

論文 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

安藤 智啓*¹・阿曾沼 剛*¹・森下 政浩*²・松尾 啓*³

要旨：本研究では、爆発荷重を受ける RC はりの損傷および応答に関する基礎的な知見を得ることを目的として爆発実験を実施した。実験時には RC はりに作用する圧力、RC はりの支点反力および軸方向鉄筋のひずみを計測し、実験終了後には RC はりの損傷状況を観察した。その結果、極至近距離で爆発荷重を受ける RC はりの損傷は局部的となり、静的載荷時に見られる全体的な曲げによる損傷とは異なること、爆発により RC はりスパン中心部には非常に短時間に高い圧力が加わること等が分かった。

キーワード：RC はり, 爆発荷重, 局部破壊, 応答, 応力波

1. はじめに

2001年9月11日に米国で発生した同時多発テロを契機として、国内においても社会的に重要な鉄筋コンクリート (RC) 構造物に対する耐爆性評価および耐爆設計がますます重要視されるようになってきた¹⁾。

土木工学分野では、落石覆工に代表されるような耐衝撃用途 RC 構造物の評価および設計法の向上に資するために、RC はり等を対象とした部材レベルの実験的・解析的研究が精力的に行われている²⁾。しかしながら、爆薬による爆発荷重を外力に想定した研究については、国内では著者ら^{3),4)}の研究を除くと例が限られている。特に、RC 部材の爆発時の応答に関して、体系的に実験的な検討を行った例は見当たらない。

そこで、本研究では、RC 構造物の耐爆性評価

法および耐爆設計法の向上に資するため、基本部材の一つである RC はりに着目して、爆薬の爆発位置を変えた爆発実験を実施し、爆発荷重を受ける RC はりの損傷および応答に関する基礎的な知見を得ることを目的とした。

2. 実験の概要

2.1 RC はりおよび爆薬

図-1に、本実験に用いた RC はりの寸法・形状および配筋状況を示す。梁幅×梁高×スパン長は、150×250×2,400 mm である。軸方向鉄筋およびせん断補強筋には、それぞれ D22 および D6 を使用した。また、下部の軸方向鉄筋のスパン中央には、ひずみゲージ (ゲージ長 5 mm) を貼付した。

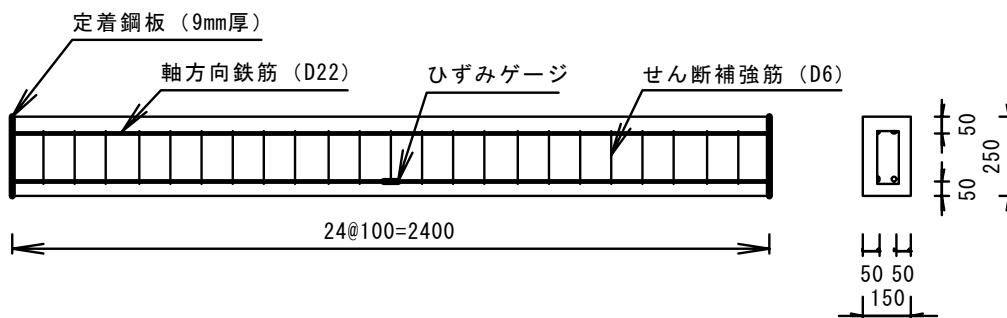


図-1 RC はり (単位: mm)

*1 防衛庁 技術研究本部第4研究所施設構造研究室 主任研究官 博(工) (正会員)
 *2 防衛庁 技術研究本部第4研究所施設構造研究室 室長 博(工) (正会員)
 *3 防衛庁 技術研究本部第4研究所 研究調整官 工博

表-1 RC はりの静的設計値

せん断スパン比 a/d	主鉄筋比 P_t	せん断耐力 V_{usc} (kN)	曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断余裕度 $\alpha (= V_{usc} / P_{usc})$
5.0	0.0258	153.8	91.0	1.69

表-2 コンクリートの材料特性値

密度 ρ_c	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
2.33	24.7	22.3	0.163

表-3 鉄筋の材料特性値

呼び名	材質	降伏強度 σ_s (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D22	SD345	392	206	0.3
D6	SD295A	376	206	0.3

表-4 ペントライト爆薬の爆轟特性値⁶⁾

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-1に、RC はりの静的設計値を示す。表中の曲げ耐力 P_{usc} およびせん断耐力 V_{usc} は、コンクリート標準示方書⁵⁾に基づき算定している。せん断余裕度 α は V_{usc} を P_{usc} で除した値であるが、 $\alpha > 1.0$ である本実験のRC はりは、静的載荷時には曲げ型で破壊すると予想される。表-2および表-3に、それぞれコンクリートと鉄筋の材料特性値を示す。

図-2に爆薬の寸法を示す。形状は直径と高さが等しい円柱体であり、その質量は400gである。種類は、TNT（トリニトロトルエン）爆薬とペンスリッド爆薬を質量比で50%ずつ混合した高性能爆薬の一つであるペントライト爆薬である。表-4に、ペントライト爆薬の爆轟特性値を示す。

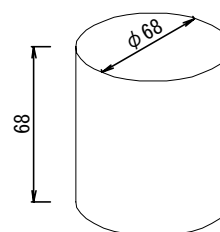


図-2 ペントライト爆薬（単位：mm）

2.2 爆発実験

図-3および写真-1に、それぞれRC はりの設置状況および爆発実験の状況を示す。RC はりは、支点反力測定用のロードセル（容量：250 kN，最大応答周波数：2.4 kHz）が片側に3個ずつ組み込まれた支点治具上に設置した。この治具は、RC はりの回転のみを許容する構造となっており、支持部にはりの跳ね上がり防止用のストッパーを備えている。爆薬は、RC はりのスパン中心に、爆薬の中心からRC はりの上面までの距離（以下、爆発距離）が所定の高さになるようにセットした。爆発実験は、電気雷管により爆薬上面の中心から起爆させて行った。

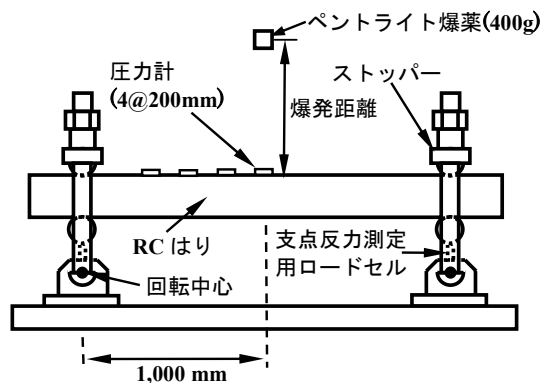
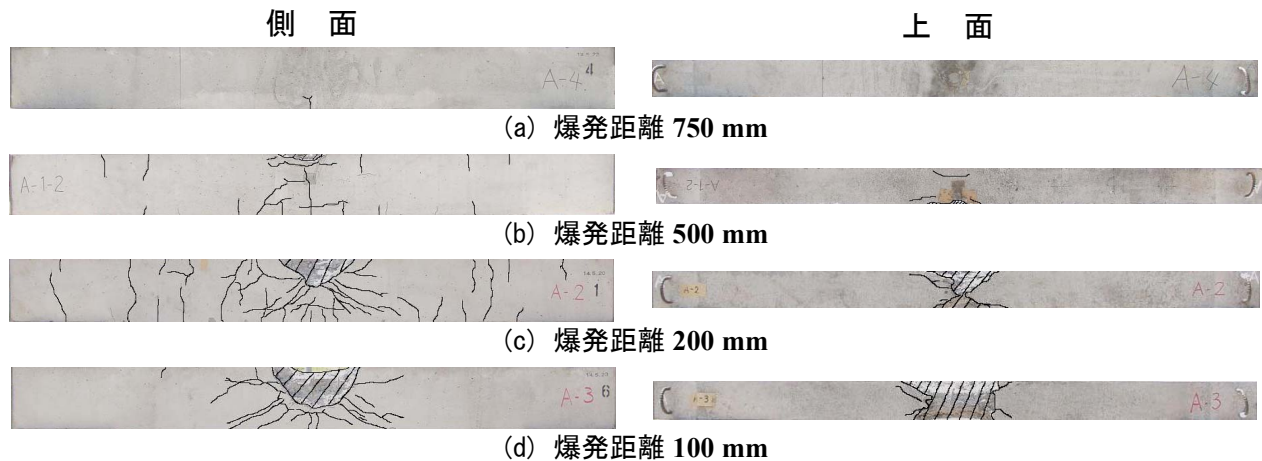


図-3 RC はりの設置状況

実験ケースは、爆発距離が1,000 mm，750 mm，500 mm，200 mm，100 mm の5ケースである。爆発距離は、RC はりの損傷程度に差異ができるよう考慮して決めた。なお、比較のため、油圧式



写真-1 爆発実験の状況（爆発距離 200 mm）



写真－2 爆発実験終了後の RC はりの損傷状況（※斜線部は欠損部を表す。）

試験装置による静的 3 点曲げ載荷実験（載荷速度：約 450 N/sec）も 1 ケース実施した。

2.3 計測項目

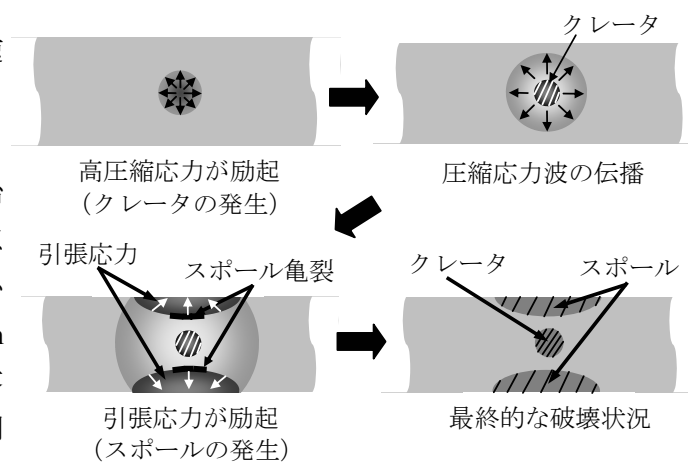
爆発実験では、爆発時の合支点反力（支点治具の 6 個のロードセルの合算値，以下単に支点反力）および RC はりの軸方向鉄筋のスパン中心のひずみを計測した。また，爆発距離 1,000 mm の場合には RC はりに作用する圧力（圧力計の容量：23 MPa，最大応答周波数：10 kHz）も計測した。なお，他の爆発距離の場合には，用いた圧力計の容量を上回るピーク値の圧力が予想されたため，圧力波形の計測は行わなかった。

アンプおよび記録装置には，それぞれ KYOWA CDV-700（最大応答周波数：500 kHz）および Nicolet MultiPro（最大応答周波数：400 kHz）を用いた。サンプリング時間は $5\mu s$ とし，計測時にフィルター処理は特に施さなかった。しかしながら，データ処理の過程において，支点反力およびひずみ波形に対して，高周波ノイズを緩和するため平滑化点数 11 点の矩形移動平均法による数値フィルター処理を施した。また，実験終了後には，RC はりの損傷状況を詳細に記録した。

3. 実験結果および考察

3.1 RC はりの損傷状況

写真－2 に，爆発実験終了後の RC はりの側面および上面の損傷状況を示す。ただし，爆発距



図－4 局部破壊の発生メカニズム（はり上面から見た図）

離 1,000 mm の場合は，はりに損傷が全く生じなかったため写真を割愛した。

まず，爆発距離 750 mm では，側面および上面とも亀裂はほとんど発生していない。次に，爆発距離 500 mm では，曲げによる亀裂が側面に生じている。また，スパン中央上面にはスパン方向に円弧状の亀裂と若干の欠損の発生していることも確認できる。この円弧状の亀裂と欠損は，後述するように，はり側面における応力波の反射に起因すると考えられる。

さらに，爆発距離 200 mm では，側面全体にわたって曲げ亀裂が生じるとともに，中央上部のコンクリートが局部的に著しく破壊していることが確認できる。この局部破壊は，図－4 に示すように，爆発によりはり上面に励起される高圧縮応力により生じるクレータと圧縮応力波が

はり側面で反射した引張応力波により生じるスポールが結合したことによるものと考えられる。参考のため、本実験と同様の実験条件により、クレータと側面スポールが明瞭に生じた RC はり（梁幅×梁高×スパン長＝200×300×2,400 mm）の例⁷⁾を写真－3に示す。

最後に、爆発距離 100 mm の場合を見ると、局部破壊がより著しくなるとともに、側面には破壊部から放射状に延びる亀裂も認められる。これを静的載荷実験の結果（写真－4）と比較すると、極至近距離で爆発荷重を受ける RC はりの損傷は極めて局部的であり、静的載荷時に見られる全体的な曲げによる損傷とは異なっていることが分かる。

3.2 爆発時の RC はりの応答

(1) 圧力波形

図－5に、爆発距離 1,000 mm の場合の RC はりに作用する圧力波形を示す。波形の時間軸は、スパン中心の圧力の立ち上がりを基準としている。

図より、スパン中心の圧力波形は、急激に立ち上がりピーク値に達し、高周波に増減を繰り返しながら約 0.2 ms で一旦零レベルまで減少し、その後ピーク値の 1/4 以下の圧力が小刻みに振動していることが分かる。また、スパン中心から離れるにしたがい、波形の立ち上がり時間は遅れ、振幅は小さくなる傾向が認められる。

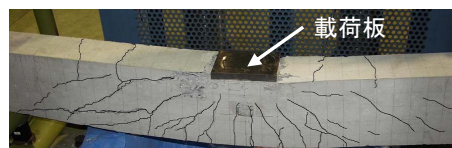
文献2)によれば、本爆発実験と同サイズの RC はりに質量 300 kg の重錘を 3.5～5.0 m/s の速度で直接衝突させた場合、継続時間が約 1 ms の振幅の大きい第1波と同じく 30～40 ms の振幅の小さい第2波が連なった衝撃力波形が励起される。本実験ではスパン中心において継続時間が約 0.2 ms の初期波が生じたが、これは上述の衝突による波形の第1波に比べて 1/5 程度と非常に短いことが分かる。

(2) 支点反力波形

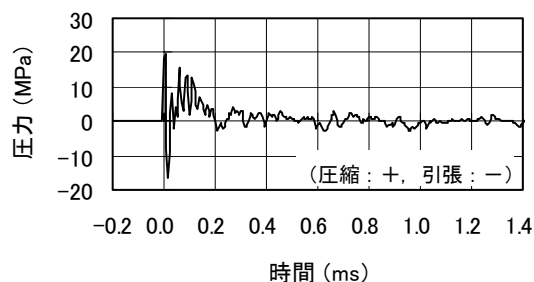
図－6に、各爆発距離における支点反力波形を示す。なお、図中、(b)を除くと－0.3～－0.2 ms



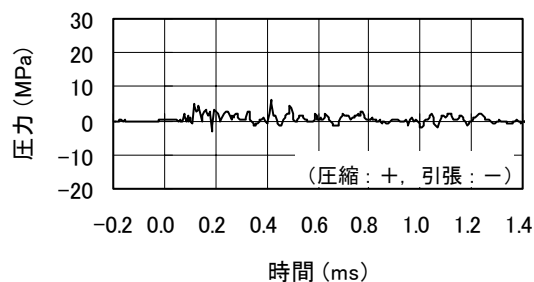
写真－3 クレータと側面スポールが明瞭に生じた例（はり上面）



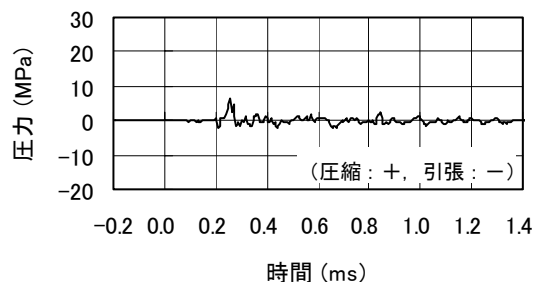
写真－4 静的載荷後の RC はりの損傷状況



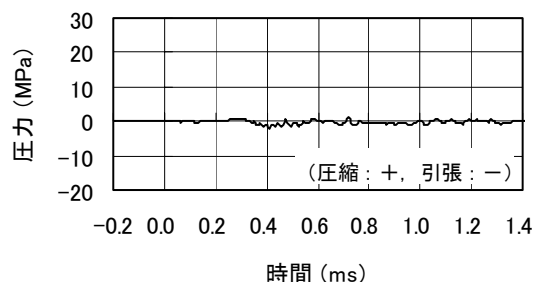
(a) スパン中心



(b) スパン中心から 200 mm



(c) スパン中心から 400 mm



(d) スパン中心から 600 mm

図－5 圧力波形（爆発距離 1,000 mm）

で瞬時的に 50~100 kN 程度の値が出力されているが、これは起爆時の発破信号による電氣的ノイズの影響と考えられ、以降の検討では無視することとした。

図より、各爆発距離で波形に違いが見られるものの、全体の継続時間はいずれも 7~9 ms であることが分かる。ここで、前述した RC はりの衝突実験結果²⁾と比べると、衝突実験では継続時間が 30~40 ms の支点反力波形が励起されるが、本実験の継続時間はその 1/4 程度である。

また、爆発距離が短くなるにしたがい、支点反力のピーク値および力積が増大する傾向も確認できる。しかしながら、爆発距離 100 mm の場合と 200 mm の場合の差は比較的小さい。これは、爆発距離がある程度近くなり RC はりの局部破壊が支配的になると、この局部破壊に大部分のエネルギーが消費されるためと考えられる。

(3) 軸方向鉄筋のひずみ波形

図-7 に、各爆発距離におけるはり下部の軸方向鉄筋のひずみ波形（以下、ひずみ波形）を示す。なお、ひずみ波形に関しても発破信号の影響と考えられるノイズの見られる場合があるが、ここでもこれらは無視して検討する。

図より、全般的に、爆発距離が短くなるにしたがい、振幅は大きく振動周期は長くなる傾向が見られる。振動周期が長くなる理由については、RC はりに損傷が生じ曲げ剛性が低下するためと考えられる。また、RC はり上面が著しく局部破壊する爆発距離 100 mm の場合にも、ひずみのピーク値は鉄筋の降伏ひずみ（約 1,900 μ ）とほぼ同程度であり、かつ残留ひずみもほとんど生じていないことを確認した。この理由としては、前述したように、爆発に起因する応力波の入射や反射により生じたはり上部のコンクリートの局部破壊が支配的になるためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、爆発荷重を受ける RC はりの損傷および応答に関する基礎的な知見を得ることを目的として爆発実験を行った。本実験条件の範

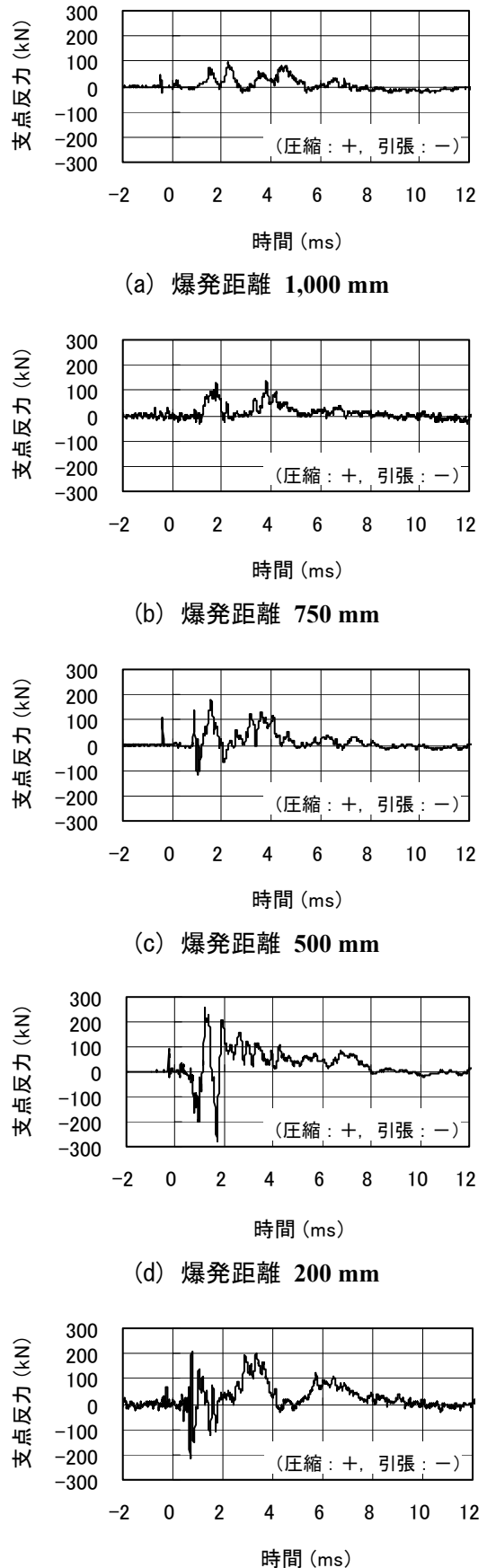


図-6 支点反力波形

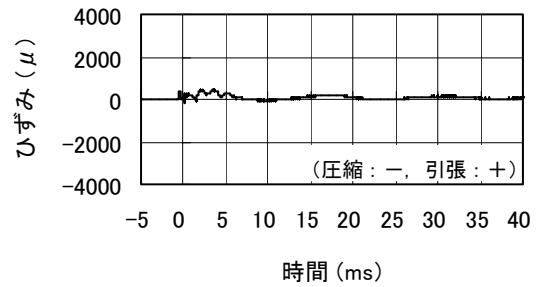
囲内で得られた主な結果は、以下のとおりである。

- 1) 極至近距離で爆発荷重を受ける RC はりの損傷は、静的載荷の場合と異なり極めて局部的となる。
- 2) 爆発により RC はりのスパン中心部には非常に短時間に高い圧力が加わる。
- 3) 支点反力波形のピーク値および力積は、RC はりの局部破壊の発生にも影響を受けると考えられる。
- 4) はり下部の軸方向鉄筋は、RC はりが著しく局部破壊した場合にもほとんど塑性変形しない。

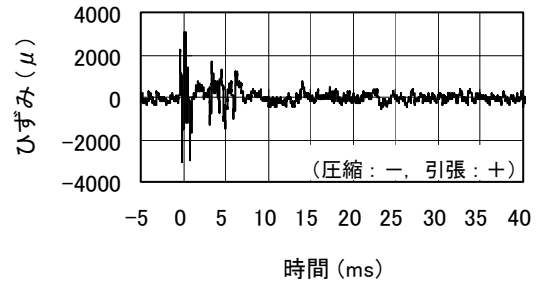
謝辞: 本研究の爆発実験の実施に際しては、(財)防衛技術協会の金子良明氏に多大なご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

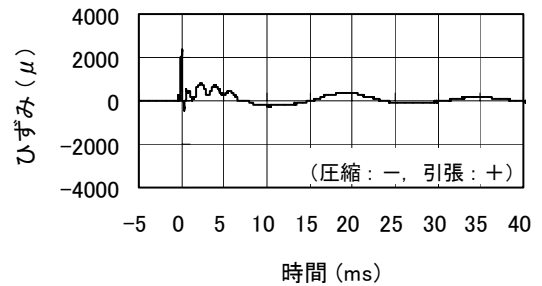
- 1) 日経コンストラクション：テロにも負けないインフラ施設, pp.38-61, 2002.2
- 2) 土木学会：構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用, (社)土木学会, 2004.3
- 3) 森下政浩ほか：接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼすコンクリート強度及び鉄筋間隔の影響, コンクリート工学論文集, 第 15 巻第 2 号, pp.89-98, 2004.5
- 4) 森下政浩ほか：繰り返し爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 土木学会論文集, No.752 /I-66, 317-322, 2004.1
- 5) 土木学会：【2002 年度制定】コンクリート標準示方書, (社)土木学会, 2002.3
- 6) B. M. Dobratz：LLNT Explosives Handbook, Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, LAWRENCE LIVERMORE LABORATORY, pp.8-23, 1981.3
- 7) 竹本憲介ほか：構造部材の破壊モードに関する研究 (爆発及び衝撃荷重を受ける RC はりの応答), 防衛庁技術研究本部技報, 第 6860 号, 2004.5



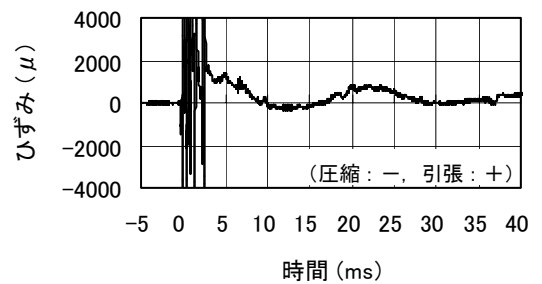
(a) 爆発距離 1,000 mm



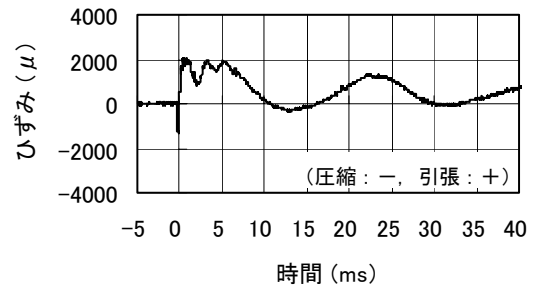
(b) 爆発距離 750 mm



(c) 爆発距離 500 mm



(d) 爆発距離 200 mm



(e) 爆発距離 100 mm

図一七 軸方向鉄筋のひずみ波形