

## 貫通を伴う無筋コンクリート版の衝突実験の再現解析に関する基礎的検討

(株)大林組

正会員 ○荒木 俊 秋元 理仁 新田 祐平

JIP テクノサイエンス(株) 正会員 佐藤 一樹 戸田 圭彦 田中 克弘

## 1. はじめに

近年、衝突による貫入・削剥などを表現可能な数値解析技術の重要性が日に日に高まってきており、筆者らは設計領域での衝突解析技術の高度化を目指している<sup>1),2),3)</sup>。

これまでの研究では重錘の自由落下問題などの比較的低速度の現象を取り扱ってきたが、より高速度な領域では貫通を伴う破壊が予想される。貫通を生ずるほどの速度領域の数値解析手法は研究段階と言え、構造物の設計では旧来の実験式が用いられることも多い。

そこで、本検討では貫通を伴う高速度衝突問題の解析法の基礎的研究として、有限要素法による無筋コンクリート版への貫通衝突実験の再現解析を試み、ひずみ速度依存効果破壊形態に及ぼす影響を調べた。

## 2. 実験概要

再現実験の対象は Hansson による無筋コンクリート版への弾丸衝突実験<sup>4)</sup>である。衝突のターゲットは図-1 に示す円形コンクリート版であり、厚さ 8mm の鋼板で巻き立てられている。弾丸は Ogive 型弾頭を有するクロム・ニッケル・モリブデン鋼の外殻にセメント系材料で質量調整したものである。本検討では弾丸の入射角度が異なる 2 ケースの実験を解析対象とする。それぞれの実験ケースにおける試験条件および試験結果を表-1 に示す。また、垂直ケースの実験後写真を図-2 に示す。弾丸の貫入によりコンクリート版は内部から半径方向に押し広げられるため、放射状のひび割れが発生している。また、前面、背面ともにクレーター状のせん断破壊面が確認できる。

## 3. 垂直衝突ケースに対するパラメトリックスタディ

解析ソフトウェアとして LS-DYNA10.2 を使用し、まず垂直ケースを対象に、コンクリートの強度をパラメータとしたパラメトリックスタディを実施した。垂直モデルは 1/4 モデル、斜めモデルは 1/2 モデルとして、コンクリートおよび弾丸をソリッド要素、鋼板をシェル要素でモデル化した。

コンクリートの構成則には高圧力下での圧密現象<sup>5)</sup>を表現可能な P- $\alpha$ 型の Mic-Grüneisen 状態方程式を適用可能な RHT モデルを採用することとした。弾丸および鋼板は弾性

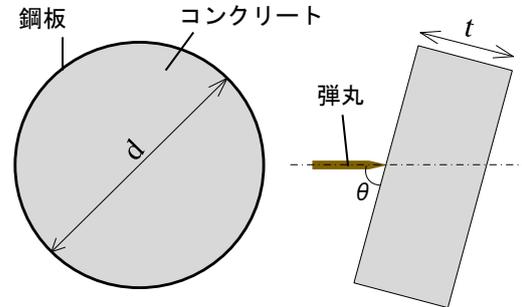
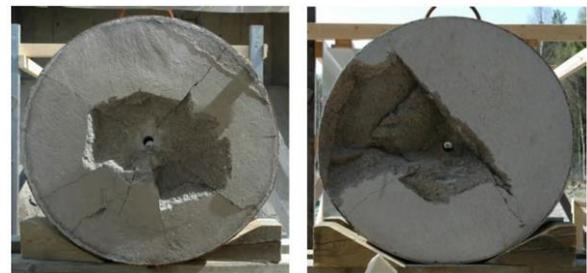


図-1 供試体形状

表-1 実験供試体の諸元および実験結果<sup>4)</sup>

| 試験条件        | 試験ケース                  | 垂直                   | 斜め    |
|-------------|------------------------|----------------------|-------|
|             | 衝突角度 $\theta$ (°)      |                      | 90    |
| 速度(m/sec)   |                        | 420                  |       |
| コンクリート版     | 直径 d(mm)               | 1200                 | 1500  |
|             | 厚さ t(mm)               | 600                  | 540   |
|             | 鋼板厚(mm)                | 8.0                  |       |
|             | 圧縮強度(MPa)              | 54.8                 |       |
| 弾丸          | 弾性係数(GPa)              | 31.3                 |       |
|             | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 2.31×10 <sup>3</sup> |       |
|             | 全長(mm)                 | 450                  |       |
|             | 直径(mm)                 | 50                   |       |
|             | 質量(kg)                 | 4.5                  |       |
|             | 弾頭形状                   | CRH8.0               |       |
| 実験結果        | 弾性係数(GPa)              | 212.7                |       |
|             | 貫通速度(m/sec)            | 139                  | 8*    |
|             | 前面クレーター直径(mm)          | 650                  | 775*  |
|             | 前面クレーター深さ(mm)          | 110                  | 235*  |
|             | 背面クレーター直径(mm)          | 900                  | 1050* |
| *実施した2体の平均値 | 背面クレーター深さ(mm)          | 155                  | 200*  |



(a) 前面側

(b) 背面側

図-2 垂直ケースの実験後写真<sup>4)</sup>

体とした。

別府ら<sup>6)</sup>のコンクリート版への剛飛翔体の衝突解析例を参考とし、表-2 に示すひずみ速度依存性を考慮した強度定数を RHT モデルの圧縮強度および引張強度として与えた 4 ケースの解析を実施した。

キーワード 衝突解析, RHT モデル, ひずみ速度依存性

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 インターシティ B 棟 (株)大林組 生産技術本部 TEL03-5769-1972

表-2 動的強度増加倍率<sup>9)</sup>

| ひずみ速度 (1/s)      | 圧縮強度増加倍率 | 引張強度増加倍率 |
|------------------|----------|----------|
| 静的               | 1.00     | 1.00     |
| 10 <sup>-1</sup> | 1.25     | 1.70     |
| 10 <sup>0</sup>  | 1.43     | 2.44     |
| 10 <sup>1</sup>  | 1.69     | 4.05     |

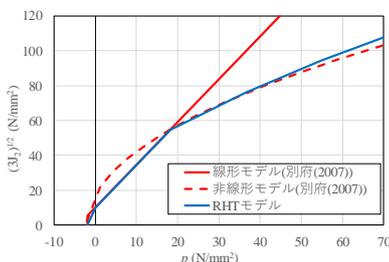


図-3 降伏曲面の比較 (圧縮を正)

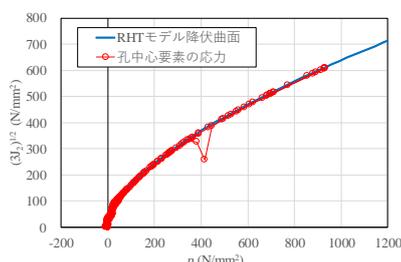


図-5 孔中心要素の応力パス (圧縮を正,  $\dot{\epsilon} = 10^0(1/s)$ )

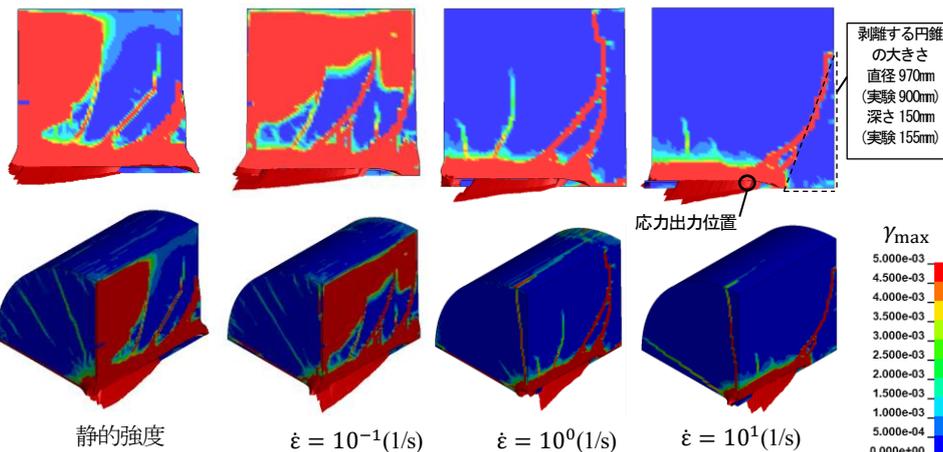


図-4 垂直衝突ケースの最大せん断ひずみコンター図 (変形 1.0 倍)

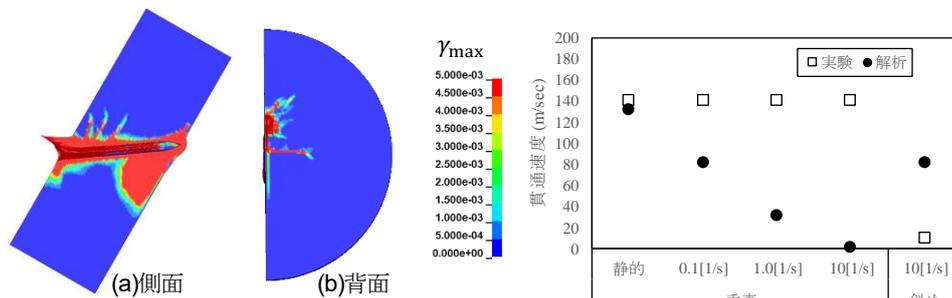


図-6 斜め衝突ケースの最大せん断ひずみコンター図 (変形 1.0 倍)

図-7 各ケースの貫通速度

また、1 軸圧縮強度までの降伏曲面の勾配は Drucker-Prager 構成則 (線形モデル) に一致するように決定し、引張側の降伏曲面は静水圧軸との交点が別府ら<sup>9)</sup>の負圧限界に一致するように決定した。別府らの降伏曲面と、我々が設定した RHT モデルの降伏曲面の比較を図-3 に示す。その他の解析条件として、エロージョンひずみは相当ひずみ 250% とし、実験の孔形状より摩擦の影響は小さいと仮定して今回の解析では摩擦を考慮しないものとした。

強度定数をパラメータとした解析結果を図-4 に示す。実験ではコンクリート版の背面側に押し抜きせん断破壊が見られたが、ひずみ速度を考慮して強度定数を上昇させると背面側のせん断破壊線が徐々に明瞭となり、ひずみ速度 10(1/s)において実験と同等のせん断破壊線が得られた。これは、別府らの検討<sup>9)</sup>と同等の結果であった。ただし、いずれのケースも前面側のクレーターは表現されなかった。また、ひずみ速度 10(1/s)における孔中心の要素の応力パスを図-5 に示す。偏差応力が卓越しており、本試験体においては圧縮破壊よりもせん断破壊が支配的であったと考えられる。

#### 4. 斜め衝突ケースの再現解析

最も破壊形態が実験と近いと考えられたひずみ速度 10(1/s)の強度定数を用いた斜め衝突ケースの解析結果を図-6 に示す。垂直同様に、概ね同等の破壊形態が得られた。

#### 5. まとめ

本研究では、貫通を伴うコンクリート版への衝突実験の再現解析を実施した。ひずみ速度 10(1/s)を考慮した場合に実験と同等の背面側のせん断破壊が得られ、ひずみ速度依存性を考慮する妥当性を再確認した。

しかしながら、図-7 に示すように貫通速度は実験と相違する。有限要素法の枠組みでは背面側の剥離現象や、エネルギーの保存の取り扱いが難しく、斜め衝突においては孔内の摩擦の影響も大きいと推察される。貫通速度の表現には、エネルギーが保存され、剥離を自然に表現可能な粒子法の利用が適していると考えられ、今後は、既往の FEM 衝突解析技術を粒子法へ拡張させることが課題である。

#### 参考文献

- 1) 秋元ら：粒子法(SPH法)による土塊衝突荷重評価に関する研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会, III-282, 2017.
- 2) 秋元ら：Mohr-Coulomb 弾塑性構成則を用いた重錘衝突実験の有限要素解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会, III-369, 2018.
- 3) 松本ら：SPH-FEM ハイブリッドモデルによる重錘衝突実験の再現解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会, III-368, 2018.
- 4) Håkan Hansson：Warhead penetration in concrete protective structures, Licentiate Thesis of KTH RIT, 2011.
- 5) 松島ら：高速圧縮破砕を受ける砂層に対するユゴニオ状態方程式の土質力学的解釈, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 69, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 16), I 371-I 378, 2013.
- 6) 別府ら：剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート版の局部破壊発生メカニズムに関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 1293-1304, 2007.