

飛来物の衝突を受けるコンクリート版の貫通破壊に関する解析的研究

九州大学大学院 学生会員 ○影山 幹浩
九州大学大学院 フェロー会員 園田 佳巨

1. 緒言

近年、竜巻や火山噴石などの自然災害から人命を守るために、飛来物の高速衝突を想定した防護構造物（シェルター）の重要性が認識され始めている。飛来物の衝突に対する防護構造物の耐衝撃性能を評価するには、貫通防止機能を正確に予測することが非常に重要である。一般に、汎用有限要素解析ソフトを用いて構造物の軽微な破壊を予測することは容易であるが、高速で衝突する飛来物の貫通ともなう局所破壊の予測は簡単でなく、未だに解析結果に対する信頼性も高くない。そこで、本研究は無筋コンクリート版に飛来物が衝突した際の貫入・貫通現象を再現可能な力学モデルを用いて、飛来物の衝突速度や質量の影響に関して考察を試みた。

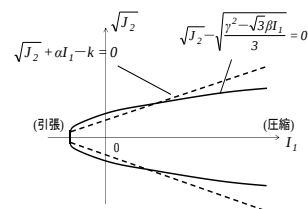


図-1 降伏曲面

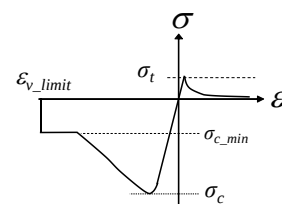


図-2 応力-ひずみ関係

2. 解析概要

2.1 解析手法

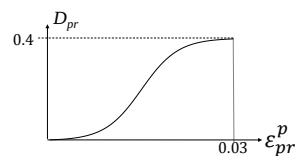
隣接する要素間で変位の連続性を仮定した FEM では破壊を対象とした解析が困難であることから、大変形時にも精度低下の心配が少ないメッシュフリー法である SPH 法を採用した。

2.2 力学モデル

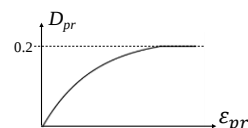
一般にコンクリート材料の弾塑性挙動を解析する際には Drucker-Prager の降伏条件式を用いることが多いが、本研究では既往の研究を参考に、 $\sqrt{J_2} - I_1$ 平面において非線形に変えた降伏条件式を採用した。図-1 に線形および非線形 Drucker-Prager の降伏曲面の比較を示す。この図より、圧縮側の静水圧が大きくなるにつれ、非線形 Drucker-Prager の降伏曲面の方が、せん断破壊し易く、既往の実験で得られているコンクリートの破壊曲面に近い特徴を有することがわかる。

また、図-2 に本研究で用いたコンクリート材料の応力-ひずみ関係を示しており、塑性後の挙動では各軸の主ひずみに応じて応力の軟化を考慮している。一方で、コンクリート材料の剛性低下を表す指標の損傷度は、図-3 のように、(a) 引張側では累積塑性ひずみ、(b) 圧縮側では主ひずみの関数で損傷度計算を行った。また、損傷度についても異方性を持たせるため、累積塑性ひずみ（対称考慮して 6 成分）を主ひずみ方向（3 成分）に変換した後に、各軸で損傷度を計算することで剛性低下に寄与させた。

さらに、貫通現象を解析において表現するために、圧潰条件を導入した。圧潰とは、圧縮破壊の中でも粒子が完全に押し潰された状態を示し、判定値として単軸方向の判定ではなく体積ひずみを採用した。具体的には、粒子の体積ひずみ ϵ_v が圧潰ひずみ ϵ_{v_lim} に達したコンクリート粒子は質量保存則を保持するために該当粒子の消去は行わないが、全応力を強制的に零となる処理を施し、本研究における ϵ_{v_lim} は 6% と設定した。以上のコンクリート材料の力学モデルを用いて、本研究では RC はりおよびコンクリート版において衝撃応答解析を行った。

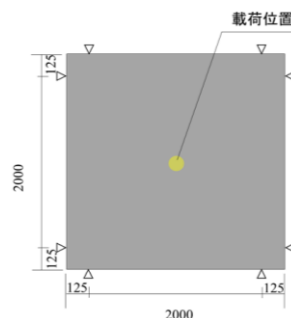


(a) 引張損傷



(b) 圧縮損傷

図-3 損傷度計算

図-4 コンクリート版
(上面図)

キーワード 粒子法、高速衝突、コンクリート版、圧潰、力積

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 ウェスト 2 号館 11 階 1102 号室構造解析学研究室 TEL092-802-3370

3. 解析結果および考察

3.1 解析モデル

コンクリート版の幾何形状および寸法は、図-4 に示すような 2000×2000×200mm の版部材で、支点間距離 1750mm の 4 辺単純支持を想定した。衝突物は質量 300kg、先端形状は半球体（曲率半径 80mm）とし、版中央上面に衝突させた。コンクリートの材料特性は、既往の衝撃実験を参考に圧縮強度、引張強度、静弾性係数、ポアソン比を各々 34.1(N/mm²)、3.41(N/mm²)、29.0(kN/mm²)、0.22 とした。解析モデルについては、1/4 モデルを用いて衝撃応答解析を行なった。そのため、支点位置の粒子は面外方向変位を拘束し、さらに 1/4 モデル対称面上の粒子は、対称面に直交する変位成分を拘束した。

3.2 衝突速度と力積の関係

衝撃力—時間曲線を積分して算出した力積と衝突速度の関係を図-5 に示す。この図より、貫通するケースの衝突速度と力積の間には明確な傾向を示すことが分かり、衝突速度が 60m/s ~90m/s の範囲では、貫通に要する力積が速度の増加とともに徐々に減少する結果が得られ、100 m/s 以上の高速度衝突になると、衝突速度に拘らず貫通に必要な力積は変わらないことが確認できた。さらに、図-6 に、この2つのパターンで生じる貫通破壊モードの比較を示す。なお、これらの図はコンクリート版の横断面における相当応力分布（図中の黒点線に囲まれた領域は初期位置）を表している。この図より、(a)では、コンクリート版の上下縁に大きな相当応力が分布しており、全体的に曲げ変形していることが確認できる一方、(b)は(a)に比べて、衝突箇所近傍に相当応力が集中し、局部的なせん断変形が支配的となっている。

3.3 衝突物の質量と力積の関係

図-7 に飛来物の質量を 300kg の 1/2 の 150kg、1/3 の 100kg に変えた場合の力積—衝突速度関係を示す。この図より、飛来物の質量に関わらず、貫通に必要な最小力積はほぼ同じであることが確認できる。

図-8 に衝突速度が 150m/s の時の重錘質量による、重錘衝撃力の比較を示している。この結果より、最大衝撃力については質量の増加とともに大きくなる反面、衝撃作用時間は短くなる傾向があることが確認できた。このことから、衝突物の質量の大小に関わらず、破壊面が同じ形態の場合には、貫通に必要な力積に大きな差が認められないと考えられる。

図-9 に、これら3種類の異なる衝突物質量で解析して得られたコンクリート版の貫通状況を示している。この結果より、3 ケース全てにおいて、衝突部近傍の局部破壊が卓越していることや飛来物の押し抜きによる斜めせん断ひび割れが生じていることなど貫通破壊モードが概ね一致していることがわかる。また、斜めせん断ひび割れの角度についても、ほとんど差異が認められない。これらのことから、飛来物の質量によらず、コンクリート版の貫通に必要な力積量は変わらないことが認められた。

4. 結論

SPH に圧潰基準を取り入れることで、飛来物の高速衝突によるコンクリート版への貫入・貫通現象が再現でき、衝突速度によって破壊形態が変化すると同時に貫通破壊に必要な力積も異なることが確認できた。また、貫通に必要な力積は飛来物の質量によらないことが確認できた。

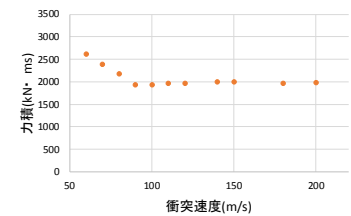
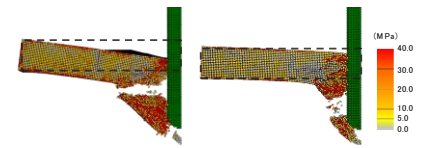


図-5 力積—衝突速度関係



(a) $V_0=60\text{m/s}$ (b) $V_0=150\text{m/s}$

図-6 貫通破壊モードの比較

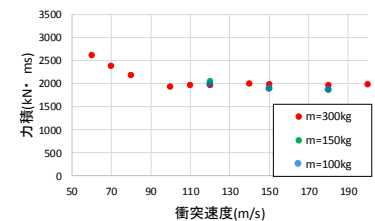


図-7 衝撃力—時間関係

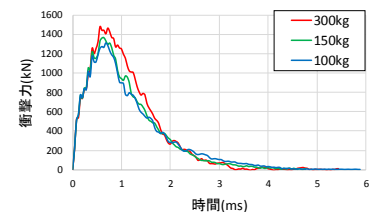
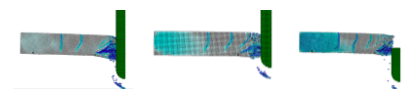


図-8 力積—支点間距離関係



(a)300kg (b)150kg (c)100kg

図-9 衝突物の質量別

コンクリート版の破壊状況