

水素爆発時の周辺構造物への影響 爆風圧を受けるRC壁応答性状の実験的把握

諏訪 好英・米澤 健次・小野 佳之

(株)大林組 技術研究所

204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640

Effects of Hydrogen Explosion on Peripheral Structures
Experimental Study on the Response of RC walls subjected to Hydrogen Explosive Load

Yoshihide SUWA, Kenji YONEZAWA and Yoshiyuki ONO

Obayashi Corporation, Technical Research Institute

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

Experiments on the hydrogen gas explosion were performed to achieve the safe use of hydrogen energy, and the effect of explosion accidents on peripheral reinforced concrete (RC) structures was studied. Hydrogen gas with 37m³ in volume and 30% in volume concentration was detonated, and the response of the walls settled near the explosion center was measured in displacement, stress, cracks and damage situation. As the result, the damage mechanism of RC structures was studied. Fundamental data for the safety design of protective walls was obtained.

Key words: hydrogen explosion, reinforced concrete wall, blast load

1. はじめに

水素インフラ施設における安全性を検討する上で、万が一水素ガスの漏洩により爆発事故が生じた場合に周辺構造物にどの程度の影響がおよぶのかを把握しておくことは極めて重要である。可燃性ガスの爆風圧は爆発中心からの距離減衰が顕著であるという特徴があり、十分な離隔距離を保持すれば危険性を回避することができる[1],[2]。また障壁を用いることで周辺に伝播する爆風圧を低減することも可能である[3],[4]。しかし、構造物が受ける爆風圧は、衝撃波が構造物に衝突することによる反射効果のため開放空間での爆風圧よりも大きくなるため、その圧力ピークおよび継続時間が構造物の応答挙動に大きな影響を与え、構造物の損傷や崩壊に至ることも考えられる[5],[6]。

これまで、水素ガスの爆発現象そのものについてはさまざまな実験が行われており、その現象は明らかになってきているものの、爆発事故により構造物が爆風圧を受けた場合にどの程度の損傷を生じ、どのように挙動するのかにつ

いて、パラメトリックな実験データに基づき検討された例は少ない。本研究では、爆風圧を受ける構造物に対する安全設計技術の確立を目的とし、基礎的なデータを得るため、水素爆発による鉄筋コンクリート構造物(RC構造物)の損傷実験を実施した[7]。

2. 実験概要

2.1 実験系および実験条件

爆発源として想定した容積37m³(4.3m×4.3m×2m)の水素テント(水素・空気の混合気を充填したテント)の近傍にRC構造物試験体を設置し、テント内の水素混合気を爆発させたときの試験体の応答および破損状況を測定した。水素テント内には体積濃度30%の水素混合気(化学量論比で最も爆発力が大きくなる濃度)を充填し、テント内中央に設置した少量のC4爆薬で爆轟させた。

実験は予備実験、本実験の2種類の実験系で実施した。それぞれの実験系を図1に示す。予備実験では、爆発源と

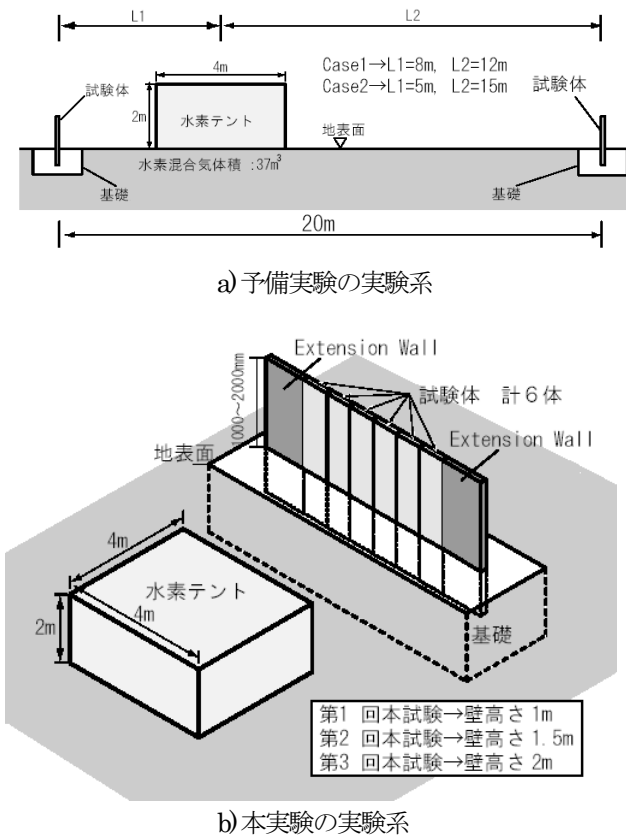


図1. 予備実験および本実験の実験系

して想定した水素テントを中心として20m隔てた位置に同一条件の試験体を2つ設置し、爆発源からの距離（以下離隔距離と呼ぶ）をパラメータとして試験体の応答を測定した。予備実験では2回の爆発実験により、離隔距離5m, 8m, 12m, 15mにおける試験体の応答を測定した。本実験では、水素テントから5mの位置に厚さ、配筋量の異なる6種類の試験体を並べて設置し、同一の爆風条件に対する応答を比較した。実験は、高さ1m, 1.5m, 2mの試験体について合計3回実施した。

2.2 試験体

実験に用いたRC構造物試験体の形状および断面を図2に、仕様一覧を表1に示す。試験体の幅はすべて300mmと共通で、高さ1m, 1.5m, 2m、厚さ80mm, 100mm, 120mmの9種類についてそれぞれシングル配筋したものとダブル配筋したものの計18種類を製作した。このうち、予備実験には高さ1m、厚さ100mmでダブル配筋のものを用いた。鉄筋は、厚さ80mm, 100mmの試験体にはφ3.2、φ6.4の溶接金網を、また厚さ120mmの試験体には#3の異形鉄筋（D10に相当）を用い、それぞれ50.8mmピッチで配置した。コンクリート強度は30N/mm²程度である。

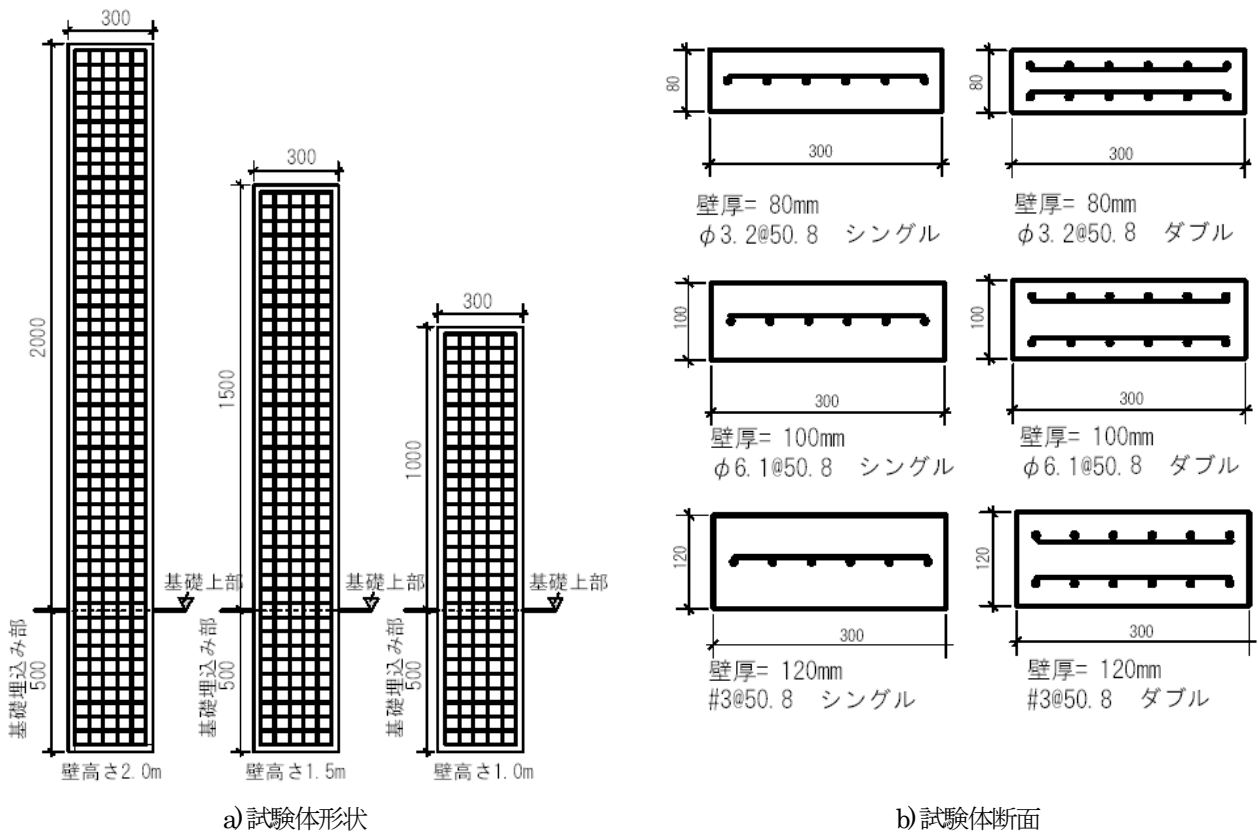


図2. 実験に使用した試験体の形状、断面および配筋状況

表1. 実験に使用した試験体一覧

No.	高さ(mm)	厚さ(mm)	配筋
M1-1	1,000	80	シングル $\phi 3.2@50.8$
M1-2			ダブル $\phi 3.2@50.8$
M1-3		100	シングル $\phi 6.1@50.8$
M1-4			ダブル $\phi 6.1@50.8$
M1-5		120	シングル #3@50.8
M1-6			ダブル #3@50.8
M2-7	1,500	80	シングル $\phi 3.2@50.8$
M2-8			ダブル $\phi 3.2@50.8$
M2-9		100	シングル $\phi 6.1@50.8$
M2-10			ダブル $\phi 6.1@50.8$
M2-11		120	シングル #3@50.8
M2-12			ダブル #3@50.8
M3-13	2,000	80	シングル $\phi 3.2@50.8$
M3-14			ダブル $\phi 3.2@50.8$
M3-15		100	シングル $\phi 6.1@50.8$
M3-16			ダブル $\phi 6.1@50.8$
M3-17		120	シングル #3@50.8
M3-18			ダブル #3@50.8

2.3 測定項目および計測器の設置

計測項目は試験体の受圧力、水平変位、鉄筋ひずみ、および水素テントおよび試験体周辺の地表面における圧力とした。鉄筋ひずみについては各試験体の脚部、水平変位については各試験体の中腹部と頂部2点を測定した。また試験体表面の受圧力の測定に関しては、6体並べた試験体のうち中央と外側の試験体の爆発源側と裏面の中腹部に圧力センサーを設置した。さらに実験の様子を2台のスタンダードビデオカメラとフレームレート4,000コマの高速ビデオカメラにより撮影した。

3. 実験結果

3.1 予備実験の結果

予備実験により得られた爆発源側試験体表面の圧力および力積の時刻歴を図3に示す。構造物が受ける圧力および力積は、離隔距離が離れるほど小さくなり、明確な距離減衰が確認できる。離隔距離12m以上の試験体ではコンクリートのひび割れは認められず、ほぼ弾性状態であったのに対し、離隔距離8mの試験体では脚部にひび割れを生じた。一方、離隔距離5mの試験体では脚部、中腹部のコンクリートに多数のひび割れを生じ、脚部の鉄筋には降伏(最大ひずみ0.54%)が確認された。予備実験で用いた

試験体は、本実験用に製作した試験体のうち、中程度の耐力を有する。予備実験の結果から、本実験の離隔距離を5mとすることとした。

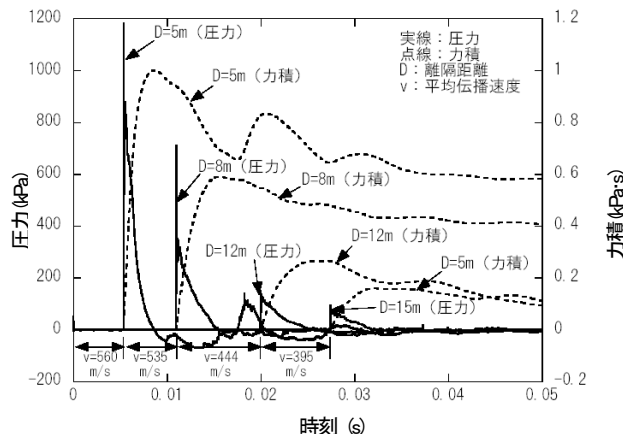


図3. 試験体表面の受圧力、力積の時刻歴 (予備実験)

3.2 本実験の結果

3.2.1 爆風圧の再現性

3回の本実験で得られた試験体表面(爆発源側)の圧力および力積の時刻歴を図4に示す。本実験では、試験体以外の条件はすべて同一としており、爆風圧の最大値および履歴は高い再現性を示した。

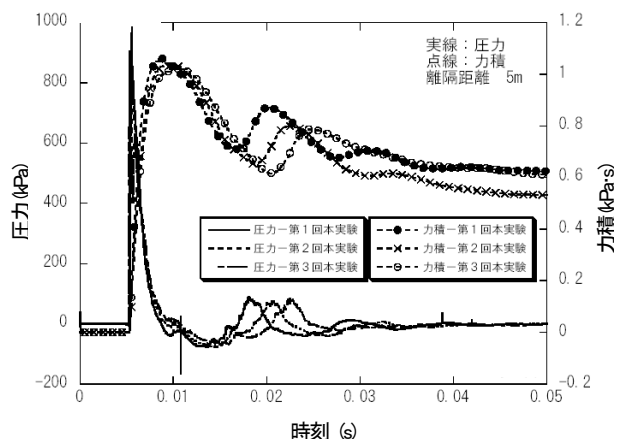


図4. 試験体表面の受圧力、力積の時刻歴 (本実験)

3.2.2 ひび割れ、損傷状況

各試験体のひび割れ、損傷状況を図5に示す。厚さ80mmの試験体は配筋量、高さにかかわらずすべて崩壊した。また崩壊した試験体のうち、ダブル配筋の試験体はいずれも脚部で破断したが、シングル配筋の試験体では試験体高さによって異なった崩壊モードを示し、高さ1mの試験体

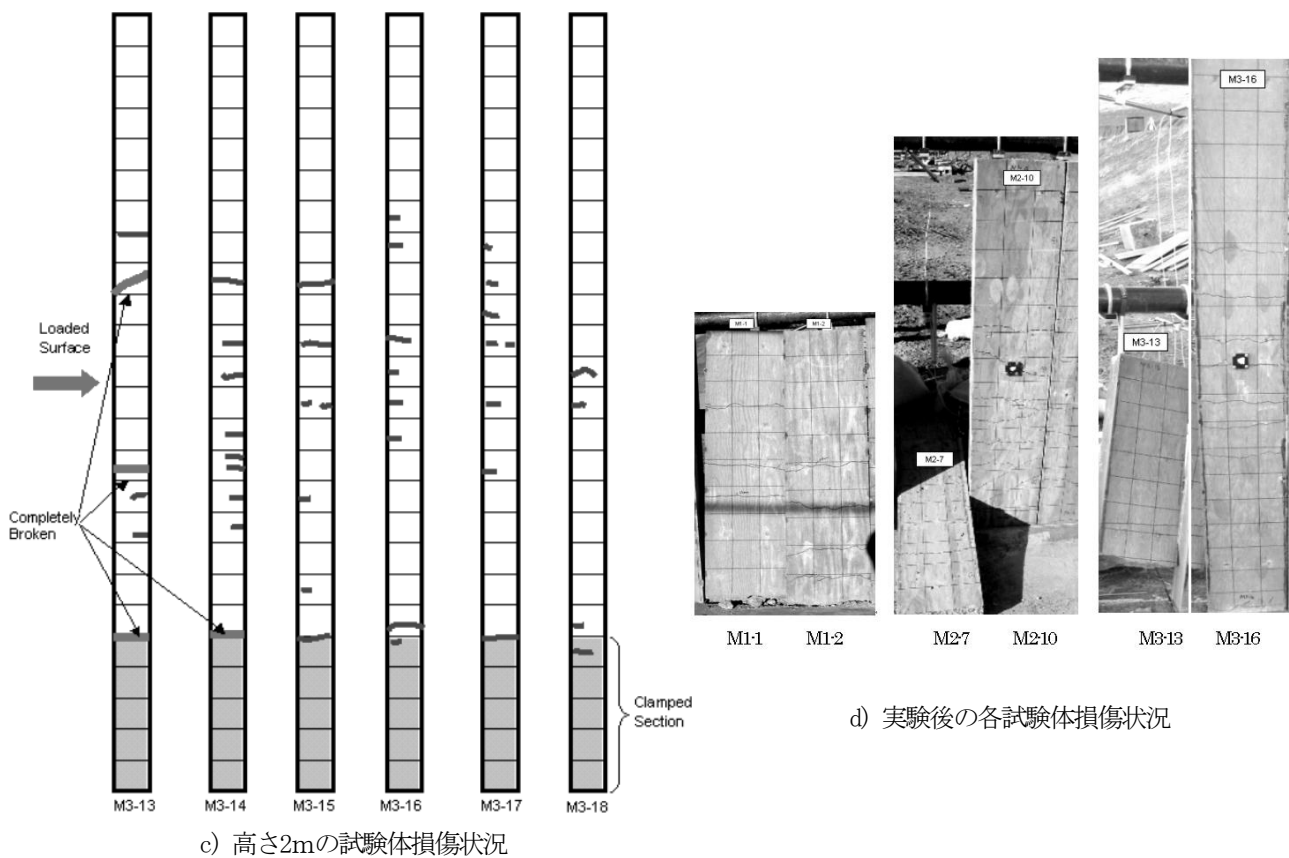
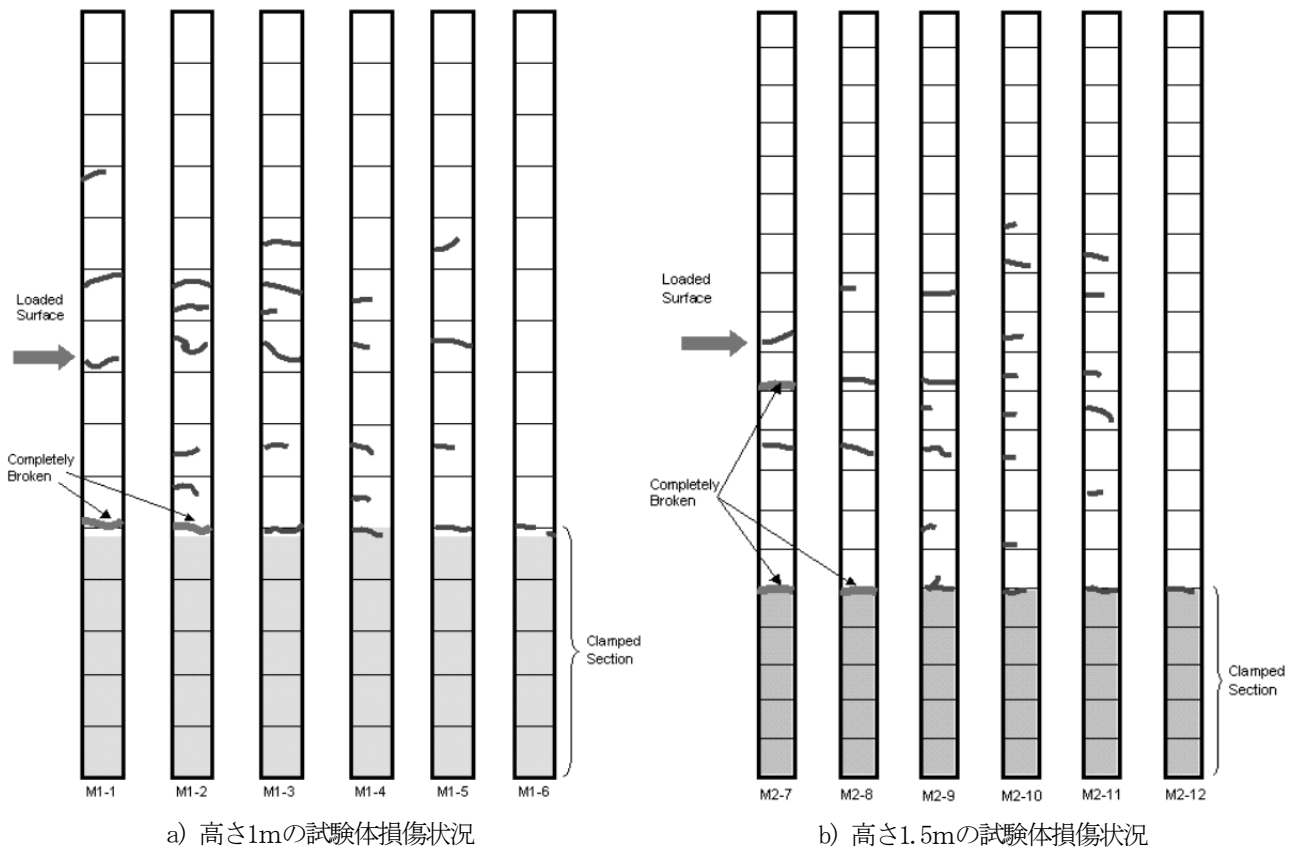


図5. 水素ガスの爆風による各種RC構造試験体の損傷状況

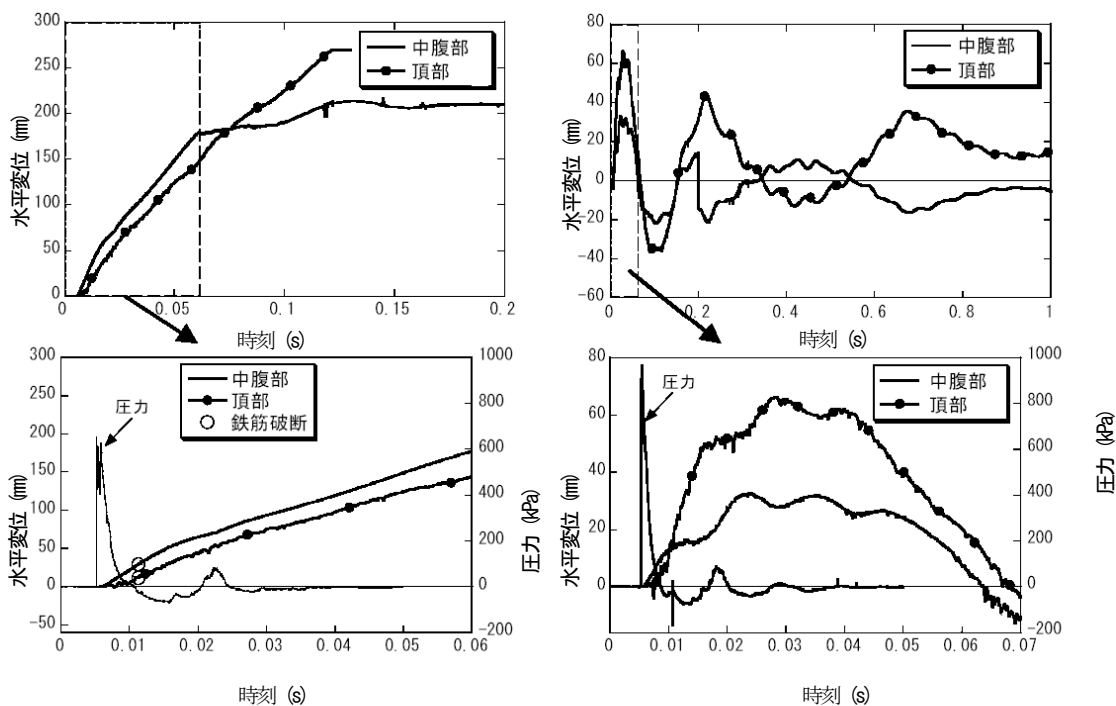
では脚部の1箇所、高さ1.5mでは脚部と中腹部の2箇所、高さ2mでは脚部と中腹部2箇所の計3箇所で破断した。

厚さ100mm,120mmの試験体に関しては、いずれの高さの試験体も崩壊には至らなかったが、変形および鉄筋ひずみに関する塑性領域の幅広いデータが得られた。コンクリートのひび割れ状況に関しては、高さが低くダブル配筋された比較的剛性が高い試験体では脚部にひび割れが生じたのみで、剛性が小さなシングル配筋のもの、高さが大きい試験体では脚部のみならず中腹部にも多数のひび割

れが観測された。

3.2.3 変位の時刻歴

実験から得られた試験体頂部および中腹部における水平変位の時刻歴の例を図6に示す。各図は試験体ごとに上下2つのグラフで示してあるが、下図は上図の枠の範囲を拡大したものである。また下図には爆発源側試験体表面が受けた圧力の時刻歴も併記した。水平変位は爆風圧を受けてからかなり遅れて推移することがわかった。図7は高速ビデオカメラの映像であるが、試験体の崩壊は爆風が通過



a) 崩壊した試験体の例 (M3-13)

b) 崩壊しなかった試験体の例 (M1-3)

図6. 試験体頂部および中腹部における水平変位時刻歴の例

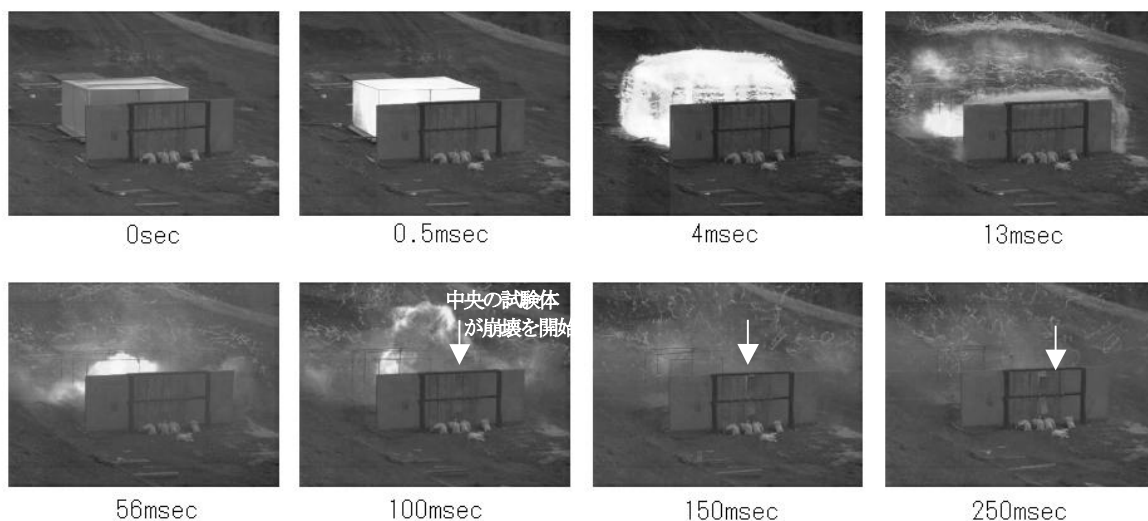


図7. 高速ビデオカメラにより捉えた爆発の瞬間と試験体破損状況

してかなりの時間が経過してから始まっている。

崩壊した試験体(図6 a)では爆風による荷重を受けた直後に鉄筋破断を生じ、初期の段階で崩壊に至った状況が時刻歴にも示されている。一方、崩壊しなかった試験体(図6 b)では振動的な変位波形が現れたが、波形にはさらに高周波の振動も認められた。いずれの試験体においても、爆風圧を受けた直後の変位の立ち上がりは頂部よりも中腹部において大きい。時間の経過に伴って頂部の変位が大きくなり、中腹部の変位を上回るようになる変位の逆転現象が認められた。

4. 考 察

実験の結果、試験体の損傷には爆風圧の第一波により脚部で衝撃破壊するものと、その後、振動的な変形モードに移行して損傷(ひび割れ、鉄筋破断、崩壊を含む)を生じるものがあると思われる。図8は実験を模擬して別途実施したFEM解析の結果である(実験条件M1-4に相当する)。試験体が爆風圧を受けた直後には脚部に変形が集中し、自由振動モードとは大きく異なる変形モードを示すが、その後変形モードが変化し、通常の振動モードに移行している。爆風圧の第一波により崩壊した試験体は主として初期の変形モードにより、また崩壊しなかった試験体はその後の振動的な変形モードに移行したものと考えられる。水平変位の時刻歴に認められた逆転現象も、このような変形モードの移行を示すものと考えられる。

なお、振動的な変形モードにより損傷したものと思われる試験体のひび割れ、損傷状況には $n=2$ または $n=3$ の高次変形モードを生じたと考えられるものが認められた。特に高さ1.5m, 2mの試験体では試験体がほぼ二等分または三

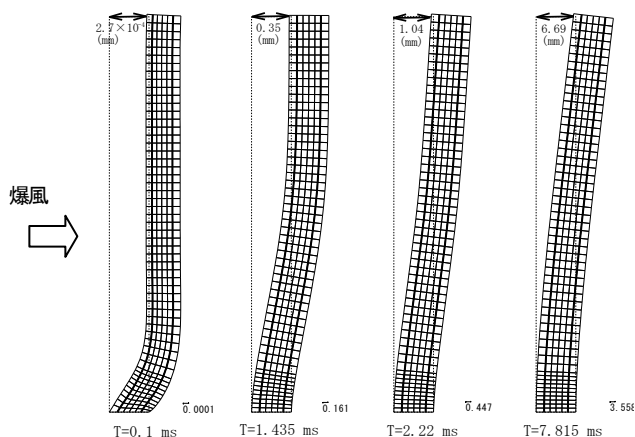


図8. FEM解析により予測した試験体の変形モード

等分に折れて崩壊しており、高次変形モードの影響を受けた可能性が示唆される。これらの変形モードへの移行は、入力された爆風による力積の時定数と構造物の固有周期によって決定するものと思われる[7]。既報[4],[8]において、障壁を高くするほど爆風圧低減効果が得られるが、爆発源の条件が同じ場合でも高い障壁ほど受ける力積が大きくなるため、障壁の強度設計に注意すべきことを示した。さらに本実験の結果、高い障壁では高次の振動モードを伴って損傷を生じる可能性のあることがわかった。高さのある障壁の設計には、十分な強度設計を行うとともに、高次の振動モードを避けるべく固有周期を爆風による力積の時定数と一致させないような工夫が必要と考えられる。

5. まとめ

水素の爆発による構造物損傷実験を実施し、爆風圧を受ける構造物の応答性状に関して弾性域から破壊に至るまでの広範囲な基礎データを得た。この種の実験は今までに例がなく、耐爆設計の基礎となる有益なデータが得られたものと考えている。本実験データに基づき、構造物の耐爆挙動に関するシミュレーション技術や合理的な耐爆設計法を検討していきたい。

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す。本研究の実施にあたり御指導頂いた関係者の皆様に謝意を表します。

また、本研究の実験計画立案に際し、防衛大学校・大野友則教授、藤掛一典助教授、別府万寿博助手、防衛庁技術研究本部第4研究所・森下政浩室長より有益な助言を、実験実施にはSRI International、Poulter Laboratory・James Colton博士、Mark Groethe博士、Paul Gefken博士、Erik Merilo博士の多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

1. Drofeev, S.B: Blast effects of confined and unconfined exposures, Proc. of the 20th. Int. Symp. on Shock Waves (1995).

2. 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, および 平成14年度成果報告書
NEDO-WE-NET-0202
3. 諏訪好英, 米澤健次：水素ガスの爆発に伴う衝撃圧力の障壁による低減効果, 水素エネルギーシステム, 29, 2, pp.11-16, (2004).
4. 小野佳之, 諏訪好英, 米澤健次：水素爆発時のRC壁の挙動に関する数値シミュレーション, 日本風工学会誌, 30, 2, pp.239-240, (2005).
5. Bounds, W.L., King, P.T. et.al.: Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, ASCE American Society of Civil Engineers (1997).
6. Conrath, E. J., Krauthammer, T. et.al.: Structural Design for Physical Security - State of the Practice -, ASCE American Society of Civil Engineers (1999).
7. 米澤健次, 諏訪好英, 小野佳之, 長沼一洋：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, 日本建築学会構造系論文集, 601, pp.151-158, (2006).
8. 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成15～16年度報告書, NEDO-03002978-0, およびNEDO-04000481-1(2005).