

論文 ボックス型鉄筋コンクリート構造物を用いた内部爆発実験

齋藤 和伸*¹・安藤 智啓*²

要旨：本研究では、RC 構造物の内部空間で爆薬が爆発する場合の構造物の応答および破壊性状に関する基礎的な知見を得るため、ボックス型 RC 構造物を用いた内部爆発実験を行った。実験時には RC 構造物に作用する圧力、構造物の加速度および鉄筋ひずみを計測し、実験終了後には RC 構造物の破壊状況を記録した。その結果、内部爆発の場合には局所的な破壊のみならず全体的な破壊も卓越すること、既往の予測式が危険側の評価を与える可能性があること、内部爆発により RC 版には非常に短時間に高い圧力が加わり、その圧力の作用に伴い RC 版には非常に大きい加速度が生じること等が明らかになった。

キーワード：ボックス型 RC 構造物、内部爆発、応答、破壊性状

1. はじめに

著者らは、爆発荷重が作用する場合の鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐爆設計法の確立に資するため、これまで RC 版や RC はりによる部材レベルの爆発実験^(例えば 1), 2)を実施し、これら部材に生じるコンクリートの剥離 (スポール破壊) やひび割れ分布等に関する実験データを蓄積してきた。その結果、RC 部材が至近距離から爆発荷重を受ける場合には、爆薬直下近傍の裏面あるいは側面のコンクリートがスポール破壊する極めて局所的な破壊の卓越することが分かってきた。また、そのスポール破壊の発生限界は、爆薬量、コンクリート厚さおよび爆薬と部材との離隔距離 (スタンドオフ距離) からある程度予測できることも分かってきた。

一方、実 RC 構造物を考えた場合、不測の爆発事故やテロ活動等により生じる爆発荷重は、RC 構造物の外部空間から作用するばかりでなく、構造物の内部空間からも作用すると考えられる。上述の RC 部材に関する結果は、爆薬周囲が開放された外部空間から荷重が作用する条件の下に得られたものであり、爆薬周囲が多部材で囲まれた内部空間から荷重が作用する場合に、同様の結果が得られるかどうかは明らかでない。

そこで、本研究では、RC 構造物の内部空間で

爆薬が爆発する場合 (以下、内部爆発) の RC 構造物の応答および破壊性状に関する基礎的な知見を得るために、一面が開口されたボックス型 RC 構造物を製作し、同構造物を用いた内部爆発実験を実施した。

2. 実験の概要

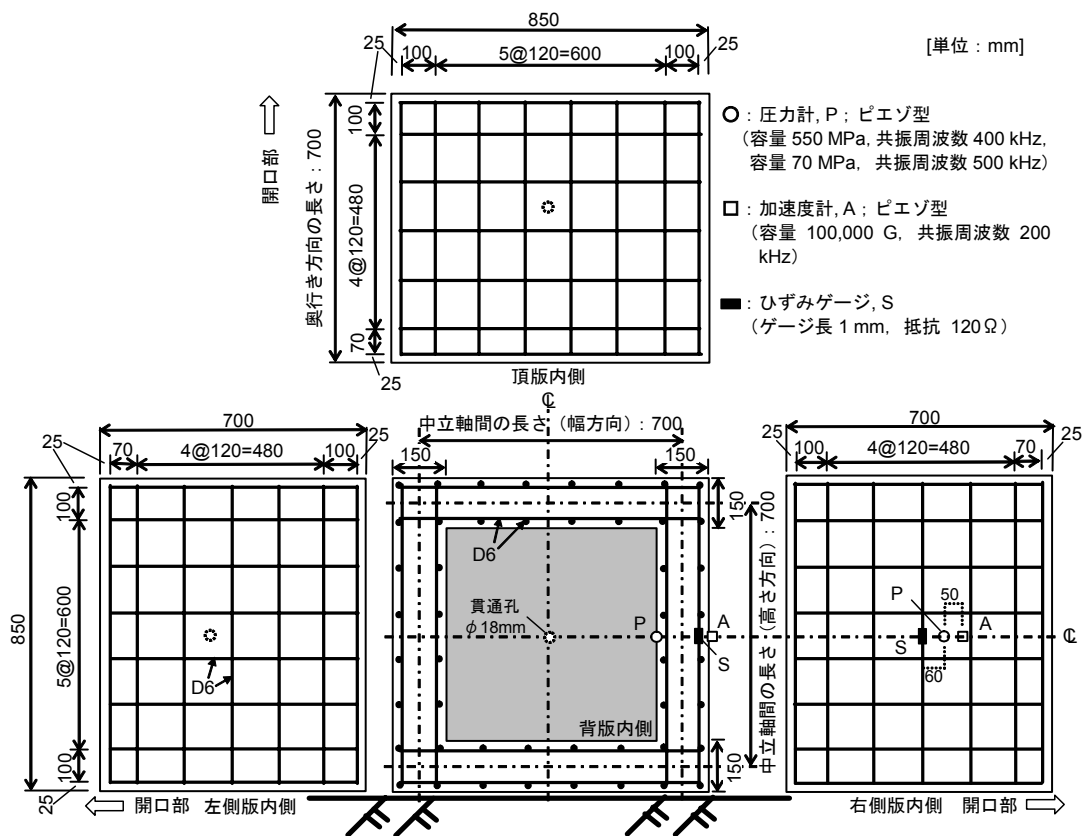
2.1 RC 構造物および爆薬

図-1 に、本実験に用いた RC 構造物 A, B の形状寸法および配筋状況を示す。各構造物には、実験時に爆薬やセンサーの設置を容易にするために、一面に開口部を設けている。各々の下段中央図の手前側が開口部である。いずれも、幅および高さ方向の版部材中立軸間の長さは 700 mm である。版厚 150 mm のものが A、版厚 100 mm のものが B である。奥行きのは長さはいずれの場合も 700 mm である。鉄筋 (D6-SD295A) は、各版部材においてかぶり 25 mm の位置に、縦横に基本的に 120 mm 間隔で複鉄筋配置した。

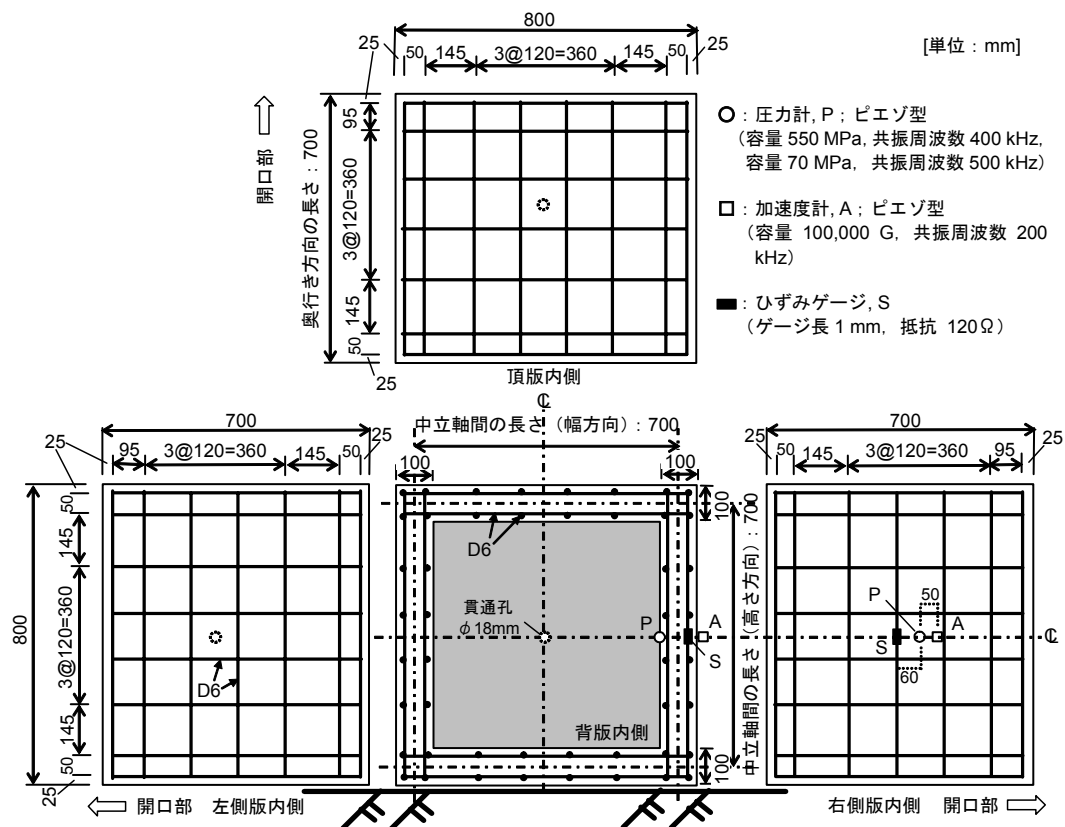
右側版には圧力計、加速度計およびひずみゲージを設置・貼付している。このうち、圧力計は版部材に直径 18 mm の小さい貫通孔を設け、この孔を利用して設置した。貫通孔は当初全ての版部材に施したが、計測を行わない箇所は金属製のキャップを埋め込み、実験時に爆発荷重

*1 防衛省陸上自衛隊 地理情報隊 工修 (正会員)

*2 防衛省技術研究本部 陸上装備研究所耐弾・耐爆構造研究室 主任研究官 博(工) (正会員)



(a) RC 構造物 A

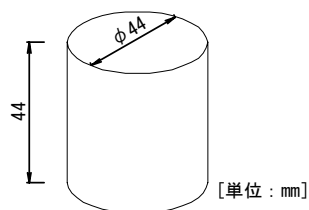


(b) RC 構造物 B

図－1 RC 構造物の形状寸法および配筋状況

表－１ コンクリートの材料特性値

圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン 比 ν_c
35.0	3.29	26.7	0.20



図－２ 爆薬の形状寸法（質量 110 g の場合）

の流出を防ぐ処置をした。表－１と表－２に、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を示す。

爆薬は質量 110 g のペントライト爆薬と 440 g の同爆薬を用いた。図－２に、前者の場合を例に形状寸法を示す。形状はいずれも直径と高さの等しい円柱体であり、質量 110 g の場合が直径 44 mm、質量 440 g の場合が直径 70 mm である。表－３に、ペントライト爆薬の爆轟特性値を示す。

2.2 内部爆発実験

実験ケースは、表－４に示す４ケースである。写真－１に、RC 構造物 A と質量 440 g の爆薬を用いた場合を例に、内部爆発実験の状況を示す。RC 構造物は、単純に砂地盤上に直置きしている。一方、爆薬は構造物や爆薬の種類に係わらず、開口部を正面から見て左側の側版内壁から爆薬中心までの距離が 100 mm の位置に設置している。この設置位置は、基本的に左側版については実験後の破壊状況を、右側版については爆発時の応答を計測する目的で決めた。高さと奥行き方向については、各構造物に対して、頂版内壁と底版内壁の中間位置および背版内壁と開口部までの距離の中間位置とした。また、爆薬の設置に際しては、実験時に RC 構造物の損傷等に影響を与えないように薄紙と細い針金で作製した保持具を用いている。なお、爆薬は、6 号電気雷管を用いて上面中心から起爆させた。

2.3 計測項目

本実験では、爆発時に右側版に作用する圧力、

表－２ 鉄筋の材料特性値

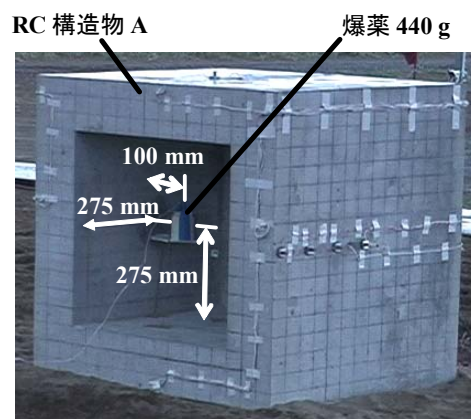
呼び名	材質	降伏強度 σ_{ys} (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン 比 ν_s
D6	SD295A	352	206	0.30

表－３ ペントライト爆薬の爆轟特性値

爆轟速度 D (m/s)	爆轟圧力 P (GPa)	爆発エネルギー E (J/mm ³)
7,530	25.5	8.10

表－４ 実験ケース

	構造物の種類	爆薬の質量
1	A	110 g
2	B	
3	A	440 g
4	B	

写真－１ 内部爆発実験の状況
(RC 構造物 A、爆薬 440 g の場合)

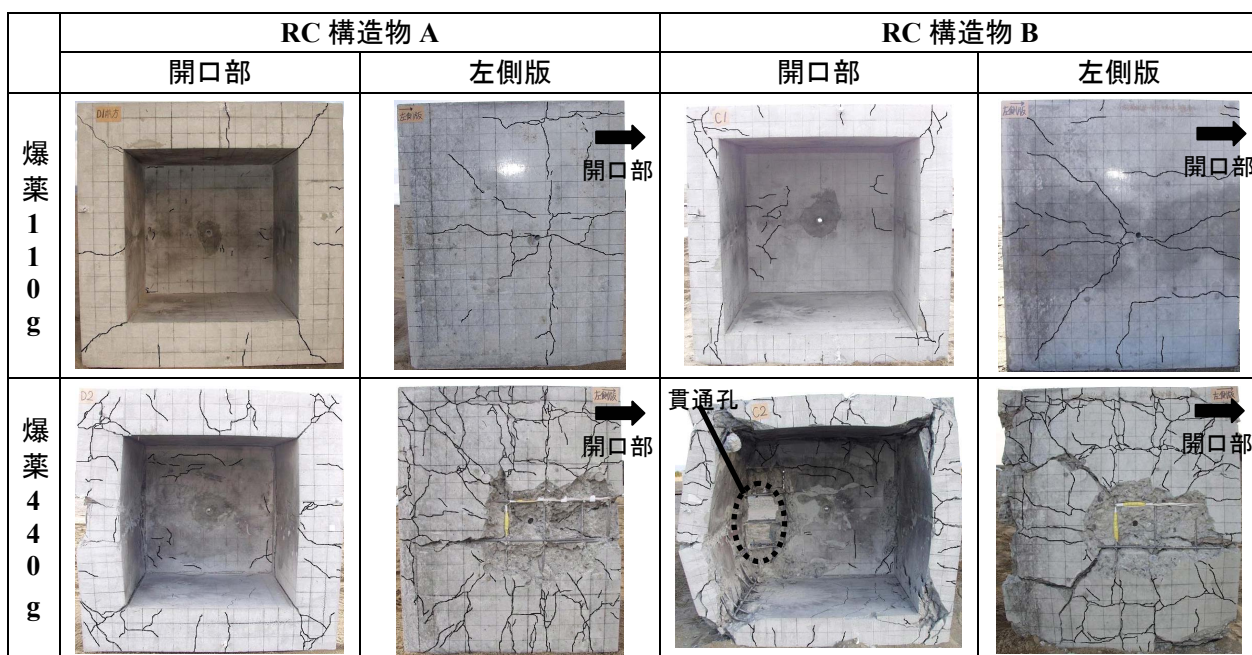
加速度および鉄筋ひずみの各波形を計測した（図－１参照）。なお、左側版については、スタンドオフ距離が短くセンサーの破損が予想されたため、波形の計測は行わなかった。

アンプおよび記録装置には、それぞれ最大応答周波数：100 kHz および最大サンプリング周波数：1 MHz のものを用いた。サンプリング間隔は 1 μ s とし、計測時にフィルター処理は特に施さなかった。また、実験終了後には、RC 構造物の破壊状況を記録した。

3. 実験結果および考察

3.1 RC 構造物の破壊状況

写真－２に、RC 構造物 A、B の実験終了後の破壊性状を示す。紙面の都合上、開口部および



写真－２ RC 構造物の実験終了後の破壊状況

左側版を見た場合のみ示す。なお、ひび割れは、黒実線により強調して示している。

まず、爆薬 110 g の場合の開口部を見ると、構造物の種類によらず各版部材の側面部にひび割れが認められる。また、左側版を見ると、全体的な曲げひび割れの発生している様子も分かる。ひび割れの顕在化の度合いは、版厚の小さい構造物 B の方が若干大きい。なお、背版および左側版の中央付近に小さい孔が見られるが、これは試験体の製作時に事前に施した貫通孔であり、爆発によって生じたものではない。

次に、爆薬 440 g の開口部を見ると、各構造物の隅角部のひび割れが大きく開口し、特に版厚の小さい構造物 B ではコンクリートの欠損も認められる。また、爆源に近い左側版が外側にたわんだ状態も示されている。このたわみの度合いは、構造物 B の方がより大きい。また、左側版に着目すると、構造物の種類によらず中央部から開口部にかけてスポール破壊の生じていることが分かる。さらに、ひび割れが RC 版の縦横に無数に発生している様子も確認できる。これより、内部爆発の場合には局所的な破壊のみならず、全体的な破壊も卓越することが分かる。なお、3.3 項以降で着目する右側版については、スポール破壊は生じなかったものの、ひび割れ

表－５ スポール破壊と貫通孔の発生の有無

		RC 構造物 A				RC 構造物 B			
		左側版		背版		左側版		背版	
		スポール	貫通孔	スポール	貫通孔	スポール	貫通孔	スポール	貫通孔
爆薬 110g	予測	無	無	無	無	有	無	無	無
	実験	無	無	無	無	無	無	無	無
爆薬 440g	予測	有	無	無	無	有	有	有	無
	実験	有	無	有	無	有	無	有	有

が同じく RC 版の縦横に無数に発生していた。

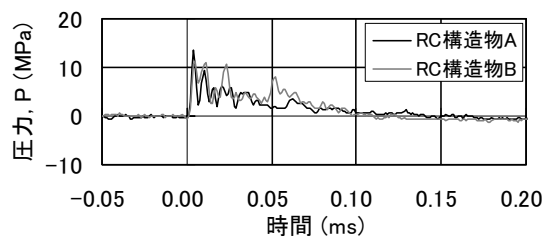
3.2 既往の予測式との対応

著者ら¹⁾の部材レベルの実験結果によると、近接爆発時の RC 版に生じるスポール破壊および貫通孔の発生限界は次式で予測できる。

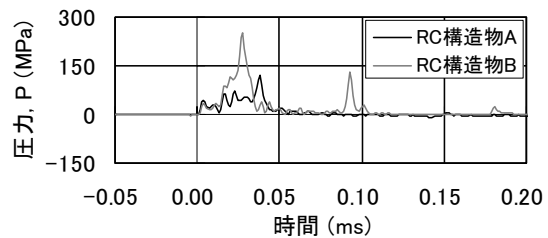
$$\text{スポール破壊：} \quad \frac{T}{W_m^{1/3}} = 2.80 \left(\frac{R}{W_m^{1/3}} \right)^{-0.59} \quad (1)$$

$$\text{貫通孔：} \quad \frac{T}{W_m^{1/3}} = 1.24 \left(\frac{R}{W_m^{1/3}} \right)^{-0.59} \quad (2)$$

ここで、T は版厚 (cm)、R は版表面と爆薬表面との距離 (cm)、 W_m は爆薬の TNT (トリニトロトルエン) 換算質量 (g) である。右辺が左辺より大きな値を示すと、スポール破壊あるいは貫通孔が生じる。 W_m に本爆薬量の 1.2 倍³⁾の TNT 換算質量を代入し、スポール破壊と貫通孔の発生の有無を予測すると表－５のとおりとなる。ただし、紙面の都合上、左側版と背版のみに着

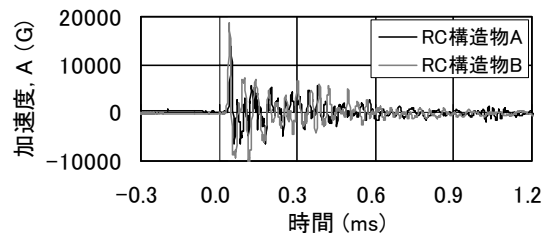


(a) 爆薬 110 g

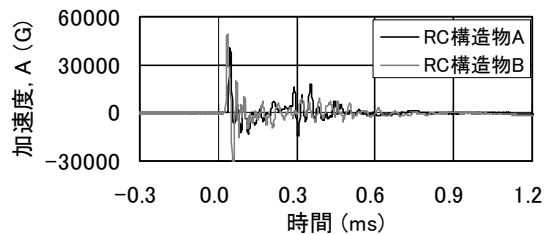


(b) 爆薬 440 g

図－3 圧力波形



(a) 爆薬 110 g



(b) 爆薬 440 g

図－4 加速度波形

目して示している。また、表中、実験結果も合わせて示している。

表より、RC 構造物 A と B の爆薬 440 g における背版の結果（表中、太枠部）を除くと、全ての予測結果が実験結果に対応しているか、若しくは安全側の評価を与えていることが分かる。しかしながら、太枠部については、予測結果が損傷を過小に評価しており、実際には構造物 A の場合にはスポールが生じ、構造物 B の場合には大きな貫通孔が生じた（写真－2 参照）。これは、爆薬の爆発に伴い生じる衝撃波が内部空間で構造物に作用するような場合には、既往の予測式が危険側の評価を与える可能性のあることを示唆している。

3.3 圧力波形

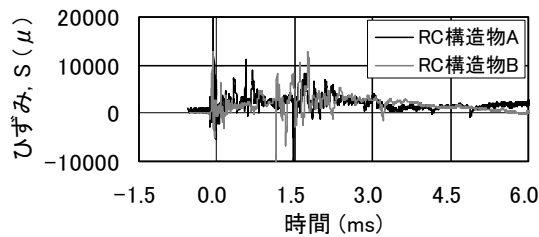
図－3 に、RC 構造物 A、B の右側版に作用する圧力波形を示す。波形の横軸は、後述する加速度および鉄筋ひずみ波形を含め、各実験で得られた圧力波形の立ち上がりを 0 ms として整理している。また、縦軸は正載荷状態を正にとって整理している。図より、爆薬 110 g の場合には、構造物の種類に係わらず波形は急激に立ち上がりピーク値に達した後、高周波の増減を繰り返して徐々に零レベルまで減少していることが分

かる。これは、内部爆発時に開口部のある構造物に作用する典型的な圧力波形⁴⁾に合致している。また、これは、周囲の版部材からの反射波の入射や、その入射波と波形計測面（右側版）からの反射波との重畳により形成されたと考えられる。なお、いずれもピーク値は 10 MPa 強であり、波形継続時間は約 0.1 ms と非常に短い。

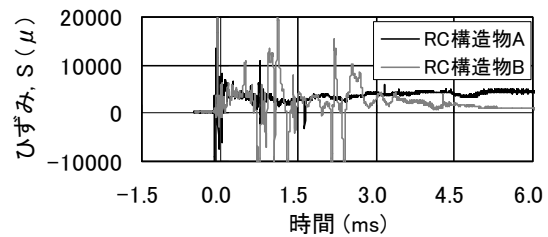
一方、爆薬 440 g の場合には、構造物の種類によらず波形は立ち上がり後 0.03～0.04 ms 後にピーク値に達していることが確認できる。この理由は現時点では明確ではないため、今後数値シミュレーション等により詳細について検討したいと考えている。なお、両者とも 100 MPa を超える大きな圧力が発生しており、かつ波形継続時間が構造物 B の場合の第 2 波、第 3 波を除くと、約 0.07 ms とここでも爆薬 110 g の場合と同様に非常に短く示されていることが分かる。

3.4 加速度波形

図－4 に、RC 構造物 A、B の右側版の加速度波形を示す。まず、爆薬 110 g の場合を見ると、いずれの構造物についても圧力波形の立ち上がり直後に、波形が正方向（側版の外側方向）に瞬間的に生じた後、この第 1 波より小さい振幅の波が正負に増減して 1 ms 前後まで推移してい



(a) 爆薬 110 g



(b) 爆薬 440 g

図－5 鉄筋ひずみ波形

ることが分かる。なお、ピーク値は構造物 B の方で 1.36 倍大きく、約 18,000 G であった。これは、版厚が小さいことによる影響と考えられる。

次に、爆薬 440 g の場合を見ると、ここでも両構造物の場合とも振幅の大きい第 1 波の発生後、第 1 波より小さい振幅の波が正負に増減して 0.7 ms 前後まで推移している様子が認められる。また、ピーク値はここでも構造物 B の方で若干大きく、約 46,000 G にも達した。

3.5 鉄筋ひずみ波形

図－5 に、RC 構造物 A、B の右側版の鉄筋ひずみ波形を示す。図より、爆薬 110 g の場合を見ると、いずれの波形も全体的には正側（引張側）に推移し、かつ高周波成分を含んだ状態で持続している様子が伺える。3 ms 程度以降になると、振幅の大きい高周波成分は見られなくなり、引張ひずみ量も零レベルに近づいてくる。なお、この零レベルに近づくまでの時間は、前述の圧力波形や加速度波形の第 1 波の応答時間に比べると非常に長いことが分かる。これは、RC 版が曲げによる全体応答を呈したことを裏付けていると考えられる。

次に、爆薬 440 g の場合を見ると、いずれの波形も爆薬 110 g の場合に比べて、引張側への推移量がより大きくなっていることが認められる。これは、爆薬量が増大したことにより、RC 版の塑性化の度合いがより著しくなったためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、RC 構造物の内部空間で爆薬が爆発する場合の RC 構造物の応答および破壊性状

に関する基礎的な知見を得るために、一面が開口されたボックス型 RC 構造物を用いた内部爆発実験を実施した。本研究の範囲内で得られた主な結果は、以下のとおりである。

- 1) 内部爆発の場合には、局部的な破壊のみならず、全体的な破壊も卓越する。
- 2) 内部爆発の場合には、既往の予測式が危険側の評価を与える可能性がある。
- 3) 内部爆発により、RC 版には非常に短時間に高い圧力が加わる。
- 4) 圧力の作用に伴い RC 版には非常に大きい加速度が生じる。また、そのピーク値は、版厚の小さい方が大きい。

謝辞：本研究の取り纏めにあたり、防衛省技術研究本部企画課の森下政浩氏および経済産業省安全保障貿易審査課の阿曾沼剛氏には有益なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森下政浩ほか：近接爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷と覆土の緩衝効果，土木学会論文集 A，Vol.62，No.4，pp.865-876，2006.10
- 2) 安藤智啓ほか：爆発荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの損傷および応答に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，vol.28，No.2，pp.829-834，2006
- 3) B. M. Dobratz: LLNL Explosives Handbook, Lawrence Livermore National Laboratory, pp.8-23, 1981.3
- 4) P. D. Smith et al.: Blast and Ballistic Loading of Structures, Butterworth-Heinemann, pp.63-88, 1994