

CN9200893

CNIC-00512

NERDI-0017

中国核科技报告

秦山核电站安全壳
在飞机撞击下的整体动力反应

THE DYNAMIC RESPONSE OF THE CONTAINMENT OF
THE QINSHAN NUCLEAR POWER PLANT FOR
THE AIRCRAFT IMPACT LOADING

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author (s) to the publisher. No part of this publication may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China.

The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

CNIC-00512

NERDI-0017

秦山核电站安全壳在飞机撞击下的 整体动力反应

左家红 韩良弼 夏祖识

(上海核工程研究设计院)

摘 要

用 ADINA 程序对秦山核电站安全壳在飞机撞击荷载下的结构反应进行了分析。结构计算模型为包含有 179 个混凝土单元和 118 个钢筋单元的、轴对称的钢筋混凝土组合壳体。数值求解考虑了材料及结构的非线性以期取得较为满意的结果。坐标系统建立在 Lagrangian 公式基础上,有限元方程的求解采用平衡迭代法(BFGS 法),共算了 600 步。讨论了安全壳在飞机撞击下的整体动力反应,着重于撞击区域的非线性行为。

**THE DYNAMIC RESPONSE OF THE CONTAINMENT OF
THE QINSHAN NUCLEAR POWER PLANT FOR
THE AIRCRAFT IMPACT LOADING**

(In Chinese)

Zuo Jiahong Han Liangbi Xia Zufeng
(SHANGHAI NUCLEAR ENGINEERING RESEARCH
AND DESIGNING INSTITUTE)

ABSTRACT

The structural response of the containment of the Qinshan Nuclear Power Plant under the standard-load-function for aircraft impact has been analyzed using the ADINA code considering an axisymmetric continuum model, which is assumed a mixed-model for the steel-concrete mixture. It consists of 179 four-node isoparametric concrete elements and 118 steel elements. In order to obtain optimum results, the nonlinear behavior of materials and structures, dynamic modes of failure and damage have been considered in the numerical solution. The coordinate system is based on the total Lagrangian formulation. The F. E. system has been solved using an incremental iterations (BFGS method) with 600 steps totally. A discussion of the overall behavior of the containment for the aircraft impact loading, especially the nonlinear behavior of the local impacted area is presented.

引言

飞机撞击安全壳事件的概率虽然很小,但由于飞机撞击的巨大冲量,对核电厂的安全会造成严重的威胁。近年来已有越来越多的国家在核电厂设计中把飞机撞击作为结构设计的主要荷载之一,许多国家的核电厂设计规范中,也规定了安全壳在飞机撞击荷载下的安全准则^[1,2]。尽管我国目前还没有完整的核电厂设计规范,但仍有必要对秦山核电厂安全壳厂房进行假设飞机撞击事故下结构的动力反应分析,以便对安全壳的安全性有更全面的了解。

关于安全壳在飞机撞击荷载下的分析研究工作主要包括:

- (1)各种假定撞击的概率;
- (2)最不利撞击部位的确定;
- (3)飞机撞击荷载函数的确定;
- (4)飞机-结构(靶体)间的相互作用;
- (5)结构被撞击区域的局部效应;
- (6)飞机撞击下整体结构的动力反应;
- (7)飞机撞击下的结构-地基共同作用;
- (8)阻尼、材料特性对结构反应的影响。

60年代末以来,已有美国、西德、法国、意大利、荷兰等许多国家的科研人员对上述各类问题进行了广泛的探讨,近年来,我国也开始进行了这方面的工作,并取得了一些初步的成果,在理论上为核电厂的安全分析提供了一定的依据。但由于安全壳钢筋混凝土结构材料本构关系的复杂性以及目前试验条件的缺乏和计算方法的局限,还有很多工作有待于进一步讨论和探索。就安全壳结构设计角度来讲,在飞机撞击荷载下的整体动力反应是更重要的一个方面,而目前又多限于进行线性分析。但是,为了作出满意的设计,越来越多地认识到对各种类型结构的非线性性能研究的重要性。在大多数情况下,结构的极限荷载特性主要是由非线性效应所控制的,如果能准确地得到极限荷载,则结构的安全性将大为增加,并且一般来讲,费用也能够降低。但为了准确地把握所研究结构的反应,通过试验而获取可靠的资料所花费的代价,通常是非常昂贵的,特别是在核电工程中。所以如果利用可靠的分析手段进行理论分析,则不仅可以减少试验,而且能够更好地了解结构的性能,为工程设计提供可靠的理论依据。近年来国际研究动态也表明,已更倾向于考虑材料的和结构的非线性行为的分析,而不再满足于只进行线性的或拟弹塑性的分析。因此,本文在应用自动动态增量非线性分析程序(ADINA)的基础上,对安全壳在飞机撞击荷载下的整体结构动力反应进行了非线性分析,考虑钢筋混凝土材料的非线性特征以及结构可能发生的局部的大位移、大应变,并着重对其撞击区域的非线性效应,作较为详细的讨论。

1 基本假定

(1)整个结构假定为由钢筋及混凝土混合组成的多层复合壳体。把钢筋折算为等体积的钢薄层,分别位于混凝土层的内外两个表面,忽略混凝土和钢筋之间的滑移,不考虑壳体内预应力钢筋以及壳体内表面钢衬里对结构反应的作用。

(2)壳体结构底部假定为固支在基岩上,忽略基岩与上部结构的相互影响,即不考虑土

壤与结构的共同作用的效应。

(3)假定飞机撞击在安全壳穹顶的正上方,飞机撞击荷载垂直作用于安全壳穹顶中心半径为 2 m 的范围内。

(4)假定在飞机撞击荷载作用下,安全壳的内部结构以及设备管道等的动力反应对于相脱离的安全壳壳体没有影响。

2 结构计算模型

与地震荷载下结构的动力反应相比,飞机撞击荷载下的结构动力反应的频率范围较宽,尤其在高频区,飞机撞击引起的加速度比地震引起的还要大,所以必须充分考虑高频的影响。为了得到较为理想的结果,特别地将撞击区及其附近的网格划分得更为细致。

整个结构计算模型为轴对称复合壳体,基本网格由 4 节点等参元组成,上、下两个表层为钢筋层,中间三层(或二层)为混凝土层。由于应力分布主要在穹顶部分,所以环梁以外及筒体部分的钢筋层被忽略,并且该处混凝土层的网格也划得较为粗略。图 1 所示为整个安全壳的计算模型,其中包括 179 个混凝土单元和 118 个钢筋单元。共 390 个节点。

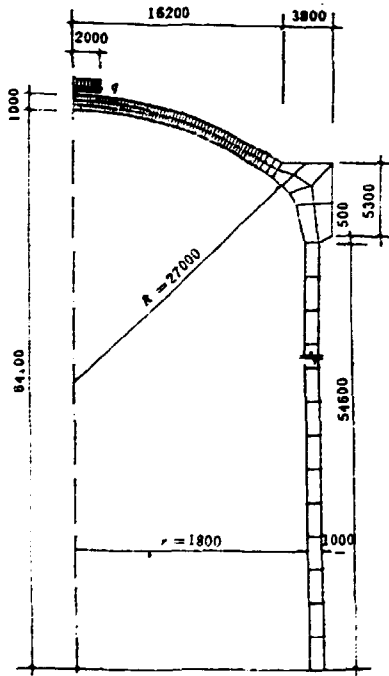


图 1 结构计算模型
Model for structure calculation

置^[6]。

3 载荷函数的选用

确定飞机撞击安全壳的载荷函数,是另一个较为复杂的课题,经过大量的研究,这些载荷函数已或多或少地被标准化了。在一些国家的研究工作中采用了几乎相同的载荷函数,这个函数是鉴于 Riera 模型,即认为飞机是弹塑性的而靶体是刚性的^[3],所以这个函数又被称为刚性载荷函数[RLF]。进一步的研究表明,由于靶体在撞击区域的效应,诸如塑性变形,裂缝传播以及能量耗散等,部分地改变了载荷函数的性质,从而得到修正的载荷函数[VLF],其峰值比刚性载荷函数[RLF]有所降低,到达峰值的时间则有所后移,其结果使动力反应降低 30%~50%^[4,5]。

对于本文所讨论的对象-秦山核电厂安全壳,参考了文献[4]中提供的“在反应堆结构穹顶和筒体的飞机撞击载荷函数”,较之刚性载荷函数[RLF],它反映了靶体在塑性区域的效应。在此基础上,针对秦山核电厂附近飞行的飞机机型特点,采用修正峰值的载荷函数如图 2 所示。假定荷载垂直作用于安全壳的正上方,半径为 2 m 的范围。已有研究表明,对于安全壳来讲,其穹顶的中央部位是飞机撞击的最不利位

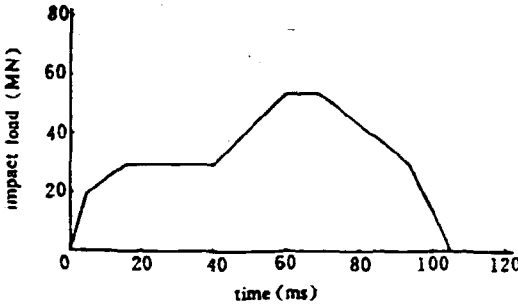


图2 荷载-时间曲线

Variation of impact load with time

4 材料模型

4.1 混凝土的本构关系

在多轴应力条件下,混凝土的材料特性非常复杂,目前还没有完善的方法进行实验测定。借助于一些简化假定,提出了各种材料模型:非线性弹性、亚弹性、弹塑性、内渐变及断裂模型等^[7~11]。本文所采用的是ADINA中的混凝土模型^[27]。

ADINA 中的混凝土模型提供了一个进行混凝土结构分析的理论正确而且相对比较简单的,以及数值上稳定的模型,能反映出实验观测得到的重要的刚度、强度等特性。在描述材料特性方面,它具有三个基本特点:

- (1)在增加压缩应力时,允许材料的非线性软化;
- (2)可以模拟材料开裂及压碎以后的特性;
- (3)定义了拉坏及压碎的破坏包络。

混凝土总的多轴应力-应变关系是以单轴应力-应变关系引伸出来的。在ADINA中,混凝土单轴应力 $\bar{\sigma}$ 与单轴应变 $\bar{\epsilon}$ 之间的关系加载阶段如图3所示。其中有三个阶段:当 $\bar{\epsilon} > 0$ 时,材料受拉,应力-应变关系为线性,杨氏模量为一个常数

$$\bar{E}_0 = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}}$$

当 $0 > \bar{\epsilon} \geq \bar{\epsilon}_1$ 以及 $\bar{\epsilon}_1 > \bar{\epsilon} \geq \bar{\epsilon}_2$ 时,

$$\bar{E} = \frac{\bar{E}_0 [1 - B(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_1)^2 - 2C(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_2)]}{[1 + A(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_1) + B(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_1)^2 + C(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_2)]^2}$$

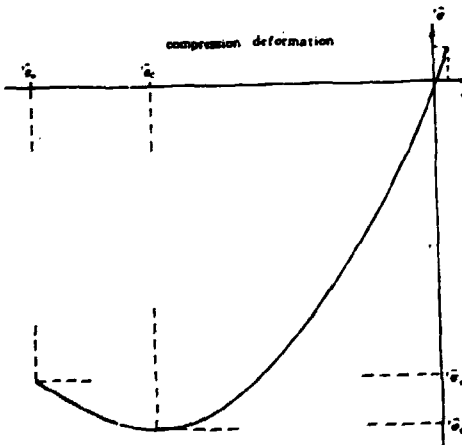


图3 混凝土单轴应力-应变关系

Uniaxial stress-strain curve for concrete

其中 A, B, C 可由单轴试验得到的参数 $\bar{E}_0, \bar{\sigma}_1, \bar{\epsilon}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\epsilon}_2$ 换算确定。

为了度量材料的加载和卸载,设一个加载函数 $f = \bar{S} + 3\alpha \sigma_m$,其中 α 是常数(通常为负值), $\sigma_m = \sigma_{ij}/3, \bar{S} = (\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij})^{1/2}, S_{ij} = \sigma_{ij} -$

$\sigma_m \delta_{ij}, \delta_{ij}$ 是kronecker $\delta_{ij} \begin{cases} i=j & \delta=1 \\ i \neq j & \delta=0 \end{cases}$

若 $f \geq f_{max}$,则材料为加载;若 $f < f_{max}$,则材料为卸载。其中 f_{max} 是在整个求解过程中,加载函数曾经达到过的最大值。

卸载时,材料假定为各向同性,此时用初始的杨氏模量 \bar{E}_0 来形成增量的应力-应变矩阵以进行刚度和应力的计算。

在加载条件下,材料的杨氏模量由三个主应力方向上的三个单轴杨氏模量加权相应三

个方向的 t 时刻的主应力得到

$$\sigma = \frac{|\sigma_{p1}| \bar{B}_{p1} + |\sigma_{p2}| \bar{B}_{p2} + |\sigma_{p3}| \bar{B}_{p3}}{|\sigma_{p1}| + |\sigma_{p2}| + |\sigma_{p3}|}$$

当受到拉伸或低的压缩时,材料被认为是各向同性的,且具有等价的多轴杨氏模量;若材料处于高压缩时,则采用正交方向由主应力方向来定义的正交异性应力-应变矩阵。相应于这些方向的应力-应变矩阵考虑为三维应力条件。

混凝土的破坏包络线是用 24 个离散应力值输入的,破坏包络线用来建立为多轴应力条件下计算用的单轴应力-应变定律以及用来说明材料是否已经出现拉伸或压缩破坏。图 4 为

混凝土模型的三轴压缩破坏包络。

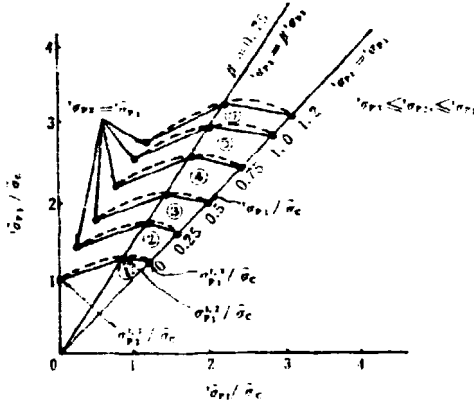


图 4 混凝土模型三轴压缩破坏包络

Envelop of triaxial compression failure for concrete model

如果在主应力方向上的拉伸应力超过拉伸破坏应力就发生拉伸破坏。在此情形下,假定破坏包络面是垂直于主应力方向的。材料破坏的结果是降低与破坏面相交的法向和剪切刚度,相应的法向应力被释放,这种应力突降和刚度阵的变化,将使局部的应力重新分布。拉伸的破坏平面一旦出现,并且沿着原来的破坏平面的法向应力达到了拉伸破坏应力,则后继的破坏平面总是假定在垂直于第一个破坏平面的方向上形成的。如果在以后加载时该处拉断面的法向应变为负,则此断面闭合,相当于与原来没有拉断面时一样。

在多轴应力条件下,用多轴破坏包络线来表示压碎,一旦材料被压碎,就假定其具有各向同性条件,在后继的求解步长中计算刚度矩阵时,假定杨氏模量为零。但在压应力计算时,仍按杨氏模量为负值处理,直到最小的主应变 ϵ_{p3} 达到 $\bar{\epsilon}_c$ 为止。当 $\epsilon_{p3} = \bar{\epsilon}_c$ 时,所有应力全部被释放掉,并且从此材料在该点不再具有抵抗能力。

在单向载荷下的试验结果表明,当应变率从 10^{-4} s^{-1} 变化到 10 s^{-1} 时,混凝土的抗压强度提高 0~80%,拉伸强度提高 0~50%,而初始杨氏模量提高 0~40%^[13-17]。为简化起见,在设计值的基础上本文将材料的强度特征值作了适当的修正。

4.2 钢筋材料的本构关系

对于钢筋,本文采用 ADINA 中所提供的弹-塑性模型。在弹-塑性分析中,描述材料性能除了弹性应力-应变关系以外,还用三个性质:

(1)屈服条件:它指定了相应于塑性流动开始时的多轴应力状态。本文选用了 Von Mises 屈服条件。

(2)流动法则:它把塑性应变增量与当前应力和屈服后的应力增量联系起来。

(3)硬化规律:它说明了塑性流动时如何修正屈服条件。

5 非线性方程求解方法

ADINA 中静力分析和动态问题的隐式时间积分主要可在两个公式系统中选择,其一为全量 Lagrangian (T. L.) 公式系统,这个解法中所有静力和运动变量都被认为是在 0 时刻初始状态下的量;另一为增量 Lagrangian (U. L.) 公式系统,它是基于与在 T. L. 公式系统中所用的相同的过程,但在解的过程中,所有静力和运动变量都被认为是在 t 时刻的状态下的量。[18~20]中说明了这两个公式系统的应用,并说明了这两种公式系统包括了所有由大位移、大应变和材料非线性性质引起的非线性效应。在二维分析中,从求解的总的结果上比较,用 T. L. 或 U. L. 公式系统在数值运算上的差别一般讲是小的,在 ADINA 中由所用的材料定律的定义来决定两者的选择。U. L. 公式系统仅用于线弹性材料的情况,而 T. L. 公式系统可用于线性和非线性的材料情况。由本题的结构受力特性和材料非线性特性,选用 T. L. 公式系统时,将具有较好的数值效率^[13]。

用数值积分法进行动力分析时,在每个时间步长中要求解的增量平衡方程为

$$M^{t+\Delta} \ddot{U} + C^{t+\Delta} \dot{U} + {}^tK U = {}^{t+\Delta}R - {}^tF \quad (5.1)$$

- 其中 M —— 质量矩阵;
 C —— 阻尼矩阵;
 tK —— 在时刻 t 的切线刚度矩阵,它包括线性和非线性的应变刚度矩阵;
 ${}^{t+\Delta}R$ —— 在时刻 $t + \Delta$ 的外部作用力矢量;
 tF —— 与时刻 t 的单元应力等效的节点矢量;
 ${}^{t+\Delta}\ddot{U}, {}^{t+\Delta}\dot{U}$ —— 在时刻 $t + \Delta$ 的节点加速度矢量和节点速度矢量;
 U —— 从时刻 t 到 $t + \Delta$ 的节点位移增量,即 $U = {}^{t+\Delta}U - {}^tU$;
 tU —— 在时刻 t 的节点位移矢量。

在动力分析中,本文采用的时间数值积分方法是 Neumark 法,假设

$${}^{t+\Delta}U = {}^tU + \Delta {}^t\dot{U} + \frac{\Delta^2}{2} \ddot{U} + \alpha \Delta^2 ({}^{t+\Delta}\ddot{U} - {}^t\ddot{U}) \quad (5.2)$$

$${}^{t+\Delta}\dot{U} = {}^t\dot{U} + \Delta {}^t\ddot{U} + \delta \Delta ({}^{t+\Delta}\ddot{U} - {}^t\ddot{U}) \quad (5.3)$$

为了无条件稳定,取 $\delta = 0.5, \alpha = 0.25$,由式(5.1)、(5.2)、(5.3)可以通过简单的消去法解得 $t + \Delta$ 时刻的位移、速度和加速度。考虑一个单独的有限元时,T. L. 公式系统中迭代所用的方程可以写成:

$$({}^iK_L + {}^iK_M) \Delta U^{(i)} = {}^{t+\Delta}R - {}^{t+\Delta}F^{(i-1)} - M^{t+\Delta} \ddot{U}^{(i)} - C^{t+\Delta} \dot{U}^{(i)} \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

- 式中 iK_L —— 线性应变增量刚度矩阵;
 iK_M —— 非线性应变(几何或初应力)增量刚度矩阵;
 ${}^{t+\Delta}R$ —— 施加在单元节点上的外载荷矢量;
 ${}^{t+\Delta}F$ —— 与 $t + \Delta$ 时刻单元应力等价的节点力矢列;

$$\Delta U^{(i)} = {}^{t+\Delta}U^{(i)} - {}^{t+\Delta}U^{(i-1)}$$

其中角标 (i) 表示用 ${}^{t+\Delta}U^{(i)}$ 来计算应力和应变。

对于物体的运动平衡方程,把所有变量都看作是前一步计算所得到的平衡状态下的已

知值,并且把本构关系线性化,可以得到一个近似解,这个解的精度可由平衡迭代改进,直到满足误差要求。式(6.1)是运动方程的线性化而得到的。由系统的非线性和时间步长 Δt 的数值,线性化的结果可能引起严重误差,使算得的解“飘离”精确解,尤其在动力分析时,某一时刻对任一给定载荷的解总是取决于解的历史。为了避免积分误差过大和不稳定,可以决定在每个载荷步长中进行迭代。当材料是弹性或超弹性的,那末此时的平衡迭代相当于具有常数刚度矩阵的 Newton 迭代,所以在具有弹性或超弹性材料的几何非线性动态分析中,可以不必在每个时间步长中形成新的刚度阵,用平衡迭代就可以保证解的精度。但当材料为非线性的,此时解的路经由切线刚度阵来确定,为了保证解的精度就需要足够小的载荷步长,就本题的计算结果来看,时间步长取 0.25 ms,是能够满足精度要求的。

对应于不同的条件,ADINA 提供了几种不同的迭代方法。其中有带线性搜索的修正牛顿迭代法,完全牛顿迭代法,BFGS 法及自动步长调整法等。本文所选用的 BFGS 法,是拟牛顿法中的一种方法,它是在迭代过程中修正系数逆矩阵,为从第 $i-1$ 次到第 i 次迭代提供一个割线近似值。这种方法每一步迭代所花的代价较之牛顿法来要大一些,但只要步长合适,结果一般是收敛的。其具体算法为

$$\begin{cases} {}^{i+1} [K^{(i-1)}] \cdot \Delta U^i = {}^{i+1} R - {}^{i+1} F^{i-1} \\ {}^{i+1} U^i = {}^{i+1} U^{i-1} + \beta \cdot \Delta U^i \end{cases}$$

其中 ${}^{i+1} [K^{(i-1)}]$ 是基于迭代历程的修正刚度矩阵。

由于飞机撞击荷载的作用时间极短,结构阻尼对于结构反应的影响并不明显,本题考虑阻尼为 5%。

6 结果分析

6.1 变形

用 ADINA 进行了静力和动态分析。在动态分析时,取时间步长 Δt 为 0.25 ms,共计算了 600 步,历时 150 ms,而载荷函数历时为 105 ms。静力分析以载荷函数的最大峰值为最终加载值,每一次加载的值为最终值的 0.25%。

图 5 所示为穹顶中心的竖向位移-时间曲线。其中实线为用 ADINA 程序计算的结果,为了比较,图上还用虚线绘出了用 SAP-5 程序作弹性和拟弹塑性动态分析而得出的穹顶中心的竖向位移(挠度)-时间曲线。从图中可以看到,壳体的动力反应的竖向位移的最大峰值出现在飞机撞击的过程中,方向向下,出现在载荷函数的峰值滞后 10 ms 左右处。计算结果表明,结构反应的最大峰值已包含在计算历时 150 ms 的范围以内。从竖向位移历程曲线来看,ADINA 分析结果和 SAP-5 分析结果的曲线的形态大致相似。用 SAP-5 进行拟弹塑性分析 [21] 所得到的竖向位移峰值与 ADINA 分析所得出的结果比较接近,所以反过来可以说明,从工程上的要求来讲,用 SAP-5 作局部弹性模量折减而进行拟弹塑性分析是可取的。但是与弹性分析结果相比,量值上增加很多,各峰值到达的时间有所后移,各周期的最大值也要大一些,这可以由材料非线性和结构的几何非线性特性而得到解释。静力分析结果与动态分析结果相比,非线性动态分析的动力特性是比较显著的,动力系数约为 1.35,所以对于材料非线性和几何非线性的结构反应,动态分析是有必要的。而弹性分析则有所不同,弹性分析中动力特性表现得不明显 [21]。

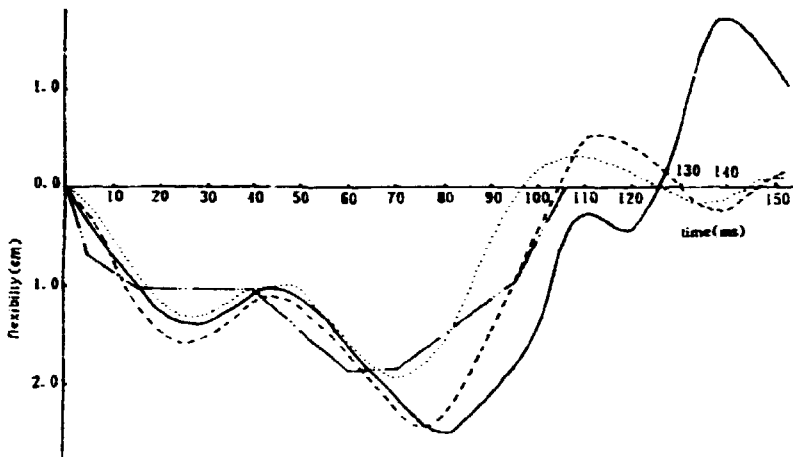


图5 穹顶中心挠度-时间曲线

Variation of flexibility (in the center of dome) with time

- (ADINA) nonlinear
- (SAP-5) quasi-elasto-plastic
- (SAP-5) elastic
- - - - load-time curve

图6所示为对应于穹顶中心最大竖向位移到达时刻的整个壳体的竖向位移的分布情况。其中实线为ADINA所作非线性分析的结果，而虚线为SAP-5所作拟弹塑性分析的结果。从竖向位移的分布来看，被飞机撞击的局部区域有较大的竖向位移量值，随着远离撞击区域，位移量值迅速衰减，在离穹顶中心半径约8 m以外，竖向位移量值已非常小。所以，有些文献中进行安全壳在飞机撞击下的力学分析时，只取环梁以上部分作为结构计算模型。而本题之所以取整个安全壳为结构计算模型，是为了更好地考虑筒体的振型特别是竖向振型的影响，以便更加符合结构的实际受力情况。从图中可以看到，ADINA作非线性分析而得到的

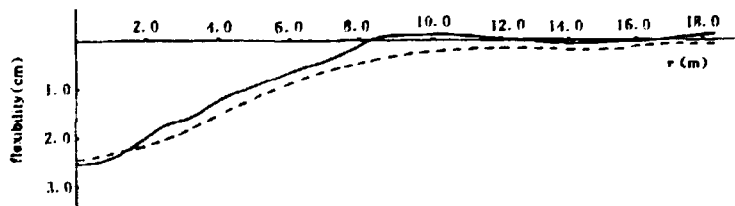


图6 相应于穹顶中心最大挠度峰值到达时刻的穹顶上各点挠度的分布

Flexibility distribution in the center of dome

- (ADINA) dynamic state
- (SAP-5) quasi-elasto-plastic dynamic state

在被撞击区竖向位移梯度较之 SAP-5 作简化的拟弹塑性分析所得到的竖向位移梯度要大, 相对来讲, SAP-5 的结果在该区域的变化较缓和, 曲线在该处较为平坦。从 ADINA 分析结果可以看出, 安全壳被撞击区的局部非线性效应是较为显著的, 这从 6.2 节结构的受力情况分析中, 可以更加清楚地反映出。

6.2 内力

图 7、8 所示, 分别是用 ADINA 作非线性动态分析和静力分析所得出的穹顶上、下层混凝土单元沿面层的积分点上的主应力在相应于穹顶中心最大挠度峰值到达时刻的沿穹顶壳面的分布。

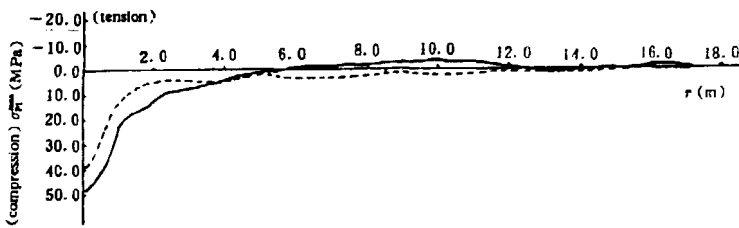


图 7 穹顶层混凝土主应力分布
Principal stress distribution in the upperlayer of dome
—— dynamic state(ADINA)
----- static state(ADINA)

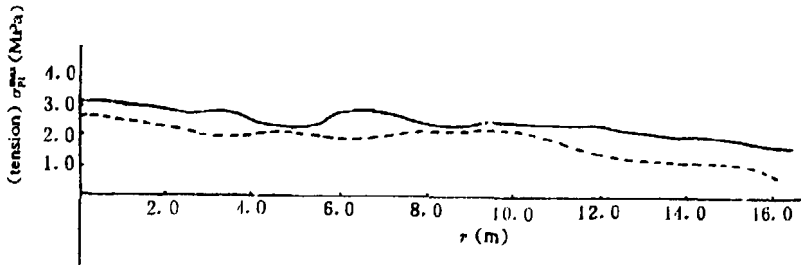


图 8 穹顶下层混凝土主应力分布
Principal stress distribution in the sublayer of dome
—— dynamic state(ADINA)
----- static state(ADINA)

在穹顶中心, 即飞机撞击的区域范围里, 应力的量值较大, 而且变化急剧, 随着远离中央, 应力值很快衰减, 过了被撞击区域以外, 应力值趋于平稳。

上层混凝土基本上处于受压状态, 在被撞击的区域里, 具有较大的压应力, 并超过了混凝土的设计抗压强度, 但离开撞击区以外, 应力值迅速减小, 在局部区域还出现了很小量值的拉应力, 到了环梁附近, 应力值已非常小了。

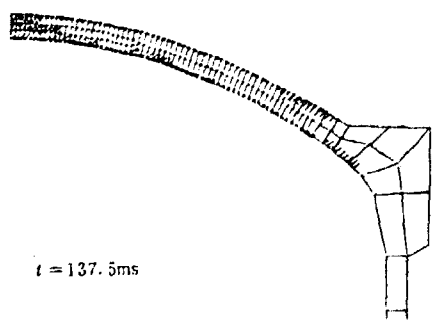
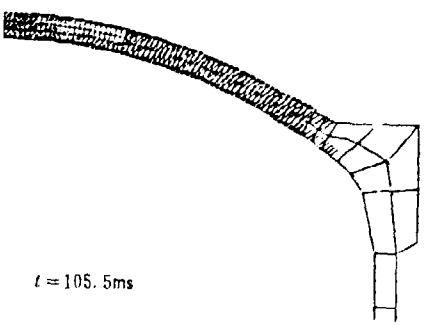
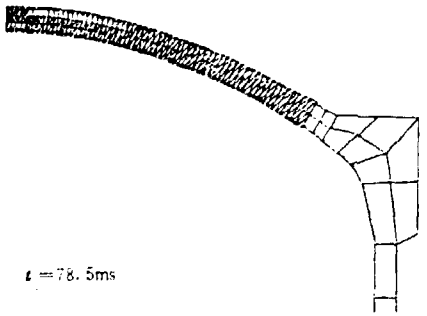
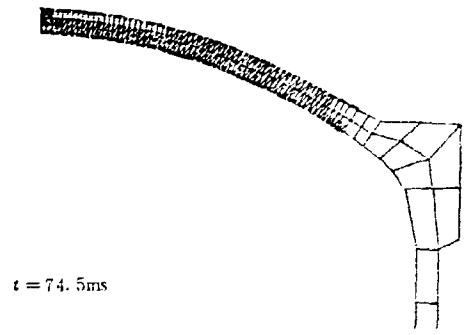
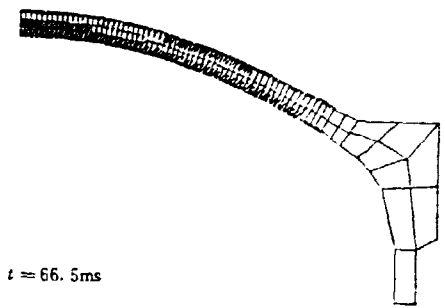
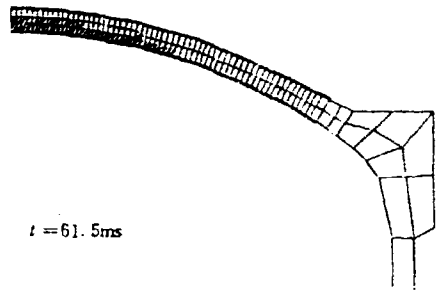
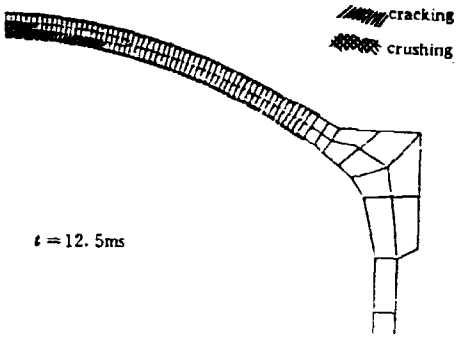
下层混凝土基本上处于受拉状态, 并且其拉应力的量值除了在撞击区附近稍大一

些以外,基本上变化较小,从其曲线形态来看,比较平坦。静力分析的结果在曲线形态上与动态分析的结果基本上相似,但就其量值来讲较动态分析所得到的结果为小,并且,其应力的分布也有所不同。由此反映出动态情形下,惯性力的影响,以及非线性分析中结构的动力特性。从应力分布的情况来看,由于撞击区域的塑性变形,材料屈服和形成塑性铰,使撞击区附近的应力重新分布。

6.3 开裂及破坏

从分析结果来看,混凝土产生裂缝的区域是广泛存在的,在穹顶中心、被撞击区局部范围里,还存在被压碎的部分。图 9~16 为壳体开裂及破坏的开展情况。最先产生裂缝的是穹顶中央部位下层混凝土(图 9),以后随着荷载作用时间的增长,裂缝产生的范围逐渐扩展,不仅如此,上层混凝土在局部地方也出现了裂缝,同时,穹顶中心局部混凝土被压碎,见图 10~13。荷载作用时间到了 105 ms 左右,混凝土开裂的现象几乎布及整个穹顶部(图 14),此时,混凝土被压碎部分也有些增加。当荷载作用中止以后,逐渐有部分开裂断面闭合,即“恢复”到原来没有断面的状态,直到 120 ms 左右的时候,穹顶上的混凝土的曾经产生裂缝的地方大部分都重新闭合,只有撞击区域里的下层混凝土的开裂断面不再闭合(图 15)。随着结构的自由振动,局部地方已经闭合的开裂断面又再度出现裂缝,但范围已大为减小(图 16)。到了最后约 150 ms 左右的时候,撞击区附近下层混凝土的裂缝仍然存在,同时环梁附近上层混凝土及环梁处内侧混凝土也有裂缝存在,在荷载直接作用的穹顶中心处沿壳面的混凝土局部被压碎。

从钢筋的应力分布情况来看,尽管整个穹顶的混凝土有较大范围的开裂现象存在,并有局部地方被压碎,但分布于上、下表面的钢筋的应力值都比较小,没有钢筋达到屈服。由此可见,壳体的混凝土的开裂的程度并不严重。钢筋与未被破坏的混凝土在一起支撑壳体,使安全壳穹顶仍然起着整体结构作用。事实上,正如 6.1 节所指出的那样,穹顶的整体变形并不显著。计算结果表明,安全壳穹顶在飞机撞击荷载作用下,会出现塑性区域,撞击区附近的局部非线性效应比较明显。尤其在结构带裂缝工作的情况下,由于刚度的突变和刚度矩阵的改变,使应力分布及裂缝开展方面有新的特征,而在撞击区以外,无论是变形还是内力,其量值都衰减得很快。所以,虽然飞机撞击荷载使安全壳局部产生塑性变形,但对整个安全壳壳体来讲,不会造成重大威胁。



7 结论与说明

(1)本课题的工程背景是为秦山核电厂在假设的军用训练飞机坠毁事故下安全壳的安全性的核算。虽然在工程设计中,此类事故的概率小于设计限值而可以不考虑飞机撞击荷载。但是,为了确保安全,对秦山核电厂安全壳厂房进行假设飞机撞击事故下结构的动力反应分析,使得对于安全壳的结构性能有更进一步的了解是很有意义的。同时,它还将是对核电厂安全分析报告的支持性材料的补充。所以,本题在分析中所用的安全壳几何尺寸是按原设计提供的,材料特征考虑到高应变率等因素在原设计值的基础上作了适当的修正,而飞机撞击函数也考虑到军用训练飞机的机型规格,作了相应的修正。本文计算结果表明,万一发生飞机撞击事故,安全壳结构仍然是足够安全的。

(2)由于钢筋混凝土材料的非线性以及安全壳结构在飞机撞击荷载作用下发生局部的塑性变形,使结构反应具有新的特性。而弹性分析的结果是比较粗略和保守的。因此,进行飞机撞击荷载下安全壳非线性动态反应分析,则可以更全面、细致地理解结构的性能。对于工程设计而言,极限荷载的提高则意味着结构安全性的增加。所以对钢筋混凝土安全壳进行在飞机撞击荷载作用下的非线性动态分析是十分必要的。

(3)由于本文采用非线性方程求解,能使材料的本构关系更加接近于实际状态。包括能够模拟钢筋的屈服硬化,以及混凝土在增加压缩应力时材料弱化的非线性应力-应变关系;模拟材料开裂和压碎以后的特性;以及在多轴条件下的拉坏和压碎的破坏包络。在求解中,材料可承受循环加载条件,即在数值求解时,允许包括拉伸破坏平面钝化的卸载和重新加载等等。因此,能够较为确切地揭示结构的真实受力状况,从而使分析结果更为可信。

(4)在具体分析时,采用了自动动态增量非线性有限元分析程序,所以,结果的可靠性基本上是可以保证的。但是,在实际运用计算的过程中,发现该程序虽然被认为可以解具有大位移和大应变的材料非线性和几何非线性的结构动态问题,但实际上对于具体问题中大位移、大应变是有一定限度的。尤其对于荷载量值大、结构变形较为显著的问题,要得到最终的计算结果有一定的难度,往往在平衡迭代过程中会发散,而不能计算到最后一个步长。通过计算还发现,在这种情形下(即由于荷载值大、结构变形在局部地区较为显著),载荷步长的减小或迭代时间步长的调整似乎对平衡迭代的收敛帮助作用并不明显,但尽管如此,结构计算模型的网格的划分,迭代时间步长的足够小的选取,对于计算结果的收敛以及计算结果的精确度还是很重要的。当然,为了保证平衡迭代的收敛,还有待于研究和改善求解非线性方程的对策。

(5)用非线性分析程序 ADINA 所得到的穹顶中心的挠度-时间曲线,与用线性分析程序 SAP-5 作简化的、局部弹性模量折减的拟弹塑性分析所得到的结果相比,其最大挠度峰值是比较接近的,曲线的形态也大致相似。所以,光就穹顶中心的变形而言,在工程设计中,按经验确定的局部弹性模量折减的拟弹塑性分析,再加上适当的构造措施,基本上已经能够满足工程设计的要求。而相对来讲,采用非线性分析程序计算所花费的 CPU 机时,要比用线性分析程序作拟弹塑性分析要多几十倍。

参 考 文 献

- [1] 法国 90 万千瓦压水堆核电站土建设计和建造规则 RRC-G. 核科学技术情报研究所出版, 1983
- [2] 美国核管理委员会反应堆管理局“标准审查大纲”. 轻水堆版 NVREG 08000, 核工业部科技核电局编印
- [3] D. Riera. On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces. *Nuc. Eng. & Des.*, 1968; 415~426
- [4] J. F. Chacón, et al. Equivalent Loading Due to Airplane Impact Taking into Account the Nonlinearities of Impacted Reinforced Concrete Buildings. *Nuc Eng & Des.*, 1985; 47~57
- [5] N. J. Krnting Reduction of Aircraft crash Impact Loading Using New Design Concept for Specific Impact Regions on Building Structures 9th-SMIRT Vol. (J), 1987, Lausanne
- [6] 潘华平等. 圆底扁球壳体在任意集中脉冲荷载作用下的动力响应; 同济大学, 1984
- [7] Cedolin L, et al. Triaxial Stress-Strain Relationship for Concrete. *J. Eng. Mech. Div. ASCE* 1977 (103) EM3; 423~439
- [8] Coon M D, et al. Incremental Constitutive Laws and Their Associated Failure Criteria with Application to Plain Concrete. *Int. J. Solids Struct.* 1972(8); 1169~1183
- [9] Chen W F. constitutive Equations for Concrete Plasticity in Reinforced Concrete Introductory Report. IABSF colloquim, Copenhagen, 1979; 11~34
- [10] Bazant Z P, et al. Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete. *J. Eng Mech. Div. ASCE* 1976 (102) EM4; 701~722
- [11] Bazant Z P, et al. Plastic-fracturing Theory for Concrete. *J. Eng. Mech. Div ASCE* 1979(105) EM3; 407~428
- [12] K. J. Bathe, et al. On three Dimensional Nonlinear Analysis of Concrete Structures. *Nuc. Eng. & Des.*, 1979(52); 285~409
- [13] Griner G R, et al. Dynamic Properties of Concrete under Impact Loading. *Shock and Vibration Bulletin*, 45 (1974-1975); 131~142
- [14] Goldsmith W, et al. Dynamic Behavior of Concrete Experimental Mechanics, 1966(6) 2; 65~79
- [15] Read H E, et al. The Dynamic Behavior of Concrete Systems. Science and Software, Report 3SR-707, 1971
- [16] Takeda J, et al. Mechanical Behavior of Concrete under Higher Rate Loading than in Static Test Mechanical Behavior of Materials, Symposium Procedure. Kyoto, Japan, 1974(2); 479~486
- [17] G. Q. Liu, D. R. J. Qwel Ultimate Load Behavior of Reinforced Concrete Plates and Shells under Dynamic Transient Loading. *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1986(22); 189~208
- [18] Bathe K J, et al. Finite Element Formulations for Large Deformation Dynamic Analysis. *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, 1975(9); 353~386
- [19] Bathe K J. An Assessment of Current Finite Element Analysis of Nonlinear Problems in Solid Mechanics. Proceedings SYNSPADE, 1975, Academic Press, 1976
- [20] Bathe K J, et al. Elastic-Plastic Large Deformations Static and Dynamic Analysis. *J. Computers and Strc.*, 1976(6) 2; 81
- [21] 左家红. 秦山核电站安全壳在飞机撞击荷载下的整体动力反应. 1989 年固体力学年会, 固体力学在工程中的应用学术会议论文集. 上海, 1989

**秦山核电站安全壳在飞机撞击
下的整体动力反应**

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社激光照排中心排版

北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本 787×1092 1/16 ·印张 1·字数 20 千字

1991 年 8 月北京第一版·1991 年 8 月北京第一次印刷

印数—120

ISBN 7-5022-0504-7

TL·274

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

ISBN 7-5022-0504-7
TL • 274

P.O.Box 2103
Beijing, China

China Nuclear Information Centre