

水素爆風圧の伝播特性に関する数値シミュレーション

小野 佳之 諏訪 好英
米澤 健次

Computational Simulation of Blast-Wave Characteristics of Hydrogen Explosion

Yoshiyuki Ono Yoshihide Suwa
Kenji Yonezawa

Abstract

A numerical model has been constructed that can simulate pressure characteristics and damage to RC structures subjected to hydrogen explosion. Hydrogen explosion tests were performed to validate the model. This paper demonstrates the applicability of the simulation code AUTODYN to the phenomenon of hydrogen explosion. The computed results are compared with the experimental data. Next, the effects of a protection wall on the pressure propagation characteristics as a function of height, wall location and explosion source height are clarified using AUTODYN.

概要

本研究では、水素爆発時の周辺への影響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を実施した。本報では、衝撃解析コードAUTODYNを用いて同実験を対象とした数値解析を実施し、爆発時の圧力伝播特性に関して実験結果との比較を行った。次に、爆発時の周辺への影響を低減させる手法として障壁に着目し、その効果に関して解析的に検討を行った。結果として、用いた解析方法により、水素爆発実験における圧力伝播特性が非常に良く再現できることが判った。また、各種条件の下で障壁まわりの爆風圧特性を比較したところ、爆源の高さによらず、高い障壁の設置が後方の爆風圧低減に有効となることが明らかとなった。

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、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。

著者らは、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、解析コード「AUTODYN」³⁾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した。

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、コストの問題から、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測定点における爆風圧特性に着目したものがほとんどであり、地上数m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関し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、水素爆発時の地上（～3m）に対する障壁の爆風圧低減効果および、地上爆発と空中爆発時の障壁の効果の違いについて検討を行った。

2. 水素爆発実験

爆発実験においては水素テントの近傍にFig. 1のように試験体を設置した。爆発中心から試験体までの距離を5mとし、壁の高さを1m, 1.5m, 2mと変化させて合計3回の爆発実験を行った。爆発方法・条件はすべての実験で共通とし、テントに充填させた水素混合気（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））を少量の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Fig. 2に示す。

3. 解析手法

解析コードは衝撃解析コードAUTODYN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。ただし、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の問題があり、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の適用性を検討した。

運動方程式は予混合気体と空気の二種類の流体ともに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⁴⁾、空気には理想気体の状態方程式を採用した。Euler座標系で複数の物質の挙動を扱う方法 (Multiple material Euler法) に関しては文献⁵を参照されたい。一方、AUTODYNでは爆轟現象を、数十種類の化学反応を考慮した連立微分方程式を解く代わりに、工学的な観点から爆轟特性を現すパラメータを換算し、爆轟波伝播による圧力を評価している³⁾。本計算では、水素と空気の予混合気の組成をH₂: 30%, O₂: 14.65%, N₂:55.35%, 300K, 1atm (101.3kpa) の初期状態にあるものとし爆轟特性パラメータを算出した。

4. AUTODYNの水素爆発現象の予測精度の検証

Table 1 計算条件
Computational condition

解析領域	12m×12m	
格子分割数	125×125	
境界条件	z軸	軸対称
	地面	剛 (反射) 境界条件
	その他	流出境界条件

爆発実験¹⁾を対象とした数値解析を行う。解析はz軸 (Fig. 2) に対称な座標系とし、AUTODYN 2Dを用いた。混合気体を実験では直方体テント4.3m×4.3m×2.0m=37m³、解析では、円筒形テント3.14×2.43×2.0=37m³に充填させた。Table 1に計算条件を示す。なお、実験と解析ではテント形状が異なるが、テントから離れた障壁位置近傍における衝撃波の伝播特性に関しては、その影響が少ないものと考えられる。境界条件は地盤面および障壁を剛 (反射) 境界条件、その他は流出境界条件とした。実験に対応させ、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。障壁高さは0.5m、1m、2mの3ケースとした。ただし、ここでは高さ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Fig. 3に示す。到達時間、ピークの位置、ピーク値など両者は一致していることが判る。特に、P3の位置で、衝撃波の通過に伴う第一ピークを示した後に、障壁前面で反射した衝撃波により、より大きい圧力のピークが認められるなど計算結果と実験結果¹⁾の波形は良く一致している。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。

以上より、衝撃解析コードAUTODYN 2Dは水素の爆発現象 (爆轟現象) を、非常に良く再現できるものと判断できる。



Fig. 1 爆発実験状況
Layout of explosion tests

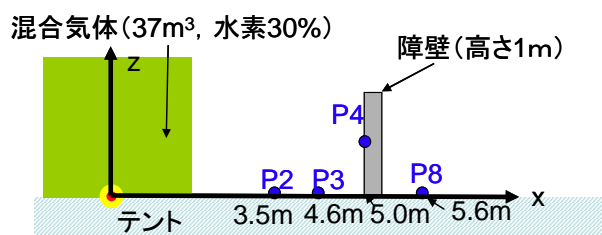
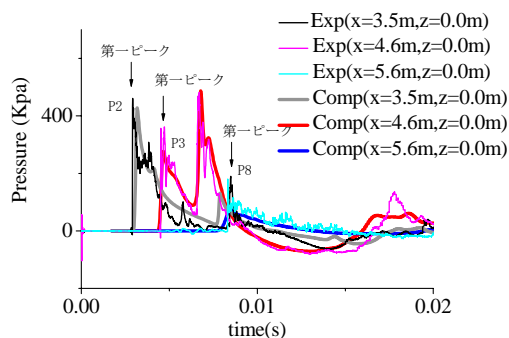
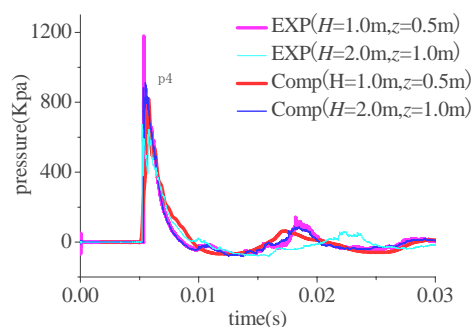


Fig. 2 圧力測定点の位置 (高さ1mのケース)
Measuring points of pressure



Ground surface



Center of a protect wall

Fig. 3 圧力特性の比較

Comparison of pressure characteristics

(x: 爆源からの距離, z: 地上高さ, H: 障壁の高さ)

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、地上爆発時に障壁の設置位置、高さを変化させ、上空の爆風圧低減効果について考察する。次に、爆源高さを変えたときの解析を実施し、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 障壁後方の圧力伝播特性の考察

解析モデルをFig. 4に示す。障壁（高さ1m）の位置xを変化させた時の、参照点におけるピーク圧力、インパルスの鉛直分布をFig. 5に示す。なお、参照点は爆源から10m

の位置とした。障壁の位置を変化させると、高さ1m以下（障壁より低い高さ）では、障壁が参照点に近いほど（参照点が障壁の背後に位置するほど）ピーク圧力が低減している。一方、1m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、障壁が爆源に近いケースで大きな低減効果が得られている。

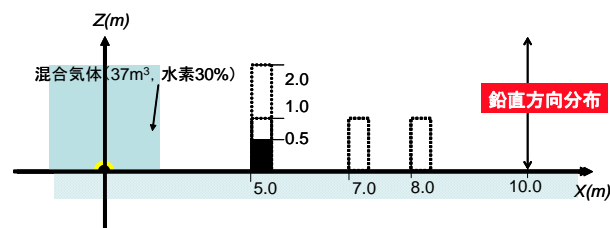
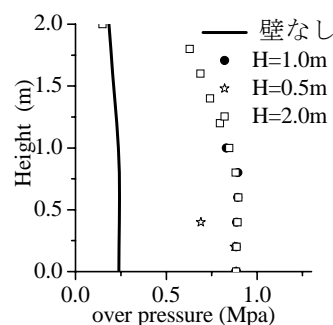
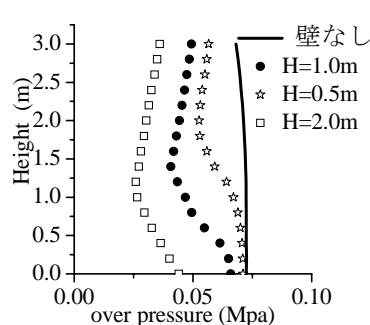
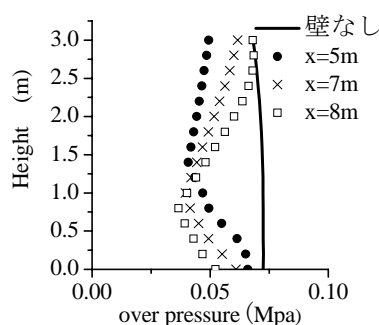
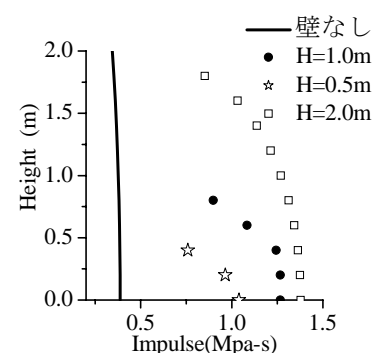
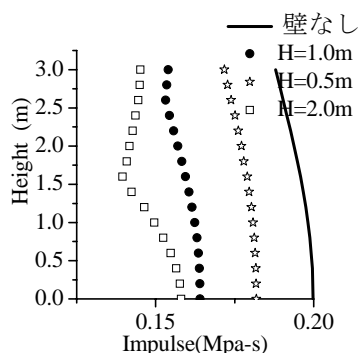
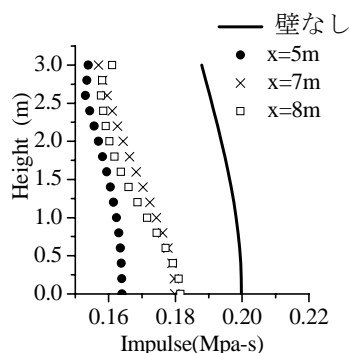


Fig. 4 解析モデル1 (地上爆発)
Computational model 1 (explosion on ground surface)



Peak pressure



Impulse

Fig. 5 障壁位置xを変化させたときの爆風圧特性の比較
(障壁高さH=1m, 地上爆発)

Comparison of pressure characteristics as position of a protect wall changes

Fig. 6 障壁高さHを変化させたときの爆風圧特性の比較
(地上爆発, 位置x=5m)

Comparison of pressure characteristics as height of a protect wall changes

Fig. 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x=5m)

Pressure and impulse distributions on frontal surface of a protect wall as height of a wall changes

次に、障壁の高さを変化させた場合 (Fig. 6) を見てみると、高い障壁ほど、後方でのピーク圧力、インパルスともに大きく低減する傾向が認められる。したがって、高い障壁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。Fig. 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ものの、ピーク圧力の値に関しては障壁高さにはほとんど依存していない。一方、インパルスに関しては、障壁が高くなるにつれて非常に大きな値を示している。Fig. 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節での考察により、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節では、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。Fig. 9に示すように、爆源高さを1.8m、3.6mとし、地上爆発時と同様に障壁の位置、高さを変化させて解析を行った。Fig. 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、Fig. 11に、障壁 (x=5) の高さによる圧力低減効果の比較を示す。Fig. 10におけるピーク圧力を見てみると、参照点 (x=10) よりもかなり前方に障壁が位置する5mのケースにおいても、障壁による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、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) が低減していることが判る。これらの要因を検討するため、Fig. 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、障壁上部・下部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、障壁に向かって伝播し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、地盤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。Fig. 13に、障壁高さを変化させたときの障壁前面のピーク圧力およびインパルスの分布を示す。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ことが判る。

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・インパルスの値に関しては、地上爆発、空中爆発で異なるものとなる。Fig. 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、空中爆発時には、地面からの反射影響を受け続けるため、

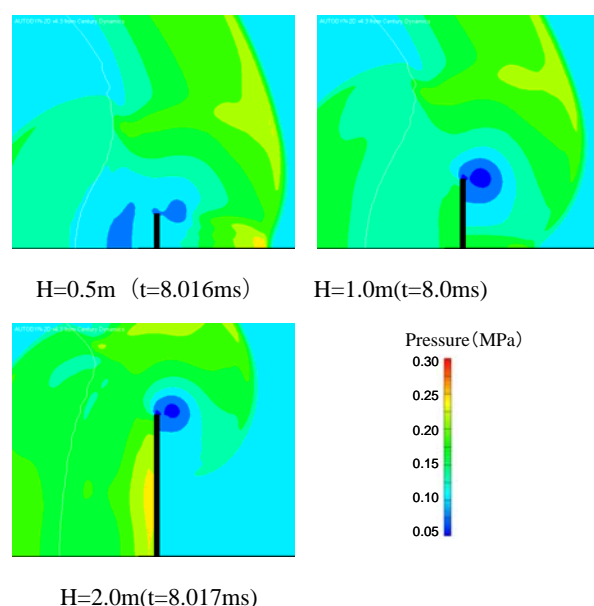


Fig. 8 障壁まわりの圧力分布の比較 (地上爆発、障壁位置5m、爆風の向き左から右)
Comparison of pressure distributions around a protect wall

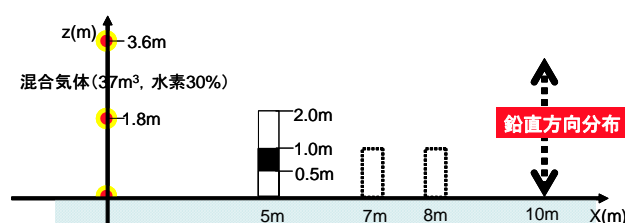


Fig. 9 解析モデル2 (空中爆発)
Computational model 2 (explosion in air)

爆風圧は後方でも減衰し難いためであると考えられる。したがって、爆源から離れた位置では、地上爆発のケースに比べて空中爆発のケースの爆風圧が大きくなる場合があるので、慎重な評価が必要である。

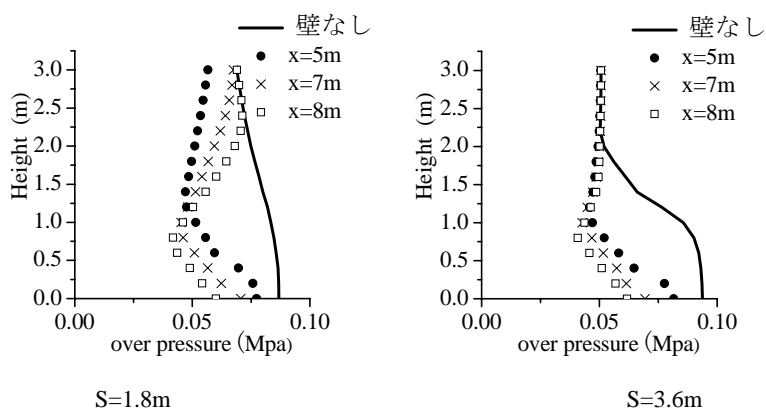


Fig. 10 障壁位置xを変化させたときの圧力の鉛直分布
(S:爆源高さ, 空中爆発, 障壁高さ1m)
Pressure Profiles at x=10 as location of a protect wall changes

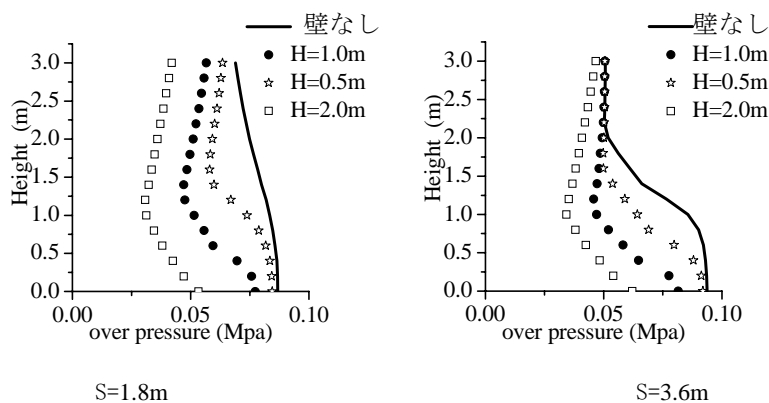


Fig. 11 障壁高さHを変化させたときのx=10における圧力の鉛直分布
(S:爆源高さ, 空中爆発, 障壁位置x=5)
Pressure Profiles at x=10 as height of a protect wall changes

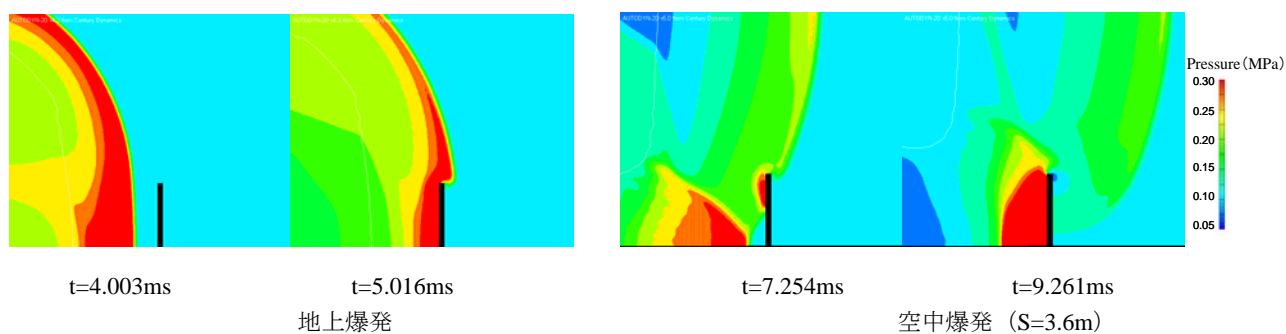
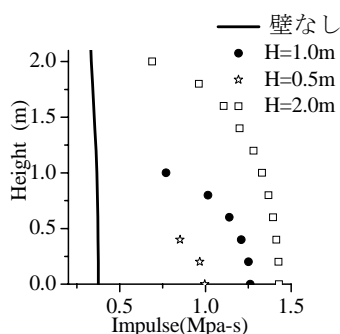
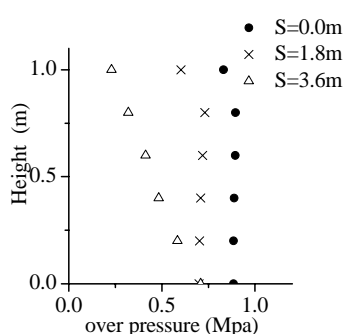


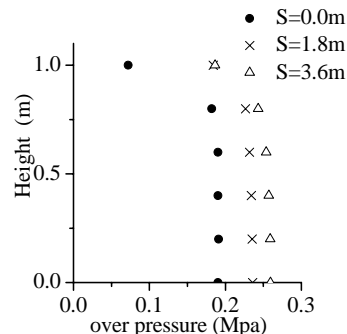
Fig. 12 爆源高さの違いによる障壁まわりの圧力伝播特性の比較 (障壁高さH=1m, 位置x=5)
爆風の向き左から右
Comparison of the pressure characteristics around a protect wall as height of explosion source changes



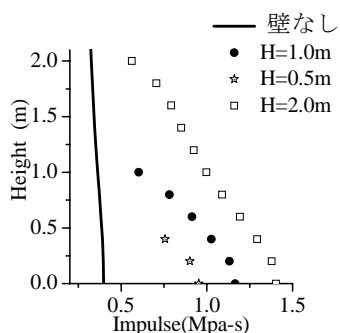
S=1.8m



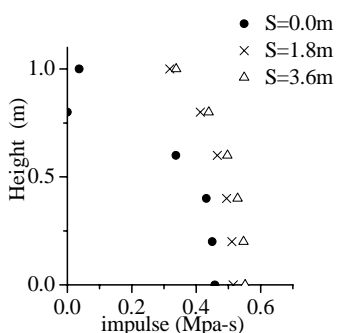
Peak pressure



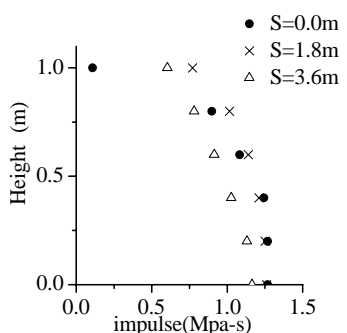
Peak pressure



S=3.6m



impulse
x=5m



impulse
x=10m

Fig. 13 障壁前面のピーク圧力とインパルスの分布

(S: 爆源高さ, 障壁位置x=5)

Pressure and impulse distributions on the frontal surface of a protect wall as height of a protect wall changes

Fig. 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 (S: 爆源高さ, 障壁高さH=1m)

Pressure and impulse distributions on frontal surface of a protect wall as height of an explosion source changes

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、前報で報告した爆発実験を対象とした数値解析を実施した。その結果、爆発実験で得られた圧力特性が用いた解析コードにより非常に良く再現されることを確認した。次に、数値解析により水素爆発が生じた場合の障壁の効果について検討した結果、爆源の高さによらず、高い障壁の設置によりピーク圧力、インパルスが低減することが期待された。ただし、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することが予想され障壁の強度設計には、十分な注意が必要である。

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, 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, No69, pp15.(2005).
- 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13年度報告書, (2002).
- 3) センチュリー・ダイナミックス社, 「AUTODYN™ Users Manual Revision 4.3」, 2003.
- 4) C.L.Mader, Numerical modeling of Detonation, ISBN 0-520-03655-7, University of California Press, 1979.
- 5) 片山雅英, 他: 爆薬の爆ごうを伴う物理的複雑系の数値解析法, 火薬学会誌第62号第6冊, 2001.