

鋼製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解析的研究

防衛大学校 学生会員 ○大平 智之 学生会員 三輪 幸治
正会員 別府 万寿博 正会員 大野 友則
伊藤忠テクノソリューションズ(株) 正会員 伊東 雅晴 非会員 片山 雅英

1. 緒言

飛翔体の高速衝突に対するコンクリート構造物の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良く評価できる実験や解析法が必要である。既往の研究は、飛翔体の速度、質量、直径やコンクリート板厚、強度等が局部破壊に及ぼす影響を調べたものが多く、先端形状の影響について検討した研究はあまりない。

本研究は、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数値解析的な検討を行ったものである。

2. 先端形状が異なる剛飛翔体による高速衝突実験

2.1 実験の概要

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/mm²、板厚7cmである。

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。

2.2 実験結果および考察

コンクリート板に生じる局部破壊は、図-2 に示すように表面破壊、裏面剥離、貫通の3種類の破壊モードに分類した。図-3 は、コンクリート板断面の損傷状況である。半球型の場合は貫入深さ1.6cmの表面破壊と裏面剥離が生じた。円錐型の場合は、貫入深さ2.3cmの表面破壊が生じて板内部から斜め方向にひび割れ(以後、斜めひび割れ)が生じたが裏面剥離はしていない。平坦型では、貫入深さ0.5cmの表面破壊が生じて、板内部から裏面に多くのひび割れが生じたが裏面剥離しなかった。すなわち、貫入深さは円錐型、半球型、平坦型の順に大きく、破壊モードや板内部の損傷状況が変化することがわかる。

3. 先端形状が局部破壊に及ぼす影響に関する数値シミュレーション

3.1 解析モデル

板厚7cmのコンクリート板を対象として、飛翔体の先端形状が局部破壊に及ぼす影響について数値解析を行う。図-4 に解析モデルを、図-5 に各先端形状のモデルを示す。解析は、衝撃解析コードAUTODYN Ver.6.0を用いて2次元軸対称系で行った。コンクリート板は1要素1.25mm×1.25mmの大きさに12,800要素に分割した。表-1 に材料の構成モデルを、表-2 にコンクリートの力学特性値を示す。解析モデルのコンクリートにはDrucker-Prager降伏条件を、圧縮および引張強度にはひずみ速度10¹(1/s)による強度増加を考慮した¹⁾。

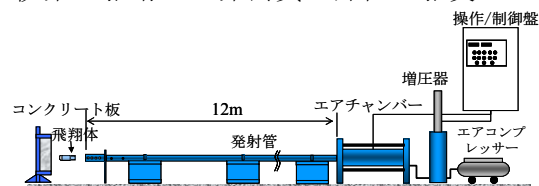


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要

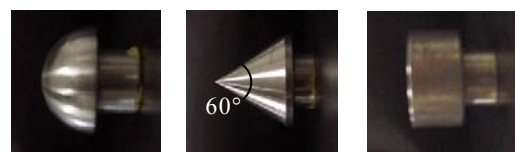


写真-1 飛翔体の先端形状

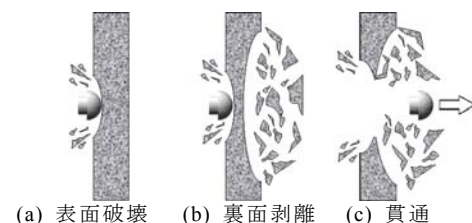


図-2 破壊モードの種類

形状	半球型	円錐型	平坦型
破壊モード	裏面剥離	表面破壊	表面破壊
損傷状況	表 裏 貫入深さ1.6cm	表 裏 貫入深さ2.3cm	表 裏 貫入深さ0.5cm

図-3 板内部の損傷状況の比較

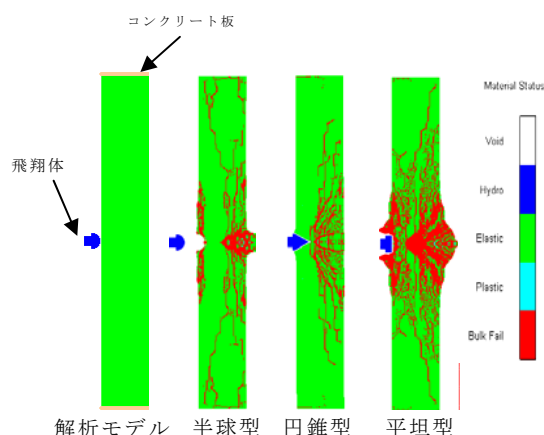


図-4 解析モデルおよび解析結果

3.2 解析結果

図-4 に解析で得られた破壊モードを示す。これより、半球型の場合は、表面破壊および板内部から斜めひび割れが生じており、裏面の損傷状況は実験とほぼ一致している。また、円錐型の場合は板内部から斜めひび割れが生じ、平坦型では、裏面に多くのひび割れが生じるなど、板内部の損傷状況は実験結果とほぼ同じ傾向となった。半球型、円錐型および平坦型の貫入深さは、それぞれ 1.1cm, 2.1cm, 0.4cm であり、実験と近い値になった。以上より、本解析モデルにより先端形状の相違が板内部の損傷状況や貫入深さに及ぼす影響をよく再現できているといえる。

3.3 先端形状の相違が破壊メカニズムに及ぼす影響に関する考察

(1) 衝突荷重に及ぼす影響

図-6 に、衝突荷重と時間の関係を示す。衝突荷重は、飛翔体の運動量を微分して求めた。半球型では、衝突後急激に増加し、先端部分が貫入した $t=0.035\text{ms}$ において 131kN に達した後、衝突荷重は $t=0.10\text{ms}$ までほぼ一定値を示し、それ以降急激に低下して 0kN となった。円錐型では飛翔体の貫入にともなって徐々に増加し、先端部分が貫入した $t=0.12\text{ms}$ に最大荷重 125kN に達した。その後、 $t=0.16\text{ms}$ まで半球型の場合とほぼ同じ荷重を示した。平坦型は、衝突直後 ($t=0.0014\text{ms}$) に最大衝突荷重 537kN に達し、それ以降急激に減少して $t=0.07\text{ms}$ には 0kN になった。衝突荷重は飛翔体とコンクリート板の接触面積によって変化するものであり、衝突直後の接触面積が大きい平坦型では円錐型や半球型に比べて最大貫入抵抗力は約 5 倍大きくなる。ちなみに、これらの力積を計算すると各形状の場合とも約 $10\text{N} \cdot \text{s}$ であった。

(2) 破壊メカニズムに及ぼす影響

図-7 に、各先端形状の衝突過程における圧力分布の時間変化を示す。半球型と平坦型では、衝突直後、飛翔体の衝突部分から正圧領域が円形状に広がって、その後裏面に達すると同時に裏面剥離が生じている。これは、衝突によって生じた圧縮応力波が裏面で自由端反射し、引張波となったために破壊が生じたと考えられる。一方、円錐型のときも裏面剥離が発生しているが、 $t=0.092\text{ms}$ に板内部からも斜め方向にひび割れが生じている。このひび割れ発生位置はちょうど塑性領域と弾性領域の境界上であり、負圧（引張波）が生じていた。この原因は、塑性領域における応力波の伝播速度は弾性領域に比べてかなり遅くなるので、塑性領域と弾性領域の境界において大きな速度差が生じた結果、膨張圧が発生したものと考えられる。すなわち、半球型および平坦型の場合に裏面に生じたひび割れは裏面剥離によって生じているが、円錐型では裏面剥離だけでなく、板内部に生じた膨張圧が斜めひび割れの起点になったことがわかる。

4. 結言

- (1) 本解析モデルにより、先端形状の相違が板内部の損傷状況や貫入深さに及ぼす影響をよく再現できた。
- (2) 先端形状の相違によって貫入深さや局部損傷が変化するのは形状により衝突荷重やひび割れ発生メカニズムが異なるためであると考えられる。

参考文献

- 1) 別府万寿博, 三輪幸治, 伊東雅晴, 片山雅英, 大野友則: 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊発生メカニズムに関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1293-1304, 2007.3

表-1 材料構成モデル

材料	状態方程式	降伏基準	破壊基準	エロージョンひずみ
コンクリート	線形型	Drucker-Prager	引張破壊	2.5
鋼材	線形型	弾性体	なし	なし

表-2 コンクリートの力学特性値

圧縮強度(N/mm ²)	静的	動的: 10 ¹ (1/s)
	25.0	42.5
引張強度(N/mm ²)	静的	動的: 10 ¹ (1/s)
	2.5	10.2
弾性係数(kN/mm ²)	25.5	
ポアソン比	0.15	
密度(g/cm ³)	2.3	

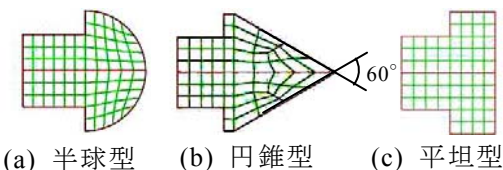


図-5 飛翔体先端形状のモデル

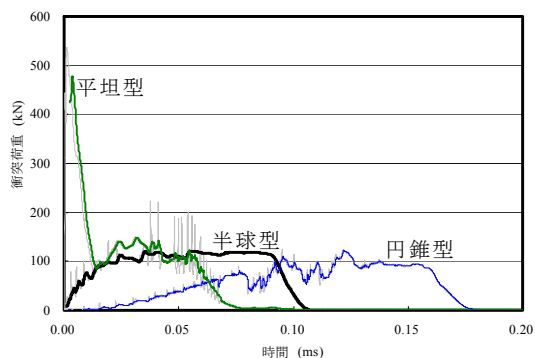


図-6 各先端形状の衝突荷重と時間の関係

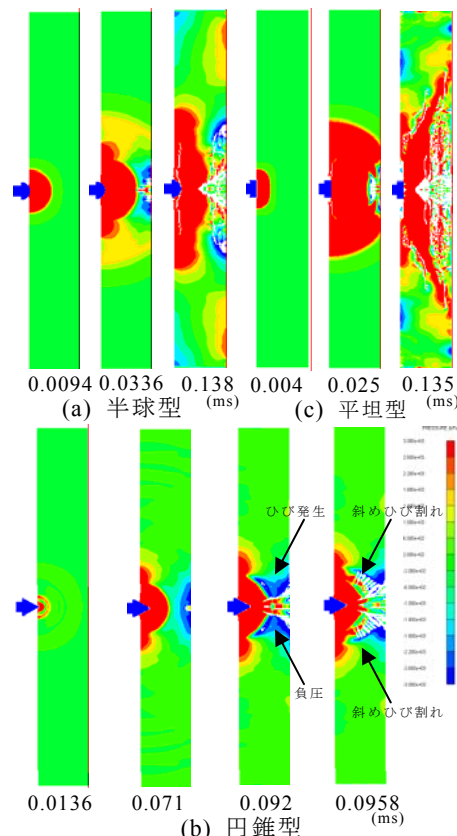


図-7 各先端形状の衝突過程の圧力分布の時間変化