

文章编号: 1001-1455(2013)06-0667-06

内爆荷载作用下钢筋混凝土安全壳的非线性响应分析*

赵春风, 陈健云

(大连理工大学土木工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 安全壳内部爆炸和恐怖袭击可能导致放射性物质的泄露, 会造成严重的灾难。运用非线性有限元软件 LS-DYNA, 采用分离式建模方法和流构耦合算法, 建立钢筋混凝土安全壳有限元模型, 对钢筋混凝土安全壳遭受内部爆炸进行了数值分析, 研究了内爆炸冲击波作用下安全壳内的动力响应, 并与 Henrych 公式和 TM5-1300 结果进行了比较。结果表明, 在比例距离为 $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、爆炸源距基底 48 m 的内爆作用下, 数值模拟能保持较好的精度。

关键词: 爆炸力学; 动力响应; 有限元方法; 钢筋混凝土安全壳; 内部爆炸; 比例距离

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

钢筋混凝土安全壳是核电站的第 1 道防线, 对防止核电站在遭受内部事故或外部恐怖袭击起着重要的作用。特别是, 近年来针对重要建筑和设施的恐怖袭击时有发生, 因此评估和研究核电站在爆炸冲击作用下的安全性就变得非常有意义。

过去几十年来, 已经有许多学者对核电站的安全壳进行了研究。B. Reborá 等^[1], M. Cervera^[2] 和 H. Abbas^[3] 都对核电站外层安全壳遭受飞机撞击进行了研究, 但这些研究仅仅关注安全壳上炸药爆炸的效果, 而没有对安全壳的动力响应进行研究。A. K. Pandey 等^[4] 研究了钢筋混凝土安全壳遭受外部不同距离爆炸时安全壳的非线性响应; 文献[5-10]深入研究了爆炸冲击波在钢筋混凝土板、安全壳和其他介质中的传播规律, 同时提出了一些经验公式; H. T. Hu 等^[11] 利用 ABAQUS 有限元软件研究了 Maanshan 核电站预应力安全壳的极限承载能力和它的破坏模式; Bao Xiao-li 等^[12] 运用 LS-DYNA 非线性有限元软件数值模拟了钢筋混凝土塔器在近距离爆炸冲击的动力响应和残余强度; 王天运等^[13-14] 建立了钢筋混凝土分离式有限元模型, 对不同着靶速度的弹丸侵彻预应力混凝土安全壳的过程进行了数值模拟, 讨论并分析了质点杆模型在安全壳预应力混凝土结构中的应用; 刘云飞等^[15] 和申祖武^[16] 研究了安全壳在遭受弹药内部爆炸时结构的薄弱部位及其应力集中现象。

鉴于目前的研究大多集中于安全壳受导弹、飞机恐怖袭击和地震等作用下的可靠性分析, 很少对安全壳内部爆炸进行研究。本文中采用非线性动力有限元软件 LS-DYNA, 对钢筋混凝土安全壳在内部爆炸荷载作用下的动力响应进行分析, 并与经验公式进行比较。

1 计算模型和材料参数

1.1 有限元模型

安全壳由内径 40 m 的圆柱体和半球形穹顶组成, 筒体高 48 m、壁厚 1.1 m, 穹顶壁厚 0.9 m, 安全壳的总体高度为 68.9 m。在水平角 0° 和 180° 处外设 2 个扶壁柱。安全壳的净自由容积大于 $60\,000 \text{ m}^3$, 设计内压为 0.4 MPa, 采用 C50 混凝土。安全壳坐落在 6.5 m 厚的基础地板上, 底板的厚度约为壁厚的 6 倍, 由于安全壳的孔洞周围采取了许多的加固措施, 且为了研究方便, 模型中采取了未

* 收稿日期: 2012-06-08; 修回日期: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51138001); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110041110012)

作者简介: 赵春风(1983—), 男, 博士研究生。

考虑孔洞的模型,安全壳的底部为固支。TNT 炸药位于安全壳基底上方 48 m 处,安全壳的内部爆炸示意图如图 1 所示。

利用 LS-DYNA 软件,采用分离式模型建立钢筋混凝土安全壳的有限元模型。安全壳的混凝土和钢筋都采用 Lagrange 单元,空气和炸药采用 Euler 单元,炸药和空气采用多物质材料 ALE 单元。混凝土和钢筋通过共节点进行耦合,实现钢筋和混凝土的协同变形。

由于结构的对称性,采用四分之一结构进行简化运算。安全壳的混凝土结构、炸药、空气采用 solid 164 单元、钢筋采用 beam 161 单元建立有限元模型,对称平面上采用对称边界条件。对 3 种不同大小的网格尺寸的计算结果与 TM5-1300 数据进行对比,结果如图 2 所示。经过简化,四分之一有限元模型的单元 360 256 个,节点 388 501 个,有限元模型如图 3。计算时间步采取计算文件 message 中的临界时间步,确保计算过程可靠。

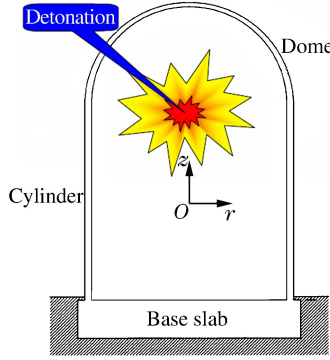


图 1 安全壳内部爆炸

Fig.1 Schematic diagram of containment under internal blast

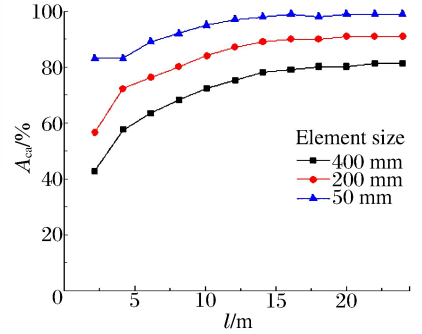


图 2 网格尺寸对计算精度的影响

Fig.2 Influence of element size on calculation accuracy for overpressure

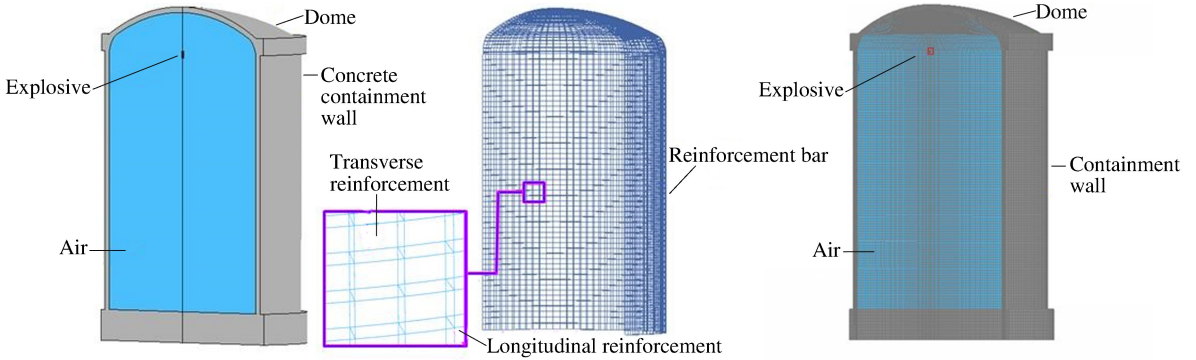


图 3 钢筋混凝土安全壳有限元模型

Fig.3 Finite element model of reinforcement concrete containment

1.2 材料模型

1.2.1 炸药

采用高能炸药爆轰材料模型模拟炸药的爆轰,其 JWL 状态方程为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \tag{1}$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为常数,由圆筒实验得到的。 E 为质量比内能, $v = \rho_0 / \rho$ 为相对体积, ρ_0 是炸药的初始密度^[1,17-19]。炸药密度 1.63 g/cm³,爆速 6.93 km/s,爆轰压力 21.0 GPa, $A = 373.8$ GPa, $B = 2.747$ GPa, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.90$, $\omega = 0.35$, $E = 4.29$ MJ/kg。

1.2.2 空气

空气的爆轰压力采用空材料 NULL 模型和 LINEAR_POLYNOMIAL 线性多方状态方程描述

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \tag{2}$$

式中: E_0 为初始能量密度, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, ρ 为质量密度, $C_i (i = 1 \sim 6)$ 为系数;描述空气时状态方程可以简化为 Gamma 定律, $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0.4$, $E_0 = 250$ kJ/kg。

1.2.3 安全壳

安全壳的钢筋混凝土材料采用 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (HJC) 模型描

述,此模型能模拟大应变、高应变率、高压效应。HJC 模型的强度用规范化等效应力进行描述: $\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}] (1 + C \ln \dot{\epsilon})$, 其中 $\sigma^* = \sigma/f'_c$, 为等效应力与静态屈服强度之比; $p^* = p/f'_c$, 为量纲一压力; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, 为量纲一应变率。损伤因子 $D(0 \leq D \leq 1)$ 由等效塑性应变和塑性体积应变累加得到: $D = \sum \frac{\Delta\epsilon_p + \Delta\mu_p}{\epsilon_{f,p} + \mu_{f,p}}$, 其中 $\Delta\epsilon_p$ 为等效塑性应变增量, $\Delta\mu_p$ 为等效体积应变增量, $\epsilon_{f,p}$ 、 $\mu_{f,p}$ 分别为材料断裂时的等效塑性应变和体积应变。 $f(p) = \epsilon_{f,p} + \mu_{f,p} = D_1 (p^* + T^*)^{D_2}$ 为常压 p 下材料断裂时的塑性应变, 其中 p^* 与 T^* 为规范化压力与材料所能承受的规范化最大拉伸静水压力, D_1 和 D_2 为损伤常数。具体计算参数见表 1, 其中 p_{crush} 、 μ_{crush} 、 μ_{lock} 、 p_{lock} 和 $\epsilon_{f,min}$ 分别为混凝土压碎时的压力、压碎体积应变、开裂应变、开裂压力和断裂塑性应变; N 为压力硬化指数, C 为应变率常数, T 为最大拉伸静水压力; K_1 、 K_2 、 K_3 为压力常数; $S_{f,max}$ 为规范化最大强度。钢筋采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC, 钢筋密度 $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$, 屈服应力 $\sigma = 414 \text{ MPa}$, 杨氏模量 $E = 210 \text{ GPa}$, 泊松比 $\gamma = 0.3$, 最大塑性应变 $\epsilon = 0.12$ 。

表 1 混凝土模型材料参数

Table 1 The parameters for the concrete material

$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G/GPa	A	B	N	C	f'_c/MPa	$S_{f,max}$	D_1	D_2
2 320	14.86	0.79	1.6	0.61	0.007	17.2	7.0	0.04	1.0
p_{crush}/MPa	μ_{crush}	T/MPa	μ_{lock}	p_{lock}/GPa	$\epsilon_{f,min}$	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	E/GPa
16.0	0.001	4.0	0.1	0.8	0.01	85.0	-171.0	208	35.7

1.3 荷载工况和边界条件

爆炸点处于安全壳的内部上方 48 m 处, 如图 1 所示。分别计算不同比例距离下爆炸荷载对安全壳的冲击作用, 比例距离 $z = R/W^{1/3}$, R 为距爆炸源中心的距离, W 为炸药的质量。爆炸相似率^[10]是由 Hopkinson 在 1915 年和 Cranz 在 1926 年分别独立提出的: 2 个尺寸不同, 但几何相似、装药成分相同的炸药, 在同样的大气中爆炸时, 在同样的比例距离上产生自相似的爆炸波(冲击波)。即装药量为 W_1 的炸药在 R_1 处和装药量 W_2 在 R_2 处产生相同的冲击波峰值压力满足 $R_1/R_2 = (W_1/W_2)^{1/3}$ 。

由于结构的完全对称性, 所以有限元模型采用对称边界条件。空气边界采用无反射边界条件, 安全壳的底部采用固定约束保证安全壳无刚体位移。

2 安全壳内部爆炸结果分析

2.1 爆炸流场冲击波演化过程

ANSYS/LS-DYNA 建立安全壳的有限元模型, 对比例距离为 $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时安全壳的动力响应进行了计算。图 4 表示了安全壳内部距底板 48 m 处炸药爆炸及冲击波的传播过程。当炸药爆炸开始, 炸药爆炸产生的空气冲击波近似以球形波的形式在安全壳内的空气中向四周传播, 由于安全壳的穹顶距离爆源最近, 所以冲击波最先到达安全壳的穹顶壁面。冲击波到达后与安全壳穹顶内壁发生作用并反射, 安全壳的穹顶受到爆炸冲击波强大的冲击, 冲击波经反射后强度加强并向下传播, 同时在穹顶和筒体的交汇处发生斜反射。之后, 冲击波经安全壳竖向筒体内壁反射后向内传播并和穹顶反射波相互作用, 冲击波和安全壳的作用点随着时间的增加沿着安全壳的内壁逐渐向下移动。当冲击波到达安全

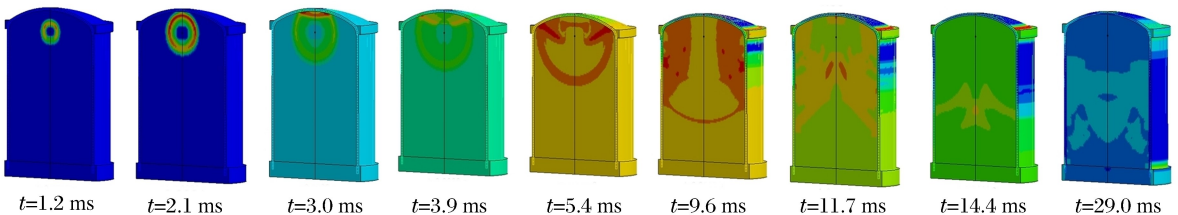


图 4 比例距离为 $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ 下炸药爆炸流场示意图

Fig. 4 Pressure-time shock wave under scale distance of $z = 3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$

壳的底部时,由于冲击波的反射使得冲击波在安全壳的底部得到加强并向上传播,反射波向中心方向汇聚且多次反射。最后,冲击波的能量逐渐减小,内壁的压力也不断衰减。

2.2 安全壳的动力响应

由于爆炸冲击波对安全壳的作用,冲击波最先到达安全壳的穹顶顶部,最大压力、主应力首先发生在此处;之后,冲击波继续向安全壳的穹顶四周扩展,后续的冲击波陆续传播到达,由于冲击波相互作用并逐渐增强,结构的应力也逐渐加大。随着时间的推移,应力最大的位置也在不断变化,安全壳的穹顶与筒体连接处出现应力集中的现象,这是由于连接处曲率半径不同造成的。

图 5 是安全壳内部各点的峰值压力曲线。由图 5 可知,随着距离的增大,峰值压力逐渐较小,由于反射,出现了多个峰值压力。图 6 给出了分析过程中动能、内能和总能量的平衡图。由图 6 可知,随着时间的增加,能量刚开始增加逐渐趋于稳定,动能基本呈下降趋势,内能逐渐增加,总能量基本保持不变,所以整个模拟是稳定可靠的。

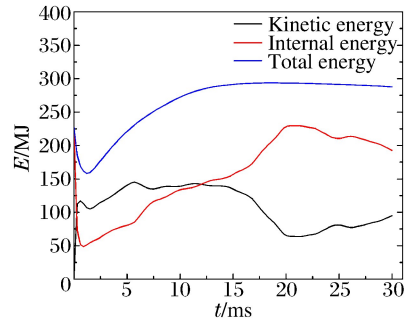
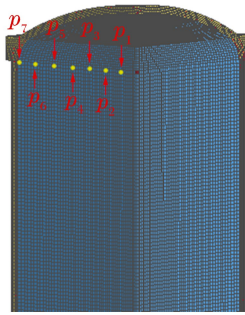
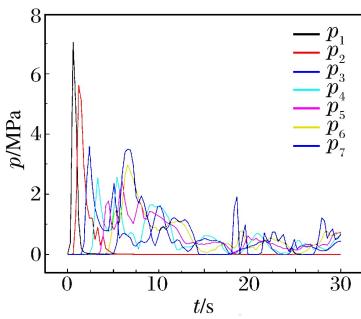


图 5 比例距离为 $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时安全壳内部峰值压力

图 6 能量平衡图

Fig. 5 Peak pressure under scale distance of $z=3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ in reinforcement concrete containment

Fig. 6 Energy balance curves

为验证模拟爆炸过程的准确性,分别计算不同比例距离下的峰值压力,同时与 J. Henrych^[8] 峰值压力计算公式和 TM5-1300^[20] 给定的峰值压力进行了对比(见图 7)。图 7 表明数值计算得到的峰值压力分别约为 TM5-1300 结果和 Henrych 计算结果的 80% 和 86%,能较好地满足计算的要求。

图 8~9 是安全壳穹顶竖向和筒体的径向位移。图 8~9 表明:随着时间的增加,安全壳穹顶竖向位移增大,最大位移不足 3 cm,安全壳穹顶在比例距离为 $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ 工况下,混凝土的塑性应变没有达到极限应变,钢筋混凝土安全壳穹顶保持整体稳定;同理,图 9 表明了钢筋混凝土安全壳筒体的径向位移较小,且最大值不足 1.2 cm。钢筋混凝土安全壳穹顶和筒体的位移表明距底板 48 m 处发生的爆炸对安全壳穹顶产生的威胁较大,对筒体较小,所以安全壳发生内部爆炸时,穹顶是比较薄弱的部位,需要设置泄压阀来减小穹顶破坏,这需要以后进行内部爆炸荷载作用下安全壳的泄压分析。

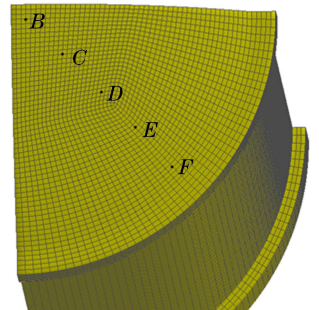
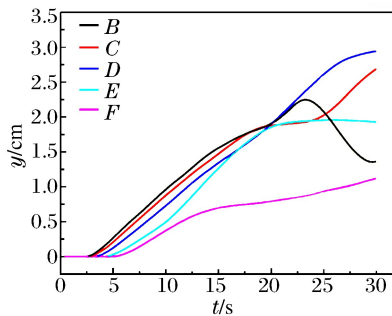
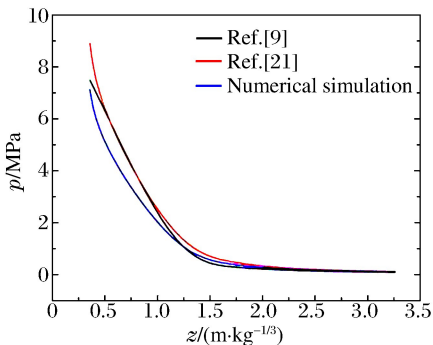


图 7 不同比例距离的峰值压力对比
Fig. 7 Comparison of peak pressure under various scale distances

图 8 比例距离为 $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时安全壳穹顶位移图
Fig. 8 Displacement diagram of dome of containment under scale distance of $z=3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$

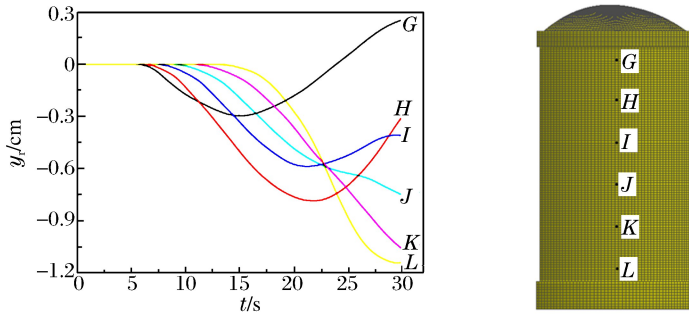


图9 比例距离为 $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时安全壳筒体径向位移

Fig. 9 Radial displacements of cylindrical shell of containment under scale distance of $z=3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$

3 结 语

运用非线性有限元动力学软件 LS-DYNA,采用流体-结构耦合算法对钢筋混凝土安全壳在内爆作用下的动力响应进行了数值模拟。为了验证数值模拟的可靠性,与 Henrych 计算公式和 TM5-1300 标准进行了比较,结果表明,在比例距离为 $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ 的内爆作用下,数值计算的结果分别约为 Henrych 计算公式和 TM5-1300 结果的 86% 和 80%,能较好地满足计算的要求。同时爆炸过程的能量平衡表明计算结果是稳定可靠的,数值计算结果定性地反映了安全壳在内爆作用下的力学行为,可以用来验证安全壳的可靠性。

参考文献:

- [1] Rehora B, Zimmerman T. Dynamic rupture analysis of reinforced concrete shells[J]. Nuclear Engineering and Design, 1976,37(2):269-297.
 - [2] Cervera M. Non-linear transient dynamic analysis of three dimensional structures[M]. Swansea, UK: Pineridge Press, 1987:320-504.
 - [3] Abbas H. Dynamic response of structures subjected to missile impact[D]. India: University of Roorkee, 1992.
 - [4] Pandey A K. Non-linear response of reinforced concrete containment structure under blast loading[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006,236(9):993-1002.
 - [5] Rogers G L. Dynamics of framed structures[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1959:100-120.
 - [6] Tai Y S, Chu T L, Hu H T. Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2011,56(3):140-147.
 - [7] Baker W E. Explosions in air[M]. Austin: University of Texas Press, 1973:253-266.
 - [8] Henrych J. The Dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979: 558-559.
 - [9] Zhao Chun-feng, Chen Jian-yun. Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2013,63(1):54-62.
 - [10] Zhao Chun-feng, Chen Jian-yun, Wang yan, et al. Damage mechanism and response of reinforced concrete containment structure under internal blast loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2012,61(1):12-20.
 - [11] Hu Hsuan-teh, Lin Yu-hon. Ultimate analysis of PWR prestressed concrete containment subjected to internal pressure[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006,83(2):161-167.
 - [12] Bao Xiao-li, Li Bing. Residual strength of blast damaged reinforced concrete columns[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010,37(3):295-308.
 - [13] 王天运,任辉启,张力军,等. 常规装药侵彻预应力钢筋混凝土安全壳数值模拟[J]. 工程力学,2005,22(5):126-130.
- Wang Tian-yun, Ren Hui-qi, Zhang Li-jun, et al. Numerical simulation of general bomb penetration into prestress

- reinforced concrete containment[J]. *Engineering Mechanics*, 2005,22(5):126-130.
- [14] 王天运,任辉启,刘水江,等.爆炸冲击波作用下核电站安全壳动力分析模型[J].*武汉理工大学学报*,2003,25(9):46-48.
Wang Tian-yun, Ren Hui-qi, Liu Shui-jiang, et al. Dynamic analysis model for the containment vessel of the nuclear station under blast shock wave[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003,25(9):46-48.
- [15] 刘云飞,王天运,贺锋,等.核反应堆预应力钢筋混凝土安全壳内爆炸数值分析[J].*工程力学*,2007,24(8):168-172.
Liu Yun-fei, Wang Tian-yun, He Feng, et al. Numerical simulation for pre-stress concrete containment under internal explosive loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2007,24(8):168-172.
- [16] 申祖武.炸药触地爆炸后核电站安全壳基底振动响应分析[J].*岩石力学*,2009,30(8):2540-2544.
Shen Zu-wu. Analysis of vibration response of containment foundation in nuclear power station after munitions bombing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009,30(8):2540-2544.
- [17] 赵春风,李晓杰,于娜.滑移爆轰作用下飞板运动规律的特征线差分法研究[J].*含能材料*,2012,20(1):57-61.
Zhao Chun-feng, Li Xiao-jie, Yu Na. Movement of flyer plate in difference method of characteristics curve under sliding[J]. *Chineses Journal of Energetic Materials*, 2012,20(1):57-61.
- [18] 李晓杰,赵春风,于娜.TNT炸药和乳化炸药驱动飞板的通用状态方程特征线法研究[J].*高压物理学报*,2012,26(4):462-468.
Li Xiao-jie, Zhao Chun-feng, Yu Na. Characteristic curve method for movement of flyer driven by TNT and emulsion explosives with general equation of state[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012,26(4):462-468.
- [19] 李晓杰,赵春风.基于通用炸药状态方程分析飞板运动规律的特征线法[J].*爆炸与冲击*,32(3):237-242.
Li Xiao-jie, Zhao Chun-feng. Characteristic curve method for analyzing movement of flyer plate based on universal equation of state of explosive[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012,32(3):237-242.
- [20] Structures to resist the effects of accidental explosions. TM5-1300[S]. USA: US Army, 1990.

Dynamic responses of reinforced concrete containment subjected to internal blast loading*

Zhao Chun-feng, Chen Jian-yun

(Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: With the help of the nonlinear finite element code LS-DYNA, a discrete finite element model was developed to numerically simulate the dynamic response of the reinforced concrete containment under internal blast loading by employing a fluid-structure-coupling algorithm. And the simulated results were compared with those by the Henrych formula as well as ones in the TM5-1300 standard, respectively. The comparisons indicate that a reliable simulation can be achieved by the developed model for the reinforced concrete containment subjected to the internal explosion under the scale distance of $3.258 \text{ m/kg}^{1/3}$ when the explosion source is 48 m above the containment base.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; finite element method; reinforced concrete containment; internal explosion; scale distance

* Received 8 June 2012; Revised 28 January 2013

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51138001)

Corresponding author: Zhao Chun-feng, zhaowindy@126.com