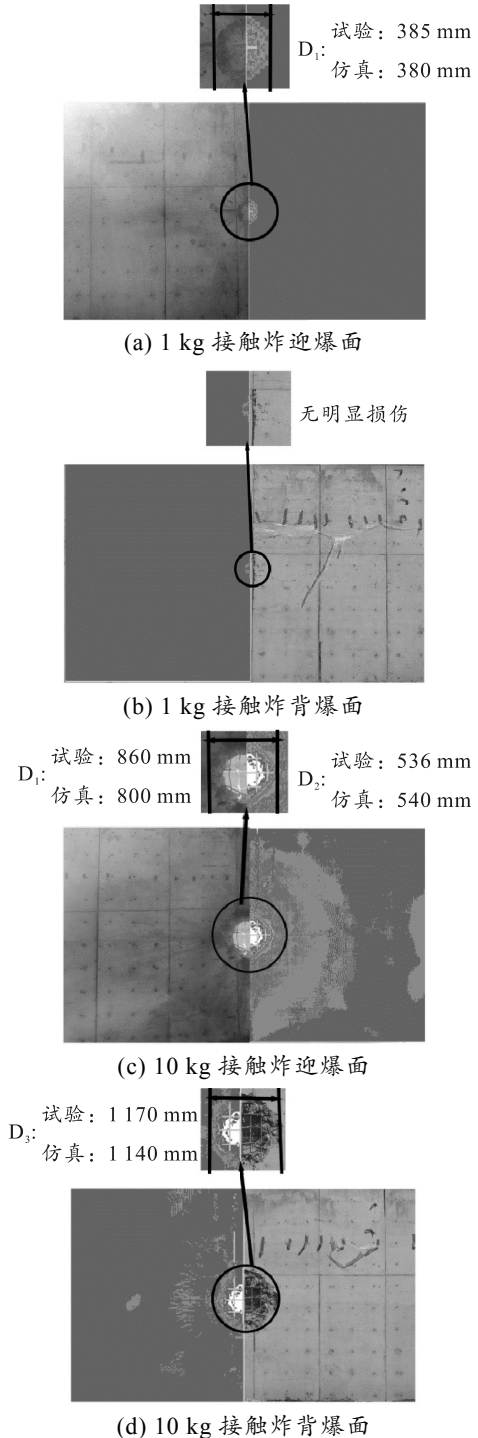
表 4 TNT 材料参数

C_1/GPa	C_2/GPa	r_1	R_2	ω
373.77	3.734 71	4.15	0.9	0.35

1.3.3 仿真模型验证

当 1 kg TNT 装药对钢筋混凝土墙体进行接触爆炸时候, 炸药 3 个方向的尺寸为 $12.5 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 墙体迎爆面出现压缩坑, 压缩坑的直径为 385 mm, 墙体没有穿孔出现, 背爆面无明显损伤, 同时两层纵筋以及箍筋没有出现损伤。当 10 kg TNT 装药对钢筋混凝土墙体进行接触爆炸时候, 炸药 3 个方向的尺寸为 $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}$, 整个墙体被贯穿, 经测量, 墙体压缩坑直径为 860 mm, 背爆面崩落坑直径为 1 170 mm, 墙体中心贯穿坑直径

为 536 mm, 迎爆面钢筋出现断裂, 背爆面钢筋没有断裂情况出现。当 20 kg TNT 装药对钢筋混凝土墙体进行接触爆炸时候, 炸药 3 个方向的尺寸为 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 整个墙体被贯穿, 经测量, 墙体压缩坑直径为 1 125 mm, 背爆面崩落坑直径为 1 286 mm, 墙体中心贯穿坑直径为 630 mm, 墙体引爆面和背爆面均出现明显的钢筋断裂。试验与数值仿真对比结果如图 6 所示, 具体仿真与理论数据对比研究如表 5 所示。



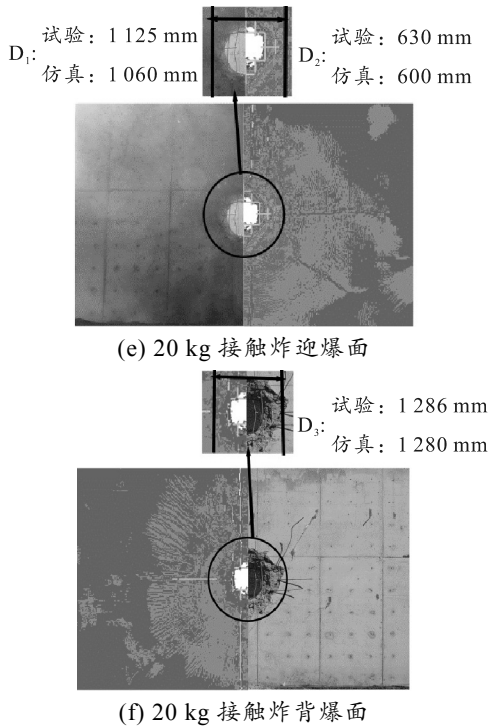


图 6 接触爆炸试验、仿真对比

表 5 试验仿真数据对比

TNT 当量/kg	仿真实验	D ₁ /mm	D ₂ /mm	D ₃ /mm	迎爆面钢筋	背爆面钢筋
1	实验	385	0	0	-	-
	仿真	380	0	0	-	-
10	实验	860	536	1 170	断裂	无断裂
	仿真	800	540	1 140	断裂	无断裂
20	实验	1 125	630	1 286	断裂	断裂
	仿真	1 060	600	1 280	断裂	断裂

2 钢筋混凝土墙毁伤参数影响规律

对 TNT 接触爆炸之后钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸的影响因素进行分析讨论。此处着重讨论炸药质量、混凝土强度、钢筋直径以及钢筋强度对接触爆炸下钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸的影响。

2.1 炸药质量的影响

由于炸药质量会对爆炸载荷的峰值和冲量产生直接的影响，同时在接触爆炸情况下，炸药形状也对超压峰值和冲量产生明显的影响；因此，通过数值仿真，保证炸药的形状为立方体，即 $l_1:l_2:h=1:1:1$ ，改变炸药质量，取 9 种不同质量炸药进行数值仿真：1、3、5、8、10、12、15、17、20 kg。然后分析炸药质量对钢筋混凝土墙损伤区域尺寸的影响。图 7 展示损伤区域随着炸药质量的变化规律。

当炸药质量较小的时候，钢筋混凝土墙只在迎爆面出现压缩坑，背爆面无明显崩落出现；随着炸

药质量增加，墙体背爆面出现崩落，当墙体崩落坑与压缩坑深度之和大于墙体厚度时，墙体被贯穿；同时迎爆面的钢筋基本都出现断裂，当炸药质量增加到 8 kg 及以上时，背爆面的钢筋出现断裂。整体来看，钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸随着炸药质量增加而增加，但增加趋势逐渐变缓。

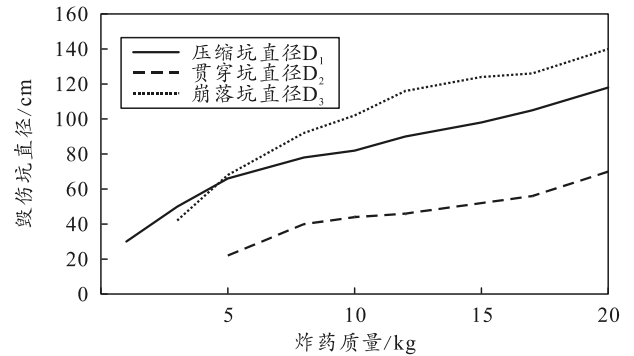


图 7 炸药质量对钢筋混凝土墙毁伤尺寸的影响

对钢筋混凝土墙接触爆炸毁伤区域尺寸与炸药当量进行数据拟合可得：

压缩坑：

$$D_1=48.73 M^{1/3}-19.87; \quad (4)$$

贯穿坑：

$$D_2=41.44 M^{1/3}-47.03; \quad (5)$$

崩落坑：

$$D_3=74.83 M^{1/3}-61.01。 \quad (6)$$

其中 D 为毁伤区域尺寸， M 为炸药质量由式(4)-(6)可知，钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸与炸药质量的立方根成线性关系。

炸药质量对钢筋混凝土墙毁伤影响如表 6 所示。

表 6 炸药质量对钢筋混凝土墙毁伤影响

TNT 质量/kg	D ₁ /cm	D ₂ /cm	D ₃ /cm	迎爆面钢筋	背爆面钢筋
1	30	0	0	无断裂	无断裂
3	50	0	42	断裂	无断裂
5	66	22	68	断裂	无断裂
8	78	40	92	断裂	断裂
10	82	44	102	断裂	断裂
12	90	46	116	断裂	断裂
15	98	52	124	断裂	断裂
17	105	56	126	断裂	断裂
20	118	70	140	断裂	断裂

2.2 混凝土强度的影响

通过数值仿真改变混凝土的单轴抗压强度，保证炸药的质量为 10 kg，研究混凝土强度的变化对钢筋混凝土墙接触爆炸毁伤区域的影响。表 7 展示了每个数值仿真模型混凝土单轴抗压强度与相应的毁

伤区域尺寸。图 8 展示了钢筋混凝土墙压缩坑、崩落坑、贯穿坑随着钢筋混凝土单轴抗压强度的变化曲线。

表 7 混凝土强度对钢筋混凝土墙毁伤影响

混凝土强度/MPa	D ₁ /cm	D ₂ /cm	D ₃ /cm	迎爆面钢筋	背爆面钢筋
20	90	54	130	断裂	无断裂
25	88	48	116	断裂	无断裂
30	82	44	102	断裂	断裂
35	80	42	100	断裂	断裂
40	80	38	90	断裂	断裂
45	80	38	88	断裂	断裂
50	78	38	82	断裂	断裂

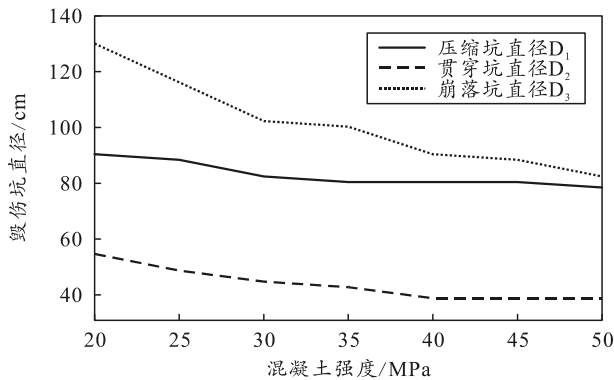


图 8 混凝土强度对钢筋混凝土墙毁伤尺寸的影响

通过数值仿真结果可知，随着混凝土单轴抗压强度的增加，钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸不断减小，钢筋混凝土墙抗爆能力不断增加。同时，当混凝土墙强度较低时，背爆面的钢筋没有出现断裂，但是随着混凝土墙强度的增加，背爆面的钢筋出现断裂。因为随着混凝土强度增加，钢筋与混凝土之间的粘结作用增加，炸药爆轰驱动混凝土破碎更容易牵连钢筋的断裂。

2.3 箍筋直径的影响

通过数值仿真改变钢筋混凝土箍筋的直径，保证炸药的质量为 10 kg，研究箍筋直径的变化对钢筋混凝土墙毁伤区域的影响。表 8 展示了每个数值仿真模型箍筋直径与相应的毁伤区域尺寸。图 9 展示了钢筋混凝土墙压缩坑、崩落坑、贯穿坑尺寸随着箍筋直径的变化曲线。

表 8 箍筋强度对钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸的影响

箍筋强度/MPa	D ₁ /cm	D ₂ /cm	D ₃ /cm	迎爆面钢筋	背爆面钢筋
100	86	42	130	断裂	无断裂
200	86	42	112	断裂	无断裂
300	86	42	106	断裂	无断裂
350	82	44	102	断裂	断裂
400	82	44	94	断裂	断裂
500	82	44	88	断裂	断裂

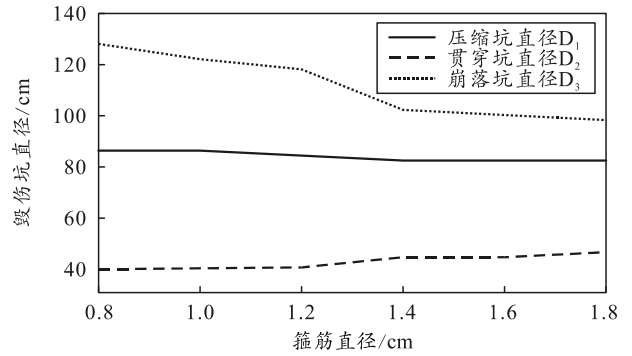


图 9 箍筋直径对钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸的影响

观察数值仿真结果可知，随着箍筋直径的增加，混凝土墙压缩坑和贯穿坑毁伤尺寸存在小幅度不明显的变化。但混凝土墙崩落坑的尺寸随着箍筋直径的增加减小较为明显。主要原因是压缩坑和贯穿坑的形成受箍筋的约束较少，而箍筋的直径增加能够耗散形成崩落坑的炸药能量，因此崩落坑的尺寸减小比较明显。同时随着箍筋直径增加，背爆面钢筋开始出现断裂，因为随着箍筋直径增加，炸药爆轰载荷更容易传递到背爆面钢筋中，因此背爆面钢筋更容易出现断裂。

2.4 箍筋强度的影响

通过数值仿真改变钢筋混凝土墙箍筋强度，保证炸药的质量为 10 kg，研究箍筋强度的变化对钢筋混凝土墙毁伤区域的影响。表 9 展示了每个数值仿真模型箍筋强度与相应的毁伤区域尺寸。图 10 展示了钢筋混凝土墙压缩坑、崩落坑、贯穿坑尺寸随着箍筋强度的变化曲线。

表 9 箍筋直径对钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸的影响

箍筋直径/cm	D ₁ /cm	D ₂ /cm	D ₃ /cm	迎爆面钢筋	背爆面钢筋
0.8	86	40	128	断裂	无断裂
1.0	86	40	122	断裂	无断裂
1.2	84	40	118	断裂	无断裂
1.4	82	44	102	断裂	断裂
1.6	82	44	100	断裂	断裂
1.8	82	46	98	断裂	断裂

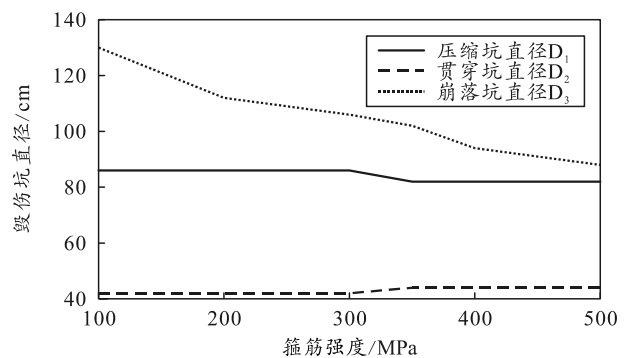


图 10 箍筋强度对钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸的影响

观察数值仿真结果可知,随着箍筋强度的增加,混凝土墙压缩坑和贯穿坑毁伤尺寸变化不明显,但混凝土墙崩落坑的尺寸随着箍筋强度的增加减小较为明显。主要因为压缩坑和贯穿坑受箍筋的影响较小,而箍筋强度增加能够增加对炸药能量的耗散,从而导致崩落坑尺寸的减小。同时随着箍筋强度增加,炸药能量更容易传递到背爆面的钢筋上,从而导致背爆面钢筋更加容易出现断裂。

2.5 纵筋强度的影响

通过数值仿真改变钢筋混凝土纵筋的强度,保证炸药的质量为 10 kg,研究纵筋强度的变化对钢筋混凝土墙毁伤区域的影响。表 10 展示了每个数值仿真模型纵筋强度与相应的毁伤区域尺寸。图 11 展示了钢筋混凝土墙压缩坑、崩落坑、贯穿坑尺寸随着纵筋强度的变化曲线。

表 10 纵筋强度对钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸的影响

纵筋强度/MPa	D ₁ /cm	D ₂ /cm	D ₃ /cm	迎爆面钢筋	背爆面钢筋
100	86	46	114	断裂	断裂
200	86	44	108	断裂	断裂
300	86	44	102	断裂	断裂
350	82	44	102	断裂	断裂
400	82	42	94	断裂	无断裂
500	82	42	90	断裂	无断裂

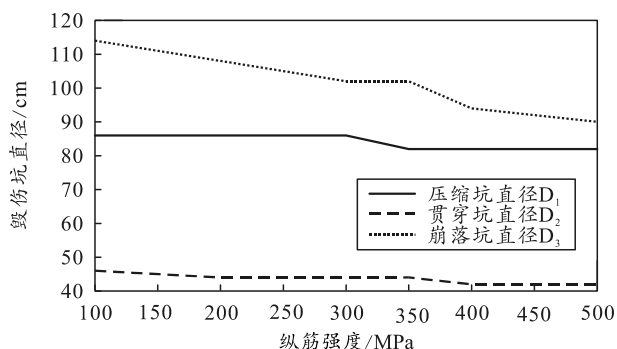


图 11 纵筋强度对钢筋混凝土墙毁伤区域尺寸的影响

观察数值仿真结果可知,随着纵筋强度的增加,混凝土压缩坑和贯穿坑毁伤坑尺寸存在小幅度不明显的变化,但混凝土墙崩落坑的尺寸随着纵筋强度增加减小的较为明显。由此可知,压缩坑和贯穿坑受纵筋的约束较小。而崩落坑受纵筋的影响程度较大,并且随着纵筋强度增加,崩落坑尺寸减小程度较大。迎爆面的纵筋无论强度多少,均在爆炸载荷的作用下出现了断裂,背爆面的钢筋随着强度的增加逐渐不出现断裂。

3 结论

通过对钢筋混凝土墙接触爆炸的试验研究可以

发现,当炸药质量较小的时候,仅仅在墙的引爆面形成压缩坑,背爆面无明显损伤;随着炸药质量的增加,墙体背爆面开始出现崩落坑,当崩落坑和压缩坑的深度之和大于墙体厚度时候,墙体被贯穿。

数值仿真作为研究钢筋混凝土结构在爆炸载荷作用下的毁伤作用工具,通过数值仿真研究可以发现,钢筋混凝土墙毁伤坑的大小与炸药质量的立方根成比例,随着炸药质量的增加,迎爆面的钢筋更容易断裂。

通过数值仿真研究可知,随着混凝土强度的增加,钢筋混凝土墙体毁伤区域尺寸都有不同程度的减小。而墙体配筋的直径和强度对毁伤区域中的压缩坑和贯穿坑影响较小,对崩落坑存在明显影响,墙体崩落坑尺寸随着墙体配筋直径和强度的增加而逐渐减小。

参考文献:

- [1] 王辉明,刘飞,晏麓晖. 接触爆炸荷载对钢筋混凝土梁的局部毁伤效应[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12): 37-45.
- [2] YANG C, JIA X, HUANG Z, et al. Damage of full-scale reinforced concrete beams under contact explosion[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 163: 104180.
- [3] TANG H, ZHAI H, SU J, et al. Punching Shear Failure Regulation of Reinforced Concrete Beams Subjected to Close-in Explosion[C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2148(1): 012018.
- [4] DUA A, BRAIMAH A, KUMAR M. Experimental and numerical investigation of rectangular reinforced concrete columns under contact explosion effects[J]. Engineering Structures, 2020, 205: 109891.
- [5] MEJÍA N, PERALTA R, TAPIA R, et al. Damage assessment of RC columns under the combined effects of contact explosion and axial loads by experimental and numerical investigations[J]. Engineering Structures, 2022, 254: 113776.
- [6] YUAN S, HAO H, ZONG Z, et al. A study of RC bridge columns under contact explosion[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 109: 378-390.
- [7] YUE S, QIU Y, ZHANG N, et al. Analytical study of local damage on concrete slab subjected to a contact explosion[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(2): 908-929.
- [8] NING J, YANG S, MA T, et al. Fragment behavior of concrete slab subjected to blast loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106370.
- [9] KUMAR V, KARTIK K V, IQBAL M A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading[J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110125.