

RC はりの衝撃応答解析に関する基礎的考察

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）の耐衝撃性能を正確に評価することが求められているが、そのため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、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などの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、本研究では SPH 法を用いて、RC はりにおける衝撃応答解析を精度良く行うためにひずみ速度効果を導入した上で、コンクリートのひび割れによる剛性低下（損傷）を考慮した衝撃応答解析手法の検討を試みた。

2. コンクリートのひび割れによる損傷評価

本研究では、図-1 に示すようなコンクリート材料の引張応力-ひずみ関係を用いて、ひび割れの発生に伴う引張応力の軟化を各主ひずみ軸で考慮することにした。さらに、コンクリートのひび割れによる剛性低下を考慮するために、図-2 のような累積塑性ひずみの関数として表現される損傷変数（ベクトル量）を採用し、累積塑性ひずみ（6 成分）を主ひずみ方向（3 成分）に変換した後に、図-3 のように各軸で損傷度ベクトルを計算し、主ひずみ軸で求めた損傷度を全体座標系に再変換して、異方性を考慮した剛性の評価を行った。

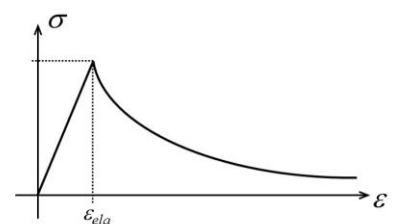


図-1 応力-ひずみ関係(引張側)

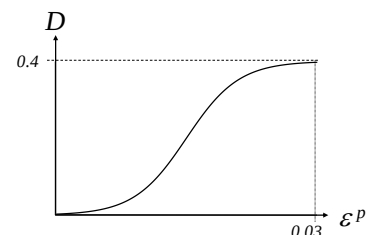


図-2 損傷度-累積塑性ひずみ関係

3. 速度効果の導入

材料が衝撃を受けた場合、大きなひずみ速度が発生し、材料の強度が増加することが一般的に認められている。そこで、本解析においてもひずみ速度効果を導入した。具体的には、コンクリート材料の圧縮側では藤掛らの式²⁾を、引張側では Ross らの式³⁾を採用し、一軸圧縮試験および割裂引張試験の解析を行い、解析手法の妥当性を検証した。

3.1 各供試体の形状寸法および材料特性

解析対象として、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いた。解析モデルは粒子径 5mm で離散化し、図-4(a), (b)に示すように配置して、各上面を載荷面、各底面を固定面として境界条件を与えることで一軸圧縮試験および割裂引張試験を再現している。材料特性については、圧縮強度、引張強度、静弾性係数、ポアソン比をそれぞれ 41.4(N/mm²)、4.14(N/mm²)、23.1(kN/mm²)、0.23 と設定している。

3.2 解析結果

載荷速度は、載荷方向部材長と検証するひずみ速度 10⁻⁵~10³(1/s) から換算して与えた。図-5 に各実験値との圧縮・引張強度の増加率を比較した結果を示す。この図より、圧縮・引張強度ともに各実験値と概ね一致しており、適切にひずみ速度効果が解析手法に反映されていることが確認できた。

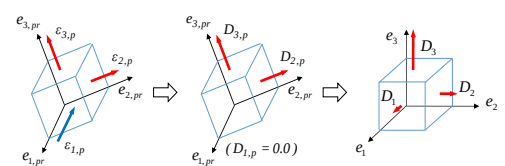
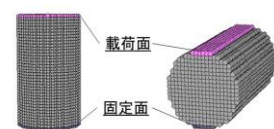


図-3 異方性を有する損傷度計算



(a) 一軸圧縮試験 (b) 割裂引張試験

図-4 解析モデル

キーワード 粒子法, 衝撃, RC はり, 損傷, 速度効果

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

4. RC はりの衝撃解析によるひずみ速度効果の妥当性検証

本節では図-2 に示す損傷モデルに、ひずみ速度効果を導入した衝撃解析手法について、既往の RC はりに対する低速度衝突実験⁴⁾の結果と比較することで妥当性検証を行った。

4.1 対象モデルおよび材料構成則

解析対象のモデルは $150 \times 250\text{mm}$ (はり幅×はり高)、全長が 2400mm の RC はりで、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。本解析は図-6 のように、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を拘束した。また、飛来物は弾性体とし、衝突速度は 5m/s とした。

図-7 に単軸換算での応力-ひずみ関係を示し、降伏条件として鉄筋材料に von Mises を、コンクリート材料には大きな静水圧が生じた際に塑性状態に入りやすい特徴を持つ非線形 Drucker-Prager (図-8) を採用した。材料特性として、既往の実験を参考に前節の材料特性に加え、鉄筋 D13、D6 の降伏強度はそれぞれ $368, 373(\text{N/mm}^2)$ であり、静弾性係数はどちらも $206(\text{kN/mm}^2)$ である。

4.2 解析結果

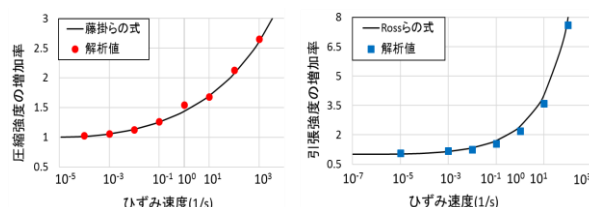
図-9 に RC はりの最大主ひずみ分布を示す。この図より、(a)と(b)では概ね同様の挙動を示しているが、(b)の方が(a)よりもひび割れ状況が明瞭に表れている。これは、本解析では粒子毎に強度増加率の計算を行っていることで、高速変形時の応力伝達経路が変化したためと考えられる。また、図-10 の変位時刻歴を見ても、ひずみ速度効果の導入により変位量が抑制され、より実験値に近付いていることから、ひずみ速度効果の妥当性が確認できた。

5. 結論

速度効果式を適切に導入した損傷度評価で、RC はりの衝撃応答解析において精度良い結果が得られた。

6. 参考文献

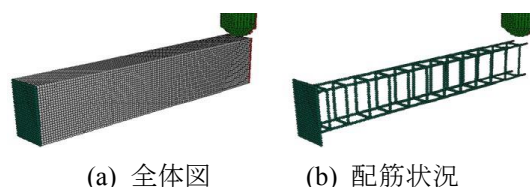
- 1) Jean Lemaitre, Rodrigue Desmorat : Engineering Damage Mechanics, Springer, pp.32-40, 2010.
- 2) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤 : ひずみ速度を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.109-123, 2001.2.
- 3) Ross C.A. Thompson P.Y. and Tedesco J.W. : Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar intension and compression, ACI Material Journal, Vol.86, pp.475-481, 1989.
- 4) 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.



(a) 圧縮強度

(b) 引張強度

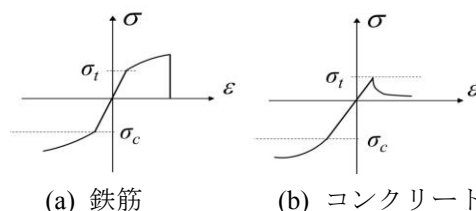
図-5 強度増加率



(a) 全体図

(b) 配筋状況

図-6 1/2 解析モデル (RC はり)



(a) 鉄筋

(b) コンクリート

図-7 応力-ひずみ関係

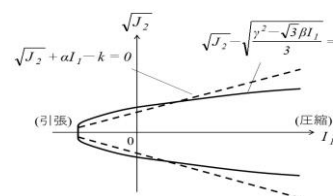
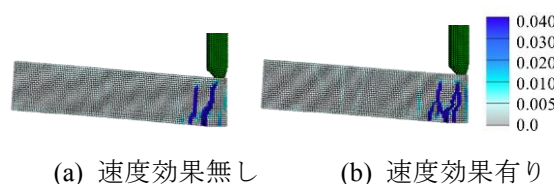


図-8 降伏条件



(a) 速度効果無し

(b) 速度効果有り

図-9 RC はりの破壊状況

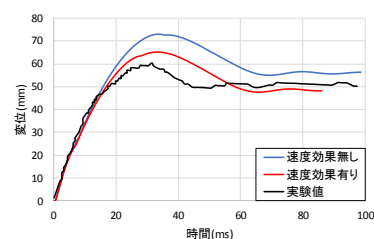


図-10 変位-時間関係