

水素爆発時の周辺構造物への影響 障壁まわりの圧力特性に関する数値解析

小野佳之, 諏訪好英, 米澤健次

(株)大林組 技術研究所

204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640

Effects of the Hydrogen Explosion on Peripheral Structures Computational Simulation of the Pressure Characteristics by the Hydrogen Explosion

Yoshiyuki ONO, Yoshihide SUWA and Kenji YONEZAWA

OBAYASHI Corporation, Technical Research Institute

4-640 Simokiyoto, Kiyose-shi, Tokyo 204-8558, Japan

The purpose of our research is to construct the numerical model which can simulate the pressure characteristics and the damage of the RC-structure subjected to the hydrogen explosion. In order to validate a numerical model, we performed a hydrogen explosion tests performed. In part 1, we show the applicability of Autodyn2D to the phenomenon of hydrogen explosion. The computed results are compared with the experimental data. Next, the effects of the protect wall on the characteristics of the pressure propagation as a function of the height, the location of the wall and the height of the explosion source are clarified by using Autodyn.

Keywords: Hydrogen explosion test, Autodyn, Shock wave, Detonation

1. はじめに

水素は次世代エネルギーとして期待されており、現在各地で水素供給ステーションなどの実証用プラントの建設が進められている。ただし、水素は引火性・爆発性の強い気体である。そのため、水素スタンドから水素が漏洩し、万一着火した場合の人体や周辺建物への影響に関して把握しておくことは重要である。このような水素爆発現象を把握する手段として、コストや安全性の面から、数値シミュレーションが挙げられるが、解析結果の妥当性を検証するための十分な実験データが得られていないのが現状である。

そこで本研究では、水素爆発時の周辺への圧力伝播特性や構造物の損傷状況・応答特性を予測するための解析手法の構築を目的とし、検証用データ取得のための爆発実験（爆轟を対象）を実施した[1]。本報では、まず、その1として、解析コード「Autodyn 2D/3D」を用いて、同実験をターゲットとした数値解析を行い、圧力伝播特

性に関して爆発実験結果と比較することで、解析コードの適用性を検討する。

一方、水素爆発時の爆風の作用を低減させる方法として、障壁の設置が挙げられる[2]。しかし、爆発実験においては、ケースや測定点の数に限界がある。そのため、地上爆発を想定した時の地盤面の爆風圧特性に着目したものがほとんどであり、上空に対する障壁の効果に関しては十分な検討が行われていない。さらに、比重が十分に小さい水素の爆発を想定した場合、地上爆発時ばかりではなく空中爆発時の障壁の効果についても把握しておくことは重要であると考えられる。そこで、本報では、数値解析により、障壁の設置位置や高さを変えたときの地上（～3m）に対する爆風圧低減効果について検討するとともに、地上爆発、空中爆発時の障壁の効果について比較を行う。

2. 水素爆発実験

米国 SRI International の協力を得て、カリフォルニア州の砂漠地帯で爆発実験を実施した[1]。水素テントの近傍に壁厚、配筋量を変化させた 6 枚の試験体を並べて



図1 爆発実験状況

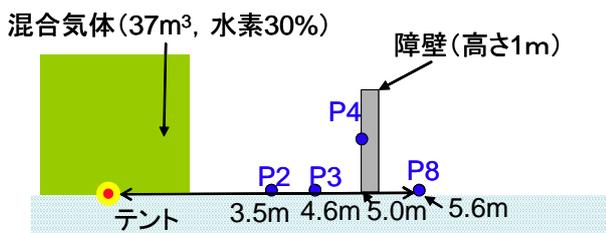


図2 圧力測定点の位置 (高さ 1m のケース)

表1 計算条件

解析ソフト	Autodyn2D	
解析領域	12m×12m	
格子分割数	125×125	
境界条件	z 軸	軸対称
	地面	反射境界条件
	その他	流出境界条件

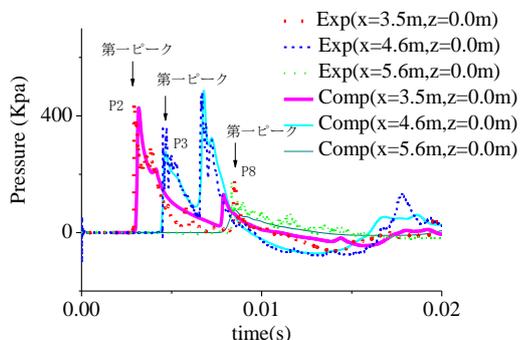
設置し(図1)、爆発中心から試験体までの距離を一定とし、壁高さ 1m、1.5m、2m と変化させて合計 3 回の爆発実験を行った。水素混合気の爆発の条件はすべての実験で共通とし、体積 37m³、水素濃度 30% (化学量論比で最も爆発力が大きくなる濃度) とし、少量の C4 爆薬を用いて爆轟を生じさせた。圧力の測定点の位置を図2に示す。

3. 解析手法

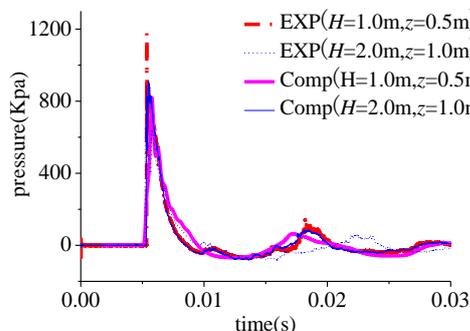
解析コードは衝撃解析コード Autodyn2D を用いた。Autodyn は、高速衝突問題や火薬の爆発現象など衝撃解析分野で広く用いられており、多くの実績を有している。しかし、水素の爆発現象に関しては、火薬のケースと設定する気体の比熱比が大きく異なるなど、Autodyn の適用性は十分には明らかではない。そこで、水素の爆発時の圧力伝播特性に関して解析結果と実験結果の比較を行うことで Autodyn の適用性を検討する。本計算では、水素と空気の前混合気の組成を H₂: 30%、O₂: 14.65%、N₂:55.35%、300K、1atm (101.3kpa) の初期状態にあるものとし、CET93 により得られた爆轟特性パラメータを用いた。運動方程式は予混合気体と空気の種類流体ともに Euler 方程式を用い、状態方程式として予混合気体には JWL 方程式、空気には理想気体の状態方程式を採用した。

4. Autodyn2D の水素爆発現象の予測精度の検証

本爆発実験[1]を対象とした数値解析を行う。水素濃度 30%の混合気体を 37m³のテント (実験では直方体テ



地盤面 (爆源からの距離 3.5m, 4.6m, 5.6m)



壁中心 (壁高さ 1.0m, 2.0m)

図3 圧力伝播特性の比較 (x: 爆源からの距離、z: 地上高さ、H: 障壁の高さ)

ト 4.3m×4.3m×2.0m、解析では、円筒形テント 3.14×2.43×2.0=37m³ に充填させた。表 1 に計算条件を示す。境界条件は地盤面および障壁を剛境界 (反射) 条件、その他は流出境界条件とした。点火位置は地盤面のテント中心とし、点火位置から 5m の位置に壁を設置した。なお、本報では高さ 1m の障壁のケースを中心に報告する。

実験[1]および解析で得られた各測定点における圧力の時刻歴波形の比較を図 3 示す。到達時間、ピーク的位置、ピーク値など両者は一致していることが判る。特に、爆発力が大きいため P3 の位置で、衝撃波による第一ピークの後に、反射によりさらに強い圧力ピークが生じる特性など計算結果と実験結果[1]の波形は良く対応している。さらに、壁中心の圧力についてもほぼ対応していることが確認できる。

5. 障壁の効果に関する検討

これまで水素爆発時の障壁の効果に関しては、爆発実験により障壁背後の爆風圧の低減効果などが確認されているが、地上爆発を想定し、参照点を地盤面に設定したものがほとんどである[2]。そこで、本解析では、水素爆発時の障壁後方の圧力の空間的な分布に着目し、まず、

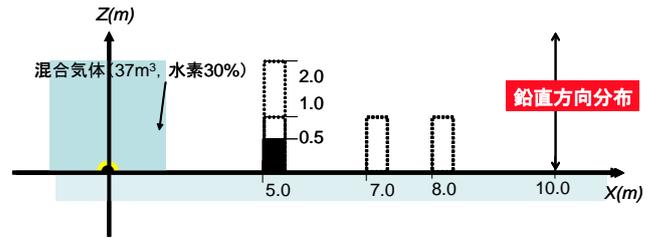


図 4 解析モデル 1 (地上爆発)

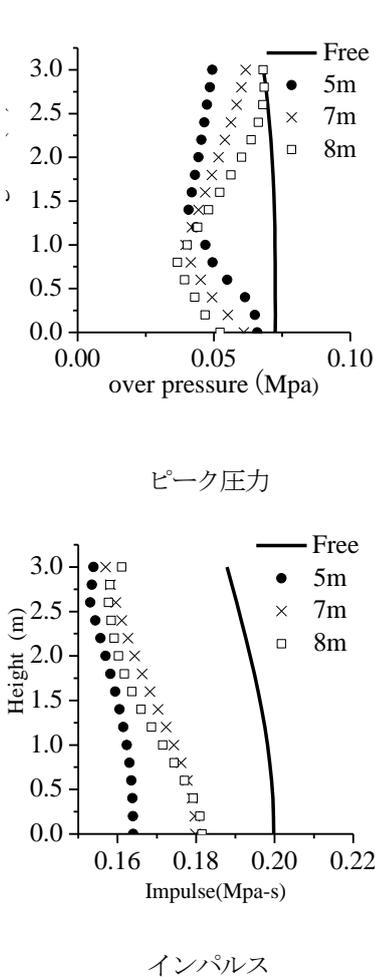


図 5 障壁位置を変化させたときの x=10 における圧力、インパルスの鉛直分布 (地上爆発、障壁高さ 1m)

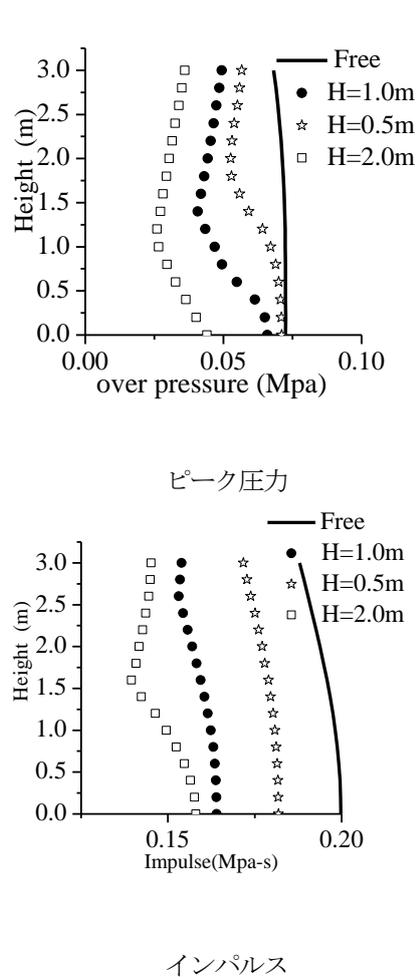


図 6 障壁高さを変化させたときの x=10 における圧力、インパルスの鉛直分布 (地上爆発、障壁位置 5m)

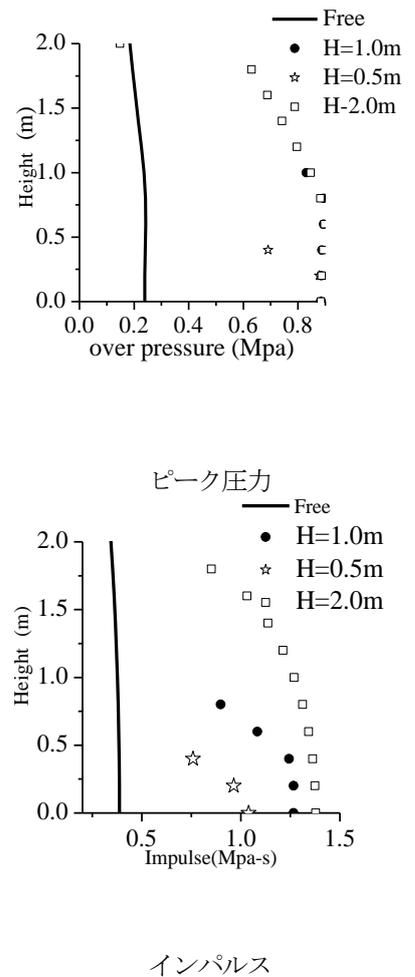


図 7 障壁全面のピーク圧力とインパルスの分布 (地上爆発、障壁位置 5m)

地上爆発時に障壁の設置位置、高さを変化させ、爆風圧低減効果について考察する。次に、地上爆発時と空中爆発時の障壁の効果の違いについて比較・検討を行う。

5. 1 障壁の設置位置、高さを変化させたときの圧力伝播特性

高さ 1m の障壁の位置を爆源から 5m、7m、8m、距離 5m の位置の障壁の高さを 0.5m、2m (図 4) と変化させて、軸対称条件で爆轟を対象として解析を行った。

障壁 (高さ 1m) の位置を変化させた時の、爆源から 10m の位置 (参照点) におけるピーク圧力、インパルスの鉛直分布を図 5 に示す。障壁の位置を変化させると、高さ約 1m (障壁高さ) 以下では、障壁に参照点に近いほど、参照点のピーク圧力が低減している。しかし、1m (障壁高さ) 以上の高さでは、障壁が爆源に近いほど低減効果が認められ、さらにインパルスに関しても、障壁が爆源に近い 5m のケースで大きな低減効果が得られている。

次に、障壁の高さを変化させた場合 (図 6) を見てみると、障壁が高いほど、後方でピーク圧力、インパルスともに大きく低減する傾向がある。よって、高い障壁

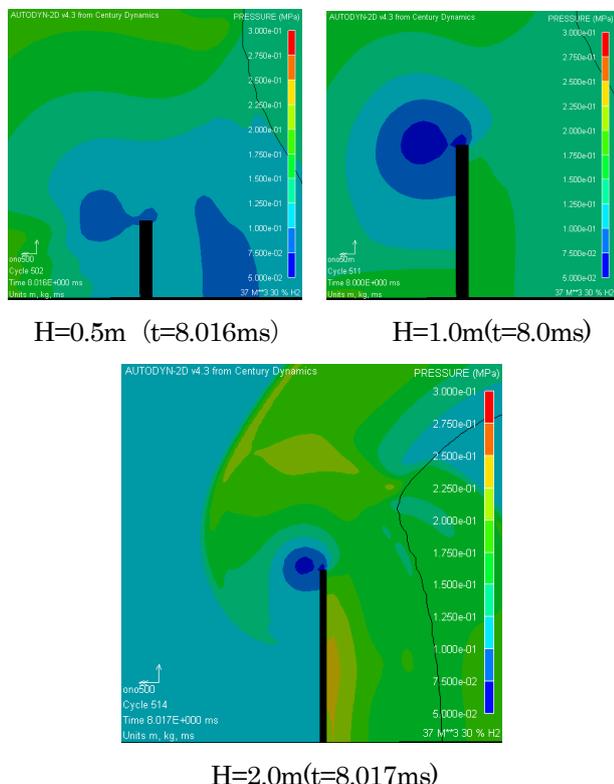


図 8 障壁まわりの圧力分布の比較

(地上爆発、障壁位置 5m、爆風の向き右から左)

の設置が圧力低減に有効と考えられるが、この場合受圧面積が増えることになる。図 7 に高さを変えたときの障壁前面に作用する圧力およびインパルスの分布を示す。高い障壁ほど受圧面積が増えるが、ピーク圧力の値は障壁高さにほとんど依存していない。しかし、インパルスに関しては、障壁が高いほど大きな値を示している。図 8 に、爆発後約 8ms における各障壁まわりの圧力のコンター図の比較を示す。障壁が高いほど、衝撃波の反射の影響を受け、障壁前面付近の圧力が高くなっていることが判る。したがって、高い障壁の設置により後方への衝撃波の到達時間が遅れるためピーク圧力、インパルスが低減することが期待できるが、障壁が高いほど爆風の反射の影響を大きく受け障壁前面のインパルスが急増するので注意が必要である。

5. 2 地上爆発と空中爆発時の障壁の効果の比較

5. 1 により、地上爆発においては、高い障壁の設置がピーク圧力やインパルスを低減させる傾向が認められた。5. 2 では、空中で爆発し、障壁の斜め上方から圧力が伝播してくる場合の障壁の効果について考察する。

図 9 に示すように、爆源高さを 1.8m、3.6m とし、障壁の位置、高さを変化させて解析を行った。図 10 に、それぞれの爆源において障壁 (高さ 1m) の設置位置を変化させたときの x=10 におけるピーク圧力の鉛直分布を示す。また、図 11 に、障壁 (x=5) の高さによる圧力低減効果の比較を示す。図 10 におけるピーク圧力を見ると、参照点 (x=10) よりもかなり前方に障壁が位置する 5m のケースでも大きな圧力低減効果が認められる。すなわち、障壁よりも高い位置で爆発し、斜め上方から衝撃波が伝播してくる場合でも、障壁の背後ばかりではなく、後方のかなり広い領域で爆風圧が大きく低減している。また、高い障壁は空中爆発においても有効に機能し、上方ばかりではなく地盤付近においてもピーク圧力 (図には示さないがインパルスも同様) を低減させていることが判る。

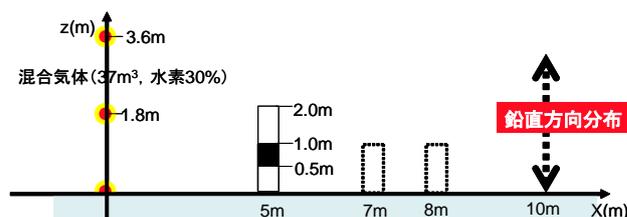


図 9 解析モデル 2 (空中爆発)

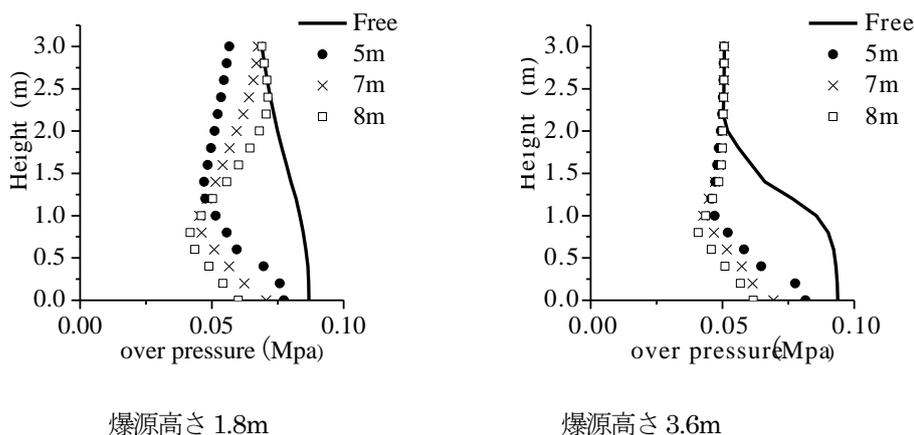


図 10 障壁位置を変化させたときの x=10 における圧力の鉛直分布 (空中爆発、障壁高さ 1m)

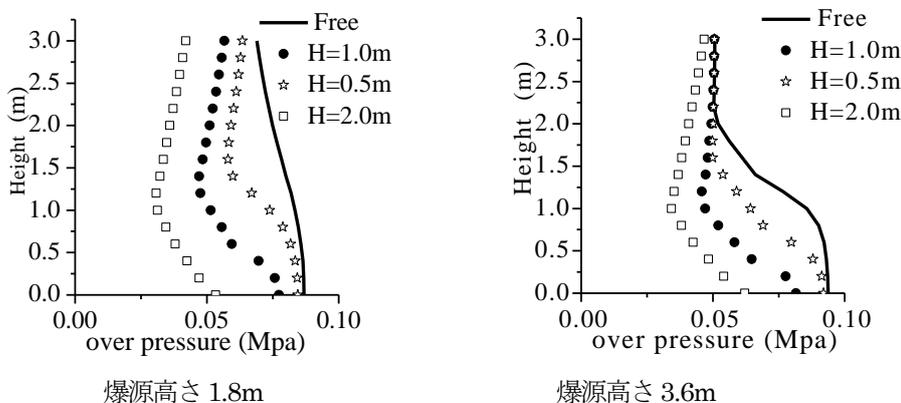


図 11 障壁高さを変化させたときの x=10 における圧力の鉛直分布 (空中爆発、障壁位置 x=5)

図 12 に、地上爆発および空中爆発時の障壁まわりの圧力のコンター図を示す。地上爆発の場合は、伝播してくる衝撃波は地盤の影響をほとんど受けず、障壁上下にほぼ同様な爆風圧が作用している。一方、空中爆発の場合は、障壁に近づいてくる衝撃波は地盤反射の影響を受けており、下部で圧力が增大している。その結果、障壁上部で上方から伝播してくる衝撃波が直接作用した直後に、反射の影響を受けた強い爆風が下部から作用している。したがって、空中爆発時に認められた障壁の圧力低減効果は、上方から伝播する爆風の圧力を低減させたのではなく、地盤で反射し地面に沿って伝播してくる強い爆風圧を低減させることにより得られたものと考えられる。図 13 に示すように、空中爆発においても、地盤の影響を受けて伝播してくる強い爆風が障壁前面で反射するため、長時間反射の影響を受け続ける高い障壁のインパルスが増大している。

以上より、空中爆発時においても、地上爆発のケースで得られた高い障壁の有効性、その際のインパルスの増

大が確認された。

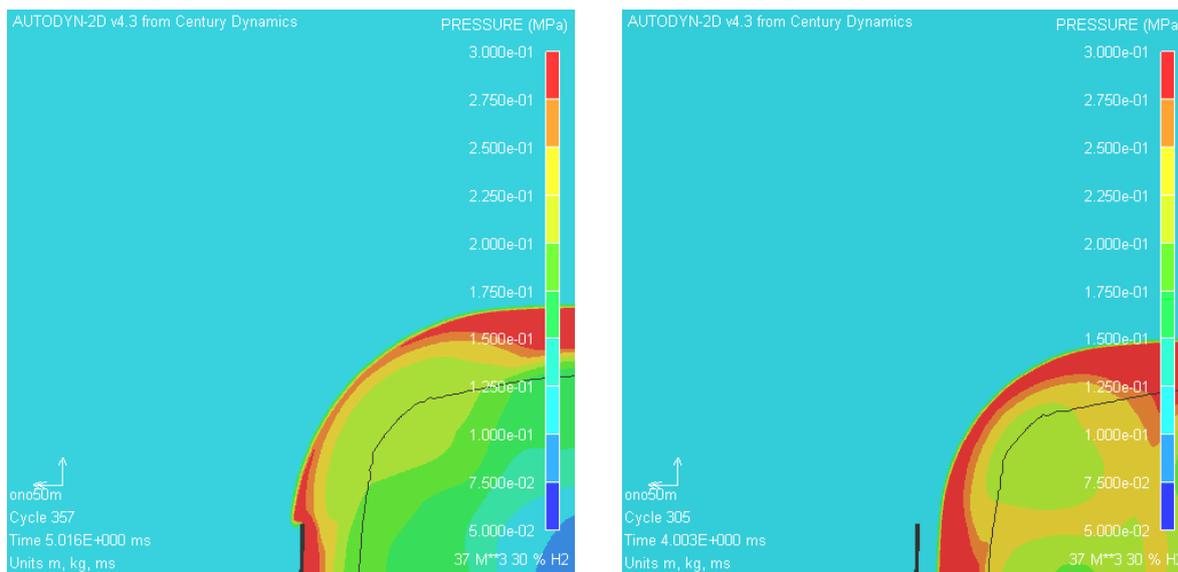
一方、障壁に作用するピーク圧力・インパルスの値は、地上爆発、空中爆発で変化した。図 14 に、爆源高さによる x=5 および x=10 における障壁前面のピーク圧力、インパルスの分布の比較を示す。x=5 では、爆源高さが地上から離れている空中爆発のケースが地上爆発に比べてピーク圧力、インパルスともに小さくなっているのに対し、障壁位置が遠方 (x=10) になると空中爆発のほうが大きい。これは、地上爆発時の衝撃波の影響は後方になるほど大きく距離に応じて減少するのに対し、空中爆発時に地面の影響を大きく受け続ける爆風圧は後方でも減衰し難いためであると考えられる。

6. まとめ

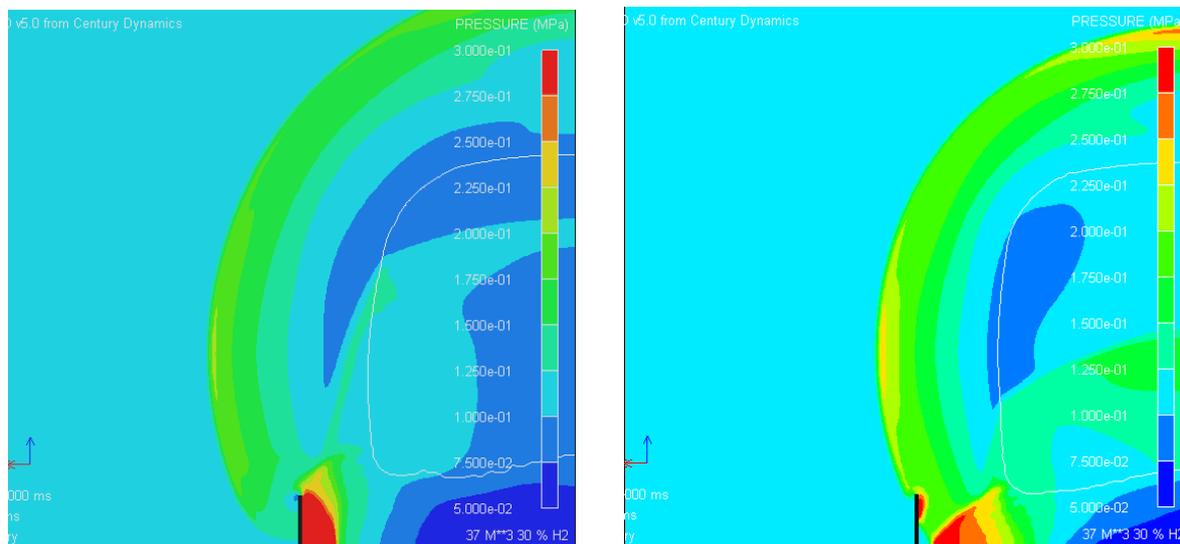
水素爆発時の障壁の効果および RC 壁の爆発圧力および応答挙動を予測する解析手法の構築を目的とし、検証用データ取得のための爆発実験を実施した。爆発実験結

果により得られた圧力特性が用いた解析コード AUTODYN により精度良く再現されることを確認した。次に、障壁の高さや位置を変化させたときの周辺の圧力伝播特性への影響について考察した。その結果、高い障壁の設置により後方への衝撃波の到達時間が遅れるため

ピーク圧力、インパルスが低減することが予測されたが、障壁が高いほど爆風の反射による障壁前面のインパルスの急増が認められた。次報では、水素爆発時に障壁も含め、RC構造物が、どの程度の損傷が生じ、どのような挙動を示すのかに着目し、考察を行う。



地上爆発



空中爆発（爆源高さ 3.6m）

図 12 爆源高さの違いによる障壁まわりの圧力伝播特性の比較（障壁高さ 1m、位置 x=5）
爆風の向き右から左

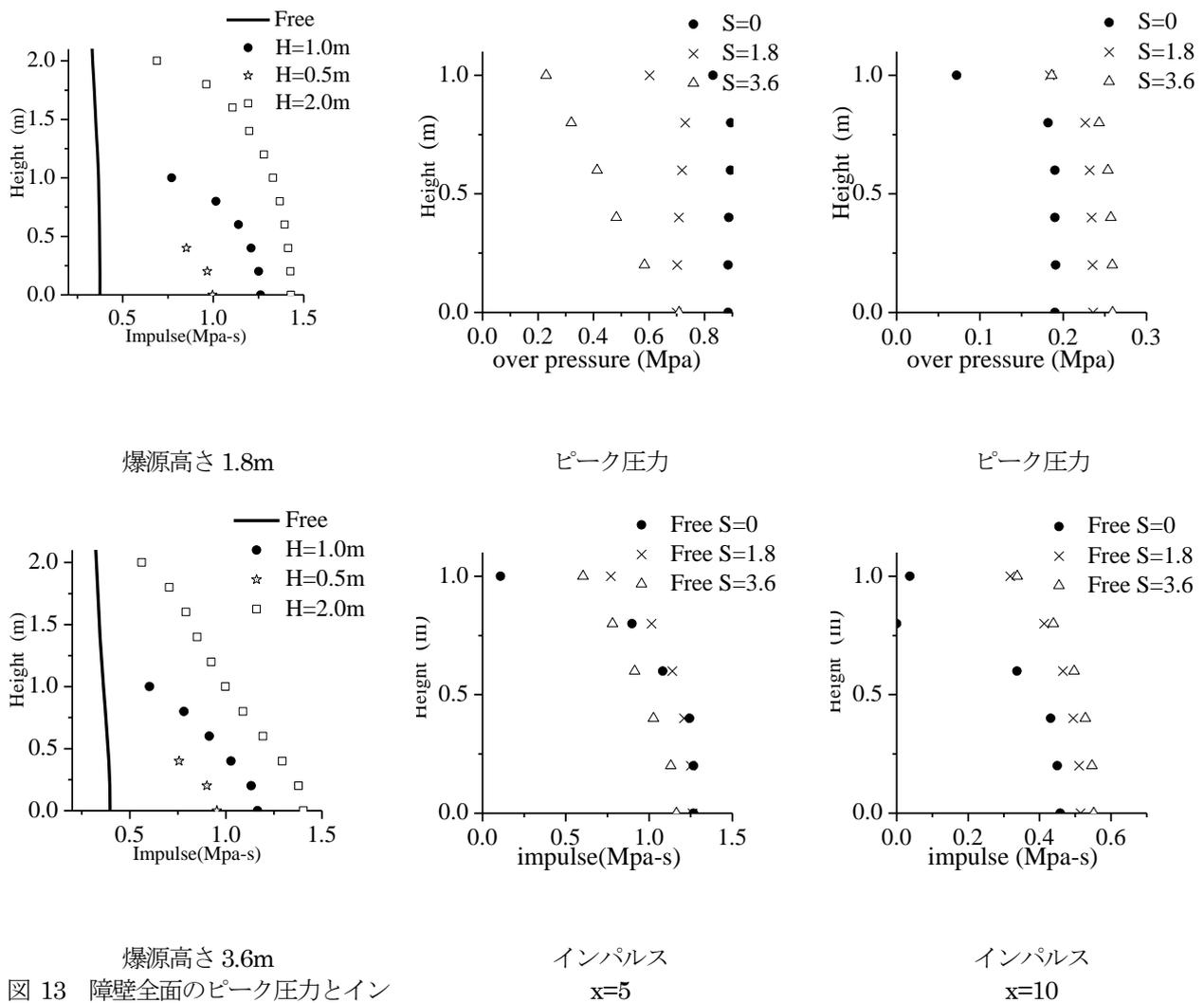


図 13 障壁全面のピーク圧力とインパルスの分布 (空中爆発、障壁位置 $x=5$)

図 14 爆源高さによる障壁前面のピーク圧力とインパルスの比較 (障壁高さ 1m、S は爆源高さ)

謝 辞

本研究は NEDO ((独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構) からの委託を受け、「水素安全利用等基盤技術開発—水素インフラと建築構造物の耐爆、耐震性の研究開発」の一環として実施したものである。ご指導頂きました方々に、ここに記して謝意を表します。

参考文献

[1] 米澤健次、小野佳之、諏訪好英、水素爆発時の周辺構造物への影響に関する数値解析—その1 水素爆発実験—、日本流体力学会年会 2005 講演論文集。

[2] 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 (ME-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。