特集

いろいろな風

水素ガス爆発による爆風

Blast Wave Propagation of Hydrogen Explosion

野津 剛^{*1} 日比一喜^{*2}

Tsuyoshi NOZU, Kazuki HIBI

1. まえがき

「低炭素社会の実現」に向けて燃料電池自動車 (FCV) および水素ステーション (FCV に水素ガスを供給する施設) の普及が目指されており、水素ステーションの安全性確保は重要な課題となっている^{1), 2), 3), 4)}。特に、水素ガスは燃焼速度の速い物質であるため、水素ステーション内で漏洩水素に着火・爆発した場合、非常に強い爆風圧が発生することが予測される。そのため、周辺への爆風圧の影響を確認するとともに、設備機器室の壁や防護壁の破壊による飛散を防ぐために RC 壁の健全性についても確認する必要がある。

著者らは、防護壁に着目した水素ガスの爆発実験を実施するとともに、これを対象とした爆風シミュレーションおよび防護壁の応答シミュレーションについても実施してきた^{5), 6)}。ここに、その成果をまとめたものを紹介する。なお、ここに紹介する一連の研究は新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO) の「水素安全性利用等基盤技術開発」事業として委託を受けて実施したものである。

2. 爆発実験

2. 1 爆発実験の概要

爆発実験を実施した時の状況を図 1 に示す。水素濃度 30%の空気との混合ガス 5.27m³ をポリエチレンフィル

ムを用いたテント内に一様に充填させ、これに着火することにより爆発を発生させる。ガスの爆発現象には、燃焼速度が音速以下の爆燃 (deflagration) と、音速を超え衝撃波を伴う爆轟 (detonation) とが知られている。屋外では通常、爆燃になるとされているが、半閉鎖空間や障害物の影響を受けて爆燃から爆轟へ遷移する現象 (DDT) が実験や CFD により明らかにされている⁴⁾。本爆発実験では、爆燃、爆轟のそれぞれの爆発現象を引き起こすために、爆燃実験では電気火花による着火を、爆轟実験では爆薬による着火をおこなう。また、テント端から 4m (あるいは 2m) の距離に幅 10m、高さ 2m、

図 1 実験状況

*1 清水建設(株) 技術研究所 主任研究員
Senior research engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation.

*2 清水建設(株) 技術研究所 リサーチフェロー
Research fellow, Institute of Technology, Shimizu Corporation.

表 1 実験ケース

Test	Wall Range (m)	H ₂ (%)	Ignition	Temp. (°C)	Wind (m/s)
Case1	4	30.0	Spark	27.2	2.2
Case2	4	30.0	Explosive	29.8	0.4
Case3	2	30.3	Explosive	22.4	1.3

厚さ 0.15m の鉄筋コンクリート造の防護壁を設置する。実験ケースは表 1 に示すとおりである。

実験データの計測は、防護壁に埋め込んだ圧力センサー (P2～P7)、防護壁背面に設置した変位計 (D1～D6)、鉄筋に貼ったひずみゲージ、地面上に設置した圧力センサー (P1, P8, P9) を用いておこなった。防護壁面および地表面の各センサーの設置位置を図 2 に示す。なお、計測のサンプリング時間は 1.0×10^{-6} sec である。

図 2 圧力計および変位計の設置位置

2. 2 実験結果

図 3 に Case1 (爆燃) および Case2 (爆轟) における爆発実験のビデオ映像のフレーム写真を示す。テント (爆心) から 100m 以上離れた場所で実験の実施状況を見学したところ、爆燃実験 (Case1) では火炎を確認した後、軽い風圧が感じられた。一方、爆轟実験 (Case2) では強い風圧を感じた後、大音響とともに地響きが生じ、土埃が舞い上がるのが確認された。

図 4 に防護壁の表面の測定点 P2、裏面の測定点 P5 にかかる爆風圧の時刻歴波形を力積 (圧力の累積値) とともに示す。爆燃 (Case1) の場合は、防護壁の表・裏面

(a) 爆燃実験 (Case1)

(b) 爆轟実験 (Case2)

図 3 爆発実験の高速ビデオ映像のフレーム写真

ともに正弦波に近い波形が得られており、緩やかに圧力が上昇した後、正圧よりやや強めの負圧へと転じている。また、防護壁裏面の圧力は表面の圧力の 1/2～1/3 程度と

図4 圧力および力積の時刻歴波形 (左: Case1 (爆燃), 右: Case2 (爆轟))

なっており、防護壁挙動を正確に把握する際には裏面の圧力も無視し得ないほどの力を持っていると推測される。一方、爆轟 (Case2) の場合は、防護壁の表面では不連続な立ち上がりの急峻な正のピーク値を取った後、緩やかに負圧に移行しているが、防護壁の裏面では鋭いピーク値はみられない。表面の圧力は爆燃時の 100 倍程度とかなり大きくなっているが、正の圧力の作用時間は防護壁の固有周期 (約 10Hz) と比べてかなり短く、防護壁の応答は、爆風圧の絶対値よりも力積に支配されると予想される⁷⁾。その力積は、防護壁の表面では爆燃時の 6 倍程度に止まっている。また、爆轟時の防護壁の表面と裏面の圧力差が非常に大きいことが確認される。

図5 測定点 D1, D2 の応答変位の時刻歴波形

図5に防護壁の中心部の測定点 D1, D2 の応答変位の時刻歴波形を示す。爆燃 (Case1) の場合は、防護壁の 1 次の固有周期で振動している様子が確認できる。一方、爆轟時 (Case2) の変位は、爆燃時の 5, 6 倍程度であり、力積は防護壁の挙動に対して支配的であることを裏付けている。また、応答波形から高次の振動モードで揺れていることも確認できる。

図6に離隔距離とピーク圧力との関係を既往の実験結果²⁾とともに示す。それぞれの爆発形態によって、ほぼ一直線上にプロットされることが確認できる。また、爆轟は爆燃と比べて爆心近傍場で 2 オーダー、遠方場で 1 オーダー圧力が大きくなっている。さらに、防護壁の効果は、爆轟の場合の方がより効果的であることがわかる。

図6 離隔距離とピーク圧力の関係

:Shrinkage cracks ——— :Cracks after Case1 ——— :Cracks after Case2 ——— :Cracks after Case3

(a) 防護壁表面

(b) 防護壁裏面

図 7 爆発実験後のひび割れ分布図

図 7 に実験後の防護壁のひび割れ状況を示す。爆轟実験後にひび割れが発生している様子が確認できる。ひび割れは防護壁高さの 1/2 の高さで水平に生じていることがわかる。

3. 数値シミュレーション

2. で実施した爆発実験について、爆風伝播状況および防護壁の変位挙動を把握するため、数値シミュレーションを実施する。

3. 1 数値解析の概要

爆風圧の計算は、3次元圧縮性オイラー方程式を用いる。計算領域 $22\text{m} \times 20\text{m} \times 12\text{m}$ の解析空間をとり、壁面上に作用する爆風圧の時刻歴波形を求めた。解析空間は図 8 に示すとおりである。計算格子は $221 \times 201 \times 61$ 、 $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{m}$ 、 $\Delta z = 0.2\text{m}$ の等間直交隔格子を用い、時間刻みは、爆燃時 (Case1) は $\Delta t = 2.35 \times 10^{-4}\text{ sec}$ 、爆轟

時 (Case2 および Case3) は $\Delta t = 5.88 \times 10^{-5}\text{ sec}$ とした。なお、本解析では燃焼解析を行っていないため、火炎伝播速度が大きい爆轟では、最初の計算ステップに燃焼によって発生する全てのエネルギーが放出されるものとし、また、火炎伝播速度が比較的小さい爆燃に対しては燃焼によるエネルギーをある時間幅で緩やかに放出させるものとした⁶⁾。

防護壁の応答計算は、有限要素法による汎用構造解析システム DIANA (TNO 社) により実施した。解析モデルは、左右の対称性を考慮して 1/2 モデルとして脚部は固定条件とする。四角形 ($200\text{mm} \times 200\text{mm}$) のシェルを用いた有限要素モデルとして、コンクリート部は厚さ方向に 9 点の積分点を設け、鉄筋は実断面積と等価な面積を持つシェル要素として鉄筋位置に配置した。ここで用いる材料特性は、材料試験結果により設定したコンクリート及び鉄筋の復元力特性を用いている⁸⁾。なお、外力は爆風伝播解析から得られた防護壁の表面及び裏面の圧力の時刻歴データを用いる。時間刻みは 0.5ms 、時間積分は Newmark- β 法とした。

3. 2 解析結果

図 9 に Case2 を対象とした爆風伝播解析による圧力コンターおよび圧力等値面の時間変化を示す。爆発直後では、爆風圧 (衝撃波) は半球状に急激に広がり、防護壁に到達すると、防護壁面上で反射・回折が生じている。防護壁前面では強い正圧のすぐ直後に周囲よりも強い負圧が発生しており、防護壁近傍では複雑な分布性状になっている。また、爆風圧は空間的に広がるにつれ、急激

図 8 解析空間

図9 爆轟時 (Case2) の圧力および等値面の時間変化

に圧力が低下している様子も確認できる。

図10, 図11に防護壁面 (P2, P4, P5, P7) にかかる爆風圧の時刻歴波形を示す。爆燃, 爆轟ともに防護壁の表面または裏面の中心部と端部といった測定位置の違いによる時間ずれなど実験結果を良く再現している。特にCase2において, 防護壁裏面の測定点P7では, 爆心位置に近いP5よりも圧力が高くなる現象が実験で得られているが, 数値解析でも再現できていることが確認できる。これは, 防護壁の上部を回折する波と, 側面を回折する波とが重なることに起因する。

防護壁の応答変位の時刻歴波形を爆発実験結果と数値計算結果とを比較して図12, 図13に示す。Case1では3波目辺りで位相のずれが若干見られるが, 振幅値は良く一致している。一方, Case2は最初に作用する衝撃的な圧力波による応答変位を良く捕らえており, 実験結果に見られるドリフトを考慮すれば, 壁の挙動を良く再現していると言える。

Case2の数値解析による防護壁表側のコンクリートひびきと変位状況を図14に示す。図中の色の濃い部分はひび割れの発生するひびきレベルである。解析結果によると, 防護壁の脚部と1/2高さで水平方向にひび割れが発生しているが, 爆発実験では, 防護壁脚部のひび割れが

図10 爆燃時 (Case1) の圧力の時刻歴波形

図11 爆轟時 (Case2) の圧力の時刻歴波形

図 12 爆燃時 (Case1) の防護壁の応答変位 (D2, D6)

図 13 爆轟時 (Case2) の防護壁の応答変位 (D2, D6)

図 14 爆轟時 (Case2) における防護壁表面のコンクリートひずみと変位挙動の時間変化

ほとんど観察されなかった。この要因として、鉄筋の密度が低いことなどから、実験では固定端となっていなかったためと推察される。

5. まとめ

爆発実験を実施するとともに、数値シミュレーションにより爆発実験を再現した。爆燃、爆轟という燃焼形態の異なる場合の壁面に働く爆風圧の時刻歴波形など、初期条件をうまく与えることで、精度良く評価できることを確認した。また、衝撃的な爆風圧が壁に作用した場合でも、爆風圧を精度良く再現できれば、応答計算により壁の挙動を精度良く評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 平成 14 年度 NEDO 成果報告書「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 第 II 期研究開発、

タスク 2 安全対策に関する調査・研究」, NEDO-WE-NET-0202, 平成 15 年 3 月

- 2) Groethe, M., Colton, J., Chiba, S. and Sato, Y., "Hydrogen Deflagrations at Large Scale", 15th World Hydrogen Energy Conference, 2004.
- 3) 平成 15 年～平成 16 年度 NEDO 成果報告書「水素安全利用等基盤技術開発－水素インフラに関する研究開発－水素インフラに関する安全技術研究」, 平成 17 年 3 月
- 4) 清水建設, 米海軍研究所, 成蹊大学, NEDO 水素に関する共通基盤技術開発－国際共同研究, 2006.
- 5) Nozu, T., Tanaka, R., Ogawa, T., Hibi, K. and Sakai, Y., International Conference on Hydrogen Safety (ICHS), 2005
- 6) 野津, 日比, 小川, 「水素爆発による爆風シミュレーション」, 第 18 回 風工学シンポジウム, 2004
- 7) 梅村, 松島, 「衝撃に対する一質点の線径応答」, 日本建築学会論文報告集, 第 103 号, 1964
- 8) 酒井, 稲葉, 野津, 小川, 「水素安全利用に関する研究 (その 2) 防護壁の応答シミュレーション」, 日本建築学会大会, 2005