

RBSM による高速衝突を受ける繊維補強セメント複合材料板の破壊挙動解析

名古屋大学

学生会員 ○岡崎 宗一郎

名古屋大学大学院

正会員 山本 佳士, 中村 光, 三浦 泰人

防衛大学校

正会員 別府 万寿博

1. はじめに

東日本大震災以降、原子力発電施設等の重要構造物に対しては、発生頻度はまれであるが、一度発生すると甚大な被害を及ぼす作用に対しても高度な安全性が求められるようになってきており、航空機衝突、竜巻飛散物等の衝撃作用に対するコンクリート構造物の応答を精度よく予測する数値解析手法の確立が望まれている。また、既往の実験的研究から、繊維補強セメント複合材料は、耐衝撃性能が高い可能性が示されている一方で、高速衝突実験を行うのは難しく実験ケースが十分でないために未解明な点も多い。したがって、機械的性質や配向性など繊維一本からその力学的特性をモデル化するメゾスケール解析による耐衝撃性評価は有用であると考えられる。本研究は高速衝突を受けるプレーンコンクリートおよび繊維補強コンクリートの局所破壊挙動をメゾスケールからシミュレートできる数値解析手法を開発することを試みたものである。

2. 解析手法

本研究では、解析手法として Voronoi 分割によるランダム多面体要素を適用した 3 次元 RBSM を用いた。RBSM では、各剛体要素の重心に並進変位 3、回転変位 3 の計 6 自由度を設定し、要素境界面上には表面力の評価点として積分点を設定する。積分点には、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する (3 次元解析では、垂直バネが 1 個、せん断バネが 2 個)。バネの構成モデルには、山本ら¹⁾によって提案されているコンクリートの圧縮軟化・局所化挙動および拘束圧依存性挙動を定量的に再現できる構成モデルを用いた。短繊維のモデル化には、国枝ら²⁾によって提案されている離散化モデルを適用した。このモデルでは図-1 のように、剛体要素の境界面をまたぐ繊維位置において、長さ 0 のバネを配置することで繊維の架橋応力を算出している。架橋力について、ひび割れ発生前では、繊維とマトリックスとの間に生じる弾性せん断応力を評価して算

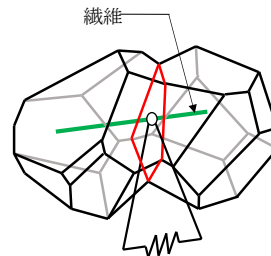


図-1 繊維の離散化モデル

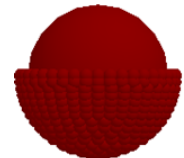


図-2 飛翔体モデル

出している。ひび割れ発生後は、ひび割れ幅の 1/2 を繊維の拔出し量と仮定しすべり分布を仮定する。仮定したすべり分布と付着応力-すべり関係から繊維軸方向の付着応力分布が求まり、軸方向に積分することで架橋力を算出している。衝撃応答は、RBSM により離散化された運動方程式を、中心差分法を用いて陽的に解いた。また、材料が高速衝突を受ける場合、一般的に強度等の力学特性が変化する「ひずみ速度効果」と呼ばれる現象が生じる。提案モデルは、本研究で対象とするひずみ速度領域であれば特にひずみ速度依存性を構成モデルに考慮しなくてもコンクリートのひずみ速度依存性を自然と再現できることを確認している¹⁾。ただし、短繊維補強効果に対するひずみ速度依存性に関しては検証を行っておらず今後の課題としたい。剛飛翔体は図-2 に示す個別要素法 (DEM) を用いてモデル化した。解析では、まず DEM に所定の初速度を与える。RBSM 要素を三角形の集合と考えて、球形要素 DEM との接触判定を行い、接触が生じた DEM-RBSM 要素間には接触バネを配置して衝突力を評価する。接触バネには Hertz の弾性接触理論を用いた。

3. 実験および解析概要

対象実験は別府らによって行われた剛飛翔体の高速衝突を受けるプレーンコンクリートおよび短繊維補強コンクリート板を実験³⁾である。剛飛翔体の質量は 50g、材質は鋼材(SS400)であり、先端形状は半球型、直径は 25mm である。飛翔体は高圧空気式飛

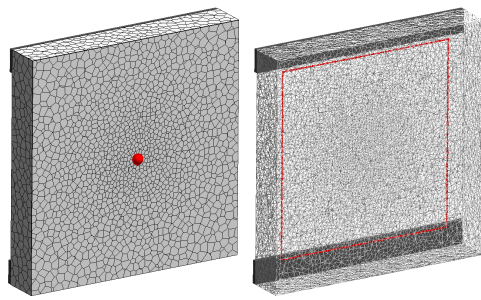


図-3 解析モデル

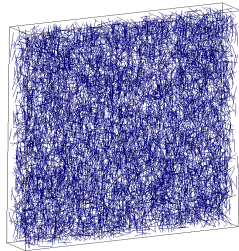


図-4 離散化した繊維モデルの一例

翔体発射装置を用いて、所定の速度で発射される。供試体の寸法は、縦 500mm、横 500mm、厚さ 80mm であり、供試体搬送中の損傷を防ぐため、D6 異形鉄筋が板周囲に配置されている。繊維は PVA（ヤング率 23kN/mm^2 、引張強度 900N/mm^2 、直径 0.66mm 、長さ 30mm ）を使用しており、マトリクスは一般的なコンクリートである。プレーンコンクリート、短繊維補強コンクリートの圧縮強度はそれぞれ 45.7 、 46.3N/mm^2 である³⁾。解析モデルを図-3 に示す。繊維は所定の混入率になるよう疑似乱数を用いて図-4 のように 1 本ずつ配置した。

4. 解析結果

剛飛翔体を 300, 400m/s で衝突させたプレーンコンクリート・繊維補強コンクリートの変形図（変形倍率 2）を図-5 に示す。プレーンコンクリートでは実験で観察される裏面破壊が再現できており、衝突速度に応じた破壊性状を再現している。短繊維補強コンクリートでは、実験において、300m/s では表面破壊が生じ、裏面破壊が見られなかったのに対して、解析では同様の性状を再現できている。一方、400m/s においては、実験が表面破壊でとどまっているのに対し、解析では若干裏面が損傷している様子が確認できる。すなわち、提案モデルは、短繊維補強の耐衝撃性向上効果をやや小さく評価することが分かった。

5. 結論

提案モデルは、短繊維による補強効果を定性的に

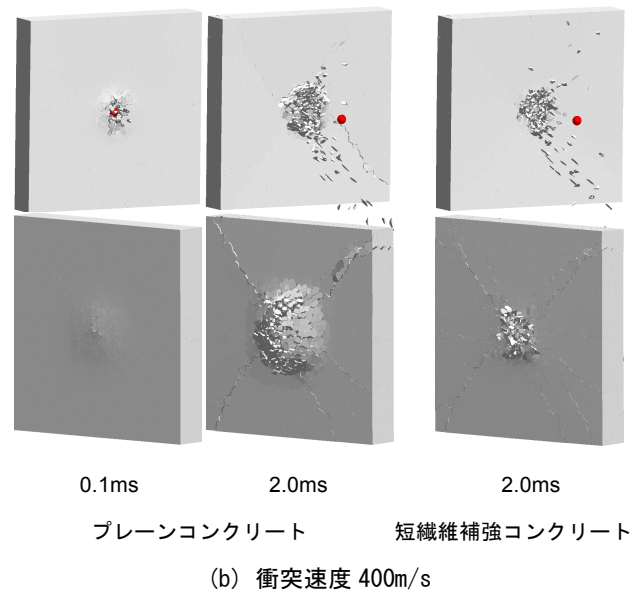
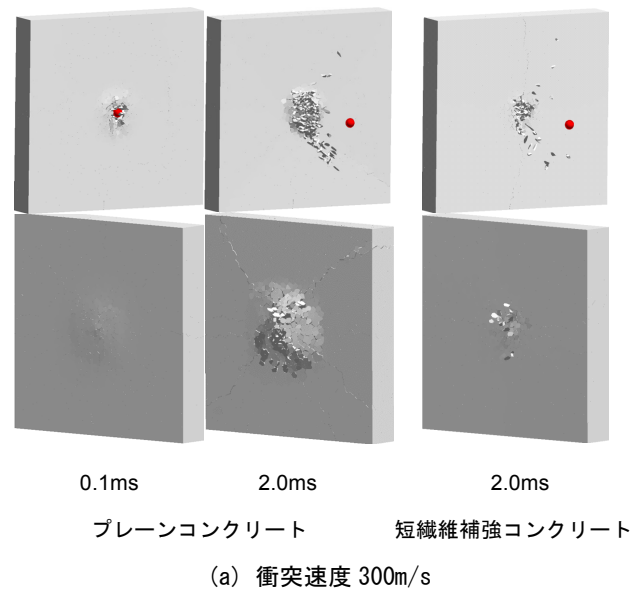


図-5 変形状

は再現できるものの、定量的には耐衝撃性の向上効果をやや小さく評価する傾向にあった。今後は、繊維の付着すべり挙動におけるひずみ速度効果、配向角度の影響等を詳細に検討していく予定である。

参考文献

- 1) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明 (2010) 3 次元 RBSM によるコンクリートの高速圧縮破壊解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.32 No.2, pp.721-726
- 2) 国枝稔, 小澤国大, 小倉大季, 上田尚史, 中村光 (2010) 短繊維を離散化した 3 次元メソスケール解析手法によるひずみ硬化型モルタルの引張破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.66 No.2, pp.193-206
- 3) 別府万寿博, 小川敦久, 高橋順 (2014) 剛飛翔体の高速衝突を受ける繊維補強セメント系複合材料板の耐衝撃性能, 土木学会論文集 E2, Vol.70 No.2, pp.180-193