文章编号:1006-9941(2025)07-0738-13

建筑结构内部爆炸毁伤快速计算方法评价

张云峰,高浩鹏,吴易烜,随亚光,刘文祥,张德志
(西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点试验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 近年来,基于工程经验的快速计算方法逐渐成为建筑结构内部爆炸毁伤评估的重要工具之一。为综合评估5种典型快速计算方法(FIST方法、等效当量-爆炸距离图表法、等效动载法、能量法以及等效当量法),开展了2种工况下3层足尺砖混建筑内爆试验。采用上述5种快速计算方法对不同爆炸工况下的建筑内爆毁伤进行评估,提出了五维计算能力评价指标及打分规则,基于此对比分析了各快速计算方法,讨论了其毁伤评估能力差异的原因,并给出了具体改进建议。结果表明:等效当量-爆炸距离图表法对建筑结构内部爆炸毁伤评估适用性较差;FIST方法、等效当量法对砖墙构件计算精度较高;能量法对楼板构件计算精度较高,但计算效率偏低;等效动载法计算效率较高,但计算精度偏低。充分考虑冲击波在复杂建筑结构内的传播规律,通过提高数值模拟规模修正当量传播系数是FIST类方法和等效当量类方法提高计算能力的主要途径。

关键词: 毁伤评估;建筑结构;内部爆炸;快速计算方法评价
中图分类号: O382;O383 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11943/CJEM2024297

0 引 言

近年来,由于仪器设备操作失误、维护保养不当、危废化学品违规贮存等造成的建筑结构内部爆炸(约束爆炸)事故时有发生,对人民群众生命财产安全造成了严重威胁[1-3],也对建筑结构安全提出了严峻挑战。建筑结构内部爆炸毁伤评估研究对建筑结构抗爆性能分析、爆炸灾害评估、城市应急管理等领域至关重要,已成为当下研究热点之一。内部爆炸作用下建筑结构毁伤评估方法主要有基于计算流体力学的大规模精细化数值模拟方法[4-5]、以工程经验为基础的快速计算方法[6-10]和人工智能方法[11-12]等。快速计算方法由于计算速度快、可靠性足以满足工程需求、方法相对成熟而得到了广泛应用。

Jarrett方程通常被视为最早的建筑爆炸毁伤快速计算方法。该方法通过总结二战时期英国典型住宅和工厂建筑物破坏的数据,形成不同毁伤等级的等效当量-爆炸距离图表[13]。另外,该方程也可转化为相应的*P-I*曲线。Baker[13]提出了三脉冲模型用于计算爆室内壁反射超压载荷,并利用归一化*P-I*曲线判断建筑结构毁伤;美国UFC 3-340-02标准利用三角波假设计算建筑内爆载荷,并采用等效单自由度(SDOF, Single Degree of Freedom)方法计算结构响应[14];基于上述理论基础,美国工程兵团、西南研究所开发了ConWep[15]、FACEDAP(Facility and Component Explosive Damage Assessment Program)[16]等程序工具用于建筑毁伤评估,但上述方法和工具仅适用于单一房间内部爆炸、建筑结构外部爆炸等简单工况的毁伤快速评估。针对复杂建筑结构内部爆炸毁伤评估,国内外先后公开发表了FIST方法[6]、等效当量-爆炸距离图表法[7]、等效动载法[8]、能量法[9]以及等效当量法[10]等快速计算方法。上述方法在载荷计算、结构响应计算、毁伤等级判断等方面均存在自身特点,但在计算误差、计算效率、计算科学性等方面尚无可靠的对比分析,不利于工程人员在实践中选择合适的计算方法,也不利于对相关计算方法进行改进和提高。

为此,本研究以足尺砖混建筑内部爆炸试验数据

收稿日期: 2024-12-09; **修回日期:** 2025-03-20
网络出版日期: 2025-06-10
作者简介: 张云峰(1990-),男,助理研究员,主要从事爆炸力学、冲击动力学、毁伤评估研究。e-mail:zhangyunfeng@nint.ac.cn
通信联系人: 随亚光(1986-),男,副研究员,主要从事爆炸力学、冲击动力学、毁伤评估研究。e-mail:suiyaguang@nint.ac.cn

引用本文: 张云峰,高浩鹏,吴易烜,等. 建筑结构内部爆炸毁伤快速计算方法评价[J]. 含能材料,2025,33(7):738-750.
ZHANG Yun-feng, GAO Hao-peng, WU Yi-xuan, et al. Comparative Study on the Fast-running Method for Damage Assessment of Building Structure Subjected to Confined Explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2025, 33(7):738-750.

为基础，对FIST方法、等效当量-爆炸距离图表法、等效动载法、能量法、等效当量法等5种方法的计算结果进行对比分析，提出五维计算能力评价指标及相应打分标准，从砖墙毁伤数量误差、砖墙毁伤位置误差、楼板毁伤数量误差、楼板毁伤位置误差、计算效率等方面，量化分析了5种计算方法的优缺点，为计算方法选择和改进提供了参考依据。

1 爆炸试验

1.1 试验设置

利用足尺砖混建筑内爆试验数据，评价5种建筑结构内部爆炸毁伤快速计算方法。为充分对比各快速计算方法的特点，避免单一工况偶然因素对评价结果的影响，本研究开展了两种不同工况下建筑内部爆炸毁伤试验。为了便于对比分析各快速计算方法应用于不同工况下的共性与差异，两种工况的装药量、爆心位置、建筑内部结构均有所区别。

1.1.1 工况1

试验工况1布置如图1所示。试验对象为三层砖混建筑，层高3.5 m，每层12个房间，房间尺寸6 m×6 m，房间分布于建筑两侧，通过走廊相连，走廊宽度4 m，各房间开窗尺寸1 m×1 m，门洞尺寸2.1 m×0.9 m，未设置实体门、窗等遮挡物。外墙为厚度为370 mm的红砖墙，内墙为厚度为240 mm的红砖墙，砂浆牌号M10，楼板为厚度为180 mm的钢筋混凝土板，钢筋牌号HRB400，混凝土牌号C40，截面配筋率0.3%。建筑东侧外墙为厚度为400 mm的钢筋混凝土剪力墙，一层地面为水泥加固地面，可视为刚体。爆心位于二楼走廊中轴线上，距东侧外墙15 m，距二楼底板高度1.8 m。爆心处放置450 kg TNT药球，装药密度1.6 g·cm^{-3}。

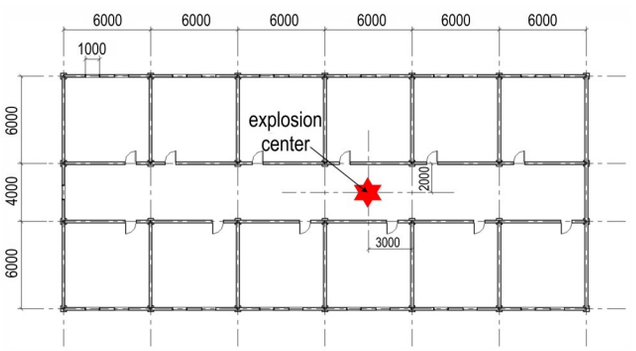


图1 砖混建筑内爆试验(工况1)布置示意图

Fig.1 Layout diagram of confined explosion test (scenario 1) in masonry-concrete building

爆炸试验后，利用数码相机记录建筑物内部的毁伤图像，依据表1所示的毁伤评估标准，逐一判断建筑各构件毁伤等级。毁伤评估标准中的现象学判据主要用于试验中的毁伤结果评估，定量判据用于快速计算结果的毁伤等级评定。

1.1.2 工况2

试验工况2布置如图2所示。试验对象为三层砖混建筑，层高3.5 m，楼层内部为开放空间，各楼层仅设置一个厚度为240 mm的红砖墙分隔而成的6 m×6 m房间，建筑右侧无钢筋混凝土剪力墙，其余结构尺寸、材料参数与工况1保持一致。爆心位于二楼走廊中轴线上，距右侧外墙9 m，距二楼底板高度1.8 m。爆心处放置164 kg TNT药球，装药密度为1.6 g·cm^{-3}。爆炸试验后，首先利用数码相机记录建筑物内部的毁伤图像，然后依据表1所示的毁伤评估标准，逐一确定建筑各构件毁伤等级。

表1 毁伤评估标准[14, 16-17]

Table 1 Damage assessment criteria[14, 16-17]

masonry walls		RC slabs	
moderate damage	severe damage	moderate damage	severe damage
There is obvious displacement in the middle of the wall, separating from the structural column	Whole or most of the wall collapses	Transverse cracking, with through cracks appearing, partial concrete spalling at the bottom of the slab, and the reinforcement is exposed.	Completely broken
The wall is cracked, with through cracks appearing	The bearing rotation angle exceeds 8 degrees	The area of the opening exceeds 10%	The concrete is severely spalled, the reinforcement is exposed, yielding and breaking, resulting in a large number of through cracks, or the whole structure is tilting
The bearing rotation angle exceeds 4 degrees		The deformation exceeds 8% of the span	The deformation exceeds 12% of the span

Note: 1) Meet any one of the above conditions.

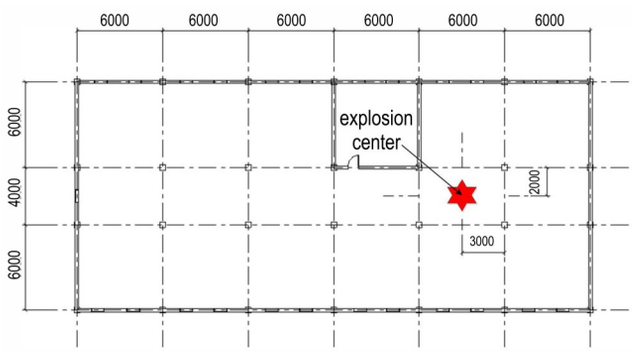


图 2 砖混建筑内爆试验(工况 2)布置示意图

Fig.2 Layout diagram of confined explosion test (scenario 2) in masonry-concrete building

1.2 试验结果

1.2.1 工况 1

图 3 为工况 1 试验结果,由于仅少量梁、柱等支撑构件发生毁伤,且部分毁伤快速计算方法尚不具备梁、柱构件毁伤评估能力,故此处仅对墙、板构件进行毁伤评估。图 3 中红色区域为构件发生重度毁伤区域,黄色区域为构件发生中度毁伤区域。可以发现,主要毁伤区域位于建筑二层,该层砌体外墙近乎全部摧垮,走廊底板、顶板、内墙均发生重度毁伤;爆心相连的两个房间的内墙和外墙均发生重度毁伤,一侧底板为重度毁伤,其余顶板、底板为中度毁伤;其余房间外墙为重度毁伤,而侧向隔墙则未发生毁伤。表 2 为三层砖混建筑毁伤统计结果,可以发现,约 28% 的砖墙和 30% 的楼板构件受到中度以上毁伤。

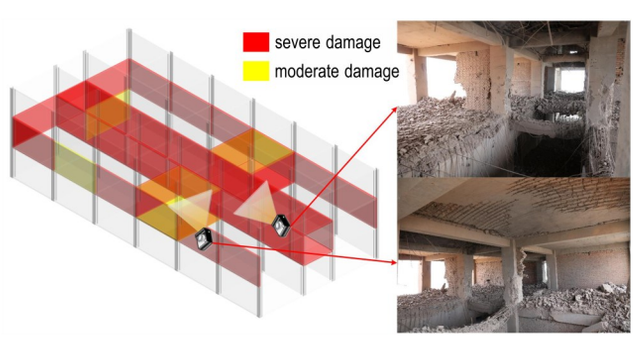


图 3 建筑各构件毁伤等级和局部毁伤图像(工况 1)

Fig.3 Damage levels of building components and local damage images (scenario 1)

表 2 三层砖混建筑毁伤等级统计结果(工况 1)

Table 2 Damage level statistics of the three-story masonry-concrete building (scenario 1)

masonry walls			RC slabs		
no damage	moderate damage	severe damage	no damage	moderate damage	severe damage
80	2	29	38	3	13

1.2.2 工况 2

图 4 为工况 2 试验结果,可以发现,主要毁伤区域位于建筑二层东侧。爆心处、爆心北侧房间楼板发生重度毁伤,东侧、南侧各有三面外墙为重度毁伤,北侧两面外墙为重度毁伤、一面外墙为中度毁伤,南侧一面外墙为中度毁伤,二层房间东侧、南侧隔墙均为重度毁伤。表 3 为三层砖混建筑毁伤统计结果。由表 3 可知,约 19% 的砖墙和 7% 的楼板构件发生中度以上毁伤。

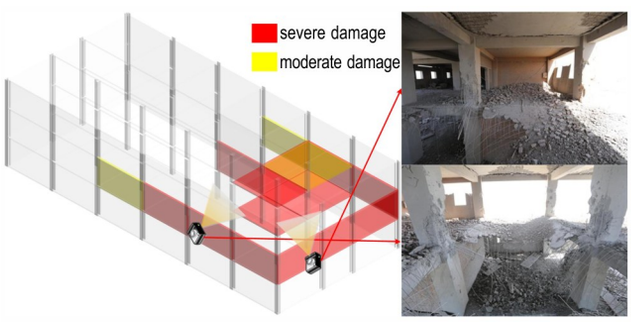


图 4 建筑各构件毁伤等级和局部毁伤图像(工况 2)

Fig.4 Damage levels of building components and local damage images (scenario 2)

表 3 三层砖混建筑毁伤等级统计结果(工况 2)

Table 3 Damage level statistics of the three-story masonry-concrete building (scenario 2)

masonry walls			RC slabs		
no damage	moderate damage	severe damage	no damage	moderate damage	severe damage
51	2	10	50	1	3

2 快速计算方法

2.1 快速计算流程

本部分主要概述 FIST 方法[6]、等效当量-爆炸距离图表法[7]、等效动载法[8]、能量法[9]、等效当量法[10]五种快速计算方法的计算流程、基本原理以及其关键假设。

2.1.1 FIST 方法

FIST(JWS Fast Integrated Structural Tool)方法为 Morris 主持开发的建筑结构类目标毁伤评估方法[6],其计算流程如图 5 所示。

第一步,计算冲击波从爆心到目标构件的传播距离。对于爆心-目标间的非承重墙,忽略其对冲击波的阻挡作用,即冲击波传播距离为爆心到目标构件的直线距离;对于承重墙,则需考虑其阻挡作用,通过在建

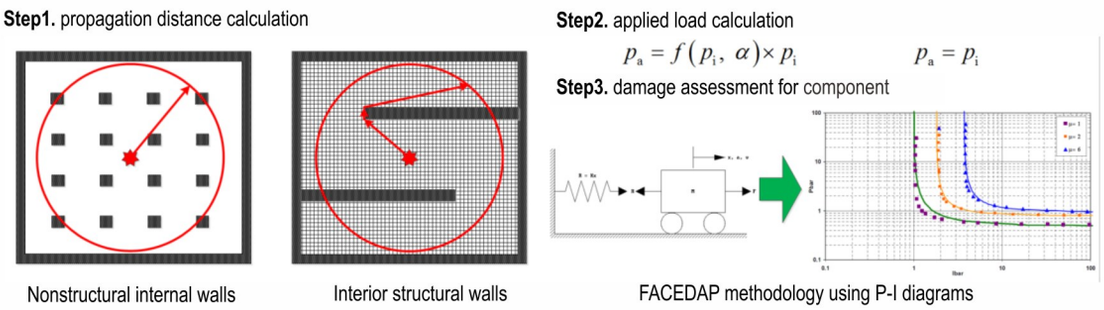


图 5 FIST方法计算流程示意图[6]

Fig.5 Flow chart of FIST method[6]

筑内部划分网格搜索爆心到目标构件的最小路径，累加计算得到传播距离[6, 17-18]。该方法在计算传播距离的过程中还可考虑因承重墙毁伤造成的新泄爆口对冲击波传播路径的影响。

第二步，计算施加在目标上的载荷 p_a。对于未受到承重墙阻隔的冲击波，采用式(1)计算其施加在构件上的超压峰值：

$$p_a = f\left(p_i, \alpha\right) \times p_i \tag{1}$$

式中，p_a为施加在构件上的超压峰值，MPa，p_i为依据冲击波传播距离和等效TNT当量，通过Kingery-Bulmash曲线[18-19]算得的入射超压峰值，MPa，$f(p_i,\alpha)$为采用Conwep计算的斜反射系数。对于受到承重墙阻隔的冲击波(即绕射冲击波)，采用式(2)计算其超压峰值：

$$p_a = p_i \tag{2}$$

此外，施加在构件上的冲量计算过程参照超压。

第三步，利用*P-I*曲线确定目标构件的毁伤等级。FIST方法所用的*P-I*曲线通过FACEDAP程序[16]确定。该程序利用等效单自由度(SDOF, Single Degree of Freedom)方法构建了包括钢筋混凝土梁、钢筋混凝土柱、砌体墙等常用建筑构件对应不同毁伤等级的*P-I*曲线，并通过足尺毁伤数据进行验证校准。

2.1.2 等效当量-爆炸距离图表法

等效当量-爆炸距离图表法可视作Jarrett方程在建筑结构内部爆炸场景下的改进和应用[7]，该方法计算流程如图6所示。

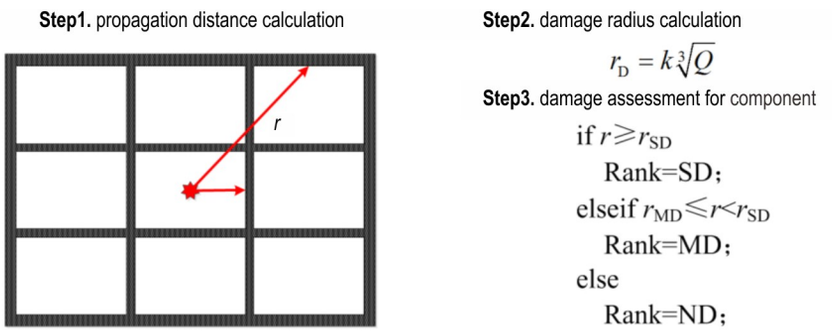


图 6 等效当量-爆炸距离图表法计算流程示意图[7]

Fig.6 Flow chart of the charge weight-standoff graphs method[7]

第一步，计算冲击波从爆心到目标构件的传播距离。该方法不考虑建筑结构内部墙、板对冲击波的约束和阻挡作用，假设爆心到目标构件的直线距离即为冲击波传播距离。

第二步，采用式(3)计算建筑构件毁伤半径：

$$r_D = k\sqrt[3]{Q} \tag{3}$$

式中，r_D为毁伤半径，k为与建筑物结构、毁伤等级相关的系数，由试验和数值模拟确定，其取值如表4所示。需要指出的是，该方法仅给出了中度毁伤和重度毁伤两个毁伤等级的毁伤系数，且针对建筑结构内的梁、板、柱、墙等构件均采用相同系数。

第三步，判定目标建筑构件毁伤等级。当冲击波传播距离r大于等于重度毁伤半径$r_{SD时}$，则判定目标构件为重度毁伤；当r小于r_{SD}，且大于等于中度毁伤半径r_{MD}，则判定目标构件为中度毁伤；否则判定目标构件为无毁伤。

2.1.3 等效动载法

等效动载法虽然忽略建筑结构内部墙、板对冲击

表 4 毁伤系数与环境参数对照表[7]

Table 4 Comparison of damage coefficient and environmental parameters[7]

room size			*k*	
length / m	width / m	height / m	moderate damage	severe damage
6	4	3.5	1.42	1.59
6	5	3.5	1.53	1.71
6	6	3.5	1.63	1.82
6	7	3.5	1.71	1.91
6	8	3.5	1.79	2.0
6	9	3.5	1.86	2.08
6	10	3.5	1.93	2.16

波的阻挡作用,但考虑了冲击波在约束空间内多次反射形成的准静态压力对建筑目标的毁伤效果[8],该方法计算流程如图 7 所示。

第一步,计算冲击波从爆心到目标构件的传播距离。该方法假设爆心到目标构件的直线距离即为冲击波传播距离。

第二步,计算目标构件等效动载。依据第一步所得冲击波传播距离,通过 Kingery-Bulmash 曲线计算目标建筑构件处自由场爆炸反射超压峰值 p_r 和反射冲量 i_r。该方法假将建筑结构内部载荷简化为三角波,计及准静态压力的作用,目标建筑构件处载荷的超压峰值保持不变,而冲量为 Kingery-Bulmash 曲线计算结果的两倍,因而正压持续时间也为自由场爆炸正压持续时间的两倍。

第三步,利用 *P-I* 曲线确定目标建筑构件的毁伤等级。该方法所用的 *P-I* 曲线通过等效单自由度(SDOF, Single Degree of Freedom)方法迭代建立。文献[8]给出了多个损伤度下弹塑性响应构件的 *P-I* 曲线。

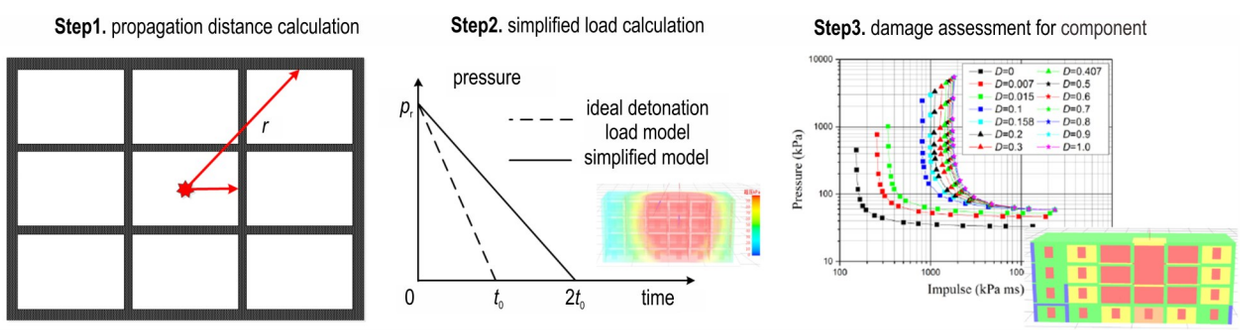


图 7 等效动载法计算流程示意图[8]

Fig.7 Flow chart of the equivalent dynamic load method[8]

2.1.4 能量法

能量法的特点在于从能量守恒的角度出发,考虑了墙体破坏对冲击波比冲量的影响[9],该方法计算流程如图 8 所示。

第一步,计算冲击波从爆心到目标构件的传播距离,假设爆心到目标构件的直线距离即为冲击波传播距离。

第二步,计算不考虑遮蔽构件破坏耗能的目标构件载荷。通过 Kingery-Bulmash 曲线算得目标建筑构件处自由场爆炸反射超压峰值 p_r 和反射冲量 i_r。

第三步,计算考虑遮蔽构件破坏耗能的目标构件载荷。针对图 4 所示工况,目标构件被一隔墙遮蔽,该方法假设作用于目标构件上的超压峰值不变,而冲量则由式(4)计算:

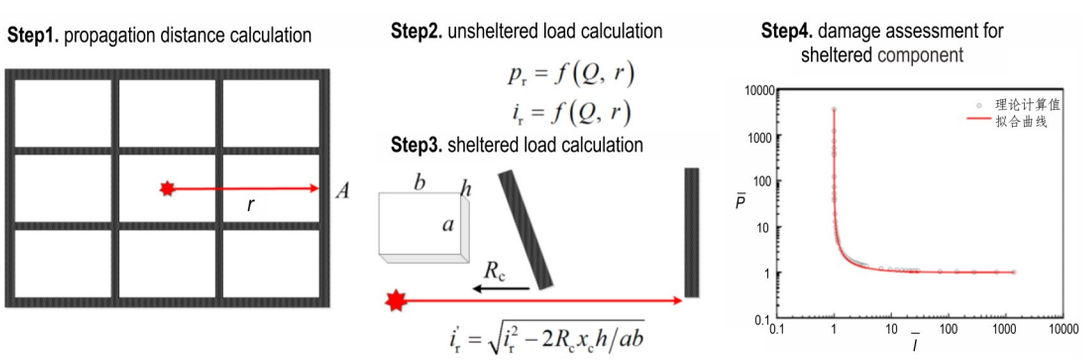


图 8 能量法计算流程示意图[9]

Fig.8 Flow chart of the energy method[9]

$$i_r' = \sqrt{i_r^2 - 2R_c x_c h/ab} \quad (4)$$

式中，i_r'为考虑遮蔽墙体破坏耗能时目标构件处冲量，R_c为遮蔽构件的等效抵抗应力，x_c为重度毁伤所对应的构件中点位移，采用SDOF法计算，a、b、h分别为遮蔽构件的长、宽、厚。

第四步，利用*P-I*曲线确定目标建筑构件的毁伤等级。该方法采用的*P-I*曲线与等效动载法*P-I*曲线构造过程一致。

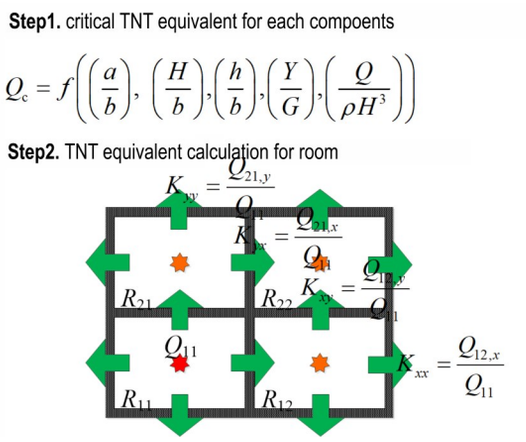


图9 等效当量法方法计算流程示意图[10]

Fig.9 Flow chart of the equivalent method[10]

第一步，计算建筑构件临界破坏药量。临界破坏药量与房间的进深、开间、高度、墙体厚度、墙体材料特性有关，剪力墙结构和砌体墙结构的临界破坏药量计算公式及参数见文献[10]。

第二步，各房间等效TNT当量计算。该方法假设各房间x、y、z三个方向上具有不同的等效TNT当量，根据传播系数K，利用式(5)~(7)算得各房间等效TNT当量：

$$Q_{i,j,k,X} = Q_{i-1,j,k,X}\cdot K_{xx} + Q_{i,j-1,k,Y}\cdot K_{yx} + Q_{i,j,k-1,Z}\cdot K_{zx} \quad (5)$$

$$Q_{i,j,k,Y} = Q_{i-1,j,k,X}\cdot K_{xy} + Q_{i,j-1,k,Y}\cdot K_{yy} + Q_{i,j,k-1,Z}\cdot K_{zy} \quad (6)$$

$$Q_{i,j,k,Z} = Q_{i-1,j,k,X}\cdot K_{xz} + Q_{i,j-1,k,Y}\cdot K_{yz} + Q_{i,j,k-1,Z}\cdot K_{zz} \quad (7)$$

式中，$Q_{i,j,k,X}$为第(i, j, k)号房间x方向上的等效当量，i、j、k分别为笛卡尔坐标系x、y、z方向上的房间编号。K_{yx}为y方向上等效当量对隔壁房间x方向等效当量的传播系数。

第三步，判定目标建筑构件毁伤等级。当目标房间的等效TNT当量大于等于目标构件的重度毁伤临界药量，则判定目标构件为重度毁伤；当目标房间的等效TNT当量大于等于中度毁伤临界药量，且小于重度毁伤临界药量，则判定目标构件为中度毁伤；否则判定目标构件无毁伤。

2.1.5 等效当量法

等效当量法的基本原理为将爆炸能量从相邻房间传入后的毁伤作用等效为发生在本房间内等效当量的爆炸作用。通过大量数值模拟确定爆炸传播过程中的当量传播系数，得到爆炸能量在整个建筑物内的连续传播规律，进而建立建筑物内爆炸毁伤的评估方法[10]，该方法计算流程如图9所示。

$$Q_{i,j,k,X} = Q_{i-1,j,k,X}\cdot K_{xx} + Q_{i,j-1,k,Y}\cdot K_{yx} + Q_{i,j,k-1,Z}\cdot K_{zx}$$
$$Q_{i,j,k,Y} = Q_{i-1,j,k,X}\cdot K_{xy} + Q_{i,j-1,k,Y}\cdot K_{yy} + Q_{i,j,k-1,Z}\cdot K_{zy}$$
$$Q_{i,j,k,Z} = Q_{i-1,j,k,X}\cdot K_{xz} + Q_{i,j-1,k,Y}\cdot K_{yz} + Q_{i,j,k-1,Z}\cdot K_{zz}$$

Step3. damage for each components

if $Q_{i,j,k} \geqslant Q_{cS}$
  Rank=SD;
elseif $Q_{cM} \leqslant Q_{i,j,k} < Q_{cS}$
  Rank=MD;
else
  Rank=ND;

2.2 快速计算结果

2.2.1 工况1

采用5种建筑结构内部爆炸毁伤快速计算方法，对试验工况下三层砖混毁伤效果进行计算。因试验结果中无轻度毁伤等级构件，且部分方法未给出轻度毁伤计算过程，故计算结果仅区分重度毁伤、中度毁伤以及无毁伤三个毁伤等级(建筑构件毁伤判据见表1)。图10为工况1快速计算结果示意图，表5为毁伤计算结果统计表。

图10a为FIST方法计算结果，可以发现，计算结果主要毁伤区域位于二层，与试验结果一致；爆心附近9个房间墙、板构件全部重度毁伤，隔壁房间内墙为重度毁伤，外墙和楼板均为中度毁伤。

图10b和c分别为等效当量-爆炸距离图表法、等效动载法计算结果。与试验结果主要毁伤区域在二层不同，两种方法主要毁伤范围为一层、二层、三层靠近爆心处，且建筑整体毁伤程度明显大于试验结果。钢筋混凝土楼板对冲击波传播有较强的阻挡约束作用，导致冲击波主要能量向侧向传播，因此试验结果主要毁伤区域为爆心所在的二层；上述两种快速计算方法均未考虑构件对冲击波传播的阻挡约束作用，故计算

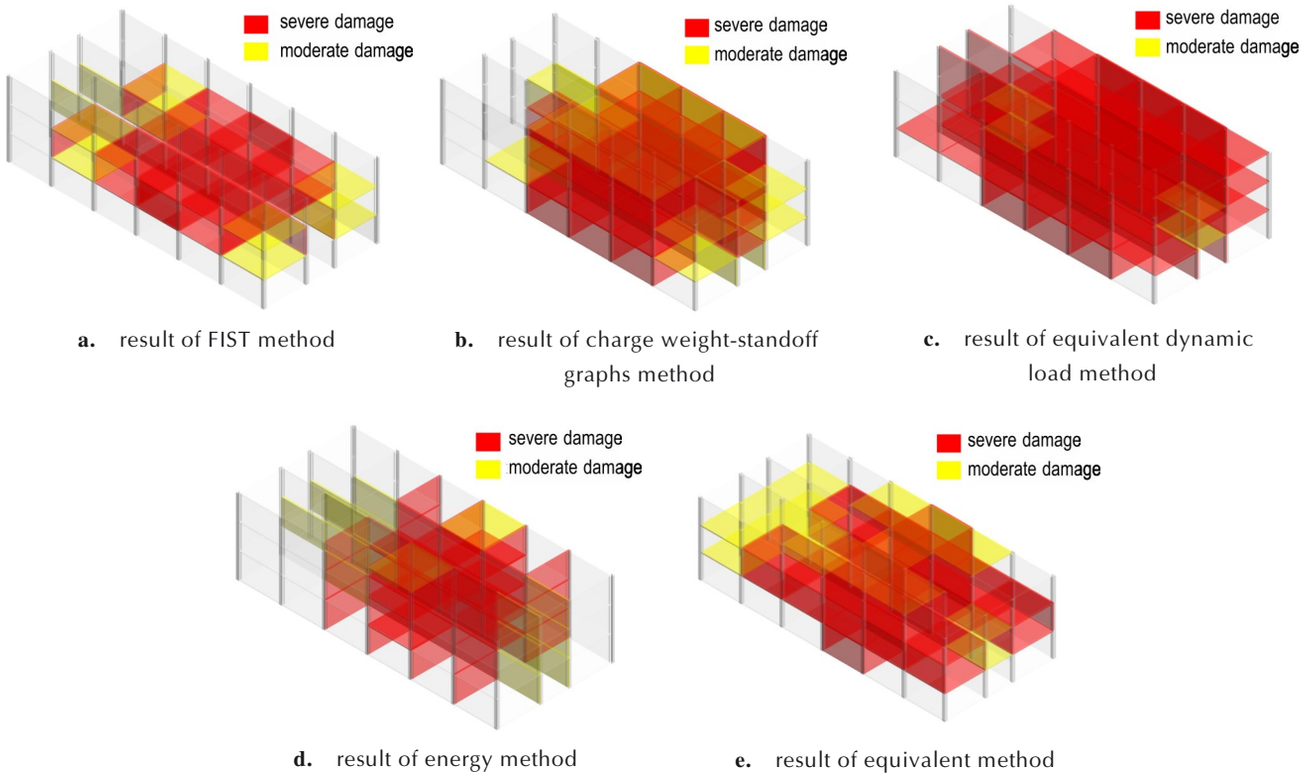


图 10 砖混建筑内爆试验与快速计算毁伤效果示意图(工况 1)

Fig. 10 Schematic diagram of confined explosion test and fast-running method results of damage effect of masonry-concrete building (scenario 1)

表 5 砖混建筑内爆毁伤快速计算结果统计表(工况 1)

Table 5 Statistical table of fast-running calculation results of damage of masonry-concrete building (scenario 1)

method	masonry walls		RC slabs	
	moderate damage	severe damage	moderate damage	severe damage
FIST	2	22	8	18
charge weight-standoff graphs method	8	64	10	31
equivalent dynamic load method	0	84	4	39
energy method	10	44	2	11
equivalent method	0	46	17	26

结果与试验结果存在偏差。等效动载法考虑准静态压力,假设建筑内爆载荷冲量为自由场冲量两倍,该假设可能过度高估了非爆室准静态压力的破坏作用,故该方法计算结果的毁伤程度大于等效当量-爆炸距离图表法。

图 10d 为能量法计算结果,其建筑物毁伤范围与等效当量-爆炸距离图表法计算结果大体相似,一层、三层房间外墙均未毁伤,毁伤程度较等效当量-爆炸距离图表法略轻。能量法考虑了墙体和楼板等构件破坏对冲击波能量的消耗作用,因此一层和三层毁伤计算结果较等效当量-爆炸距离图表法和等效动载法计算结果轻。但是,墙体和楼板除了对冲击波能量具有消耗作用外,还具有明显的约束阻挡作用,Needham[19]总结了大量试验及数值模拟结果,指出“响应”结构与刚体结构对冲击波传播的影响基本相同,能量法仅考虑建筑构件的能量消耗作用,并未考虑其约束阻挡作用,是导致其一层和三层毁伤计算结果与试验结果差距较大的主要原因。

图 10e 为等效当量法计算结果。由图 10e 可知,其毁伤程度较等效当量-爆炸距离图表法和等效动载法计算结果轻,但毁伤房间分布规律相似,毁伤范围为一层和三层靠近爆心的房间以及二层绝大部分构件。等效当量法主要考虑因素为各房间之间的能量传递,其传播系数 K 为大量数值模拟结果的拟合,但在数值

模拟过程中仅考虑相邻两个房间之间的能量传递效果，所选计算单元过小，当将该系数推广至多房间工况下计算建筑毁伤，无法计及冲击波复杂传播过程对建筑毁伤的影响，导致等效当量法计算结果与试验结果差异较大。

2.2.2 工况 2

图 11 为工况 2 试验毁伤结果及快速计算结果示意图，表 6 为毁伤计算结果统计表。

图 11a 为 FIST 方法计算结果，主要毁伤区域位于二层，与试验结果相符；爆心及南侧、北侧房间楼板重度毁伤，相邻房间楼板中度毁伤，二层房间东侧外墙重度毁伤，南侧外墙重度毁伤。

图 11b 和 c 分别为等效当量-爆炸距离图表法和等效动载法计算结果。由于两种方法均未考虑墙、板等构件对冲击波传播的阻挡约束作用，导致其毁伤范围为一层、二层和三层靠近爆心处，且建筑毁伤程度明显大于试验结果。

图 11d 为能量法计算结果，建筑毁伤程度明显小于试验结果，仅爆心处楼板重度毁伤，二层房间三面隔墙重度毁伤，一层和三层房间南侧隔墙中度毁伤。试验中，建筑二层的顶板和底板对爆炸冲击波具有约束阻挡作用，导致其侧向威力增强，能量法计算爆炸冲击波载荷时未考虑该物理现象，导致其建筑毁伤程度计算结果小于试验结果。

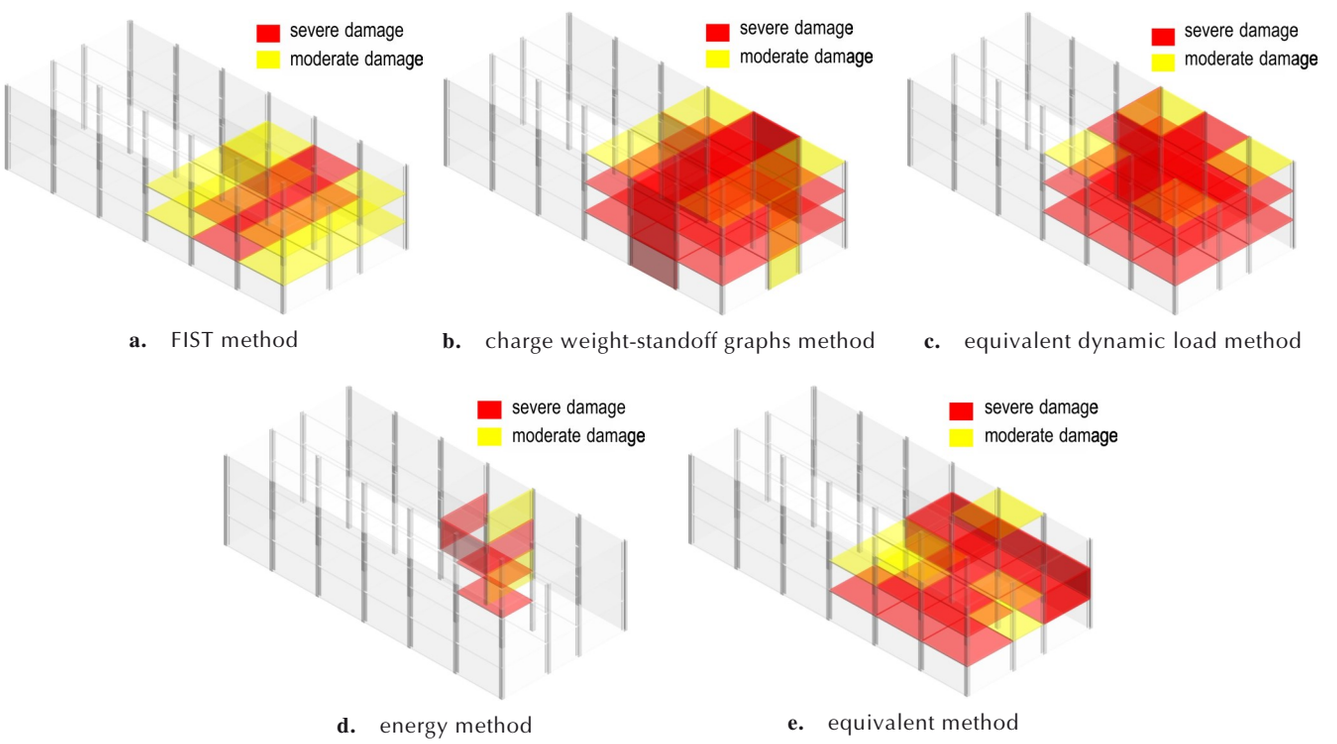


图 11 砖混建筑内爆试验与快速计算毁伤效果示意图（工况 2）

Fig. 11 Schematic diagram of confined explosion test and fast-running method results of damage effect of masonry-concrete building (scenario 2)

表 6 砖混建筑内爆毁伤快速计算结果统计表（工况 2）

Table 6 Statistical table of fast-running calculation results of damage of masonry-concrete building (scenario 2)

method	masonry walls		RC slabs	
	moderate damage	severe damage	moderate damage	severe damage
FIST	1	2	12	6
charge weight-standoff graphs method	3	12	4	23
equivalent dynamic load method	0	9	4	23
energy method	2	3	0	2
equivalent method	0	12	6	14

图11e为等效当量法计算结果,主要毁伤区域位于二层,爆心及爆心附近顶板和底板全部毁伤,二层北侧、东侧和南侧各三面墙重度毁伤,二层房间隔墙重度毁伤,三层爆心所在位置南北两侧顶板中度毁伤。该方法对于工况2墙构件的毁伤计算结果与试验结果最为接近,但板构件毁伤计算结果误差则较大。

3 分析与讨论

3.1 评价指标

为全面对比分析各建筑结构内部爆炸毁伤快速计算方法对试验工况的计算能力,提出五维计算能力评价指标,分别为砖墙毁伤数量误差、楼板毁伤数量误差、砖墙毁伤位置误差、楼板毁伤位置误差和计算效率。砖墙与楼板的结构和材料特性不同,导致其毁伤机制不同,将两者误差分开评价可更详尽对比各方法毁伤计算能力。过往相关研究仅重视毁伤数量误差,忽略毁伤位置误差。然而,毁伤数量误差无法完整反映计算结果与真实结果的差异,如图3、10所示,计算结果中砖墙中度以上毁伤数量与试验结果基本一致,但中度以上毁伤砖墙主要位于走廊两侧,而试验结果中度以上毁伤砖墙则主要为建筑外墙,两者毁伤位置差别明显。另外,毁伤快速计算方法还需保证一定的计算效率,以满足火力优化等使用场景对毁伤概率的计算需求。

砖墙毁伤数量误差指计算结果中建筑砖墙构件重度毁伤和中度毁伤数量之和与试验结果的相对误差,其表达式为:

$$E_{\mathrm{bn}}=\frac{\left|\left(N_{\mathrm{bs}}+N_{\mathrm{bm}}\right)-\left(N'_{\mathrm{bs}}+N'_{\mathrm{bm}}\right)\right|}{\left(N'_{\mathrm{bs}}+N'_{\mathrm{bm}}\right)}\cdot 100\% \tag{8}$$

式中,E_{bn}为砖墙毁伤数量误差,N_{bs}为砖墙重度毁伤数量计算结果,N_{bm}为砖墙中度毁伤数量计算结果,N'_{bs}为砖墙重度毁伤数量试验结果,N'_{bm}为砖墙中度毁伤数量试验结果。采用类似方法定义楼板毁伤数量误差,其表达式为:

$$E_{\mathrm{sn}}=\frac{\left|\left(N_{\mathrm{ss}}+N_{\mathrm{sm}}\right)-\left(N'_{\mathrm{ss}}+N'_{\mathrm{sm}}\right)\right|}{\left(N'_{\mathrm{ss}}+N'_{\mathrm{sm}}\right)}\cdot 100\% \tag{9}$$

式中,E_{sn}为楼板毁伤数量误差,N_{ss}为楼板重度毁伤数量计算结果,N_{sm}为楼板中度毁伤数量计算结果,N'_{ss}为楼板重度毁伤数量试验结果,N'_{sm}为楼板中度毁伤数量试验结果。

砖墙毁伤位置误差指计算结果中砖墙构件毁伤等级与试验结果对应位置毁伤等级不同的构件数量与试验结果砖墙构件毁伤数量的比值,其表达式为:

$$E_{\mathrm{bp}}=\frac{\left|N_{\mathrm{bp}}-\left(N'_{\mathrm{bs}}+N'_{\mathrm{bm}}\right)\right|}{\left(N'_{\mathrm{bs}}+N'_{\mathrm{bm}}\right)}\cdot 100\% \tag{10}$$

式中,E_{bp}为砖墙毁伤位置误差,N_{bp}为计算结果中砖墙构件毁伤等级与试验结果对应位置毁伤等级不同的构件数量。类似地,定义楼板毁伤位置误差,其表达式为:

$$E_{\mathrm{sp}}=\frac{\left|N_{\mathrm{sp}}-\left(N'_{\mathrm{ss}}+N'_{\mathrm{sm}}\right)\right|}{\left(N'_{\mathrm{ss}}+N'_{\mathrm{sm}}\right)}\cdot 100\% \tag{11}$$

式中,E_{sp}为楼板毁伤位置误差,N_{sp}为计算结果中楼板构件毁伤等级与试验结果对应位置毁伤等级不同的构件数量。计算效率指标可用30 min内对该建筑毁伤计算次数表示:

$$E_{\mathrm{ff}}=\frac{30}{t_{\mathrm{o}}} \tag{12}$$

式中,E_{ff}为计算效率,t_{o}为单次计算耗时,min。

对各快速计算方法5个计算能力指标进行评分,每个指标最高分为20分,评分标准如表7所示。因毁伤快速计算方法局限性,毁伤数量、位置误差小于50%即可认为相关算法可用,综合考虑现有毁伤评估快速计算方法水平,赋予50%误差为良好水平,即16分,100%误差为合格水平,即12分;对于计算效率指标,赋予普通性能计算机(本次计算采用计算机处理器Intel Core i7-3770 CPU 3.4 GHz)半小时内可迭代计算1000次为优秀水平,即20分,半小时内迭代计算100次

表7 建筑结构内爆毁伤快速计算能力评分标准

Table 7 Scoring criteria for calculation ability of fast-running method for damage assessment of building structure subjected to confined explosion

ability indicator	value	score	value	score	value	score	value	score	value	score
E_{bn}	200%	4	150%	8	100%	12	50%	16	0%	20
E_{sn}	200%	4	150%	8	100%	12	50%	16	0%	20
E_{bp}	200%	4	150%	8	100%	12	50%	16	0%	20
E_{sp}	200%	4	150%	8	100%	12	50%	16	0%	20
E_{ff}	10	4	32	8	100	12	316	16	1000	20

为良好水平，即16分。需要注意的是，上述评分标准非绝对标准，而是依据计算模型规模、快速计算方法发展程度以及采用计算机算力等条件制定的相对评分标准。

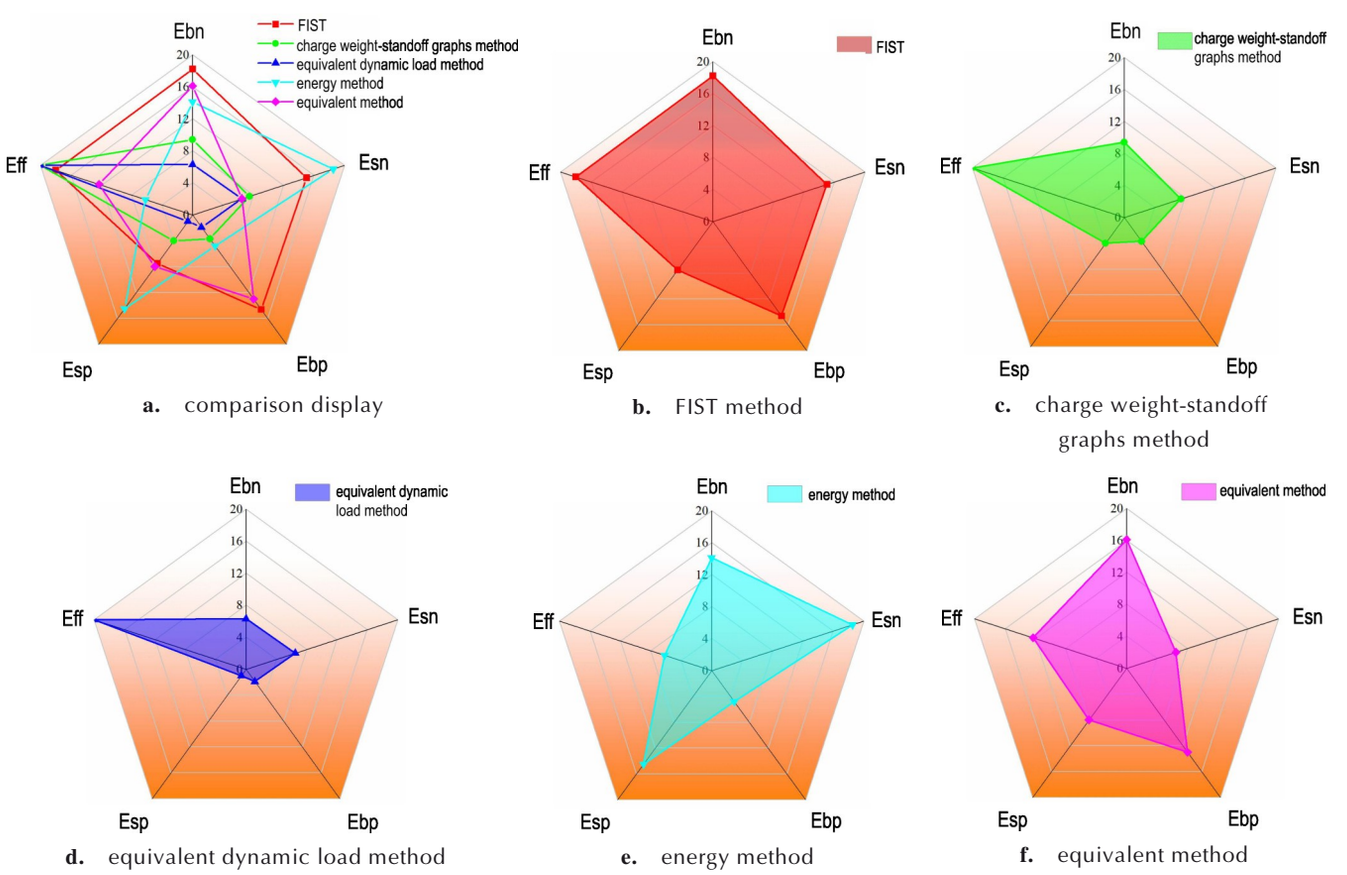
3.2 对比分析

3.2.1 工况1

针对各毁伤快速计算方法对工况1的计算结果，依据评分标准形成五维能力图如图12所示。可以发现，FIST方法的计算能力较为均衡，总体评分较高，但在楼板位置误差评分较低，表明FIST方法计算结果中板构件毁伤位置与试验结果误差较大，符合图3和图10a所示结果。等效当量-爆炸距离图表法和等效动载法的构件毁伤数量误差和构件毁伤位置误差评分均较低，表明上述方法计算误差较大；但两种方法计算效率能力评分均得到满分，表明两种方法在计算效率方面具有明显优势。由于等效动载法的载荷模型放大了除爆室以外房间的冲击波毁伤能力，导致该方法的计算误差评分最低。能量法楼板毁伤数量、位置误差评分较高，但其砖墙毁伤数量、位置误差评分较低，表明该方法对建筑楼板毁伤计算能力较强，但不考虑构件约束阻挡作用的假设对大当量内部爆炸条件下砖墙构件计算结果影响显著，该方法计算效率评分在所有方法中最低，主要原因为该方法需利用SDOF法迭代计算各构件的中点位移，该过程耗时较长，而其它方法均使用*P-I*曲线或等效当量-爆炸距离图表进行快速判定，计算效率更高。等效当量法砖墙毁伤数量和位置误差评分较高，但其楼板毁伤数量和位置误差评分较低，表明该方法给出的*z*方向上当量传播系数偏大，这可能与该方法建立过程中所选数值模拟计算单元规模过小有关。

3.2.2 工况2

针对各毁伤快速计算方法对工况2的计算结果，依据评分标准形成五维能力图如图13所示。可以发现，FIST方法对墙构件毁伤计算能力较高，但对楼板构件毁伤计算能力较低，计算效率适中。等效当量-爆炸距离图表法和等效动载法均表现出较高的计算效率，但其对楼板构件毁伤计算能力较低；其砖墙毁伤数量误差评分较高，但毁伤位置误差评分较低，表明计算结果的砖墙毁伤数量与试验结果相近，但毁伤位置不同，



a. comparison display　**b.** FIST method　**c.** charge weight-standoff graphs method

d. equivalent dynamic load method　**e.** energy method　**f.** equivalent method

图12 快速计算方法五维能力图及对比（工况1）

Fig.12 Five dimension capability graph of fast-running methods and comparison (scenario 1)

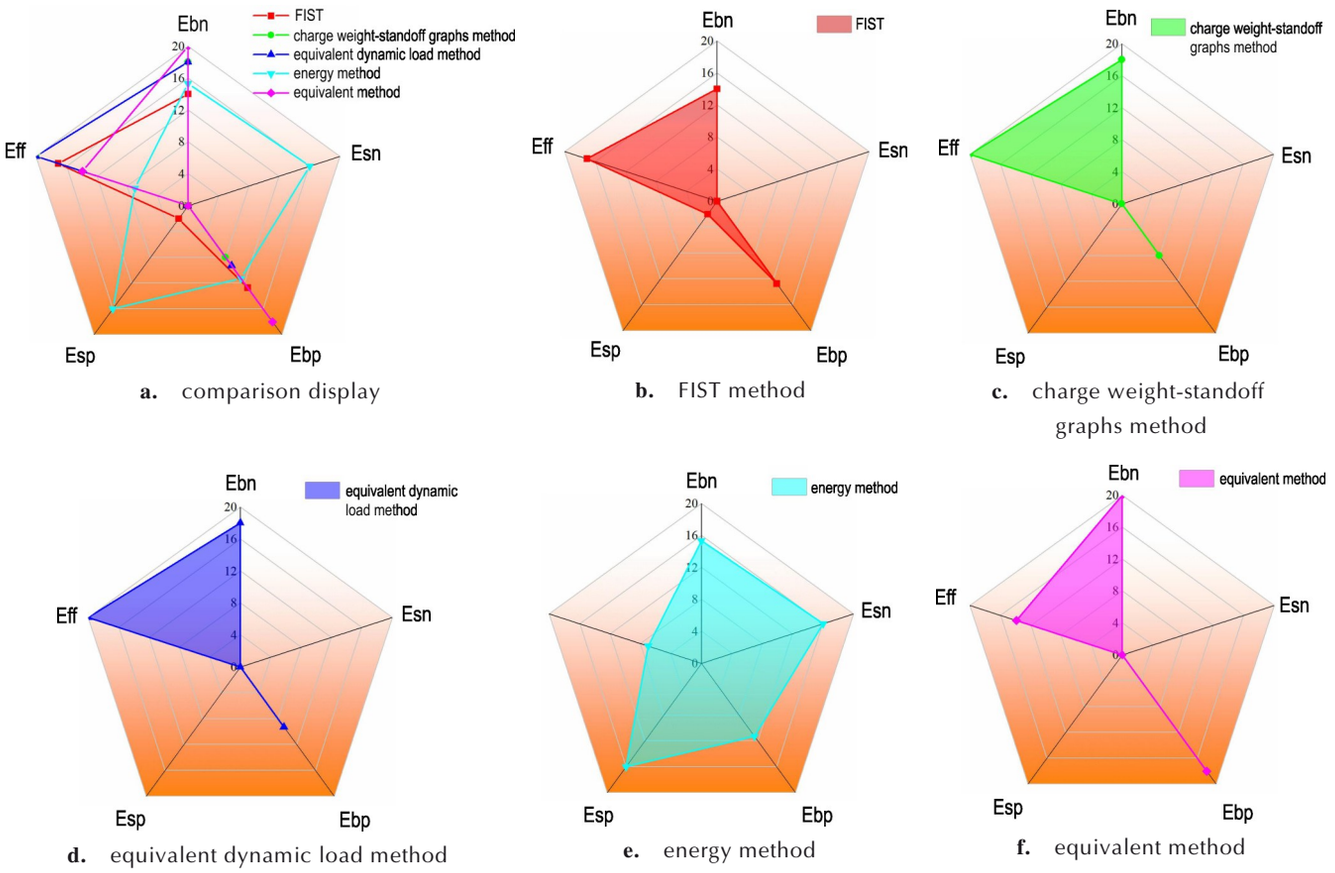


图 13 快速计算方法五维能力图及对比(工况 2)

Fig.13 Five dimension capability graph of fast-running methods and comparison (scenario 2)

符合图 4 和图 11b、c所示结果。能量法计算效率评分较低,楼板毁伤数量和位置误差评分较高,表明该方法对建筑楼板毁伤计算能力较强,砖墙毁伤位置误差评分较低,符合图 4 和图 11d 所示结果。等效当量法砖墙毁伤数量和位置误差评分较高,但其楼板毁伤数量和位置误差评分则较低。

3.3 评价与讨论

当前建筑结构内爆毁伤快速计算方法可以分为三类。第一类是以试验、灾害和战争等数据为基础的查表法,如等效当量-爆炸距离图表法等。由于该类方法所用的数据大多为爆炸事件发生后现场勘查所得的毁伤结果,缺乏爆炸冲击波传播过程数据,且涉及建筑结构多样,难以归类分析爆炸冲击波传播过程。计算过程中,该类方法把建筑视为一个整体应用等效当量-爆炸距离图表或 *P-I* 曲线判断建筑结构毁伤,不考虑爆炸冲击波在建筑内部传播过程中的反射和绕射等现象。因此,该类方法的特点为计算效率较高,但整体计算精度偏低,仅对于内部空间较为开阔建筑目标(如工况 2)的无遮挡构件计算精度较高。该类方法适用于大当量爆炸条件下,对城镇和工业园区等建筑群目标的毁伤评估及等效 TNT 当量反演等分析[3, 20-21],但对建筑结构内部爆炸毁伤计算适用性则较差。

第二类是以建筑抗爆设计标准为基础的理论计算方法,如 FIST 方法、等效动载法和能量法等,该类方法利用 UFC 3-340-02 等标准中较成熟的 SDOF 方法计算建筑构件的结构响应,但建筑抗爆设计标准大多仅给出建筑结构内部爆炸时爆室构件的载荷计算方法,未考虑其余房间构件载荷计算。由此,Morris、陈旭光以及周阳等依据对建筑结构内部爆炸冲击波传播规律的理解,设计了相应的建筑构件载荷计算方法[8-9]。FIST 方法计算冲击波传播距离的过程中考虑了承重构件对冲击波的约束和阻挡作用,认为爆炸冲击波需绕过承重构件向目标构件传播,该假设也符合 Needham[19]的研究成果。从工况 1 和工况 2 计算结果与试验结果对比可知,该方法将毁伤范围限制在爆心所在楼层,与试验现象吻合。但是,由图 10a 和图 11a 可以发现,该方法对楼板构件的毁伤计算结果误差较大,其原因为采用 Kingery-Bulmash 曲线计算所得爆炸载荷

大于实际载荷。

等效动载法忽略建筑结构内部墙体对冲击波的阻挡作用，直接将爆心到目标构件的直线距离视为冲击波传播距离，再利用自由场爆炸 Kingery-Bulmash 曲线计算构件载荷；考虑准静态压力的作用，冲量载荷简化为计算结果的 2 倍。显然，该方法过于简化了爆炸冲击波在复杂建筑结构内的传播过程，导致工况 1 和工况 2 计算结果相较试验结果误差很大，评分偏低；工况 2 内部为较开阔空间，与等效动载法假设符合度更高，但其对板构件计算结果仍远大于试验结果，表明考虑准静态压力的载荷为自由场爆炸冲量 2 倍的假设高估了爆炸冲击波的毁伤能力。能量法与等效动载法相似，未考虑准静态压力的影响，但考虑了构件响应对冲击波能量的消耗。从工况 1 和工况 2 计算结果与试验结果对比可知，该方法对板构件的计算能力评分较高，表明其利用自由场爆炸 Kingery-Bulmash 曲线计算构件载荷的假设较合理。综合上述分析，第二类方法中爆炸冲击波在建筑内部的载荷分布计算方法对毁伤评估结果影响显著，充分研究爆炸冲击波在建筑结构内部的传播规律，并提出更合理的爆炸载荷计算方法，是第二类方法未来的发展方向。

第三类是对建筑结构代表单元进行大规模爆炸加载数值模拟，获得爆炸当量、房间尺寸和材质等对建筑结构毁伤影响规律，以该规律为基础设计复杂建筑毁伤快速计算方法，代表方法为等效当量法。该方法对工况 1 和工况 2 墙构件计算能力评分较高，而板构件计算能力评分偏低，表明当前该方法的纵向传播系数计算公式有待修正。因此，针对更大规模的建筑结构代表单元进行批量数值模拟，使数值模拟计算结果包含复杂空间冲击波传播规律并修正其载荷传播系数，为第三类方法未来的发展方向。

4 结 论

基于足尺砖混建筑内爆试验数据，对比分析了 5 种建筑结构内部爆炸毁伤快速计算方法计算结果与试验结果的差异，提出了五维计算能力评价指标及相应打分规则，包括砖墙毁伤数量误差、砖墙毁伤位置误差、楼板毁伤数量误差、楼板毁伤位置误差和计算效率，并对计算方法进行了定量评价。对造成各方法计算能力差异的原因进行了分析，并给出了两类主要计算方法的改进建议，结论如下：

（1）提出的五维计算能力评价指标可直观展示各种建筑结构内部爆炸毁伤快速计算方法的特点。其中，FIST 方法和等效当量法对砖墙构件计算精度较高，两种方法对工况 1 和工况 2 计算结果的砖墙毁伤数量误差评分均大于 14 分，对工况 1 和工况 2 计算结果的砖墙毁伤位置误差评分均大于 13 分；能量法对楼板构件计算精度较高，对工况 1 和工况 2 计算结果的楼板毁伤数量误差评分均大于 16 分，对工况 1 和工况 2 计算结果的楼板毁伤位置误差评分均大于 14 分，但计算效率较低；等效当量-爆炸距离图表法和等效动载法的计算效率最高，但计算结果的精度偏低。

（2）等效当量-爆炸距离图表法等以毁伤数据为基础的查表法，适用于大当量爆炸条件下，对建筑群目标的毁伤评估及威力反演，但对建筑结构内部爆炸毁伤计算适用性则较差；内部爆炸加载下建筑内部载荷分布算法为影响 FIST 方法、等效动载法以及能量法计算结果精度的关键因素，充分研究爆炸冲击波在建筑结构内部的传播规律，并提出更合理的爆炸载荷计算方法，为该类方法的发展方向；等效当量法对楼板构件计算误差较大，可通过大规模数值模拟修正其纵向载荷传播系数计算公式，以提高计算精度。

（3）本研究仅为 5 种快速计算方法对砖混建筑结构计算能力的对比研究，其研究结果对建筑结构毁伤快速计算方法设计具有一定参考意义，但上述快速计算方法对其它类建筑毁伤计算能力可能与本文结果有所区别，仍需开展进一步研究。

参考文献：

[1] 方秦，杨石刚，陈力，等. 天津港“8·12”特大火灾爆炸事故建筑物和人员损伤破坏情况及其爆炸威力分析[J]. 土木工程学报，2017，50(3)：12-18.
FANG Qin，YANG Shi-gang，CHEN Li，et al. Analysis on the building damage，personnel casualties and blast energy of the “8.12” explosion in Tianjin port[J]. *China Civil Engineering Journal*，2017，50(3)：12-18.

[2] 顾琳琳，徐永行，朱黄浩，等. 隧道内甲烷蒸汽云爆炸特性及杀伤效应研究[J]. 含能材料，2025，33(3)：213-224.
GU Lin-lin，XU Yong-xing，ZHU Huang-hao，et al. Research on combustion characteristics and injury effects of methane vapor clouds in Tunnels[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*(*Hanneng Cailiao*)，2025，33(3)：213-224.

[3] 陈国华，谢沐霖，张强，等. 停车场内氢能客车氢泄露爆炸事故及风险分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2024，52(2)：84-94.
CHEN Guo-hua，XIE Mu-lin，ZHANG Qiang，et al. Study on hydrogen leakage-explosion and risk of hydrogen bus in station[J]. *Journal of South China University of Technology* (*Natural Science Edition*)，2024，52(2)：84-94.

[4] 周游，纪冲，王雷元，等. 重复爆炸载荷作用下薄壁方管动力响应研究[J]. 兵工学报，2019，40(9)：1871-1880.
ZHOU You，JI Chong，WANG Lei-yuan，et al. Research on the

dynamic response of thin-walled square tube under repeated blast loads[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(9): 1871-1880.
[5] GUO X K, LI Y, MCCRUM D P, et al. A reinforced concrete shear wall building structure subjected to internal TNT explosions: Test results and numerical validation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 190: 104950.
[6] MORRIS R D. Weaponeering: conventional weapon system effectiveness (Second Edition)[M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013: 915-959.
[7] 李光宇. 典型坚固目标毁伤效应数字化评估研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
LI Guang-yu. Research on digital assessment of damage effect of typical solid target[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
[8] 陈旭光. 建筑物在侵爆作用下的累积毁伤评估[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
CHEN Xu-guang. Cumulative damage assessment of buildings under penetration and explosion[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
[9] 周阳. 空地导弹对典型建筑物毁伤效能评估方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
ZHOU Yang. Research on evaluation method of damage effectiveness of air-to-ground missile against typical buildings[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
[10] 罗苇杰. 多层建筑物爆炸毁伤效应工程评估方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2022.
LUO Wei-jie. Study on the engineering evaluation method of damage effect of multi-story building under explosion[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2022.
[11] ALMUSTAFA M K, NEHDI M L. Machine learning model for predicting structural response of RC slabs exposed to blast loading[J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111109.
[12] ALMUSTAFA M K, NEHDI M L. Machine learning model for predicting structural response of RC columns subjected to blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 162: 104145.
[13] BAKER W E. Explosion Hazards and Evaluation[M]. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1983: 289-291.
[14] USACE-Protective Design Center. UFC 3-340-02, Structures to resist the effects of accidental explosions[S]. 2008.
[15] DOA, DON, DAF. TM 5-855-1, Structure to resist the effects of conventional weapons[S]. 1990.
[16] CHARLES J O, EDWARD J C. A computer program for explosive damage assessment of conventional buildings[R].Proceedings of the Twenty-Sixth DoD Explosives Safety Seminar, 1994.
[17] ASCE. ASCE/SEI 59-11. Blast protection of buildings[S]. Reston: 2011.
[18] CHOON M M T. Rapid estimation of building damage by conventional weapons[D].Monterey: Naval Postgraduate School, 2014.
[19] CHARLES E N. Blast waves (Second Edition)[M]. Gewerbestrasse: Springer International Publishing AG, 2018: 297-304.
[20] 陈大鹏, 陈力, 还毅, 等. 盐城响水化工园区"3.21"危化品爆炸事故爆炸威力分析及灾害后果评估[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(2): 196-203.
CHEN Da-peng, CHEN Li, HUAN Yi, et al. Analysis on the power and disaster consequences of "3.21" explosion accident in the chemical industry park of Xiangshui, Yancheng[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(2): 196-203.
[21] MENDONCA-FILHO L G, BASTOS-NETTO D, GUIRARDELLO R. Estimating the TNT equivalence of a 15-ton single base powder explosion through damaged building profiles analyses[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 158: 599-604.

Comparative Study on the Fast-running Method for Damage Assessment of Building Structure Subjected to Confined Explosion

ZHANG Yun-feng, GAO Hao-peng, WU Yi-xuan, SUI Ya-guang, LIU Wen-xiang, ZHANG De-zhi
(*National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *China*)

Abstract: The fast-running method based on engineering experience is an important tool to assess the explosion damage inside the building structure. To provide the reference for the selection and subsequent improvement of relevant calculation methods, the full-scale confined explosion tests on three-story masonry-concrete building were carried out under two scenarios. The five fast-running methods developed in recent years (i.e. FIST method, charge weight-standoff graphs method, equivalent dynamic load method, energy method, equivalent method) were used to calculate the damage of the buildings. The evaluation indicator and scoring criteria of 5-dimensional calculation ability were put forward. The characteristics of each fast-running method were compared and analyzed. The reasons for the difference in the ability of each method are discussed. Some suggestions for improvement are given. The results show that the charge weight-standoff graphs method is not suitable for the damage assessment of building structure subjected to confined explosions. The FIST method and equivalent method have high accuracy in calculating the masonry wall. The energy method has high accuracy in calculating the RC slabs, but the computational efficiency is low. The calculation efficiency of equivalent dynamic load method is high, but the calculation accuracy is low. In addition, considering the propagation law of the shock wave in complex building structure, improving the scale of numerical simulation are the main way to improve the computing ability of FIST-like and equivalent-like method.

Key words: damage assessment; building structure; explosion; fast-running method comparative
CLC number: O382; O383 **Document code:** A **DOI:** 10.11943/CJEM2024297
(责编: 高 毅)