

高速飛翔体の斜め衝突に対するコンクリート板の損傷に関する実験的研究

防衛大学校 学生会員 藤井 敬久 学生会員 田中 信行
 正会員 大野 友則 正会員 別府万寿博

1. 緒言

爆発事故時に発生し得る爆発物の破片や構造部材・材料の破片などの飛翔体に対して、コンクリート構造物の安全性を検討するためには、局部破壊を予測することが重要である。これまでに多くの実験が行われ、様々な局部破壊の評価式が提案されている¹⁾。既往の研究の多くは、飛翔体が構造物に対して垂直に衝突する場合について検討されているものがほとんどである。実際に爆発事故等で物体が飛散して構造物に衝突する場合、垂直以外の角度でも衝突することが考えられる。そこで本研究は、飛翔体がコンクリート板に対して斜め衝突した場合の、コンクリート板の局部破壊について検討を行った。

2. コンクリート板に対する高速飛翔体の斜め衝突実験

2.1 斜め衝突実験の概要

実験は図-1に示すように、火薬式発射装置を用いて飛翔体をコンクリート板に衝突させた。実験パラメータは、衝突速度(300~900m/s)、コンクリート板の圧縮強度(28.5, 53.5, 72MPa)、衝突角度(15, 30, 45, 60, 90°)及び、図-2に示す2種類の飛翔体(飛翔体A:直径約8mm、長さ約28mm、質量約10g、鉛製、飛翔体B:直径約6mm、長さ約23mm、質量約4g、鉛製)である。衝突角度は、図-3のようにコンクリート板表面と射線のなす角度として定義した。表-1に、実験ケースを示す。コンクリート板の前方に50cmの間隔で2枚の検速紙を設置し、この間を通過する時間から飛翔体の速度を測定した。コンクリート構造物の局部破壊の評価に関する研究は、多くは飛翔体がコンクリート塊に衝突した際の表面破壊深さを求めるものであり、裏面剥離限界厚さ、貫通限界厚さ(それぞれ、裏面剥離、貫通が生じる最大のコンクリート板厚)は、表面破壊深さの関数として間接的に求められる。表面破壊深さが局部破壊の評価の基本となっていると言えるため、本研究では、コンクリート板の局部破壊状況の確認、表面破壊深さの測定を行った。

2.2 実験結果及び考察

図-4に、飛翔体Bのコンクリート板の表面破壊深さと衝突速度の関係を示す。図中に実験結果の回帰式も示している。これより、衝突速度が大きくなるにしたがい、表面破壊深さが大きくなるのがわかる。図-5に、飛翔体Bの表面破壊深さと衝突角度の関係を示す。これより、衝突角度と表面破壊深さの間には比例関係が見られる。ここで斜め衝突の場合、図-6のように飛翔体の実際の衝突速度 V を、コンクリート板表面の法線方向の速度成分 $V\sin$ を衝突速度として検討する。図-7に、速度成分 $V\sin$ と表面破壊深さの関係を示す。図中に図-4で示した回帰曲線も示している。これより、衝突速度を $V\sin$ で表した場合の表面破壊深さの値が、正面衝突による表面破壊深さの値の回帰曲線とほぼ等しい値を示している。よって、衝突速度を $V\sin$ で表すと斜め衝突を正面衝突として評価できることがわかった。

表-1 実験ケース

	コンクリート強度 (MPa)	衝突速度 (m/s)	衝突角度 (°)
飛翔体 A	28.5	300, 500, 700	15, 30, 45, 60, 90,
	53.5		
	72		
飛翔体 B	28.5	500, 700, 920	15, 30, 45, 60, 90,
	53.5		
	72		

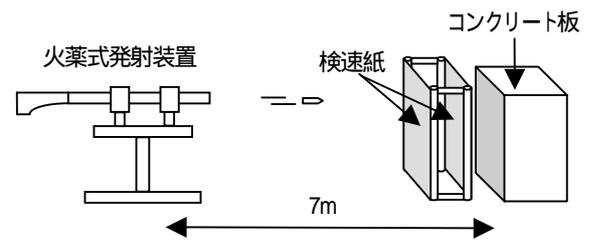


図-1 実験の概要図

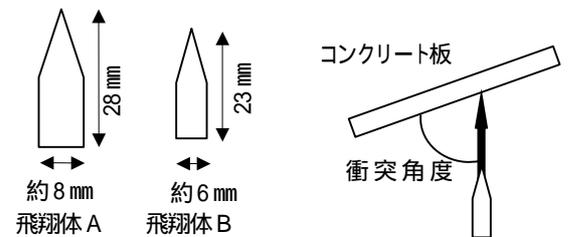


図-2 飛翔体タイプ

図-3 衝突角度

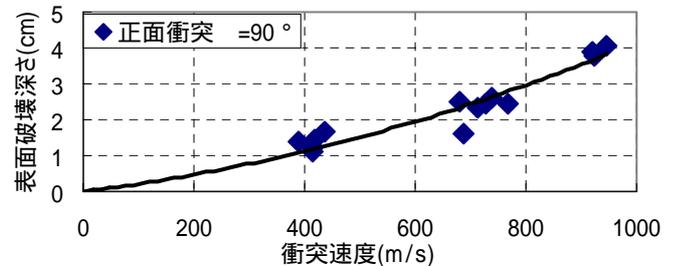


図-4 衝突速度と表面破壊深さの関係(飛翔体B)

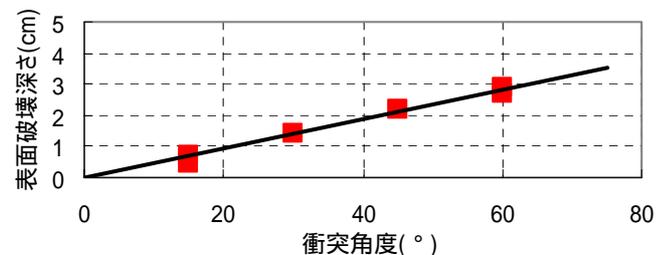


図-5 衝突角度と表面破壊深さの関係
(飛翔体B: 衝突速度 940m/s)

キーワード: 高速飛翔体, コンクリート板, 局部破壊評価式, 修正係数

連絡先: 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 Tel: 046-841-3810(ex3521) E-mail: s49395@ed.nda.ac.jp

2.3 局部破壊評価式による表面破壊深さの予測

コンクリート板に対する高速飛翔体の衝突による局部破壊の評価には様々な式が提案されている¹⁾。その中で代表的な式として修正 NDRC 式がある。本実験条件が修正 NDRC 式の適応範囲内 ($V: 150 \sim 900 \text{m/s}$, $D: \sim 41 \text{cm}$, $W/D^2: 0.014 \sim 0.056$, 飛翔体形状: 円錐・円柱) であるので、以下に示す修正 NDRC 式を準用して表面破壊深さの評価を行った。

$$x/D = 0.00697 \sqrt{NWD} \left(\frac{V}{D}\right)^{1.8} \left(\frac{0.098}{f_c'}\right)^{0.5} \quad x \leq 2D \quad (1)$$

$$x/D = 1.21 \times 10^{-5} \cdot NW \left(\frac{V}{D}\right)^{1.8} \left(\frac{0.098}{f_c'}\right)^{0.5} + D \quad x \geq 2D \quad (2)$$

ここで、 x : 貫入深さ(cm), D : 飛翔体直径(cm), N : 先端形状係数, W : 飛翔体重量(kg), V : 飛翔体速度(m/s), f_c' : コンクリート強度(MPa)である。本実験では先端形状係数 N は 1.14 (飛翔体の先端が非常に鋭い) である。図-8 に、飛翔体 B の衝突によるコンクリート板 ($f_c' = 28.5 \text{MPa}$) の表面破壊深さと衝突速度の関係を示す。

図-8 より、修正 NDRC 式は表面破壊深さを過大に評価していることがわかる。これは修正 NDRC 式は剛飛翔体(衝突によって変形を生じない飛翔体)を使用した実験結果に基づいた評価式であるためであり、本実験で使用した飛翔体は、衝突により変形・破壊を生じた柔飛翔体である。従って、評価式の値より実験値は小さい値となる。よって、飛翔体の変形・破壊を考慮した修正係数を、修正 NDRC 式に乗じることで表面破壊深さを評価することとした。図-9 に実験値と修正 NDRC 式の値の関係を示す。図-9 より、比例関係が得られるので、その傾きを修正係数とする。これより、飛翔体 B の修正係数は 0.44 となる。同様に、飛翔体 A の修正係数は 0.40 である。図-10 に修正係数を乗じた修正 NDRC 式の値と実験値の関係を示す。図-10 より、修正係数を乗じることにより柔飛翔体の衝突によるコンクリート板の表面破壊深さが評価することが出来ることがわかる。

3. 結言

本研究は、高速飛翔体の斜め衝突に対するコンクリート板の損傷の評価に関して検討を行ったものである。本研究の成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 斜め衝突は飛翔体速度を、コンクリート板表面の法線方向の速度成分を衝突速度とすることにより、正面衝突として検討することが出来る。
- (2) 柔飛翔体の衝突によるコンクリート板局部破壊の評価を行うために、修正 NDRC 式を用いた飛翔体の変形を考慮した、修正係数を修正 NDRC 式に乗じることにより 柔飛翔体の衝突による局部破壊を評価することが出来た。

今後は材料の異なる飛翔体による衝突実験及び、同材料で、直径・質量の異なる飛翔体による衝突実験により修正係数の検討をする必要がある。

参考文献

1) 土木学会 構造工学シリーズ6: 構造物の衝撃挙動と設計法

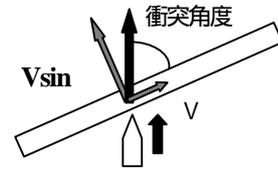


図-6 斜め衝突の際の衝突速度の考え方

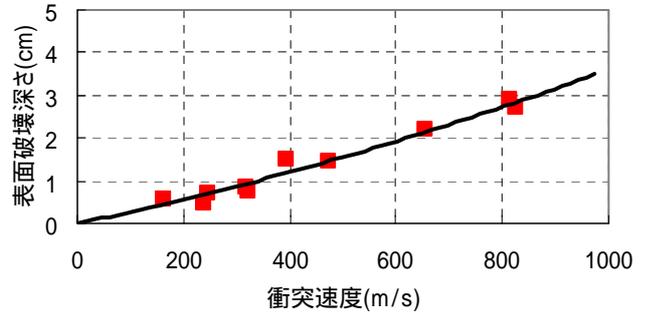


図-7 表面破壊深さと衝突速度の関係 (飛翔体 B 斜め衝突)

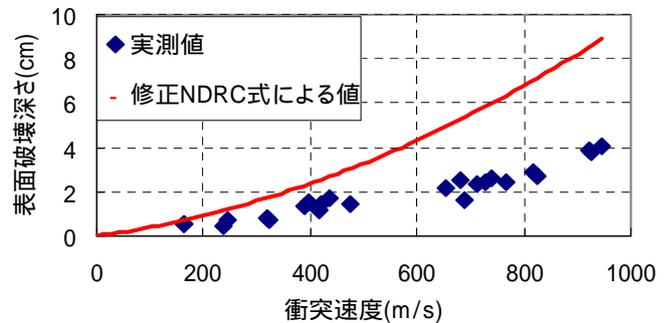


図-8 実測値と修正 NDRC 式の値との比較 (飛翔体 B $f_c' = 28.5$)

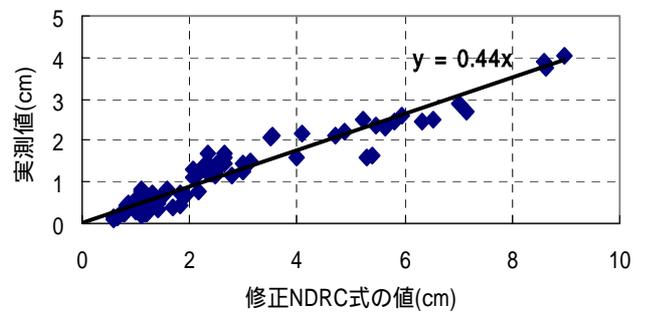


図-9 表面破壊深さの実測値と評価式の値の比較 (飛翔体 B)

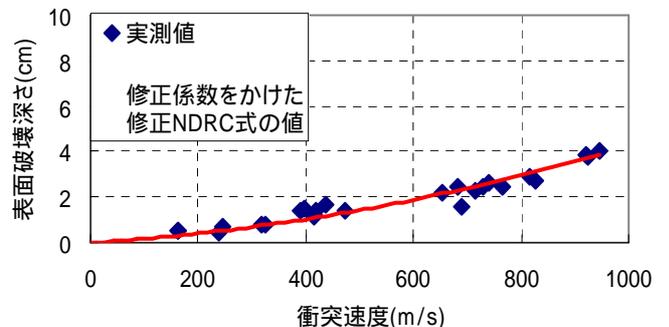


図-10 実測値と修正係数をかけた修正 NDRC 式の値との比較 (飛翔体 B $f_c' = 28.5$)