

# 钢筋混凝土结构抗内爆性能的有限元优化设计分析

陈剑杰<sup>1,2</sup> 胡永乐<sup>2</sup> 辛春亮<sup>2</sup> 李志康<sup>2</sup> 王春明<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>同济大学地下建筑与工程系 上海 200092) (<sup>2</sup>新疆马兰 63653 部队 马兰 841700)

**摘要** 讨论了结构抗内爆动力有限元数值计算中的参数取值、破坏准则问题。使用 DYNA 软件计算得到的爆炸荷载, 采用有限元优化设计技术, 分析了空心圆柱体钢筋混凝土结构的抗爆性能, 成功地得到了与化爆实验相一致的结果。计算得出的结构响应和破坏规律可供工程设计参考。

**关键词** 内爆炸, 有限元, 优化, 钢筋混凝土

**分类号** TV 331

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)04-0554-04

## 1 引言

为探索密闭结构抵抗一定当量爆炸动力载荷的可行性, 实施了厚壁空心圆柱体钢筋混凝土结构的化爆实验, 同时开展了化爆实验的结构抗爆性能的数值分析。在数值分析中, 遇到 3 大技术难题: (1) 结构爆炸荷载的确定; (2) 结构和材料模型及其参数的确定; (3) 结构的动力破坏准则。经过大量计算, 并与理论、实验结果对比分析, 最后确认以 DYNA 软件通过炸药爆轰动力有限元计算得到的爆炸荷载最为合理; 从工程应用的角度看, 以线弹性材料、弹脆性压碎与开裂材料和弹塑性材料模型较为合理, 但缺乏实测可靠的动态物理力学参数和破坏准则参数。

本文基于 DYNA3D 计算的结构爆炸荷载, 讨论了线弹性模型动力有限元数值计算中的参数取值和结构的破坏准则问题。采用有限元优化设计技术分析了钢筋混凝土结构的抗爆性能。

## 2 有限元动力分析的参数和破坏准则

在本文的结构抗爆性能计算中, 将由 DYNA 软件显式有限元爆轰计算出来的圆柱形结构内壁的应

力场数据, 作为隐式有限元分析的结构动力载荷。首先计算了结构内应力场的一般特征, 在此基础上进行有限元优化设计分析。在所有的有限元动力计算中, 都存在参数取值和破坏准则问题。

### 2.1 材料物理力学性质参数

采用线弹性模型, 将钢筋混凝土材料等效为混凝土材料, 实测其质量密度  $\rho$ , 动弹性模量  $E_d$  近似地由质量密度  $\rho$  和实测超声波速度  $C_p$  计算得到, 泊松比  $\nu$  取高标号混凝土材料在较高加载速率下的经验值 0.167<sup>[1]</sup>。

### 2.2 结构阻尼系数

动载作用下结构都存在阻尼, 它使爆炸波的能量散逸而耗损。岩石和混凝土类介质中能量消耗(内部散逸)一般认为是内阻尼性质的, 但由于波的传播所产生的能量消耗(辐射阻尼)都与波的频率有关, 故在动态分析中仍多采用线性粘滞阻尼。本文的结构动力有限元计算中采用阻尼矩阵和刚度矩阵有关的综合方法, 即取

$$C^e = \alpha M^e + \beta K^e$$

式中: 系数  $\alpha$ ,  $\beta$  可由体系的两个振型相应的自振频率  $\omega_i$ ,  $\omega_j$  的阻尼比  $\lambda_i$ ,  $\lambda_j$  决定, 取

$$\alpha = 2\omega_i\omega_j\lambda / (\omega_i + \omega_j)$$

$$\beta = 2\lambda / (\omega_i + \omega_j)$$

2000年7月25日收到初稿, 2000年9月20日收到修改稿。

作者 陈剑杰 简介: 男, 1966年生, 现任高级工程师, 主要从事工程地质、岩土力学、防护工程和核环境科学方面的研究工作。

根据结构的实际几何尺寸和物理性质指标值, 利用动力有限元模态计算的子空间法计算了化爆实验中所用的实际结构的前 5 阶自振频率。假定各振型阻尼比均为  $\lambda$ ,  $\lambda$  的取值参照花岗岩类小尺寸岩样的数据(一般为 0.02)<sup>[2]</sup>, 实际结构中应大于 0.02。为此, 设定 3 个阻尼比量级: (1)  $\lambda=0$ , (2)  $\lambda=0.02$ , (3)  $\lambda=0.05$ , 分别计算出相应的阻尼矩阵系数为(1)  $\alpha=0$ ,  $\beta=0$ ; (2)  $\alpha=100$ ,  $\beta=4.0 \times 10^{-6}$ ; (3)  $\alpha=300$ ,  $\beta=1.0 \times 10^{-5}$ , 用于结构动力响应的有限元计算。如果结构尺寸更大(内径不变), 其阻尼数值将会更大些, 使用本文的计算结果对工程设计而言是偏于安全的。

### 2.3 钢筋混凝土结构的动态强度

根据理论分析、数值计算的结果, 确认在实验涉及的爆炸当量和比例距离范围内, 不足以产生爆室结构混凝土压碎破坏。实际可能产生的结构破坏包括筒体部分(即侧壁)的沿径向的竖直开裂(环向拉伸应力引起)、沿径向的水平开裂(轴向拉应力引起)、沿柱面方向的开裂(径向拉伸应力引起, 多与反射应力波有关)、底板部分的竖直径向开裂和水平圆盘状开裂, 此外在侧壁与底板交接处因强应力集中产生局部破坏, 以拉应力为主。其中, 侧壁环向拉应力集中形成的竖直径向整体开裂破坏面是最关键的控制性破坏, 根据它的产生与否, 可以判别结构是否发生整体失效。

结构中材料的点破坏采用瞬时动力破坏准则。根据计算得到的应力数据发现, 沿侧壁厚度的拉应力分布离散度较其他应力分量为小, 且量级与初始压力荷载相差不大。考虑到结构整体破坏是由宏观裂纹的扩展形成的, 采用环向拉应力峰值沿厚度方向的几何平均值来表征结构的破坏应力水平。认为环向峰值拉应力几何平均值  $\sigma_{\theta}$  大于或等于等效混凝土材料的单轴动抗拉强度  $R_t$  时, 结构整体破坏, 否则, 结构不发生整体破坏。

$R_t$  的确定方法如下: 根据实测的 150 mm×150 mm×150 mm 立方体混凝土试件的单轴静抗压强度值和经验关系, 可以得到化爆实验中混凝土材料的单轴抗拉强度约为 3.5 MPa。根据国内外的一些试验资料<sup>[3, 4]</sup>, 混凝土材料在同本次化爆实验中相当的动力加载速率下, 动态强度提高系数可大于或等于 2, 实际动抗拉强度可达到 6~20 MPa, 在本次化爆模拟试验中取混凝土材料的动抗拉强度  $R_{td}^{concr} = 7.0$  MPa。二级钢筋的动力抗拉强度取值  $R_{td}^{steel} = 500$  MPa<sup>[5]</sup>。根据等强度原理<sup>[6]</sup>, 可估算与钢

筋混凝土等效的混凝土材料的实际抗拉强度  $R_t$  为

$$R_t = R_{td}^{concr} \left( 1 + \frac{R_{td}^{steel}}{R_{td}^{concr}} \frac{V_{steel}}{V_{steel+concr}} \right)$$

式中:  $R_{td}^{concr}$  为混凝土的动抗拉强度,  $R_{td}^{steel}$  为钢的动屈服强度,  $V_{steel} / V_{steel+concr}$  为混凝土结构中钢筋含量体积率。

经过计算, 在钢筋混凝土结构的抗爆极限分析中, 可取结构极限抗拉强度为 10.0 MPa, 若不计钢筋的增强作用, 则结构强度可取 7.0 MPa。如果安全系数取 1.2, 则对应的设计许用结构抗拉强度分别可取 8.3 MPa(考虑钢筋增强)和 5.8 MPa(不计钢筋增强)。

## 3 有限元优化设计技术

优化设计是一种寻找确定最优设计方案的技术。所谓“最优设计”是指一种方案可以满足所有的设计要求, 而且所需的支出(如重量、面积、体积、应力、费用等)最小, 即最有效的方案。ANSYS 软件的一项独特功能是提供了参数化设计语言 ADPL, 并且所有可以参数化的 ANSYS 选项均可进行优化设计。采用零阶方法或一阶方法, ANSYS 程序提供了一系列的分析~评估~修正的循环过程。对初始设计进行分析, 将分析结果按设计要求进行评估, 然后修正设计, 直到满足所有的设计要求为止。

在优化设计中需要定义设计变量、状态变量和目标函数等优化变量。设计变量是自变量, 优化结果的取得就是通过改变设计变量的数值来实现的。在本文优化分析中选取爆室结构的壁厚作为设计变量。状态变量是约束设计的数值, 属于因变量, 是设计变量的函数。在本文中设定状态变量为沿壁厚的环向拉应力峰值的几何平均值, 要求其数值小于或等于结构的极限抗拉强度。目标函数是要尽量减小的数值, 必须是设计变量的函数。本文优化分析中设定目标函数为内径不变的条件下, 爆室结构的总体积最小(即壁厚最小或花费最小)。设计序列是指确定一个特定模型参数的集合, 而一个合理的设计则是指满足所有给定的约束条件(设计变量的约束和状态变量的约束)的设计。本文中, 合理设计是指给定钢筋率、材料参数和爆室内尺寸的条件下, 结构拉应力水平低于结构强度的任一设计方案。最优设计是既满足所有的约束条件, 又能得到最小目标函数值的设计, 在本文中表现为壁厚最小的合理

设计方案。

ANSYS 优化设计步骤为: (1) 生成循环所用的分析文件, 在分析文件中完成参数化建立模型、初始设计的有限元求解、提取并指定状态变量和目标函数等; (2) 在 ANSYS 数据库里建立与分析文件中变量相对应的参数; (3) 指定分析文件; (4) 选择优化变量; (5) 选择优化工具或优化方法; (6) 指定优化循环控制方式; (7) 进行优化分析; (8) 查看设计序列结果和后处理。

#### 4 钢筋混凝土结构抗爆性能

进行了 1 种结构形式、3 种爆炸当量、3 种阻尼参数、爆室内尺寸不变但厚度变化、允许抗拉强度值 1~10 MPa 共 9 个序列的优化设计计算。三维动力有限元计算中结构形式、基本几何尺寸和爆炸当量采用化爆实验中的实际值。爆室为钢筋体积率 7%、高径比为 1、内直径 1.2 m、壁厚 0.5 m 的钢筋混凝土圆柱体。TNT 药量  $Q=1.6, 2.9, 8.0$  kg, 在几何中心爆炸。

表 1 是根据各优化设计序列优化设计分析的计算结果整理出来的, 表示不同当量、不同阻尼条件下结构应力水平  $\sigma_{tt}$  (MPa) 与壁厚  $D$ (m) 的拟合函数关系。

由这些表达式可以得到结构应力水平分别为

5.8, 7.0, 8.3 和 10.0 MPa 时, 对应的结构壁厚值 (表 2)。

分析可知, 当忽略结构阻尼并且结构破坏极限强度为 10 MPa, 1.6, 2.9, 8.0 kg 3 种 TNT 药量爆炸时, 该类型内直径 1.2 m 的钢筋混凝土爆室结构发生整体破坏的壁厚分别为 0.43, 0.72 和 0.93 m。这就说明, 内直径 1.2 m、壁厚 0.5 m 的钢筋混凝土空心圆柱体爆室结构应该能抵抗 1.6 kg TNT 爆炸的荷载而不会发生整体破坏, 但不能抵抗 2.9 或 8.0 kg TNT 爆炸。

化爆实验结果表明, 所设计的内直径 1.2 m、壁厚 0.5 m 的钢筋混凝土空心圆柱体爆室抗 1.6 kg TNT 爆炸是可以不发生整体破坏的, 但当药量为 2.9 和 4.15 kg 时均发生了整体破坏。

在实际工程中, 根据施工技术水平与质量保证程度、工程重要性和持久性, 可选择表 2 中的 1 种设计方案。建议采用许用结构抗拉强度 5.8 MPa、阻尼比为 0.02 的方案, 即不计钢筋的增强且有 1.2 的安全系数。此时 1.6, 2.9, 8.0 kg TNT 爆炸所需的安全爆室厚度分别为 0.60, 1.07 和 1.91 m。

从优化设计分析计算结果还可以看出, 爆室破坏的极限厚度与药量立方根的关系是非线性的。对于相同的整体破坏极限应力, 该类型爆室结构在药量较高时, 单位壁厚能抗较大的单位立方根药量爆炸。

表 1 钢筋混凝土爆室侧壁拉应力水平与壁厚的关系

Table 1 Relationship between tensile stresses and thickness of side wall

优化设计序列编号	爆炸当量 /kg	阻尼系数	拟合函数式
1		$\alpha=0$ $\beta=0$	$\lg \sigma_{tt} = 0.7576 \lg^2 D - \lg D + 0.5324$
2	1.6	$\alpha=100$ $\beta=4 \times 10^{-6}$	$\lg \sigma_{tt} = 0.7826 \lg^2 D - 0.9652 \lg D + 0.5092$
3		$\alpha=300$ $\beta=1 \times 10^{-5}$	$\lg \sigma_{tt} = 0.7315 \lg^2 D - 0.9516 \lg D + 0.4877$
4		$\alpha=0$ $\beta=0$	$\lg \sigma_{tt} = 0.8395 \lg^2 D - 1.0038 \lg D + 0.8383$
5	2.9	$\alpha=100$ $\beta=4 \times 10^{-6}$	$\lg \sigma_{tt} = 0.9507 \lg^2 D - 0.9822 \lg D + 0.7871$
6		$\alpha=300$ $\beta=1 \times 10^{-5}$	$\lg \sigma_{tt} = 0.9801 \lg^2 D - 0.9776 \lg D + 0.7606$
7		$\alpha=0$ $\beta=0$	$\lg \sigma_{tt} = -0.3728 \lg^3 D + 0.7723 \lg^2 D - 0.8146 \lg D + 0.9783$
8	8.0	$\alpha=100$ $\beta=4 \times 10^{-6}$	$\lg \sigma_{tt} = -0.3838 \lg^3 D + 0.7669 \lg^2 D - 0.7802 \lg D + 0.9219$
9		$\alpha=300$ $\beta=1 \times 10^{-5}$	$\lg \sigma_{tt} = -0.4845 \lg^3 D + 0.8152 \lg^2 D - 0.7421 \lg D + 0.8744$

表 2 对应于结构不同应力的壁厚

Table 2 Wall thickness corresponding to different structure stress

结构应力水平 / MPa	序列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$Q / \text{kg}$	1.60	1.60	1.60	2.90	2.90	2.90	8.00	8.00	8.00
	$\lambda$	0	0.02	0.05	0	0.02	0.05	0	0.02	0.05
5.8		0.65	0.60	0.58	1.20	1.07	1.02	2.40	1.91	1.60
7.0		0.54	0.52	0.49	0.98	0.87	0.84	1.58	1.32	1.11
8.3		0.48	0.46	0.44	0.83	0.75	0.71	1.20	0.99	0.87
10.0		0.43	0.42	0.40	0.72	0.66	0.62	0.93	0.80	0.72

## 5 结论与建议

在大量结构爆炸荷载和动力响应数值模拟的基础上, 本文尝试应用三维动力有限元优化设计技术来分析钢筋混凝土结构爆室的抗爆性能, 结果表明此技术的应用是成功的。其中的参数和破坏准则问题, 经过理论推导、数值分析、实测资料的搜集及爆炸模拟实验标定等, 得到了合理的解决。该方法可进一步应用于类似的其他爆炸工程设计计算中, 成为理论研究人员和工程设计人员的有力工具。

优化设计分析表明, 对于 1.6, 2.9, 8.0 kg TNT 药量的封闭爆炸, 采用低钢筋率、内直径 1.2 m 的空心钢筋混凝土圆柱体爆室, 当壁厚分别为 0.43, 0.72, 0.93 m 时, 将产生整体破坏, 结构壁厚为 0.5 m 时, 只能承受 1.6 kg TNT 或略微高一点当量的爆炸。这是与化爆实验破坏效应观测结果相一致的。

要保证爆室结构不整体破坏, 3 种药量对应的

设计壁厚宜分别取 0.60, 1.07 和 1.91 m。

结构应力水平与爆室结构尺寸的关系是非线性的, 不与药量立方根成正比。

## 参考文献

- 1 过镇海. 混凝土的强度、变形试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 2 李俊如, 吴锦拔. 岩石的阻尼特性实验与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增): 797~801
- 3 李惠荣. 混凝土在快速加载作用下的力学特性[J]. 防护工程, 1985, (3): 48~65
- 4 胡时胜, 王道荣, 刘剑飞. 混凝土材料动力学性能的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, (增): 85~88
- 5 李庆标, 曹焜康. 建筑钢在快速变形下的抗拉力学性能及其变化规律[J]. 防护工程, 1980, (4): 27~29
- 6 王中黔, 李 铮. 水压爆破药量计算及其应用[A]. 见: 冯叔瑜编. 土岩爆破文集(第二辑)[C]. 北京: 冶金工业出版社, 1985, 191~198

## FEM OPTIMIZATION ANALYSIS ON ANTI-EXPLOSION ABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

Chen Jianjie<sup>1, 2</sup>, Hu Yongle<sup>2</sup>, Xin Chunliang<sup>2</sup>, Li Zhikang<sup>2</sup>, Wang Chunming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geotechnical Department, Tongji University, Shanghai 200092 China

<sup>2</sup>Unit 63653 of PLA, Malan 841700 China

**Abstract** The parameter decision and failure criteria in the dynamic FEM modeling on anti-explosion of reinforced concrete structure are discussed. The explosion loads are obtained by DYNA FEM. Using FEM optimization technology, the anti-explosion ability of reinforced concrete hollow cylinders is analyzed. The results are consistent with chemical explosion experiment.

**Key words** inner-explosion, FEM, optimization, reinforced concrete