

高速飛翔体の斜め衝突に対するコンクリート板の損傷および跳飛角に関する実験的研究

防衛大学校 学生会員 田中信行 正会員 大野友則 正会員 別府万寿博

1. はじめに

物体の高速衝突を受けるコンクリート構造物の安全性を検討する場合、表面破壊・貫入・裏面剥離・貫通などの局部破壊を予測する事が重要である。本研究は、700m/s の高速度で発射した飛翔体を入射角を変えてコンクリート板に衝突させ、跳飛角度や跳飛速度、および破壊の発生条件について検討したものである。さらに、貫入深さや裏面剥離限界について、代表的なコンクリートの局部破壊評価式である修正 NDRC 式と比較した。

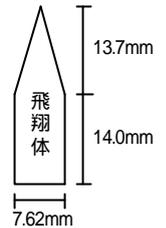


図-1 飛翔体の寸法

2. 実験の概要

本実験は、飛翔体発射装置より約 7.0m 離れた位置に、コンクリート板を設置した。発射装置により飛翔体を約 700m/s の速度で発射し、コンクリート板に衝突させた。本実験で用いたコンクリート供試体は圧縮強度 375.9kgf/cm²、寸法 500mm×500mm×70mm のコンクリート板である。飛翔体は図-1 に示す直径 7.62mm、長さ 27.7mm、質量 10.0g で先端が非常に尖った鉛製である。実験では、供試体前面および飛翔体が跳飛する方向に検速紙を設置して飛翔体の衝突前後の速度を計測した。実験パラメータは図-2 に示すように、入射角度 i とし、入射角度は 10, 15, 20, 25, 27.5, 30, 45, 60, 90 度とした。

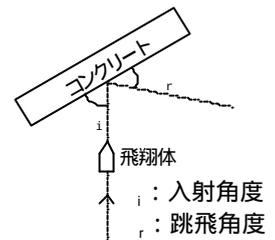


図-2 入射角度

3. 実験結果および考察

(1) 飛翔体の衝突後挙動

図-3 に、飛翔体の入射角度 i を変化させた時のコンクリート板に生じる表面破壊の深さを示す。これより、飛翔体がコンクリート板に対して垂直に衝突する場合 ($i = 90^\circ$) では約 3cm の深さであるが、入射角が浅くなるにつれて次第に小さくなっている。とくに 30° 以下では急減していることがわかる。図-4 に、入射角度と跳飛角度の関係を示す。ここで飛翔体の跳飛とは、コンクリート板に衝突後、飛翔体が貫入せず、進行方向を変化させて運動を続けることを示す。実験では入射角度 i が 10° から 25° の範囲では飛翔体の跳飛が生じたが、 i が 27.5° から 90° の範囲では跳飛が生じなかった。つまり跳飛限界角は 25° ~ 27.5° の範囲であることがわかった。図-5 には入射角度と跳飛速度の関係を示している。これより、跳飛限界の 27.5° から 15° までは跳飛速度が 400m/s 前後であるが、10° まで小さくなると速度はあまり減少せず、約 600m/s の跳飛速度になることがわかる。

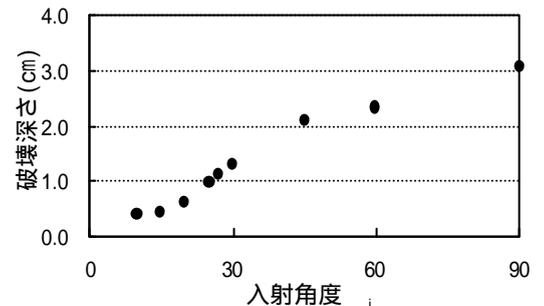


図-3 貫入深さと入射角度の関係

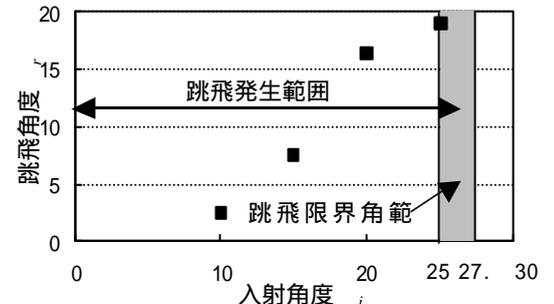


図-4 飛翔体入射角度に対する跳飛

(2) コンクリート板の破壊状況

写真-1 に、コンクリート板の表裏の破壊状況を示す。裏面剥離が生じたのは入射角度 i が 90° および 60° の 4 ケース中、2 ケースのみであった。また、いずれの場合においても、表面の破壊面積よりも裏面剥離面積の方が大きかった。これは応力波が衝突部から裏面へと広がりながら伝播するためと考えられる。 $i = 15^\circ$ では表面破壊はほとんど生じていないことがわかる。

図-6 に、飛翔体の入射角度とコンクリート板表面において破壊した部分の体積の関係を示す。ここで破壊の体積は、破壊部分の縦、横方向の寸法と、破壊深さから、円錐に換算して求めた。これより、コンクリート表面の破壊体積は、限界跳飛角 27.5° から 90° にかけてほぼ比例して増加している。限界跳飛角以下での破壊体積が小さいの

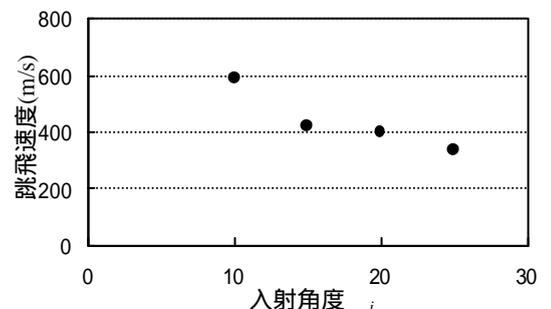


図-5 飛翔体入射角度と跳飛速度の関係

キーワード：高速衝突，貫入量，裏面剥離限界厚，貫通限界厚，跳飛角度

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 Fax 046-844-5913

は、跳飛が生じるために衝突前後の運動エネルギー差が小さくなるためと考えられる。

(3) 修正 NDRC 式との比較

飛翔体がコンクリートに衝突した場合の貫入深さ、裏面剥離限界厚、貫通限界厚の予測式は数多く提案されているが、一般によく使われている式の一つに以下に示す修正 NDRC 式がある。

$$\text{貫入深さ;} \quad x = 0.00697 \sqrt{NWD(V_0/D)^{1.8}} / \sqrt{f'_c} \quad x \leq 2D \cdots (1a)$$

$$x = \left\{ 1.21 \cdot 10^{-5} \cdot NW(V_0/D)^{1.8} / \sqrt{f'_c} \right\} + D \quad x \geq 2D \cdots (1b)$$

$$\text{裏面剥離限界厚;} \quad s = 2.12D + 1.36x \quad x \geq 0.65D \quad \cdots (2)$$

$$\text{貫通限界厚;} \quad e = 1.32D + 1.24x \quad x \geq 1.35D \quad \cdots (3)$$

ここに、 x : 貫入深さ(cm)、 N : 先端形状係数、 W : 飛翔体の重量(kgf)、 D : 飛翔体の直径(cm)、 V_0 : 飛翔体の衝突速度(cm/sec)、 f'_c : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)、 s : 裏面剥離限界厚(cm)、 e : 貫通限界厚(cm)である。

以下に、修正 NDRC 式を用いて実験結果と比較検討してみる。本実験の条件(飛翔体の先端が非常に鋭い先端形状係数 N ; 1.14、飛翔体の重量 W ; 0.01kgf、飛翔体の直径 D ; 0.762cm、衝突速度 V_0 ; 70000cm/s、コンクリートの圧縮強度 f'_c ; 375.9kgf/cm²)を基に試算すると、貫入深さは 6.87cm、裏面剥離限界厚は 10.96cm、貫通限界厚は 9.52cm となり、これは実験値を過大に評価している。修正 NDRC 式は剛飛翔体の実験結果に基づいて提案されたものであるが、本実験で用いた飛翔体は鉛製であり、衝突により変形・破壊した。つまり、飛翔体は可変形性を有するので、修正 NDRC 式に修正係数を乗じて修正する必要がある。各ケースにおいてコンクリート面法線方向の速度成分を求めて入射角度とし、修正 NDRC 式に用いた結果と実験で得られた結果を整合させると、修正係数は 0.455 となる。図-7 に、修正 NDRC 式に修正係数を乗じた結果と実験結果の関係を示す。これより、修正 NDRC 式に適切な修正係数を乗じることで貫入深さを評価できることがわかる。また貫入深さが非線形的に大きくなる傾向も一致している。

裏面剥離限界については、実験結果より 60° の場合が裏面剥離の発生限界であると考えられる。修正 NDRC 式を用いると $i=60^\circ$ の場合の裏面剥離限界厚は 9.05cm となる。本実験のコンクリート板の厚みが 7cm であるので、修正 NDRC 式で得られる結果を実験結果に整合させると、修正係数は 0.77 となる。この場合、 $i=90^\circ$ の時の裏面剥離限界厚は 8.44cm となり、必ず裏面剥離が生じる。また、 $i=60^\circ$ の場合は 6.97cm となり、実験結果とほぼ一致する。

貫通限界は修正 NDRC 式に修正係数を乗じて得た貫入量 x' を代入すると、一番貫通限界厚が大きい $i=90^\circ$ において 4.88cm となる。すなわち、本供試体には貫通が生じないことを示しており、実験結果と整合している。

4. まとめ

- (1) コンクリート表面から飛翔体衝突軸に対する飛翔体の入射角度 i が 0~25° の場合、飛翔体がコンクリート衝突後に跳飛が生じること、また跳飛が生じる範囲で i が小さくなるほど跳飛速度が大きくなることがわかった。また入射角度 i が減少するにつれ、コンクリートの損傷量が減少する。
- (2) 修正 NDRC 式の貫入深さ評価式に修正係数を乗ずることにより、柔飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板に生じる表面破壊深さ、または貫入量、裏面剥離限界厚、貫入限界厚がほぼ評価できる。

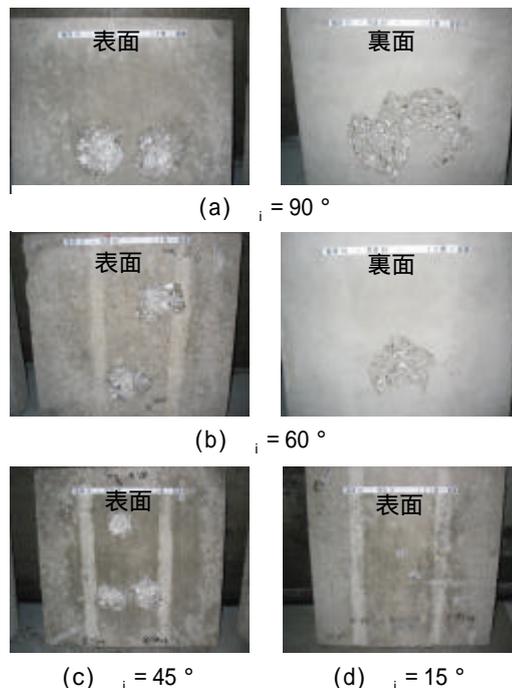


写真-1 コンクリートの破壊状況

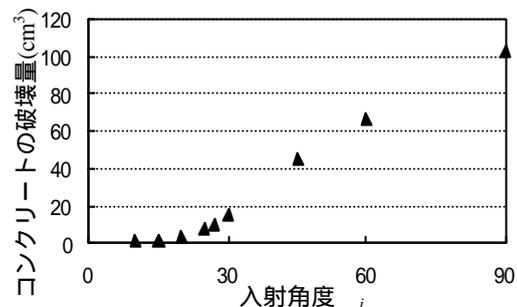


図-6 飛翔体入射角度に対するコンクリート表面の破壊量

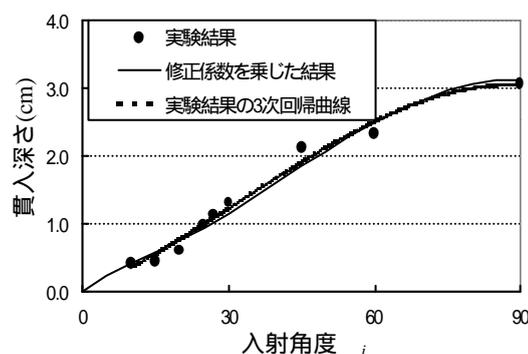


図-7 修正係数を乗じた修正 NDRC 式と実験結果の比較