

水素ガスの爆発事故対策に関する研究（その2）

水素爆風圧を受けるRC壁の非線形応答解析

米澤 健次 長沼 一洋 諏訪 好英
小野 佳之 井元 勝慶

Countermeasures to Accidents Due to Hydrogen-Gas Explosion (Part 2)

Nonlinear Response Analysis for Reinforced Concrete Walls Subjected to Hydrogen Explosive Pressure

Kenji Yonezawa Kazuhiro Naganuma Yoshihide Suwa
Yoshiyuki Ono Katsuyoshi Imoto

Abstract

To evaluate the safety of the hydrogen infrastructure, it is very important to grasp the influence on the surrounding structure of hydrogen-gas explosion. As a fundamental study, the nonlinear responses of reinforced concrete walls subjected to blast loading by hydrogen-air explosion are analyzed using AUTODYN and FINAL. Hydrogen detonation phenomena and the structural response of a simple wall are simulated by AUTODYN. Nonlinear finite element analyses are conducted using FINAL for various types of walls subjected to explosive blast loads. The analysis results on the structural behavior obtained from the two programs are in good agreement. They indicate that shear failure might occur at the bottom of a wall under excessive blast loads. Furthermore, a parametric study using FINAL indicates the degree of damage to walls subjected to various blast loads.

概要

水素ガスの爆発による周辺構造物への影響を調べることを目的として、水素爆風圧を受けるRC壁の非線形応答性状を手法が異なる2つの解析ソフト（AUTODYN、FINAL）を用いて解析した。AUTODYNでは水素爆発による爆轟現象とRC壁の応答性状を連成させて解析し、また、FINALでは爆風圧 - 時間関係を仮定することで動的な非線形FEMによりRC壁の応答性状を解析した。2つの異なる手法による解析結果は、両者ともにRC壁脚部でせん断破壊が生じ、応答性状においてほぼ同様な傾向を示した。

さらに、FINALを用いて、爆風圧及び壁の断面形状と配筋を変化させたパラメータ解析を実施し、様々な爆風圧に対してRC壁がどの程度の損傷を受けるかを把握した。

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及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、ガスの濃度及び体積だけでなく、爆発現象が爆燃¹⁾か爆轟¹⁾かによって大きく異なり、爆発中心からの距離減衰が顕著であるという特徴がある。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で、開放空間（Free field）における圧力変化を上回り、その最大圧力及び継続時間が構造物の挙動に大きな影響を与えるが、その定量的な把握はなされていないのが現状である。本研究は、水素爆発事故を想定した爆風圧を受ける鉄筋コンクリート造（RC）独立壁を対象とした非線形応答解析を実施し、想定したRC壁がどの程度の爆風圧で、ど

の程度の損傷を受けるかを検討したものである。

ここでは、単純なRC造独立壁を想定し、2種類の解析手法を用いて検討した。一つは気体、液体、固体に関わる衝撃現象を連成させて動的に解析できる衝撃解析ソフト“AUTODYN2D/3D”を用い、水素の爆轟現象をシミュレーションし、その連成としてRC壁の非線形応答を解析した。他の一つはRC壁が受ける爆風圧 - 時間関係を既往の実験結果及び解析結果²⁾を基に仮定し、非線形FEM解析ソフト“FINAL[®]”による動的応答解析を実施した。FINALは、主にRC構造物の動的・静的非線形挙動を解析するため、当社が開発し、地震力を受けるRC構造物の解析において、多くの実績を有している。

2つの解析手法により同一のRC壁体を解析し、両者の解析結果を比較し、その対応性を確認した上で、FINALを用いて、様々な爆風圧力及び力積に対して、RC壁体の壁厚と補強量を変数としたパラメータ解析を行った。

なお、本解析で対象としたRC壁は、爆風圧による非線形応答及び破壊を検討するために、一般に用いられるRCの防御壁に比べ、壁厚及び配筋量を小さめに設定した。

2. AUTODYN2D/3Dによる基本モデルの解析

2.1 解析モデル

水素と空気の混合気体が爆轟して大気中を伝播し、RC壁に衝撃波が到達する直前までは、2次元軸対称解析を実施した。引き続き、その結果を用いて、RC壁をモデル化した流体とRC壁の3次元連成衝撃解析を実施した。

ここで対象とした仮定のRC壁の形状及び配筋をFig. 1に示す。脚部を完全固定と仮定し、幅300mm、壁厚80mmとし、高さ1mと2mを仮定した2ケースについて解析した。鉄筋は径が3.2mm、ピッチ50mmでシングル配筋したものを想定した。その他の仮定条件は、水素濃度30%、混合気の体積37m³(半径2.43m×高さ2.0mの円筒形)、爆轟が生じるものとし、爆発中心から5mの位置に

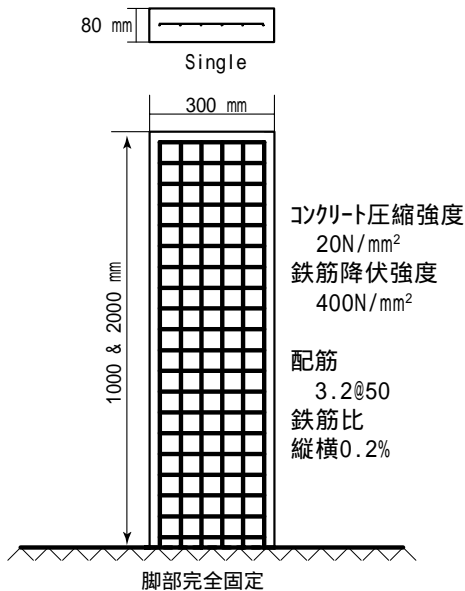


Fig. 1 仮定したRC壁と境界条件
Assumed RC Wall and Boundary Condition

RC壁があるものとした。

2次元軸対称解析では、固定された座標系(Euler座標系)に複数の流体(本解析では混合気体と空気)を定義できるMultiple-material Euler法³を用いた。Fig.2に示すように、爆轟の点火位置は、地上面の中心位置とし、定常爆轟が生じるものとした。

モデルは爆発中心から5.2m、高さ4.8mの範囲をx方向120、z方向130にメッシュ分割した。解析は衝撃波がRC壁の位置に到達する直前(4.74ms)まで解析した。

3次元連成衝撃解析では、燃焼後の混合気体と空気を単一の流体として扱い、計算負荷の低いFCT Euler法³を用いた。一方、コンクリートには移動・変形に伴い座標の位置が変化するLagrange座標系³の六面体要素を、鉄筋にはBeam要素を適用した。Fig. 3に解析モデルを示す。Euler座標系とLagrange座標系との間には、相互作用境界条件を適用した。対称性を利用してy=0(Fig.3参照)の領域の半分のみをモデル化した。メッシュ分割数は、気体のEuler座標系に関しては、x,y,z方向それぞれに、RC壁の高さ1mのケースが60,10,320とし、高さ2mのケースが100,10,320とし、コンクリートに関しては、高さ1mの場合、40,6,5、高さ2mの場合が80,6,5とした。2次元軸対称解析の最終結果を3次元連成衝撃解析の初期条件として与え継続的に解析した。

爆轟現象のモデルとしては、水素、混合気は組成が

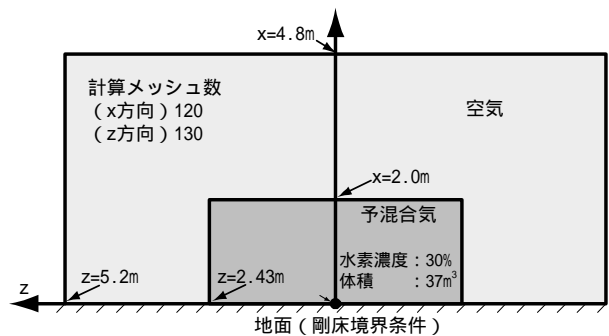


Fig. 2 2次元軸対称解析モデル
Axi-symmetric Analysis Model

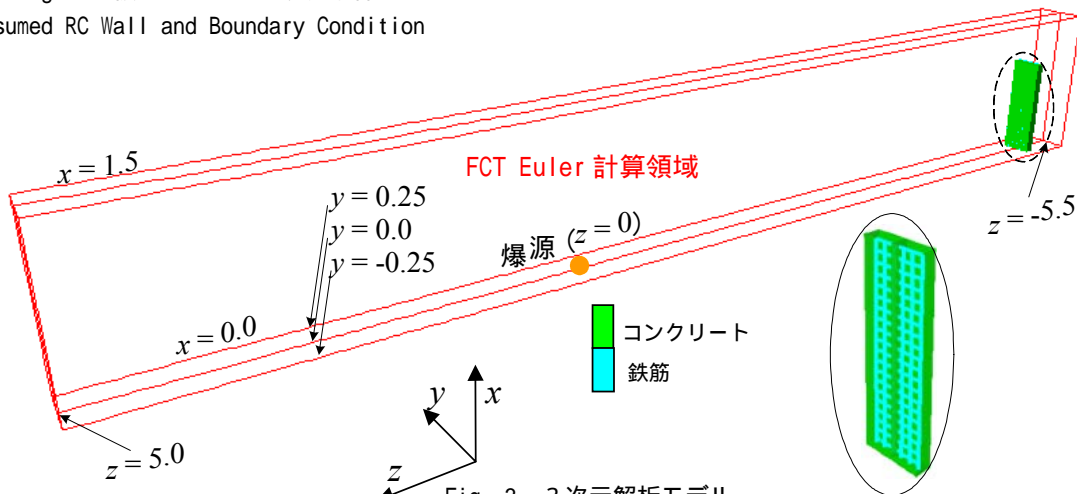


Fig. 3 3次元解析モデル
Three Dimensional Analysis Model

H₂:30%, O₂:14.65%, N₂:55.35%, 300K, 101.3kPaを初期条件とした理想気体として取り扱い, JWL(Jones-Wilkins-Lee)の状態方程式³⁾及びAUTODYNのon-time定常理想爆轟計算ロジックを用いた。式(1)にJWL式を示す。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) \exp \left(-\frac{R_1}{\eta} \right) + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) \exp \left(-\frac{R_2}{\eta} \right) + \omega p e \quad (1)$$

但し, p は圧力, ρ は密度, e は内部エネルギー, ρ₀ (ρ₀は初期密度)であり, A, B, R₁, R₂, ω は爆轟固有の物性値である。また, 安定した状態で爆轟が起こるための条件(C-J爆轟条件)として, 状態方程式に関わる物性値の他に, 混合気内を伝播する反応速度(C-J爆轟速度)と反応完結点の圧力(C-J圧力)が必要になる。本解析で用いたそれらの爆轟特性値をTable 1に示す。コンクリートは, Mohr-Coulomb (Drucker-Prager 則)のモデル³⁾を用い, 状態方程式としては, 多孔質体

Table 1 爆轟特性

Detonation Material Parameters					
初期密度	C-J圧力	C-J爆速	C-J温度	生成気体	比熱比
Kg/m ³	MPa	m/s	K	Kg/m ³	
0.8449	1.573	1.977	2.953	1.5245	1.1631

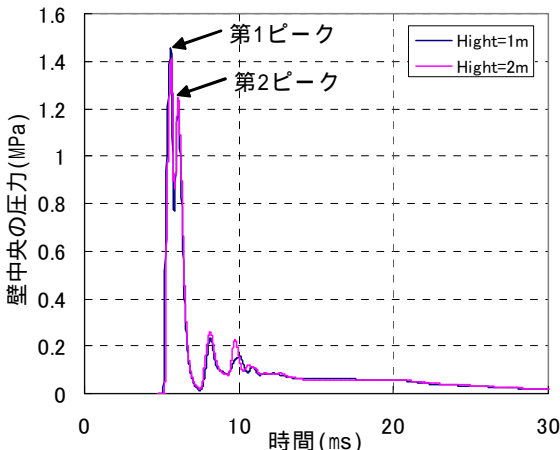


Fig. 4 壁中央位置の圧力 - 時間関係

Pressure - Time Relationship at Center of RC Wall

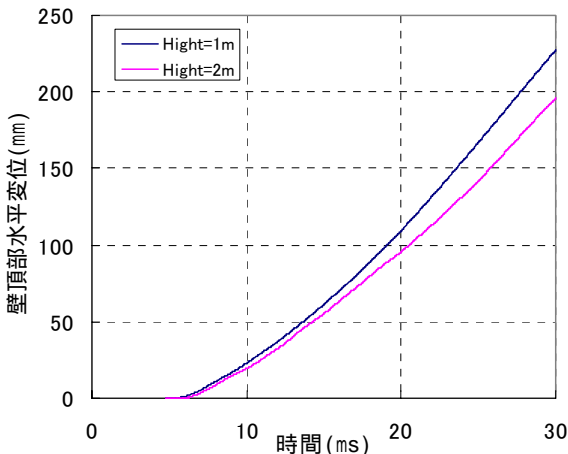


Fig. 5 壁頂部の水平変位の時刻歴

Time History of Displacement Response at Top of RC Wall

のPorousモデル³⁾を用いた。鉄筋は完全弾塑性体を仮定した。

2.2 解析結果

Fig.4に3次元解析から得られたRC壁中央位置における圧力の時刻歴を示す。圧力の時刻歴に関しては, 1mと2mの場合で殆ど差異はなく, 爆轟が生じてから約5ms後に衝撃波が壁面に到達し, 衝撃波が衝突した直後に2つの大きな圧力のピークが形成されている。第1ピークは衝撃波が壁面に衝突した結果, 発生した圧力であり, 第2ピークは衝撃波に遅れて移動してきた燃焼ガスの境界面が壁面に接近することにより空気が圧縮され, 生じた圧力と考えられる。その最大ピーク圧力は約1.4MPaまで上昇した。

Fig.5に高さ1m及び2mの解析における壁頂部の応答水平変位の時刻歴を示す。また, Fig.6に高さ1mのRC壁の解析における各時間毎の変形及び損傷状況を示す。変形及び損傷状況からわかるように, 壁脚部の損傷が大きく, 脚部のせん断変形が卓越している。脚部の鉄筋が約16msで破断し, 約25ms時には脚部のせん断破壊に至る結果となった。高さ2mの場合も同様な破壊性状を示したが, 水平変位の推移は, 高さ2mの場合が高さ1mに比べ, 変位の進展が遅い。これは慣性力の影響が支配的になり, 高さ2mの方が, 質量が大きい分, 変位の進展が遅れたものと考えられる。

以上より, 本解析手法によると, ここで仮定した条件下では高さ1mと2mのRC壁はいずれも破壊することが分かった。

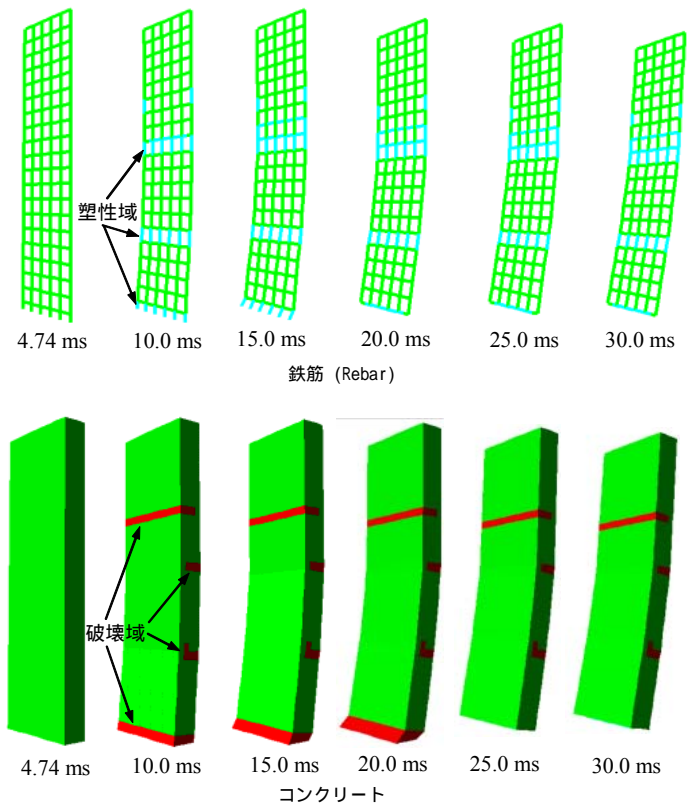


Fig. 6 変形モードと損傷状況(H=1m)
Deformation Mode and Damage Condition (H=1m)

3. FINALによる基本モデルの解析

3.1 解析モデル

前節で述べた連成衝撃解析と同一の条件で動的非線形FEM解析を実施した。Fig.7に解析モデルの一例を示す。壁厚方向の断面に対して2次元平面応力場を仮定し、コンクリートは4節点四辺形要素、鉄筋はトラス要素でモデル化した。

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性体とし、鉄筋の応力ひずみ関係はバイリニアを仮定した。(材料構成則の詳細は文献4)を参照)

なお、これらのコンクリート及び鉄筋の材料構成則においては、ひずみ速度の影響は考慮していない。

爆風圧の時刻歴はFree fieldで行われた水素爆発実験と解析の結果²⁾より得られた爆風圧(最大圧力で無次元化)~時間関係(Fig.8)を仮定し、最大圧力により相似形をなすものとした。最大圧力は、前述の結果より1.4MPaと仮定した。爆風圧は壁面に一様分布圧力として動的に載荷した。

時間積分はNewmark-法($\gamma=0.25, \beta=0.5$)により、時間増分は 5×10^{-5} 秒で一定とした。減衰は初期剛性比例

型の内部粘性減衰とし、一次固有周期に対して1%を仮定した。

3.2 解析結果

Fig.9に壁頂部の水平変位の時刻歴を示し、高さ1mの解析から得られた各時間毎の変形状況をFig.10、ひび割れ及び損傷状況をFig.11に示す。なお、AUTODYNの解析では爆発が生じた時刻を0秒としているが、この解析では壁面の圧力が立ち上がる時を0秒としており、AUTODYNとは時間が6ms程度ズレていることに留意されたい。

Fig.9より、頂部の変位は、高さ1m,2m両者ともに280mmに達しており、破壊に至っていることが推察される。変位の推移に関しては、高さ2mの方が高さ1mに比べ、変位の進捗が遅く、AUTODYNの結果とほぼ同様な結果となった。また、Fig.10の変形モードからは爆風圧を受けた瞬間、脚部にせん断変形が卓越し、脚部の変形が支配的になることがわかる。時間の経過に従い、脚部コンクリートの圧壊、及び鉄筋降伏が生じ、変形状及び破壊部位ともにAUTODYNの結果とほぼ対応した。

Fig.12に脚部コンクリートの平均せん断応力()と平均せん断ひずみ()の関係を示す。高さ1m,2mともにせん断応力は $2.5\text{N}/\text{mm}^2$ の近傍で頭打ちとなり、せん断

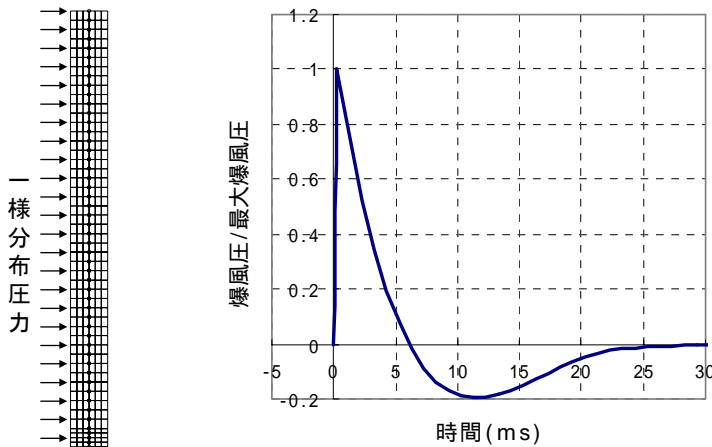


Fig. 7 解析モデル
Analysis Model

Fig. 8 仮定した爆風圧の時刻歴
Assumed Time History of Blast Load

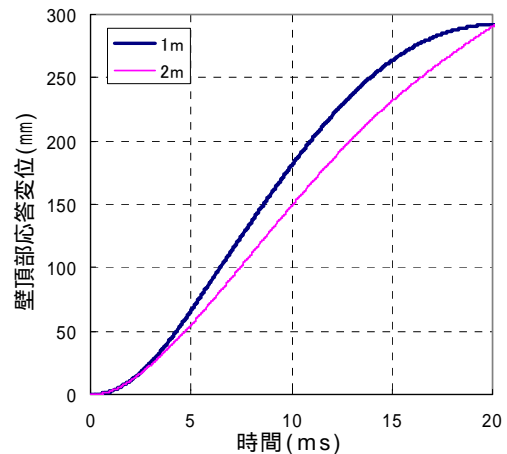


Fig. 9 壁頂部の水平変位の時刻歴
Time History of Displacement Response
at Top of RC Wall

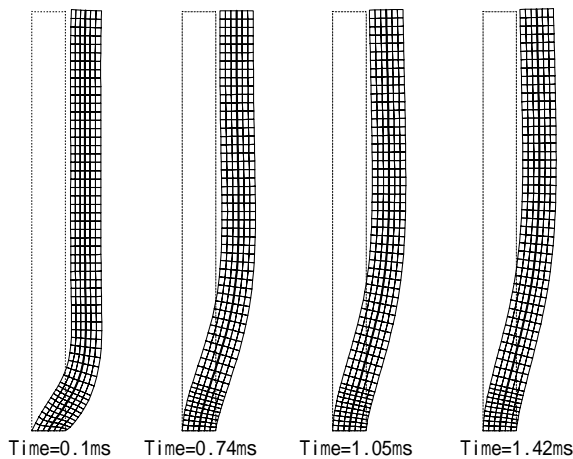


Fig. 10 変形モード (H=1m)
Deformation Mode (H=1m)

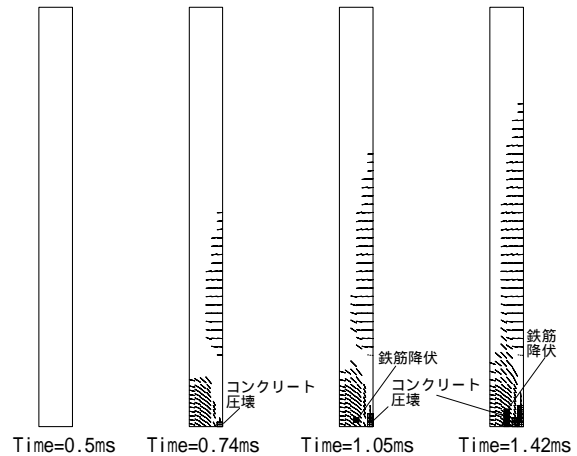


Fig. 11 ひび割れパターンと損傷状況 (H=1m)
Crack Pattern and Damage Condition (H=1m)

ひずみが進展し、脚部でせん断破壊したことがわかる。静的な一様分布圧力を受ける場合には、細長い形状であるために曲げ変形が支配的になるが、動的な爆風圧を受ける場合には、爆風圧が負荷された瞬間、慣性力の影響により脚部のせん断変形が卓越することがわかった。

以上より、RC壁面に作用する爆風圧-時間関係を仮定できれば、動的非線形FEM解析により、水素爆発による爆風圧を受けるRC壁の動的応答が評価可能であることがわかった。

4. FINALによるパラメータ解析

4.1 解析パラメータ

爆風圧を受ける構造物の応答は、受ける衝撃圧力の大きさと、その継続時間で定義される力積に大きく影響を受ける⁵⁾。そこで、3章で述べた解析手法により、任意

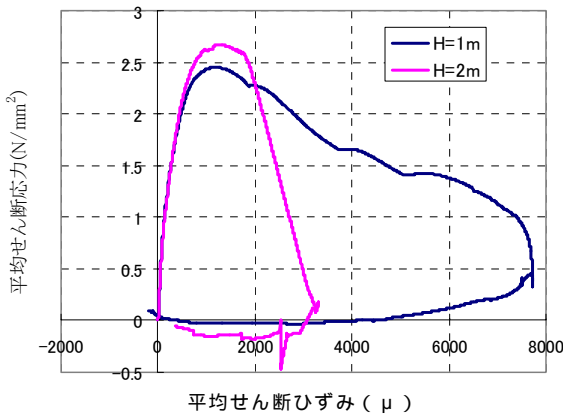


Fig. 12 平均せん断応力～せん断ひずみ関係
Average Shear Stress - Shear Strain Relationships at Base

Table 2 解析パラメータ及び解析結果一覧
Analysis Parameters and Analysis Results

壁厚 (mm)	配筋	力積 最大圧力	変位 (mm)	ϵ_R	τ	鉄筋 降伏	圧壊	破壊 モード
1	80 $\phi 3.2@50.S$	3.02 (kPa-s)	249.7	4.91	2.18	○	○	S
2	80 $\phi 3.2@50.D$		223.8	5.46	2.21	○	○	S
3	100 D6 @50. S		161.0	2.52	2.17	○	○	S
4	100 D6 @50. D	1.2 (MPa)	144.5	5.08	2.38	○	○	S
5	120 D10@50. S		120.2	1.76	2.24	○	○	S
6	120 D10@50. D		99.24	3.56	2.51	○	○	S
7	80 $\phi 3.2@50.S$	1.76 (kPa-s)	132.0	2.36	1.40	○	○	B
8	80 $\phi 3.2@50.D$		124.3	3.56	1.44	○	○	B
9	100 D6 @50. S		89.19	2.16	1.39	○	○	B
10	100 D6 @50. D	0.7 (MPa)	77.44	2.95	1.60	○	○	S
11	120 D10@50. S		63.54	0.75	1.39	○	○	B
12	120 D10@50. D		48.50	1.88	1.75	○	○	S
13	80 $\phi 3.2@50.S$	0.88 (kPa-s)	63.84	0.76	0.85	○	○	B
14	80 $\phi 3.2@50.D$		60.79	1.12	0.89	○	○	B
15	100 D6 @50. S		42.05	0.70	0.84	○	○	B
16	100 D6 @50. D	0.35 (MPa)	33.10	1.08	0.95	○	○	B
17	120 D10@50. S		27.73	0.34	0.86	○	○	B
18	120 D10@50. D		19.50	0.60	1.00	○	○	B
19	80 $\phi 3.2@50.S$	0.25 (kPa-s)	15.02	0.23	0.35	○	○	B
20	80 $\phi 3.2@50.D$		13.98	0.33	0.36	○	○	B
21	100 D6 @50. S		9.137	0.13	0.37			C
22	100 D6 @50. D	0.1 (MPa)	7.226	0.14	0.36			C
23	120 D10@50. S		5.640	0.07	0.39			C
24	120 D10@50. D		4.285	0.08	0.39			C

配筋のS、D：シングル配筋，ダブル配筋 変位：壁頂部最大変位
 ϵ_R ：最大鉄筋ひずみ(%) τ ：脚部の最大平均せん断応力(N/mm²)
 破壊モードのS、B、C：脚部せん断破壊，曲げ降伏，ひび割れのみ

の最大圧力及び力積を受ける場合に対して、RC壁の壁厚、配筋を変数としたパラメータ解析を実施した。Table 2に各解析パラメータを示し、Table 3に仮定したRC壁の断面の詳細を示す。爆風圧-時間関係は、Fig. 8に示すものとし、その力積は最大圧力に応じて比例的に増減するものと仮定した。RC壁の高さは1mに限定し、その他の条件は3章と同一とした。

4.2 パラメータ解析結果

Table 2にパラメータ解析結果を示す。表中の破壊モードにおけるせん断破壊(S)の判断基準は、脚部の最大平均せん断応力()が、ACI規準のせん断ひび割れ強度の0.33 σ_c (σ_c :コンクリート軸圧縮強度(N/mm²))を超えた場合にせん断破壊するものと判定した。

Fig. 13に力積0.88 kPa-s (最大圧力0.35 MPa) に対する各壁の頂部水平変位の時刻歴を示す。壁厚が増すほど、及び配筋量が増えるほど、最大変位が小さくなり、また、最大変位に到達するまでの時間が短くなる傾向を示す。

Fig. 14及びFig. 15に最大圧力0.35MPa、壁厚100mmでダブル配筋の解析(No.16)による変形モードとひび割れ・

Table 3 仮定したRC壁の断面
Details of Assumed RC Walls

壁厚= 80mm 鉄筋比=0.2% 3.2 ϕ 50.8 Single	壁厚=100mm 鉄筋比0.64% D6 ϕ 50 Single	壁厚=120mm 鉄筋比=1.18% D10 ϕ 50 Single
壁厚= 80mm 鉄筋比=0.4% 3.2 ϕ 50.8 Double	壁厚=100mm 鉄筋比=1.28% D6 ϕ 50 Double	壁厚=120mm 鉄筋比=2.37% D10 ϕ 50 Double

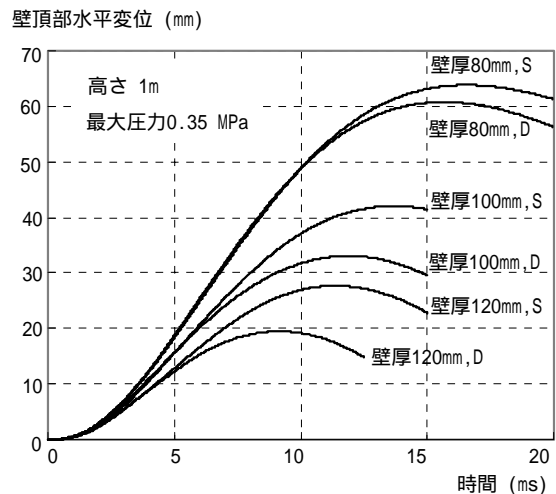
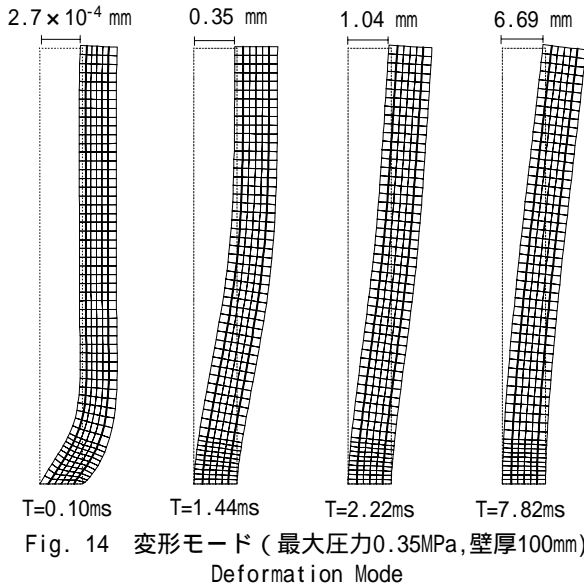


Fig. 13 壁頂部の水平変位の時刻歴
Time History of Displacement Response at Top of RC Wall



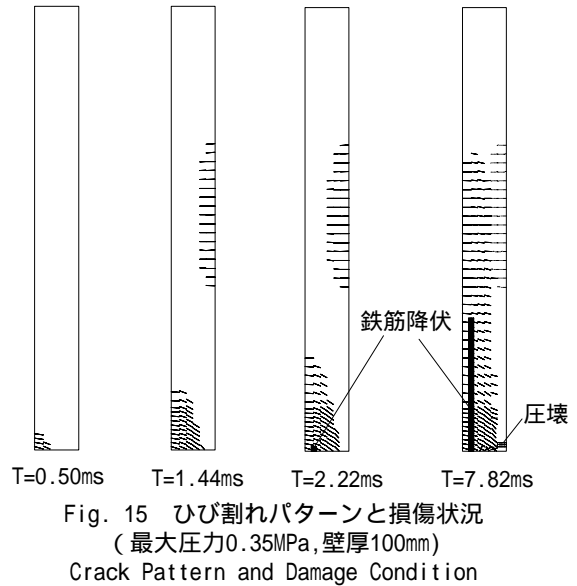
鉄筋降伏状況をそれぞれ示す。このケースでは、鉄筋は降伏し、かぶりコンクリートが圧壊するが、崩壊には至っていない。また、Fig.14からわかるように、崩壊に至らない場合の変形モードの特徴として、爆風圧を受けた直後は脚部のせん断変形が顕著に生じるが、時間の経過に伴い、曲げ変形に移行していることがわかる。

Table 2より力積が1.76kPa-s(最大圧力0.7MPa)以上において、脚部がせん断破壊し、力積が0.88kPa-s(最大圧力0.35MPa)の場合は曲げ降伏、力積が0.25kPa-s(最大圧力0.1MPa)の場合、壁厚80mm以外は、鉄筋も降伏せず、ひび割れのみが生じる結果となった。

5. まとめ

- (1)AUTODYNによる気体と構造物の連成衝撃解析では、仮定した条件下において、水素爆風圧によりRC壁は崩壊した。
- (2)AUTODYNによる気体と構造物の連成衝撃解析とFINALによる構造物の動的非線形FEM解析を比較した結果、RC壁の非線形挙動及び破壊性状はほぼ一致した。
- (3)RC壁面に作用する爆風圧-時間関係を仮定できれば、動的非線形FEM解析により、水素爆発による爆風圧を受けるRC壁の動的応答が評価可能である。
- (4)RC壁が水素爆風圧を受けると、慣性力の影響により、脚部がせん断破壊する可能性がある。
- (5)パラメータ解析では、力積が1.76kPa-s(最大圧力0.7MPa)以上で、脚部がせん断破壊し、力積が0.88kPa-s(最大圧力0.35MPa)の場合は曲げ降伏、力積が0.25kPa-s(最大圧力0.1MPa)の場合、壁厚80mm以外は、鉄筋も降伏せず、ひび割れのみが生じる結果となった。

爆風圧を受ける構造物の応答性状は、作用する最大爆風圧力及びその継続時間として定義される力積に依存する。しかし、水素爆発による爆風圧の力積は、反射波の



影響もあり、未解明な点が多く、実験データが殆どないのが現状である。本研究は、ある一定の仮定条件下の検討に過ぎない。今後は、現象の究明を目的として実験を行い、解析手法の確認及び改良を行う予定である。

謝辞

本研究は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)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。本研究の実施にあたりご指導をいただきましたNEDO, SRI (Stanford Research Institute International)の関係者の方々、本委託業務に関する評価・サポート委員会委員の方々、また、AUTODYNによる解析でご協力戴きました(株)CRCソリューションズ・片山雅英博士に感謝いたします。

参考文献

- 1) 諏訪好英, 他: 水素ガスの爆発事故対策に関する研究(その1): 水素ステーションの爆発事故に対する障壁設置の効果, 大林組技術研究所報, No.68, 2004
- 2) 諏訪好英, 他: 水素爆発による鉄筋コンクリート造構造物への影響予測(その1~その2), 水素エネルギー協会大会, Vol.23, pp.53-60, 2003.12
- 3) AUTODYN. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software: Theory Manual, Century Dynamics Limited, 1999.
- 4) 長沼一洋, 他: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第536号, pp.135-142, 2000.10
- 5) 武藤 清: 構造物の強度と変形(耐震設計シリーズ2), 丸善, 1965.7