

# 論文 接触・近接爆発を受ける RC 梁の破壊挙動に関する基礎的検討

永田 真<sup>\*1</sup>・市野 宏嘉<sup>\*2</sup>・別府 万寿博<sup>\*3</sup>

**要旨：**本研究は、接触・近接爆発荷重を受ける RC 梁の破壊挙動に関する基礎的な知見を得るために爆破実験を行い、爆発による作用圧力の特性や RC 梁の破壊性状を調べたものである。実験では爆薬の質量を一定とした上で離隔距離を変化させ、RC 梁に作用する圧力と支点反力およびせん断補強筋のひずみを計測した。実験の結果、離隔距離が短くなるにしたがい(1)RC 梁の中央と端部に作用する最大圧力および力積の差が大幅に増加すること、(2)全体変形に加えて局部破壊が生じる範囲が増加していくことが明らかになった。また、梁中央部に局部破壊が生じた後に全体変形が発生していくプロセスを考察した。

**キーワード：**RC 梁, 接触爆発, 近接爆発, 圧力分布, 全体破壊, 局部破壊

## 1. はじめに

2001年に米国で発生した同時多発テロ事件以降、世界中でテロ事件が頻発している。また、2015年に発生した中国における危険物倉庫の大爆発など、不測の爆発災害も増加している。爆発荷重に対する構造物の安全性評価手法や耐爆設計法に関する研究については、米国では1964年に耐爆設計技術マニュアルである TM5-855-1<sup>1)</sup>が作成されており、土木学会や日本建築学会においても爆発荷重を対象とした研究委員会が設立されている<sup>2)</sup>。

空中爆発のように爆薬が構造物から十分に離れた位置で爆発する場合は、部材に作用する荷重を等分布荷重と仮定し、部材を等価な1質点系ばねモデルに置換することで簡易的に解析を行う方法が提案されている<sup>3)</sup>。この方法は、米国の防護設計技術マニュアルである TM5-1300<sup>4)</sup>などで実用にも供されている。一方、接触・近接爆発については、McVay<sup>5)</sup>や田中ら<sup>6)</sup>によって主に RC 版に対して実験的な研究が行われており、局部破壊に関する評価式が提案されている。しかし、接触・近接爆発荷重を受ける RC 梁の応答については、安藤らの実験<sup>7)</sup>を除き検討例が少ないのが現状である。

本研究は、RC 構造物に対する耐爆設計法に資することを目的とし、爆発荷重を受ける RC 梁の破壊挙動に関する基礎的な検討を行ったものである。まず、RC 梁に対する接触・近接爆発実験を行い、RC 梁に作用する圧力を計測し、その特性を調べた。次に、RC 梁内部の鉄筋のひずみや支点反力から、破壊メカニズムについて考察を行った。

## 2. 実験の概要

### 2.1 試験体および爆薬

図-1に、本実験に用いた RC 梁の形状寸法および配

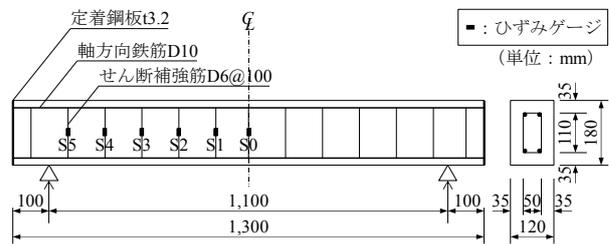


図-1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

表-1 RC 梁の静的設計値

主鉄筋比 $p_t$	せん断スパン比 $a/d$	静的せん断耐力 $V_{usc}$ (kN)	静的曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN)	せん断余裕度 $\alpha (=V_{usc}/P_{usc})$
0.0082	3.79	82.7	22.1	3.74

表-2 鉄筋の力学特性

呼び名	材質	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D6	SD295A	332	512	205	0.3
D10	SD295A	388	522		

表-3 コンクリートの力学特性

実験時材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
81	27.1	31.8	0.21

筋状況を示す。RC 梁の寸法は梁幅 120mm、梁高 180mm、支点間距離 1,100mm である。軸方向鉄筋は呼び名 D10 の異形鉄筋を用い、定着を確保するため梁端部において厚さ 3.2mm の鋼板と溶接した。せん断補強筋には呼び名 D6 の異形鉄筋を用い、配筋間隔は 100mm とした。

表-1に、RC 梁の静的設計値を示す。表中の静的せん断耐力および静的曲げ耐力は、表-2、3、4に示す鉄筋およびコンクリートの力学特性を用いて、土木学会コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に基づいて算出している。せん断

\*1 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科研修生 修士 (工学) (正会員)

\*2 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科講師 博士 (工学)

\*3 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科教授 博士 (工学) (正会員)

表-4 コンクリートの配合表

水 W (kg/m <sup>3</sup> )	セメント C (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 s (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 G (kg/m <sup>3</sup> )
162	324	872	958
粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)
20	16	50.0	48.4

表-5 実験ケース

実験番号	C4直径・高さ (mm)	C4質量 (g)	TNT換算質量 W (g)	離隔距離 R (mm)	換算距離 Z (m/kg <sup>1/3</sup> )
1	70	376	470	接触	0.00
2				77	0.10
3-1				154	0.20
3-2				154	0.20
4				231	0.30

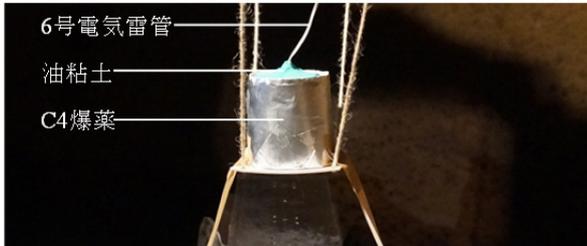


写真-1 C4爆薬

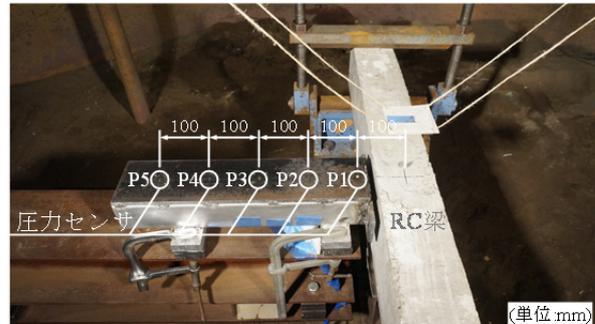


写真-2 圧力センサの設置状況

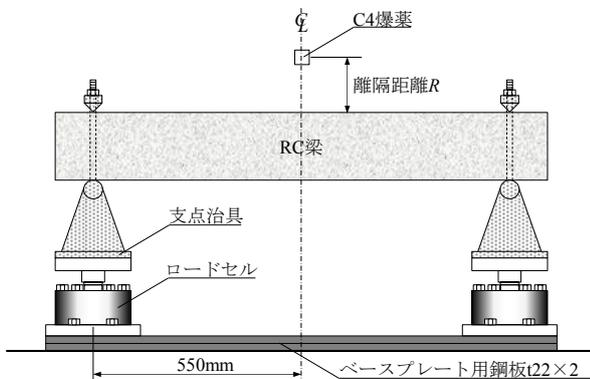


図-2 RC梁の設置状況

余裕度  $\alpha$  は  $\alpha > 1.0$  であることより、RC梁は静的載荷時には曲げ破壊する力学特性を有している。

爆薬には取扱いが比較的安全で成型が容易な C4 爆薬を使用した。C4 爆薬は、ヘキソーゲンを約 91%、可塑剤等を約 9% 含有する爆薬で、高爆速で可塑性・可とう性が高い特徴を有する。C4 爆薬は直径および高さが 70mm の円柱形に成型し、充填密度を  $1.4\text{g/cm}^3$ 、質量を 376g とした。爆薬量については、一般的に爆発熱を用いて TNT 換算されることが多い。TNT 爆薬および C4 爆薬の爆発熱はそれぞれ  $1,080\text{kcal/kg}$ 、 $1,350\text{kcal/kg}$  であるので、C4 爆薬の TNT 爆薬に対する爆発熱の比は 1.25 となる<sup>9)</sup>。そのため、本実験で用いた C4 爆薬の TNT 換算質量は 470g となる。

爆薬の起爆には 6 号電気雷管を用いた。6 号電気雷管は、写真-1 に示すように、雷管の添装薬側を爆薬に向けて挿入し C4 爆薬を起爆した。また、雷管は引き抜けや転倒防止のため油粘土を用いて C4 爆薬中に固定した。

## 2.2 実験方法および実験ケース

図-2 に RC 梁の設置状況を示す。本実験では、梁の跳ね返りを防止するため、支点部に鋼製の治具を用いて梁の上下を固定した。治具は梁の回転を許容し、ピン支

持に近い構造になっている。支点治具直下には支点反力測定用にひずみゲージ式のロードセルを設置した。爆薬は、RC 梁中央の上部に設置し、爆薬の中心から RC 梁の上面までの距離（以下、離隔距離と呼ぶ）が所定の高さとなるように設定した。

表-5 に実験ケースを示す。実験は爆薬量を一定とし、接触爆発（換算距離が  $0.00\text{m/kg}^{1/3}$ ）および換算距離が  $0.10\text{m/kg}^{1/3}$ 、 $0.20\text{m/kg}^{1/3}$ 、 $0.30\text{m/kg}^{1/3}$  になるよう離隔距離を 77mm、154mm、231mm と変化させて実施した。換算距離は次式で定義される。

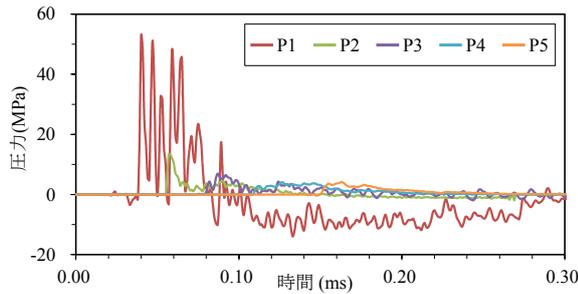
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

ここに  $R$  は離隔距離 (m)、 $W$  は TNT 換算質量 (kg) を表す。

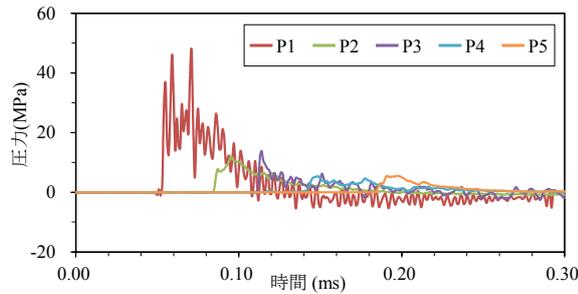
実験回数については、離隔距離が 154mm のケースについては 2 回行い、他のケースは 1 回のみ行った。

## 2.3 計測項目

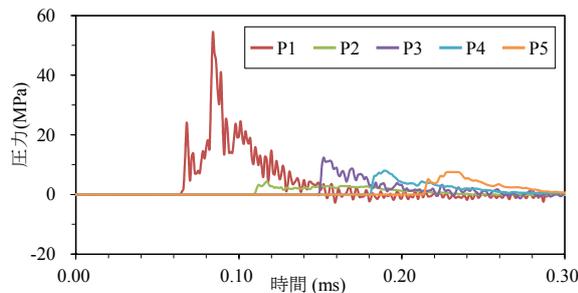
本実験では爆発によって RC 梁に作用する圧力を計測するため、写真-2 に示すように、梁の直交方向に梁上面と同一高さの位置に板厚 10mm の鋼板を配置し、圧力センサを 100mm 間隔で設置した。すなわち、圧力センサにより RC 梁中央から 100mm、200mm、300mm、400mm、500mm の位置に作用する圧力を計測した。それぞれの圧力センサについて、100mm の位置には米国 PCB 社製の M109B01（容量：552MPa）、200mm～400mm の位置には同社の 113B23（容量：69MPa）、500mm の位置には同社の 113B24（容量：6.9MPa）を用いた。ただし、実験 1 と実験 3-2 については計測不良であった。また、左右の支点治具直下の 2 個のロードセルにより、支点反力を求めた。ロードセルには日本特殊測器社製の LCX-50T（容量：500kN）を用いた。さらに、図-1 に示



(a) 実験 2 ( $R=77\text{mm}$ )

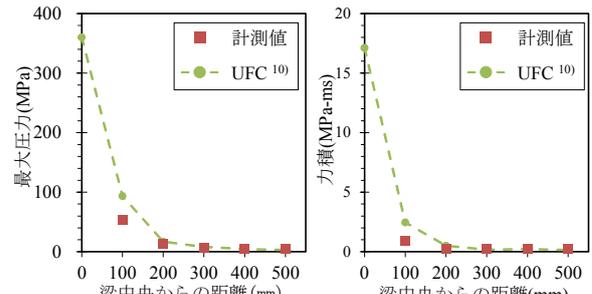


(b) 実験 3-1 ( $R=154\text{mm}$ )

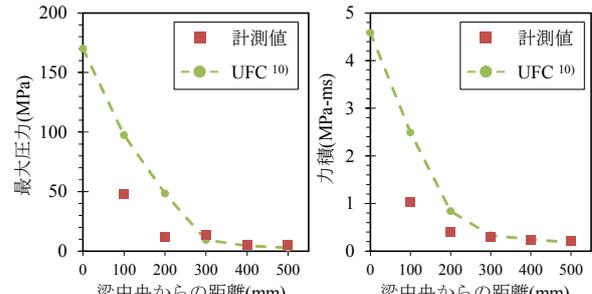


(c) 実験 4 ( $R=231\text{mm}$ )

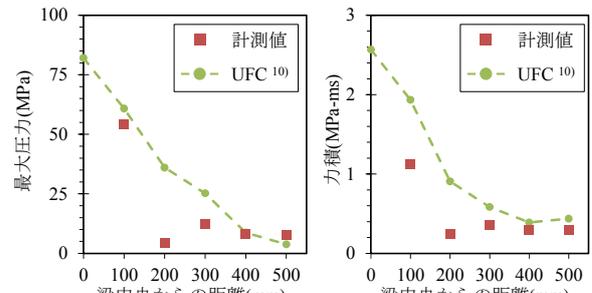
図-3 圧力～時間関係



(a) 実験 2 ( $R=77\text{mm}$ )



(b) 実験 3-1 ( $R=154\text{mm}$ )



(c) 実験 4 ( $R=231\text{mm}$ )

図-4 最大圧力・力積の分布形状

す位置にゲージ長 5mm のひずみゲージを貼付し、せん断補強筋のひずみを計測した。サンプリング間隔については、圧力センサのみが  $2\mu\text{s}$  であり、他は  $4\mu\text{s}$  とした。なお、計測時にフィルター処理は施していない。ただし、後述するようにロードセルの値に対しては移動平均法によるフィルター処理を施した。爆破実験後には、RC 梁の破壊性状および梁中央における残留変位を計測した。残留変位については、両支点部における下端鉄筋を結んだ位置を基準として、梁中央の位置におけるコンクリート下縁までの長さを基に算定した。なお、コンクリートが剥落している場合は、梁中央の位置における下端鉄筋と基準間までの長さを基に算定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 圧力波形

図-3 に、RC 梁の直角方向に配置した圧力センサから得られた圧力波形を示す。時間軸の原点については、3.3 節で述べる雷管の起爆時に生じるひずみ応答にスパイク状のノイズが立ち上がる瞬間の時刻とした。図から、

いずれのケースにおいても爆風圧がセンサ位置に到達すると瞬間的に大きな圧力が生じ、初期に複数のピークが現れる。また、梁中央ほど立ち上がり鋭い性状を示している。最大圧力については、梁中央から端部へ向かうにしたがい急激に減少する傾向が認められる。一方、作用時間については、例えば図-3(b)に示す実験 3-1 の梁中央に近い P1 の場合は約  $0.08\text{ms}$  であるのに対し、端部側の P5 の場合は約  $0.12\text{ms}$  となっており、梁中央から端部へ向かうにしたがい増加していく傾向が認められる。

図-4 に、最大圧力および力積の分布形状を示す。図中には、米国の防護設計技術マニュアルである UFC<sup>10)</sup> を用いて、爆薬からの距離および爆風圧の入射角度を考慮することで算定した値についてもプロットした。図から、いずれのケースも梁中央からの距離が減少するに伴い、最大圧力および力積の値は増加する傾向が認められる。ここで、最大圧力および力積の分布特性と隔離距離の関係について考察する。表-6 に、最大圧力および力積について、実験で得られた梁中央から 100mm の位置と 500mm の位置における値を比較したものを示す。表

表一六 最大圧力・力積の分布特性と離隔距離の関係

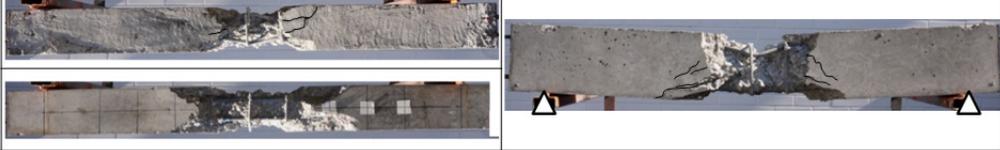
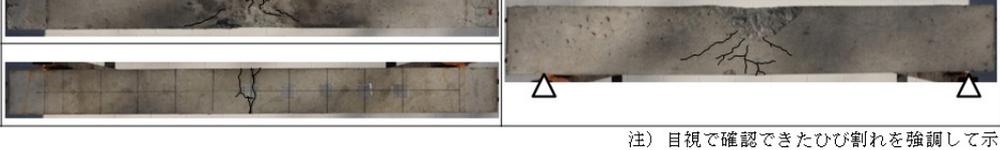
実験番号	離隔距離 (mm)	梁中央から500mmの位置での値に対する			
		梁中央から100mmの位置		梁中央*	
		最大圧力	力積	最大圧力	力積
2	77	13 倍	4.5 倍	86 倍	78 倍
3-1	154	8.6 倍	4.7 倍	29 倍	21 倍
4	231	7.2 倍	3.8 倍	11 倍	8.6 倍

※梁中央の値はUFC<sup>10</sup>より算定

表一七 実験ケースと最大荷重・力積の推定値の関係

実験番号	C4 質量 (g)	TNT換算質量 (g)	離隔距離 R (mm)	換算距離 Z (m/kg <sup>1/3</sup> )	最大荷重 (kN)	力積 (kN-ms)
2	376	470	77	0.10	6,300	230
3-1			154	0.20	4,000	110
4			231	0.30	3,100	90

写真一三 接触・近接爆発による RC 梁の破壊性状

実験番号	損傷状況 (左上: 爆発面 左下: 裏面 右: 側面)	残留変位 (mm)
1 (R: 接触 Z: 0.00m/kg <sup>1/3</sup> )		44
2 (R: 77mm Z: 0.10m/kg <sup>1/3</sup> )		36
3-1 (R: 154mm Z: 0.20m/kg <sup>1/3</sup> )		8
3-2 (R: 154mm Z: 0.20m/kg <sup>1/3</sup> )		8
4 (R: 231mm Z: 0.30m/kg <sup>1/3</sup> )		6

注) 目視で確認できたひび割れを強調して示している。

から、離隔距離が 231mm から 77mm の範囲で比較すると、梁中央から 100mm の位置における最大圧力は 500mm の位置の 7.2 倍から 13 倍、力積については 3.8 倍から 4.7 倍の範囲で増加している。また、梁中央の最大圧力および力積を UFC<sup>10</sup> から求め、これを梁中央から 500mm の位置における計測値と比較すると、最大圧力は 11 倍から 86 倍に、力積は 8.6 倍から 78 倍に大幅に増加している。これらの比較から、離隔距離が短くなるにしたがい、RC 梁の中央と端部に作用する最大圧力および力積の差が顕著に増加する傾向が認められる。

表一七に、RC 梁に作用した最大荷重と力積の推定値を示す。最大荷重と力積については、離散的に得られた最大圧力および力積の計測値と、梁中央については UFC<sup>10</sup> から得られた結果を線形補完することで算定した。表から、離隔距離が短くなるにしたがい、最大荷重および力積の値が急激に増加していることがわかる。

### 3.2 破壊性状

写真一三に、爆発実験後の RC 梁の破壊性状を示す。まず、接触爆発を受ける実験 1 は、残留変位が 44mm となり、中心部のコアコンクリートが完全に欠損する局所破壊が生じた。実験後に飛散したコンクリート片を観察したところ、細かいものでは粗骨材程度の大きさに粉砕されていた。また、中心から約 400mm の位置の側面および爆発面にひび割れが確認された。これは、梁中央部に極めて大きな荷重が瞬時に作用したことにより、瞬間的にひび割れ部を固定端とするような局所的な変形が起こったためと考えられる。

実験 2 については残留変位が 36mm で、中心部のかぶりコンクリートが剥離している。ただし、コアコンクリートには多数のひび割れが発生し大きな損傷が生じているが、コンクリート片はせん断補強筋の内側に残留していた。また、写真一三の左上に示す爆発面の損傷状況か

らわかるように、コンクリートの欠損は爆薬直下の中心部から側面方向へ進展している。これについて安藤らは、中心部には爆発面に励起される高圧縮力により円弧状にクレータが生じる一方、RC 梁の側面側には圧縮応力波が自由端反射した引張応力波によって破壊が生じ、これらが結合したことによる<sup>7)</sup>と述べている。本実験でも同様の破壊現象が生じたものと考えられる。

実験 3-1 および 3-2 は同一の離隔距離であり、残留変位はともに 8mm であった。実験 2 と同様の局部破壊を生じているが、実験 1 および 2 と比較して局部破壊が生じた範囲が減少している。

実験 4 については、局部破壊が生じた範囲はごく一部であり、側面には斜め方向のひび割れと中央部下から下側の軸方向鉄筋の位置まで伸びる曲げひび割れ、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが確認された。クレータおよびスポールは確認されていないことから、今回の実験条件下において局部破壊の発生限界は、離隔距離（換算距離）が 154mm ( $0.20\text{m/kg}^{1/3}$ ) から 231mm ( $0.30\text{m/kg}^{1/3}$ ) の間にあると考えられる。

以上から、離隔距離が短くなるにしたがい残留変位とともに局部破壊が生じる範囲が増加する傾向が認められる。

### 3.3 せん断補強筋のひずみ応答

図-5 に、梁中央におけるせん断補強筋のひずみ(S0)～時間関係を示す。図中には、0ms から約 0.05ms までの時間で瞬時的に最大で約 10,000 $\mu$  のひずみ出力されているが、これは雷管の起爆時に生じるスパイク状のノイズと考えられるため、以降の考察から除外する。また、時間軸の原点についてはこのノイズが立ち上がる瞬間の時刻とした。図から、いずれの応答においても約 0.05ms から約 0.14ms になるまでの時間で、一旦圧縮側に入ったひずみが引張側に移行している。ひずみ応答の振幅は、接触爆発のケースが最も大きく、離隔距離が長くなるにしたがい小さくなっている。引張側のひずみの値は、離隔距離が最も長い実験 4 の場合でも約 0.2ms の時刻で約 4,000 $\mu$  となっており、この時刻には周囲のコンクリートに破壊が生じていると考えられる。

写真-4 は、実験 3-1 における RC 梁側面の損傷部分とひずみゲージの貼付位置との対応を示したものである。写真から、梁中央の S0 および 100mm 離れた S1 付近では、ひずみゲージを貼付したせん断補強筋周辺のコンクリートが剥落していることがわかる。図-6 は、同じ実験における全てのせん断補強筋のひずみと支点反力～時間関係を比較したものである。図から、S0 と S1 においては他のひずみと異なり、次節で説明する支点反力が立ち上がる前、すなわち全体変形が生じる前の約 0.2ms までの時間に、上述したような圧縮側から引張側に移行す

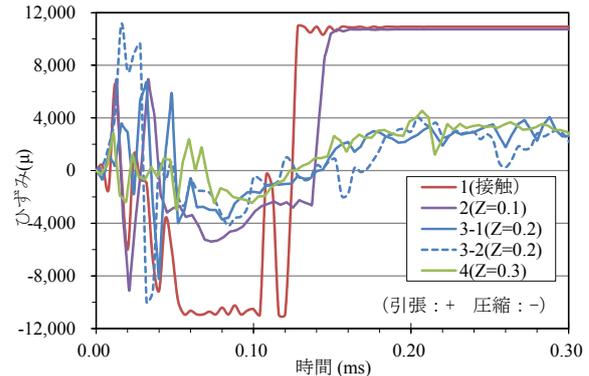


図-5 梁中央のせん断補強筋におけるひずみ(S0)～時間関係



写真-4 損傷部分とひずみゲージ貼付位置(実験 3-1)

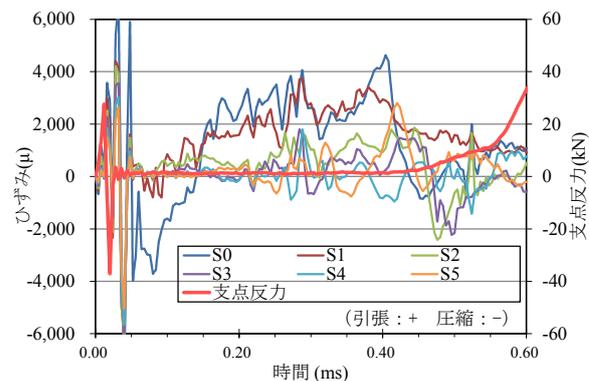


図-6 ひずみと支点反力～時間関係の比較(実験 3-1)

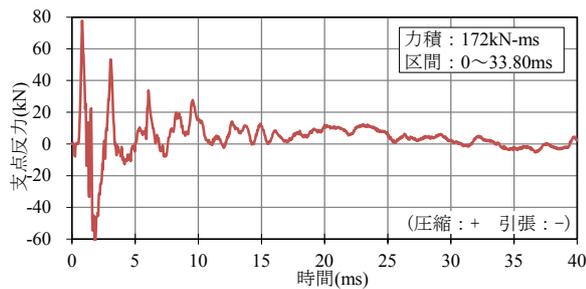
る応答が確認できる。このことから、コンクリートの局部破壊は 0.2ms あたりの時刻で生じていると考えられる。

以上から、RC 梁には図-4(b)で示した圧力分布のように、梁中央部に極めて局所的に高圧縮力が作用したことにより約 0.2ms の時刻で局部破壊が生じ、その後支点反力が立ち上がるとともに全体変形が生じたと考えられる。

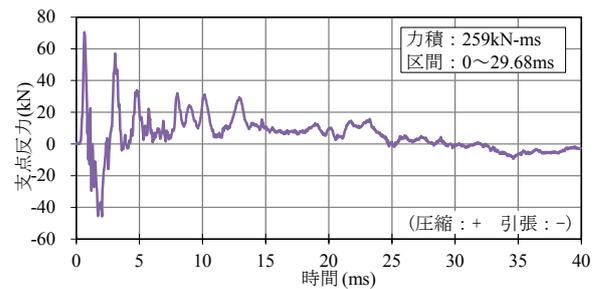
### 3.4 支点反力

図-7 に、各実験ケースにおける支点反力～時間関係を示す。支点反力に対しては高周波ノイズを除去するためにデータ 10 区間 (40 $\mu$ s 間) の移動平均法によるフィルター処理を施した。図から、いずれのケースにおいても支点反力は爆発後瞬時的に最大値まで立ち上がった後急激に減少し、その後第 2 波の最大値まで立ち上がり、増減を繰り返しながら主要な継続時間約 30ms の波形を形成していることがわかる。

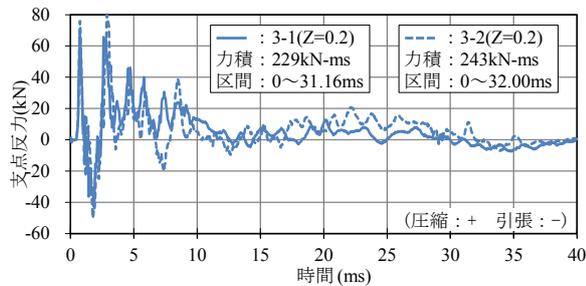
ここで、RC 梁の破壊性状と支点反力の関係を考察するため、支点反力を時間に対して積分した値（以下、単に力積と呼ぶ）を図中に示すように算定した。算定の区



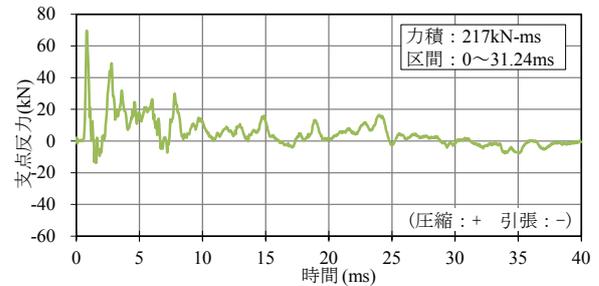
(a) 実験 1 (接触爆発)



(b) 実験 2 (近接爆発 R=77mm)



(c) 実験 3-1, 3-2 (近接爆発 R=154mm)



(d) 実験 4 (近接爆発 R=231mm)

図-7 支点反力～時間関係

間は主要な継続時間とし、その区間の積分値を求めた。なお、支点反力は RC 梁の変形に応じて増加し、RC 梁の損傷（塑性変形量）に応じて支点反力の応答時間は増大すると考えられるため、この力積は全体損傷による変形量の増大とともに増加すると考えられる。図から、近接爆発のケースでは離隔距離が短くなるにしたがい、力積が 217kN-ms から 259kN-ms へと増加する傾向が確認できる。これは、離隔距離が短くなるにしたがい表-7 に示すように爆発荷重が増加し、また、写真-3 に示すように残留変位が増加していることと整合する。一方、接触爆発を行った実験 1 では、支点反力の力積は 172kN-ms となり他のケースより減少している。これは、写真-3 に示したように実験 1 では中心部のコアコンクリートが完全に欠損しており、RC 梁の全体変形が生じなかったためと考えられる。

#### 4. 結言

本研究では、接触・近接爆発荷重を受ける RC 梁の破壊挙動に関する基礎的な知見を得るために爆発実験を行い、爆発による作用圧力の特性や RC 梁の破壊性状について考察を行ったものである。以下にその成果を要約する。

- (1) 爆薬からの離隔距離が短くなるにしたがい、RC 梁の梁中央と端部において作用する最大圧力および力積の差が大幅に増加し、RC 梁全体に作用する最大荷重と力積が急激に増加していくことがわかった。
- (2) 離隔距離が短くなるにしたがい残留変位とともに局部破壊が生じる範囲が増加していくことがわかった。
- (3) セン断補強筋のひずみと支点反力～時間関係から、

局部破壊が生じた後、全体変形へ移行するプロセスを考察した。

- (4) 支点反力の力積について、近接爆発では離隔距離が短くなるにしたがい増加した。一方、接触爆発ではコアコンクリートが完全に欠損し、RC 梁の全体変形が生じなかったため減少した。

#### 参考文献

- 1) Department of Army : TM5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, July.1965
- 2) 日本建築学会 : 建築物の耐衝撃設計の考え方, 2015.1
- 3) Biggs, J.M : Introduction to Structural Dynamics, John, McGraw-Hill, Inc., Sep.1964
- 4) Department of the Army : TM5-1300 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Nov.1990
- 5) McVay, M.K : Spall Damage of Concrete Structures, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Jun.1988
- 6) 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, pp297-312, 2001.4
- 7) 安藤智啓, 阿曾沼剛, 森下政浩, 松尾啓 : 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
- 8) 土木学会 : コンクリート標準示方書[設計編], 2008.3
- 9) 火薬学会 : エネルギー物質ハンドブック, 1993.3
- 10) Department of Defense : UFC3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Sep.2014