剛飛翔体の先端形状がコンクリート板の局部破壊に及ぼす影響に関する実験的検討

防衛大学校　学生会員　○三輪　幸治
正会員　別府　万寿博
正会員　大野　友則

1. 緒言

飛翔体の高速衝突によって生じるコンクリート部材の局部的な損傷に対する防護設計法を確立するためには，衝突の条件に応じて局部破壊の程度を精度よく評価することが不可欠である．既往の研究より，飛翔体の速度，質量および先端形状等が，コンクリートの局部破壊に影響を与えることはわかっているが，先端形状の影響について検討した例は非常に少ない．

本研究は，コンクリート板に対する高速衝突実験を行い，剛飛翔体の先端形状がコンクリート板の局部破壊に及ぼす影響について検討したものである．

2. コンクリート板に対する飛翔体の高速衝突実験の概要

2.1 実験装置および供試体

実験は，**図-1** に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いて，飛翔体をコンクリート板に衝突させた．この実験装置は，エアコンプレッサー，増圧器，エアチャンバー，発射管(長さ：12m，内径：35mm)から構成される．飛翔体は，エアコンプレッサーおよび増圧器で圧縮された空気を動力として発射される．コンクリート板は，上下 2 辺を固定して発射管出口から 1m の位置に設置した．コンクリート板の寸法は縦 50cm×横 50cm，強度は 25N/mm^2 である．コンクリート板は，板厚 13cm，9cm，7cm，5cm の 4 種類を作製した．

飛翔体の先端形状は，**写真-1** に示す半球型，60°の円錐型(以後，円錐型という)，平坦型の 3 種類とし，速度約 200m/s でコンクリート板に衝突させた．飛翔体はいずれも鋼製で，質量 50g，直径 25mm である．

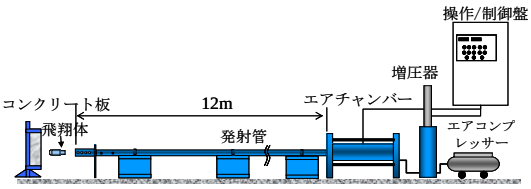
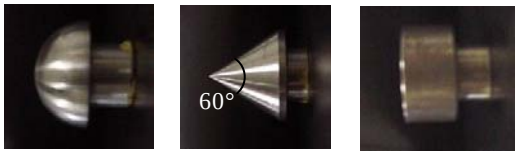


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要

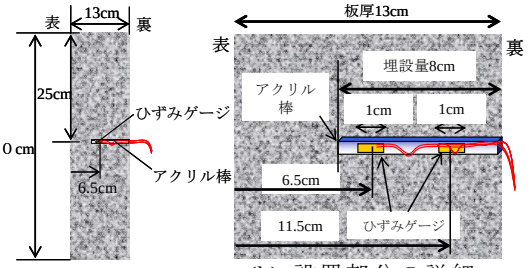


(a) 半球型　(b) 円錐型　(c) 平坦型

写真-1 飛翔体の先端形状

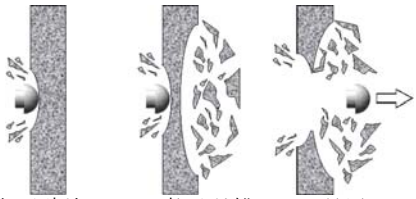
2.2 コンクリート板内部のひずみの計測

コンクリート板内部のひずみを計測するため，板厚 13cm のコンクリート板の中に，2 枚のひずみゲージを貼付したアクリル棒を設置した．ひずみゲージの設置位置は，**図-2** に示すようにコンクリート板の表面中心から 6.5cm および 11.5cm の深さとした．アクリル棒は，コンクリートとの付着強化のために，側面に突起を有している．なお，アクリル棒の縦弾性係数は約 4.0kN/mm^2 であり，コンクリートの縦弾性係数 25kN/mm^2 に比べてかなり小さく，コンクリートの挙動にはあまり影響しないと考えられる．



(a) 断面図　(b) 設置部分の詳細

図-2 ひずみゲージの設置位置



(a) 表面破壊　(b) 裏面剥離　(c) 貫通

図-3 破壊モードの種類

3. 実験結果および考察

局部破壊の評価には，表面破壊深さと**図-3** に示す破壊モードを用いた．局部破壊の破壊モードは，表面破壊，裏面剥離，貫通の 3 種類に分類される [1)]．

3.1 表面破壊深さの特徴

図-4 は，破壊モードが表面破壊であったケースの表面破壊深さと先端形状の関係を示している．図には，既往の評価式の中で先端形状を考慮できる修正 NDRC 式による表面破壊深さも示している．ちなみに，修正 NDRC 式は，表面破壊深さを算定する際に，先端形状の影響を形状係数 N(半球：1.0，鋭い:1.14，平坦:0.72)として考慮している [1)]．図より，表面破壊深さは，円錐型で 2.3～2.5cm，半球型で 1.0cm～1.6cm，平坦型で 0.5～1.5cm となっており，円錐型，半球型，平坦型の順に大きいことがわかる．また，

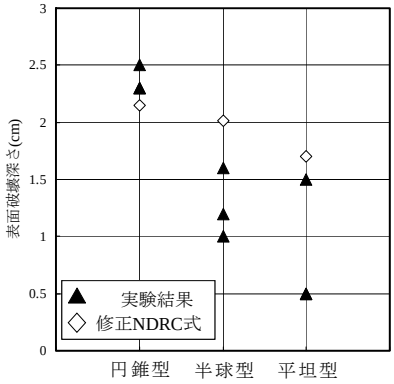


図-4 表面破壊深さ

キーワード：コンクリート板，局部破壊，剛飛翔体，先端形状
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：g44051@nda.ac.jp

修正 NDRC 式による表面破壊深さと実験値を比較すると，修正 NDRC 式による表面破壊深さは実験に比べて半球型，平坦型ではやや大きく，円錐型ではやや小さく評価しており，今後詳細に検討する必要があると考えられる．

3.2 裏面剥離および貫通の特徴

図-5 は，板厚に対する表面破壊深さの割合と，表面破壊および裏面剥離との関係を示している．これより，半球型，平坦型では表面破壊深さが板厚に対して約 20%を超えると裏面剥離が生じているが，円錐型では，表面破壊深さが約 35%に達しても裏面剥離は生じなかった．つまり，板厚に対する表面破壊深さの割合が同じでも，円錐型の場合は，裏面剥離は発生しにくいことを意味している．

図-6 は，全実験ケースで得られた破壊モードを示している．図より，板厚 13cm および 9cm のときはいずれの先端形状においても表面破壊であった．板厚 7cm のときは半球型では裏面剥離が生じたが，円錐型および平坦型では表面破壊のままであった．また，板厚 5cm になると，半球型，円錐型は貫通したが，平坦型は裏面剥離であった．

以上より，円錐型，平坦型による局部破壊の特徴は，半球型を基準にすると次のように説明できる．円錐型の場合は，表面破壊深さは最も大きいが，裏面剥離は生じにくい．しかし，裏面剥離が生じると貫通に移行しやすいと考えられる．ただし，貫通限界厚は半球型と同程度であった．一方，平坦型は，表面破壊深さは最も小さいが，裏面剥離の発生限界厚は半球型とほぼ等しい．また，貫通は生じにくく，最終的な貫通限界厚は半球型よりも大きくなると考えられる．

3.3 コンクリート板内部のひずみの特徴

図-7 に，板厚 13cm のケースにおける，表面から 6.5cm の位置のひずみ～時間関係を示す．これらの破壊モードは，いずれも表面破壊であった．これより，衝突後 0.2～0.3ms の間に，半球型では約 600μ，円錐型では約 300μ の最大圧縮ひずみが生じた．一方，平坦型では約 1800μ もの極めて大きな最大圧縮ひずみが生じている．これは，平坦型の場合は，コンクリートとの接触面積が大きく，抵抗力も大きくなるため，コンクリート板内部の圧縮ひずみも大きくなったと考えられる．

4. 結言

本研究の成果を要約すると，以下のとおりである．

(1) 剛飛翔体を速度約 200m/s で衝突させたときに生じるコンクリート板の表面破壊深さは，円錐型，半球型，平坦型の順に大きいことがわかった．

(2) 円錐型の場合の表面破壊深さは半球型に比べて大きいが，裏面剥離は生じにくい．しかし，裏面剥離が生じた際は貫通に移行しやすいことがわかった．一方，平坦型は半球型に比べて，表面破壊深さは小さいが裏面剥離発生限界厚は半球とほぼ等しいことがわかった．また，貫通限界厚は半球よりも大きいと考えられる．

(3) コンクリート板内部に生じる最大圧縮ひずみは，平坦型の場合は半球型や円錐型に比べてかなり大きいことがわかった．

参考文献

1) Kennedy, R.P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, 37, pp.183-203, 1976.

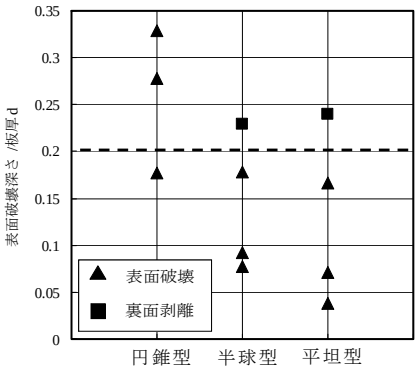


図-5 表面破壊深さ/板厚

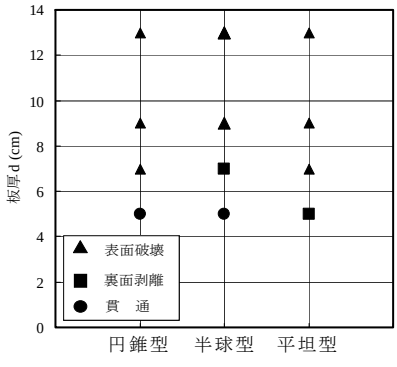


図-6 破壊モード

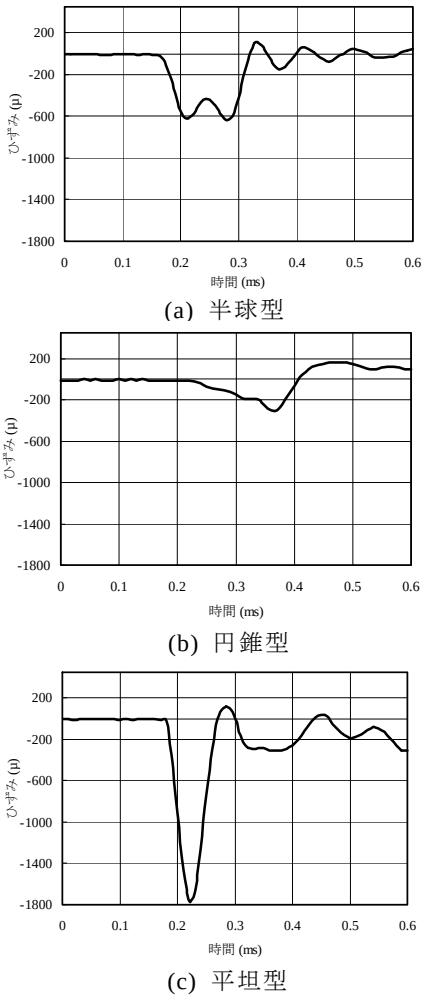


図-7 コンクリート板内部におけるひずみ～時間関係