DOI: 10.11858/gywlxb.20230712

起波配筋混凝土框架结构的抗内爆性能数值模拟

尹华伟[1,2], 陈本政[1]

（1. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 湖南湖大土木建筑工程检测有限公司, 湖南 长沙 410082）

摘要: 人工塑性铰在框架结构抗震研究中已经得到广泛应用, 其能够控制梁塑性铰出现的位置, 避免框架结构在地震中出现梁柱节点破坏而发生连续倒塌, 实现“强柱弱梁”的设计目标。一种新型起波钢筋构造的人工塑性铰为结构抗爆设计提供了新的思路。现有的结构静载试验表明, 起波钢筋兼具优异的变形性能和较强的极限承载力。采用简化混合建模的方法, 基于有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA, 对采用不同起波配筋方案的钢筋混凝土框架结构进行数值模拟。研究结果表明: 在爆炸荷载作用下, 起波配筋梁能有效地吸收冲击力, 降低支座反力, 推迟反力峰值出现时间, 保护梁柱节点, 将破坏限制在梁板构件, 从而防止结构发生连续倒塌。

关键词: 冲击荷载; 内部爆炸; 起波钢筋; 框架结构; 有限元分析

中图分类号: O347; TU352.1 **文献标志码:** A

钢筋混凝土材料被广泛应用于各类军用和民用建筑中, 针对钢筋混凝土的抗爆加固研究备受国内外学者重视。传统的混凝土抗爆措施有外贴钢板、外粘纤维增强复合材料（fiber reinforced polymer, FRP）、施加预应力等增强构件刚度, 设置耗能夹层结构（泡沫铝、波纹板等）以及外涂大变形加固材料等。目前, 结构抗爆研究大多集中在抵御结构的外部爆炸袭击方面, 针对结构内爆的试验研究相对较少。实际上, 在相同当量炸药下, 相比于结构的外部爆炸, 内部爆源对结构的威胁更大。内部爆炸时, 爆源与各构件之间的距离较近, 冲击波经过多次反射, 极易出现极端荷载, 并且不同于外部爆炸, 由于框架对空气的约束, 爆炸会产生更高的气体压力, 从而增加冲击波的正相位持续时间, 对结构造成更大的损伤。根据 FEMA（federal emergency management agency）的研究, 内部爆炸一般无法达到外部爆炸的炸药当量, 通常仅导致结构发生局部破坏[1]。因此, 如何保证局部破坏下结构不发生连续倒塌, 是结构抵御内部爆炸的研究课题之一。

人工塑性铰最初是基于抗震设计中“强柱弱梁”原则提出的, 其目的是保证震后塑性铰出现的位置远离梁柱节点, 保持结构的完整性。Feng 等[2] 提出了一种由普通钢筋弯扭构造而成的新型人工塑性铰, 通过钢筋拉伸试验得到其等效应力-应变曲线, 如图 1 所示。可以看出, 曲线主要有 4 个临界点: 第一屈服点、硬化点、第二屈服点和极限强度点, 起波钢筋的极限强度相较于平直钢筋无明显减小。进一步分析起波配筋梁静载试验数据发现: 相较于普通配筋梁, 不同起波位置的试件 S4（1/2 处起波）、S8（1/3 处起波）、S9（1/6 处起波）的破坏荷载均有所降低, 如图 2 所示; 试件 S8 的弯起部位位于剪跨范围, 其并未出现第二屈服点; 试件 S9 的起波位置距离支座过近, 起波钢筋并未过多参与梁的受力, 其破坏模式更接近平直配筋梁, 仅在起波位置出现少量裂缝; 试件 S2-2（FRP 增强, 1/2 处起波）则表现出与试件 S2-1（1/2 处起波）相近的破坏模式和较高的极限承载力。

樊源等[3]、刘思嘉等[4]、陈力等[5] 注意到起波钢筋优异的变形性能具有拉伸耗能的潜力, 将其与结构抗爆结合起来, 提出了将梁底部配筋弯折从而提升梁整体变形耗能性能的构造方法, 并给出了不同

* **收稿日期:** 2023-08-14; **修回日期:** 2023-09-06
基金项目: 国家重点研发计划（2016YFC0701405）
作者简介: 尹华伟（1972—）, 男, 博士, 副教授, 主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: yhwzzy@163.com

类型突加荷载下起波配筋梁的抗力动力系数显式计算公式；通过不同加载方式的起波配筋梁落锤试验，证实了在梁 1/3 处设置起波钢筋能有效降低冲击荷载作用下梁的支座反力，并推迟支反力峰值出现的时间；借助理论分析和冲击拉伸试验方法，研究了钢筋起波高度对起波钢筋动态拉伸性能的影响，并建立了起波矢高影响下的起波钢筋弹性极限强度动态增强因子（dynamic increase factor, DIF）计算模型。

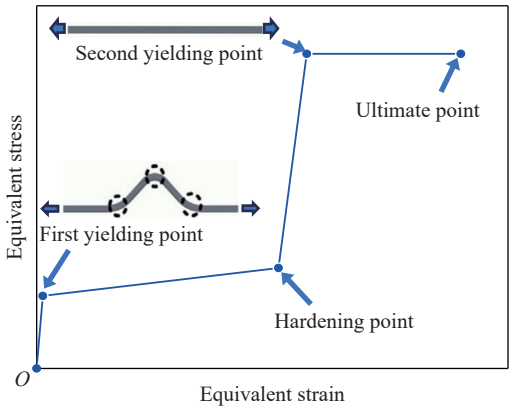


图 1　起波钢筋拉伸特性曲线[2]

Fig. 1　Kinked rebar tensile behavior curve[2]

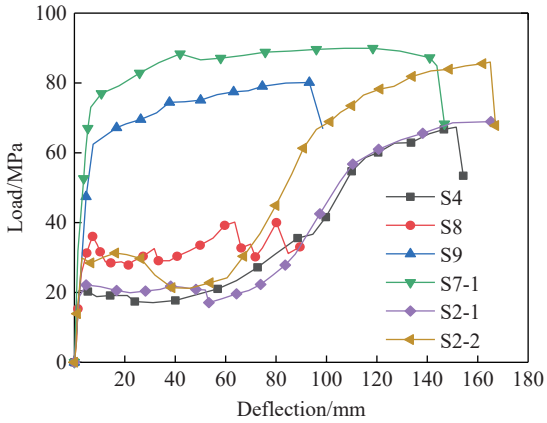


图 2　起波配筋梁的荷载-位移曲线[2]

Fig. 2　Kinked rebar beam load-deflection curves[2]

综合分析上述静载和冲击试验结果，可以发现：跨中起波配筋并环向包裹 FRP 的梁拥有较好的变形性能，且降低了跨中起波对梁的削弱作用；而 1/3 处起波配筋梁也拥有突出的耗能性。因此，本研究选用上述 2 种起波配筋工况，与采用普通配筋的框架结构进行对比，通过 ANSYS/LS-DYNA 软件对 3 种工况进行数值模拟，分析在局部内爆作用下采用不同起波配筋方案时框架结构的抗倒塌性能，以期为工程实际应用提供参考。

1　简化混合有限元建模方法

钢筋混凝土框架现场爆炸试验的成本高、操作难度大、安全性较低，且爆炸荷载作用下传感器损坏严重，获取有效的试验数据十分困难。因此，现有的框架结构爆炸试验较少，大多集中在结构外部爆炸试验以及小型试件的爆炸试验，在这种前提下，数值模拟方法得到了广泛应用。对于大型框架结构的爆炸试验，借助有限元软件 SAP2000，采用拆除构件法[6] 模拟结构构件失效导致的倒塌，能极大地缩短计算时间，但是这种方法也忽略了爆炸冲击波与结构构件之间的相互作用以及失效构件的残余承载力；而 ANSYS/LS-DYNA 在实现爆炸冲击与构件之间的作用时需要借助多材料任意拉格朗日-欧拉（multi material-arbitrary Lagrangian-Eulerian, MM-ALE）流固耦合算法，若使用常规的实体单元直接对足尺框架结构的内爆炸进行建模，会生成巨量的网格节点，导致软件计算效率非常低。

Mkrtychev 等[7]、Bulushev 等[8] 注意到，虽然 Solid 单元能够最大限度地反映混凝土材料的力学行为，但是过多的 Solid 单元会导致计算时间过长，为此，他们通过将 Solid 单元转化为 Beam 单元来解决，即在局部坐标系中将 Beam 单元截面划分积分区域，通过赋予各区域不同的材料，可以实现 Beam 单元近似代替 Solid 单元建模，并将数值模拟结果与试验结果进行比较，验证了该简化方法的可靠性。Lu 等[9]、Chen 等[10] 进一步提出了一种简化有限元建模方法，即对爆炸冲击波作用下的局部区域采用精细化建模，其他区域采用简化建模，成功复现了穆拉联邦大厦（MFB）的倒塌事故，并通过与 2 项不同的钢筋混凝土框架外部爆炸现场试验进行对比，验证了该方法的有效性。

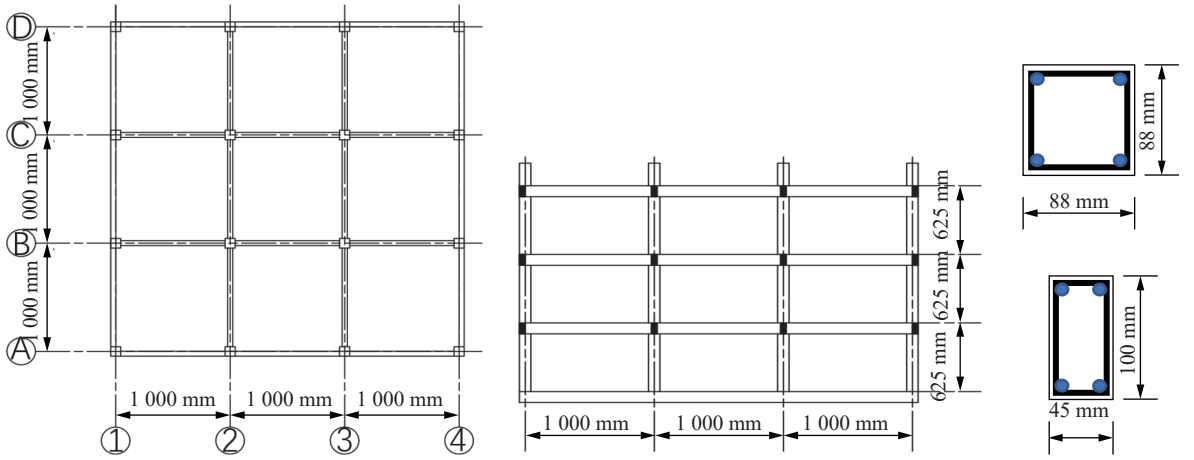
由于框架结构在内爆炸作用下多为局部构件的损伤，且冲击波对距爆源较远的构件影响不大。因此，对受爆炸影响的局部区域采用精细化建模，模拟冲击波与构件的相互作用，其他区域则采用简化建模，模拟结构整体的受力状态以及后续的倒塌，从而有效提高计算效率。为此，基于上述简化混合有限元建模方法，对起波配筋混凝土框架结构受内部爆炸影响下的抗爆性能进行研究。

2　框架内爆试验验证

2.1　缩尺框架试验概况

简化混合有限元建模法应用于框架承受外部爆炸的可行性已经得到验证，本节将对其运用于结构内部爆炸模拟的可行性进行研究，对高超等[11]开展的 1/8 缩尺框架内爆试验进行模拟，比较模拟与试验得到的破坏模式。

试件构造如图 3 所示，参照文献 [11] 中给出的模型数据，结合简化混合有限元法进行建模。混凝土采用微粒配合比，抗压强度 f_c=36 MPa；纵筋为直径 6 mm 的 HRB335 带肋钢筋，箍筋为直径 2 mm 的镀锌钢丝，屈服强度均取 f_y=320 MPa。采用沙袋堆载的方式模拟结构上部荷载，楼面荷载为 2 kN/m²，屋面荷载为 8 kN/m²。



(a) Floor plan　　(b) Elevation　　(c) Column and beam

图 3　试件构造

Fig. 3　Specimen structure

选取工况 3 的前 2 次爆炸试验进行数值模拟，根据文献 [11]，炸药的缩尺比例为 1∶512，即当量为 0.4 和 1.0 kg 的 TNT 炸药在一层角部开间中部距离地面 100 mm 处先后进行 2 次起爆。

2.2　简化混合有限元建模

对缩尺框架角部开间一层半的范围采用精细化建模，混凝土采用单点积分六面体单元，钢筋采用 Hughes-Liu 积分梁单元，由*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义钢筋与混凝土之间的黏结。混凝土材料选取*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3（K&C 模型），该模型可以定义混凝土的动态增强因子，以考虑应变率的影响，采用欧洲国际混凝土委员会（CEB）[12]给出的动态压缩关系式及 Malvar 等[13]改进的动态拉伸关系式。引入侵蚀关键字*MAT_ADD_EROSION 模拟混凝土的损伤，由于内爆炸作用下炸药的比例距离较小，材料会快速变形达到峰值应力并维持一段时间而不迅速下降，破坏往往是由于峰值应力滞留较长时间引起的[14]，当单元瞬时应变达到侵蚀准则时，将会被不可逆地删除，考虑到应力滞留的影响，通过试算，将混凝土侵蚀最大主应变设为 0.2。动态抗压强度增强因子 δ_c 和动态抗拉强度增强因子 δ_t 分别表示为

$$\delta_c=\begin{cases}\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_{cs}}\right)^{1.026\alpha} & \dot{\varepsilon}_d\leqslant 30\ \mathrm{s}^{-1}\\ \gamma\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_{cs}}\right)^{1/3} & \dot{\varepsilon}_d>30\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases}\tag{1}$$

$$\delta_{\mathrm{t}}=\begin{cases}\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}}{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{ts}}}\right)^{\delta} & \dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}\leqslant 1\ \mathrm{s}^{-1}\\ \beta\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}}{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{ts}}}\right)^{1/3} & \dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}>1\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases}\tag{2}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{cs}}$为混凝土参考压应变率，取值为$3\times10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}$；$\lg\gamma=6.156\alpha-2$，$\alpha=1/(5+9f_{\mathrm{cs}}/f_{\mathrm{c0}})$；$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{ts}}$为混凝土参考拉应变率，取值为$10^{-6}\ \mathrm{s}^{-1}$；$\lg\beta=6\delta-2$，$\delta=1/(1+8f_{\mathrm{cs}}/f_{\mathrm{c0}})$，$f_{\mathrm{c0}}=10$ MPa，f_{cs}为混凝土静态抗压强度；$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}$为当前应变率。

钢筋材料选取*MAT_PLASTIC_KINMATIC 描述，通过 LS-DYNA 内置的 Cowper-Symonds[15] 模型描述材料的应变率效应，动态增强因子表示为

$$\delta_0=1+(\dot{\varepsilon}/C)^{\frac{1}{P}}\left(\sigma_0+\beta E_{\mathrm{p}}\varepsilon_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{p}}\right)\tag{3}$$

式中：$\dot{\varepsilon}$为应变率；参数 C、P 分别取 40 s^{-1}和 5；不考虑钢筋的随动硬化，β取 0；σ_0为钢筋的屈服应力；E_{p}为塑性硬化模量；$\varepsilon_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{p}}$为有效塑性应变。

细化区钢筋和混凝土材料参数如表 1 所示，其中：ρ_0、μ、E 分别为密度、泊松比及弹性模量，ε_{f}为钢筋失效应变。

表 1　钢筋和混凝土材料参数

Table 1　Rebar and concrete material parameter

Concrete (K&C)			Rebar (*MAT_PLASTIC_KINMATIC)						
ρ_0/(kg·m^{-3})	μ	f_{c}/MPa	ρ_0/(kg·m^{-3})	μ	E/GPa	f_{y}/MPa	C/s^{-1}	P	ε_{f}
2 400	0.2	36	7 800	0.2	206	320	40	5	0.14

角部开间以外的区域采用简化建模，将梁柱实体单元用 Hughes-Liu 积分梁单元替换，结合关键字*INTEGRATION_BEAM，通过归一化局部坐标系（$-1<s<1$、$-1<t<1$）将截面积分区域划分为无约束混凝土、箍筋约束混凝土和纵筋 3 个区域，并通过*SECTION_BEAM 控制单元截面尺寸。以柱截面为例，如图 4 所示，将不同区域赋予不同的材料以实现单元的转化。

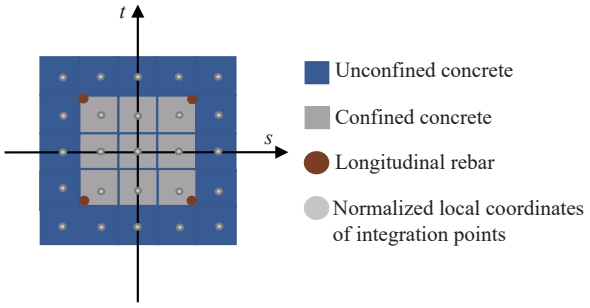


图 4　简化柱截面示意图

Fig. 4　Schematic diagram of simplified column

通过材料关键字*MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION 将无约束混凝土、箍筋约束混凝土、纵筋的拉压屈服应力与塑性应变曲线分别赋予不同的区域。纵筋的应力-应变采用单调加载无屈服点钢筋的有效应力-应变曲线定义

$$\sigma_{\mathrm{p}}=f_{\mathrm{y,k}}+k(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_{\mathrm{y}})\qquad \varepsilon_{\mathrm{y}}<\varepsilon_{\mathrm{s}}\leqslant\varepsilon_{\mathrm{u}}\tag{4}$$

式中：$f_{\mathrm{y,k}}$为钢筋屈服强度标准值，k为硬化段斜率，ε_{y}为钢筋屈服应变，ε_{u}为钢筋峰值应变，ε_{s}为钢筋应变。

简化区无约束混凝土的单轴应力-应变曲线参照规范 GB 50010—2010[16] 定义；箍筋约束混凝土抗压强度参照 Mander 等[17] 建议的公式进行修正

$$f'_{\mathrm{cc}}=f'_{\mathrm{c0}}\left(-1.254+2.254\sqrt{1+\frac{7.94f'_{\mathrm{l}}}{f'_{\mathrm{c0}}}}-\frac{2f'_{\mathrm{l}}}{f'_{\mathrm{c0}}}\right)\tag{5}$$

式中：f'_{c0}为无约束混凝土的抗压强度，f'_{l}为箍筋影响下的混凝土围压。

对于简化区的楼板，采用 Belytschko-Tsay 积分形式的壳单元代替实体单元，由*PART_COMPOSITE 实现壳单元的分层布置并控制各层厚度与位置，如图 5 所示。外层无约束混凝土采用材料*MAT_CONCRETE_EC2 描述，内层钢筋混凝土采用*MAT_HYSTERETIC_REINFORCEMENT 定义混凝土 2 个

方向的配筋率(FRACX、FRACY)，模拟钢筋混凝土的力学行为。简化区和细化区通过*NODAL_RIGID_BODY 建立刚性连接，实现两部分位移和力的传递。

在细化区设置空气域，空气和 TNT 炸药采用共节点法建模，材料及状态方程参数列于表 2 和表 3，其中：C_0～C_6 为空气材料常量，E_0 为单位体积内能，V_0 为相对体积，A、B、R_1、R_2、ω为状态方程参数，D 为炸药爆速，p_{CJ} 为炸药爆压。

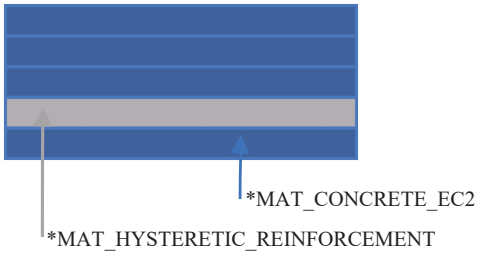


图 5　简化分层板示意图

Fig. 5　Schematic diagram of simplified layering slab

表 2　空气材料参数

Table 2　Air material parameters

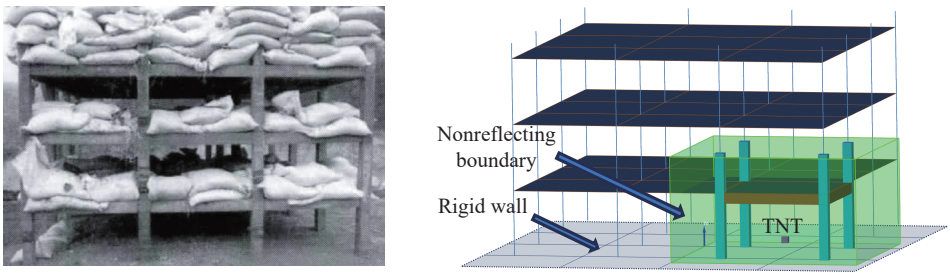
ρ_0/(kg·m^{-3})	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/(J·m^{-3})	V_0
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^5	1

表 3　TNT 材料参数

Table 3　TNT material parameters

ρ_0/(kg·m^{-3})	D/(m·s^{-1})	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/(J·m^{-3})	V_0
1 630	6 930	21	373.8	3.747	4.15	0.9	0.35	7×10^9	1

空气边界设置为无反射边界，通过关键字*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 实现爆炸冲击波与构件间的流固耦合；将地面设置为无限刚性，由*RIGID WALL 描述。有限元模型如图 6 所示。



(a) Experiment model　　(b) Numerical model

图 6　1/8 缩尺模型

Fig. 6　1/8 scale model

在局部内爆作用下，结构倒塌主要由构件局部损伤后的内力重分布导致。对于自重较大的模型，采用 LS-DYNA 直接施加重力荷载会使模型应力短时间内变化过快，从而导致计算结果异常，因此，重力采用显式动态松弛法(*DYNAMIC_RELAXATION)施加，将静力学问题转化为显式动力学问题近似求解。通过对节点添加人工阻尼降低结构动能，当模型当前动能与峰值动能的比值收敛到 0.01 时结构静载施加完毕，如图 7 所示，将其作为结构受内爆前的初始状态。

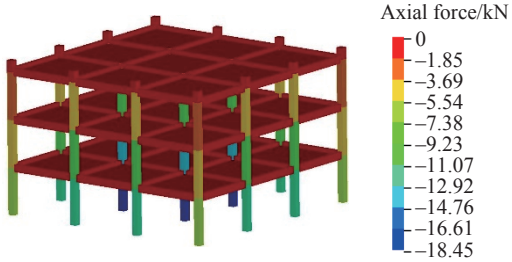


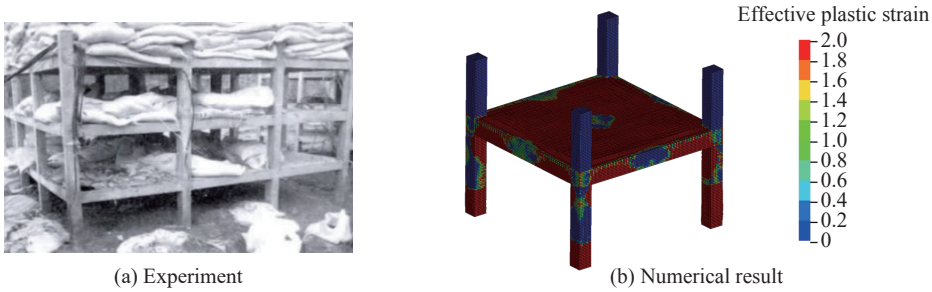
图 7　数值模型重力

Fig. 7　Gravity of numerical model

2.3　数值模拟与试验结果对比

利用多次重启动的方法实现对模型 2 次内部爆炸以及倒塌的模拟：通过关键字*STRESS_INITIALIZATION 将前一阶段模型的所有信息传递到后一阶段中，待爆炸产生的冲击波与结构完全作用后，删去空气炸药网格，并加入全局质量阻尼（*DAMPING_GLOBAL）模拟结构在内力重分布作用下的倒塌破坏。

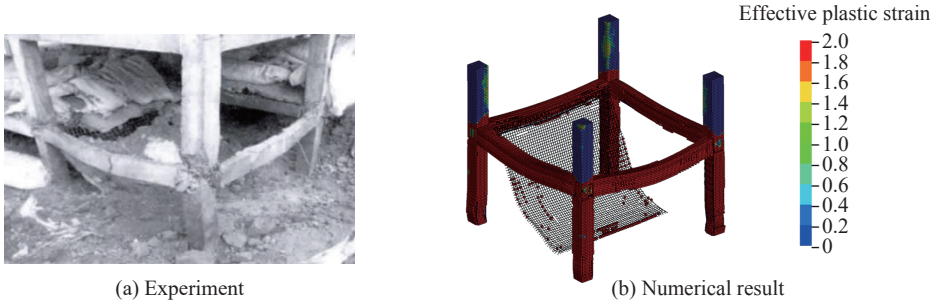
由于内部爆炸试验中传感器受损严重，现有文献中并未记录下有效数据，因此，仅对破坏模式和破坏特征进行比较。如图 8 所示，0.4 kg 当量 TNT 炸药爆炸后，角柱附近楼板出现起鼓但并未破坏，相比于试验，高估了楼板强度；梁柱整体上完整，未出现明显破坏，与试验现象一致。如图 9 所示，1.0 kg 当量 TNT 炸药爆炸后，楼板被破坏，大量单元达到侵蚀临界值被删除，与试验现象接近；边梁向外侧发生变形，且多处出现裂缝，梁柱节点混凝土发生剥落，但相较于试验破坏略轻；由于缩尺模型的竖向荷载较小，因此，结构并未发生倒塌，与试验结果相同。



(a) Experiment　　(b) Numerical result

图 8　0.4 kg TNT 起爆

Fig. 8　0.4 kg TNT explosion



(a) Experiment　　(b) Numerical result

图 9　1.0 kg TNT 起爆

Fig. 9　1.0 kg TNT explosion

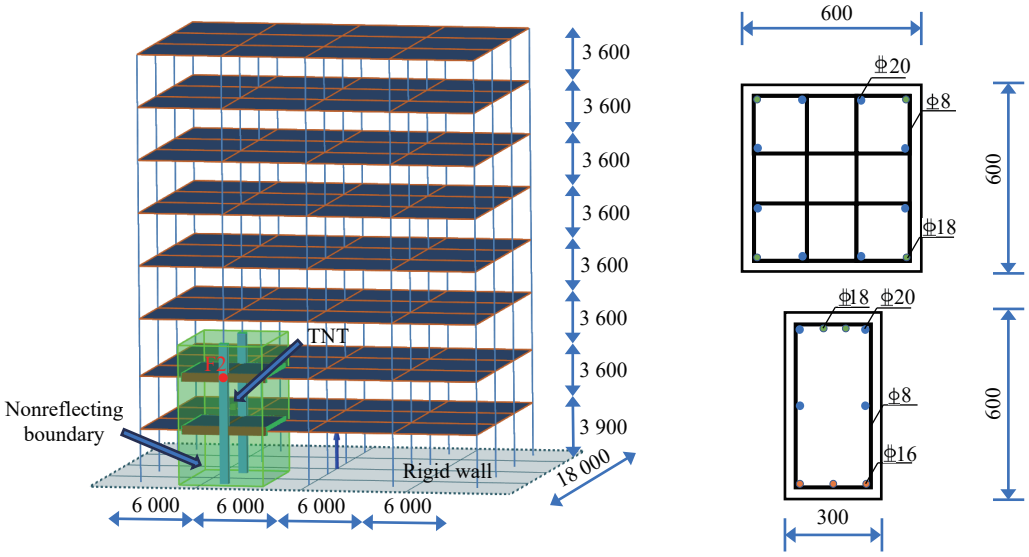
考虑到数值模拟无法复现爆炸试验现场的温度、湿度、装药方式等影响炸药性能的因素，且软件内置的流固耦合算法在模拟冲击波的多次反射与结构的作用中存在一定的误差，因此，模拟结果的误差总体上在可接受范围内。

3　起波配筋足尺框架内部爆炸模拟

3.1　足尺框架模型设计

为研究起波配筋框架抵御内部爆炸的性能，根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》[16]、JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》[18]、GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》[19] 设计了一栋 8 层简易框架结构。如图 10 所示，框架首层高 3.9 m，2 层及以上层的层高为 3.6 m，纵横向跨度均为 6 m，混凝土强度等级为 C40，梁柱构件截面统一配筋。板厚 100 mm，配筋率 0.6%，采用双层配筋网格，所有构件保护层厚度均为 20 mm，主筋均采用 HRB400 钢筋，f_y=400 MPa；箍筋采用 HRB335 钢筋，f_y=320 MPa，箍筋间距为 200 mm，加密区为 100 mm。楼面恒活荷载按 0.5 和 2.0 kN/m²组合；不考虑填充墙的作用，将

其折算为均布荷载施加到框架梁上，内外墙荷载分别为 8 和 10 kN/m，重力荷载由*LOAD_GRAVITY 施加。上述所有荷载均视为静力荷载，由动态松弛法施加到结构上。



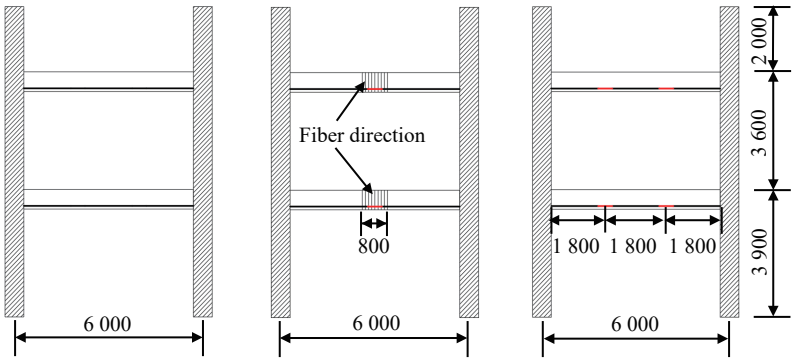
(a) Frame structure　　(b) Column and beam

图 10　框架结构数值模型(单位：mm)

Fig. 10　Numerical model of frame structure (Unit: mm)

由于框架结构的边柱相较于中柱的侧向约束更少，在受到冲击荷载作用时，其破坏往往比中柱更加严重，综合分析 FEMA 列举的 10 种恐怖袭击炸药等级，将炸药当量设为 100 kg，并置于结构角部开间梁上方 500 mm 处引爆。

取角部的部分开间进行细化，细化区截面如图 11 所示，综合考虑第 2 节中对静载试验结果的分析，拟采用 3 种起波配筋方案：普通配筋、跨中起波配筋并环向包裹单层碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)、梁 1/3 处起波配筋。对于 CFRP，采用完全积分的壳单元描述，假设其与混凝土表面完美结合，采用共节点法建模，材料参数如表 4 所示，其中：E_A、E_B 为纵向及横向的弹性模量，μ_{BA}、μ_{CA}、μ_{CB} 为泊松比，G_{AB}、G_{BC}、G_{CA} 为剪切模量，X_C、X_T 为纵向的抗压和抗拉强度，Y_C、Y_T 为横向的抗压和抗拉强度，S_C 为抗剪强度，CRIT 为固定常数。



(a) Normal rebar　　(b) 1/2 kinked rebar　　(c) 1/3 kinked rebar

图 11　等效起波钢筋位置(单位：mm)

Fig. 11　Equivalent kinked rebar location (Unit: mm)

表 4　CFRP 材料参数[20]

Table 4　Material parameters of CFRP[20]

ρ_0/(kg·m^{-3})	E_A/GPa	E_B/GPa	μ_{BA}	μ_{CA}	μ_{CB}	G_{AB}/GPa	G_{BC}/GPa
1 600	130	9	0.021	0.021	0.3	7.620	7.62
G_{CA}/GPa	X_C/MPa	X_T/MPa	Y_C/MPa	Y_T/MPa	S_C/MPa	CRIT	
7.62	1 450	2 080	180	87	104	54	

由于 Beam 单元弯起建模并不能充分体现起波钢筋在梁中的力学特性，因此，采用等效替代的方式[21]：如图 12 所示，将文献 [2] 中给出的 HRB400 起波钢筋等效应力-应变曲线赋予跨中直线钢筋单元，等效建立起波钢筋模型，其中起波钢筋的长度与试验中钢筋标距长度一致，取 200 mm。

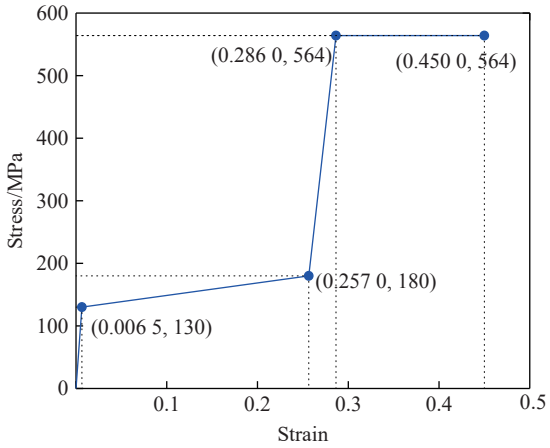
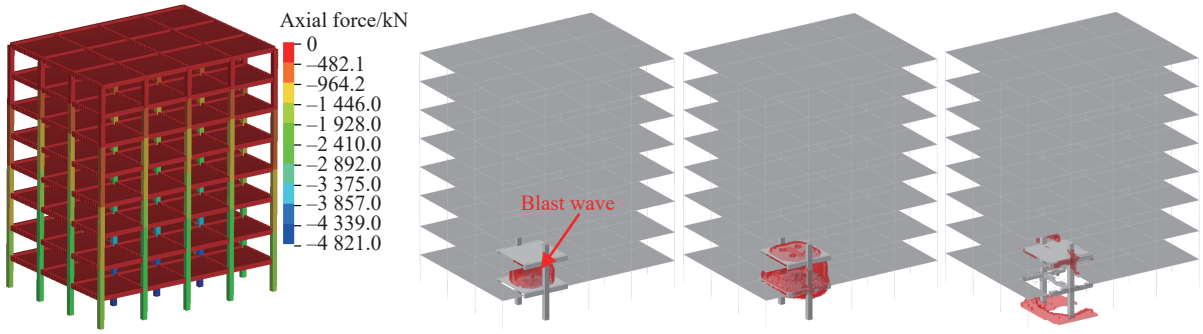


图 12　HRB400 起波钢筋的等效应力-应变关系

Fig. 12　Equivalent stress-strain relation of HRB400 kinked rebar

3.2　加载过程

通过显式动态松弛施加静力荷载完毕后重置计算时间进入瞬态分析阶段，爆炸过程持续 4 ms，模拟重力重分布阶段持续 200 ms。图 13 为框架结构重力加载完成后柱的整体轴力状态及爆炸冲击波作用过程：起爆后 0 ms，重力荷载加载完毕，框架结构竖向荷载分布均匀；起爆后 1 ms，冲击波开始作用于框架柱及上部框架梁；起爆后 2 ms，一层楼板被击穿，冲击波向下部空间释放并持续作用于结构；起爆后 4 ms，冲击波沿无反射边界向外部释放，与结构的作用基本结束。



(a) Axial force (0 ms)　(b) 1 ms　(c) 2 ms　(d) 4 ms

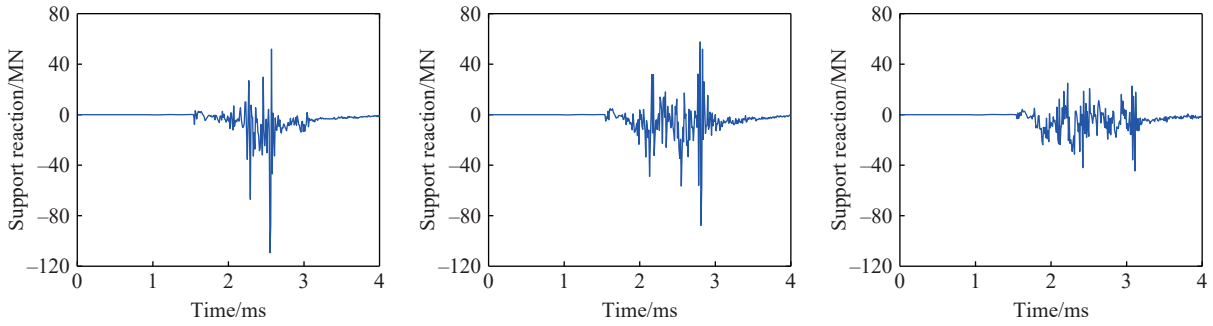
图 13　框架结构加载阶段

Fig. 13　Frame structure loading phase

3.3　结果与讨论

通过后处理软件 LS-PREPOST 提取炸药下部框架梁的支座反力时程曲线、最终位移曲线以及测点 F2 的竖向位移时程曲线，分析起波配筋梁的耗能性以及对梁柱节点的保护性。

如图 14 所示，冲击荷载的作用持续约 1.5 ms，其中平直配筋框架梁支座反力峰值为 109.0 MN、1/3 处起波配筋框架梁支座反力峰值为 87.7 MN、环向包裹 CFRP 的跨中起波配筋框架梁支座反力峰值为 44.5 MN，起波配筋工况下的支座反力峰值相较于平直配筋工况分别降低了 19.5% 和 59.1%；支座反力峰值出现时间也由 2.55 ms 推迟至 2.81 和 3.11 ms。这是因为相较于普通钢筋，起波钢筋拥有较低的弹性阶段承载力和不变的极限承载力，在冲击荷载作用下能快速达到第一屈服点，进入拉伸阶段发生塑性变形，从而吸收冲击力，宏观表现为降低支座反力峰值、推迟反力峰值出现时间。

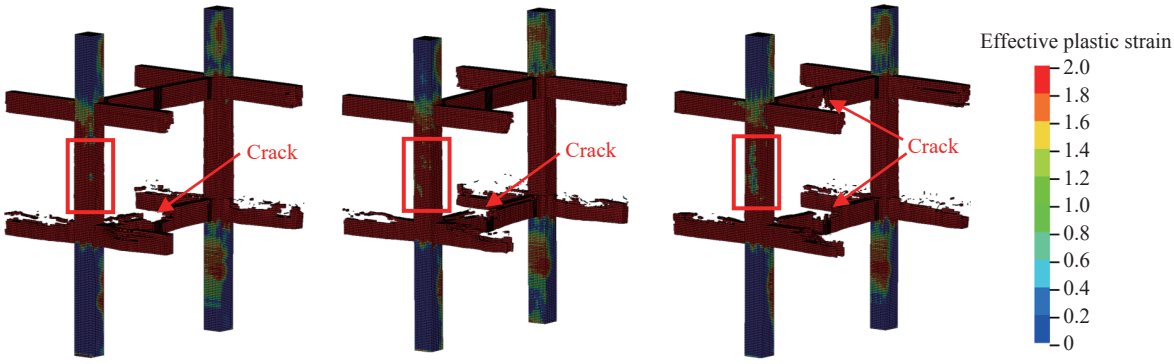


(a) Normal rebar　(b) 1/3 kinked rebar　(c) 1/2 kinked rebar

图 14　梁柱节点支座反力

Fig. 14　Support reaction of beam-column joint

截取 3 种工况细化区的破坏情况进行比较，如图 15 所示。与图 15(a)、图 15(b) 相比，图 15(c) 中环向包裹 CFRP 的跨中起波配筋工况起爆点上下两侧梁跨中均发生严重破坏，相较于其他 2 种配筋方案，柱的有效塑性应变明显降低，支反力峰值也最低。进一步分析可知，出现这种现象的原因是在跨中设置起波钢筋会削弱梁的承载力，环向包裹的 CFPR 并不能有效弥补这种削弱，上侧梁在距离爆源较远的情况下也发生了变形吸能，从而导致其发生严重破坏。如图 15(b) 所示，将起波配筋位置移动到梁端 1/3 处后，起爆点上侧框架梁不再破坏，且仍能够降低支反力峰值。



(a) Normal rebar　(b) 1/3 kinked rebar　(c) 1/2 kinked rebar

图 15　框架细化区的破坏情况

Fig. 15　Detailed damage of the frame refined region

此次模拟中，100 kg 的炸药内爆对结构造成的局部损伤并未引起主要竖向承重构件失效，3 种工况下的框架结构均未发生倒塌。图 16 给出了炸药下部框架梁爆后的位移曲线，其中普通配筋框架梁的跨中竖向位移为 105 mm，1/3 处起波配筋与 1/2 处起波配筋并包裹 CFRP 框架梁的跨中竖向位移分别

为 115 和 121 mm，分别增加了 9.5% 和 15.2%。分析可知，跨中设置起波钢筋能充分发挥其拉伸性能，最大程度地利用起波钢筋的耗能性，而将起波钢筋位置移动到梁端 1/3 处时，其拉伸程度降低，跨中竖向位移峰值随之减小。通过对比图 17 中 3 种配筋工况下结构在重力重分布阶段测点 F2 的竖向位移时程曲线，发现采用起波配筋的框架结构位移更小，侧面说明了起波配筋能有效吸收冲击力，降低框架柱受到的初始损伤，使其拥有更高的残余承载力，减小结构在重力重分布阶段的竖向位移，防止结构发生局部倒塌。

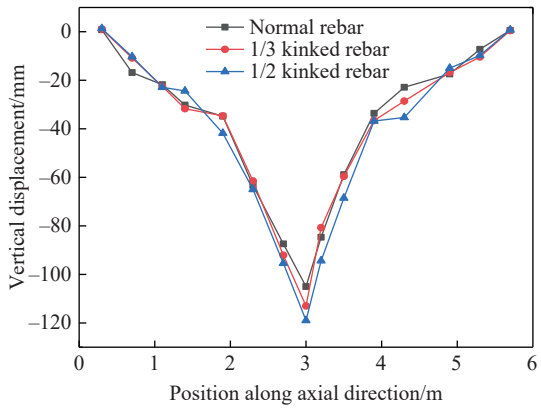


图 16　框架梁爆炸后的竖向位移

Fig. 16　Post-explosion vertical displacement of beam

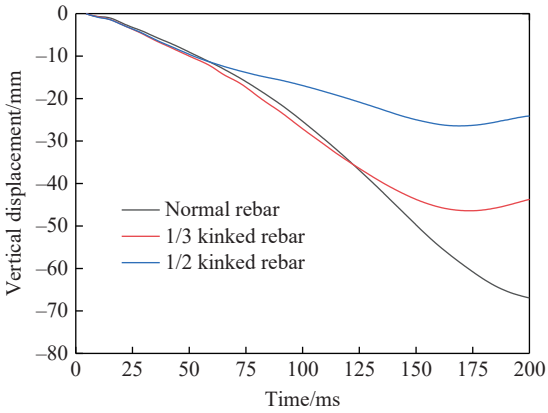


图 17　测点 F2 的竖向位移

Fig. 17　Vertical displacement of measuring point F2

4　结　论

采用简化混合有限元方法建立了足尺框架模型，分析了不同起波配筋方案框架结构抵御内部爆炸的性能，得到以下主要结论。

(1) 在内爆作用下，跨中起波配筋吸收冲击力的效果最明显，但由于跨中设置起波钢筋会显著削弱梁的承载能力，环向包裹纤维增强复合材料无法有效弥补跨中起波钢筋造成的强度损失，导致结构受内爆作用时距爆源较远的梁也会发生破坏。

(2) 梁端 1/3 处起波配筋的框架梁在内爆作用下，仍然能够有效降低支座反力峰值，起到耗能的作用，且距爆源较远的梁不会被破坏。

(3) 起波配筋梁能够有效地吸收爆炸冲击力、降低支座反力、推迟支座反力峰值出现时间，从而保护框架柱，并且能够有效地防止框架结构在局部内爆作用下由于主要竖向承重构件失效而导致的结构局部倒塌。

(4) 综合考虑耗能性以及承载能力，框架结构受内爆作用下，起波钢筋设置于梁端 1/3 处时，其性能优于设置于跨中。

参考文献：

[1] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Primer to design safe school projects in case of terrorist attacks and school shootings [M]. Washington: Building Performance Assessment Team, 2012.

[2] FENG P, QIANG H, QIN W, et al. A novel kinked rebar configuration for simultaneously improving the seismic performance and progressive collapse resistance of RC frame structures [J]. Engineering Structures, 2017, 147: 752–767.

[3] 樊源, 陈力, 任辉启, 等. 起波配筋 RC 梁抗爆作用机理及抗力动力系数的理论计算方法 [J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(3): 035102.
FAN Y, CHEN L, REN H Q, et al. Blast-resistant mechanism of RC beam with kinked rebar and calculation method of dynamic resistance coefficient [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(3): 035102.

[4] 刘思嘉, 陈力, 曹铭津, 等. 起波钢筋高速动态拉伸力学性能研究 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(5): 053101.
LIU S J, CHEN L, CAO M J, et al. Study on mechanical properties of the kinked rebar under high speed dynamic tension [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(5): 053101.

[5] 陈力, 任辉启, 樊源, 等. 强动载作用下起波配筋梁抗力性能的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 1–8.
CHEN L, REN H Q, FAN Y, et al. Experimental study on the resistance of RC beam with kinked rebar under severe dynamic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 1–8.

[6] 李世强. 爆炸荷载下 RC 框架结构连续性倒塌数值分析 [D]. 内蒙古: 内蒙古科技大学, 2017.
LI S Q. Numerical analysis of progressive collapse of RC frame structure under blast loading [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2017.

[7] MKRTYCHEV O, DUDAREVA M S, ANDREEV M. Verification of the reinforced concrete column bar model based on the test results [C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018, 251: 04014.

[8] BULUSHEV S V, DUDAREVA M S. Nonlinear models of reinforced concrete beam elements with the actual reinforcement [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 753(3): 032040.

[9] LU J X, WU H, FANG Q. Progressive collapse of murrah federal building: revisited [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104939.

[10] CHEN G Q, LU J X, WU H. Dynamic behavior and retrofitting of RC frame building under vehicular bomb explosion [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143: 106925.

[11] 高超, 宗周红, 伍俊. 爆炸荷载下钢筋混凝土框架结构倒塌破坏试验研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 9–20.
GAO C, ZONG Z H, WU J. Experimental study on progressive collapse failure of RC frame structures under blast loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 9–20.

[12] Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP model code 1990: design code [M]. London: Thomas Telford Publishing, 1993.

[13] MALVAR L J, CRAWFORD J E. Dynamic increase factors for concrete [R]. Naval Facilities Engineering Service Center, 1998.

[14] 陈肇元. 爆炸荷载下的混凝土结构性能与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
CHEN Z Y. Performance and design of concrete structures under explosive loads [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.

[15] HALLQUIST J O. LS-DYNA keyword user’s manual r11 [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2018.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.

[17] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804–1826.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Code for seismic design of building: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.

[20] 张梦琳. FRP 加固人防墙抗冲击性能试验研究与有限元分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
ZHANG M L. Experimental study and finite element analysis on impact resistance of civil air defense wall strengthened with FRP [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.

[21] 高蒙. 配置局部起波钢筋的混凝土梁受力性能试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
GAO M. Experimental study on mechanical behavior of concrete beams reinforced with V-shaped rebar [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

Numerical Simulation on Internal Explosion Resistance of Concrete Frame Structures with Kinked Rebar

YIN Huawei[1,2], CHEN Benzheng[1]

（1. *College of Civil Engineering*, *Hunan University*, *Changsha* 410082, *Hunan*, *China*;
2. *Civil Engineering Inspection and Test Limited Company of Hunan University*, *Changsha* 410082, *Hunan*, *China*）

Abstract: Artificial plastic hinges have been widely used in the seismic research of frame structures, which can control the location of the beam plastic hinges and avoid the continuous collapse of the frame structure due to the damage of beam-column joints in earthquakes. The design goal of “strong column weak beam” can be achieved. An artificial plastic hinge with kinked rebar provides a new idea for structural blast resistance. Established structural static load tests have shown that the kinked rebar has excellent deformation performance. The ultimate load capacity of beam with kinded rebar is not reduced. With the software ANSYS/LS-DYNA and the hybrid finite element modeling approach, a numerical simulation study of reinforced concrete frame structures with different kinked rebar schemes was carried out. The results showed that the beam with kinked rebar can absorb the impact energy, reduce the support reaction, delay the peak reaction force, protect the beam-column joints, limit the damage to beam-slab members, and prevent the continuous collapse of frame structre.

Keywords: impact loading；internal explosion；kinked rebar；frame structure；finite element analysis