

研究論文

数値シミュレーションを用いた鉄筋コンクリート版の爆発損傷の評価

萩谷浩之^{*}, 森下政浩^{**}, 安藤智啓^{***}, 田中秀明^{**}, 松尾 啓^{**}

本研究では、鉄筋コンクリート(RC)構造物が爆発荷重を受けた場合の損傷を数値シミュレーションを用いて精度良く予測するための手法を確立するため、接触爆発荷重を受けるRC版に対して有限差分法に基づく3次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、その結果と実験から得られたクレータとスポールの寸法、版表面のき裂発生状況及び鉄筋のひずみを比較することにより、本解析手法の工学的有効性について検討した。その結果、本手法により、(1)スポールの直径及び深さ、並びにクレータ深さについては比較的精度良く評価できること、(2)RC版上面のき裂発生状況をほぼ模擬し、下面のき裂発生状況についても定性的には表すことができること、(3)鉄筋のひずみレベルを比較的良く予測できることなどが判明した。

1. 緒 論

著者ら^{1)~3)}は、これまで爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート(RC)構造物の損傷を把握することを目的として、RC版のコンクリート強度、配筋、爆薬量、爆薬とRC版との距離等を種々変化させて爆発実験を実施し、RC版の爆発面に生じるコンクリートの凹み(クレータ)、裏面に生じる剥離(スポール)及びクレータとスポールが版厚方向に連結する場合の貫通孔の寸法並びにき裂発生状況に着目して、RC版の損傷状況を実験的に検討してきた。

一方、コンピュータの性能が飛躍的に向上した今日の現状を鑑みると、研究を進めるにあたり、実験的手法だけでなく、数値解析的な手法の併用により効率的かつ経済的に実施する必要がある。これまでも爆発荷重を受けるRC版の数値解析的な研究に関する報告例^{4)~7)}はあるが、著者ら¹⁾の試みを含めてすべて2次元的な解析であり、実際の3次元RC構造物の損傷を模擬した解析例は著者らの知る限り存在しない。また、爆発荷重を受けるRC版の数値解析では、コンクリートの材料特性が特に重要である。

コンクリートの破壊規準は、ひずみ速度の他、応力の静水圧成分にも依存することが知られているが、実験の実施が困難なことから、圧縮側についてはひずみ速度で10⁰のオーダー、側圧で100MPa程度までの報告^{8),9)}しかなされていない。コンクリートの単軸引張強度については、ひずみ速度1×10¹程度までの報告¹⁰⁾がなされているが、結果により大きな差がある。いずれにせよ、これらの報告にあるひずみ速度は、爆発現象に比べ数オーダー低いものと考えられる。

このような背景により、本研究では、接触爆発荷重を受けるRC構造物の損傷を数値シミュレーションを用いて精度良く予測するための手法を確立するための第1段階として、有限差分法によるRC版の3次元弾塑性衝撃応答解析を試みた。3次元解析により、クレータ、スポール等版厚方向の損傷状況の他、軸対称のような2次元的な取扱いで解析が困難な版表面のき裂発生状況、鉄筋のひずみについても解析が可能となる。特に、本研究では、爆発現象を模した高圧・高ひずみ速度条件下の材料試験の実施が現実には困難であることを考慮して、静的な材料試験結果に基づいた数値シミュレーションを実施し、その結果を別途実施した実爆実験の結果と比較することにより、本解析手法の工学的有効性について検討を行った。なお、本数値解析には、汎用衝撃応答解析コードAutodyn-3D(Ver.3.2)¹¹⁾を用いた。

2. 実験の概要

2.1 RC版試験体及び爆薬

本解析において対象としたRC版試験体は、Fig. 1

2003年3月27日受付

2003年7月7日受理

^{*}防衛庁 技術研究本部 第1研究所
〒153-8630 東京都目黒区中目黒2-2-1
TEL 03-5721-7005 ext.6268
FAX 03-3713-6077

E-Mail hagiya@jda-trdi.go.jp

^{**}防衛庁 技術研究本部 第4研究所
〒229-0006 神奈川県相模原市淵野辺2-9-54
TEL 042-752-2941 ext.235

^{***}防衛庁 管理局
〒162-8801 東京都新宿区市谷本村町5-1
TEL 03-3268-3111 ext.21013

Table 1 List of static design values of RC slabs

Slab Type	Shear-Span Ratio a/d	Main Rebar Ratio P_1	Static Shear Capacity V_{usc} (kN)	Static Bending Capacity P_{usc} (kN)	Shear-Bending Capacity Ratio $\alpha (=V_{usc} / P_{usc})$
L-type	3.53	5.02×10^{-3}	75.1	68.4	1.10
H-type			104.0	73.5	1.41

に示す600mm×600mm×100mmの正方形の複鉄筋RC版である。縦横の鉄筋には、呼び径が6mmの異形鉄筋D6(JIS規格品)を用いている。鉄筋の配筋間隔は、中央部においていずれも100mmである。また、実験時の鉄筋のひずみを測定するため、鉄筋にゲージ長5mmのひずみゲージを防水措置を施して貼り付けた。ひずみゲージの貼り付け位置はFig. 1に示す中央の下部横鉄筋の下側の3点(G1, G2及びG3)であり、中央からそれぞれ5cm, 15cm及び25cmの位置である。コンクリートの圧縮強度は17.9MPa及び47.5MPaの2種類であり、それぞれのコンクリートを用いた試験体をLタイプ及びHタイプと呼ぶ。なお、上部及び下部の縦横鉄筋の位置を固定するために、呼び径が10mmの異形鉄筋D10を試験体の上部及び下部の外周にそれぞれ配筋している。

試験体の静的設計値を Table 1 に示す。このうち、押し抜きせん断耐力 V_{usc} と曲げ耐力 P_{usc} は、コンクリート標準示方書¹³⁾に基づいて算出した。また、静

的せん断余裕度 α は、 V_{usc} を P_{usc} で除した値であり、 $\alpha > 1.0$ は静的荷重時に RC 版が曲げ破壊で終局に至ることを表す。また、コンクリート及び鉄筋用鋼材の力学的特性をそれぞれ Table 2 及び Table 3 に示す。

一方、爆薬については、トリニトロトルエン(TNT)爆薬とペンスリット(PETN)爆薬を各々50%ずつ調合したペントライト爆薬を使用した。爆薬は、Fig. 2に示すような直径と高さの等しい円柱形で、重量は 25g($\phi = 27\text{mm}$), 51g($\phi = 34\text{mm}$)及び 102g($\phi = 43\text{mm}$)の3種類である。実験には、Hタイプ試験体については爆薬量 102g 及び 51g(以下、これらの試験条件をそれぞれ H-102, H-51 と呼ぶ。), Lタイプ試験体については爆薬量 51g 及び 25g(以下、これらの試験条件をそれぞれ L-51, L-25 と呼ぶ。)を用いた。Table 4 に、ペントライト爆薬の密度、体積、爆轟の反応完結点である C-J(Chapman-Jouguet)エネルギー及び C-J エネルギーに体積を乗じて算出した爆轟エネルギーを示す。

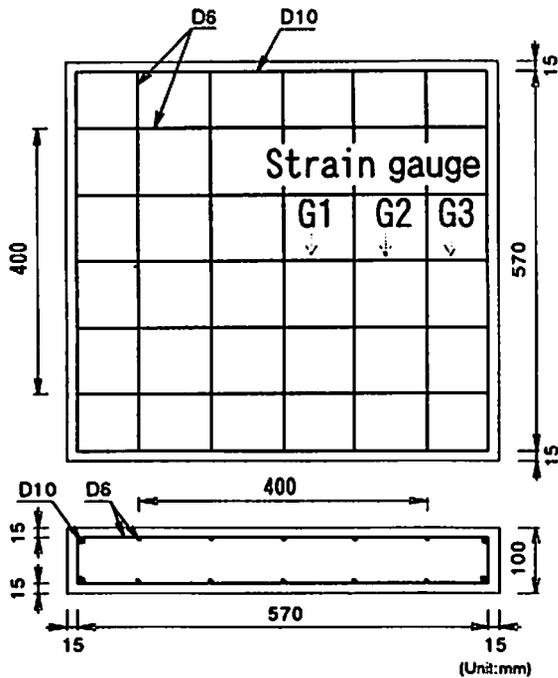


Fig.1 Dimensions of RC slab and reinforcing bar arrangement

2.2 実験方法

Fig. 3 に、実験の状況を模式的に示す。RC 版試験体は 2 本の角材上に単に設置した。爆薬を設置した

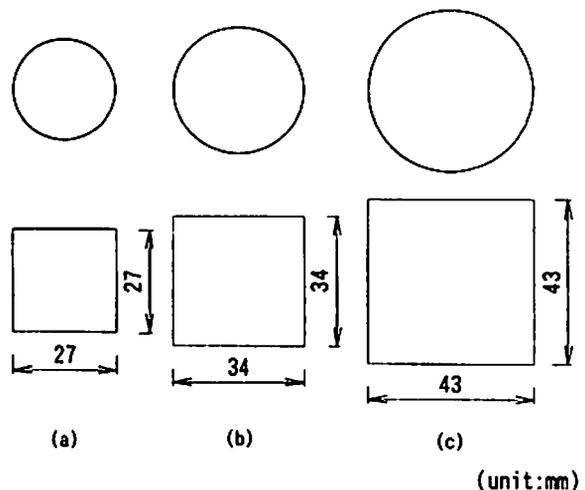


Fig.2 Dimensions of explosive

Table 2 Material property of concrete

Slab Type	Age (day)	Density ρ_c (g/cm ³)	Compressive Strength f_c (MPa)	Sound Speed of Longitudinal Wave C_l (m/s)	Young's Modulus E_c (GPa)	Poisson's Ratio ν_c
L-type	28	2.30	17.9	3076.1	20.6	0.17
H-type		2.34	47.5	3102.7		

Table 3 Material property of reinforcing bar

Rebar Type	Grade	Yield Strength σ_r (MPa)	Young's Modulus E_r (GPa)	Poisson's Ratio ν_r
D6	SD295A	333	177	0.30
D10	SD345	394	186	

Table 4 Detonation energy of explosives

Explosive Type	Density ρ_c (g/cm ³)	Volume V_c (mm ³)	C-J Energy E_{CJ} (J/mm ³)	Detonation Energy E_c (kJ)
Pentolite - 25g	1.62	1.54×10^4	8.10	1.25×10^2
Pentolite - 51g		3.09×10^4		2.50×10^2
Pentolite - 102g		6.24×10^4		5.05×10^2

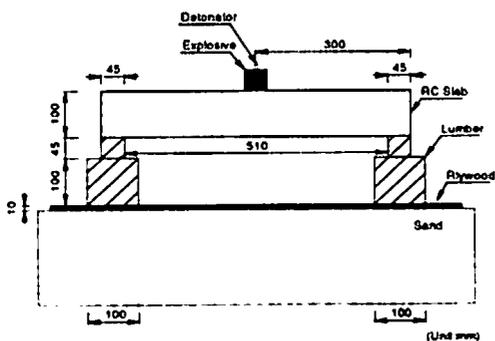


Fig.3 Situation of experiment

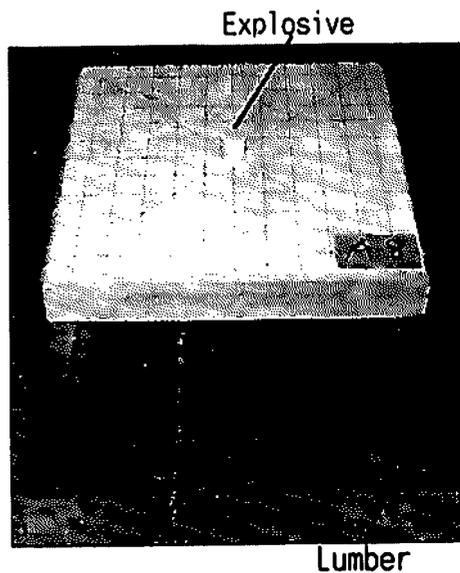


Fig.4 Setup for experiment

状況を Fig. 4 に示す。爆薬は、電気雷管を用いて円柱形爆薬の上面中心から起爆させた。測定項目は、爆発により RC 版に生じたクレータとスポールの直径及び深さ、貫通孔直径並びに鉄筋のひずみである。クレータとスポールの計測において、直径については中心を通る 4 方向の平均値を、深さについては最も深い箇所(但し、貫通孔の発生する場合については、貫通孔断面が最小となる箇所)の値を採用した。また、鉄筋のひずみについては、ひずみゲージを用いて計測し、ブリッジボックス及びシグナルコンディショナ (KYOWA CDV-700A) を介し、データ収集装置 (Nicolet MultiPro) に記録した。

3. 解析の概要

3.1 解析モデル

解析モデルを Fig. 5 に示す。本解析に用いた汎用衝撃応答解析コード Autodyn-3 D (Ver.3. 2) は陽解法に基づいており、計算のタイムステップ Δt は Courant 条件により決定される¹¹⁾。今回の解析では、RC 版及び爆薬の対称性を考慮して 1/4 モデルにつ

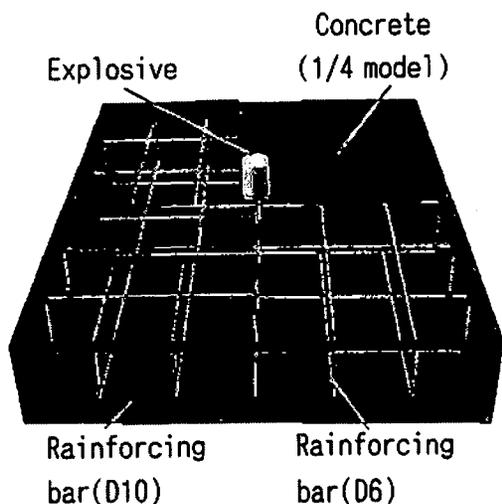


Fig.5 Simulation model

いて実施した。適用した要素タイプは、コンクリート部及び爆薬部については8節点の3次元ソリッド要素である。RC版の1/4モデルの境界条件については、実験時の設置条件を模擬するため、RC版裏面の支持部(実験におけるRC版と角材との接触部を指す。)の鉛直下方向変位のみを0に拘束し、1/4モデルの残り3/4の領域と共有する面については、鏡面对称条件を設定した。RC版及び爆薬は、いずれも実験に用いた実物の形状寸法に即して忠実にモデル化した。また、実験に対応させるため、爆薬は上面中央からの点起爆とした。爆発荷重は、爆薬の起爆点から順次爆薬要素が爆轟していき、最終的にRC版に作用する。RC版中の鉄筋については、他の要素に比較してサイズが小さく、解析所要時間を著しく増大させることが予想されたため、梁要素としてモデル化した。コンクリート要素と鉄筋の要素間は、完全付着を仮定している。また、電気雷管についてはモデル化を省いた。総節点数は、1/4モデルにおいて63,706点である。

なお、各要素の積分点数は、解析所要時間短縮のため1点積分としている。また、数値解析時間は、最初の爆薬要素が爆発した時間を $0\mu s$ とし、その時点からRC版に生じるクレータ及びスポール破壊の進行がほぼ終了するまでの $1000\mu s$ とした。

3.2 材料モデル

解析に用いたコンクリート、鉄筋及び爆薬に対する材料モデルについて記述する。

3.2.1 コンクリート

コンクリートの状態方程式及び降伏・破壊基準に関して、静水圧成分に対してはPorousモデル¹¹⁾を、

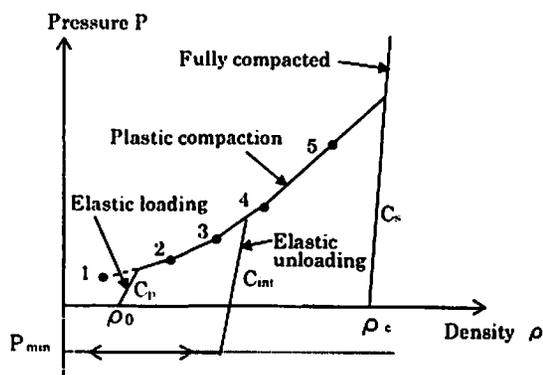


Fig.6 Equation of state for concrete

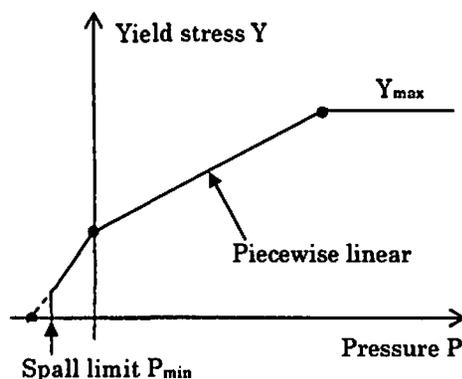


Fig.7 Constitutive model for concrete

偏差応力成分に対してはMohr-Coulombモデル¹¹⁾を修正したものを適用した。

(1) 静水圧成分

コンクリートの静水圧成分に対する材料モデルは、Fig.6に示すような、折線近似による圧力-体積ひずみ関係(Porousモデル)に、引張側のスポール圧に達した時点で剛性を0とする基準を組み合わせたものとした。Porousモデルの材料物性値については、山口らの報告¹³⁾に基づき決定した。但し、スポール圧は、一般に静的引張強度が圧縮強度の1/20~1/10程度となることから、圧縮強度の1/10を仮定した。

(2) 偏差応力成分

コンクリートの偏差応力成分に対する材料モデルには、Fig.7に示すような、引張限界及び上限値を有するDrucker-Prager型のもの(AutodynのMohr-Coulombモデルを修正したもの)を用いた¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。材料モデルの材料物性値については、山口らの報告¹³⁾に基づき算出した。

3.2.2 鉄筋

鉄筋要素に用いた物性モデルは、圧縮側及び引張

Table 5 Material parameters of pentolite

C-J Detonation Velocity V_{CJ} (m/s)	C-J Pressure P_{CJ} (GPa)	C-J Energy E_{CJ} (J/mm ³)	Material Parameter				
			A (MPa)	B (MPa)	R_1	R_2	W
7,530	25.5	8.10	540	9.37	4.50	1.10	0.35

側の場合とも、折線近似による圧力-体積ひずみ関係に従う等方弾塑性体モデルである。なお、降伏応力 σ_r とポアソン比 ν_r は、それぞれ Table 3 のとおりである。

3. 2. 3 爆薬

爆薬要素に用いる材料モデルには、以下に示す JWL (Jones-Wilkins-Lee) の状態方程式¹¹⁾を採用した。

$$P = A(1 - Wh/R_1)e^{-R_1/h} + B(1 - Wh/R_2)e^{-R_2/h} + Whr_{ref}Q \quad (1)$$

ここで、 P は圧力、 Q は内部エネルギー、 A, B, R_1, R_2, W は材料定数、 r 及び r_{ref} はそれぞれ密度と参照密度を表し、 $h = r/r_{ref}$ 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、上述の状態方程式に関わる物性値の他に、爆薬内を伝播する反応速度 (C-J 爆轟速度) と爆薬の反応完結点の圧力 (C-J 圧力) が必要である。実験に用いたペントライトに対するこれらの値を Table 5 に示す。

4. 結果及び考察

4. 1 損傷状況

H-102 試験体の場合を代表例として、中央断面における破損の進展状況を Fig. 8 に、応力の伝播状況を Fig. 9 に示す。H-102 試験体の場合、解析でのタイムステップ Δt は $1 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2} \mu s$ であった。Fig. 8 及び Fig. 9 より、RC 版の破損メカニズムを把握することができる。すなわち、

- 1) 爆発により生じた圧縮応力波がコンクリートに入射する。
- 2) 圧縮応力波がコンクリート内を伝搬するとともに塑性域が半球状に拡大する。
- 3) 裏面で圧縮応力波が反射し、引張応力波となり、スポール破壊が生じる。
- 4) 応力波の反射及び干渉を繰り返す、最終的な破損状態となる。

次に、Fig. 10 に実験後の試験体の断面写真を示す。Fig. 8 ($t=1000 \mu s$ の場合) と Fig. 10 を比較すると、シミュレーションにより表面のクレータ及び裏面の

スポールの発生状況を定性的には良く模擬できていることが分かる。同様に、Fig. 11 に示すように H-51、L-51 及び L-25 の場合もクレータ及びスポールの発生状況を定性的に模擬している。

Table 6 にクレータの直径及び深さ、スポールの直径及び深さ、並びに貫通孔の直径について、実験結果とシミュレーション結果を併せて示す。この際、数値シミュレーションについては、以下の2つの基準を満足する部分をスポール部と見なして評価した。

- 1) 引張応力が作用して破壊が生じた。
- 2) 裏面側に平板状に破壊が生じている。

基準 1) については、RC 版に生じるスポールはスポール圧による引張破壊と考えられるため、基準 2) に関しては、既往の実験結果¹²⁾を参考に設定した。

著者らの経験¹¹⁾に基づく、同じ爆発条件でも、クレータ及びスポールの寸法は、2~3割ばらつくことが多く、この範囲の差であれば、シミュレーション結果は工学的に有効であると考えられる。この基準に基づき Table 6 を見ると、シミュレーション結果はクレータ直径については過小に評価する傾向があるものの、クレータ深さ、スポール直径及び深さについては、一部を除き実験結果に比較的近い値となっている。すなわち、数値シミュレーション結果に筆者らが提案するスポール破壊域の評価基準を組合せることにより、損傷評価で最も重要な厚さ方向の損傷程度をある程度予測することができる。なお、シミュレーションによるクレータ直径が過小となる理由としては、本シミュレーション手法が連続体力学に基づくため、クレータの形成に伴う破片の飛散を模擬できないことなどが考えられる。

4. 2 表面のき裂

3次元数値シミュレーションにより、これまで2次元では困難であった RC 版表面のき裂分布について解析することが可能となる。Fig. 12 に実験後の試験体上面及び下面のき裂発生状況の例を示す。ここで、上面とは爆薬を設置した側の面を指す。Fig. 13 に同じ爆発条件の数値シミュレーションによるき裂発生状況を示す。なお、Fig. 12 における RC 版の支持部及び Fig. 13 における版の下面の境界条件設定位置は、

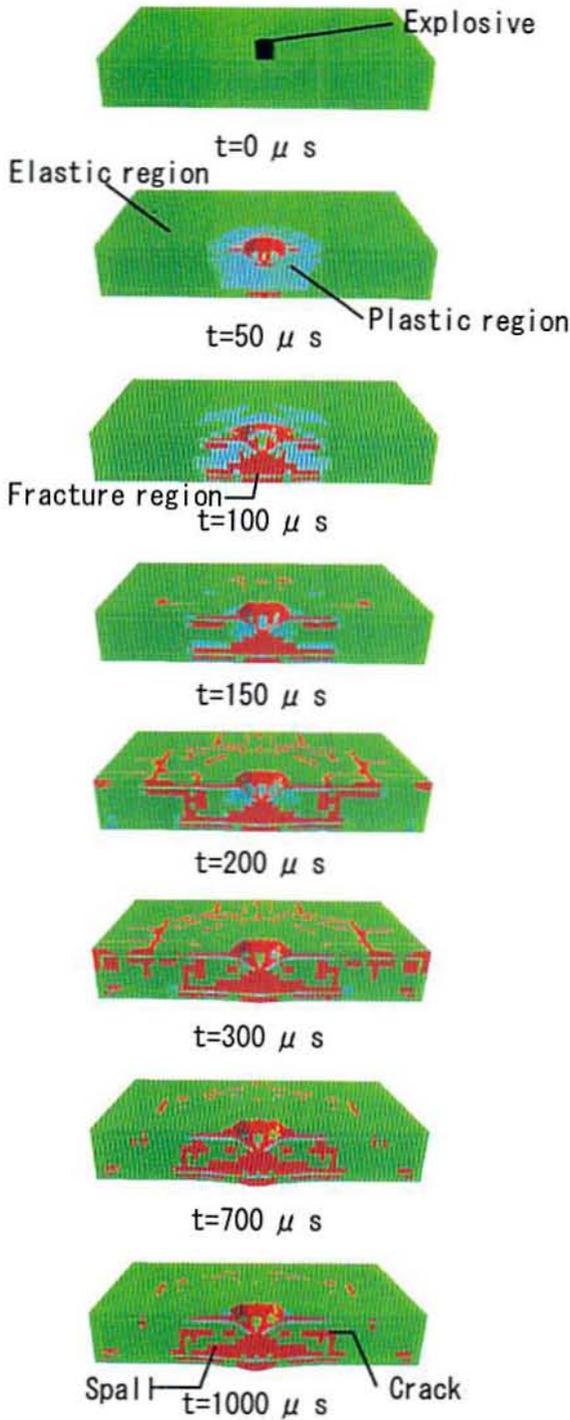


Fig.8 Simulation results of material status (H-102; concrete strength: 47.5MPa, charge weight: 102g)

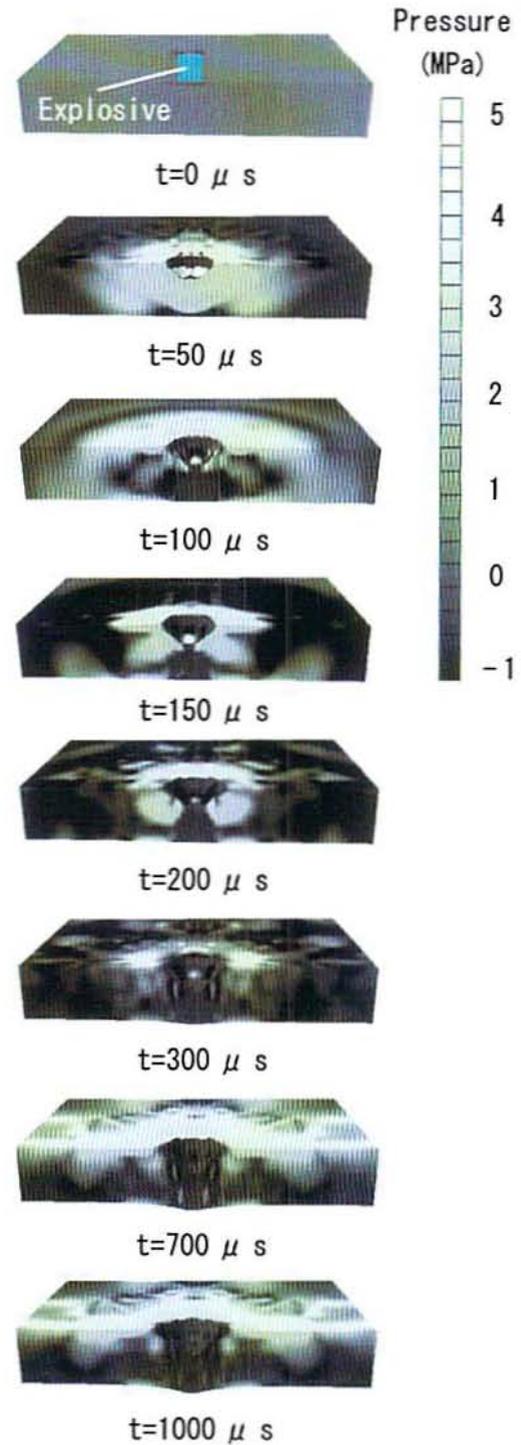


Fig.9 Simulation results of pressure distribution (H-102)

いずれも左右端である。Fig.12 より、RC 版上面には爆発点を中心とした放射状き裂と4辺から約 10cm の位置にき裂が見られ、裏面には放射状き裂が著しく生じている。今回実施した3次元シミュレーションは、版上面のき裂発生状況をほぼ模擬しており、下面については対角線方向のき裂はよく表現されていないものの、き裂の発生状況を定性的には模擬していることが分かる。

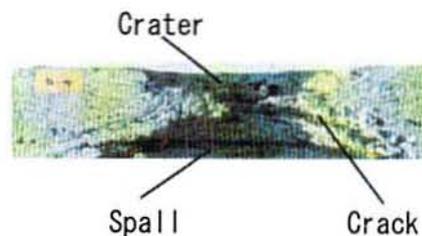


Fig.10 Experimental cross section (H-102)

Table 6 Comparison between experimental and simulated results

Parameter		Crater		Spall		Perforation	Strain gauge
		Diameter D_c (cm)	Depth H_c (cm)	Diameter D_s (cm)	Depth H_s (cm)	Diameter D_p (cm)	Gauge revealed by spalling
H-102	Experiment	19.7	4.3	29.9	5.7	1.9	G1,G2
	Simulation	8.6	4.6	30.0	7.0	2.0	—
H-51	Experiment	15.8	3.1	25.8	3.3	—	G1
	Simulation	6.0	3.6	25.8	4.1	—	—
L-51	Experiment	15.7	3.9	22.1	3.7	—	G1
	Simulation	8.0	4.5	26.3	4.5	—	—
L-25	Experiment	12.8	2.5	2.0	0.5	—	—
	Simulation	7.0	3.2	20.0	4.4	—	—

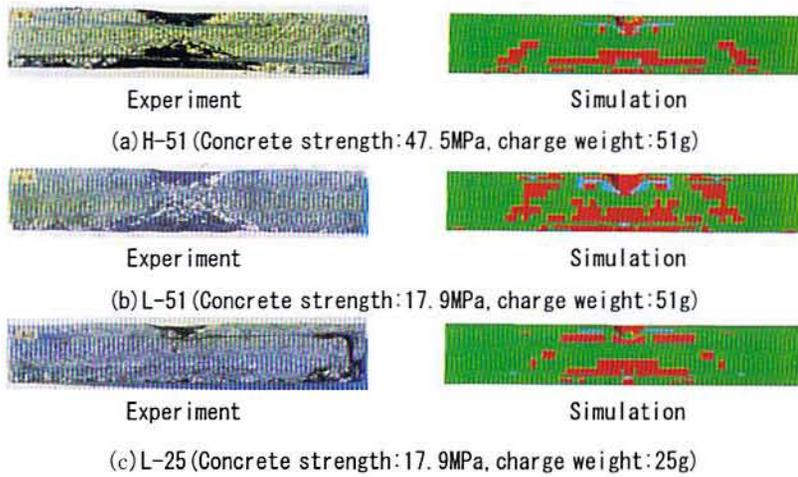


Fig.11 Cross section of RC slabs



Fig.12 Experimental result of cracking (H-102)



Fig.13 Simulated result of cracking (H-102)

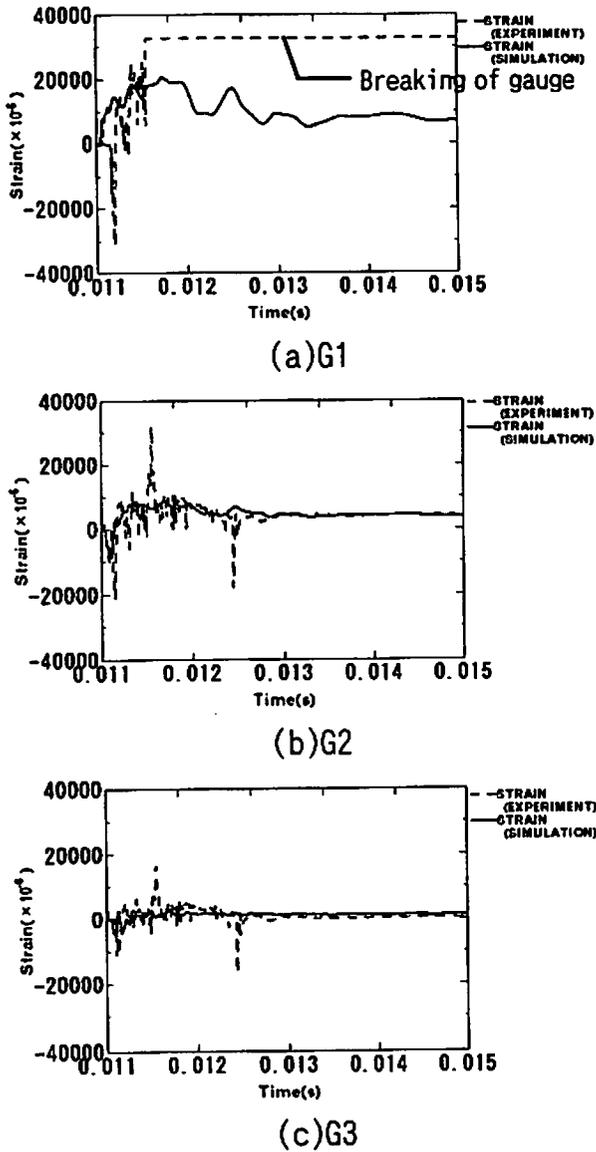


Fig.14 Strain histories for H-102

4.3 鉄筋ひずみ

実験とシミュレーションによる爆発時のひずみ履歴の比較結果を、最も爆薬量の多いH-102の場合を例にFig.14に示す。なお、Fig.14(a)の実験値は、ひずみゲージ断線のため、途中でオーバースケールとなっている。爆発直後の高周波のひずみ波形が、シミュレーションでは適切に表現されているとは言い難いが、鉄筋のひずみレベルに関しては比較的良く合っていることが分かる。実験値とシミュレーション結果でひずみ波形の分布が異なる理由としては、本シミュレーション手法ではコンクリートと鉄筋の要素間を完全付着と仮定しており、付着部分のはく離が表現できないこと等が考えられる。

5. 結言

本研究では、寸法が一辺 600mm、厚さ 100mm の

正方形鉄筋コンクリート版について、汎用衝撃応答解析コード AUTODYN-3D を用い、接触爆発を受けた場合の3次元損傷評価シミュレーションを静的材料特性に基づき実施し、実験結果との比較を行った。その結果、本数値シミュレーション手法により、(1) スポールの直径及び深さ、並びにクレタ深さについては比較的精度良く評価できること、(2) RC版上面のき裂発生状況をほぼ模擬し、下面のき裂発生状況についても定性的には表すことができること、(3) 鉄筋のひずみレベルを比較的良く予測できることなどが分かり、工学的有効性を確認することができた。今後、クレタ部やスポール部のコンクリート片のはく離・飛散を模擬可能な手法についても検討していきたいと考える。

文 献

- 1) 森下政浩, 田中秀明, 伊藤 孝, 山口 弘: 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 構造工学論文集, Vol.46A, 2000. 3
- 2) 田中秀明, 森下政浩, 伊藤 孝, 山口 弘: 爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす爆発位置の影響, 土木学会論文集, No.675/I-55, 2001. 4
- 3) 田中秀明, 辻 正哲: 爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす配筋の影響, コンクリート工学論文集, Vol.14-1, 2003. 1
- 4) 森下政浩, 山口 弘, 安藤智啓: 接触爆発を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷評価, 第28回安全工学シンポジウム講演予稿集, No.222, 1998. 7
- 5) N.Gebbeken, M.Ruppert: A new material model for concrete in high-dynamic hydrocode simulations, Archive of Applied Mechanics, Vol.70, No.7, August 2000.
- 6) N.Gebbeken, S.Greulich: Reliable Modelling of Explosive Loadings on Reinforced Concrete Structures, International Conference on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, May 2001.
- 7) Darell Lawver, Darren Tennant, and Howard Lecine: Response of Reinforced Concrete Wall Due to External Explosions for Ladeburg Bunker Tests 7A, B, International Conference on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, May 2001.
- 8) 山口 弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係(その2 高速載荷), 日本建築学会論文報告集, 396, 1989

- 9) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野 淳, 鈴木 篤: ひずみ速度効果を考慮した3軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, 2001. 2
- 10) 藤掛一典, 山根茂樹, 大野友則, 水野 淳, 鈴木 篤: 急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.592/V-39, 1998. 5
- 11) Autodyn. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software: Theory Manual, Century Dynamics Limited, 1999.
- 12) 土木学会: コンクリート標準示方書[2002 年制定]構造性能照査編, 2002.
- 13) 山口 弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係(その1 静的載荷), 日本建築学会論文報告集, 389, pp.98-108, 1988
- 14) Hancock, Soil and rock strength models, Pisces 2DELK Application Note 78-14, August, 1979
- 15) V.D.Hoek, Modelling of concrete by a Mohr-Coulomb model, Pisces International Technical Note TN-7802, March 1978.
- 16) V.D.Hoek, Modelling of reinforced concrete in Pisces 2DELK, Pisces International Technical Note TN-7802, March 1978.

Damage evaluation of reinforced concrete slabs subjected to contact detonation loads with numerical simulation

Hiroyuki Hagiya^{*}, Masahiro Morishita^{**}, Tomohiro Ando^{***}
Hideaki Tanaka^{**}, and Kei Matuo^{**}

In this study, in order to establish a damage evaluation method of RC structures subjected to contact detonation loads with numerical simulation, three-dimensional elasto-plastic impact analyses based on Finite Difference Method (F.D.M.) were carried out on RC slab models. The numerical results were discussed on sizes of crater and spall, cracking on the slab surfaces and reinforcement strain, compared with experimental results. The main results obtained are as follows: 1) The numerical results are relatively in good agreement with experimental results for the diameter and depth of spall, and the depth of crater. 2) Cracking on the top surface of the slab is almost simulated, and numerical cracking on the back surface is similar to experimental one. 3) Strain level is well predicted with the numerical simulation.

^{*}1st Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defense Agency, 2-2-1 Nakameguro, Meguro, Tokyo 153-8630, JAPAN

^{**}4th Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defense Agency, 2-9-54 Fuchinobe, Sagami-hara, Kanagawa 229-0006, JAPAN

^{***}Finance and Equipment Beaurc, Japan Defense Agency, 5-1 Motomura, Ichigaya, Shinjuku, Tokyo 162-8801, JAPAN)
