

爆炸荷载作用下钢筋混凝土构件的缩尺效应

潘昊瑾, 潘钻峰, 黄正, 张海鹏, 司豆豆

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了研究爆炸荷载作用下钢筋混凝土(RC)构件的缩尺效应, 基于现有的不同缩尺系数 RC 构件的爆炸试验数据, 建立数值模型, 并重点讨论混凝土材料应变率的缩尺效应, 论证采用缩尺有限元模型进行原型结构动力响应预测的可行性。计算结果表明, 如果不考虑应变率的缩尺效应, 缩尺系数越小, 缩尺数值模型的损伤情况和动态响应就越不符合相似率; 当缩尺系数为 0.1 时, 比例爆距 0.50、0.44 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 下的 RC 梁跨中位移误差分别为 32.5%、75.1%, 比例爆距 0.591、0.518 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 下的 RC 板跨中位移误差分别为 45.08%、46.93%。在对动态增长系数(DIF)曲线进行缩尺后, 所得数值模型计算结果更符合相似率, 误差在 10% 之内。最后, 提出了采用缩尺试验结果预测原型结构动力响应的流程。

关键词: 缩尺效应; 应变率效应; 爆炸; 数值模拟; 钢筋混凝土(RC)梁; 钢筋混凝土板

中图分类号: O383

文献标志码: A

Scaling Effects of Reinforced Concrete Members Under Blast Loads

PAN Haojin, PAN Zuanfeng, HUANG Zheng, ZHANG Haipeng, SI Doudou

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate the scaling effect on reinforced concrete (RC) members under blast loads, numerical models were established based on existing explosion test data from RC members with various scaling factors. The research primarily focused on the scaling effect of the concrete material strain rate and demonstrated the feasibility of using scaled finite element models to predict the dynamic response of prototype structures. The results show that if the scaling effect of strain rate is not considered, the smaller the scaling factor, the less the damage and dynamic response of the scaled numerical

model match the similarity criteria. For a scaling factor of 0.1, the mid-span displacement errors of RC beams at scaled blast distances of 0.50 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ and 0.44 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ are 32.5% and 75.1%, respectively. The mid-span displacement errors of RC slabs at scaled distances of 0.591 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ and 0.518 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ are 45.08% and 46.93%, respectively. After scaling the dynamic increase factor (DIF) curve, the results of numerical model calculations align more closely with similarity ratios, with errors generally less than 10%. Finally, a process was proposed for predicting the dynamic response of prototype structures using scaled test results.

Keywords: scaling effect; strain rate effect; blast; numerical simulation; reinforced concrete (RC) beam; reinforced concrete slab

在民用基础设施及军事设施中, 钢筋混凝土(RC)结构占据较大比例, 当其遭受军事袭击、恐怖袭击或者危化品爆炸等爆炸荷载作用时, 局部结构的关键承重构件受损, 甚至引起结构倒塌^[1-3], 从而导致严重后果。钢筋混凝土结构在爆炸荷载作用下的动力性能、分析和设计是近年来被广泛研究的课题^[4-5]。RC 梁和板是建筑结构中的主要承重构件, 对于结构能否继续服役至关重要。很多学者对 RC 梁和板构件在爆炸荷载作用下的毁伤效应进行了较为全面的研究, 在炸药质量^[6-7]、炸药形状^[8]、爆炸距离^[7,9]、构件尺寸^[10-11]、强度^[12]、配筋率^[13-14]等如何影响 RC 梁、板的抗爆性能方面已经取得了一些成果。

对揭示结构抗爆性能研究来说, 最直接的方法是进行全尺寸爆炸试验。出于安全性和经济性方面考虑, 许多足尺试验研究不可行, 因此学者们往往采用缩尺试验以及数值模拟手段^[15-16]来预测原型结构的动力响应。对于爆炸荷载的缩尺, 已有国外学者

收稿日期: 2024-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(52078368)

第一作者: 潘昊瑾, 博士生, 主要研究方向为结构抗爆。E-mail: 2310447@tongji.edu.cn

通信作者: 潘钻峰, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗爆。E-mail: zfp@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

认为应采用立方根缩尺法则^[17]。目前,对于钢筋混凝土结构相关参数的缩尺,尚没有统一结论,尤其是混凝土材料的缩尺,在试验中很难满足相似率。鉴于此,国内外学者开展了系列RC构件抗爆缩尺试验。Zhang等^[7]的研究表明,与大尺寸RC梁相比,小尺寸RC梁的局部损伤程度略有降低,其损伤情况及跨中位移并不符合相似关系。Wang等^[18]的试验结果显示,比例系数较大的RC板的局部损伤比比比例系数较小的RC板略有减小,RC板存在缩尺硬化效应,动力响应不完全符合相似关系。刘子超等^[19]基于Wang等^[18]的试验研究得到以下结论:缩尺系数为0.2的RC板模型的损伤分布及位移响应误差较大,不满足相似率。此外,混凝土材料的应变率效应不容忽视。在数值模型中,考虑混凝土应变率的缩尺会带来更大误差,且不满足相似率,这和预期结果有一定偏差。因此,一些学者也开始在钢筋混凝土结构抗爆研究中考虑混凝土材料的应变率效应^[20-23]。

目前大部分抗爆研究未完全考虑钢筋混凝土结构的缩尺项,导致结构的损伤以及动力响应不完全符合相似率。尤其对于材料应变率的可缩性,还没有统一结论。为此,在进行缩尺模型数值模拟时,应全面考虑模型的缩尺项,从而可以更准确地预测原型结构的动力响应。因此,本文基于Zhang等^[7]、汪维^[11]的不同缩尺系数RC梁和单向RC板的抗爆试验,以量纲一相似理论为基础,对爆炸荷载以及RC构件进行缩尺,利用有限元软件LS-DYNA建立RC构件的数值模型并验证其合理性。随后,给出了缩尺系数0.1~1.0条件下RC构件损伤情况以及跨中最大位移的相似关系。最后,重点研究了混凝土应变率的缩尺效应以及相应缩尺方法,从而使缩尺数值模型的动力响应更符合相似率。研究结果可为建立爆炸荷载作用下缩尺钢筋混凝土结构与原型结构动力响应相似关系提供理论依据。

1 缩尺准则

根据文献[19],爆炸荷载的缩尺基于立方根准则,以保证缩尺模型的比例爆距与原模型一致。对于与RC构件相关的变量,当缩尺试验使用与原型相同的混凝土时,结构质量的缩尺系数为 λ^3 (λ 为缩尺系数);钢筋横截面积缩尺系数为 λ^2 ,即配筋率恒定。此外,抗压强度和失效应变不进行缩尺就可以符合要求。

对于材料的应变率效应,通过II定理可得到其

量纲一表达式,爆炸持续时间为 t ,声速为 c_0 ,爆炸物半径为 r ,应变率项为 $\dot{\epsilon}$ 。基于国际单位制基本量纲(长度、时间、质量),可由II定理得出相关参数的量纲一表达式,再通过引入缩尺系数 λ 表示缩尺试验与原型试验对应物理量的比值,计算式为:

$$\Pi_1: \frac{tc_0}{r} = k \rightarrow \frac{t_{\text{缩尺}} c_{0\text{缩尺}} / r_{\text{缩尺}}}{t_{\text{原型}} c_{0\text{原型}} / r_{\text{原型}}} = 1 \rightarrow \frac{\lambda_t \lambda_{c_0}}{\lambda_r} = 1 \rightarrow \lambda_t \lambda_{c_0} = \lambda_r \rightarrow \lambda_t = \lambda_r \quad (1)$$

$$\Pi_2: \dot{\epsilon} t = k \rightarrow \frac{\dot{\epsilon}_{\text{缩尺}} t_{\text{缩尺}}}{\dot{\epsilon}_{\text{原型}} t_{\text{原型}}} = 1 \rightarrow \lambda_{\dot{\epsilon}} \lambda_t = 1 \rightarrow \lambda_{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{\lambda_r} \quad (2)$$

$\lambda_t = t_{\text{缩尺}} / t_{\text{原型}}$,对于缩尺试验和原型试验,空气不变,故 $\lambda_{c_0} = 1$ 。量纲一表达式中只有 λ_r 可以独立变化,因此 $\lambda = \lambda_r$ 可定义为唯一独立的缩尺系数。当模型缩尺时,材料应变率提高(缩尺系数为 $1/\lambda$),对应更高的材料强度,导致通过缩尺模型预测原型结果时产生一定误差。由于在实验室或现场缩尺模型试验中无法定性分析应变率效应对结果的影响,因此本文采用数值模拟方法深入探究应变率对缩尺模型相似率的影响。

2 RC梁数值计算模型

2.1 有限元模型验证

2.1.1 模型参数

数值模拟参考Zhang等^[7]的RC梁抗爆试验,试验照片见图1。RC梁使用槽钢配合以木板夹紧固定。本研究使用的部分试验参数见表1。

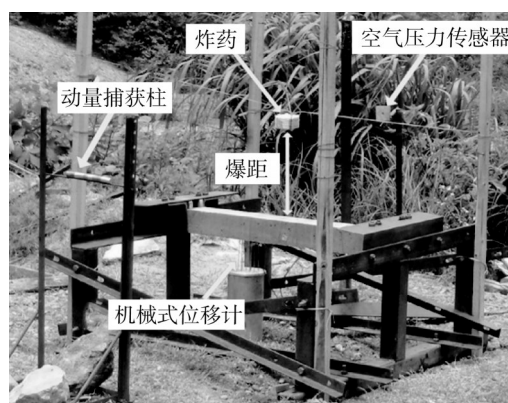


图1 RC梁抗爆试验^[7]

Fig.1 Explosion test of RC beam^[7]

建模时为了提高计算效率,使用1/4模型进行简化,模型中RC梁尺寸为62.5 mm×125.0 mm×675.0 mm。所有配筋均为6 mm的HPB235钢筋,箍筋间距为60 mm。用于提供边界条件的夹持钢板

表 1 RC 梁试验参数

Tab.1 Test parameters of RC beams

试验编号	缩尺系数	尺寸/(mm×mm×mm)	炸药质量/kg	炸药高度/m	比例爆距/(m·kg ^{-1/3})
B1-4	0.6	75×75×850	0.22	0.3	0.50
B1-3	0.6	75×75×850	0.32	0.3	0.44
B2-2	0.8	100×100×1 100	0.51	0.4	0.50
B2-1	0.8	100×100×1 100	0.75	0.4	0.44
B3-1	1.0	125×125×1 350	0.99	0.5	0.50
B3-2	1.0	125×125×1 350	1.46	0.5	0.44

尺寸为 62.5 mm×65.0 mm×10.0 mm(长×宽×高)。按照试验,在钢板和 RC 梁之间使用木板模拟边界条件,木板厚度为 20 mm。原型 RC 梁使用 3 mm 的网格尺寸,钢板和木板网格尺寸为 5 mm,空气网格尺寸为 10 mm。图 2 所示为 RC 梁数值模型。

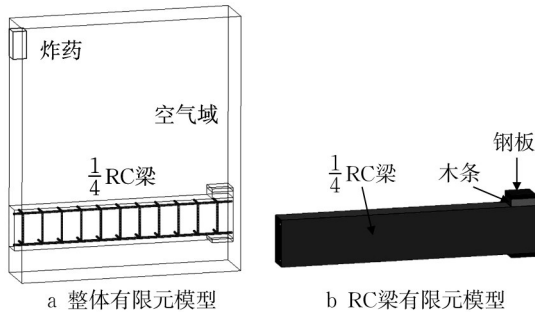


图 2 RC 梁 LS-DYNA 数值模型

Fig.2 LS-DYNA numerical model of RC beam

本文采用 K&C 材料模型模拟混凝土材料,通过材料关键字 072R3-CONCRETE_DAMAGE_REL3 定义。混凝土材料标准抗压强度为 40 MPa,换算成圆柱体抗压强度需乘以系数 0.79^[24],为 31.6 MPa。普通混凝土的动态增长系数(dynamic increase factor,DIF)曲线见图 3,表征材料的应变率效应。

RC 梁采用 HPB235 钢筋,由塑性随动模型模拟,在 LS-DYNA 软件中通过关键字 Plastic-Kinematic 定义,屈服强度和极限强度分别为 395、501 MPa^[7]。钢筋与混凝土之间采用 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 流-固耦合接触。钢筋和混凝土通过 MAT_ADD_

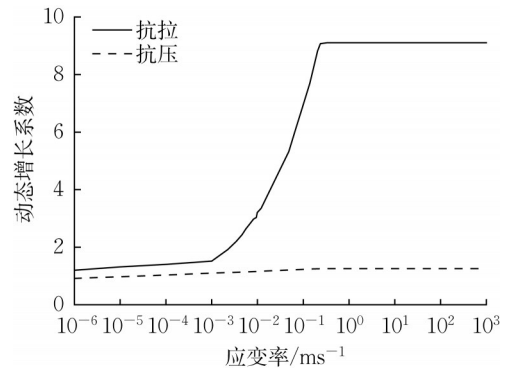


图 3 普通混凝土动态增长系数曲线

Fig.3 DIF curve of ordinary concrete

EROSION 定义侵蚀。

此外,木板按照木材模型手册^[25]中的默认松木参数,通过关键字 MAT_WOOD_PINE 定义。RC 梁、木块和钢板之间的接触通过关键字 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 定义,动、静摩擦系数分别为 0.2 和 0.3。

使用任意拉格朗日欧拉算法(ALE)模拟爆炸波的传播。空气和炸药分别采用 MAT_NULL 和 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料表示,状态方程为 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 和 EOS_JWL,相关参数按照吴昊等^[26]研究选取,如表 2、3 所示。炸药采用初始体积分法,通过 INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 施加在 RC 梁跨中顶部的空气中。RC 梁与空气和炸药通过 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义流-固耦合接触。

表 2 空气模型参数

Tab.2 Model parameters of air

初始密度/(kg·m ⁻³)	E ₀ /(J·m ⁻³)	P _C /kPa	μ	C ₀ 、C ₁ 、C ₂ 、C ₃ 、C ₆	C ₄ 、C ₅
1.29	2.5×10 ⁵	0	0	0	0.4

注:E₀为单位体积爆轰能与内能初始值;P_C为截断压力;μ为黏滞系数;C₀、C₁、C₂、C₃、C₄、C₅、C₆为多项式方程系数。

此外,通过 LOAD_BODY_Z 对 RC 梁施加重力荷载,结构的对称面和空气域施加对称约束,空气边界通过 BOUNDARY_NON_REFLECTING

定义。

2.1.2 模拟结果

对于原型试验,模拟的 RC 梁损伤基本与试验的

表3 炸药模型参数

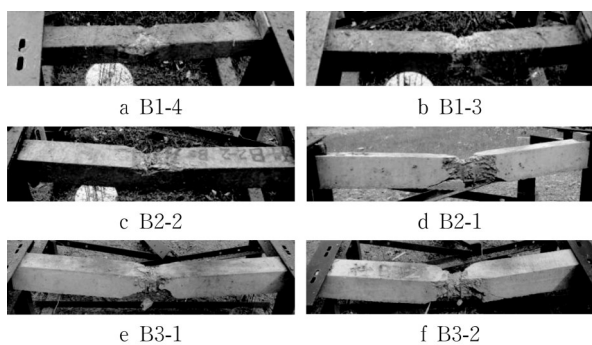
Tab.3 Model parameters of TNT

初始密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	爆速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	爆压/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$
1 630	6 930	21	3.738×10^2	3.747	4.15	0.9	0.35	6×10^9

注:A、B、 R_1 、 R_2 、 ω 为状态方程系数。

相同,RC梁整体为受弯破坏,并且迎爆面的受压区混凝土以及背面的受拉区混凝土出现剥落。模拟中比例爆距0.50、0.44 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 下RC梁的跨中位移分别为32.4、45.4 mm,试验值分别为34、46 mm,误差在10%以内,相差不大。

对于缩尺模型,除不考虑动态增长系数缩尺外,对其他模型几何参数进行缩尺,有限元网格尺寸也严格按照缩尺系数选取。为便于后续对缩尺效应进行研究,仅考虑钢筋直径和间距的缩尺,保证缩尺模型的配筋率与原型一致。炸药相关参数也按照缩尺准则同时进行缩尺。试验结果和模拟结果分别见图4、7、8。可以看到,RC梁的损伤情况基本一致。缩尺RC梁跨中位移见图5。当缩尺系数为0.8时,模拟得到的跨中位移值与试验值较接近,而在缩尺系数为0.6时,跨中位移相差较多。这是由于缩尺试验中并未考虑钢筋的缩尺,钢筋直径不变,缩尺RC梁中的钢筋配筋率变大,RC梁的抗弯刚度变大,因此位移响应较小。此外,缩尺试验设计存在缺陷,炸药质量和RC梁尺寸并未严格缩尺,且数值模拟中未考虑混凝土应变率的缩尺,这也是模拟结果与试验值存在误差的原因。

图4 RC梁试验结果^[7]Fig.4 Test results of RC beams^[7]

2.2 尺寸效应

2.2.1 混凝土材料应变率

应变率效应是指在动态荷载下材料力学性能与静态荷载下存在显著差异的现象,而应变率缩尺效应是指试验中材料应变率特性随着试样尺寸缩小发生的变化。钢筋混凝土结构在遭受到强度高且作用

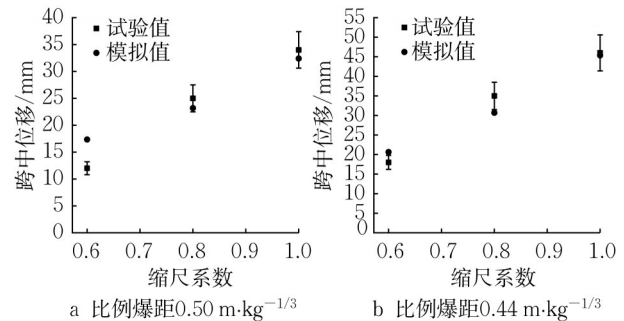


图5 缩尺RC梁跨中位移

Fig.5 Mid-span displacement of scaled RC beam

时间极短的爆炸荷载时,动态抗压强度比静态抗压强度提高1倍,动态抗拉强度甚至比静态抗拉强度提高6倍^[27],极大地影响结构的抗爆能力。在缩尺模型中,缩尺系数越小,混凝土材料的应变率越大,放大系数近似为缩尺系数的倒数,符合缩尺准则章节中的理论结果^[19]。缩尺模型中材料应变率的增大会导致材料强度的提高,从而使得缩尺模型的动态响应不符合相似率。

为考虑应变率效应对缩尺模型相似率的影响,建立缩尺系数0.1~1.0的缩尺模型,并对混凝土应变率进行缩尺。其中,混凝土材料的应变率效应通过动态增长系数描述。若不改变动态增长系数曲线,则当模型缩尺时材料应变率增大,对应的材料强度也会增大。因此,需要对动态增长系数曲线进行修正,让缩尺模型中更大的应变率值对应与原型中相同的动态增长系数。对动态增长系数曲线的横坐标按照 $1/\lambda$ 进行拉伸,即当缩尺系数为0.1时,动态增长系数曲线的横坐标扩大10倍,如图6所示。对应混凝土抗拉和抗压的动态增长系数计算式为:

$$\alpha_{\text{DIF,t}} = f(\dot{\epsilon}_{\text{d,t}}\lambda) \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{DIF,c}} = f(\dot{\epsilon}_{\text{d,c}}\lambda) \quad (4)$$

式中, $\dot{\epsilon}_{\text{d}}$ 为应变率。

2.2.2 缩尺模型计算结果

缩尺模型参数见表4。图7、8所示为RC梁在爆炸荷载作用下的损伤情况。可以看到,若不考虑动态增长系数的缩尺,则模型的损伤情况随缩尺系数的减小逐渐减弱,RC梁的损伤范围减小。尤其是当缩尺系数为0.2和0.1时,数值模型的损伤情况与原

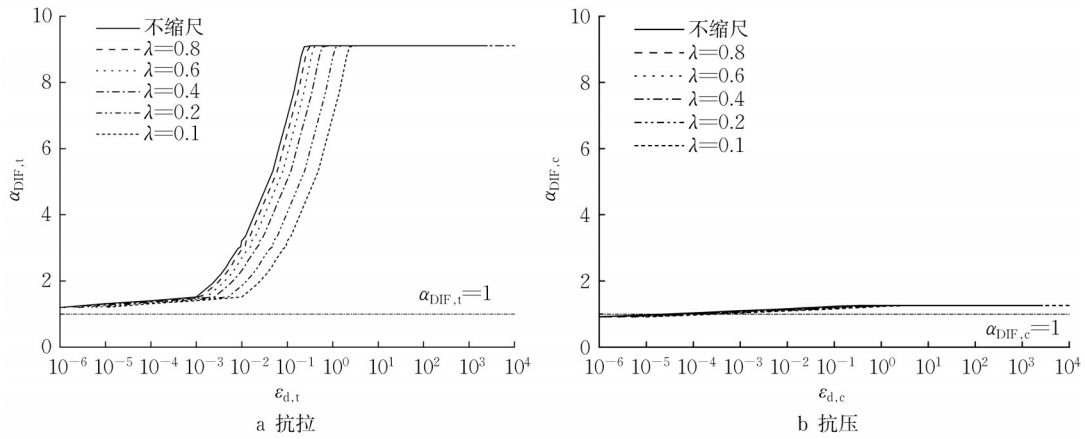


图 6 RC 梁缩尺模型动态增长系数曲线

Fig.6 DIF curve of RC beam in scaled model

型相差较大, RC 梁跨中受压区破坏范围略有减小, 受拉区破坏范围缩小明显, 且梁的斜裂缝数量也明显变少。这是由于在此缩尺系数下, 混凝土强度明

显提高, 因此爆炸荷载下的损伤过小。当数值模型考虑了动态增长系数缩尺后, 不同缩尺系数下的 RC 梁呈现出一致的损伤结果。

表 4 RC 梁缩尺模型参数

Tab.4 Parameters of RC beam in scaled model

缩尺系数	混凝土梁尺寸/(mm×mm×mm)	钢筋直径/mm	箍筋间距/mm	网格尺寸/mm	比例爆距 0.5 m·kg ^{-1/3}		比例爆距 0.44 m·kg ^{-1/3}	
					炸药质量/kg	炸药高度/m	炸药质量/kg	炸药高度/m
1.0	125×125×1350	6.0	60	3.0	0.990	500	1.460	500
0.8	100×100×1080	4.8	48	2.4	0.507	400	0.748	400
0.6	75×75×810	3.6	36	1.8	0.214	300	0.315	300
0.4	50×50×540	2.4	24	1.2	0.063	200	0.093	200
0.2	25×25×270	1.2	12	0.6	0.008	100	0.012	100
0.1	12.5×12.5×135.0	0.6	6	0.3	0.001	50	0.001	50

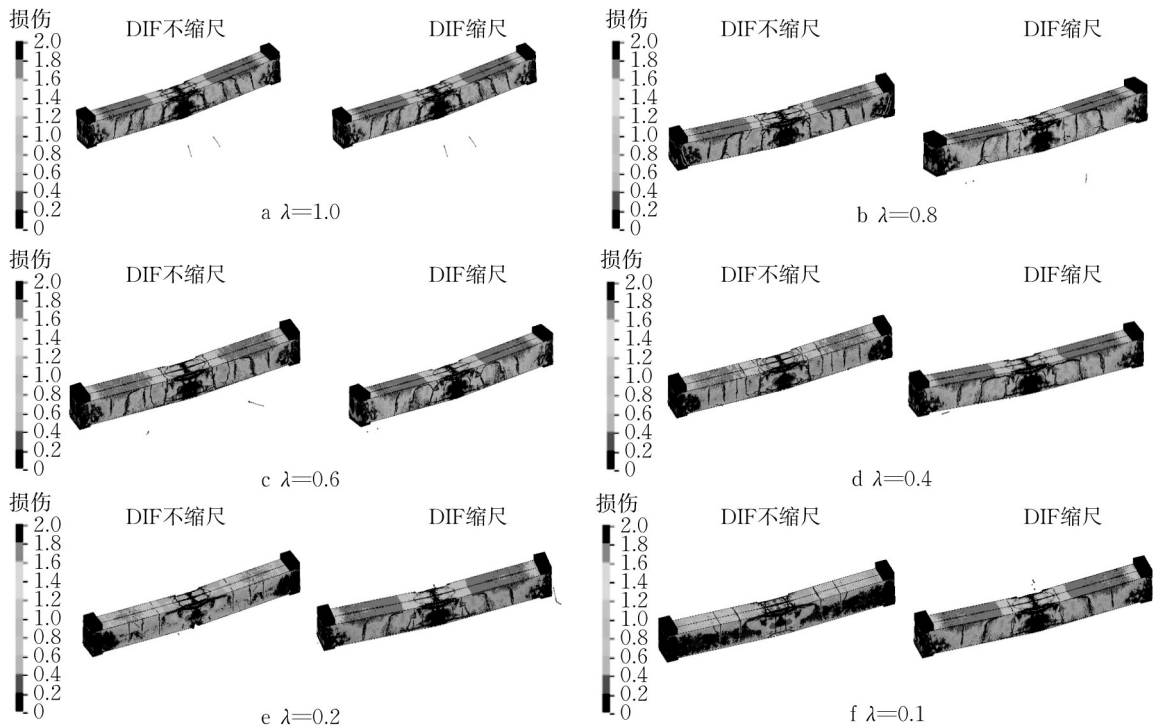


图 7 RC 梁缩尺模型损伤结果 (比例爆距 0.50 m·kg^{-1/3})

Fig.7 Damage results of RC beam in scaled model (scaled distance 0.50 m·kg^{-1/3})

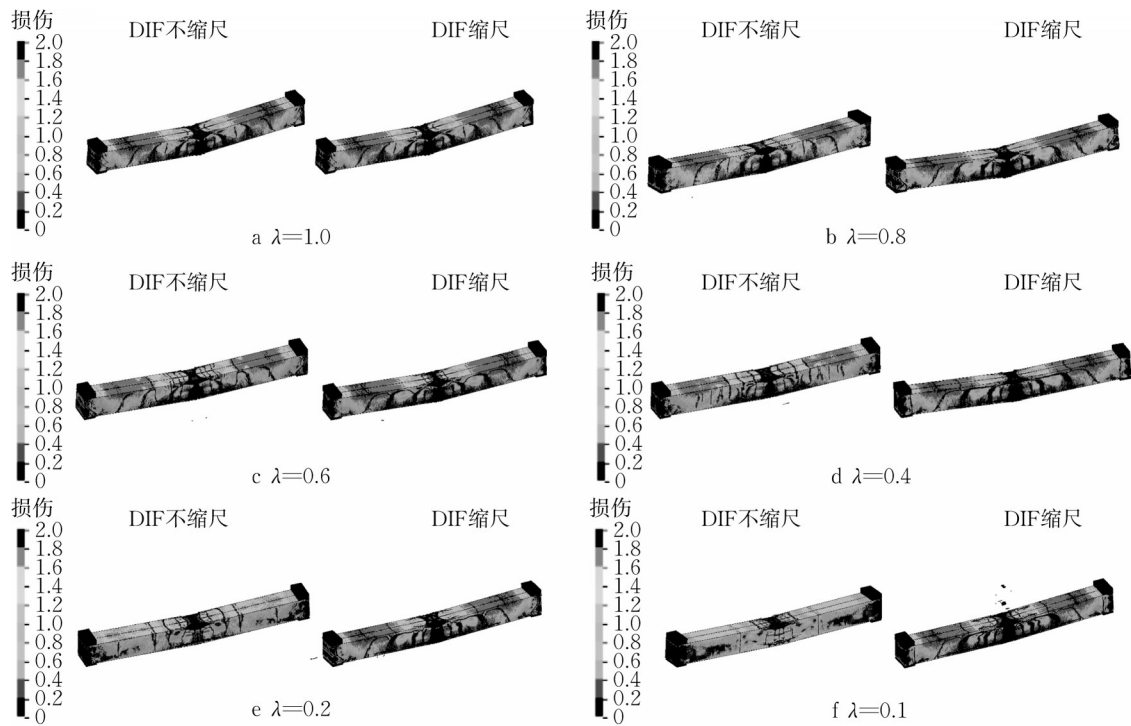


图8 RC梁缩尺模型损伤结果(比例爆距 $0.44 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

Fig.8 Damage results of RC beam in scaled model (scaled distance $0.44 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

图9中,“缩尺曲线”为根据原型模拟结果按缩尺比计算的RC梁跨中位移(即完全符合相似率的位移),同时图上也显示了可接受的 $\pm 10\%$ 误差区间。从图9可以看到,不考虑动态增长系数缩尺时,RC梁显示出缩尺硬化效应,跨中位移与缩尺曲线相差

较大,且缩尺系数越小差距越大,位移响应不完全符合相似率。当缩尺系数为0.1时,比例爆距 0.50 、 $0.44 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 下RC梁跨中位移与缩尺曲线的误差分别为 32.5% 、 75.1% 。对动态增长系数进行缩尺后,跨中位移与缩尺曲线较为接近,符合相似率。

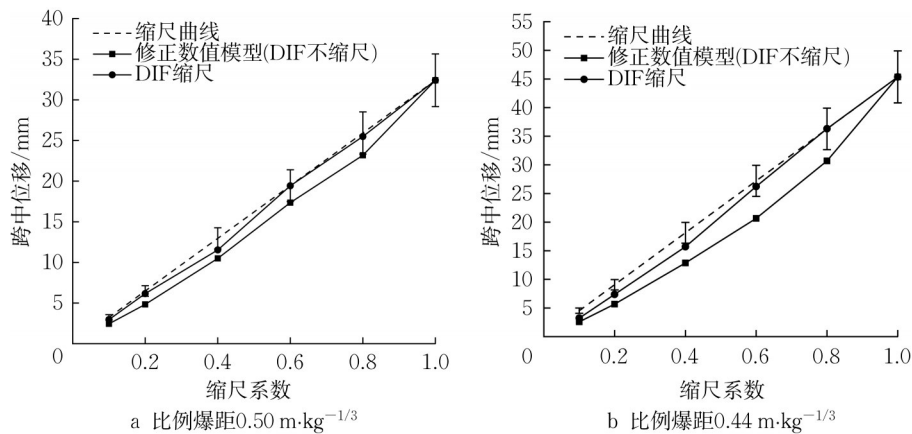


图9 缩尺RC梁跨中位移曲线

Fig.9 Mid-span displacement curve of scaled RC beam

3 RC板数值计算模型

3.1 有限元模型验证

3.1.1 模型参数

数值模拟参考 Wang 等^[18]的单向RC板抗爆试

验,试验照片和参数见图10、表5。

采用K&C材料模型模拟混凝土材料,动态增长系数曲线见图3。RC板采用HRB335钢筋,由塑性随动模型模拟,屈服强度为484 MPa。用于夹紧RC板的钢条定义为刚体并约束钢条转动和平动,与RC



图10 RC板抗爆试验^[18]

Fig.10 Explosion test of RC slab^[18]

板的接触通过关键字 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 定义,动、静摩擦系数分别为0.2和0.3。采用CONWEP方法施加爆炸荷载,关键字为LOAD_BLAST_ENHANCED。通过输入炸药的坐标位置、质量等简单参数调整0.518、0.591 m·kg^{-1/3} 2种比例爆距。图11所示为LS-DYNA中的1/4 RC板数值模型。

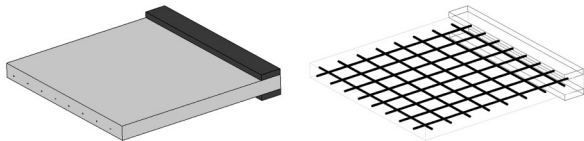


图11 1/4 RC板LS-DYNA 数值模型

Fig.11 LS-DYNA numerical model of 1/4 RC slab

3.1.2 模拟结果

原型试验中不同比例爆距下RC板试验结果如图12所示,数值模拟的RC板损伤情况如图16、17所示。由图12可知,比例爆距为0.591 m·kg^{-1/3}时,RC板在迎爆面沿跨中出现一条主裂缝,同时在中心出现环形区域的损伤;背面中心的部分混凝土受拉脱落,同时出现一些沿中心向外扩散的斜剪裂缝。试验中板的跨中最大位移为19.3 mm,数值模型中为21.5 mm。比例爆距0.518 m·kg^{-1/3}下RC板的破坏形式基本与前者一致,随着炸药量的增加,板的迎爆面出现爆破坑。此外,可以观察到,试验中RC板的

迎爆面出现了沿跨度方向的横向裂缝。试验中板的跨中最大位移为40.0 mm,数值模型中为39.7 mm。总体来说,数值模型裂缝的发展、损伤区域以及跨中最大位移均和试验结果的吻合程度较高。

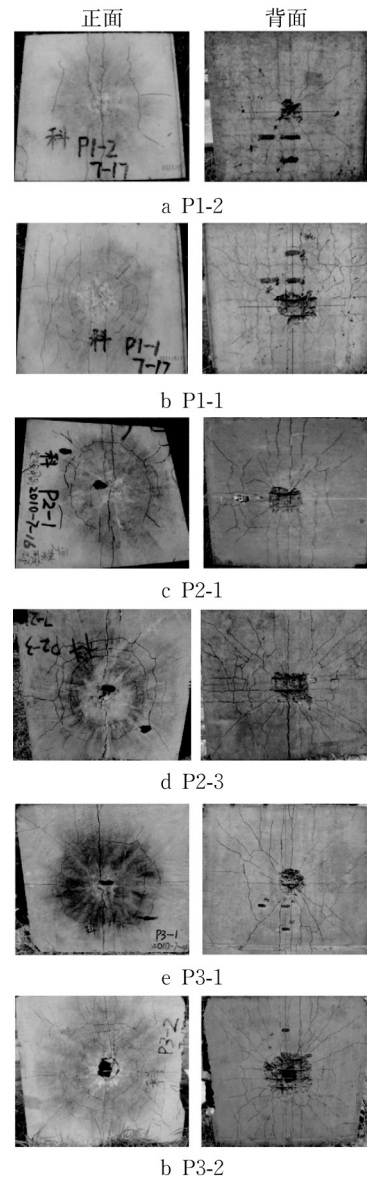


图12 RC板试验结果^[18]

Fig.12 Test results of RC slabs^[18]

对于缩尺模型,除了混凝土应变率,其余几何参

表5 RC板试验参数

Tab.5 Test parameters of RC slabs

编号	缩尺系数	尺寸/(mm×mm×mm)	炸药质量/kg	炸药高度/m	比例爆距/(m·kg ^{-1/3})
P1-2	0.6	750×750×30	0.13	0.3	0.591
P1-1	0.6	750×750×30	0.19	0.3	0.518
P2-1	0.8	1 000×1 000×40	0.31	0.4	0.591
P2-3	0.8	1 000×1 000×40	0.46	0.4	0.518
P3-1	1.0	1 250×1 250×50	0.64	0.5	0.591
P3-2	1.0	1 250×1 250×50	0.94	0.5	0.518

数以及网格尺寸严格按照缩尺系数选取。图13、16、17展示了缩尺模型计算结果,可以较好地表示试验中缩尺RC板动力响应和损伤情况。如图13所示,比例爆距为 $0.591\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 时,缩尺系数0.8和1.0下RC板跨中最大位移的模拟结果与试验结果误差不大。其中,缩尺系数为0.6时误差较大的原因是缩尺试验中的炸药质量(130 g)小于严格缩尺的炸药质量(138 g),造成试验测得的位移值小于数值计算结果。当比例距离为 $0.518\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 时,缩尺模型中板跨中位移产生误差的原因可能为:试验中缩尺RC板的配筋率高于原型,导致试验与数值模型结果有较大的误差;现场试验中RC板中心的贯穿破坏可能也影响到跨中最大位移的测量;在更严重的爆炸荷载作用下,板厚变薄,而夹持系统尺寸不变,导致RC板边界条件由固支转变为简支,跨中位移过大。

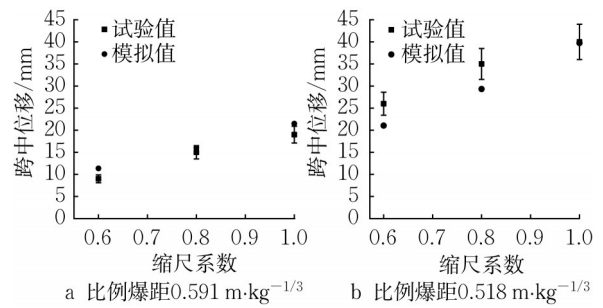


图13 缩尺RC板跨中位移

Fig.13 Mid-span displacement of scaled RC slab

3.2 尺寸效应

同样地,对缩尺系数为0.1~1.0的RC板进行数值模拟,观察RC板损伤模式以及跨中位移。缩尺模型参数如表6所示。

表6 RC板缩尺模型参数

Tab.6 Parameters of RC slab in scaled model

缩尺系数	混凝土板尺寸/(mm×mm×mm)	钢筋直径/mm	钢筋间距/mm	网格尺寸/mm	比例爆距 $0.591\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$		比例爆距 $0.518\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$	
					炸药质量/kg	炸药高度/mm	炸药质量/kg	炸药高度/mm
1.0	1250×1250×50	6.0	75.0	3.0	0.640	500	0.940	500
0.8	1000×1000×40	4.8	60.0	2.4	0.328	400	0.481	400
0.6	750×750×30	3.6	45.0	1.8	0.139	300	0.203	300
0.4	500×500×20	2.4	30.0	1.2	0.041	200	0.060	200
0.2	250×250×10	1.2	15.0	0.6	0.005	100	0.008	100
0.1	125×125×5	0.6	7.5	0.3	0.001	50	0.001	50

图14为RC板数值模型中迎爆面中心单元的应变率。可以看到,随着缩尺系数减小,数值计算模型承受的应变率提高,且放大系数近似为缩尺系数的倒数。动力响应如图15所示。图16、17分别显示了2种比例爆距下各缩尺系数RC板的损伤情况。

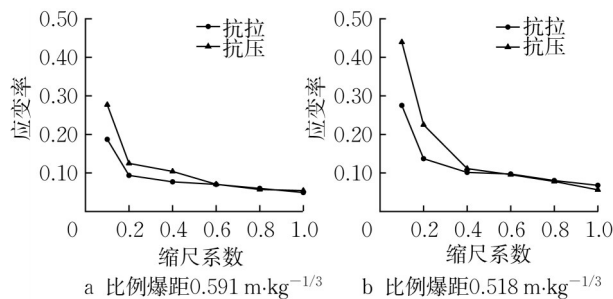


图14 不同缩尺系数下RC板的应变率

Fig.14 Strain rate of RC slab at different scaling factors

在缩尺系数较大时,动态增长系数不缩尺或缩尺RC板的损伤模式基本一致。对于比例爆距 $0.591\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$

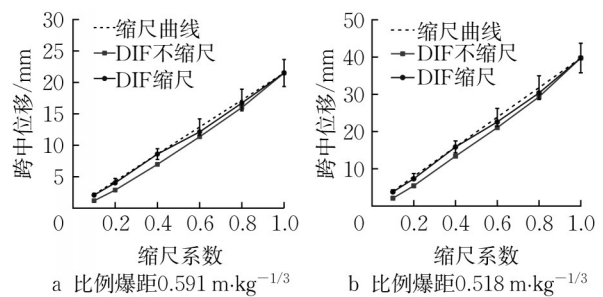


图15 缩尺RC板跨中位移曲线

Fig.15 Mid-span displacement curve of scaled RC slab

$\text{kg}^{-1/3}$ 的RC板,在缩尺系数为0.2和0.1时,动态增长系数不缩尺的RC板损伤模式出现了明显的偏差。对于比例爆距 $0.518\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 的RC板,在缩尺系数小于0.6时,RC板的横向裂缝消失不可见。在缩尺系数为0.1时,应力云图更是显示了与原型完全不同的损伤情况。同时,对于2种比例爆距的RC板,在缩尺系数小于0.6时,动态增长系数不缩尺的模型下跨中位移与缩尺曲线的偏差逐渐变大。比例爆距 $0.591\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 的RC板在缩尺系数为0.2和0.1时误差分别为

33.32%、45.08%,而比例爆距 $0.518\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 的RC板误差分别为31.69%、46.93%。

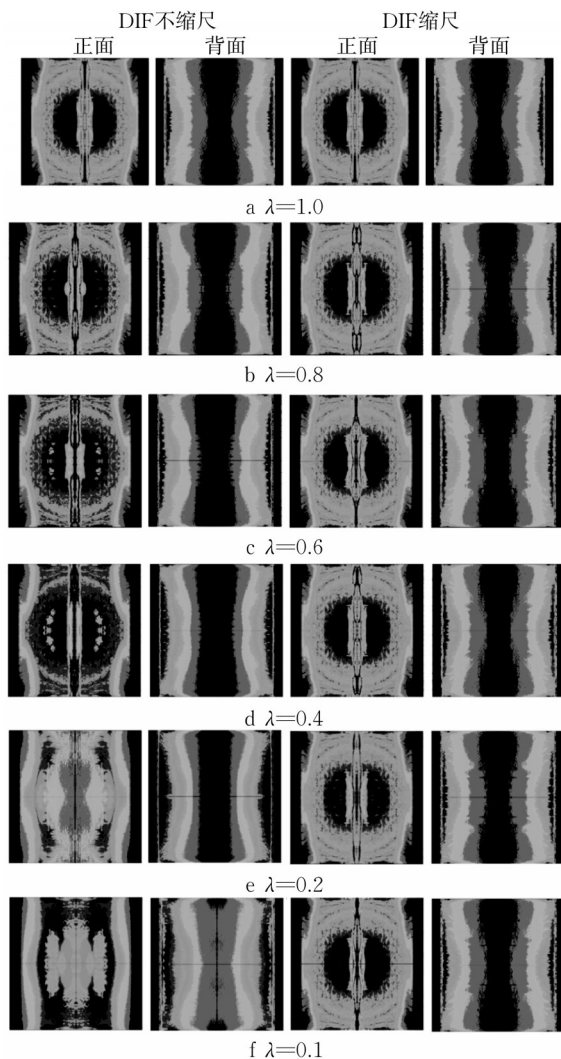


图 16 RC板缩尺模型损伤结果(比例爆距 $0.591\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)
Fig.16 Damage results of RC slab in scaled model (scaled distance $0.591\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)

4 原型结构动力响应

目前,缩尺抗爆试验仍然是钢筋混凝土结构爆炸效应研究的重要手段。尽管有很多学者在这一领域进行了探索^[28-29],但是由于结构相似性的复杂性,因此试验数据很多时候并不能应用于原型结构。目前,大多数学者直接根据相似度推测原型结构的动力特性。然而,由于存在材料的缩尺硬化现象,因此原型结构的动力响应估计值偏低。如图 18 所示,当得到的试验数据为缩尺系数 0.6 的 RC 板跨中位移时,若按照相似度反推缩尺系数 0.8 以及原型 RC 板位移,则会较低地估计跨中位移,造成结构的不安全设计。

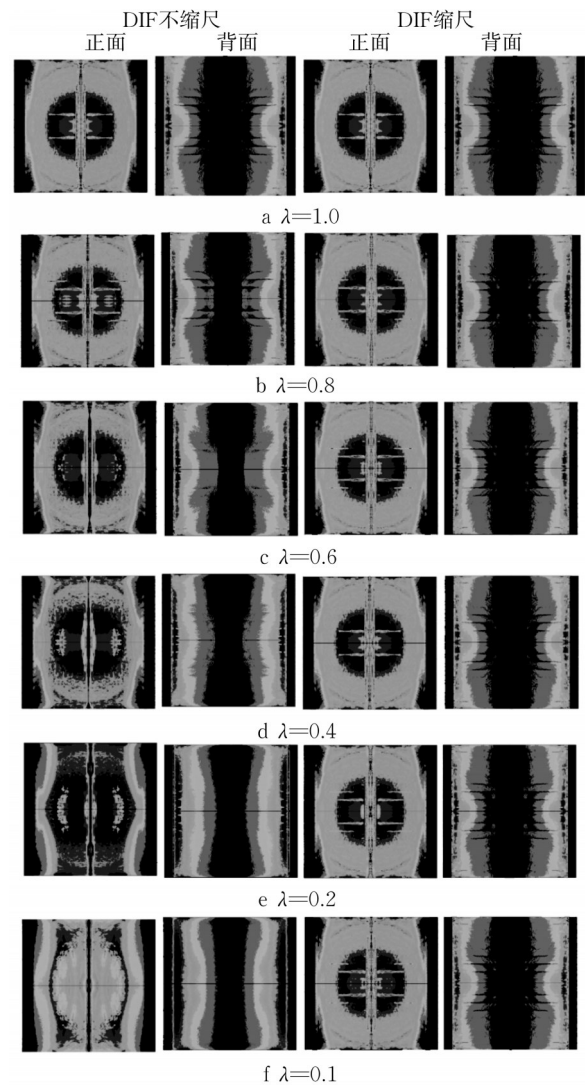


图 17 RC板缩尺模型损伤结果(比例爆距 $0.518\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)
Fig.17 Damage results of RC slab in scaled model (scaled distance $0.518\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)

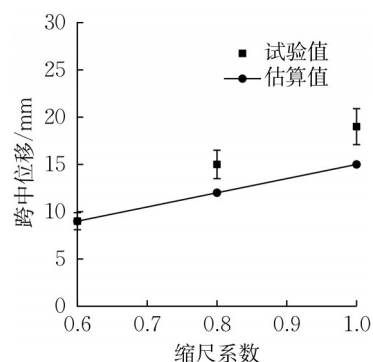


图 18 原型RC板跨中位移推测(比例爆距 $0.591\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)
Fig.18 Speculation of mid-span displacement of prototype RC slab (scaled distance $0.591\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)

假设只进行一组缩尺系数 0.6 的 RC 板抗爆试验,利用此试验结果推测原型结构在爆炸荷载下的

动力响应,如图19所示。具体流程见图20。图19中,灰色阴影部分为10%的误差范围。可以看到,原型板的跨中位移试验值也在误差范围内。

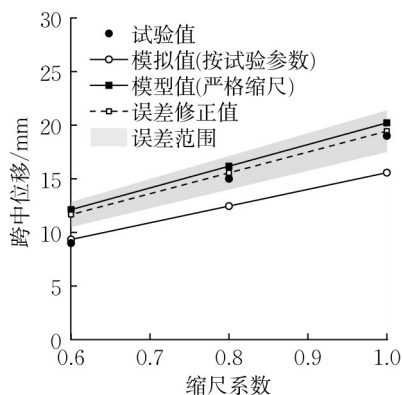


图19 原型RC板跨中位移预测过程(比例爆距 $0.591 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)

Fig.19 Prediction process of mid-span displacement of prototype RC slab (scaled distance $0.591 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)

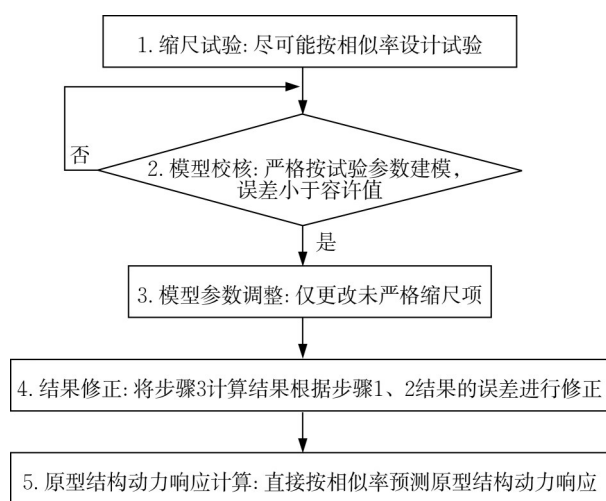


图20 爆炸荷载下原型结构动力响应预测流程

Fig.20 Prediction process of dynamic response of prototype structure under blast loads

5 结论

(1)缩尺试验的设计应尽可能全面地考虑各种参数的缩尺,才能得到符合相似率的缩尺试验结果。建立的RC构件数值模型能较好地模拟试验中RC构件的损伤情况与动力响应。

(2)在钢筋混凝土结构抗爆模拟中,缩尺模型与原型的相似关系受混凝土材料的应变率影响很大。当缩尺系数小于0.6时,若忽视混凝土材料应变率效应所引起的动态强度提升,不对其动态增长系数进行缩尺,则会导致缩尺构件动力响应结果不符合

相似率,无法准确预测原型构件的动态响应。

(3)考虑混凝土材料动态增长系数曲线缩尺的数值模型计算结果更符合相似率,跨中位移可以直接根据缩尺系数与原型建立等效关系。

(4)对于RC梁和RC板抗爆试验的数值模拟,分别采用ALE算法和CONWEP算法,混凝土材料应变率的缩尺方法均适用,并给出了基于缩尺试验预测原型结构动力响应的建议。

作者贡献声明:

潘昊瑾:模拟实现,数据分析,论文撰写。

潘钻峰:研究构思,论文修改指导。

黄正:论文修订,论文校核。

张海鹏:协助完成论文内容。

司豆豆:参与论文修改。

参考文献:

- [1] ORTON S L, CHIARITO V P, MINOR J K, *et al.* Experimental testing of CFRP-strengthened reinforced concrete slab elements loaded by close-in blast [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(2): 4013060.
- [2] LUCCIONI B M, AMBROSINI R D, DANESI R F. Analysis of building collapse under blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(1): 63.
- [3] HAMED E, RABINOVITCH O. Geometrically nonlinear effects in the flexural response of masonry walls strengthened with composite materials [J]. *Journal of Mechanics of Materials & Structures*, 2007, 2(5): 829.
- [4] GINSBURG S, KIRSCH U. Design of protective structures against blast [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(6): 1490.
- [5] JONES N, ALVES M. Post-failure response of impulsively loaded clamped beams [J]. *European Journal of Mechanics*, 2006, 25(5): 707.
- [6] WU Z, ZHANG P, FAN L, *et al.* Debris characteristics and scattering pattern analysis of reinforced concrete slabs subjected to internal blast loads: a numerical study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 1.
- [7] ZHANG D, YAO S, LU F, *et al.* Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 33: 497.
- [8] SHI Y, CHEN L, WANG Z, *et al.* Field tests on spalling damage of reinforced concrete slabs under close-in explosions [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2015, 6(2): 389.
- [9] SYED Z I, RAMAN S N, NGO T, *et al.* The failure behaviour of reinforced concrete panels under far-field and near-field blast effects [J]. *Structures*, 2018, 14: 220.
- [10] NING J, MENG F, MA T, *et al.* Failure analysis of

- reinforced concrete slab under impact loading using a novel numerical method [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103647.
- [11] 汪维. 钢筋混凝土构件在爆炸荷载作用下的毁伤效应及评估方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
WANG Wei. Study on damage effects and assessments method of reinforced concrete structural members under blast loading [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [12] LI J, WU C, HAO H. Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion [J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 395.
- [13] YAO S, ZHANG D, CHEN X, *et al.* Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 66: 120.
- [14] YAO S, ZHANG D, LU F, *et al.* Damage features and dynamic response of RC beams under blast [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 62: 103.
- [15] GOMATHI K A, RAJAGOPAL A, REDDY K S S, *et al.* Plasticity based material model for concrete subjected to dynamic loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 142: 103581.
- [16] GOMATHI K A, RAJAGOPAL A. Dynamic performance of reinforced concrete slabs under impact and blast loading using plasticity-based approach [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20(14): 2043015.
- [17] KINGERY C N. Air blast parameters versus distance for hemispherical TNT surface bursts [R]. Aberdeen Proving Ground, MD: Ballistic Research Laboratory, 1966.
- [18] WANG W, ZHANG D, LU F, *et al.* Experimental study on scaling the explosion resistance of a one-way square reinforced concrete slab under a close-in blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 49: 158.
- [19] 刘子超, 吴俊, 喻君, *et al.* 爆炸荷载作用下钢筋混凝土构件缩尺效应的数值模拟研究 [J]. *结构工程师*, 2022, 38(4): 16.
LIU Zichao, WU Jun, YU Jun, *et al.* Numerical study on the scaling effect of reinforced concrete members under blast load [J]. *Structural Engineers*, 2022, 38(4): 16.
- [20] WANG W, ZHANG D, LU F, *et al.* Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 27(1): 41.
- [21] ZHAO C F, CHEN J Y. Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading [J]. *Theoretical & Applied Fracture Mechanics*, 2013, 63/64: 54.
- [22] THAI D K, KIM S E, BUI T Q. Modified empirical formulas for predicting the thickness of RC panels under impact loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 169: 261.
- [23] LIN X. Numerical simulation of blast responses of ultra-high performance fibre reinforced concrete panels with strain-rate effect [J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 176: 371.
- [24] 顾祥林. 混凝土结构基本原理 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2011.
GU Xianglin. Basic principles of concrete structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011.
- [25] MURRAY Y D. Manual for LS-DYNA wood material model 143 [M]. McLean, VA: Federal Highway Administration, 2007.
- [26] 吴昊, 林城. 两层单跨缩尺RC框架结构外爆炸试验数值模拟 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2022, 39(3): 111.
WU Hao, LIN Cheng. Numerical simulation on external explosion experiments of two-story single-span scaled RC frame structure [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2022, 39(3): 111.
- [27] MALVAR L J, ROSS C A. A review of strain rate effects for concrete in tension [J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(6): 735.
- [28] CHI S. Validation of similitude laws for dynamic structural model test [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2004, 20(4): 11.
- [29] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧 [J]. *大连理工大学学报*, 2000(1): 1.
LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity techniques in structural dynamic model tests [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000(1): 1.