

# 論文 剛飛翔体の衝突を受けるブレンコンクリート板に生じる裏面剥離の再現性に関する感度解析

松澤 遼\*1・佐藤 暁拓\*2・大西 慶弘\*3・別府万寿博\*4

**要旨:** 本論文では、過去に行われたブレンコンクリート板に対する衝突試験を対象に裏面剥離の再現性について数値解析的検討を実施した。まず、表面破壊となる条件について基本的な時刻歴応答が再現できることを確認した後、裏面剥離限界となる条件について剥離片形成のプロセスを示した上で最終的な剥離片の形状を概ね再現できることを確認した。さらに、裏面剥離限界状態における強度、拘束条件、摩擦係数について感度解析を実施し、各パラメータが剥離片の形状や剥離発生の有無に及ぼす影響について検討した。

**キーワード:** 衝突, 数値解析, 裏面剥離, コンクリート, RHT モデル

## 1. はじめに

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所における重大事故を受け、日本では実用発電用原子炉に係る新規制基準が施行された<sup>1)</sup>。新規制基準には原子力発電所が想定すべき脅威として竜巻による飛来物、テロリズムによる航空機衝突等が示されており、飛翔体の衝突を受けるコンクリート構造物に係る安全性評価の重要性はさらに増している。

衝撃的作用を受けるコンクリート構造に生じる局部破壊の形態は概ね「表面破壊」、「裏面剥離」、「貫通」に分類される<sup>2),3)</sup>。このうち、裏面剥離や貫通は構造物に対する影響が大きいためその評価が特に重要となる。国内では別府らが実験を通してコンクリートの局部破壊に関する研究を進めているが<sup>4),5),6)</sup>、裏面剥離が生じる破壊メカニズムについてはまだ十分に明らかにされていない。また、板厚18cmのブレンコンクリート板に対して速度約41m/sで剛飛翔体を衝突させる試験において、わずか2m/s程度の衝突速度の増加で裏面剥離が生じた事例を報告しており<sup>6)</sup>、これは裏面剥離限界の評価が容易でないことも示している。

局部破壊の評価手法としては実験の他に実験式や数値解析によるものがある。実験式についてはこれまで数多くのものが提案されているが、入力条件を同じとしても式により評価値は異なる。その原因として、実験式を作成する際に設ける仮定が実現象と異なる場合があることや参照している実験結果のばらつき等が考えられているが<sup>3)</sup>、式に含まれないパラメータの影響について議論されることは少ない。例えば、摩擦力や拘束条件の違いは対象物に対して荷重として影響を及ぼすと考えられるが、実験式に考慮することは難しい。

他方、数値解析については解析結果に対する信頼性向上に向けた取り組みが以前から行われている。例えば、日本計算工学会では工学シミュレーションの品質向上を目的として対象物の形状・寸法、境界・荷重条件、材料物性等の不確かさ(ばらつき)による影響評価を行う考え方を示している<sup>7),8)</sup>。これらのうち、特にコンクリート強度については養生条件の他、コア供試体の寸法や採取位置によりばらつきが生じうる等の報告もあるため<sup>9)</sup>、局部破壊の評価においても設定強度を一定値とせず限界状態近傍における感度を確認することが重要である。

本研究では、コンクリート構造に生じる裏面剥離の評価技術向上に資することを目的として、過去に行われたブレンコンクリート板に対する衝突試験を対象にした数値解析的検討を実施した。まず、表面破壊となる条件について基本的な時刻歴応答を再現できることを確認した後、裏面剥離限界となる条件について再現解析を実施し、解析結果より破壊発生プロセスを示すとともに試験における剥離片の形状を概ね再現できることを確認した。次に、裏面剥離限界状態に対して影響を及ぼし得るパラメータの一例として、コンクリートの引張強度、拘束条件、摩擦係数に関してそれらの条件が剥離片の形成やその挙動に与える影響について検討を行った。解析には汎用解析コードのLS-DYNAを用いた。コンクリートに対してはRHTモデルを適用した。

## 2. 対象とした試験

別府らは竜巻飛来物を想定した構造物の耐衝撃設計法の確立に向け、ブレンコンクリート板に対して速度数十m/sで剛飛翔体を衝突させる試験を実施し、表面破壊から裏面剥離限界に至る板の破壊モードの遷移について

\*1 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム本部 (正会員)

\*2 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム本部

\*3 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム本部 博(工)

\*4 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 博(工) (正会員)

議論している<sup>5)</sup>。試験装置の概略を図-1に示す。コンクリート板は一辺が1180mm、厚さが180mmであり、高圧空気式飛翔体発射装置により約10m/s~40m/sで鋼製飛翔体を射出、衝突させるものである。本研究では、一連の実験のうち表面破壊となった速度33m/sのケースと、裏面剥離限界となった速度38m/sのケースを対象とした検討を実施した。

### 3. 解析モデルおよび条件

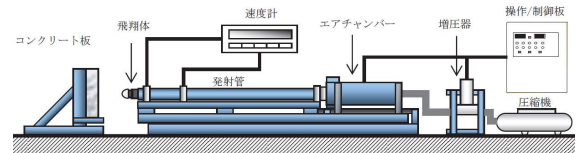
#### 3.1 解析モデル

図-2に解析モデルを示す。コンクリート板にはソリッド要素を適用した。板には破片化防止用の補強用鉄筋D22が4本配されているため、解析モデルではこれを梁要素で模擬した。鋼製飛翔体は先端がφ80mmの半球であり、飛翔体全体の質量は8.3kgである。飛翔体についてはソリッド要素を適用した。また、板裏面側にはロードセルを模した鋼製の支持具をソリッド要素でモデル化して配置した。支持具の底面を空間に固定しており、板は支持具との接触を介して拘束を受けている。すべての部材について平均的な要素サイズは5mmである。試験体の対称性を考慮し1/4体系による解析モデルとした。解析における時間増分はCFL条件を満たすようプログラムにより自動設定され、概ね $2.5 \times 10^{-4}$ msであった。

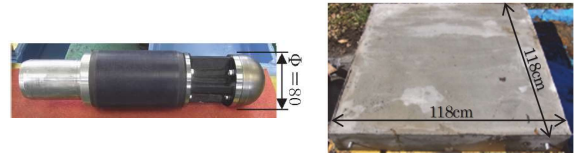
表-1, 2に材料物性を示す。予備検討の結果、先端を含む飛翔体全体、支持具、および鉄筋の応答としては弾性変形範囲内であることがわかったため、最終的にこれらは線形弾性体としてモデル化した。コンクリートモデルの詳細は次章で述べる。

#### 3.2 検討条件

はじめに、時刻歴データが計測された衝突速度33.0m/sの条件による解析(ケースA)を実施し、基本的な時刻歴応答を確認した。次に、衝突速度を37.9m/sとした解析(ケースB)を実施し、試験において裏面剥離限界となった破壊性状が再現できることを確認した。その後、衝突速度37.9m/sの場合について感度解析を実施した。表-3に条件一覧を示す。解析ケースB-ftではコンクリート強度が裏面剥離限界状態へ与える影響を解析的に確認した。試験では板内部を横断する斜めひび割れにより剥離片となり得る領域(以降、単に「剥離片」)が形成されたが、後述するケースBの解析結果においては最大主応力の発生に応じて試験と同様の破壊が生じたことから、引張強度 $f_t$ をパラメータとし、 $\pm 20\%$ の範囲で変化させた。解析ケースB-bcでは、板の拘束条件が裏面剥離限界に与える影響を確認するため、支持具を削除した上で板の周囲4端面の3並進変位を拘束(以降、「単純拘束」)したモデルによる解析を実施した。ケースB-fricでは、鋼材(飛翔体、支持具)とコンクリート板の接触における摩擦力の影響



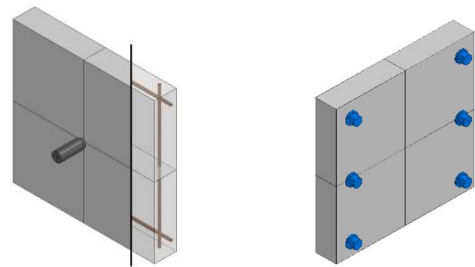
(a) 高圧空気式飛翔体発射装置



(b) 鋼製飛翔体

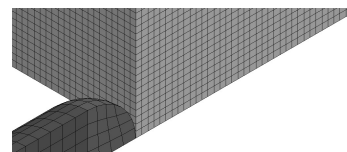
(c) コンクリート板

図-1 本研究で対象とした別府らの試験<sup>5)</sup>



(a) 表面側

(b) 裏面側



(c) 衝突位置近傍の計算要素

図-2 解析モデル

表-1 コンクリートの基本物性

密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ヤング率 (MPa)	ポアソン比 (-)	$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	骨材サイズ (mm)
2,310	24,260	0.2	29.4	2.19	20

表-2 鋼材と鉄筋の基本物性

密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ヤング率 (MPa)	ポアソン比(-)
7,850	200,000	0.3

を確認するため、摩擦係数をパラメータとした解析を実施した。既往の研究によれば鋼材とコンクリートの間の動摩擦係数は0.3~0.5との報告があるため<sup>5)</sup>、これに基づいて摩擦係数を変化させた。ここで、静止摩擦に関する情報がないため、静止摩擦係数は動摩擦係数と同じ値とした。なお、基本ケースA, Bにおいて摩擦は考慮していない。

### 4. コンクリートモデル

本研究では、コンクリートに対して RHT (Riedel-

Hiermaier-Thoma) モデルを適用した<sup>10),11)</sup>。RHT モデルでは、非線形状態方程式、降伏応力の圧力依存性、およびひずみ速度に応じた動的強度が考慮される。また、Lode 角の効果が考慮される。降伏関数は式(1)~(3)で表わされ、コンクリートの損傷は式(4)、式(5)に示すとおり塑性ひずみとともに増大するダメージ変数  $D$  により評価される。

$$F(p, \sigma_{eq}, \theta, \dot{\epsilon}_p) = \sigma_{eq} - \sigma_f(p, \theta, \dot{\epsilon}_p) \quad (1)$$

$$\sigma_f(p, \theta, \dot{\epsilon}_p) = f'_c \sigma_f^* (p^*, F_R(\dot{\epsilon}_p, p^*)) R_3(\theta, p^*) \quad (2)$$

$$\sigma_f^* = \begin{cases} A \left( p^* - \frac{F_R}{3} + \left( \frac{A}{F_R} \right)^{-1/n} \right)^n & 3p^* \geq F_R \\ \frac{F_R f'_s}{Q_1} + 3p^* \left( 1 - \frac{f'_s}{Q_1} \right) & F_R > 3p^* \geq 0 \\ \frac{F_R f'_s}{Q_1} - 3p^* \left( \frac{1}{Q_2} - \frac{f'_s}{Q_1 f'_t} \right) & 0 > 3p^* \geq 3p_t^* \\ 0 & 3p_t^* > 3p^* \end{cases} \quad (3)$$

$$0 \leq D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^f} \leq 1 \quad (4)$$

$$\epsilon_p^f = \max(D_1(p^* - (1-D)p_t^*)^{D_2}, \epsilon_p^m) \quad (5)$$

ここで、式中の各変数は以下のとおりである。

- $F$  : 降伏関数
- $F_R$  : ひずみ速度の効果を表す関数
- $R_3$  : Lode 角の効果を表す関数
- $f'_c, f'_t$  : 一軸圧縮強度, 一軸引張強度
- $f'_s$  : せん断強度
- $\sigma_{eq}, \sigma_f$  : ミーゼス応力, 降伏応力
- $p, I_1$  : 静水圧, 応力テンソルの 1 次不変量
- $J_2$  : 偏差応力テンソルの 2 次不変量
- $\theta$  : Lode 角
- $\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p$  : 塑性ひずみ, 塑性ひずみ速度
- $\epsilon_p^f, \epsilon_p^m$  : 限界ひずみとその下限値
- $A, n, D_1, D_2$  : モデル固有の定数

また、式中、上付きの“\*”はコンクリートの圧縮強度で正規化された変数を意味する。

RHT モデルでは、CEB-FIP コード<sup>12)</sup>に基づいて式(6a)~(6c)によりひずみ速度に応じた動的強度倍率 (Dynamic Increase Factor : DIF) が考慮される。

$$f'_{c,t} / f_{c,t} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0^{c,t})^{\beta_c}, \dot{\epsilon}_p \leq \dot{\epsilon}_p^{c,t} \\ \xi_{c,t} \sqrt[3]{\dot{\epsilon}_p}, \dot{\epsilon}_p > \dot{\epsilon}_p^{c,t} \end{cases} \quad (6a)$$

$$\beta_c = \frac{1}{5 + (3/4)f'_c}, \beta_t = \frac{1}{10 + (1/2)f'_t} \quad (6b)$$

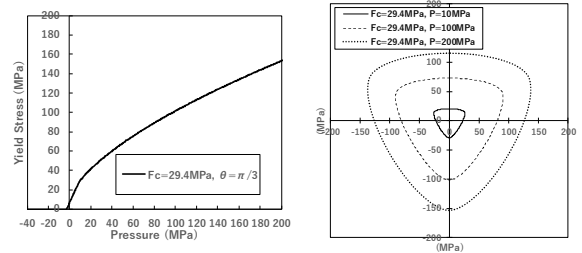
$$\log \xi_c = 6\beta_c - 0.492, \log \xi_t = 7\beta_t - 0.492 \quad (6c)$$

ここで、CEB-FIP コードでは  $\dot{\epsilon}_p^{c,t} = 30(1/s)$  であるが、LS-DYNA の RHT モデルでは特に指定しない場合  $\dot{\epsilon}_p^{c,t}$  に非常に大きな値が設定され、高ひずみ速度領域においても DIF 曲線が滑らかに上昇する。本研究では  $\dot{\epsilon}_p^{c,t}$  を指定していない条件によりすべての解析を実施した。

図-3 に最大降伏面、図-4 にひずみ速度に応じた DIF、図-5 に一軸載荷条件下における応力-ひずみ関係をそれぞれ示す。

表-3 解析条件一覧

ケース	衝突速度(m/s)	パラメータ	値
A	33.0	—	—
B	37.9	—	—
B-ft	37.9	引張強度 $f_t$	$0.8f_t \sim 1.2f_t$
B-bc	37.9	拘束条件	単純拘束
B-fric	37.9	摩擦	摩擦係数 0.3~0.5



(a) 子午平面 (b) 偏差平面

図-3 最大降伏面

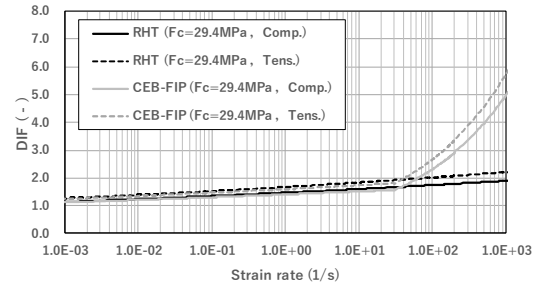


図-4 動的強度倍率

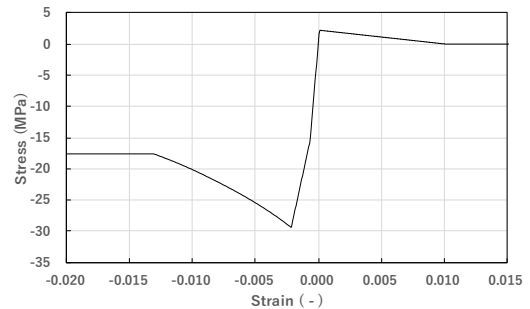
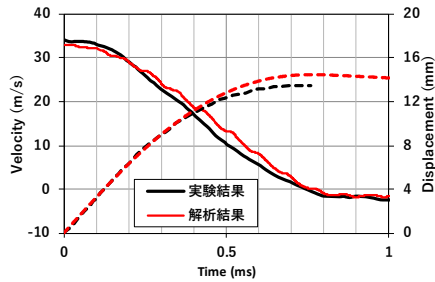
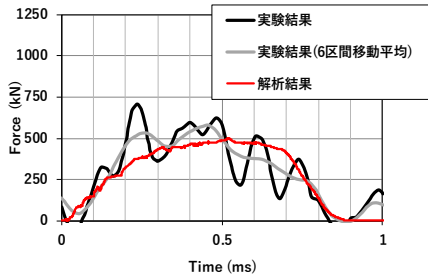


図-5 応力-ひずみ関係 ( $f'_c = 29.4\text{MPa}$ )



(a) 飛翔体の速度時刻歴



(b) 衝突荷重の時刻歴

図-6 時刻歴応答の比較

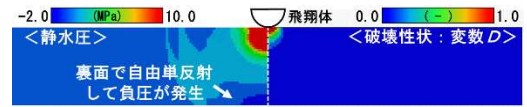
## 5. 解析結果

### 5.1 衝突速度 33m/s, 表面破壊(ケース A)

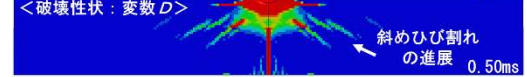
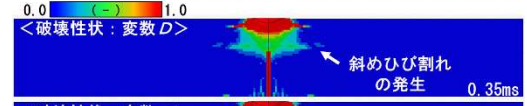
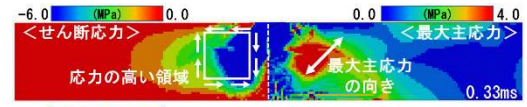
衝突速度が 33.0m/s のケースでは、試験において「表面破壊(裏面垂直・水平方向に微小なひび割れ)」であった。図-6 に飛翔体の速度・変位時刻歴、および衝突荷重の時刻歴の比較を示す。裏面剥離限界に至る直前の速度条件において、試験の時刻歴応答が再現できることを確認した。

### 5.2 衝突速度 37.9m/s, 裏面剥離限界(ケース B)

図-7 に板断面における破壊発生のプロセスを示す。破壊性状を示す図において赤く塗られた領域は式(4)で示したダメージ変数  $D$  が 1 に達し、完全に破壊したことを示している。(a)は飛翔体衝突後 0.1ms における静水圧と破壊性状である。図より、飛翔体の衝突により発生した圧縮波が板の裏面側に達して自由端反射することで負圧を生じたが、この時点で裏面側において破壊は生じていない。(b)は 0.3ms 以降について示した図であるが、板の変形に伴いせん断強度(5.3MPa)以上のせん断応力が生じ、それに応じて最大主応力が引張強度の 2 倍近い値となった。ここで、静的強度以上の応力が生じるのはひずみ速度効果を考慮しているためであり、衝突位置近傍では瞬間的に最大で  $10^3\text{s}^{-1}$  程度のひずみ速度が生じた。その直後、最大主応力と垂直な方向に斜めひび割れが発生して板内に進展した。従って、本研究で対象としている条件においては衝突直後の応力波の伝播ではなく、せん断破壊の進展により裏面剥離を生じることがわかる。故に、ケース B-bc で述べるように破壊性状は拘束条件の影響をより受けやすくなる。中央付近に縦に伸びる曲げひび割れが認められるが、対称条件を設定したことで生じ

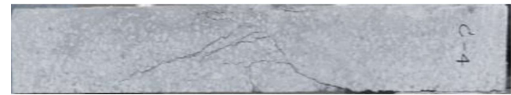


(a) 0.1ms における板断面の状態

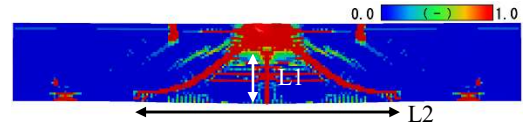


(b) 斜めひび割れの進展(0.3ms 以降)

図-7 破壊発生のプロセス



(a) 試験結果



(b) 解析結果(ダメージ変数  $D$ )

図-8 板断面の破壊性状

表-4 裏面剥離片形状の比較

項目	試験 (mm)	解析 (mm)
裏面剥離深さ(図-8 中の L1)	120	122
裏面剥離直径(図-8 中の L2)	556	661

やすくなっていると考えられる。

図-8 は最終的な破壊性状である。本研究ではこの破壊性状図により剥離片の大きさを評価した。表-4 は裏面剥離片の形状を試験と比較したものである。試験に対して L2 の値が 2 割程度大きいのが、概ね形状を再現できている。限界状態の判定については、板に生じる斜めひび割れが裏面付近に到達した上で剥離片の衝突方向変位が収束すれば裏面剥離限界、変位が増加し続ければ裏面剥離とした。ケース B では剥離片の変位が最終的に収束したため、解析結果としては裏面剥離限界である。

### 5.3 強度に関する検討(ケース B-ft)

引張強度をパラメータとした解析の結果について述べる。図-9 は板断面における衝突方向の変位コンター上にダメージ変数が 1 になった領域の外枠を白線により表示したものである。引張強度の大きさに応じた傾向が得られており、 $0.8f_t$  とした場合は剥離片全体の変位量が 10mm を超え裏面中央において約 15mm となったのに対



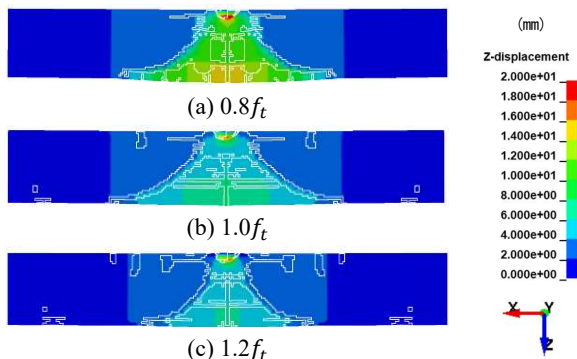


図-9 板断面の変位コンター図(B-ft)

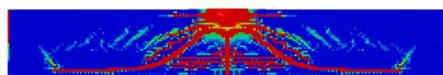


図-10 板断面の破壊性状(B-bc)

して、 $1.2f_t$ とした場合は剥離片全体の変位量が 10mm 以下に低下した。ただし、いずれの条件においても裏面剥離限界であった。

#### 5.4 拘束条件に関する検討(ケース B-bc)

拘束条件に関する検討ケース B-bc について、図-10 に板断面における破壊性状図を示す。端面を拘束することで板全体に広がる破壊モードとなり、衝突位置から斜めに生じるせん断破壊が板全体に進展した。その結果、裏面剥離直径は 955mm となり試験に対して 2 倍近い値となった。一方、板裏面中央における局所的な応答が抑制され、裏面中央の変位としてはケース B の 1/2 程度となった。最終的にケース B-bc の条件についても変位が収束したため裏面剥離限界であるが、剥離片直径の増大は飛散片質量の増加や部材の残存強度低下につながるため、ケース B-bc については構造強度に与える影響が低減するとは言えない。

#### 5.5 摩擦に関する検討(ケース B-fric)

摩擦に関する検討ケースについて図-11 に飛翔体の衝突荷重と支持具による反力の時刻歴を示す。図-12 には板断面における衝突方向の変位コンター図を示す。摩擦を考慮することで、鋼材(飛翔体、支持具)とコンクリート板の間の接触力が大きくなった。また、図-9(b)に示したケース B の変位コンター図と比較すると、摩擦を考慮することで剥離片の変位が増大したことがわかる。いずれの条件も時刻 1.0ms までに衝突荷重が生じた後に支点反力が生じ始めており、また剥離片が概ね時刻 1.0ms までに形成されることから、ケース B に比して剥離片の変位が大きくなった主な要因としては摩擦により飛翔体の衝突荷重が増加したことが考えられる。ここで、裏面中央付近の変位が最も大きくなったのは摩擦係数 0.4 の場合であるが、荷重時刻歴に着目すると時刻 1.3ms ~ 2.0ms にかけて衝突荷重と支点反力が同時に生じてい

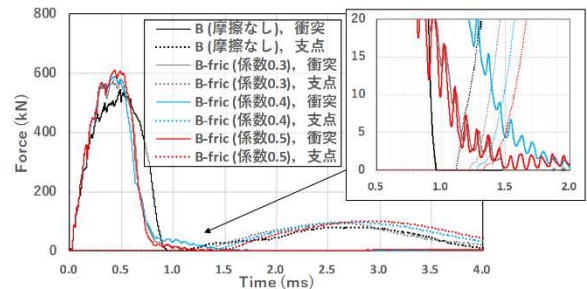


図-11 衝突荷重と支点反力の時刻歴

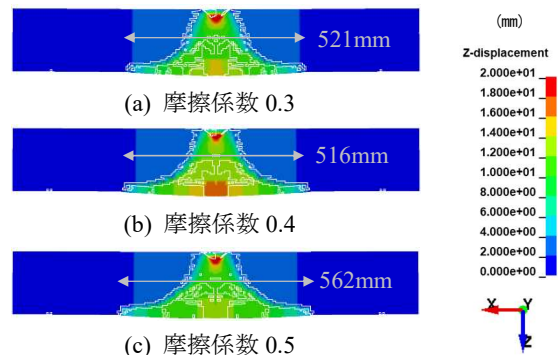


図-12 板断面の変位コンター図(B-fric)

る時間があり、局所的な変形と全体的な変形が複合的に生じたことで変位が大きくなったと考えられる。これに対して、摩擦係数 0.5 の場合は 0.4 よりも中央の変位が 2 割以上低下するが、剥離片の直径が約 1.1 倍となった。剥離片周辺における変位の増加と範囲の拡大の関係性については今後より詳細に検討する必要があるが、摩擦係数の増大は裏面剥離を生じやすくなる傾向を示している。

#### 5.6 複合的な条件による検討

以上、引張強度、拘束条件、摩擦係数による影響について検討したが、ここでは各検討項目の中で剥離片が飛散方向にもっとも変位した条件を複合して解析を行った。すなわち、引張強度を  $0.8f_t$ 、摩擦係数を 0.4 とした条件である。摩擦係数を 0.5 とした条件では 0.4 に対して裏面剥離直径が増大したものの変位量としては低下したため採用していない。これに対して拘束条件については、支持具によるモデルで明らかに剥離片の変位が大きかったが、単純拘束モデルにおいて裏面剥離の直径が顕著に増大したため、2つの条件について解析した。

図-13 に板の破壊性状図と裏面中央における変位の時刻歴を示す。比較のため、ケース B および B-bc の結果も併記した。支持具による拘束を設定した条件では強度と摩擦係数を変更することで裏面中央の変位は単調増加傾向となり裏面剥離となった。一方、単純拘束とする条件では最終的に剥離片は飛散に至らないものの、最大変位が 3.3mm から 15.5mm に増大した。裏面剥離限界近傍の応答変化が極めて敏感な反応であることがわかる。

以上より、引張強度、拘束条件、摩擦係数は設定によ

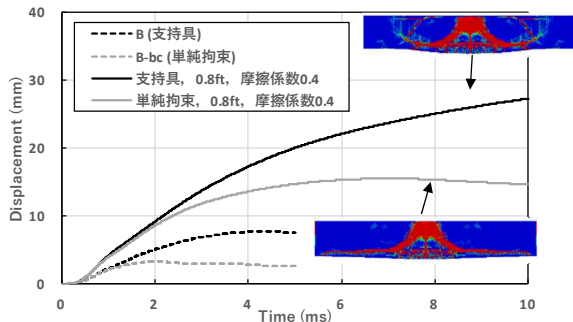


図-13 複合的な条件による解析結果

り裏面剥離発生の有無や、剥離片形状に差異を生じ得る重要なパラメータであること、すなわち設定条件のばらつきによる影響を確認することの重要性を示した。ただし、現状は1つの試験のみを対象としているため、今後さらに多くの事例について検討する必要がある。

## 6. まとめ

本研究では、過去に行われた衝突試験を対象にした数値解析を実施し、プレーンコンクリート板の裏面剥離限界における設定条件の影響について検討した。本研究で得られた成果を以下に記す。

- (1) 衝突速度 33m/s の表面破壊となる条件について解析を実施し、裏面剥離に至る直前の速度水準において試験の時刻歴応答を再現できることを確認した。
- (2) 同様に、衝突速度 37.9m/s の裏面剥離限界となる条件について解析を実施し、剥離片形成のプロセスについて述べた。また、裏面側における剥離片の形状を概ね再現できることを確認した。
- (3) 裏面剥離限界となる条件において、解析における設定条件が結果に与える影響について検討した。
  - A) 引張強度をパラメータとした解析を行い、強度がより小さい条件で剥離片の変位が大きくなることを示した。
  - B) 拘束条件について板端面を単純拘束する条件で解析を実施し、剥離片が形成される領域が大幅に拡大することを示した。
  - C) 鋼材(飛翔体、支持具)とコンクリート板との間に考慮する摩擦係数をパラメータとした解析を実施し、摩擦係数に増大に伴い剥離片の変位や直径が大きくなることを示した。
- (4) 最終的に、引張強度を 0.8 倍、摩擦係数を 0.4 とする条件を組み合わせて解析を実施したところ、支持具モデルでは裏面剥離限界となる条件で裏面剥離となった。単純拘束モデルでは裏面剥離に至らないまでも、裏面側中央の変位が大きく増大した。このことから、本研究で感度とした条件が裏面剥離限界

の評価において大きな影響を及ぼし得る重要なパラメータであることを示した。

## 謝辞

本研究では、伊藤忠テクノソリューションズ(株)で長年にわたり衝撃解析に従事された伊東雅晴博士に多大なるご指導、ご助言を賜りました。また、防衛大学の片岡新之介氏には実験に関する情報を快く提供していただきました。ここに記して感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 原子力規制委員会：実用発電用原子炉に係る新規性基準について—概要—，2016年更新
- 2) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，1993.
- 3) 防衛施設学会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—，2018.
- 4) 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，Vol. 63, No.1, pp.178-191, 2007.
- 5) 別府万寿博，上野裕稔：剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート板の損傷に関する基礎的考察，防衛大学校理工学研究報告，第 52 巻，第 2 号 別刷，平成 27 年.
- 6) 片岡新之介，上野裕稔，別府万寿博，市野宏嘉：剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 62A, 2016.
- 7) 日本計算工学会：学会標準(HQC001&002)事例集，JSCES S-HQC003:2015, 2015.
- 8) 日本計算工学会：工学シミュレーションの品質マネジメント，JSCES S-HQC001:2017, 2017.
- 9) 宮田敦典，中田善久，大塚修三，木村友哉：模擬床部材から採取したコア供試体の寸法及び採取位置が圧縮強度とそのばらつきに及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38, No. 1, 2016.
- 10) Riedel, W. Kawai, N., Kondo, K.: Numerical assessment for impact strength measurement in concrete materials, *International Journal of Impact Engineering*, **36**, pp.283-293, 2009.
- 11) Grunwald, C. et al. : A general concrete model in hydrocodes: Verification and validation of the Riedel-Hiermaier-Thoma model in LS-DYNA, *International Journal of Protective Structures*, **8(1)**, pp. 58-85, 2017.
- 12) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990, 1991.