

# 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  
 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

これまでに提案されているコンクリートの局部破壊評価式は、飛翔体やコンクリート板の特性を入力データとして貫入深さや破壊モードを算定することができる。しかし、各評価式による予測結果が非常にばらつくことが指摘されており、また、飛翔体の先端形状の影響について検討しているものは少ない。したがって、今後、破壊メカニズムに基づいた合理的な評価法を提案することが必要である。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. 異なる先端形状の剛飛翔体を用いた高速衝突実験

### 2.1 実験の概要

実験は、高圧空気式飛翔体発射装置<sup>1)</sup>を用いて、剛飛翔体(以後、飛翔体という)を速度約200m/sでコンクリート板に衝突させた。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種類であり、どの形状も質量50g、直径25mmである。コンクリート板の強度は25N/mm<sup>2</sup>、寸法は縦50cm×横50cm、板厚は7cmおよび13cmである。なお、板厚13cmのケースでは、ひずみゲージを貼付した亚克力棒をコンクリート板の中央に設置し、表面から6.5cmの位置における板内部のひずみを計測した。

### 2.2 実験結果

図-1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。円錐型では、貫入深さが2.3cmであり、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。平坦型では貫入深さが0.5cmであり、板内部から裏面に多くのひび割れが生じた。ちなみに、円錐、平坦型の場合は、裏面剥離は生じなかった。以上より、貫入深さは円錐型、半球型、平坦型の順に大きく、先端形状により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

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。図-2に各先端形状のモデルを、図-3に板厚7cmの解析モデルを示す。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にコンクリートの材料モデルに用いた解析定数を示す。降伏基準にはDrucker-Prager降伏条件を用いて、圧縮および引張強度にはひずみ速度10<sup>1</sup>(1/s)による強度増加を考慮した<sup>1)</sup>。なお、飛翔体のモデルに用いた鋼材は弾性体とした。

### 3.2 解析結果

図-3に、板厚7cmの破壊モードを示す。貫入深さは半球型、円錐型および平坦型に対してそれぞれ1.1cm、2.1cm、0.4cmとなり、実験とほぼ一致した。また、半球型および円

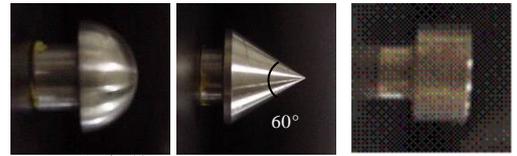


写真-1 飛翔体の先端形状

先端形状	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	表	表
	裏	裏	裏
	貫入深さ	1.6cm	2.3cm

図-1 板内部の損傷状況の比較(板厚7cm)

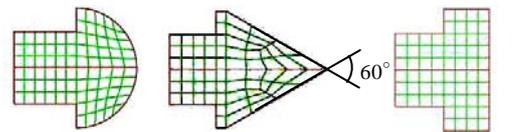


図-2 飛翔体先端形状のモデル

解析モデル	半球型	円錐型	平坦型	凡例
コンクリート板	弾性	弾性	弾性	弾性
飛翔体	弾性	弾性	弾性	弾性
	塑性	塑性	塑性	塑性
	破壊	破壊	破壊	破壊

図-3 解析モデルおよび解析結果(板厚7cm)

表-1 コンクリートの解析定数

状態方程式	線形型	
降伏条件	Drucker-Prager降伏基準	
破壊基準	引張破壊	
エロージョンひずみ	2.5	
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	静的: 25.0	動的(10 <sup>1</sup> (1/s)): 42.5
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	静的: 2.5	動的(10 <sup>1</sup> (1/s)): 10.2
弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	25.5	
ポアソン比	0.15	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.3	

錐型の場合は、表面破壊および板内部から裏面にひび割れが発生し、平坦型では裏面付近に多くのひび割れが生じるなど各形状とも実験のひび割れ状況を比較的良好に再現している。

図-4 に、板厚 13cm の板内部に生じるひずみについて、解析値と実験値を比較して示す。飛翔体の衝突(t=0ms)後、解析および実験ともに圧縮ひずみが生じている。各形状とも解析値は実験に比べて 1.5~2 倍程度大きい。その最大値は平坦型、半球型、円錐型の順に大きくなる傾向を再現することができた。また、半球、平坦型の場合は衝突後、急に圧縮ひずみが立ち上がり、円錐型の場合は緩やかにひずみが増加して最大値に達しているが、解析でもこれらの特徴を比較的良好に再現していることがわかる。

3.3 先端形状が破壊メカニズムに及ぼす影響

図-5 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、荷重は衝突後徐々に増加し、先端部分が全て貫入した時点で 131kN に達した。円錐型では飛翔体の貫入にともなって増加し、やはり先端部分が貫入したときに最大荷重 125kN を示した。平坦型では、衝突とほぼ同時に最大衝突荷重 537kN となった。これは、衝突荷重は飛翔体とコンクリート板の接触面積により変化するので、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約 5 倍の最大荷重を生じたものと考えられる。

図-6 に、板厚 13cm の場合の圧力分布と損傷状況を示す。図には衝突によって生じた塑性領域の範囲も点線で示している。各形状とも板裏面に負圧が生じ、ひび割れが生じている。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、引張波に転じて負圧が発生して引張破壊が生じたためと考えられる。また、各形状とも板内部にも負圧や斜めひび割れが生じている。これは、塑性領域での応力波の伝播速度が弾性領域に比べてかなり遅くなるために、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、膨張圧(負圧)が発生して引張破壊したものと考えられる。塑性領域の大きさについては、平坦型が半球型や円錐型に比べてかなり大きいことがわかる。つまり、先端形状によって塑性領域の大きさが異なるため、板内部のひび割れ状況も変化したものと考えられる。

4. 結言

- (1) 数値シミュレーションにより、先端形状の相違が板内部の損傷状況やひずみ応答に及ぼす影響について比較的良好に再現できた。
- (2) 板内部から裏面に生じるひび割れの発生メカニズムは、1)衝突によって生じる圧縮応力波が裏面で自由端反射して引張破壊すること、2)応力波の伝播速度が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るために膨張圧が生じ引張破壊することが考えられる。したがって、先端形状の相違により、衝突後に生じる塑性領域の大きさが異なるために板内部の損傷状況や破壊モードが変化すると考えられる。

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.

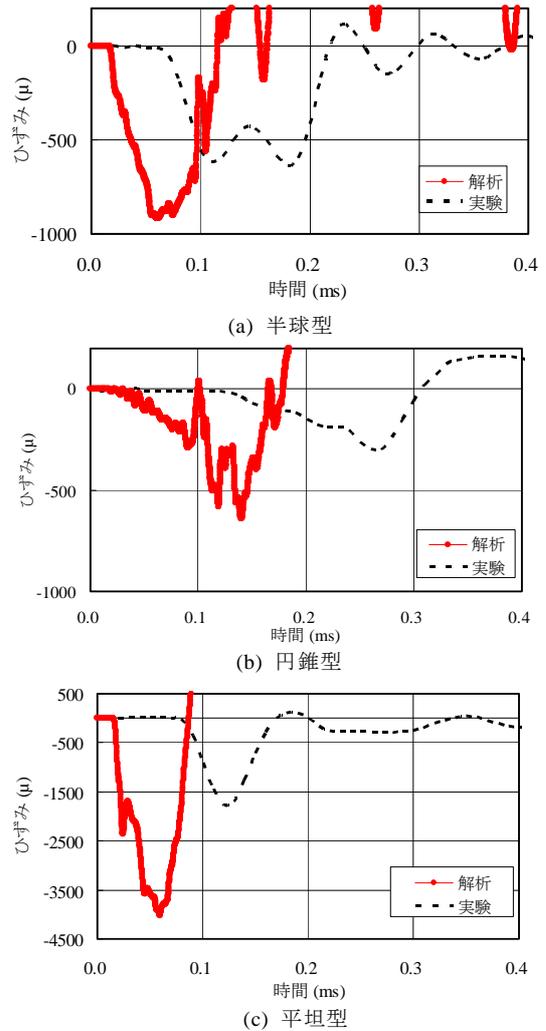


図-4 板内部のひずみの比較(板厚 13cm)

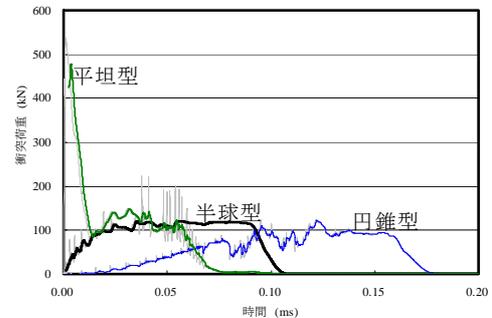


図-5 衝突荷重～時間関係の比較(板厚 13cm)

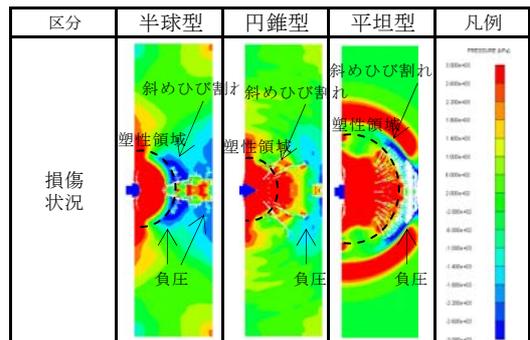


図-6 板内部の圧力分布の比較(板厚 13cm)