

飛来物の衝突を受ける RC 部材の破壊モードに関する基礎的研究

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。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 RC 部材に飛来物が高速衝突した際の貫入・貫通現象を再現可能な力学モデルに関する基礎的検討を行い、飛来物の衝突速度や鉄筋の有無が RC 部材の破壊モードに与える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、はり部材と版部材に対して、低速度衝突解析および高速衝突解析を行い、鉄筋の有無や衝突速度の大きさによって変化する破壊状態を評価した。本解析は全て質量 300kg、先端形状は半球体の弾性体の飛来物と想定している。

2.1 材料構成則および材料特性

本解析では図-1 に示すように、コンクリート材料には、引張側では軟化、圧縮側では非線形の硬化を考慮し、鉄筋材料には 1/100 硬化則を圧縮側および引張側で用いた。降伏条件として鉄筋には von mises の条件に従い、コンクリート材料は図-2 の黒線で表した、圧力依存性を有する非線形 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、鉄筋粒子には引張破断ひずみを 15% と設定し、コンクリートでは圧潰基準を設定した。具体的には、図-2 のように非線形 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ような大きな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。なお、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。また、本検討で用いた各部材の鉄筋およびコンクリートの材料特性は、表-1 に示す。

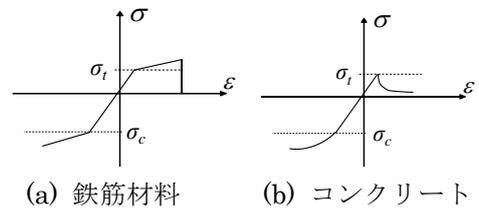


図-1 応力-ひずみ関係

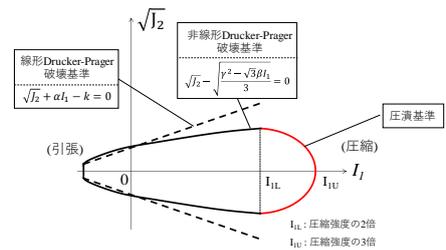


図-2 降伏条件および圧潰条件

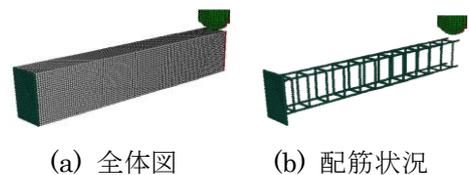


図-3 1/2 解析モデル (RC はり)

3. RC はりおよび無筋コンクリートはりの衝突挙動

3.1 解析モデルおよび材料特性

解析対象は、既往の RC はりに対する低速度衝突実験¹⁾を参考に、150×250mm (はり幅×はり高)、全長が 2400mm の無筋および RC はりで、RC はりは図-3 に示すように、D13 を軸方向鉄筋としてかぶり高さ 40mm の位置に上下端に 2 本ずつ合計 4 本、せん断補強筋は D6 を 100mm 間隔に配置されている。本解析は対称性を考慮して 1/2 モデルを採用し、対称面上の粒子の変位は面外方向のみを拘束した。本検討では飛来物の衝突速度は 5m/s または 100m/s とした。

表-1 各節で用いる材料特性

解析対象 材料名称	はり			版	
	鉄筋 D6	鉄筋 D13	コンクリート	鉄筋 D16	コンクリート
密度 (kg/m ³)	7853	7853	2500	7850	2500
静弾性係数 (GPa)	206.0	206.0	23.1	206	29.0
降伏強度 (MPa)	368	373	—	380	—
圧縮強度 (MPa)	—	—	41.4	—	34.1
引張強度 (MPa)	—	—	4.14	—	3.41
ポアソン比	0.30	0.30	0.23	0.3	0.22

3.2 解析結果

図-4に降伏条件を変えたRCはりの最大主ひずみ分布を示す。この図より、(a)に比べて(b)の方がより明瞭に、RCはりの底面から中央衝突部に向かって数本のひび割れが進展する状況が認められる。図-5に(a)無筋コンクリートはりおよび(b)RCはりの最大主ひずみの分布を示す。なお、図中の赤点線が各はりの初期位置を表している。(a)では衝突部底面から衝突部に向かってひび割れが進展しているだけでなく、衝突部と支点の間においても、ひび割れが形成される破壊モードが認められる。一方(b)では、鉄筋の補剛効果ではりが曲げ変形による全体応答を示すことがひび割れ状況からも確認できる。図-6は、衝突速度を変えた無筋コンクリートはりの最大主ひずみ分布を示す。この図より、(a)と(b)でひび割れ分布が異なっていることから、衝突速度が変化すると破壊モードが変化することがわかる。

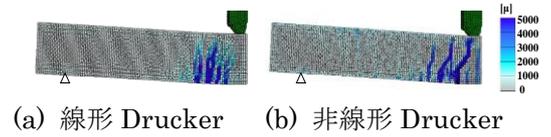


図-4 RCはりの最大主ひずみ分布

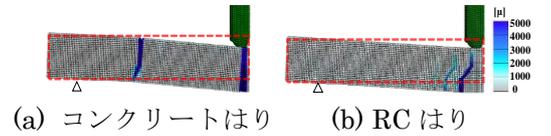


図-5 はり部材の最大主ひずみ分布

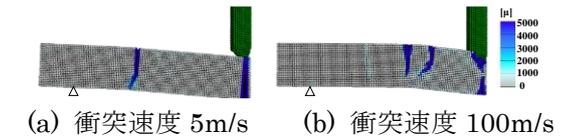


図-6 無筋はりの最大主ひずみ分布

4. RC版およびコンクリート版を用いた高速衝突解析

4.1 解析モデル

対象モデルは、2000×2000×200mmの無筋コンクリート版およびRC版を想定し、支点間距離1750mmの4辺単純支持とした。RC版は図-7に示すように、鉄筋(D16)を150mm間隔でかぶり高さ40mmの位置に格子状に配筋している。解析は対称性を考慮して1/4モデルを採用し、対称面上の粒子の変位は面外方向のみを拘束した。なお、衝突速度は30m/s~100m/sで解析を試みた。

4.2 解析結果

図-8に衝突速度-各衝突速度での貫通に必要な力積関係を表している。この図より、赤い点線で囲まれているような高速衝突の場合、無筋コンクリート版とRC版で貫通に必要な力積が概ね等しいことが確認できる。また、図-9に衝突速度100m/sの貫通時の状況を示す。図中の赤点線が各はりの初期位置を表わすが、(a)、(b)どちらも変形が局所的なせん断破壊で、図-10の裏面の最大主ひずみ分布を見ても、概ね同様であることがわかる。以上より、高速衝突の場合は鉄筋の補剛効果が小さいということが推察できる。

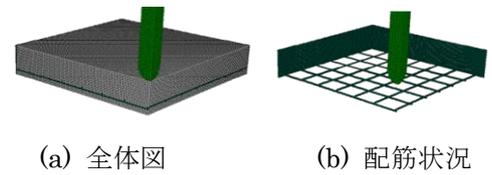


図-7 1/4解析モデル (RC版)

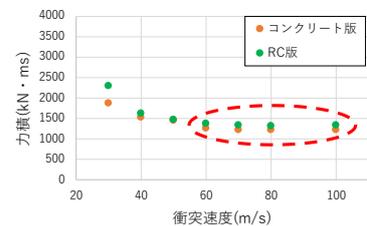


図-8 衝突速度-力積関係

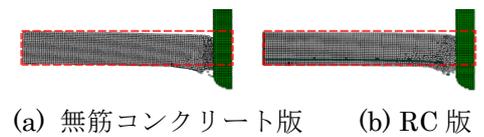


図-9 版部材の破壊状況 (横断面)

5. 結論

飛来物の衝突速度が非常に大きくなり、RC部材の破壊モードが局所的になると鉄筋の補剛効果はほとんど見られなくなることがわかった。

6. 参考文献

- 1) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，土木学会構造工学シリーズ15，pp.73~93，2004.
- 2) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：低速度衝撃を受ける四辺単純支持RC版の耐衝撃設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1327-1336，2009.

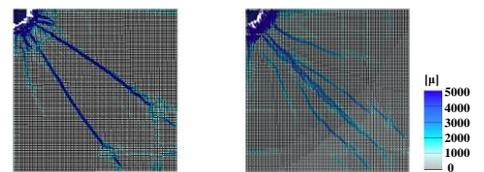


図-10 版部材の最大主ひずみ分布 (裏面)