

## PROBABILISTIC ASSESSMENT OF AIRCRAFT HAZARD FOR NUCLEAR POWER PLANTS

C.V. CHELAPATI,  
*Department of Civil Engineering,  
California State College, Long Beach, California,*

I.B. WALL,  
*General Electric, San Jose, California,*

R.P. KENNEDY,  
*Holmes & Narver, Inc., Los Angeles, California, U.S.A.*

As part of a general probabilistic safety analysis, the risk of structural damage to a nuclear power plant from aircraft crashes has been evaluated in a quantified manner. Frequency distributions of aircraft speed and weight and engine weight were constructed for small and large aircraft and for site locations adjacent to and remote from an airport; an analysis of aircraft accidents is presented to establish the probability of an aircraft hitting a nuclear power plant. If an aircraft hits a building, either the whole building or just the local component may respond. It is shown that the response of entire reactor building is negligible and the damage to specific structural components are of concern.

Components of a reactor building may experience structural damage in several modes as a result of an aircraft crash. It is essential that one consider all modes of damage for any particular component to establish the critical mode of damage. Further, depending upon various parameters involved, the critical mode of damage may vary for different components. For the specific case of an aircraft striking a reactor building, one could consider three modes of damage. The aircraft engine might perforate the structural component. This type of damage is classified as "*Perforated Mode of Damage*". The second mode is classified as "*Cracking Mode of Damage*" where the structural component ceases to function satisfactorily after the impact due to extensive cracking. The third mode is classified as "*Collapse Mode of Damage*" where a local collapse of the structural system occurs. For a typical layout of a BWR plant, it was judged that an 18 inch thick concrete sidewall located at the top floor of the reactor building was the most critical structural component. In this paper the probability of damage of this sidewall for all three modes of damage is investigated.

Available empirical formulas for perforation of concrete are examined and new formulas are proposed to cover the range of parameters encountered in aircraft engine impact. Uncertainties in formulation are discussed and the probability of damage for this mode is determined using Monte Carlo methods.

Under the impact of an aircraft, the "*Cracking Mode of Damage*" is estimated using elastic analyses. Solutions are obtained using a finite element idealization and considering the maximum reactive force due to aircraft strike as a static load. Dynamic analysis using the modal method is also conducted to estimate the critical stresses in the wall panel.

The last phase of this study was to evaluate the conditional probability of local collapse of the wall panel using probabilistic approaches and yield line theory. The striking location, and thus the critical yield pattern; the moment; and rotational capacities are all treated as random variables. -

It is concluded that the aircraft risk is usually acceptably low for the typical case studied here.

DISCUSSION

**Q** R. S. BEKOWICH, U. S. A.

1. Have you considered aircraft carrying heavy solid objects such as a tank ?
2. Have you related the impact analysis to the contact area between the projectile and the structure ?

**C** C. V. CHELAPATI, U. S. A.

Result of about 80 experiments on the impact of projectiles on concrete slabs (reinforced and plain with and without a liner) show that the failure phenomena are spalling on the back side of the structure that extend, for higher forces, to the outside surface. The corresponding perforation at the impact surface was considerably less significant.

**C** W. STRUCK, Germany

Viele Ansätze zur Sicherheitsbetrachtung auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Grundlage werden deswegen nicht quantitativ vollendet, weil man bei der Detailarbeit erfahren muss, wie viele Lücken im Kenntnisstand und bei den erforderlichen zahlenmässigen Unterlagen erst noch ausgefüllt werden müssen (1).

Umso aner kennenswerter ist daher die Mühe und der Mut derjenigen, die trotz dieser widrigen Umstände eine solche wahrscheinlichkeitstheoretische Sicherheitsbetrachtung bis zum Ende durchführen. Über die Näherungen und Annahmen, die dabei dann gemacht werden, um die Lücken provisorisch zu füllen, kann man verschiedener Meinung sein. Man wird sie bei Erweiterung der Kenntnisse bzw. der Zahlenunterlagen später verbessern oder ändern. Wesentlich ist, dass erst einmal die Betrachtung konsequent bis zum Endergebnis in Zahlenwerten durchgeführt wird, und dabei die zugrundegelegten Näherungen und Annahmen klar herausgestellt werden, wie es hier in so hervorragender Weise geschehen ist.

Zu einem der Einzelprobleme hier noch einige Bemerkungen:

Bei den hier u. a. zur Debatte stehenden Überlegungen über das Versagen einzelner Bauteile durch Überschreiten ihrer Grenztragfähigkeit gegenüber stossartiger Belastung sind die mechanischen Gesetze des kurzen Stosses "ohne Randeinfluss" (2), zugrundegelegt worden, wie es z. B. auch in (3) geschah. Mit entsprechendem Hinweis auf Vorsicht sind diese Überlegungen auch für den Aufprall grosser Flugzeuge angewandt worden. Bei dieser Art Aufprall handelt es sich aber sicher um einen langen Stoss, bei dem die Auflagerreaktionen des gestossenen Bauteils nicht mehr vernachlässigt werden sollten. Der Absorptionsfaktor  $F_A$  ist dann ausser vom Verhältnis der mitwirkenden Massen  $W_I/W_w$  auch von dem Verhältnis des Stosskraft-Verformungs-Gesetzes an der Kontaktstelle zwischen stossendem und gestossenen Körper (d. h. im wesentlichen der Steifigkeit  $c_1$  des Flugkörpers) zum Kraft-Verformungs-Gesetz, also der Steifigkeit  $c_2$  des gestossenen Bauteils abhängig.

Für den elastischen Grenzfall kann man  $F_A$  z. B. errechnen über

$$F_A = \frac{W_I}{W_w} \cdot K_E^2 \quad \text{mit} \quad K_E = K_E \left( \frac{W_I}{W_w} ; \frac{c_1}{c_2} \right) \quad \text{nach (4)}$$

Andererseits sollte man erwägen, ob es für die Fälle des Aufprallens grosser Flugzeuge nicht sinnvoller ist, die Lösung mit Hilfe wirklichkeitsnah variiertes Stosskraft-Zeit-Verläufe zu versuchen, wie es für Einzelfälle z. B. in (5) bis (7) geschehen ist.

Da die Verformungen des gestossenen Bauteils klein sind gegenüber den Verformungen des Flugzeuges beim Aufprall, und damit der zeitliche Verlauf der zwischen den beiden Körpern wirkenden Stosskraft nur geringfügig vom Verformungsverhalten des gestossenen Bauteils beeinflusst wird, ist es gerechtfertigt, entsprechende Stosskraft-Zeit-Verläufe unter der Annahme des Aufprallens auf eine starre Wand zu ermitteln.

Bei Kenntnis des Stosskraft-Zeit-Verlaufes braucht die Frage nach der Art des Stosses (elastisch, plastisch oder wieviel Energie durch spezielle Flugzeugeigenschaften dem Stossvorgang entzogen werden) nicht mehr gestellt zu werden. Das Problem wird dadurch aufteilbar. Auf der einen Seite müssen die Verteilungsfunktionen der die Stosskraft-Zeit-Verläufe charakterisierenden Parameter abgeschätzt werden, auf der anderen Seite ist die Variation des Verhaltens des gestossenen Bauteils für bestimmte Stosskraft-Zeit-Verläufe zu ermitteln. Die Stosskraft-Zeit-Verläufe lassen sich der jeweiligen technischen Entwicklung im Flugzeugbau durch Berechnung verhältnismässig leicht anpassen. Die Ermittlung des Geschehens am gestossenen Bauteil unter gegebenem Stosskraft-Zeit-Verlauf bei bekanntem Verformungsverhalten wird ebenfalls bei langen Stössen auf analytischem Wege immer mit ausreichender Genauigkeit abschätzbar sein.

Die Bestimmung der tatsächlichen Grenztragfähigkeit der Bauteile unter entsprechenden Bedingungen ist dagegen ohne die Grundlagen aus zeit- und kostenaufwendigen Versuchsarbeiten nicht möglich.

Die auf diesem Gebiet begonnenen Forschungsarbeiten, z. B. auch (8), sollten deswegen so schnell und so intensiv wie möglich weiterbetrieben werden.

#### References:

- (1) W. Struck, "Zur Frage der Sicherheit bei der Beurteilung von Bauteilen nach Versuchsergebnissen", Die Bautechnik, 48 (1971) pp. 188-195.
- (2) E. Limberger und W. Struck, "Die stossartige Beanspruchung von Bauteilen", VDI-Zeitschrift, 113 (1971) pp. 793-798.
- (3) W. Struck und E. Limberger, "Näherungslösung für das Verhalten eines elastischen Systems unter einem unelastischen Stoss", Nuclear Engineering and Design, 12 (1970) pp. 452-456.
- (4) E. Limberger, "Ein (Feder-Masse)-(Feder-Masse)-Schwinger zur Lösung von Stossproblemen", Materialprüfung, 13 (1971) Nr. 10.
- (5) J. D. Riera, "On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces", Nuclear Engineering and Design, 8 (1968) pp. 415-426.
- (6) H. T. Y. Yang and D. A. Godfrey, "Structural analysis of aircraft impact on a nuclear containment vessel and associated structures", Nuclear Engineering and Design, 11 (1970) pp. 295-307.

- (7) W. Struck, E. Limberger und K. Brandes, "Zur Abschätzung der Beanspruchung in Flächentragwerken bei örtlicher Stossbelastung mit Parameterstudie am Beispiel einer Stahlbeton-Kugelschale", Sammelband wissenschaftlicher Kurzberichte der Mitarbeiter der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Berlin, erscheint 1972.
- (8) H. Eifler, "Bericht über Vorversuche für die Ermittlung des Werkstoff- und Verbundverhaltens im Bereich plastischer Gelenke von Stahlbetonplatten bei statischer Belastung", Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Berlin, Aktenzeichen 212/11 931<sup>1</sup> (Okt. 1969).

R. P. KENNEDY, U. S. A.

**A**

Our primary purpose was to evaluate the probability of collapse of the wall slab given the condition of aircraft impact. For a ductile wall slab, collapse is expected when the total flexural strain energy capacity of the slab has been exceeded. Furthermore, the kinetic energy of the striking aircraft is better specified than is a force-time history of impact. Therefore, it seemed most logical to approach the problem of wall collapse under aircraft impact on an energy basis in which the strain energy capacity of the wall is compared to the kinetic energy absorbed from the impacting aircraft.

One major advantage to this energy approach was that it lead to a closed-form analytical solution. This made it possible to incorporate a probabilistic approach in which the variability of each important variable is assessed and utilized. These variables included the moment and rotational capacity of the slab yield lines, type of impacting aircraft, location of impact, and type of impact.

When evaluating wall cracking a impact force time history would be highly desirable. These force time histories are currently not known for general aircraft impact.