

水素タンク破裂による飛翔体と鋼製壁の高速衝突シミュレーション

平 田 寛 米 澤 健 次 小 野 佳 之
田 畑 侑 一 萩 尾 浩 也

High-Speed Collision Simulation of Flying Object and Steel Wall Due to Hydrogen Tank Rupture

Hiroshi Hirata Kenji Yonezawa Yoshiyuki Ono
Yuichi Tabata Hiroya Hagio

Abstract

Safety designs for the iron doors and structural walls of factories with high-pressure containers such as hydrogen tanks are necessary because flying objects such as container debris may collide with doors and walls due to hydrogen explosions. However, few studies on the collision of objects at high speeds have been conducted, and there is insufficient information on a rational safety design. Recently, the use of FEM for collisions has been increasing, and its usefulness has been acknowledged. The FEM for collision can be a useful tool with validity based on experimental data. In this study, we conducted an FEM to reproduce the collision of tanks in previous experiments. The validity of the proposed FEM was confirmed.

概 要

水素タンク等の高圧容器を扱う工場の鉄扉や構造壁においては、爆発等による飛翔体（容器の破片等）の衝突が懸念され、それらに対する対策を行った安全設計を行う必要がある。しかし、タンクの破片が飛翔し、高速で構造物に衝突した時の挙動に関する知見は少なく、不確定要素に対して過度な安全率を見込んだ設計となりやすい。よって、より合理的な設計を行うために実験データの蓄積が求められる。また、これらの現象に対してFEMによる再現解析を行う事例は増えてきているが、解析の妥当性を確認するためには、実験による検証が必要不可欠である。本報では、タンク破裂に伴う飛翔体と構造物の衝突現象に対する解析技術の構築を目的とし、水素タンク破裂時の飛散挙動を模擬した実験に対して、非線形FEMによる再現解析を実施した。その結果、本報で提案する解析手法の妥当性と有用性を確認した。

1. はじめに

水素エネルギーは石油に依存しない次世代エネルギーとして期待されており、水素エネルギーの活用のために、水素関連施設など、高圧水素タンクを取り扱う施設の建設が進められている。しかし、水素エネルギー利用の普及には安全技術の確立が最重要課題であり、上記のような施設を設計する際には、万が一の事故を想定した安全設計が求められる。特に、高圧の水素タンクが破裂した場合には、タンクの破片が高速に飛散し、それが室内の壁や扉に衝突した場合を想定した設計が必要である。しかし、タンクの破片が飛翔し、高速で構造物に衝突した時の挙動に関する知見は少ない。そのため、不確定要素に対して過度に安全率を見込んだ設計となりやすい。

一方、このようなタンク破裂に伴う飛翔体の衝突現象に対して、FEM解析は安全性検証および合理的な設計のための有用なツールとなり得るが、そのためには実験による検証が必要不可欠である。

本報では、タンク破裂に伴う飛翔体と構造物の衝突現

象に対するFEM解析技術の構築を目的とし、高圧水素タンク破裂に伴う飛翔体と鋼製壁の高速衝突現象を模擬した実験に対して非線形FEMによる再現解析を実施し、その適用性を確認した。

2. タンク破裂に伴う飛翔体の衝突実験

2.1 実験の目的

水素関連の実験施設において水素タンクが破裂する際の飛翔体と構造物の衝突現象に対する性状把握を目的としたタンク破裂実験を実施した。本章では、水素タンク破裂に伴う飛翔体と鋼製壁の高速衝突現象に着目し、その再現解析の検証に用いた実験の概要について述べる。なお、本実験は一般財団法人自動車研究所の城里テストセンターの室内施設にて実施した。

2.2 実験概要

実験ケース一覧をTable 1、実験装置概要をFig. 1、水素タンクの外観をFig. 2、鋼製壁の概略図をFig. 3に示す。水

素タンク破裂時の衝撃圧力に対する安全性を考慮し、防御用の壁や円筒管を設置し、加圧ホースによりヘリウムガスを送り込み水素タンクが破壊するまで加圧した。タンクの飛散方向には、鋼製の構造体（鋼製壁）を設置した。

実験で用いた水素タンクはクロムモリブデン鋼製の35MPaタンクであり、寸法は全長897mm×直径φ250mm、総質量は約45kgである。また、Fig.2 に示すようにタンクの口金部から155mmの位置に切れ込みを入れることで、タンクの破断箇所を特定し、口金部と反対の部分（以下、飛翔体）を鋼製壁にめがけて飛翔させる計画とした。切れ込み深さは、Case1が4～5mm、Case2とCase3が3～4mmとした。なお、飛翔体部分の寸法は全長742mm×直径φ250mm、質量は（実験後の測定で）33kg～34kgとほぼ同一であった。

鋼製壁にはSS400鋼板を用いた。鋼板の寸法は縦2150mm、横1500mmであり、板厚は6mmとした。鋼板は角パイプ（□-150×150×9、□-150×100×9）で構成した鋼製枠に溶接で取り付け、コンクリート床の上に直置きすることとし、固定用アンカー等は用いていない。また、衝突時の鋼製壁の移動抑制と、転倒防止のため、鋼製壁脚部に鋼製の錘（1200mm×590mm×180mm）を設置した。なお、錘を含めた鋼製壁の総質量は2100kg程度であった。

実験では、衝突前後の飛翔体を高速度カメラで撮影し、画像解析により鋼製壁に衝突する直前の飛翔体の速度を算定した。

2.3 実験結果

Table 2に実験結果一覧を、Fig.4に衝突後の鋼製壁の破壊状況、Fig. 5にタンク破裂直後の飛翔体の状況を示す。Fig. 5は高速度カメラで撮影した画像であり、図中に示す赤丸部（追跡点）を用いて、タンクの速度を算出した。鋼製壁衝突直前の飛翔体の速度は、Case1：127.5m/s、Case2：87.2m/s、Case3：191.0m/sであり、各ケースの破壊形式は、Case1が非貫通、Case2が半貫通、Case3が貫通と、それぞれ異なる破壊形式となった。また、特に着目すべき点として、Case1とCase2では、飛翔体の速度はCase2の方が低速なのにもかかわらず鋼板の損傷が顕著である点である。これは飛翔体の衝突角度が大きく影響していると考えられる。Fig.5より、Case1とCase3の飛翔体はほぼ真直ぐ飛翔しているのに対し、Case2の飛翔体は鋼製壁衝突前に30°程度傾いているのが確認できる。また、Fig. 4からも、Case2には飛翔体が斜めに衝突したことが推察できる。飛翔体の衝突角度による影響については、次章のFEM解析にて検証と考察を行う。

2.4 既往評価式との比較

Table 2には、実験結果と既往の評価式との比較結果も合わせて示している。比較対象の評価式は、BRL式とした。鋼板貫通評価の実験式には種々のものが考案されて

Table 1 実験ケース
Experimental Cases

試験 ケース	鋼製壁(構造体含む)			水素タンク			
	衝突部の鋼板		質量 (kg)	飛翔体部分			切れ込み 深さ
	材質	板厚 (mm)		材質	直径 (mm)	質量 (kg)	
Case1	SS400	6	2135	クロム モリブ デン鋼	250	33.9	4～5mm
Case2			2012			33.6	3～4mm
Case3			2140			33.3	3～4mm

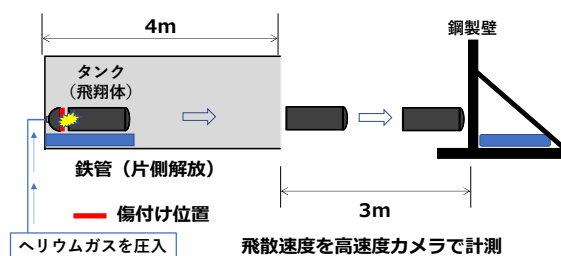


Fig. 1 実験装置概要
Layout of Explosion Tests

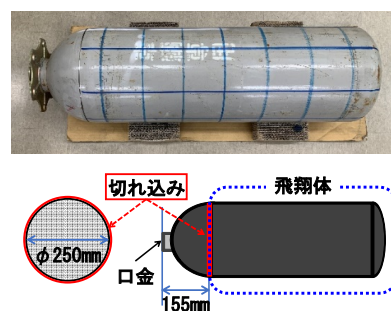


Fig. 2 水素タンク（飛翔体）の外観
Appearance of Hydrogen Tank (Flying Object)

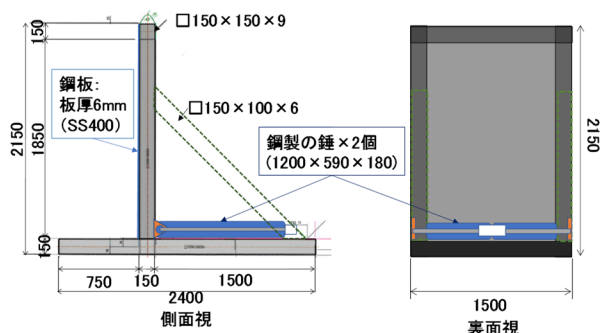


Fig. 3 鋼製壁の概略図
Schematic Diagram of Steel Wall

いるが、その中でもBRL式は鋼板貫通を安全側に評価できる手法であることが既往研究^{2),3)}により確認されており、防護設備の設計において使用されている。BRL式は、飛翔体の質量、衝突速度および飛翔体直径をパラメータとしており、以下の式で表される。

$$T^{3/2} = 0.5MV^2 / (1.44 \times 10^9 K^2 D^{3/2}) \quad (1)$$

ここに、 T ：貫通限界板厚（貫通させないために必要な板厚）（m）、 M ：飛来物の質量（kg）、 V ：飛来物の衝突速度（m/s）、 K ：鋼板の材質に関する係数（SS400鋼の場合、 ≈ 1 ）、 D ：飛来物の直径（m）である。なお、BRL式は剛体円柱が衝突するときの鋼板の貫通を評価するもので、今回のタンクは衝突部先端が曲面なので、BRL式で想定している条件とは厳密には異なる。

BRL式に基づく貫通限界板厚は、実験で非貫通だったCase1で12.98mm、半貫通したCase2で7.86mm、貫通したCase3で22.36mmであった。半貫通した場合も貫通と判断することとして、実験結果とBRL式による判定を比較すると、Case2、Case3ではBRL式による判定は実験結果と一致するが、Case1では実験結果と異なり、安全側の評価となる。

ただし厳密には、実験において鋼製壁は完全に固定されているわけではないので、鋼製壁の移動が実験時の破壊形式にある程度影響したことも考えられる。この点も、以降の章で再現解析結果を用いて考察する。

3. FEMによる解析検討

3.1 解析の概要

タンク破裂実験（以下、本実験）において、タンクが飛翔して鋼製壁に衝突した時の損傷に対するFEM解析の再現性を検証した。鋼製壁およびタンクを詳細にモデル化し、実験で得られた飛翔速度を基にFEM解析を実施した。また、鋼製壁の支持条件等の実験時の諸条件が鋼製壁の破壊形式に与えた影響を確認するため、固定された鉄板に飛翔体が正面から衝突した場合（理想状態での衝突）を想定した追加検討解析も実施した。なお、本解析は約90m/s～200m/sの非常に高速な衝突を対象としているため、ひずみ速度が鋼材強度に与える影響もパラメータとして検討を行った。

3.2 解析条件

Table 3 に解析パラメータ、Fig. 6に解析モデルを示す。本解析検討では、実験の再現解析用のモデルと、各実験ケースにおいて理想状態での衝突を想定した追加検討用の解析モデルを準備した。解析には非線形有限要素プログラムAbaqus/Explicit 2017⁴⁾を使用し、解析要素は、1次の4辺形シェル要素を用いた。

実験の再現解析では、Fig. 6(b)に示す通り、実験で使用した鋼製壁（PL6mm×1500mm×2150mmのSS400 鋼板を鋼管柱に溶接した鋼製壁）に、飛翔体を衝突させる解析を

Table 2 実験結果（既往の評価式との比較結果）

Experimental Results					
試験ケース	実験結果			BRL式による判定	
	鋼製壁の板厚 (mm)	飛翔体の衝突速度 (m/s)	鋼製壁の破壊形式	貫通限界板厚 (mm)	予想モード 実験との対応
Case1	6	127.5	非貫通	12.98	貫通 ×
Case2		87.2	半貫通	7.86	貫通 ○
Case3		191.0	貫通	22.36	貫通 ○

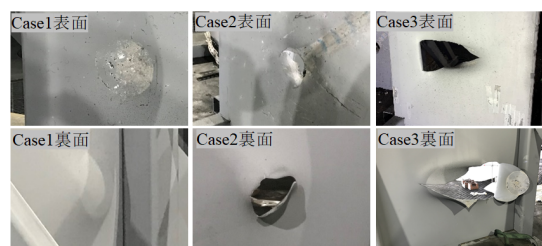


Fig. 4 鋼製壁の破壊状況（裏面側）
Damage Status of Steel Walls

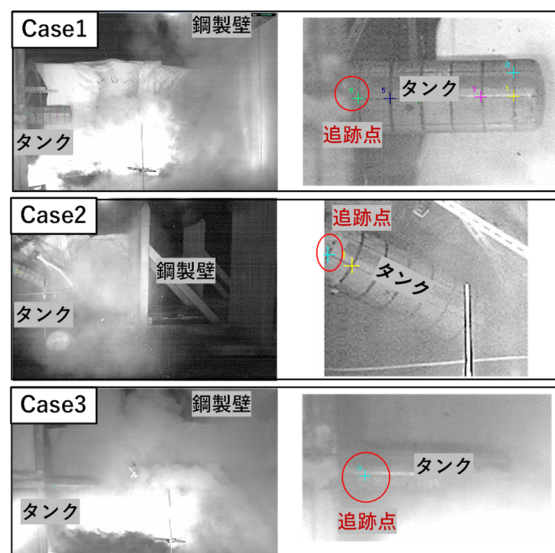
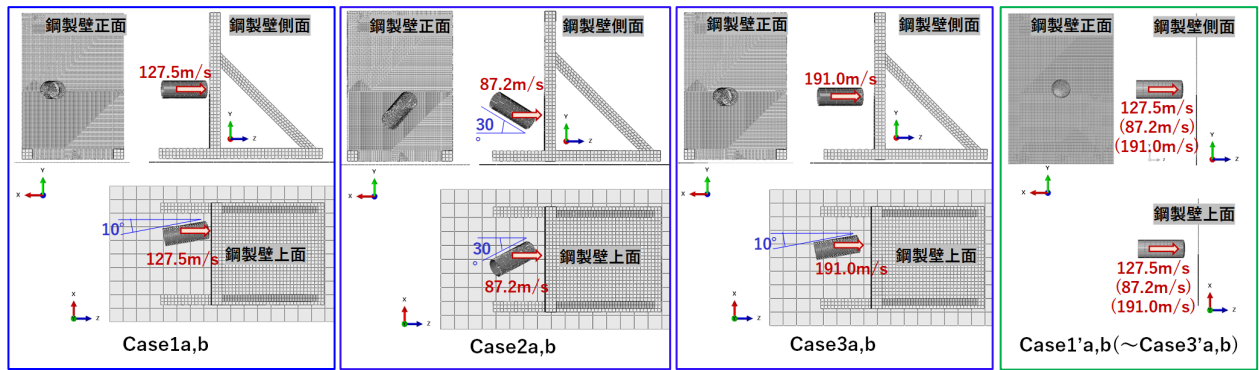


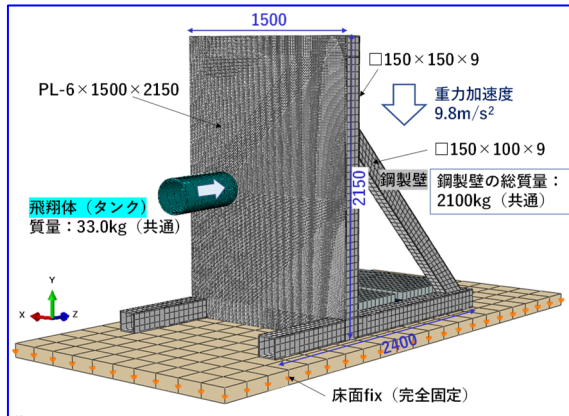
Fig. 5 破裂直後のタンク（飛翔体）の状況
Flight Status of Tanks

Table 3 解析パラメータ

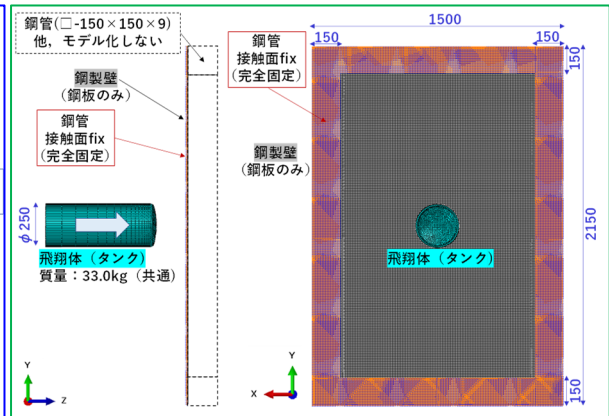
Analysis Parameters					
解析 ケース	飛翔体 衝突速度 (m/s)	鋼材の 歪速度 依存性	飛翔体の 衝突位置 と角度	対象とする 実験ケース	備考
Case1a	127.5	－	実験結果Case1 より推定	Case1	実験の 再現解析
Case1b		考慮			
Case2a	87.2	－	実験結果Case2 より推定	Case2	
Case2b		考慮			
Case3a	191.0	－	実験結果Case3 より推定	Case3	
Case3b		考慮			
Case1'a	127.5	－	鋼製壁中央、 垂直に衝突	Case1	追加検討 解析 ※理想状態 での衝突
Case1'b		考慮			
Case2'a	87.2	－		Case2	
Case2'b		考慮			
Case3'a	191.0	－		Case3	
Case3'b		考慮			



(a) 各ケースのタンクの衝突条件（実験の再現解析，追加検討解析）



(b) 実験の再現解析用のモデル



(c) 追加検討解析用のモデル（理想状態での衝突）

 Fig. 6 解析モデル概要
Analysis Model Overview

実施した。飛翔体速度は実験における測定値（Case1：127.5m/s，Case2：87.2m/s，Case3：191.0m/s）を飛翔体モデルの全節点に与えた。鋼製壁への衝突時の角度は，衝突後の鋼製壁の破壊状況から推定し，Fig. 6(a)に示す条件を設定した。各構成要素（床，鋼製壁，飛翔体）について，ペナルティ法により接触を考慮し，各構成要素間の摩擦係数は0.2とした。また，床に鋼製壁が設置されている状況を模擬するために，全構成要素に対して重力加速度 9.8m/s^2 を与えた。

追加検討用の解析では，Fig. 6(c)に示す通り，各実験ケース（Case1～Case3）について，理想状態での衝突を想定し，PL6mm $\times$ 1500mm $\times$ 2150mmの鋼板の四方（鋼管 $\square$ -150 $\times$ 150 $\times$ 9に接触する幅150mmの範囲）について，x,y,z方向全ての並進自由度を拘束し，板の中央に飛翔体が衝突する場合を設定した。なお，飛翔体の初速度は，実験の再現解析と同様に，実験における測定値を与えた。

Table 4 に鋼製壁用鋼板（PL6mm，SS400）の引張試験結果，Table 5に，解析に用いた鋼材モデルの材料パラメータを示す。鋼材モデルにはひずみ速度依存性を考慮するため，Johnson-Cook塑性モデル⁵⁾を用いた。ただし，本研究では現象の考察を簡潔にするために，熱の影響は考慮していない。熱の影響を考慮しない場合のJohnson-Cook塑性モデルは以下の式で表される。

 Table 4 鋼製壁用鋼板の引張試験結果
Tensile Test Results of Steel Plate for Steel Walls

鋼種	板厚 (mm)	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張り強さ σ_u (N/mm ²)	使用部位
		公称応力 [真応力]	公称応力 [真応力]	
SS400	6	355 [356]	460 [532]	鋼製壁の鋼板 (全ケース共通)

 Table 5 鋼材モデルの各種パラメータ
Constitutive Model Parameters

材料モデルのパラメータ				鋼製壁 (SS400)		飛翔体
				速度依存 を非考慮	速度依存 を考慮	※弾性を 仮定
弾性パラ メータ	ヤング係数	E	(N/mm ²)	205000		
	ポアソン比	ν	-	0.3		
	密度	ρ	(g/cm ³)	7.85		
塑性パラ メータ Johnson- Cook モデル	降伏応力	A	(N/mm ²)	356		-
	ひずみ硬化 係数	B	(N/mm ²)	540		
	ひずみ硬化 指数	n	-	0.6		
	ひずみ速度 硬化係数	C	-	0	0.08	
	基準ひずみ 速度	$\dot{\epsilon}_0$	(1/s)	1.0		

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (2)$$

ここに、 A は降伏応力、 B および n はひずみ硬化を表す定数、 C はひずみ速度依存性係数、 $\dot{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみ速度、 $\dot{\varepsilon}_0$ は基準ひずみ速度である。Johnson-Cook塑性モデルでは、係数 C の値により、鋼材強度にひずみ速度が与える影響を定義できる。本解析では、ひずみ速度依存が無い場合 ($C=0$) と、ひずみ速度依存がある場合 ($C=0.08$) の2ケースを設定した。なお、パラメータ C の値は、試行錯誤的に決定したもので、既往研究⁶⁾と同程度の値を採用している。パラメータ A , B , n は、一般的な鋼材の n 乗硬化則を仮定した場合のパラメータであり、本解析では、鋼材の引張試験結果（降伏点と引張強さ）に対応するように各パラメータを設定した。

鋼材の破壊パラメータは、既往文献⁷⁾を基に、延性による損傷が発生する相当塑性ひずみを応力三軸度（静水圧応力と相当応力の比）の関数として次式で与えた。

$$\varepsilon_{eq} = 140 \cdot \exp\left(-4.7 \cdot \frac{3\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) + 0.3 \quad (3)$$

ここに、 ε_{eq} は相当塑性ひずみ、 σ_{eq} は相当応力、 σ_m は静水圧応力である。なお、本破壊パラメータを用いた解析の妥当性については、文献⁸⁾にて飛翔体速度が50～60m/s程度の衝突現象を模擬した既往実験³⁾の再現解析により確認している。

3.3 実験の再現解析結果

Table 6に本実験の再現解析結果一覧、Fig. 7に各解析ケースにおける衝突後0.018秒時点の鋼製壁の破壊状況（相当塑性ひずみ分布）を示す。なお、この時点ですべてのケースにおける最終的な破壊モード（貫通の有無）が確定している。

ひずみ速度依存を考慮していない解析ケース (Case1a

～Case3a) では、Case1aは貫通、Case2aは半貫通、Case3aは貫通という結果であり、実験と比較して破壊が生じやすい傾向があり、Case1の破壊形式は再現できていない。

一方、ひずみ速度依存を考慮した場合、3ケース全ての解析 (Case1b～Case3b) において解析と実験の貫通・非貫通の判定が一致している。また、Fig. 8 に示す通り、鋼製壁の最終破壊状況（衝突部の破断形状）も一致している。このことから、約90m/s～200m/sの非常に高速な衝突を対象とした本実験の再現解析においても、鋼材モデルのひずみ速度依存性を考慮することで、実験を概ね再現していることを確認できた。

3.4 追加検討解析結果と考察

Table 7に、理想状態での衝突を模擬したケーススタディの解析結果一覧を示す。鋼材のひずみ速度依存性を考慮した解析結果 (Case1'b～Case3'b) に着目すると、Case1'bとCase2'bは非貫通、Case3'bのみ貫通という結果となり、Case2'bのみ、実験結果 (Case2) やその再現解析結果 (Case2-b)と破壊形式が異なる結果となった。この違いは、タンクの衝突角度による影響が主要因であると考えられ、

Table 6 実験の再現解析結果
Simulation Analysis Results

解析 ケース	飛翔体の 衝突速度 (m/s)	解析結果 (破壊形式)	実験 との対応
速度依存 を非考慮	Case1a	127.5 貫通	×
	Case2a	87.2 半貫通	○
	Case3a	191.0 貫通	○
速度依存 を考慮	Case1b	127.5 非貫通	○
	Case2b	87.2 半貫通	○
	Case3b	191.0 貫通	○

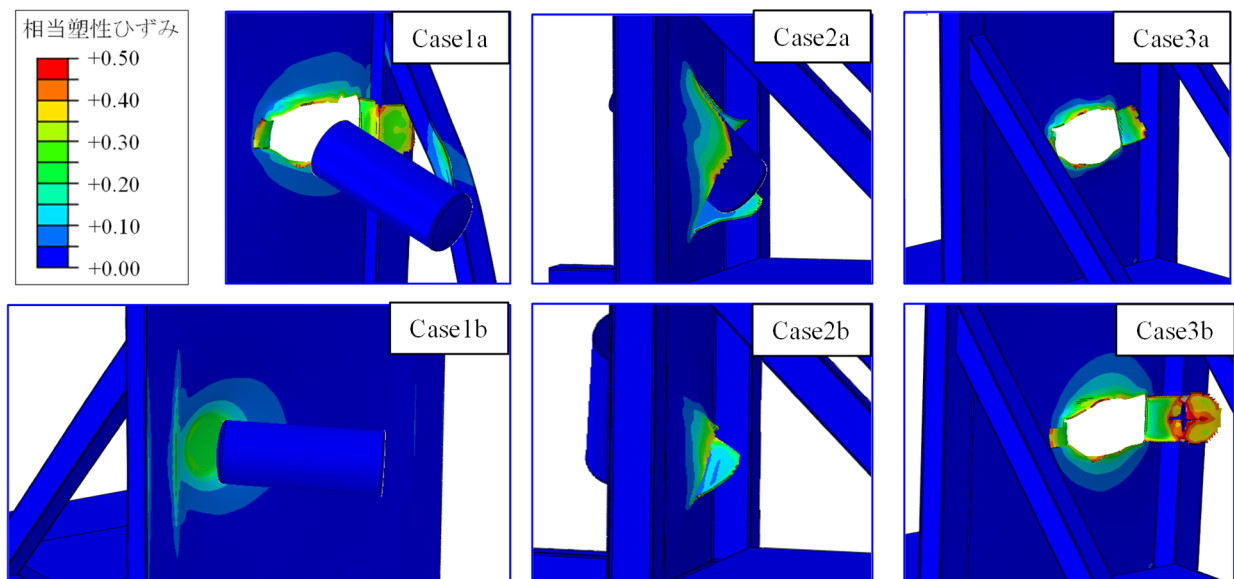


Fig. 7 解析結果：相当塑性ひずみコンター図（衝突後0.0018s（＝最終的な破壊モード確定）時点）

Analysis Result: Equivalent Plastic Strain Contour Diagrams

タンクが角度をもって衝突する場合に、正面から衝突した場合よりも鋼板に損傷（半貫通）が生じやすいことを、FEM解析でも確認できた。また、Case1'b, Case3'bは、実験（Case1, Case3）や、その再現解析結果（Case1b, Case3b）と、破壊形式は同じであり、理想的な衝突条件でも、破壊形式が変わらないことを確認できた。なお、鋼材のひずみ速度依存性を考慮していない解析結果（Case1'a～Case3'a）も同様の傾向であり、Case2'aのみ非貫通となり、Case2aと破壊形式が異なる結果となった。

参考までに、ケーススタディの解析結果を既往の評価

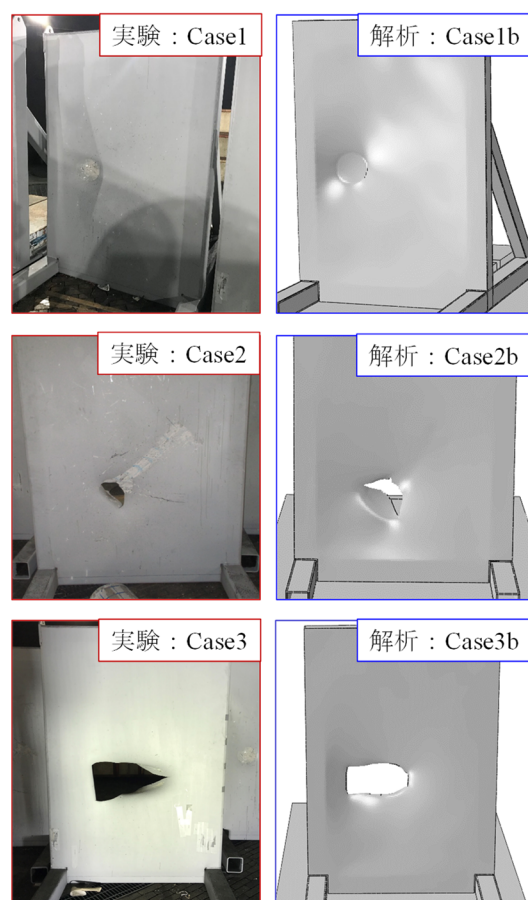


Fig. 8 鋼製壁の最終破壊状況（実験との比較）

Final Fracture Status of Steel Walls

Table 7 追加検討解析の結果
Case Study Analysis Results

解析 ケース	飛翔体の 衝突速度 (m/s)	破壊 形式	再現解析 との対応	参考：BRL式 との対応
速度依存 を非考慮	Case1'a	127.5	貫通	○
	Case2'a	87.2	非貫通	×
	Case3'a	191.0	貫通	○
速度依存 を考慮	Case1'b	127.5	非貫通	○
	Case2'b	87.2	非貫通	×
	Case3'b	191.0	貫通	○

式（BRL式）と比較した結果もTable 7 に示している。解析結果とBRL式による判定は、一致するケースも、一致しないケースもあった。よって、BRL式は安全側であるが、非線形FEM解析と比べると精度は低いことが分かる。また、Case2のように飛翔体が斜めから衝突する場合は適用範囲外である。

以上より、本報で構築した非線形FEM解析技術の妥当性とその有用性を示すことができた。

4. まとめ

水素タンク破裂時の飛散挙動を模擬した実験に対して、非線形FEMによる再現解析を実施し、以下の知見を得た。

- 1) ひずみ速度が鋼材強度に与える影響を考慮することで、90m/s～200m/sの非常に高速な衝突現象を解析で精度よく再現出来ることを確認した。
- 2) 飛翔体（水素タンク）の衝突角度の違いが、鋼製壁の破壊性状に与える影響が大きいことを確認した。また、それを非線形FEMで精度よく再現出来ることを確認した。

本解析手法は、既往評価式では対応できない複雑なディテールや衝突条件に対しても適用できるため、過度に安全率を見込むことなく、より合理的な設計が実現できるものと考えられる。今後は、本解析手法を活用し、水素関連実験施設をはじめ、高压容器を扱う施設の設計実務に貢献する予定である。

参考文献

- 1) Russell, C.R., Reactor safeguards, PERGAMON PRESS (1962).
- 2) 土木学会：構造工学シリーズ6, 構造物の衝撃挙動と設計法, 1993.
- 3) 土田恭平, 小笠原義浩, 別府万寿博, 和内博樹, 松浦淳, 間瀬辰也, 荻原実：鋼製飛来物に対する鋼板の貫通評価に関する研究（その1～その4）衝突実験によるBRL 式の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015.9.
- 4) Abaqus version 2017 Analysis User's Manual, 2017
- 5) Johnson, G.R., Cook, W.H. : A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proceeding of 7th International Symposium on Ballistics, pp.541-547, 1983.
- 6) 土木学会：構造工学シリーズ15, 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004.5
- 7) 小野徹郎, 佐藤篤史：構造物鋼材の延性き裂発生条件, 日本建築学会構造系論文集第565 号, pp.127-134, 2003.5
- 8) 平田寛, 米澤健次：鉄扉に飛翔体が衝突した場合を想定したシミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018.9.