

先端形状が異なる衝突体の水平衝突を受ける RC 版の局部的損傷に関する理論的考察

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

火薬類や高圧ガス貯蔵施設等における爆発事故では、爆発に伴って発生する飛散物の衝突によって爆発源周辺のコンクリート構造物が局部的損傷を受けることが報告されている。飛散物の衝突によるコンクリートの局部破壊については、飛散物の質量、速度、直径やコンクリート版の強度、版厚、鉄筋量等が破壊に及ぼす影響について調べた研究が多いが、飛散物の形状の影響について詳細に調べた例は少ない。本研究は、先端形状が異なる衝突体が比較的低速度で鉄筋コンクリート版（以下、RC版）に衝突した際に生じる局部的損傷の相違について理論的考察を行ったものである。

2. 実験の概要

図-1に、水平衝撃荷重装置を示す。本装置は、本体フレーム、ゴム棒、油圧ジャッキ、反力壁および衝突体から構成されている。衝突体は、ゴム棒を油圧ジャッキによって所定の長さだけ伸張させ、ゴム棒の弾性エネルギーを利用して速度を得る。衝突体の速度は、装置のガイド上に設置されているレーザー式速度計によって測定される。衝突体の質量は約100kgであり、衝突体の先端部分は交換可能である。写真-1に、実験に用いた衝突体の先端部分を示す。先端部分の形状は、半球型、円錐型、平坦型の3種類であり、すべて直径10cm（鋼製：S45C）である。RC版は、反力壁に固定した支持梁に4辺をクランプで固定して設置した。RC版の寸法は、縦110cm×横110cm×版厚7cm、複鉄筋断面である。コンクリートの圧縮強度は33.5N/mm²、鉄筋の直径は3.2mm、配筋間隔は5cm、かぶり厚さは1.5cmである。実験では衝突体の各先端形状について速度3、5、7m/sでRC版の中央に衝突させた。また、衝突時における版裏面のコンクリートのひずみ応答を調べるため、版裏面の中心から5cm、15cmの位置にひずみゲージを貼付した。衝突体には加速度センサを設置して、加速度を計測した。また、高速度ビデオによって衝突の瞬間の様子を撮影した。

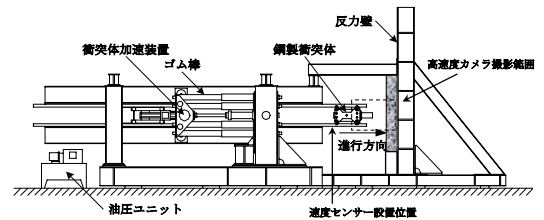


図-1 水平衝撃荷重装置

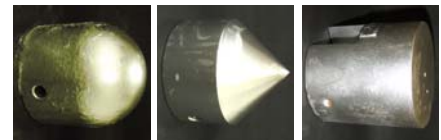


写真-1 衝突体の先端部分の形状 (左から半球型、円錐型、平坦型)

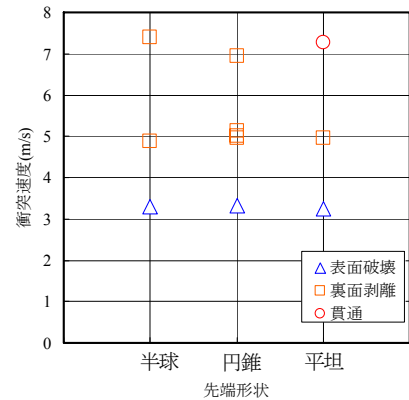


図-2 破壊モードの比較

3. 局部損傷の状況

図-2に、全実験結果の破壊モードの比較を、図-3に、衝突速度7m/sの場合に生じたRC版の破壊状況を示す。破壊モードは、表面破壊、裏面剥離、貫通、の3種類に分類した。速度3m/sの場合は、各形状の場合とも衝突部分の損傷は小さく、裏面にはひび割れのみが生じたので破壊モードは表面破壊である。速度5m/sになると、半球および円錐型では版表面に凹み変形が生じ、裏面側のコンクリートに剥離が生じたので、裏面剥離である。平坦型では表面側の衝突部分全体のコンクリートが陥没し、ひび割れが裏面まで達して押抜きせん断型の破壊性状を示しているが、衝突体は貫通しなかったため、裏面剥離と判定した。速度7m/sでは、図-3に示すように半球および円錐型では表面側の衝突部分に凹み変形や孔が生じ、裏面ではコンクリートの剥離が生じた。このとき、コンクリートのひび割れは衝突部分から裏面まで連結しているが鉄筋は切断されず、衝突体は版を貫通しなかったため裏面剥離と判定した。平坦型では衝突体が版を完全に貫通したので、平坦型の破壊が最も進展したといえる。すなわち、先端形状の相違により裏面の損傷の程度が異なり、平坦型の場合の破壊が最も大きかった。

図-4に、裏面に損傷が生じた衝突速度5m/sのケースにおける衝突荷重を示す。衝突荷重 $F (=ma)$ は、衝突体の質量 m に加速度 a を乗じて求めている。半球型の場合は、衝突体がRC版に衝突した直後に衝突荷重は急増し、最大値約180kNとなった後、急激に約50kNまで低下した。円錐型の場合は、衝突直後からRC版に徐々に貫入し、 $t=2.0ms$ で最大値約90kNを示した。平坦型の場合は、衝突直後 ($t=0.05ms$) に最大衝突荷重約200kNを示している。したがって、最大衝突荷重は、平坦型、半球型、円錐型の順に大きいことがわかる。このとき、各形状の場合とも裏

	表面 (衝突部分拡大)	裏面
半球型		
円錐型		
平坦型		

図-3 局部損傷の様子 (衝突速度7m/s)

表-1 静的荷重～貫入量関係及び平面 (r 軸) 方向の応力に関する式の一覧

先端形状	荷重-貫入量関係	平面方向の応力 (r ≤ a)	平面方向の応力 (r > a)
半球型	$F = \frac{4 E_c R^{0.5}}{3 (1 - \nu_c^2)} \delta^{1.5}$	$\frac{\sigma_r}{p_m} = \frac{1 - 2\nu}{2} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{3/2} \right] - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}$	$\frac{\sigma_r}{p_m} = \frac{(1 - 2\nu) a^2}{2 r^2}$
円錐型	$F = \frac{2 E_c}{\pi (1 - \nu_c^2)} \tan \theta \cdot \delta^2$	$\frac{\sigma_r}{p_m} = -\cosh^{-1} \frac{a}{r} (1 - 2\nu) \frac{a}{2r} \left[\frac{a}{2r} \left(1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \right)^2 + \frac{r^2}{a^2} \ln \frac{1 + \left(1 + r^2/a^2 \right)^{1/2}}{r/a} \right]$	
平坦型	$F = 2a \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} \delta$	$\frac{\sigma_r}{p_m} = \frac{1 - 2\nu}{2} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \right] - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{-1/2}$	

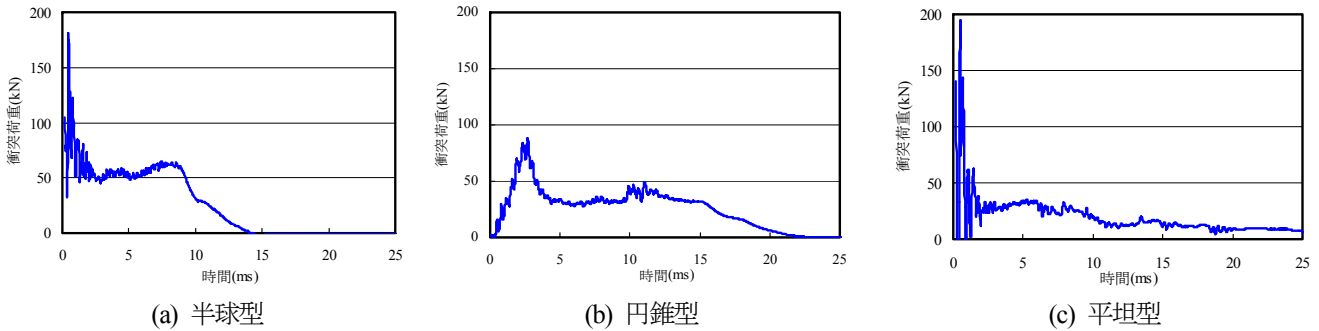


図-4 衝突荷重の比較

面の中央から 15cm の位置のひずみゲージでは引張ひずみが生じていた。すなわち、各形状の場合とも最大荷重となった後に荷重が急激に低下したのは版裏面に損傷が生じたためであると考えられる。

4. 先端形状が局部損傷に及ぼす影響に関する理論的考察

RC 版裏面の損傷は、版表面側の衝突部分のコンクリートに生じたひび割れが版裏面に到達して形成されていることが一つの要因であると考えられるので、各形状の先端部分とコンクリートの接触部分間に生じる応力分布の相違について考察する。図-5 は、弾性接触論による衝突体とコンクリートの接触状態の概要を示している。r = a の位置は、最大接触半径の位置を示している。また、表-1 に、弾性論における各形状の静的荷重 F と貫入量 δ の関係および接触部分における平面方向 (r 軸方向) の応力分布に関する式の一覧を示す¹⁾。ここで、σ_r : 水平方向の応力、E_c : コンクリートのヤング係数、ν_c : コンクリートのポアソン比、R : 半球状衝突体の半径、p_m : 平均接触圧力、a : 接触半径、r : 平面方向の距離、を示している。図-6 は表-1 の式を用いて計算した接触部分の平面 (r 軸) 方向の応力と平均圧力 p_m の比と接触半径 a に対する平面方向 (r 軸) の位置の関係を示している。図から、接触面における平面方向の応力は、各形状の場合とも接触半径 a の位置で極大値となるのがわかる。すなわち、各形状の場合ともに、ひび割れは接触半径位置における引張応力が引張強度を超えた場合に生じると考えられる。

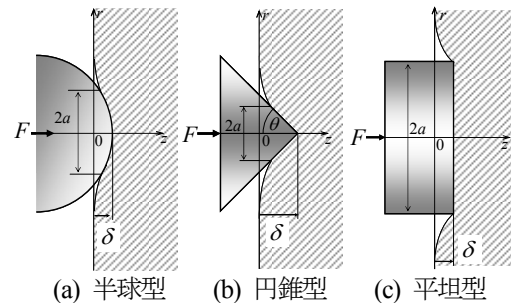


図-5 各形状の接触状態

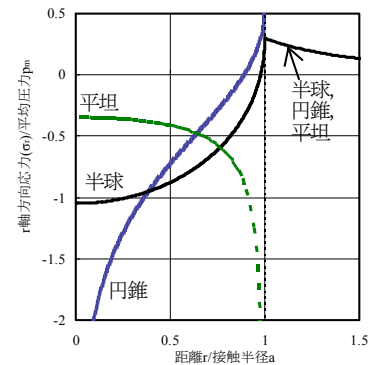


図-6 平面方向の応力分布の比較

ちなみに、衝突荷重の場合は、コンクリートの動的強度がひずみ速度によって増加すること考慮して、コンクリートの引張強度を 7kN/mm² と仮定して計算した場合、半球型: r = 0.1mm, 円錐型: r ≒ 0mm, 平坦型: r = 5cm の位置においてひび割れが生じると計算される。すなわち、実験では平坦型の場合に版が貫通したのは、半球型および円錐型では図-2 に示したように先端形状の頂点近くでひび割れが生じて貫通孔が小さくなるため衝突体は貫通しづらいが、平坦型では版表面の衝突体の直径の位置からひび割れが生じて、貫通孔が大きくなるので貫通しやすいと考えられる。ただし、弾性解では半球および円錐型でひび割れが生じる位置 r が実験と比べて著しく小さくなるため、詳細な検討を行うためには塑性変形の影響を考慮する必要がある。

5. 結言

本研究の成果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 先端形状の相違により裏面の損傷の程度は異なり、局部損傷は平坦型の場合が最も大きかった。
- 2) 平坦型の破壊が最も大きくなった要因には、1)平坦型の最大衝突荷重が半球型や円錐型に比べて大きい、2)半球、円錐型では先端形状の頂点近くからひび割れが生じて貫通孔が小さくなり貫通しづらいが、平坦型では版表面の衝突体直径の位置からひび割れが生じて貫通孔が大きくなり貫通しやすい、ことが考えられる。

参考文献 1) Fischer-Cripps, A., C.; Introduction to Contact Mechanics, second edition, Springer Science, 2007.