

# SPH法による剛飛翔体の高速衝突を受ける コンクリート板の局部破壊解析

SPH Simulations of High Velocity Impacts on Concrete Plate

榊原辰雄<sup>1)</sup>, 津田徹<sup>2)</sup>, 太田垣良<sup>3)</sup>

Tatsuo Sakakibara, Toru Tsuda and Ryo Ohtagaki

1)博(工) 伊藤忠テクノロジーソリューションズ(株) (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3, tatsuo.sakakibara@ctc-g.co.jp)

2)博(工) 伊藤忠テクノロジーソリューションズ(株) (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3, tooru.tsuda@ctc-g.co.jp)

3)伊藤忠テクノロジーソリューションズ(株) (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3, ryou.ohtagaki@ctc-g.co.jp)

The local damage of the concrete plates are produced by high velocity impact of rigid projectiles. In order to represent the cracking or perforation behaviors of the concrete, SPH is appropriate method because of completely mesh free. In this paper, SPH simulations for the local damage of the concrete plates due to high velocity impact are performed to study the effects of the impact velocity and the strength of the concrete plate. To represent the nonlinear failure behavior of the concrete, the strain rate effects of concrete strength are taken into account. The numerical results of the local damage of concrete plates are discussed through comparing with experimental results.

**Key Words** : SPH, high velocity impact, concrete plate, local damage, strain rate

## 1. はじめに

コンクリート板に剛飛翔体を高速衝突させると、亀裂、裏面剥離、貫通などの局所的な破壊挙動が見られる。このような現象を有限要素法に代表される連続体モデルで解析する場合、要素の大変形やつぶれによる計算の困難さを避けるためにイロージョンなどの処理が必要である[1]。そこで、要素のゆがみや大変形にも特別な考慮が必要なく、固体材料の衝突や貫通などの不連続現象を精度よくシミュレーションする手法として粒子法が用いられるようになってきた[2]。本論文では、粒子法の一つであるSPH法を用い、コンクリート板に剛飛翔体が高速衝突する現象について剛飛翔体の速度やコンクリート板の強度が局所破壊挙動に及ぼす影響検討を行った。コンクリートの材料構成則としてひずみ速度依存性を考慮した構成則を用い、普通強度および高強度コンクリート供試体に対して衝突速度を変えた解析を実施し、既往の実験結果[3]と比較検証を行った。尚、解析コードとしてLS-DYNA Ver.971を用いた。

## 2. SPH法

SPH法では連続体を粒子の集合体とみなし、任意の位置での物理量は、次式に示すカーネル近似により各粒子点の分布量を重ね合わせることで評価する。

$$f(x) = \int f(x')W(x-x',h)dx' \quad (1)$$

ここで、 $x$  : 評価点座標、 $x'$  : 粒子点座標、 $h$  : スムージング長さ、 $f(x)$  : 任意の関数、 $W(x-x',h)$  : 次式の平滑化関数を表す。

$$W(u,h) = \frac{1}{h(u)^d} \theta(u) \quad (2)$$

ここで、 $u = |x-x'|/h$ 、 $d$  : 解析次元、 $\theta$  は重み関数で本論文では3次のBスプラインを使用している。

カーネル近似を用いた粒子の運動方程式には応力勾配を用いた(3)式を用いる。

$$\frac{dv_i}{dt} = -\sum_j m_j \left( \frac{\sigma_i}{\rho_i^2} A_{ij} - \frac{\sigma_j}{\rho_j^2} A_{ji} \right) \quad (3)$$

ここで、 $A_{ij}$  は、次式を表す。

$$A_{ij} = \frac{1}{h^{d+1}} \theta' \left( \frac{\|x_i - x_j\|}{h} \right) \quad (4)$$

## 3. 解析モデルの概要と解析条件

本論文では、別府ら[3]の実験で用いられた供試体を解析の対象とした。供試体の寸法は縦50cm, 横50cm, 板厚

8cmで、解析モデルはFig.1(a)に示すように1/4対象モデルとした。解析時間の低減を図るため、供試体中心部をSPH要素でモデル化し、周辺部はラグランジュ要素を用いてモデル化を行った。SPH要素とラグランジュ要素は並進自由度のみ伝達する結合とした。SPH要素の中心間距離は1.25mmとし、規則正しく格子状に配置した。剛飛翔体の質量は50gで先端部は直径25mmの球状である。剛飛翔体のモデルをFig.1(b)に示す。解析モデル全体の要素数をTable 1に示す。

本解析では剛飛翔体は剛体とし、コンクリート供試体は弾塑性モデルとしてDrucker-Pragerの降伏基準を適用した。コンクリートは普通強度コンクリートおよび高強度コンクリートの2種類とし、高速衝突によるコンクリートのひずみ速度依存性を考慮するために、(5)式に示す藤掛らの式[4]により動的圧縮強度の増加を考慮した。

$$\frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.006} \left[ \text{Log} \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^{1.05} \quad (5)$$

ここに $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的ひずみ速度、 $f'_{cd}$ は動的圧縮強度、 $f'_{cs}$ は静的圧縮強度である。普通強度コンクリート供試体のひずみ速度依存性を考慮した降伏関数をFig.2に示す。本解析では、コンクリート供試体のすべての要素に対して毎時間ステップでひずみ速度から動的圧縮強度を算出し、圧縮強度に対するひずみ速度依存

性を考慮した。引張強度については一軸圧縮強度の1/10と仮定し、ひずみ速度依存性は考慮せず一定として扱った。コンクリート供試体の物性値をTable 2に示す。

境界条件は、Fig.1(a)に示すコンクリート供試体の下辺および左辺を対称条件とし、上辺は実験と同様に固定条件とした。剛飛翔体の衝突速度としてTable 3に示すように3通りの衝突速度を設定した。

#### 4. 解析結果と考察

剛飛翔体衝突後の時間0.69msecにおけるモデル中央断面の相当塑性ひずみ分布図をFig.3に、供試体の表面およ

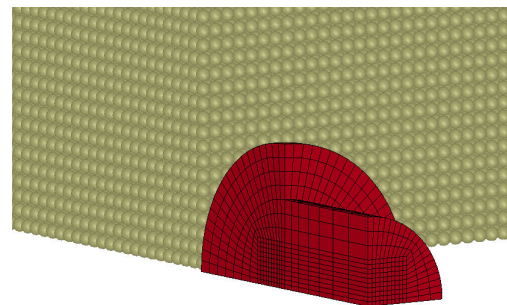
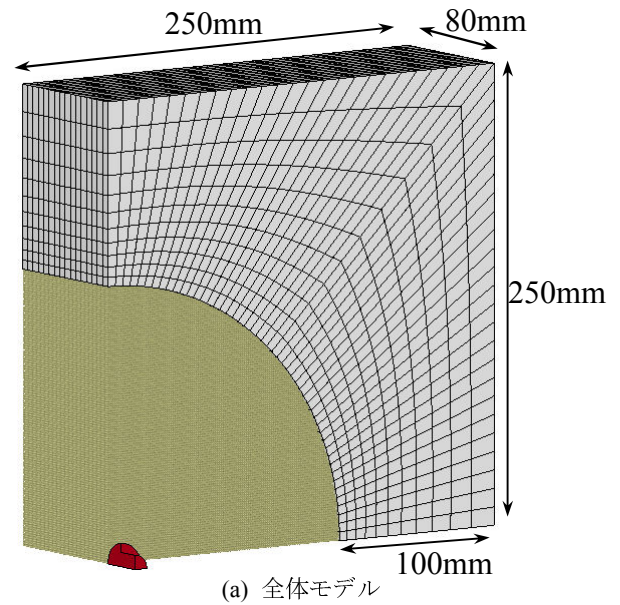


Fig. 1 解析モデル

Table 1 要素数

	要素数	節点数
コンクリート(SPH)	739252	
コンクリート(SOLID)	8800	10404
剛飛翔体	4220	4936

Table 2 コンクリート物性値

共通	縦弾性係数	MPa	25500
	ポアソン比		0.15
	密度	g/cm3	2.5
普通強度	一軸圧縮強度	MPa	25.0
	引張り強度	MPa	2.5
高強度	一軸圧縮強度	MPa	100.0
	引張り強度	MPa	10.0

Table 3 計算ケース

普通強度			高強度		
NO.	板厚 (cm)	速度 (m/s)	NO.	板厚 (cm)	速度 (m/s)
1	8	210	4	8	210
2	8	310	5	8	310
3	8	415	6	8	415

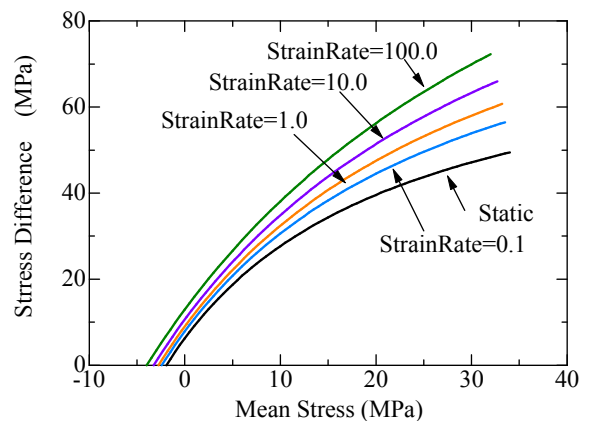


Fig. 2 降伏関数

び裏面の相当塑性ひずみ分布図をFig.4に示す。コンクリート供試体と剛飛翔体が衝突する表側では、圧縮破壊によるコンクリートの飛散が実験では観察されている。SPH法では大変形により要素を削除する（イロージョン）処理が不要であり、実験で見られる供試体の飛散状況をよく再現していると言える。普通強度コンクリートでは衝突速度の増加に応じて表面破壊が増加し、衝突速度415m/secでは貫通に至っている。一方、高強度コンクリートでは、表面破壊の程度は衝突速度に依存せず同程度の大きさと言える。Fig.3に示す供試体断面の塑性分布から、衝突速度210m/sec、310m/secのケースでは供試体の断面中央あたりから裏面に向かって斜めに塑性領域が広がっている様子がみられ、衝突速度415m/secのケースでは表面の崩壊は他のケースと同等でありながら、裏面剥離と考

えられる破壊状況を確認することができる。また、裏面には放射状に亀裂と考えられる塑性ひずみ分布が確認でき、別府ら[3]の実験結果とも整合している。

Fig.5、Fig.6はそれぞれ剛飛翔体の速度およびモデル全体のエネルギーの時刻歴変化を示している。Fig.5の速度履歴からも普通強度コンクリートの衝突速度415m/secのケースで貫通していることがわかる。一方、高強度コンクリートでは、すべてのケースで剛飛翔体は衝突後に反発し、貫通には至っていない。Fig.6に示す図は衝突速度415m/secのケースで、普通強度コンクリートでは供試体のひずみエネルギーの増加とともに、衝突後の飛散による運動エネルギーの増加が見られる。また、高強度コンクリートでは飛翔体の運動エネルギーのほとんどがコンクリートのひずみエネルギーとして消費されていることが

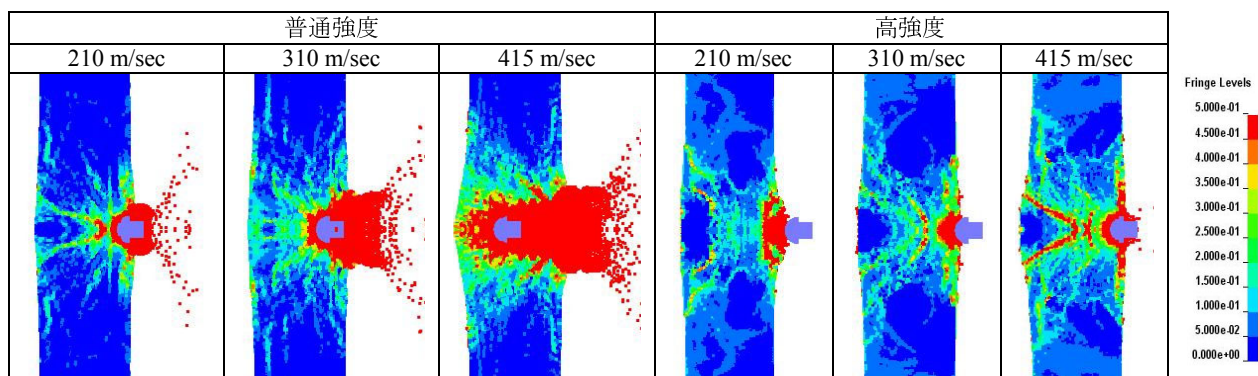


Fig. 3 コンクリート供試体断面破壊状況 (衝突後 0.69msec)

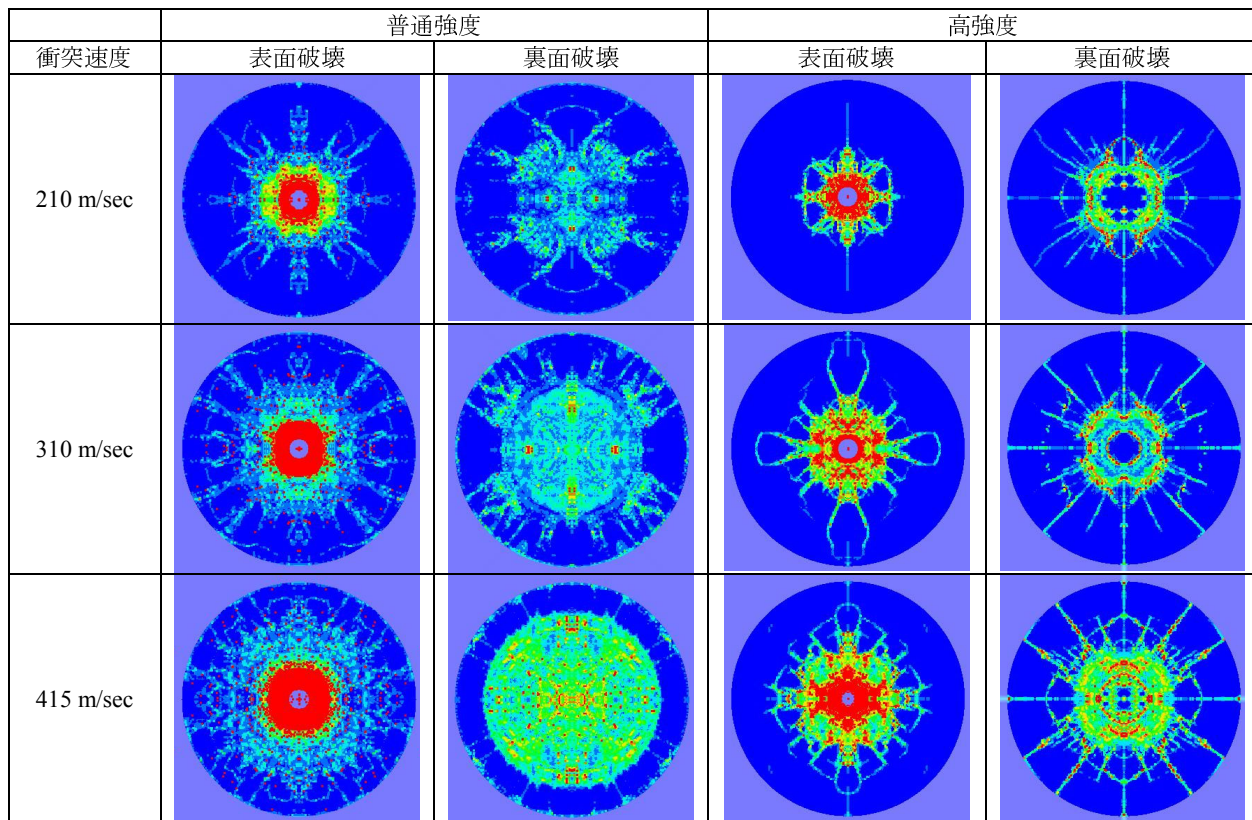
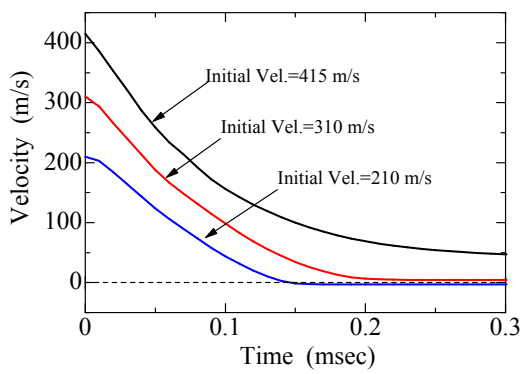
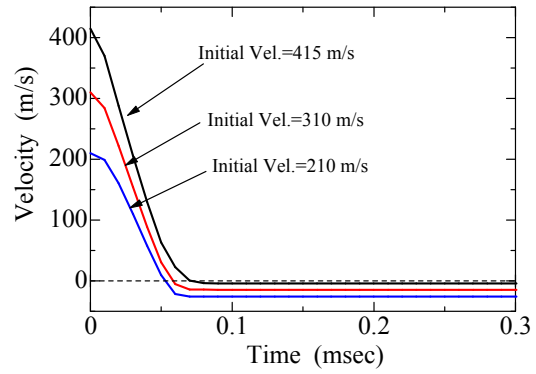


Fig. 4 コンクリート供試体表面、裏面破壊状況 (衝突後 0.69msec)

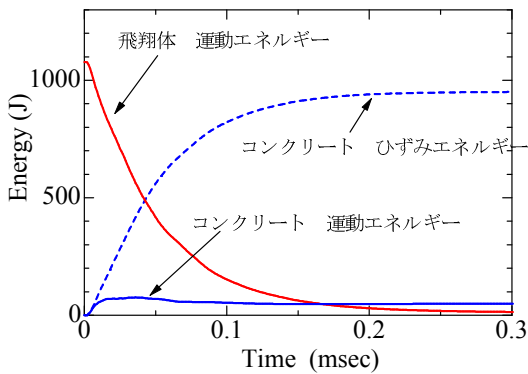


(a)普通強度コンクリート

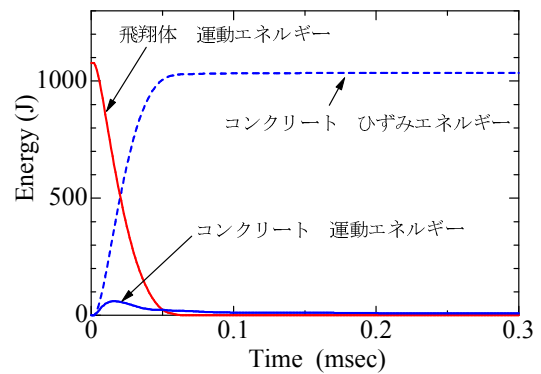


(b)高強度コンクリート

Fig. 5 飛翔体の速度変化



(a)普通強度コンクリート



(b)高強度コンクリート

Fig. 6 エネルギーの履歴 (衝突速度 415m/sec)

わかり、高強度コンクリートの高速衝突に対する有効性が確認できる。

Fig.7は供試体表面の破壊深さと衝突速度の関係を示した図で、本解析結果および別府ら[3]の実験結果を示している。解析結果の破壊深さについては剛飛翔体の最大貫入深さを表面破壊深さとした。普通強度コンクリートについては実験値とよい一致を示すが、高強度コンクリートについては解析値が実験値よりも小さい結果となった。原因として、瞬間的なひずみ速度の増加による強度の過大評価によるものと考えられ、今後改良を検討したい。

## 5. 結論

剛飛翔体の高速衝突によるコンクリート板の破壊解析をSPH法により実施し、その有用性を確認した。本解析結果においても、普通強度コンクリートでは衝突速度の増加により破壊形態が異なること、また、コンクリート板の高強度化による表面破壊、裏面剥離の低減効果が期待できることを確認した。

## 謝辞：

本研究を進めるにあたり貴重なご意見を頂いた防衛大学校 別府万寿博 先生に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

1) 別府万寿博, 三輪幸治, 伊東雅晴, 片山雅英, 大野友則：剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板

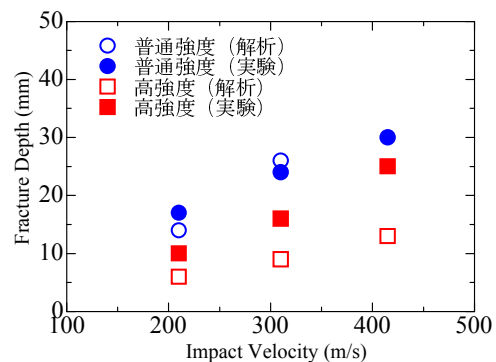


Fig. 7 表面破壊深さと衝突速度の関係

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.

2) Leonard E Schwer: Simple Input Concrete Constitutive Models: An Illustration of Brick Wall & Concrete Cylinder Perforation, 10<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference, pp.20.39-20.50, 2008.  
 3) 別府 万寿博, 三輪 幸治, 大野 友則, 塩見 昌紀：鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究, 土木学会論文集E, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.  
 4) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤：ひずみ速度効果を考慮した三軸圧縮応力下におけるコンクリートの直交異方性モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.109-123, 2001.