SPH 法による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 〇秋元 理仁 高橋 篤史JIP テクノサイエンス(株) 正会員 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¹⁾.

過年度には Hansson らの無筋コンクリート版への弾丸衝 突実験²⁾の再現解析を試み,材料特性としてひずみ速度依存 効果³⁾を取り入れることにより実験結果の破壊性状が再現 できることを確認した.FEM 解析結果を図-1 に示す.

しかしながら,前面側クレーターが現れない点および実 験では貫通した弾丸が貫通しなかった点が課題として残っ た.その原因は弾丸の貫入を表現するために導入したエロ ージョン(ひずみが過大となった要素を消去する)則である と考えられる.要素を削除した場合,同時に保持していたエ ネルギーも消失することとなり,解析モデル内のエネルギ ー保存則が満たされず,弾丸の速度低下や破壊領域の抑制 を引き起こしている可能性がある.

そこで、本研究では剥離や貫通を自然な定式化で取り扱うことが可能な SPH 法に着目し、SPH 法による同実験の再現解析を実施した.

2.実験および過年度再現解析の概要

衝突実験のターゲットは図-2 に示す円形コンクリート版

	試験ケース	垂直
衝突条件	衝突角度 θ(°)	90
	速度(m/sec)	420
コンクリート版	直径 d(mm)	1200
	厚さ t(mm)	600
	鋼板厚(mm)	8.0
	圧縮強度(MPa)	54.8
	弾性係数(GPa)	31.3
	密度(kg/m ³)	2.31×10 ³
弾丸	全長(mm)	450
	直径(mm)	50
	質量(kg)	4.5
	弹頭形状	CRH8.0
	弾性係数(GPa)	212.7
実験結果	貫通速度(m/sec)	139
	前面クレーター直径(mm)	650
	前面クレーター深さ(mm)	110
	背面クレーター直径(mm)	900
	背面クレーター深さ(mm)	155

表-1 実験供試体の諸元および実験結果 2)

キーワード SPH 法, コンクリート版, 衝突解析, RHT モデル 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 原子力本部 FAX03-5769-1942

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 90°の実験ケースを解析対象とする. 実験の条件および結果を表-1 に示す.また,垂直ケースの 実験後写真を図-3 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.



図-1 FEM モデル最大貫入時の最大せん断ひずみコンター3)



FEM モデルは 1/4 対称モデルとしており、コンクリート の構成則には高圧力下での圧密現象を表現可能な P-a型の Mie-Grüneisen 状態方程式⁴⁾を組み込んだ RHT モデル⁵⁾を採 用し、弾丸および鋼板は弾性体とした. 解析結果として図-1 に示すせん断破壊線を得ている.

3. SPH 法によるモデル化

FEM 同様に解析ソフトウェアとして LS-DYNA10.2 を使 用した. SPH 法の解析コストが大きいことを考慮し、コン クリート版が円形断面であることを利用した軸対称モデル による検討とした. コンクリート要素を SPH 粒子でモデル 化し、メッシュサイズは FEM モデルと同等の 5mm 間隔程 度とした. なお、鋼板および弾丸は FEM としており、それ ぞれ軸対称シェル要素,軸対称ソリッド要素でモデル化さ れている. SPH 粒子と弾丸 FEM 要素間には接触を定義し、 FEM モデル同様に摩擦係数を0とした.また、鋼板 FEM 要 素と SPH 粒子とは節点共有により結合条件とした.

材料定数は全て FEM モデルと同一とし、コンクリートの 強度定数としてひずみ速度 10(1/s)相当の圧縮強度および引 張強度を与えた.

4. 解析結果の評価

図-4 に衝突開始後 0.3 秒後の最大せん断ひずみコンター 図を示す.弾丸は貫通しており,前面背面ともに SPH 粒子 が剥離してクレーター状の破壊性状が現れている.また,図 -5 に弾丸速度の時刻歴を示す.弾丸速度は 100m/sec 以上を 保持しており,実験結果と同傾向にあると考えられる.

破壊性状および弾丸速度が FEM 解析と異なる結果になった要因として, SPH 法がエネルギーを保存したまま貫入 事象を扱うことができるためと考えられる. 図-6 にコンク リートの内部エネルギーと弾丸の運動エネルギーの時刻歴 を示す. FEM 解析ではエロージョンによるエネルギー総和 の漸減が見られるが, SPH 法にはそれが見られない.

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 再現解析に SPH 法を適用した検討を実施した.エネルギー 保存則を満たすような数値解析法を選択することにより、 FEM では表現しづらい貫入現象をより自然に表現すること ができることを確認した.

内部の破壊領域が広いことなど精度面で検証すべき課題 は残るものの SPH 法をはじめとする粒子法は衝突事象の解 析法としてその表現力に優位性があると考えられる.ただ し,解析コストは依然として高く三次元モデルでの検証は



図-6 エネルギー比較

本研究では実施できなかった. 今後は適切な粒子分割・モデ

ル化の検討および三次元モデルへの適用と検証を目指す.

参考文献

- 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.
- 2) Håkan Hansson : Warhead penetration in concrete protective struc tures, Licentiate Thesis of KTH RIT, 2011.
- 3) 荒木ら: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,土木学会第73回年次学術講演会,I-175,2 020.
- W. Herrmann: Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Prous Materials, Applied Physics, 1969.
- 5) T. Borrval, W. Riedel: The RHT concrete model in LS-DYNA, 2011.