

飛来物の衝突を受けるコンクリート版の局部破壊に関する解析的研究

九州大学大学院 学生会員 ○後藤 航
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に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に関する基礎的検討と飛来物の衝突速度の影響に関して考察を試みた。

2. 解析概要

本研究では、SPH 法を用いて衝撃解析を行った。なお、飛来物の衝突速度とともに変化するコンクリート版の破壊状況や力積を評価するため、衝突速度を 10m/s, 20m/s, 30m/s, 40m/s, 50m/s, 80m/s, 100m/s, 120m/s, 150m/s の 9 ケースに分けて衝撃応答解析を試みた。さらに、比較的小さな一定速度 10m/s でコンクリート版を押し抜くプッシュオーバー解析も同時に行った。

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 形状寸法

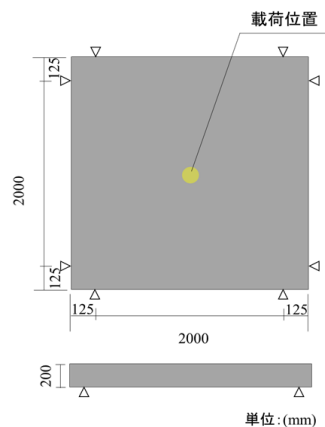
解析に用いたコンクリート版の幾何形状と寸法を図-1 に示す。解析モデルは、2000×2000×200mm の無筋コンクリート版を想定したもので、支点間距離 1750mm の 4 辺単純支持を仮定した。飛来物は、質量 300kg、先端形状は半球体（曲率半径 80mm）とし、版中央上面に衝突させることにした。

2.3 材料特性および力学モデル

コンクリートの材料特性は、既往の衝撃実験を参考に表-1 のように設定した。コンクリートの降伏条件には、圧縮側には硬化、引張には軟化を考慮した圧力依存性を有する Drucker-Prager の降伏条件に従うものとした。さらに、本研究では衝突物の貫入・貫通を再現するために、コンクリートの圧潰基準を設定した。具体的には、図-2 のように Drucker-Prager の圧縮側に応力の上限となる破壊曲面を設け、圧潰曲面上の応力値に達したコンクリート粒子は圧潰が生じたとみなし、質量保存則を保持するために該当粒子の消去は行わず、応力と剛性を強制的に零となるような処理を施した。なお、図-2 中の I_1 は応力の一次不変量、 J_2 は偏差応力の二次不変量である。

2.4 境界条件および解析条件

本解析では、粒子径を 10mm で離散化した 1/4 モデルと全体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 モデルには、境界条件として対象面上の粒子の変位を面外方向のみに拘束した。なお、飛来物については破壊が生じない弾性体を仮定した。



(上)上面図 (下)横断面図

図-1 形状寸法

表-1 材料特性

密度(kg/m ³)	静弾性係数(kN/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	ポアソン比
2500	29.0	34.1	3.41	0.22

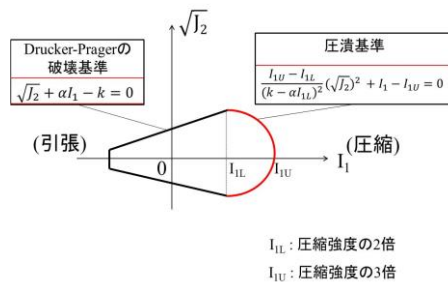


図-2 圧潰表現

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 ウエスト 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 貫通再現および各衝突速度の応答結果

図-3 は、飛来物が衝突速度 30m/s で衝突・貫入する過程を時刻毎に示したものである。この図から、SPH 法によってコンクリートの圧潰をとまう貫通現象が良好に再現できることが分かる。

図-4 および図-5 は、衝突速度を変化させた時の発生衝撃力-時間関係および力積を示している。なお、ここで示す衝撃力は、飛来物の加速度に質量を掛けて求めたものである。図-4 より、衝突速度が大きいほど最大衝撃力が大きくなり、発生時間も早くなることが明瞭に認められる。また、衝突速度が 80m/s 以上になると、最大衝撃力の起ち上がり勾配が急に大きくなること、衝突速度が 50m/s 以下になると、最大衝撃力以降の除荷勾配が小さくなっていくことがわかる。次に図-5 を見ると、衝突速度と力積の間には明確な傾向があり、大きく 3 ケースに分類できることが分かる。まず、飛来物が 10 m/s ~30m/s の低速度で衝突して貫通に至らない場合は、力積は速度に比例して線形的に増加することが分かる。一方、40 m/s ~50m/s の中速度で衝突してコンクリート版を貫通する場合には、貫通に要する力積が速度の増加とともに減少する結果が得られた。さらに衝突速度が 80 m/s ~150m/s と高速になると、コンクリート版の貫通に必要な力積はほぼ一定となることが確認できた。このことから、飛来物の衝突速度がある一定以上になると、破壊形態や貫通に必要な力積は変わらないと考えられる。さらに、飛来物の衝突による破壊と比較するために 10m/s の一定速度で版を押し抜くプッシュオーバー解析を行った結果、版の押し抜きに必要な力積は、図-5 の赤点部分で示す約 2000(N・s) と、飛来物の高速衝突で貫通に要する力積より大きいことも確認できた。

3.2 低速衝突と高速衝突の比較

図-6 および図-7 に(a)プッシュオーバー解析と(b)衝突速度 150m/s 時の解析で得られた変位分布および相当応力分布を示している。なお、図-6 は貫通時の面外変位を色分けで示し、図-7 は点線で示す変形前のコンクリート版の形状と破壊時点の変形と相当応力分布を示している。図-6(a)および図-7(a)より、プッシュオーバー解析では、コンクリート版が全体的に変形しており、曲げ破壊と押し抜きせん断破壊が混在していると考えられる。一方、図-6 (b) と図-7(b)では衝突箇所近傍の局所的な変形が卓越しており、脆性的な押し抜きせん断破壊が生じていることが認められる。さらに相当応力分布を詳細に見ると、図-7(a)にはコンクリート版の上下縁に曲げ破壊モードを示す大きな相当応力の分布が認められるのに対し、図-7(b)には上下縁に曲げ破壊を示す大きな相当応力はなく、貫通する飛来物との接触面に表面から裏面につながる大きな相当応力値が分布し、押し抜きせん断破壊モードであることが推察される。

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。

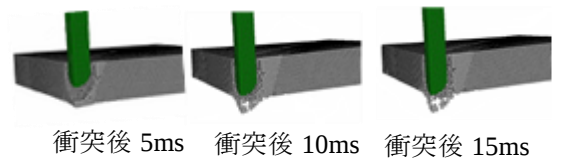


図-3 衝突速度 30m/s

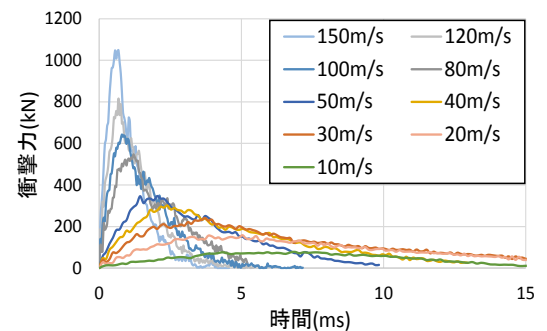


図-4 衝撃力-時間関係

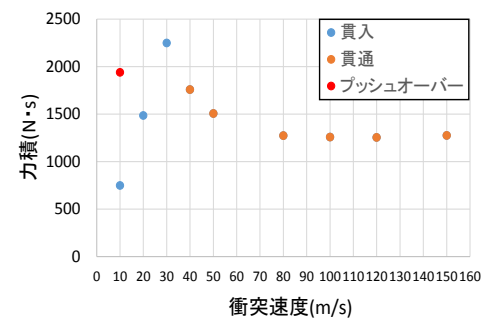
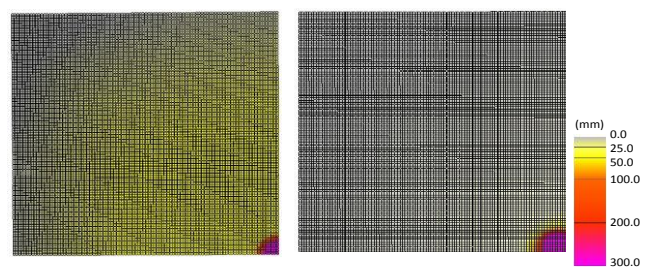
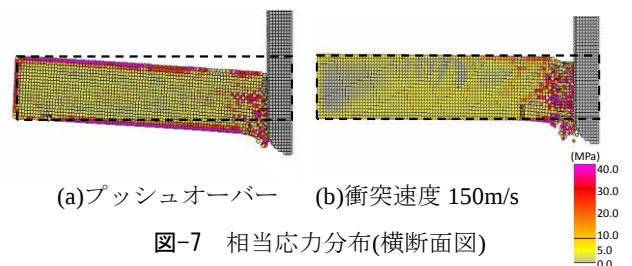


図-5 力積-衝突速度関係



(a)プッシュオーバー (b)衝突速度 150m/s

図-6 変位分布(上面図)



(a)プッシュオーバー (b)衝突速度 150m/s

図-7 相当応力分布(横断面図)