

## 設計竜巻及び設計飛来物に対する健全性

## 1. 目的

高放射性廃液貯蔵場(HAW)及びガラス固化技術開発施設(TVF)ガラス固化技術開発棟の外壁及び屋上スラブに対し、設計竜巻及び設計飛来物による影響の評価を実施し、竜巻発生時の施設の健全性を確認する。

## 2. 評価方法

## 2.1 解析コードおよび解析モデル

衝撃解析ソフトウェア ANSYS AUTODYN により、以下に示す評価対象施設と竜巻飛来物との衝突によって生じる現象を解析し、貫通、裏面剥離、変形などの損傷状態を評価した。解析モデルは3次元体系とした。

## 2.1.1 R C壁に対する衝突解析

- (1) 評価対象施設：HAW 施設、TVF 開発棟
- (2) 評価対象部位：R C 壁（外壁）、R C 壁（屋上スラブ）
- (3) 竜巻飛来物：鋼製材

## 2.2 解析ケース

解析ケースの一覧を表 2.1 に示す。

表 2.1 解析ケース一覧

ケース No.	評価対象		竜巻飛来物	
	部位	対象施設	種類	衝突速度 (m/s)
1	R C 壁 (外壁)	HAW 施設	鋼製材 (135 kg)	51 (水平)
2		TVF 開発棟		
3	R C 壁 (屋上スラブ)	HAW 施設		34 (鉛直)
4		TVF 開発棟		

### 2.3 解析モデル

本業務で対象とする竜巻飛来物は外形 4200 mm × 300 mm × 200 mm の角形鋼管である。飛来物の形状を図 2.1 に示す。

全ての解析ケースで飛来物は 300 mm × 200 mm の面で対象施設に衝突するものとする。飛来物の質量は 135 kg であり、材質は鋼製材 SS400 である。飛来物の板厚は形状、質量、密度から算出し、4.17 mm とした。

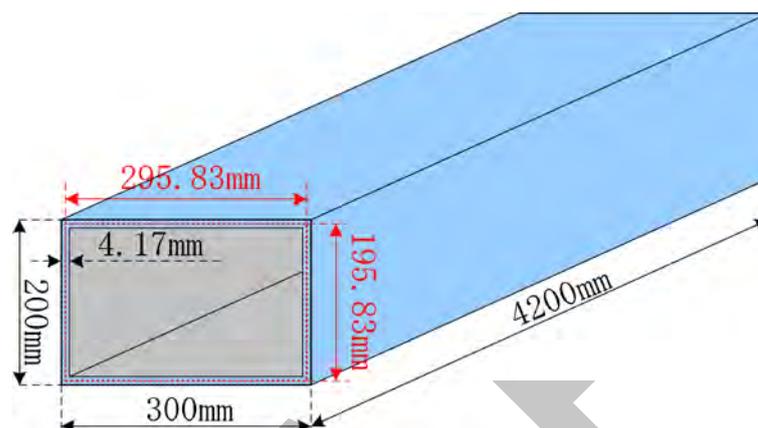


図 2.1 竜巻飛来物の形状

表 2.2 竜巻飛来物の諸元

項目	値
質量	135 kg
形状	角形鋼管 長さ×幅×高さ:4200 × 300 × 200 mm
板厚	4.17 mm ※形状(体積)、質量、密度から算出
材質	SS400
衝突方向	300 mm × 200 mm の面で衝突

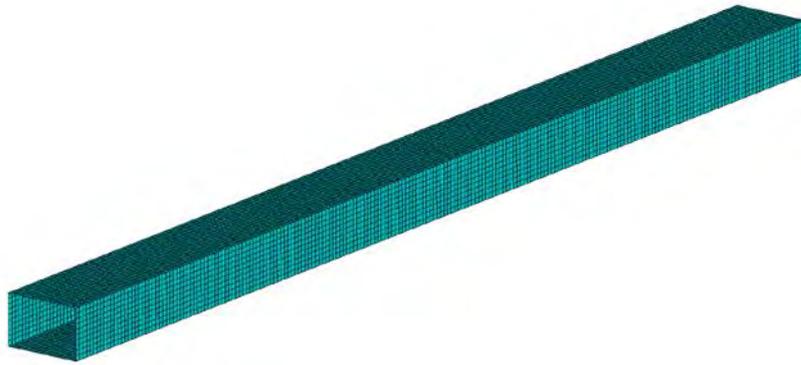


図 2.2 竜巻飛来物の要素分割図

#### 2.4 材料モデル

竜巻飛来物の材料は SS400 である。飛来物の物性値を表 2.3 および表 2.4 に示す。保守的評価の観点から破壊条件を設定せず、表 2.4 中の最大の相当塑性ひずみ 33.5 %を超えた場合でも応力は 590 MPa を保つものとした。

表 2.3 竜巻飛来物 (SS400) の物性値

項目		値	出典など
密度	kg/m <sup>3</sup>	7850	文献[1]
構成則		弾－線形硬化塑性	
ヤング率	GPa	205	文献[1]
ポアソン比	—	0.3	
体積弾性率	GPa	171	ヤング率・ポアソン比から算出
せん断弾性係数	GPa	78.8	
降伏応力	MPa	247	文献[2]
応力 - ひずみ関係	—	表 2.4	
破壊則		なし	

表 2.4 竜巻飛来物の応力－ひずみ関係 (文献[2])

相当塑性ひずみ (%)	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	33.5	↓
降伏応力 (MPa)	248	289	348	392	425	452	472	490	501	590	590

### 3. RC壁（外壁、HAW施設、ケース1）に対する衝突解析

#### 3.1 評価条件

##### (1)解析モデル

RC壁（外壁、HAW施設、ケース1）の諸元を表3.1に、概要図を図3.1に示す。竜巻飛来物である鋼製材は外壁の中央に垂直に衝突するものとした。外壁の周囲4面は境界条件によって固定した。

外壁は鉄筋コンクリートと押えコンクリートで構成されている。鉄筋コンクリートについては、コンクリートを6面体ソリッド要素、鉄筋をビーム要素でモデル化した。押えコンクリートは6面体ソリッド要素でモデル化した。

表 3.1 RC壁（外壁、HAW施設、ケース1）の諸元

項目		値
形状		5270 × 36650 × 325 mm
押えコンクリート	材料	普通コンクリート
	厚さ	25 mm
	密度	2400 kg/m <sup>3</sup>
	設計基準強度	210 kg/cm <sup>2</sup>
鉄筋コンクリート	材料	普通コンクリート
	厚さ	300 mm
	密度	2400 kg/m <sup>3</sup>
	設計基準強度	210 kg/cm <sup>2</sup>
鉄筋	材料	SD30（SD295Aで代用）
	配筋	D16@200（短辺方向、長辺方向）
	かぶり	30 mm

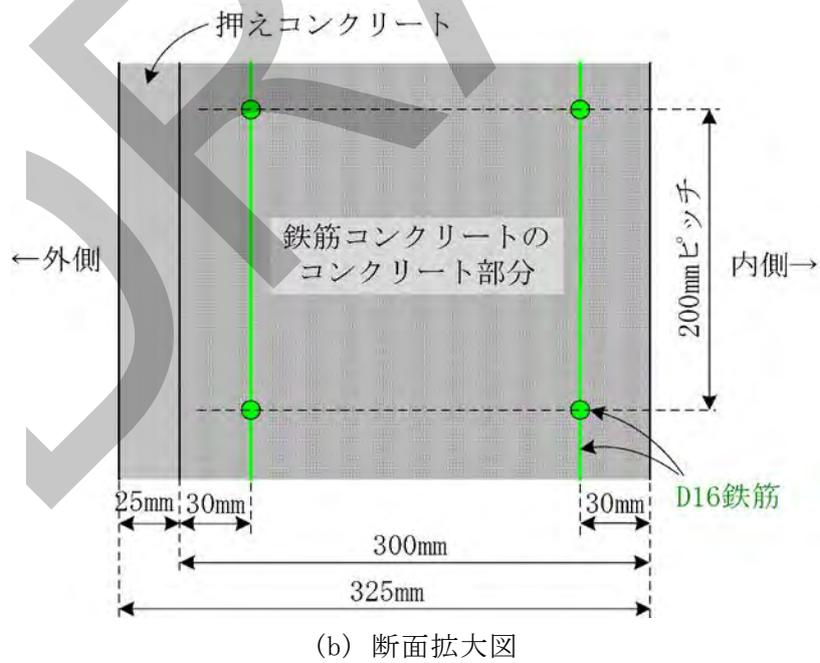
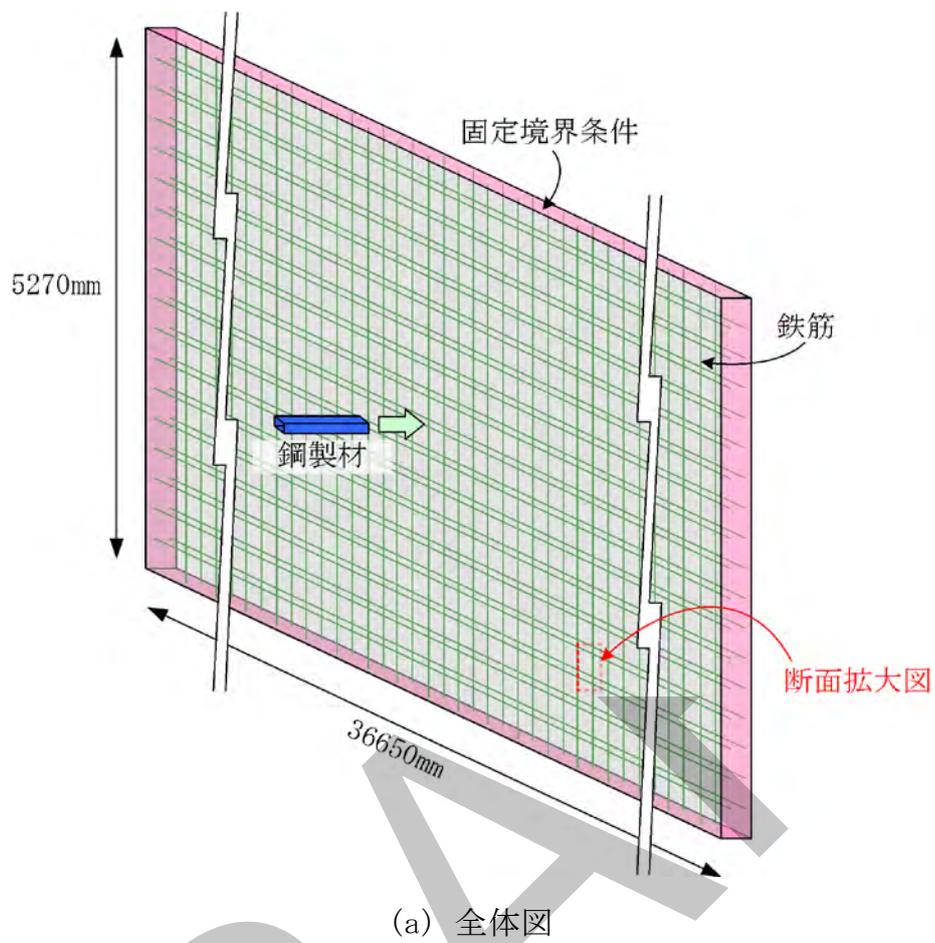


図 3.1 RC壁（外壁、HAW 施設、ケース 1）の概要図

## (2) 材料モデル

### 1) コンクリート

鉄筋コンクリートのコンクリート部分および押えコンクリートの物性値を表 3.2 に示す。なお、鉄筋コンクリートのコンクリート部分の密度については、図 3.2 に示すように、鉄筋 1 ピッチ分の鉄筋コンクリート中のコンクリート部分と鉄筋部分の重量比から、表 3.3 のように算出した。

表 3.2 コンクリートの物性値

項目		値		出典など
		鉄筋コンクリート	押えコンクリート	
密度	kg/m <sup>3</sup>	2330 <sup>(※)</sup>	2400	
状態方程式 構成則 破壊則		CAPROUS モデル		文献[3]
ヤング率	GPa	21.5		文献[5]
ポアソン比	—	0.2		文献[5]
せん断弾性係数	GPa	8.96		ヤング率・ポアソン比から算出
設計基準強度 (圧縮強度)	MPa	20.6		
引張強度	MPa	1.73		文献[6]

(※) 鉄筋コンクリート全体の密度と、コンクリートと鉄筋の重量比から算出。図 3.2 および表 3.3 参照

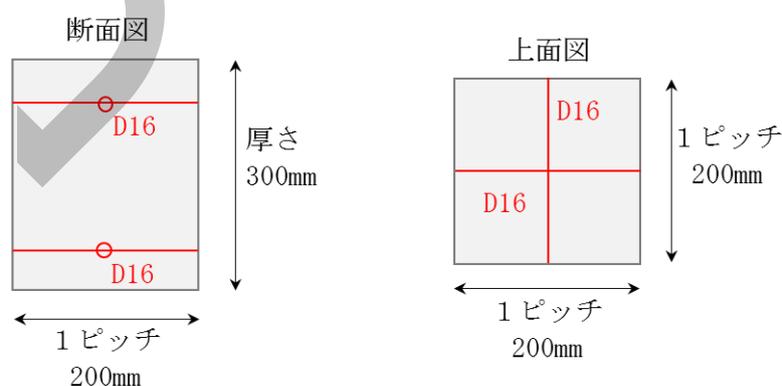


図 3.2 コンクリートの密度算出に関する概要図（鉄筋 1 ピッチ分）

表 3.3 鉄筋コンクリートのコンクリート部分の密度算出

項目		単位	値	出典など
鉄筋コンクリート	寸法	mm	200×200×300	図 3.2
	体積 ( $V_{rc}$ )	mm <sup>3</sup>	$1.20 \times 10^7$	
	密度 ( $\rho_{rc}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2400	
鉄筋	長さ (L)	mm	200	図 3.2
	呼び名	-	D16	
	公称直径 (d)	mm	15.9	JIS 規格値 <sup>[4]</sup>
	本数 (N)	本	4	図 3.2
	体積 ( $V_r$ )	mm <sup>3</sup>	$1.59 \times 10^5$	$= (d/2)^2 \pi L \times N$
	密度 ( $\rho_r$ )	kg/m <sup>3</sup>	7850	文献[1]
コンクリート	体積 ( $V_c$ )	mm <sup>3</sup>	$1.18 \times 10^7$	$= V_{rc} - V_r$
	密度 ( $\rho_c$ )	kg/m <sup>3</sup>	2330	(※)

(※) 鉄筋コンクリートの総重量をMとすると、 $M = \rho_{rc} V_{rc} = \rho_c V_c + \rho_r V_r$ より

$$\rho_c = (\rho_{rc} V_{rc} - \rho_r V_r) / V_c$$

## 2) 鉄筋

鉄筋 SD295A の物性値を表 3.4 に示す。

表 3.4 鉄筋 (SD295A) の物性値

項目		値	出典など
密度	kg/m <sup>3</sup>	7850	文献[1]
構成則		弾－線形硬化塑性	
ヤング率	GPa	205	文献[1]
ポアソン比	-	0.3	
体積弾性率	GPa	171	ヤング率、ポアソン比から算出
せん断弾性係数	GPa	78.8	
降伏応力	MPa	295	JIS 規格値 <sup>[4]</sup> の耐力の最小値
耐力	MPa	510	JIS 規格値 <sup>[4]</sup> の引張強さの最小値 440MPa を伸び 16%として真値
破壊則		破断ひずみ	
破断ひずみ(伸び)	%	14.8	JIS 規格値 <sup>[4]</sup> の伸びの最小値 16% を真値に変換

### 3.2 解析結果

飛来物が時刻 9 ms で反跳し、エネルギー収支時刻歴および鉄筋の塑性ひずみエネルギー時刻歴ともに時刻 15 ms 以降はほぼ変動がなかったことから、現象は収束し、有意な変形挙動はこれ以上生じないものと考えられる。

裏面の中央部では最大 5.7 mm 程度の変位が生じた。しかし、変位はそれ以上増加せず、弾性振動を繰り返していることから、裏面剥離は生じないものと判断できる。

コンクリートには衝突面から裏面にかけて十字状に亀裂が生じたが、貫通には至らなかった。

コンクリートの速度ベクトル図から、すべての計算要素の変位は弾性振動しており、計算完了時まで、常に飛散方向の速度を持つ計算要素は存在しないことが確認された。

鉄筋に生じた最大相当塑性ひずみは、衝突面側が 0.0997 %、裏面側が 0.544 % であり、破断ひずみ 14.8 % に比べて十分小さく、破断には至らなかった。

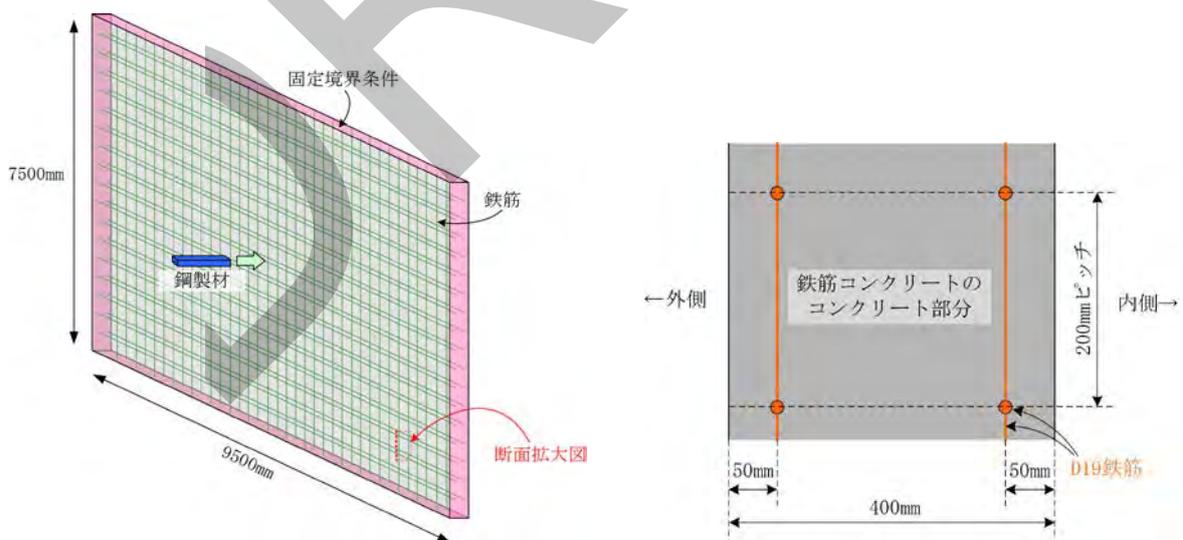
## 4. RC壁（外壁、TVF 開発棟、ケース 2）に対する衝突解析

### 4.1 評価条件

#### (1) 解析モデル

RC壁（外壁、TVF 開発棟、ケース 2）の概要図を図 4.1 に、外壁の諸元を表 4.1 に示す。竜巻飛来物である鋼製材は外壁の中央に垂直に衝突するものとした。外壁の周囲 4 面は境界条件によって固定した。

外壁は鉄筋コンクリート製である。コンクリートは 6 面体ソリッド要素、鉄筋はビーム要素でモデル化した。



(a) 全体図

(b) 断面拡大図

図 4.1 RC壁（外壁、TVF 開発棟、ケース 2）の概要図

表 4.1 R C 壁（外壁、TVF 開発棟、ケース 2）の諸元

項目		値
形状		7500 × 9500 × 400 mm
鉄筋コンクリート	材料	普通コンクリート
	密度	2400 kg/m <sup>3</sup>
	設計基準強度	225 kg/cm <sup>2</sup>
鉄筋	材料	SD35 (SD345 で代用)
	配筋	D19@200 （短辺方向、長辺方向）
	かぶり	50 mm

(2) 材料モデル

1) コンクリート

鉄筋コンクリートのコンクリート部分の物性値を表 4.2 に示す。なお、密度については、図 4.2 に示すように、鉄筋 1 ピッチ分の鉄筋コンクリート中のコンクリート部分と鉄筋部分の重量比から、表 4.3 のように算出した。

表 4.2 コンクリートの物性値

項目		値	出典など
密度	kg/m <sup>3</sup>	2320	鉄筋コンクリート全体の密度と、コンクリートと鉄筋の重量比から算出。図 4.2 および表 4.3 参照
状態方程式 構成則 破壊則		CAPROUS モデル	文献[3]
ヤング率	GPa	22.1	文献[5]
ポアソン比	—	0.2	文献[5]
せん断弾性係数	GPa	9.21	ヤング率・ポアソン比から算出
設計基準強度 (圧縮強度)	MPa	22.1	
引張強度	MPa	1.81	文献[6]

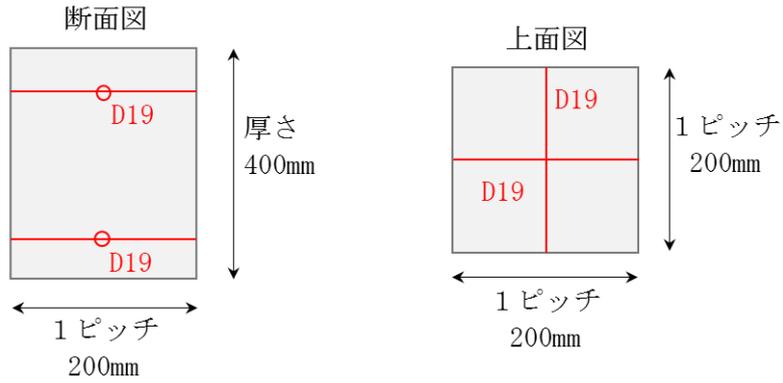


図 4.2 コンクリートの密度算出に関する概要図（鉄筋 1 ピッチ分）

表 4.3 鉄筋コンクリートのコンクリート部分の密度算出

項目		単位	値	出典など
鉄筋コンクリート	寸法	mm	200×200×400	図 4.2
	体積 ( $V_{rc}$ )	mm <sup>3</sup>	$1.60 \times 10^7$	
	密度 ( $\rho_{rc}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2400	
鉄筋	長さ (L)	mm	200	図 4.2
	呼び名	-	D19	
	公称直径 (d)	mm	19.1	JIS 規格値 <sup>[4]</sup>
	本数 (N)	本	4	図 4.2
	体積 ( $V_r$ )	mm <sup>3</sup>	$2.29 \times 10^5$	$= (d/2)^2 \pi L \times N$
	密度 ( $\rho_r$ )	kg/m <sup>3</sup>	7850	文献 [1]
コンクリート	体積 ( $V_c$ )	mm <sup>3</sup>	$1.58 \times 10^7$	$= V_{rc} - V_r$
	密度 ( $\rho_c$ )	kg/m <sup>3</sup>	2320	(※)

(※) 鉄筋コンクリートの総重量をMとすると、 $M = \rho_{rc} V_{rc} = \rho_c V_c + \rho_r V_r$  より  

$$\rho_c = (\rho_{rc} V_{rc} - \rho_r V_r) / V_c$$

## 2) 鉄筋

鉄筋 SD345 の物性値を表 4.4 に示す。

表 4.4 鉄筋(SD345)の物性値

項目		値	出典など
密度	kg/m <sup>3</sup>	7850	文献[1]
構成則		弾－線形硬化塑性	
ヤング率	GPa	205	文献[1]
ポアソン比	—	0.3	
体積弾性率	GPa	171	ヤング率、ポアソン比から算出
せん断弾性係数	GPa	78.8	
降伏応力	MPa	345	JIS 規格値 <sup>[4]</sup> の耐力の最小値
耐力	MPa	578	JIS 規格値 <sup>[4]</sup> の引張強さの最小値 490 MPa を伸び 18 %として真値に変換
破壊則		破断ひずみ	
破断ひずみ(伸び)	%	16.6	JIS 規格値 <sup>[4]</sup> の伸びの最小値 18 %を真値に変換

## 4.2 解析結果

飛来物が時刻 9 ms で反跳し、エネルギー収支時刻歴には時刻 10 ms 以降はほぼ変動がなかったことから、現象は収束し、有意な変形挙動はこれ以上生じないものと考えられる。

裏面の中央部では最大 3.7 mm 程度の変位が生じた。しかし、変位はそれ以上増加せずに、弾性振動を繰り返していることから、裏面剥離は生じないものと判断できる。

コンクリートには衝突面から裏面にかけて十字状に亀裂が生じたが、貫通には至らなかった。

コンクリートの速度ベクトル図から、すべての計算要素の変位は弾性振動しており、計算完了時まで、常に飛散方向の速度を持つ計算要素は存在しないことが確認された。

鉄筋に生じた最大相当塑性ひずみは、衝突面側および裏面側ともにゼロであり、鉄筋は塑性変形や破断には至らなかった。

## 5. RC壁（屋上スラブ、HAW施設、ケース3）に対する衝突解析

### 5.1 評価条件

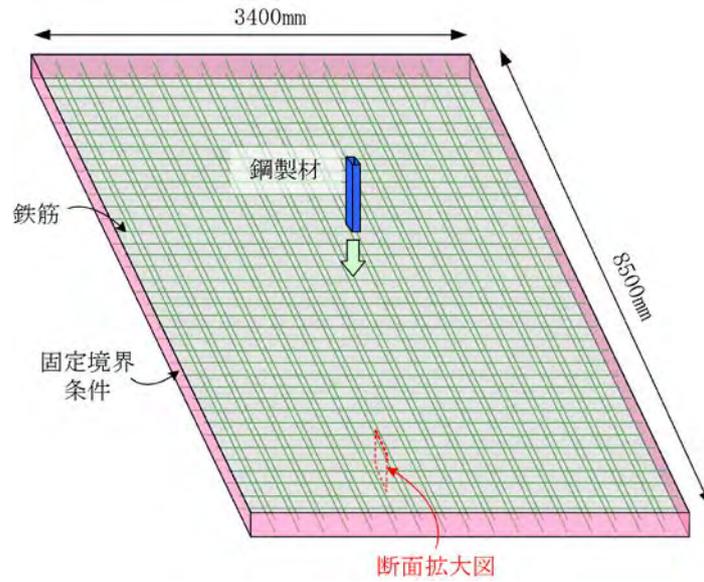
#### (1)解析モデル

RC壁（屋上スラブ、HAW施設、ケース3）の諸元を表5.1に、概要図を図5.1に示す。竜巻飛来物である鋼製材は屋上スラブの中央に垂直に衝突するものとした。スラブの周囲4面は境界条件によって固定した。また、屋上スラブの解析モデルにおいては、荷重条件として自重を考慮した。

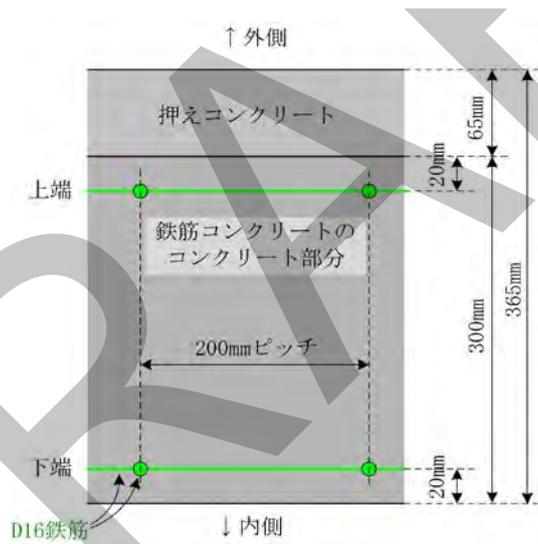
屋上スラブは鉄筋コンクリートと押えコンクリートで構成されている。鉄筋コンクリートについては、コンクリートを6面体ソリッド要素、鉄筋をビーム要素でモデル化した。押えコンクリートは6面体ソリッド要素でモデル化した。

表 5.1 RC壁（屋上スラブ、HAW施設、ケース3）の諸元

項目		値
形状		3400 × 8500 × 365 mm
押えコンクリート	材料	軽量コンクリート
	厚さ	65 mm
	密度	1800 kg/m <sup>3</sup>
	設計基準強度	180 kg/cm <sup>2</sup>
鉄筋コンクリート	材料	普通コンクリート
	厚さ	300 mm
	密度	2400 kg/m <sup>3</sup>
	設計基準強度	210 kg/cm <sup>2</sup>
鉄筋	材料	SD30（SD295Aで代用）
	配筋	D16@200（短辺方向、長辺方向）
	かぶり	20 mm



(a) 全体図



(b) 断面拡大図

図 5.1 RC壁（屋上スラブ、HAW 施設、ケース 3）の概要図

(2) 材料モデル

1) コンクリート

鉄筋コンクリートのコンクリート部分および押えコンクリートの物性値を表 5.2 に示す。なお、鉄筋コンクリートのコンクリート部分の密度については、図 5.2 に示すように、鉄筋 1 ピッチ分の鉄筋コンクリート中のコンクリート部分と鉄筋部分の重量比から、表 5.3 のように算出した。鉄筋の物性値は、RC 壁（外壁）ケース 1 と同様とする。

表 5.2 コンクリートの物性値

項目		値		出典など
		鉄筋コンクリート	押えコンクリート	
密度	kg/m <sup>3</sup>	2330 <sup>(※)</sup>	1800	
状態方程式 構成則 破壊則		CAPROUS モデル		文献[3]
ヤング率	GPa	21.5	11.2	文献[5]
ポアソン比	—	0.2		文献[5]
せん断弾性係数	GPa	8.96	4.67	ヤング率・ポアソン比から算出
設計基準強度 (圧縮強度)	MPa	20.6	17.7	
引張強度	MPa	1.73	1.09	文献[6]

(※) 鉄筋コンクリート全体の密度と、コンクリートと鉄筋の重量比から算出。

図 5.2 および表 5.3 参照

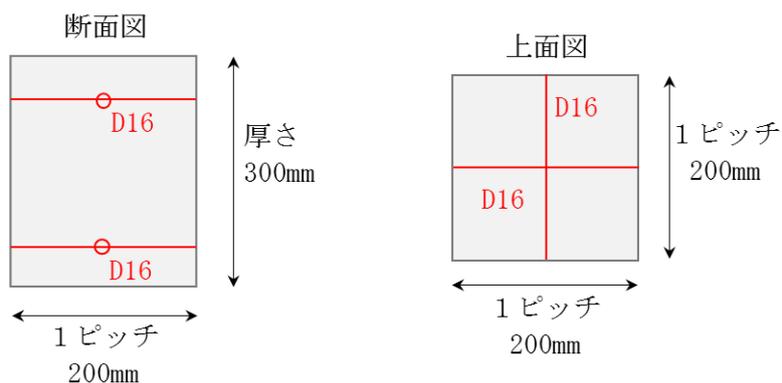


図 5.2 コンクリートの密度算出に関する概要図（鉄筋 1 ピッチ分）

表 5.3 鉄筋コンクリートのコンクリート部分の密度算出

項目	単位	値	出典など	
鉄筋コンクリート	寸法	mm	200×200×300	図 5.2
	体積 ( $V_{rc}$ )	mm <sup>3</sup>	$1.20 \times 10^7$	
	密度 ( $\rho_{rc}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2400	
鉄筋	長さ (L)	mm	200	図 5.2
	呼び名	-	D16	
	公称直径 (d)	mm	15.9	JIS 規格値 <sup>[4]</sup>
	本数 (N)	本	4	図 5.2
	体積 ( $V_r$ )	mm <sup>3</sup>	$1.59 \times 10^5$	$= (d/2)^2 \pi L \times N$
	密度 ( $\rho_r$ )	kg/m <sup>3</sup>	7850	文献[1]
コンクリート	体積 ( $V_c$ )	mm <sup>3</sup>	$1.18 \times 10^7$	$= V_{rc} - V_r$
	密度 ( $\rho_c$ )	kg/m <sup>3</sup>	2330	(※)

(※) 鉄筋コンクリートの総重量をMとすると、 $M = \rho_{rc} V_{rc} = \rho_c V_c + \rho_r V_r$ より

$$\rho_c = (\rho_{rc} V_{rc} - \rho_r V_r) / V_c$$

## 2) 鉄筋

鉄筋 SD295A の物性値は、表 3.4 に示した HAW 施設外壁の鉄筋と同じ値とする。

## 5.2 解析結果

飛来物が時刻 6 ms で反跳し、それ以降はエネルギー収支時刻歴および鉄筋の塑性ひずみエネルギー時刻歴ともにほぼ変動がなかったことから、現象は収束し、有意な変形挙動はこれ以上生じないものと考えられる。

裏面の中央部では最大 2.7 mm 程度の変位が生じた。しかし、変位はそれ以上増加せずに、弾性振動を繰り返していることから、裏面剥離は生じないものと判断できる。

コンクリートには衝突面から裏面にかけて十字状に亀裂が生じたが、貫通には至らなかった。

コンクリートの速度ベクトル図から、すべての計算要素の変位は弾性振動しており、計算完了時まで、常に飛散方向の速度を持つ計算要素は存在しないことが確認された。

鉄筋に生じた最大相当塑性ひずみは、衝突面側が 0.083 %、裏面側はゼロであり、破断ひずみ 14.8 % に比べて十分小さく、破断には至らなかった。

DRAFT

## 6. RC壁（屋上スラブ、TVF 開発棟、ケース4）に対する衝突解析

### 6.1 評価条件

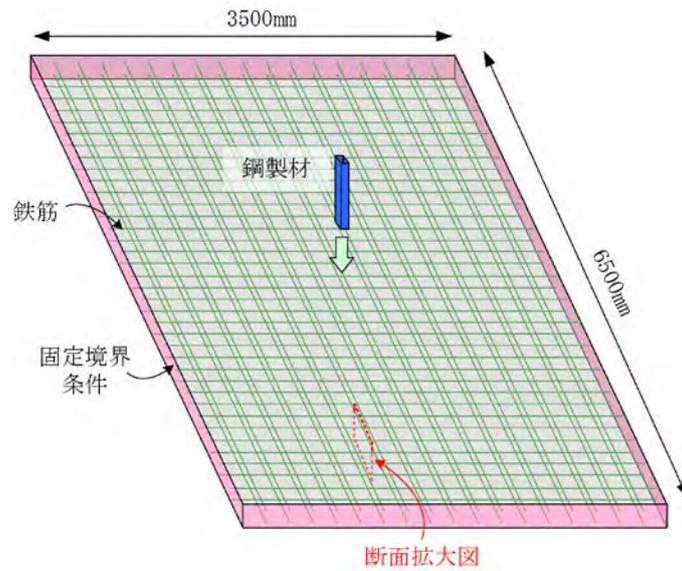
#### (1)解析モデル

RC壁（屋上スラブ、TVF 開発棟、ケース4）の諸元を表 6.1 に、概要図を図 6.1 に示す。竜巻飛来物である鋼製材は屋上スラブの中央に垂直に衝突するものとした。スラブの周囲4面は境界条件によって固定した。また、屋上スラブの解析モデルにおいては、荷重条件として自重を考慮した。

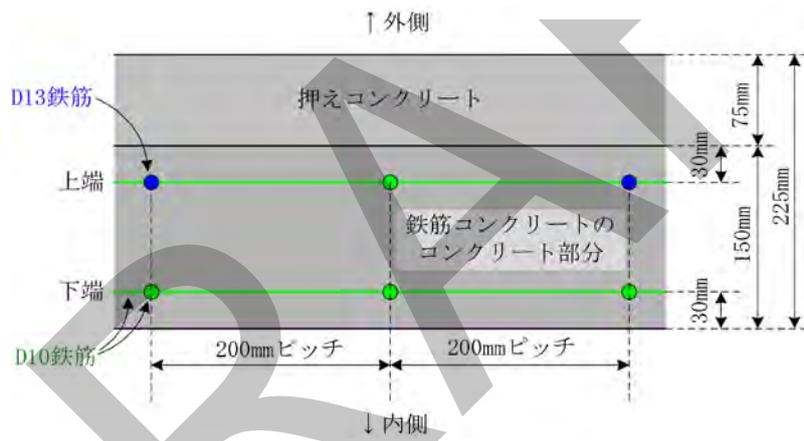
屋上スラブは鉄筋コンクリートと押えコンクリートで構成されている。鉄筋コンクリートについては、コンクリートを6面体ソリッド要素、鉄筋をビーム要素でモデル化した。押えコンクリートは6面体ソリッド要素でモデル化した。

表 6.1 RC壁（屋上スラブ、TVF 開発棟、ケース4）の諸元

項目		値
形状		3500 × 6500 × 225 mm
押えコンクリート	材料	普通コンクリート
	厚さ	75 mm
	密度	2400 kg/m <sup>3</sup>
	設計基準強度	150 kg/cm <sup>2</sup>
鉄筋コンクリート	材料	普通コンクリート
	厚さ	150 mm
	密度	2400 kg/m <sup>3</sup>
	設計基準強度	225 kg/cm <sup>2</sup>
鉄筋	材料	SD30（SD295Aで代用）
	配筋	短辺方向： D10・D13 交互@200（上端） D10@200（下端） 長辺方向： D10@200（上端および下端）
	かぶり	30 mm



(a) 全体図



(b) 断面拡大図

図 6.1 R C壁（屋上スラブ、TVF 開発棟、ケース 4）の概要図

(2) 材料モデル

1) コンクリート

鉄筋コンクリートのコンクリート部分および押えコンクリートの物性値を表 6.2 に示す。なお、鉄筋コンクリートのコンクリート部分の密度については、図 6.2 に示すように、鉄筋 2 ピッチ分の鉄筋コンクリート中のコンクリート部分と鉄筋部分の重量比から、表 6.3 のように算出した。

表 6.2 コンクリートの物性値

項目		値		出典など
		鉄筋コンクリート	押えコンクリート	
密度	kg/m <sup>3</sup>	2340 <sup>(※)</sup>	2400	
状態方程式 構成則 破壊則		CAPROUS モデル		文献[3]
ヤング率	GPa	22.1	19.3	文献[5]
ポアソン比	—	0.2		文献[5]
せん断弾性係数	GPa	9.21	8.04	ヤング率・ポアソン比から算出
設計基準強度 (圧縮強度)	MPa	22.1	14.7	
引張強度	MPa	1.81	1.38	文献[6]

(※) 鉄筋コンクリート全体の密度と、コンクリートと鉄筋の重量比から算出。

図 3.2 および表 3.3 参照

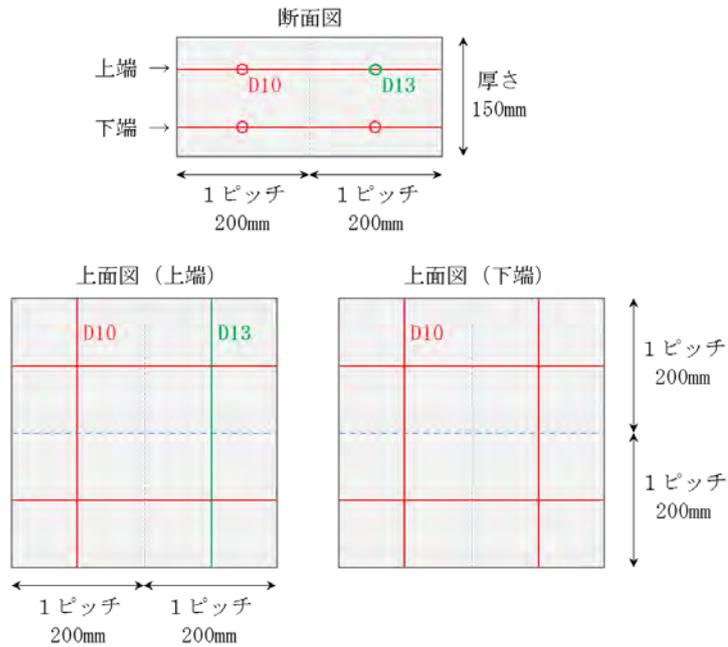


図 6.2 コンクリートの密度算出に関する概要図（鉄筋 2 ピッチ分）

表 6.3 鉄筋コンクリートのコンクリート部分の密度算出

項目		値	出典など	
鉄筋コンクリート	寸法	mm	400×400×150	
	体積 ( $V_{rc}$ )	mm <sup>3</sup>	$2.40 \times 10^7$	
	密度 ( $\rho_{rc}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2400	
鉄筋	長さ (L)	mm	400	
	D13	公称直径	mm	12.7
		本数 ( $N_1$ )	本	1
		体積 ( $V_1$ )	mm <sup>3</sup>	$5.067 \times 10^4$
	D10	公称直径	mm	9.53
		本数 ( $N_2$ )	本	7
		体積 ( $V_2$ )	mm <sup>3</sup>	$1.997 \times 10^5$
総体積 ( $V_r$ )	mm <sup>3</sup>	$2.504 \times 10^5$		
密度 ( $\rho_r$ )	kg/m <sup>3</sup>	7850		
コンクリート	体積 ( $V_c$ )	mm <sup>3</sup>	$2.375 \times 10^7$	
	密度 ( $\rho_c$ )	kg/m <sup>3</sup>	2340	

(※) 鉄筋コンクリートの総重量をMとすると、 $M = \rho_{rc} V_{rc} = \rho_c V_c + \rho_r V_r$  より  $\rho_c = (\rho_{rc} V_{rc} - \rho_r V_r) / V_c$

## 2) 鉄筋

鉄筋 SD295A の物性値は、表 3.4 に示した HAW 施設外壁の鉄筋と同じ値とする。

## 6.2 解析結果

飛来物が時刻 7 ms で反跳し、エネルギー収支時刻歴および鉄筋の塑性ひずみエネルギー時刻歴ともに時刻 25 ms 以降はほぼ変動がなかったことから、現象は収束し、有意な変形挙動はこれ以上生じないものと考えられる。

裏面の中央部では最大 21.3 mm 程度の変位が生じた。しかし、変位はそれ以上増加せずに、弾性振動を繰り返していることから、裏面剥離は生じないものと判断できる。

コンクリートには衝突面から裏面にかけて十字状に亀裂が生じたが、貫通には至らなかった。

コンクリートの速度ベクトル図から、すべての計算要素の変位は弾性振動しており、計算完了時まで、常に飛散方向の速度を持つ計算要素は存在しないことが確認された。

鉄筋に生じた最大相当塑性ひずみは、衝突面側が 0.56 %、裏面側が 1.63 % であり、破断ひずみ 14.8 % に比べて十分小さく、破断には至らなかった。

## 7. まとめ

解析結果の評価に使用した RC 壁の破壊形態および定義を図 7.1 および表 7.1 に示す。図 7.1 は文献[12]より転載、表 7.1 は文献[12]を参考にまとめたものである。この破壊形態に従って、解析結果を「貫入・表面飛散」、「裏面剥離」、「貫通」の3種類に分類する。フローチャートを図 7.2 に示す。なお、文献[12]では、図 7.1 の(a)～(c)を「局部破壊」、(d)を「全体破壊」と分類しているが、今回のケースはすべて「局部破壊」に該当する。

このフローチャートに基づいて破壊形態を分類した RC 壁の解析結果一覧を表 7.2 に示す。なお、図 7.3 および図 7.4 に各ケースの計算完了時のコンクリートの変形・損傷状態図をまとめた。

まず[分岐 1]において、すべての解析ケースの鉄筋の塑性ひずみエネルギーは時刻 50 ms までには増加が完了して一定値になっているため、これ以上の塑性変形を伴う大変形は生じないと判断できる。

[分岐 2]においては、すべての解析ケースの飛来物は反跳しており、「貫通」には至らないと判断できる。

[分岐 3]では、すべての解析ケースにおいて、変位は単調増加ではなく途中から弾性振動となり、また、飛散方向の速度を持ち続ける計算要素は全く存在しないため、「裏面剥離」とは断定できない。

[分岐 4]においてはすべての解析ケースで[NO]と判断した。

[分岐 5]では、解析ケースすべての裏面側に損傷が見られるため、「貫入・表面飛散（裏面側に亀裂あり）」と判定した。

図 7.5 に示した衝突試験で得られた RC 壁の局部破壊状況の例(文献[14])のように、「貫入・表面飛散」(図 7.5 では「表面破壊」と表記)と評価された RC 壁の裏面の形状はほぼフラットに近いことがわかる。

以上の結果から、設計竜巻及び設計飛来物によって高放射性廃液貯蔵場(HAW)及びガラス固化技術開発施設(TVF)ガラス固化技術開発棟の外壁及び屋上スラブに「貫入・表面飛散」、「裏面剥離」、「貫通」の発生は見られず、施設の健全性は維持される。

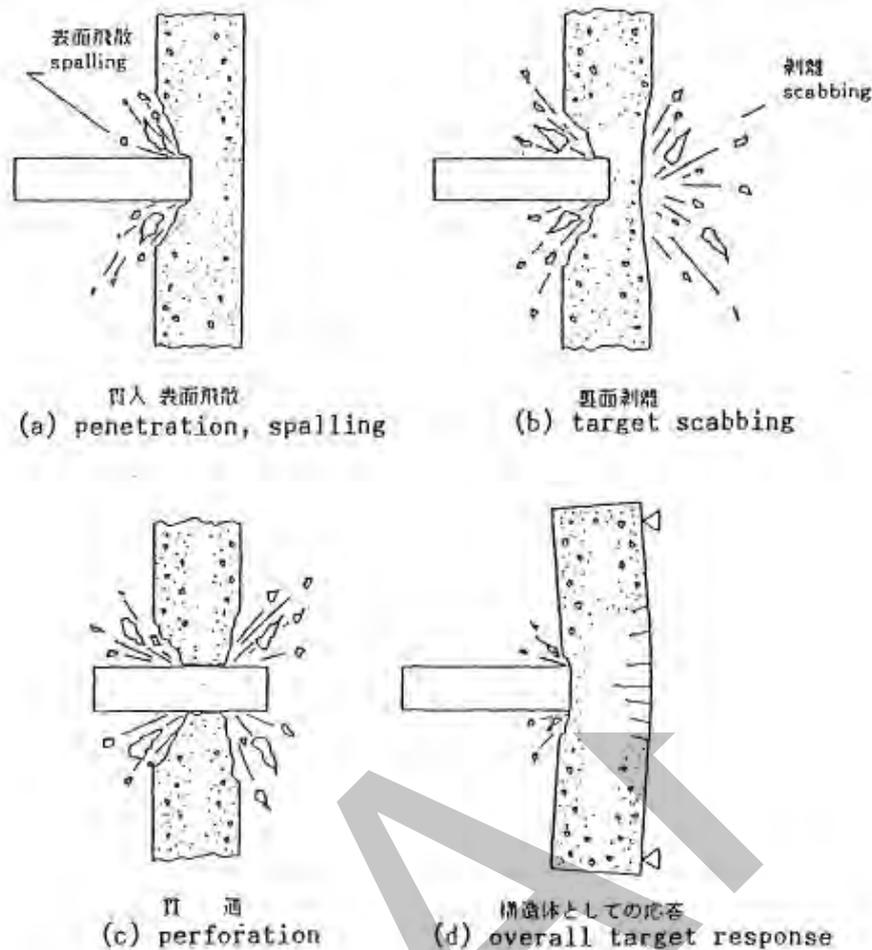


図 7.1 飛来物の衝突による鉄筋コンクリートの破壊形態  
(文献[12]より抜粋。なお、文献[12]によると本図の参照元は[13])

表 7.1 貫入・表面飛散、裏面剥離、貫通の定義

破壊形態	定義
貫入・表面飛散	衝突面側に窪みができる現象である。裏面側に亀裂が生じるものの破片飛散が生じない場合も含む。
裏面剥離	衝突面側だけでなく裏面側のコンクリートが飛散する現象である。スポール破壊による純粋な裏面剥離だけでなく、衝突によって裏面側に生じるコーン状の亀裂に誘起される剥離も含む。
貫通	飛来物が鉄筋コンクリートを通り抜ける現象であり、構造物そのものに貫通孔が生じる。飛来物は貫通後に衝突方向の残留速度を持つ場合と貫通時に停止する場合がある。

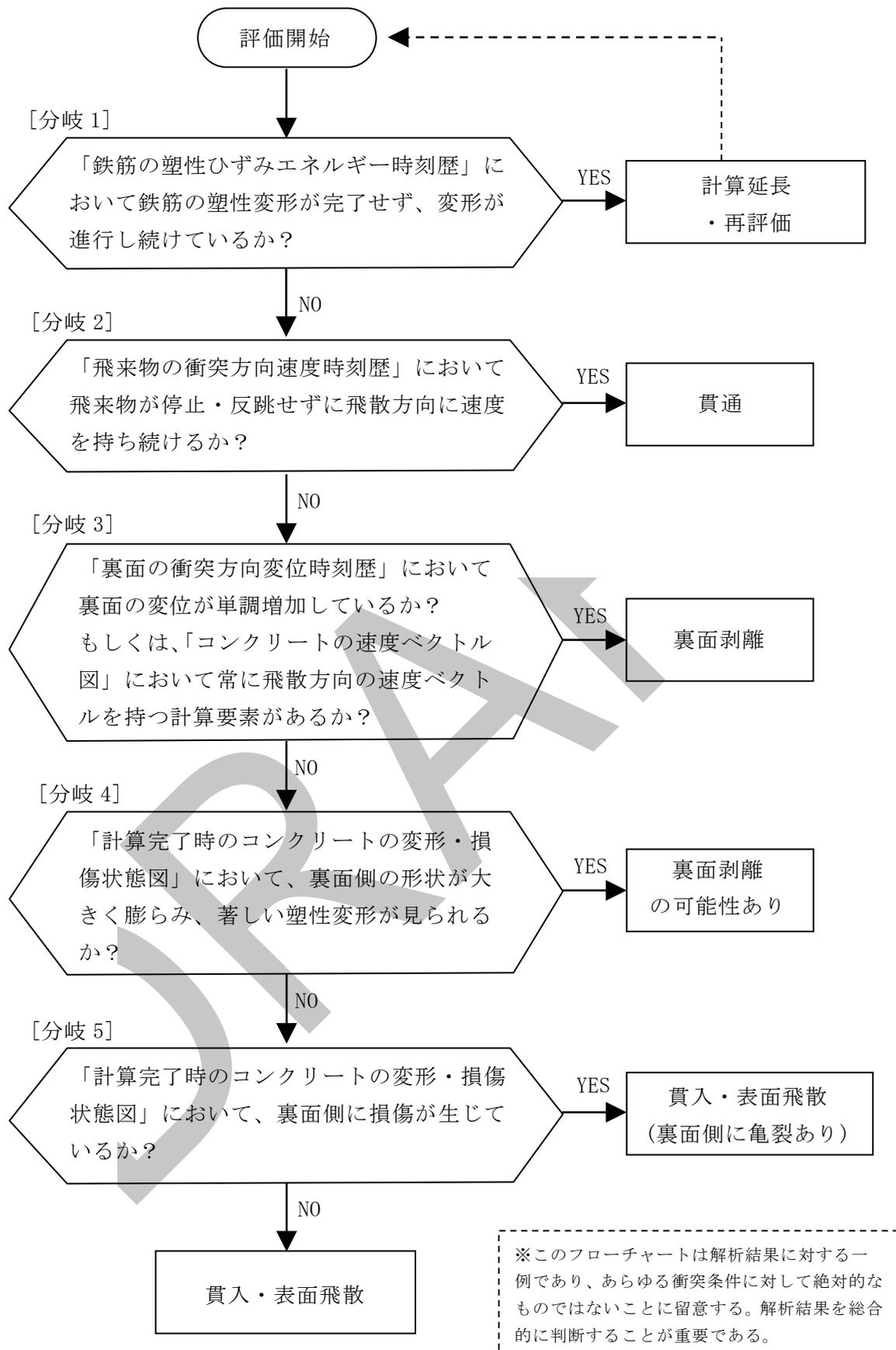
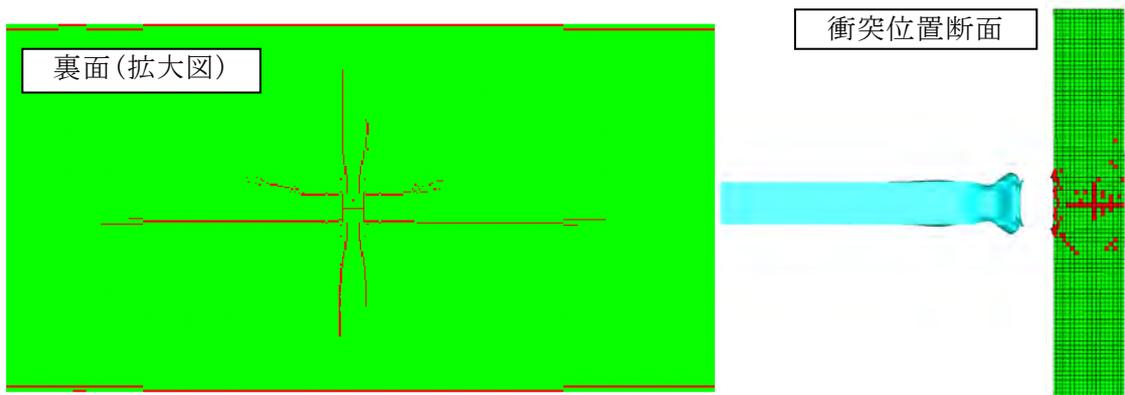


図 7.2 解析結果の評価で使したフローチャート

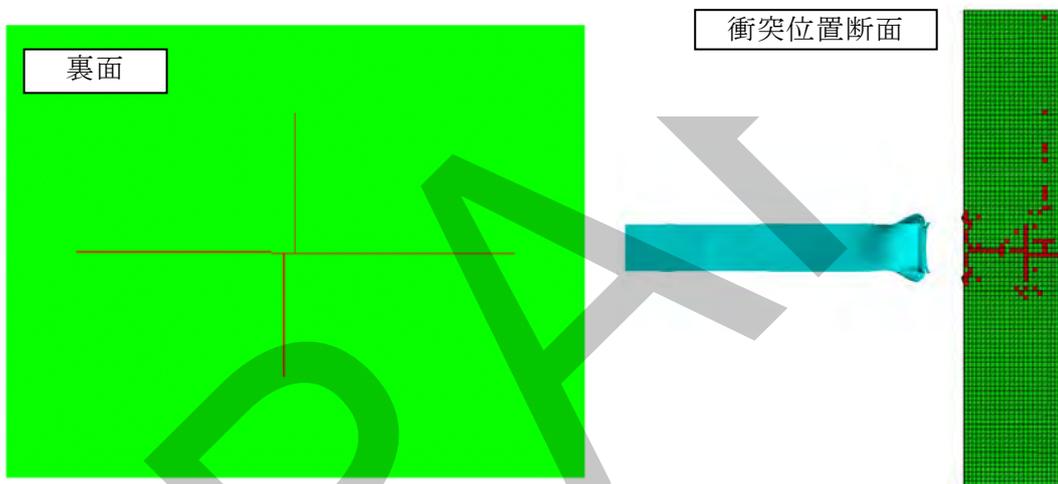
表 7.2 解析結果一覧 (RC 壁)

#	評価対象			衝突速度 (m/s)	飛来物残留速度 (※) (m/s)	飛来物貫通有無	破壊形態	鉄筋破断有無	裏面最大変位 (mm)
	部位	対象施設	厚さ (mm)						
(a)	RC 壁 (外壁)	HAW 施設	325	51 (水平)	-4.1	無	貫入・表面飛散 (裏面側に亀裂あり)	無	5.7
(b)		TVF 開発棟	400		-4.0	無		無	3.7
(c)	RC 壁 (屋上スラブ)	HAW 施設	365	34 (鉛直)	-1.9	無		無	2.7
(d)		TVF 開発棟	225		-1.5	無		無	22

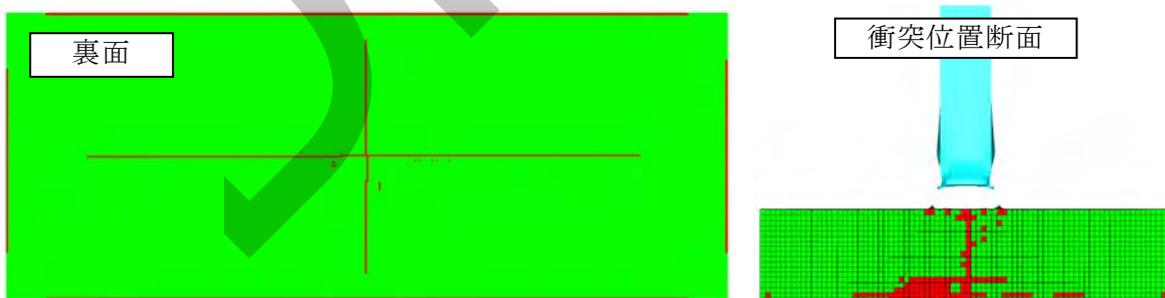
(※) 負の値は飛来物が反跳していることを示す。



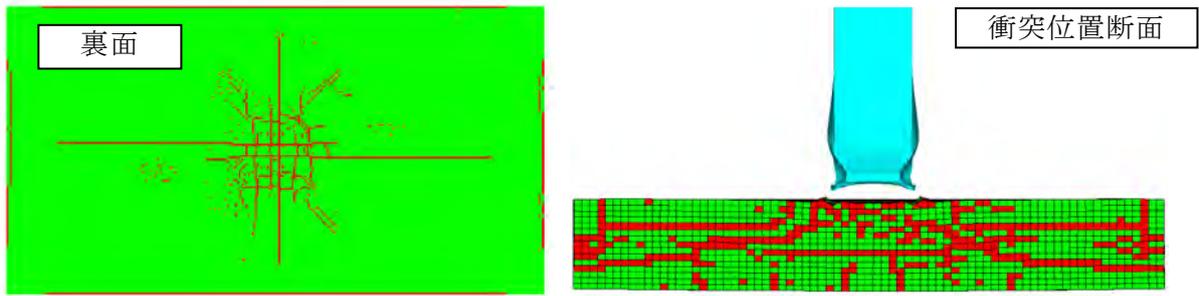
(a) 外壁、HAW 施設、衝突速度 51 m/s  
(緑：非破壊、赤：破壊)



(b) 外壁、TVF 開発棟、衝突速度 51 m/s  
(緑：非破壊、赤：破壊)



(c) 屋上スラブ、HAW 施設、衝突速度 34 m/s  
(緑：非破壊、赤：破壊)



(d) 屋上スラブ、TVF 開発棟、衝突速度 34 m/s

(緑：非破壊、赤：破壊)

図 7.3 各ケースの計算完了時のコンクリートの変形・損傷状態図

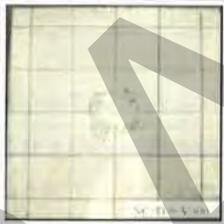
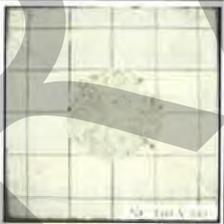
衝突速度 210m/s : 表面破壊		衝突速度 310m/s : 裏面剥離		衝突速度 415m/s : 貫通	
表面	断面	表面	断面	表面	断面
					
裏面		裏面		裏面	
					

図 7.4 局部破壊状況の例(文献[14])

## 8. 参考文献

参考文献を表 8.1 にまとめた。

表 8.1 参考文献

項番	資料名
[1]	鋼構造設計便覧、JFE スチール株式会社、2013 年 8 月、4-1 頁、4-1. 構造材の定数
[2]	T. Tsuda, et al., Implementation of the Tanimura-Mimura's Strain Rate Dependent Constitutive Model in LS-DYNA Using User Defined Material Model, 11th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn, MI, USA, June 6-8, 2010
[3]	高速衝突を受けるコンクリート構造物の局部破壊に対する設計ガイドライン (案)、平成 26 年 3 月、防衛施設学会、150-165 頁
[4]	JIS G 3112:2010(鉄筋コンクリート用棒鋼)
[5]	原子力施設鉄筋コンクリート構造 計算基準・同解説、2013 改定、日本建築学会
[6]	コンクリート標準示方書[設計編]、2012 年制定、土木学会
[7]	JIS G 4304:2012 (熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯)
[8]	WEB より情報取得、ステンレス協会、「ステンレスのヤング率、ポアソン比など機械的性質について」( <a href="http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q7/">http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q7/</a> )
[9]	新日鉄住金(株)、建設用資材ハンドブック、2016 年 3 月改訂版、206 頁
[10]	JIS G 3459:2016 (配管用ステンレス鋼鋼管)
[11]	AFATL-TR-84-59、HULL Users' Manual、Daniel A Matuska、June 1984
[12]	飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法、伊藤ほか 2 名、電力中央研究所・総合報告：U24、平成 3 年 7 月、財団法人電力中央研究所
[13]	原子力工業、第 35 巻第 9 号 (1989)、P. 29
[14]	高速衝突を受けるコンクリート構造物の局部破壊に対する設計ガイドライン (案)、平成 26 年 3 月、防衛施設学会、128-132 頁

以上