飛来物の高速衝突を受けるコンクリート版の局所破壊の解析的研究

九州大学　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容易でなく、未だに解析結果に対する信頼性も高くない。そこで、本研究では無筋コンクリート版に飛来物が高速衝突した際の貫入・貫通現象を精度良く再現するための力学モデルに関する基礎的検討を行った。

２．解析概要

本研究では、SPH 法を用いて、コンクリート版の破壊状態を評価するため、重錘の衝突速度を 10m/s、30m/s、100m/s の 3 パターンに大きく分けて衝撃応答解析を試みた。

2.1 解析手法

SPH 法は連続体を粒子の集合体として離散化し、各粒子の影響範囲内に存在する他の粒子の物理量を用いて、kernel 関数による重み付き平均によって応答を求める手法である。本研究では、隣接する要素間で変位の連続性を仮定した FEM では取り扱いが困難な破壊現象を対象とした解析を行うために、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 辺単純支持とした。重錘は、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。

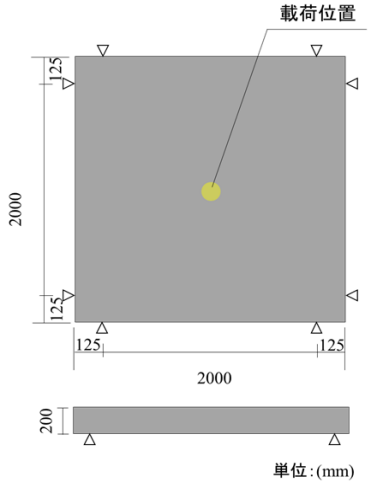

図-1　形状寸法

(上)上面図　　(下)横断面図

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

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 の圧縮側に上限となる破壊局面を設け、静水圧が圧潰基準となる曲面を上回る静水圧が生じたコンクリート粒子は圧潰したとみなし、質量保存則を保持するために該当粒子の消去は行わずに応力および剛性を強制的に零となるように設定した。ここで、図-2 中の I_1 は静水圧で、J_2 は偏差応力の二次不変量である。

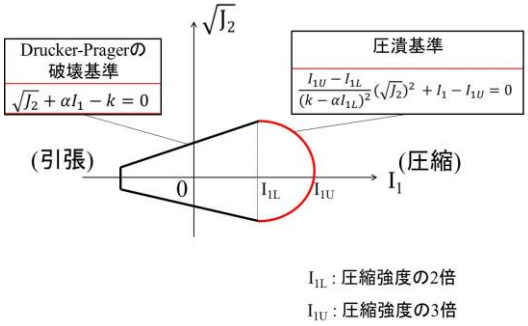

図-2　圧潰表現

2.4 境界条件および解析条件

本解析では、粒子径を 10mm として離散化した 4 分の 1 モデルを用いて衝撃応答解析を行なった。そのために、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、支点位置の粒子には面外方向変位を拘束した、なお、重錘については破壊が生じない弾性体と仮定した。

３．解析結果および考察

3.1 コンクリート版の破壊状況

図-3(a)~(c)に３通りの異なる衝突速度によるコンクリート版の破壊状況を示す。衝突速度 10m/s では、図-3(a)に示すように重錘が衝突後に徐々に先端からコンクリート版にめり込んでいく様子が確認でき、衝突後 12ms 頃には重錘の貫入量の増加は見られなくなり、最終的には 70mm ほど貫入して重錘が停止することが確認できた。衝突速度 30m/s の図-3(b) では、衝突後 10ms の時点でコンクリート版の裏面にまで重錘が到達するが、先端が裏面に貫通した 20ms 以降に速度は急速に低下し、最終的にはコンクリート版内に貫入したまま重錘は停止し、完全な貫通には至らなかった。一方、衝突速度 100m/s の図-3(c) では、他の２ケースと比べて非常に早い時間で重錘がコンクリート版を貫通し、衝突後わずか 1ms 後には、衝突箇所近傍のコンクリート粒子が圧潰していることが分かった。

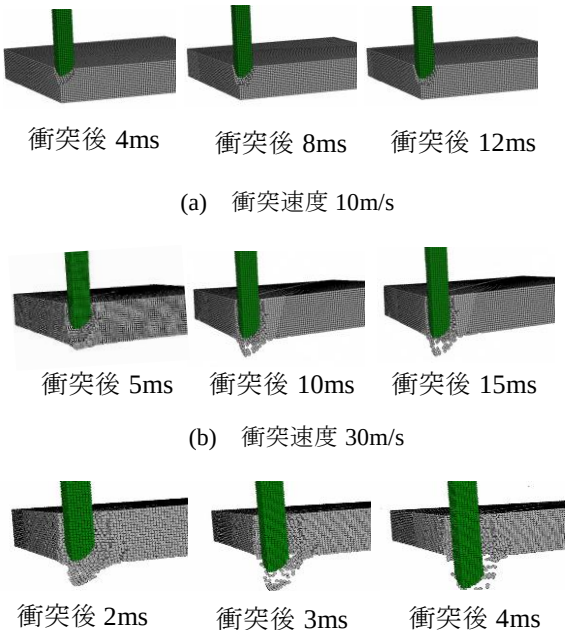

図-3 コンクリート版の破壊状況

3.2 各衝突速度の応答結果

図-4 および図-5 に各衝突速度の重錘衝撃力および支点反力の応答を示している。ここで、図-4、図-5 は各ケースの貫通時までの応答(衝突速度 100m/s は 4ms まで)しか出力していない。図-4 を見ると、衝突速度が大きいほど重錘衝撃力は大きくなり、最大衝撃力の発生時間も早いことがわかる。また、３ケースともに重錘衝撃力波形には大きな振動が認められるが、このような応答になる理由として、コンクリート粒子の破壊が衝突面側から裏面側に向かって連続的に発生し、両者の接触状態が極めて短時間に変化しながらコンクリート版内に重錘の貫入が進行していくためであると考えられる。次に、図-5 の支点反力波形を見ると、重錘速度が速くなるほど、衝突直後に負の支点反力が発生するだけでなく、その後に重錘の貫入が進んで概ねコンクリート版を貫通した後にも再度の負の支点反力の発生が認められる．これらの原因として、重錘衝突直後にはリバウンド挙動に対する反力が発生し、重錘の貫通が生じる時点ではコンクリート版の過度な面外変形に対する反力として生じていると考えられる。また、衝突速度 100m/s の波形を見ると、最初に大きな負の支点反力が生じているが、このことから重錘の衝突直後にコンクリート版に多大な損傷が生じていることが推察される。図-6 に３通りの衝突速度で得られた最終的なひずみ分布を示す．この図より、衝突面近傍で大きな圧縮ひずみ、衝突箇所の裏面で大きな引張ひずみが生じており、重錘の高速衝突にともなうひずみの局所化が発生していることが認められる。

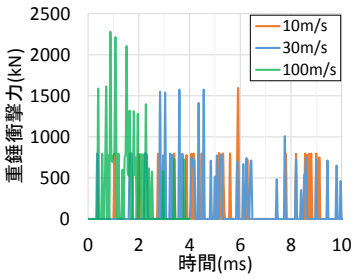

図-4 重錘衝撃力

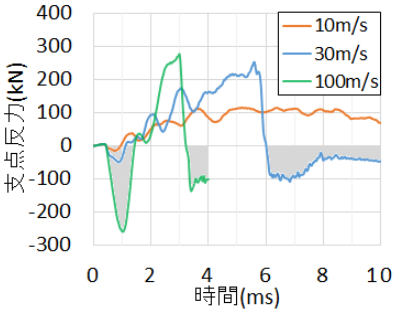

図-5 支点反力

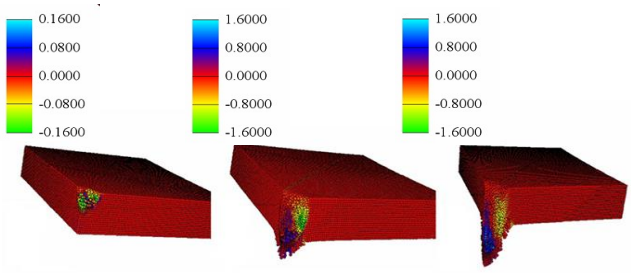

図-6 ひずみ分布

(左から衝突速度 10m/s、30m/s、100m/s)

４．結論

SPH 法において、圧縮側の応力計算に圧潰基準を取り入れることで、重錘の高速衝突による無筋コンクリート版への貫入・貫通現象が表現できた。