

水素関連施設における耐爆設計のための シミュレーション技術 Simulation Technique for Explosion Resistant Design in Hydrogen Related Facilities

田畑 侑一
小野 佳之
米澤 健次
平田 寛

Yuichi Tabata
Yoshiyuki Ono
Kenji Yonezawa
Hiroshi Hirata

1. はじめに

近年、水素エネルギーは有望な次世代エネルギーとして期待され、その利活用のため、高压の水素タンク等を取り扱う水素関連施設が増加している。水素関連施設の安全設計において、水素が漏洩して万が一にも引火し爆発した場合や、水素タンク等の高压な压力容器が破裂した場合の、人体や周辺建物への影響を把握しておくことは重要である。こうした現象を事前に予測し、設計に反映する上で、数値シミュレーション技術は有効な手段となり得るが、計算結果の妥当性を確認するための検証データの取得が不可欠となる。しかしながら、検証データ取得のための実験は爆発を伴うため実施が容易でなく、かつ多大な費用を要するため、先行研究例が少ないのが現状である。

筆者らはこれまでに水素関連施設の安全かつ合理的な耐爆設計に向けた数値シミュレーション技術の構築を目的とし、水素関連事故を想定した実験と数値シミュレーション技術による実験の再現解析を実施してきた¹⁻⁴⁾。本報では、これまでに実施した実験および数値シミュレーション技術の概要と適用事例について紹介する。

2. 評価の方法

水素関連施設の耐爆設計では、主に以下の2点について検討が必要となる。

- ① 水素ガスの爆発および高压容器破裂に起因した衝撃波の圧力伝搬が構造物に及ぼす影響
- ② 水素タンク等の高压容器の破裂に伴う破片の飛散・衝突が構造物に及ぼす影響

水素ガスの爆発は、水素の急激な燃焼反応によるものであるが、衝撃波を発生させない程度に反応が比較的緩やかな爆燃(deflagration)と燃焼反応が極めて急激で衝撃波の発生を伴う爆轟(detonation)とに分類される。爆轟による衝撃波の圧力の最大値は、爆燃で生じる気圧波(有限振幅音波)による圧力に比べて1桁以上大きな値を示すことが知られている⁵⁾。また、高压容器が破裂した場合には、高压で圧縮された水素が瞬時に大気中に解放されることによって一気に膨張して衝撃波が生じ、それによる圧力(衝撃圧力)が伝搬する。従って、施設の設計にあたっては、水素爆轟および高压容器破裂に伴う圧力伝搬に対する安全性が求められる。Fig. 1 にここで述べた水

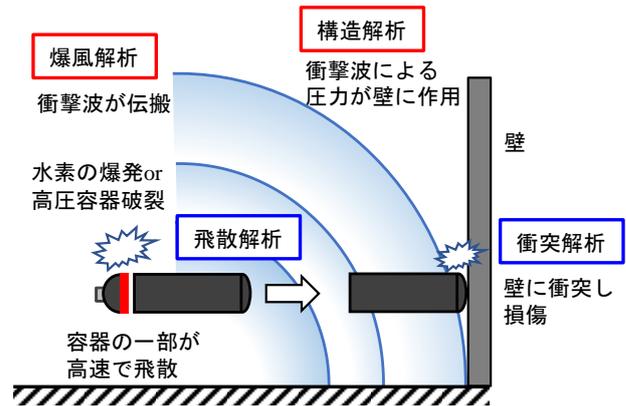


Fig. 1 水素関連施設で想定される現象例
Examples of Phenomena Expected
in Hydrogen Related Facilities

素関連施設の設計で想定すべき現象の概念図を示す。これらの現象について数値解析を用いて予測するためには、まず、圧縮流体解析により水素爆轟あるいは高压容器破裂の衝撃波の圧力伝搬を計算する。次に、得られた圧力の時刻歴を外力に用いて、壁等の構造物の応答および損傷状況を解析的に評価する。

一方で、高压容器破裂時には、容器の一部が破片となって非常に高速で飛散し、壁面に衝突・損傷することも考えられるため、破片の衝突に対する安全性も考慮する必要がある。高压容器破裂に伴う破片の飛散速度は、压力容器の容量や破裂時の容器内圧力値等に依存する。また、破片が衝突した場合の壁の損傷の程度は、飛散速度だけでなく、破片の大きさや質量、衝突の仕方等によって大きく変わる。従って、こうした現象を予測するためには、まず、高压容器の破裂・飛散現象を対象に解析を実施して破片の飛散状況および飛散速度を把握し、次に得られた結果を用いて、壁面への衝突解析を実施することにより壁面の損傷状況を評価する。

3. 解析方法とその精度検証

3.1 水素爆発実験

爆風圧を受ける構造物に対するシミュレーション技術の検証用データ取得のため、屋外での水素爆発実験を実施した¹⁾。本実験は、NEDOの委託研究の一環として実施したものである。Fig. 2 に実験レイアウトを示す。この実験では、開放空間に水素と空気の混合気体(水素濃度

30%、体積 37m³) を充填した水素テントと RC 壁試験体とを配置し、水素爆轟時の試験体の応答性状を測定した。試験体は配筋量、壁厚、壁高さを変えたものを製作し、受圧力や水平変位、加速度、損傷状況、地盤面の圧力等を計測した。Photo 1 に実験時に撮影した爆発の瞬間を示す。本実験により、3.2 節で後述する爆風圧の伝搬特性とともに、爆風圧を受ける独立 RC 壁の応答に関して、弾性範囲から崩壊までの広範囲なデータが得られた。

3.2 再現解析による爆風・構造解析手法の精度検証

水素爆轟時の圧力伝搬および RC 壁の応答性状の予測精度について検証するため、爆発実験を対象とした数値解析を実施した。解析領域と圧力測定点の位置を Fig. 3 に示す。爆風解析は衝撃解析コード Autodyn2D を用い、z 軸を対称とする円筒座標系上での 2 次元の解析を行った²⁾。実験および解析で得られた地盤面の各測定点における圧力の時刻歴波形の比較を Fig. 4 に示す。衝撃波の到達時間、ピークの位置、ピークだけでなく、壁から反射した衝撃波の影響についても実験結果を良好に再現している。また、試験体中心の圧力についても、概ね対応する結果が得られた。

次に、大林組が開発した非線形 FEM 解析ソフト FINAL[®]を用い、爆風圧を受ける RC 壁に対する動的応答解析を実施した³⁾。Fig. 5 に解析結果の一例として、応答変位の時刻歴の比較を示す。壁の内部粘性減衰 0.1%とし、ひずみ速度効果を考慮することにより、最大応答変位や波形の振幅について、概ね実験と良好に対応する結果が得られた。以上より、衝撃解析コード Autodyn、非線形 FEM 解析ソフト FINAL を用い、適切に条件設定を行うことで、水素の爆轟実験により得られた衝撃波の圧力伝搬特性、および爆風圧を受ける RC 壁の非線形応答性状を精度良く再現できることが確認できた。

3.3 タンク破裂実験

次に、高圧容器破裂時の飛散物の挙動に関する検討について解説する。高圧タンク破裂時のタンクの飛散挙動の把握および検証用データ取得のため、タンク破裂実験

を行った。実験の概要を Fig. 6 に示す。耐爆チャンバー内部に切れ込みを入れた鋼製タンクを配置し、ヘリウムガスを加圧注入することでタンクを破裂させた。飛散したタンクを高速度カメラで撮影し、その飛散速度を測定するとともに、飛散方向下流側に鋼製壁を配置し、タンク衝突時の壁の損傷状況を確認した。タンクの飛散状況の一例を Photo 2 に示す。実験では、タンクの切込み深さを変えることにより破裂圧の異なるケースを実施しており、得られた飛散速度の最大値は 191.0m/s であった。



Photo 1 水素爆発 (爆轟) の瞬間
Snapshot of Hydrogen Gas Explosion

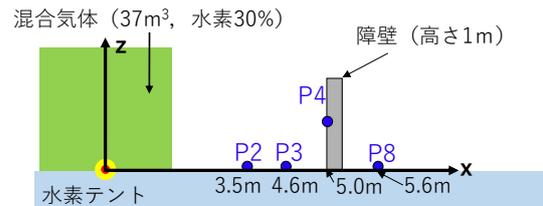


Fig. 3 解析領域

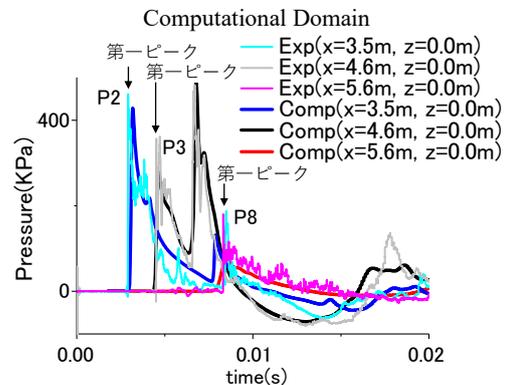


Fig. 4 圧力特性の比較

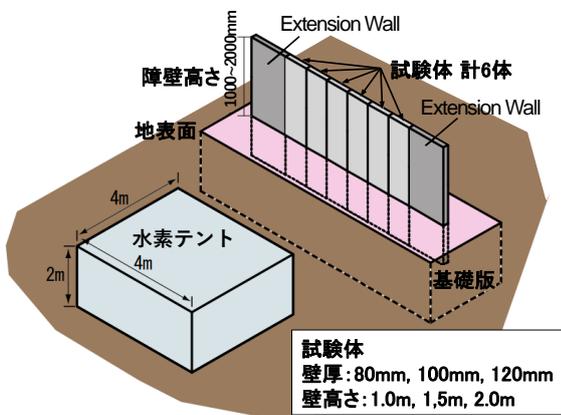


Fig. 2 水素爆轟実験レイアウト

Layout of Hydrogen Gas Detonation Experiments

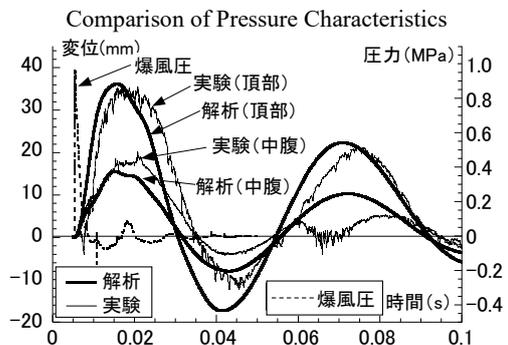


Fig. 5 応答変位の時刻歴

Time Histories of Response Displacement

3.4 再現解析によるタンク破裂・衝突解析手法の精度検証

タンク破裂後の破片の飛散および鋼製壁衝突後の損傷状況の予測について検証するため、実験を対象とした再現解析を実施した。タンクの飛散解析については、衝撃解析コード Autodyn3D を用い、解析負荷低減のためタンク周辺のみモデル化した。タンク破裂解析の例を Fig. 7 に示す。適切な解析条件の設定が必要であるが、タンクの飛散速度について概ね実験と整合する結果が得られた。

次に、タンクの一部が高速で飛散し、鋼製壁に衝突した際の壁の損傷に対する FEM 解析の再現精度を検証した⁴⁾。解析モデルを Fig. 8 に示す。解析には非線形有限要素プログラム Abaqus/Explicit 2017 を使用し、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検討した。鋼製壁の損傷状況について、実験と解析の比較結果を Fig. 9 に示す。鋼材強度のひずみ速度への依存性を考慮することにより、非常に高速な飛翔体の衝突現象を、解析によって精度よく再現することが確認できた。

4. 適用事例

ここでは、第3章で検証した爆風・構造解析手法について、実際に適用した事例を示す。

4.1 RC 構造物を対象とした爆風・構造解析事例

水素関連施設において、水素爆発時の圧力伝搬特性および RC 造構造物の損傷状況・応答特性を把握するため、爆風解析と構造解析を連携させた検討を行った。爆風解析について、解析モデルおよび計算格子を Fig. 10 に示す。ここでは室中心において①高圧圧力容器 105MPa が破裂、②濃度 30% の水素混合気体 55m³ が爆轟の 2 パターンを設定し、爆風の影響を低減させることを目的とした爆風放散孔の効果について検証するため、屋根の有無を変数とした解析を実施した。Fig. 11 に圧力容器破裂時の壁面のインパルスの分布を示す。放散孔を設けない屋根有りのケースでは、反射の影響により、屋根無のケースに比べてインパルスが顕著に増大した。

次に、爆風解析によって得られた衝撃圧力の時刻歴を用いて、RC 造壁および屋根を対象とした動的非線形 FEM による時刻歴応答解析を実施した。ここでは、爆風解析での解析変数に加え、壁厚を 500mm(配筋:D25@100 ダブル)と 300mm(D19@100 ダブル)の 2 ケース設定した。また、計算において室を構成する壁および屋根躯体は積層シェル要素で表現し、鉄筋は要素内の鉄筋層としてモデル化している。Fig. 12 に圧力容器破裂ケースにおける最大変位時の損傷状況を示す。放散孔を設けない屋根有りの場合には、密室空間となることで衝撃圧力が増幅し、屋根面が大きな損傷を受けた。

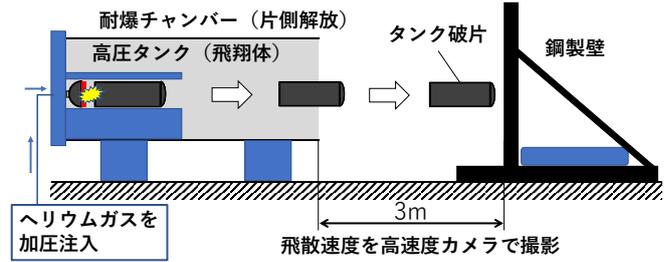


Fig. 6 タンク破裂実験装置の概要

Outline of Tank Burst Tests

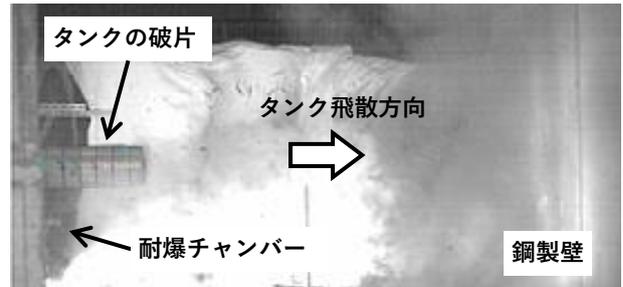


Photo 2 破裂による飛散開始直後のタンク
Flight of Tank Fragment Immediately after Burst

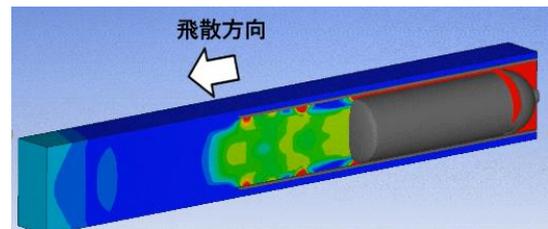


Fig. 7 タンク破裂解析例
Analysis Example of Tank Burst

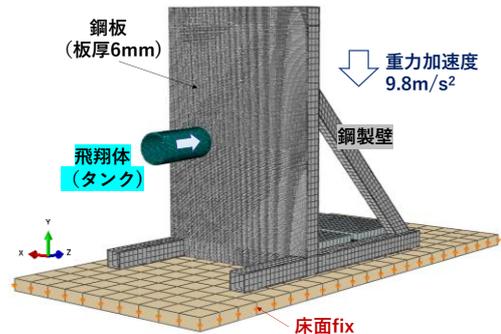


Fig. 8 鋼製壁へのタンク衝突解析のモデル概要
Model for Collision and Damage Simulation

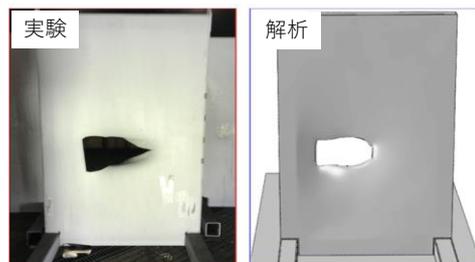


Fig. 9 鋼製壁の損傷状況 (実験(左)および解析(右))
Fracture of Steel Walls

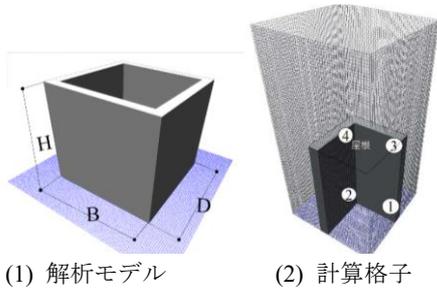
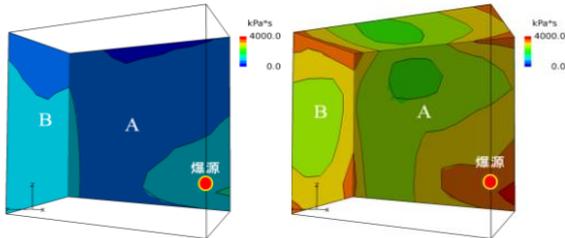
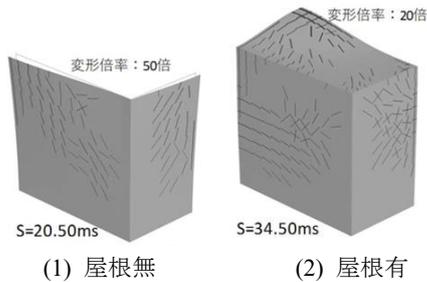


Fig. 10 解析モデル (B=6m, D=11m, H=5.5m)
Analysis Model



(1) 屋根無 (放散孔有) (2) 屋根有 (放散孔無)
Fig. 11 壁面のインパルスの分布 (高压容器破裂)
Distributions of Impulse on the Wall



(1) 屋根無 (2) 屋根有
Fig. 12 ひび割れ損傷状況 (最大変位時)
Cracking Conditions

4.2 鉄扉への飛翔体衝突解析事例

高压容器を扱う工場等では、容器破裂に起因する鉄扉や構造壁に対する飛翔体(容器の破片等)の衝突が懸念され、これらに対する安全設計を行う必要がある。そこで、鉄扉への飛翔体高速衝突時の損傷状況について検討するため、FEM 解析を実施した。解析モデルを Fig. 13 に示す。解析では、厚さ 12mm の SS400 鋼板 2 枚を下地材 (194*150*6*9@300mm) で接合した鉄扉(SS400)に、鋼製压力容器の半分(SS400, 質量 35kg)が 350m/s の速さで衝突する場合を想定した。解析変数として、水平下地材が無いケース T1 と、水平下地を追加したケース T2 を設定した。Fig. 14 に鉄扉の破壊状況を示す。水平下地が無い場合(T1) は、压力容器が鉄扉を貫通して口金部が破断し、飛散した状況が確認できる。一方、水平下地が有る場合(T2) は、鉄扉に大きな変形が生じるが、压力容器が鉄扉を貫通せず完全に静止した。

5. おわりに

本報では、水素関連施設の安全設計を目的として実施

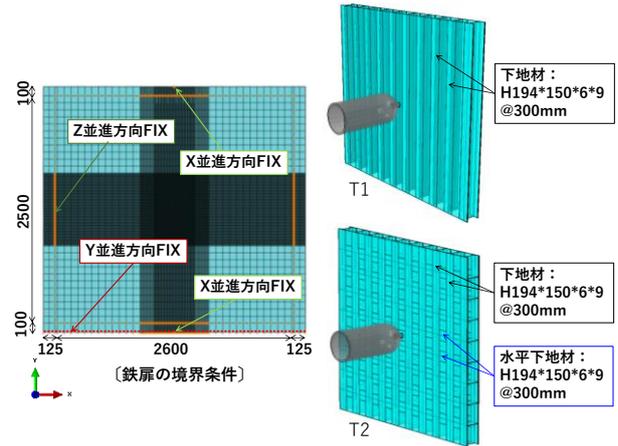
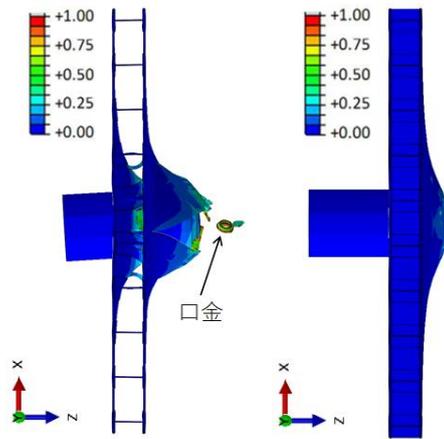


Fig. 13 解析モデル
Analysis Model



(a) T1 (水平下地無し) (b) T2 (水平下地有り)

Fig. 14 破壊状況：相当塑性ひずみ分布
Fracture Status : Distributions of Equivalent Plastic Strain

した、検証用データ取得のための実験および解析技術について紹介した。解析技術を適切に組み合わせることで、水素爆発や高压容器破裂に伴う構造物への影響を精度よく評価できることが確認された。今後は、水素関連施設の設計に活用していく予定である。

参考文献

- 1) 米澤健次他：水素爆風圧を受けるRC壁の応答性状に関する実験的研究, 大林組技術研究所報, No.69, 2005
- 2) 小野佳之他：水素爆風圧の伝搬特性に関する数値シミュレーション, 大林組技術研究所報, No.70, 2006
- 3) 米澤健次：水素爆風圧を受けるRC壁の応答性状に対する動的非線形FEM解析, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, pp.127-133, 2006
- 4) 平田寛他：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, 大林組技術研究所報, No.85, 2021
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成13年度成果報告書NEDO-WE-NET-0102