

衝撃荷重を受ける RC 構造物の解析的研究

独立行政法人 原子力安全基盤機構 正会員 日比野 憲太 伊藤 博夫
 本橋 章平 蛭沢 勝三

1. 目的

使用済核燃料の再処理施設は、その立地条件に応じて航空機衝突事故などの外的要因に対する防護が求められる。これらの施設の多くは、建屋の構造形式が RC 構造であるため、航空機衝突に対する RC 構造物の衝撃耐力や破壊挙動を把握する必要がある。本研究では、航空機のエンジン等の剛飛来物が高速 (200 ~ 400 m/s) で RC 構造物に衝突する際に生じるスポール破壊に着目し、それを表現するコンクリート構成則の定式化を試みた。小鹿ら¹⁾および武藤ら²⁾の RC スラブの衝撃実験を対象とし、提案したコンクリート構成則を組み込んだ汎用衝撃解析コード (AUTODYN) を用いた検証解析を行い、ミサイルの貫通量や RC スラブの損傷状況を比較することにより、本構成則の妥当性および問題点に関する検討を行った。

2. 解析概要

筆者らは既往の研究³⁾において、衝撃荷重を受けるコンクリートの挙動を表現する構成則 (DYCAPS モデル) を提案している。このモデルは、降伏・破壊面にひずみ速度依存性を考慮し、塑性ポテンシャルを用いて硬化・軟化特性を表現できるようにしたものである。本研究では、さらにひずみ速度の増加による引張強度の増加を考慮した動的スポール破壊強度を導入した。

スポール破壊とは、応力波が物体の自由表面で反射し戻ってくる際に進行波と干渉し、大きな負圧が発生することが原因で、引張破壊を生じる現象である。本研究では、動的スポール破壊強度を設定することにより、それより大きな圧力が発生した箇所をスポール破壊したものと判定することとした。

DYCAPS モデルの動的な降伏面および破壊面の概要を図-1 に示す。横軸は静水圧 (p)、縦軸は降伏応力 (s_y) である。動的スポール破壊強度 (p_{min}^d) は、図-1 に示す破壊面が静水圧軸と交わる応力 (p_{\perp}^d) とひずみ速度依存性を考慮した一軸引張強度 (f_t^d) を比較し、小さい方の値を採用した。

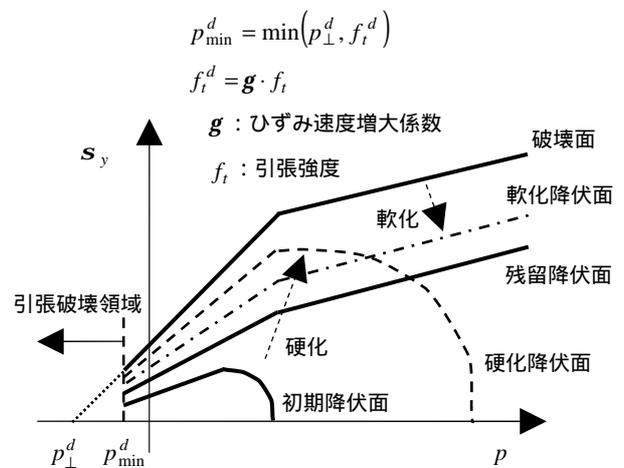


図-1 DYCAPS モデルの動的な降伏面と破壊面

3. 検証解析の概要

改良した DYCAPS モデルを用いて、表-1 に示す小鹿らおよび武藤らの RC スラブの衝撃実験を対象とした検証解析を行った。小鹿らの実験ではミサイル衝突時のスラブ厚の違いによるミサイルの貫入量、武藤らの実験ではミサイル衝突時のスラブ厚の違いによる破壊モードに関する検討を行っている。

本検証解析では、試験体の対称性を考慮して、二次元軸対称問題として扱った。また、RC スラブはコンクリートを模擬したラグランジュ要素と、鉄筋の総断面積と等価なシェル要素によりモデル化した。

表-1 実験概要

	小鹿らの実験	武藤らの実験
試験体 (寸法、鉄筋比)	300 × 300 mm (無筋)	1500 × 1500 mm $p_x = 0.4\%, p_y = 0.4\%$
ミサイル速度 (m/s)	400 m/s	200 m/s
スラブ厚 (mm)	100, 130, 160 mm	150, 180, 350 mm

キーワード コンクリート、衝撃、スポール破壊、構造解析

連絡先 〒105-0001 東京都港区虎ノ門 4-3-20 (独) 原子力安全基盤機構 解析評価部 TEL: 03-4511-1860

4. 解析結果および考察

小鹿らの実験を対象とした検証解析から得られたミサイル貫入量を、実験結果と比較して表-2 に示す。また、スラブの損傷状況の一例として、スラブ厚 130 mm のケースの解析結果を実験結果と比較して図-2 に示す。ミサイルの貫入量（ミサイル先端から衝突前のスラブ表面までの距離）の解析結果は、実験結果とほぼ一致する結果となった。スラブの破壊状況に関しては、ミサイルが貫通するケースで生じるスラブ表裏面でのクレータ形状およびミサイルが貫入するケースで生じるスラブ表面でのクレータ形状共に、そのひび割れ進展状況は実験結果とほぼ一致する結果となった。また、ミサイルが貫通するか貫入するかは、スラブ厚に対し 30 mm 程度の差の範囲で判断できることを確認した。ただし、貫通のケースでのミサイルの残留速度は、実験では 0 m/s と報告されているが、本解析では 73 m/s 程度を有しており、残留速度に関する検討が今後は必要である。

武藤らの実験を対象とした検証解析から得られた RC スラブの損傷モードを、実験結果と比較して表-3 に示す。スラブ厚に応じて、実験結果に近い損傷モードが得られていることが確認できる。ただし、表中の Scabbing とはミサイルは貫通しないがスラブ裏面からコンクリートが剥離飛散する損傷、Just Perforation とはミサイルは貫通しないがスラブには貫通口が開いた損傷、Penetration とはスラブ表面にクレータが生じるが裏面には剥離飛散を生じない損傷を示している。本解析から得られた RC スラブの損傷状況の一例として、スラブ厚 150 mm の場合での Scabbing のケースの損傷状況を図-3 に示す。本ケースの損傷状況は、スラブ裏面付近にコンクリートの剥離飛散破壊が確認でき、本構成則を用いることにより、典型的なスポール破壊が推定可能なことが確認できる。

5. まとめ

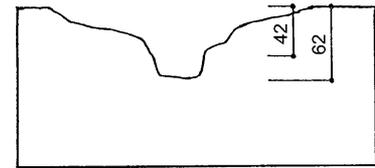
従来までの DYCAPS モデルに動的スポール破壊強度を考慮することにより、RC 構造物に高速 (200 ~ 400 m/s) で剛飛来物が衝突した際に生じるスポール破壊時の損傷状況を、推定可能なことを確認した。ただし、ミサイル貫通後の残留速度は、小鹿らの実験結果と比較して、大きく推定する傾向が確認された。今後は、この残留速度に関する検討を行う必要がある。

参考文献

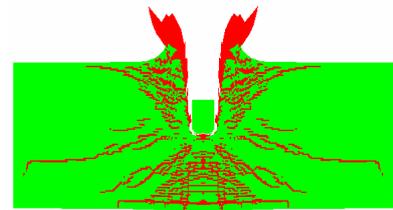
- 1) N.Koshika. et al. : A quantitative appraisal of local damage to concrete structures under impact loading, Proc. of the Int. Symp. on Impact Engng. Vol.1, pp.258-263, Sendai Japan, 1992.11
- 2) K.Muto. et al. : Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impact of Deformable Missiles Part 1, Outline of Test Program and Small-Scale Tests, Trans. of 10th Structural Mech. in Reactor Tech., Vol. J, pp.257-264, Anaheim California USA, 1989.10
- 3) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：平成 15 年度 核燃料施設安全解析コード改良整備 コンクリート構造物の衝撃破壊挙動解析に係るコード整備に関する報告書 (JNES / SAE03-078) , 2004.10

表-2 ミサイル貫入量 (小鹿らの実験)

スラブ厚 (mm)	貫入量 (mm)	
	実験	解析
100	貫通	貫通
130	62	63 ~ 69
160	63	61 ~ 65



(a) 実験結果 (130 mm)



(b) 解析結果 (130 mm)

図-2 損傷状況 (小鹿らの実験)

表-3 損傷モード (武藤らの実験)

スラブ厚 (mm)	損傷モード	
	実験	解析
150	Scabbing	Scabbing
180	Just Perforation	Just Perforation に近い
350	Penetration	Penetration

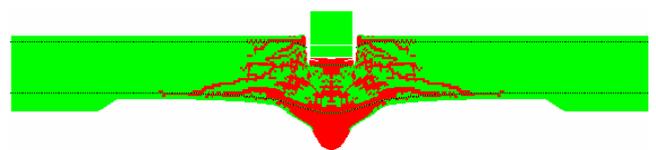


図-3 損傷状況 (武藤らの実験、150 mm, Scabbing)