

文章编号: 1673-0836(2006)06-0967-04

钢包砼拱形防护门有限元模态分析*

战 颂, 徐永君, 张均锋

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要:防护门是阵地工程中的薄弱环节,研究其在冲击载荷作用下的动态响应具有重要意义。作者利用 ANSYS有限元分析软件,建立钢包混凝土拱形防护门的仿真模型。通过对模型进行模态分析,给出防护门的前 10阶固有频率及相应的振型,对防护门的自振特性有了较为精确的认识,从而为进一步分析防护门的动力响应打下基础。

关键词: ANSYS;混凝土;模态分析;固有频率

中图分类号: U453, TB115

文献标识码: A

The Modal Analysis of Certain Reinforce Concrete Protective Door Using Finite Element Method

ZHAN Song, XU Yong-jun, ZHANG Jun-feng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, the global finite element model of certain reinforced concrete protective door is established by using ANSYS program. The first ten natural frequencies and the corresponding vibration models of the protective door are obtained from modal analysis, which provide a scientific basis for the further dynamic characteristic analysis of the protective door.

Keywords: ANSYS; concrete; modal analysis; natural frequency

1 引言

由于现代战争的需要,对地下防护工程结构抗力的要求日益提高,其中防护门合理的结构设计和其在冲击载荷作用下的动态响应分析尤为重要。国外对防护门的研究资料是很难获得的,国内研究人员对防护门的研究取得了一些有价值的试验数据和成果。

1984年,第二炮兵工程设计研究所曾与清华大学共同开展钢包混凝土拱形防护门门扇结构强度的具体试验研究工作。文献[1]详细记述了防护门的试验方案,试验过程及各种结果,并给出了设计上的合理化建议。文献[2]通过原型坑道内爆炸试验,研究了装药在防护门附近爆炸时形成的

冲击波和破片对防护门的破坏作用。但试验研究早已不能满足工程实际的需要,与计算机仿真模拟相结合已是必然要求。采用有限元数值模拟爆炸载荷作用下的结构响应方面的研究,国内已有不少成果。文献[3,4]应用有限元方法分析了爆炸载荷作用下地下结构与土介质相互作用问题,文献[5,6]利用 ANSYS有限元软件证明钢筋混凝土组合结构是理想的抗爆炸防护结构。本文所研究的拱形防护门就是一种钢与混凝土的组合结构,其门扇是由钢板、钢销焊接并在其中打筑高强度混凝土制成的。钢销均匀分布在内外拱形钢板之间,能够保证内外拱板共同工作,提高结构整体强度。

本文利用 ANSYS有限元软件,建立钢包混凝土拱形防护门的仿真模型,对其非线性性能进行数

* 收稿日期: 2006-08-20(修改稿)

作者简介:战 颂(1982-),女,吉林舒兰人,硕士研究生,主要从事钢包混凝土理论与数值计算研究工作。

E-mail: szhan@imech.ac.cn

值模拟,通过模态分析,计算出防护门的前 10 阶固有频率,并观察其振型,对防护门的自振特性有了较为精确的认识,从而为进一步研究防护门的动力响应打下基础。

2 计算模型

为了清楚地反映门扇内各部分的应力、应变及混凝土开裂情况,本文采用 3 维实体模型,力求模型与实际情况的一致性^[7-9]。门扇钢板用 solid45 单元,混凝土用 solid65 单元,该单元是 ANSYS 为混凝土材料专门定义的一种单元,它不但可以模拟混凝土材料特有的开裂压碎等力学现象,而且预先定义好了混凝土的破坏准则,使用起来比较方便。将钢销看成混凝土中的钢筋,用 link8 单元来模拟。

建模假设:防护门上焊点与焊缝等处连接牢固,建模时按连接处理对分析计算结果没有影响。

建模及网格划分原则:防护门不仅包括门扇、门框、土建等主要结构,还有吊环、把手、支座梁等对整体受力影响不大的附属结构,在建立整体模型时,不可能也没有必要一一考虑,因此,在建模时对其进行了必要的简化。

防护门整体为对称结构,门扇高 4.3 m,跨度约 4.2 m,门扇厚度为 0.3 m,为保证划分单元形状规则,长宽比合理,尽量使用六面体单元。图 1 是防护门包括土建在内的整体模型,图 2 显示了门扇细部各单元关系,白色为钢销,中间为混凝土,外侧薄片单元为钢板,每个钢销作为一个 link8 单元,四个钢销之间的混凝土为一个 solid65 单元,它们共用节点实现位移协调。

超压时间曲线方程:

$$P(t) = P_{s0} (1 -) (ae^{-t/t_a} + be^{-t/t_b} + ce^{-t/t_c}) \quad (1)$$

$$= \frac{t - t_0}{t_b} \quad (2)$$

式中: P_{s0} = 36MPa,为峰值高压; t_0 = 17 ms,为峰值

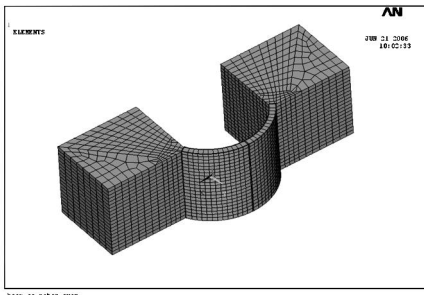


图 1 防护门整体三维实体模型图
Fig 1 3D model of the protective door

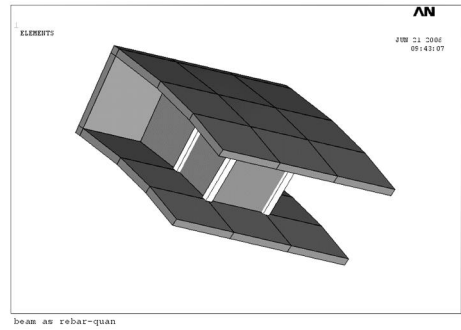


图 2 门扇细部图

Fig 2 Detail of the door

超压到达时间; t_b = 1400 ms,为正向持续时间; t 为爆炸开始时计算的时间。

系数分别为 $a = 0.039$, $b = 0.18$, $c = 0.781$, $= 3.8$, $= 27$, $= 330$,对应曲线如图 3。

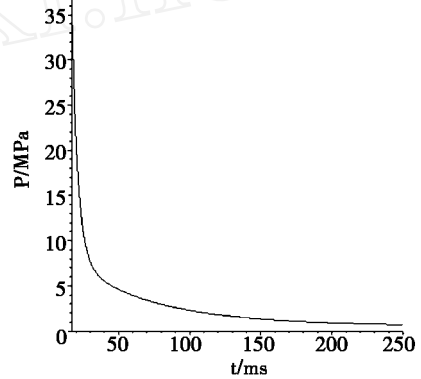


图 3 爆炸载荷的超压时间曲线

Fig 3 Curve of overpressure time of blasting load

单元尺寸:

应力波在混凝土材料中的传播速度^[10]为:

$$C_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

式中: $E = 5.5 \times 10^{10}$ Pa,为混凝土材料弹性模量; $\rho = 6000$ kg/m³,为混凝土材料密度。

将参数带入上式,计算出波速 $C_1 = 3027.7$ m/s,根据图 3 所示超压曲线,取冲击波特征时间 $T = 0.050$ s,可得波长 $\lambda = C_1 T = 151$ m。根据采样定理,每个波长范围内至少采两个点,即对应的每波长范围内至少划分两个单元。若保证信号不失真,每个波长范围内采 8~10 个点,即对应的每波长范围内至少划分 8~10 个单元。在波的传播计算中,大多取每个波长范围内划分 20 个单元。按每个波长范围内划分 20 个单元计算,单元特征尺寸为小于 7.5 m。本文计算模型中网格划分,单元特征尺寸约 0.3 m,每波长范围远多于 20 个单元,所以能够保证计算精度要求。

3 模态分析

防护门承受动态载荷,其结构的固有频率、振型等是结构设计中的重要参数,也是其他动力学分析问题的起点,特别是瞬态动力学分析的所必需的分析过程。

典型的无阻尼模态分析求解的基本方程是经典的特征值问题^[11]。

$$[K]\{i\} = \omega_i^2 [M]\{i\} \quad (4)$$

式中: $[K]$ 为刚度矩阵; $\{i\}$ 为第阶模态的振型向量(特征向量); ω_i 为第阶模态的固有频率(ω_i^2 是特征值); $[M]$ 为质量矩阵。

有许多数值方法可用于求解上面的方程。本文采用子空间法进行模态提取,该方法用于提取大模型的少数模态(40阶以下),适用于较好的实体及壳单元组成的模型。表 1列出了防护门的前 10阶固有频率和相应振幅。图 4给出了前四阶模态对应的振型示意图。图 5给出了频率随阶数的变化曲线。

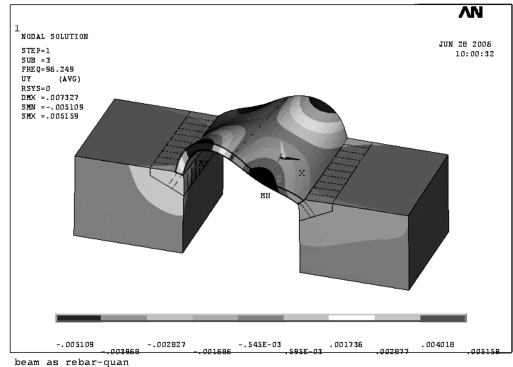


图 4c 三阶振型示意图

Fig 4c 3^d order model

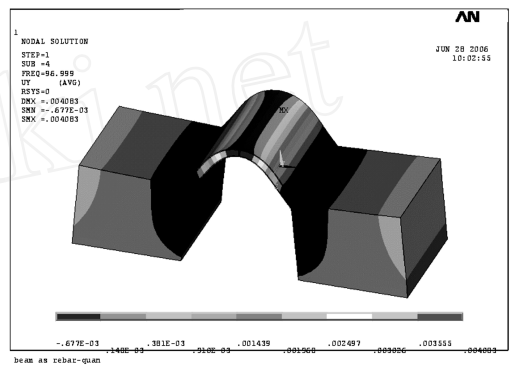


图 4d 四阶振型示意图

Fig 4d 4th order model

表 1 防护门整体前 10阶频率

Table 1 Frequency of protective door at first 10 orders

模态阶数	固有频率 (Hz)	最大振幅 (mm)
1	74.84	4.64
2	81.63	4.63
3	96.25	5.16
4	97.00	4.08
5	109.97	3.15
6	114.27	5.04
7	121.49	5.33
8	144.56	8.39
9	149.57	3.61
10	155.31	11.00

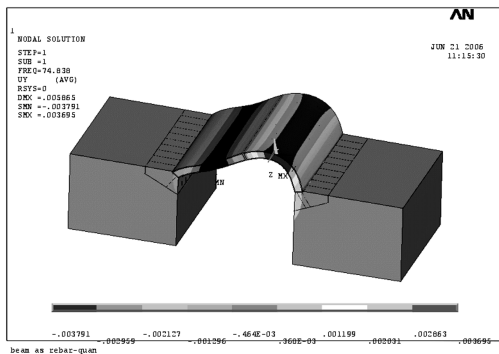


图 4a 一阶振型示意图

Fig 4a 1st order model

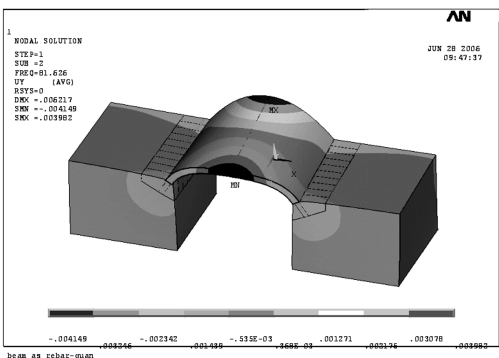


图 4b 二阶振型示意图

Fig 4b 2^d order model

4 结论

(1) 防护门固有频率的频谱成台阶形变化,有相近频率出现。

(2) 前几阶振型的最大振幅差别不大,所以比较容易同时激发。

(3) 前几阶模态和相对应的振型都出现在门扇上,所以防护门门扇本身是最薄弱环节,是最容

易被破坏的部位。

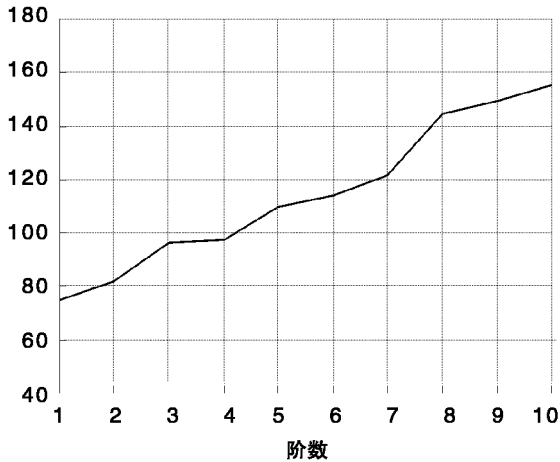


图5 频率随阶数的变化曲线

Fig 5 Curve of frequency variation with orders

参考文献:

- [1] 第二炮兵工程设计研究所,清华大学土木工程系. 钢包砼拱形防护门试验研究综合报告 [R]. 1987
- [2] 何翔,庞伟宾,曲建波,刘国军,李茂生. 防护门在空
气冲击波和破片作用下的破坏 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24 (5): 475 - 479
- [3] 赵以贤,王良国. 爆炸载荷作用下地下拱形结构动态分析 [J]. 爆炸与冲击, 1995, 15 (3): 201 - 211
- [4] 王凤霞,何政,欧进萍. 桩 - 土 - 结构动力相互作用的线弹性地震反应分析 [J]. 世界地震工程, 2003, 19 (2): 58 - 66
- [5] 石少卿,张湘冀,尹平. 爆炸荷载作用下一种新型防护结构的静力分析 [J]. 地下空间, 2003, 23 (1): 66 - 68
- [6] 张湘冀,石少卿,尹平,刘颖芳. 全封闭的钢 - 混凝土 - 钢夹层板抗爆性能的数值分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30 (4): 17 - 19
- [7] 龚曙光,谢桂兰. ANSYS操作命令与参数化编程 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004
- [8] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005
- [9] 邢静忠,王永岗,陈晓霞. ANSYS7.0分析实例与工程应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004
- [10] 宋守志. 固体介质中的应力波 [M]. 北京:煤炭工业出版社, 1989年
- [11] 小飒工作室. 最新经典 ANSYS及 Workbench教程 [M]. 北京:电子工业出版社, 2004
- [5] Kruschwitz S, Yaramanci U. Detection and characterization of the disturbed rock zone in claystone with the complex resistivity method [J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 57 (1): 63 - 79
- [6] 王学滨. 平面应变压缩岩样侧向变形特征数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (5): 525 - 530
- [7] 王学滨. 地震前兆特征与岩样剪切应变率异常数值模拟 [J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25 (1): 102 - 107, 122
- [8] 潘岳,王志强,吴敏应. 非线性硬化与非线性软化的巷、隧道围岩塑性分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (7): 1038 - 1042

(上接第 966页)