

## 爆薬による鉄筋コンクリート梁の破壊

佐々宏一\*, 伊藤勝久\*\*, 伊藤一郎\*

この研究では 50cm×70cm×600cm の鉄筋コンクリート梁を RDX を用いて爆破する実験を最小抵抗線の長さが 25cm の場合について種々の装薬条件で実施し、剝離して飛び出すかぶりコンクリートの破片の飛行速度および剝離しない自由面の変位速度の時間的変化状態の測定を行ない、これらの結果にもとづいて、自由面の変位速度の値がほぼ 5 m/sec より速くなれば剝離が発生することを明らかにした。さらに、この結果を用いて、種々の装薬条件の場合の最適な最小抵抗線の長さを示した。ついで電子計算機を用いて梁の破壊に関するシミュレーションを行ない、鉄筋が存在する場合には、鉄筋とコンクリートとの接触面に応力集中が発生するために無筋の場合よりも剝離が発生しやすくなること、および剝離が発生するならば鉄筋の入っている面で分離することなどを明らかにした。

### 1. 緒言

コンクリート構造物を火薬類を用いて解体するという方法は手軽であり、迅速かつ経済的であるが、解体しようとする構造物が市街地にあったり、解体しない他の構造物に隣接している場合には、火薬類の爆発によって発生する振動の大きさが他に影響を及ぼすことはないか、飛石の飛行速度がプラストフェンスなどによってその飛散を確実に防止しうる程度であるかなどについて十分検討しておく必要がある。これらのことを検討するためには、まず火薬類を用いてコンクリート構造物を破壊する場合の破壊機構を明らかにしておく必要がある。

コンクリート構造物を火薬類を用いて破壊する方法としては、破壊対象物に火薬類の爆発生成ガスの持つ準静的な圧力を作用させて破壊する方法、すなわち、燃速の遅い弱い火薬類を用いて破壊する方法と、逆に強力な爆薬を利用し、その爆轟衝撃によって発生する強力な波動によって破壊する方法とが考えられる。筆者らは、燃速の遅いコンクリート破砕薬を用いて無筋コンクリートブロックを破壊する実験や、有限要素法を用いた応力解析結果などを用いて、爆発生成ガスの圧力による材料の破壊機構を考察し、それにもとづい

て破壊状況と振動および飛石の程度との関連性などを明らかにした<sup>1-3)</sup>。

そこで今回は、鉄筋コンクリート梁を高燃速の爆薬を用いて破壊する実験を行ない、その結果と Tensor Code を用いて行なったシミュレーションの結果とを対比することによって、応力波による鉄筋コンクリート梁の破壊状況について検討したので、その結果について報告する。

### 2. 爆薬による鉄筋コンクリート梁の破壊実験

#### 2-1 実験方法および条件

破壊実験に供した鉄筋コンクリート梁は、図 1 に示すように、断面が 50 cm×70 cm、長さが 6 m のもので、梁の引張側にはかぶり厚さ 10 cm で直径 38 mm の主鉄筋が 15 cm 間隔で 3 本、圧縮側にはかぶり厚さ

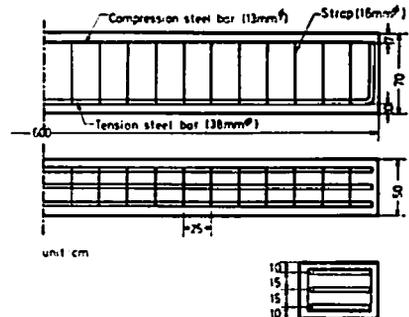


Fig. 1 Constitution of reinforced concrete beam for experiment

昭和47年11月30日受理

\* 京都大学工学部資源工学教室 京都市左京区吉田本町  
 \*\* 不鳥建設(株)中央研究所 茨木市大学太田之内上野 6  
 (当時学生)

7 cm で直径 13 mm の圧縮鉄筋が同じく 15 cm 間隔で 3 本入っており、これらが 25 cm 間隔で配置された直径 16 mm のストラップ筋で固定されているものであって、梁のコンクリートの軸圧縮強度は  $400 \text{ kg/cm}^2$ 、圧裂試験より求めた引張強度は  $43 \text{ kg/cm}^2$ 、密度は  $2.3 \text{ g/cm}^3$ 、弾性縦波の伝播速度は  $4,500 \text{ m/sec}$ 、ヤング率  $2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 0.2 である。

応力波を用いて梁を破壊するために使用する爆薬の性能としては、高爆速でかつ小薬量でも定常爆速に達することが要求されるので、今回は粉状の RDX を直径 20 mm のボール紙筒内に比重ほぼ 0.85 で装填したものを使用した。この薬包の爆速を 3 cm 間隔で配置したイオンギャップを用いて測定したところ、 $5,340 \text{ m/sec}$ 、 $5,800 \text{ m/sec}$ 、 $5,660 \text{ m/sec}$  という値が得られた。したがって、平均値は  $5,600 \text{ m/sec}$  となる。使用した薬包は 10 g 薬包および 20 g 薬包であって、それらの薬長はほぼ 5 cm および 10 cm である。梁の破壊実

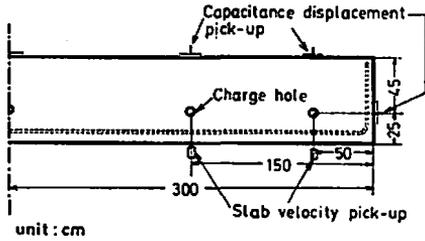


Fig. 2 Blasting pattern and arrangement of pick-up

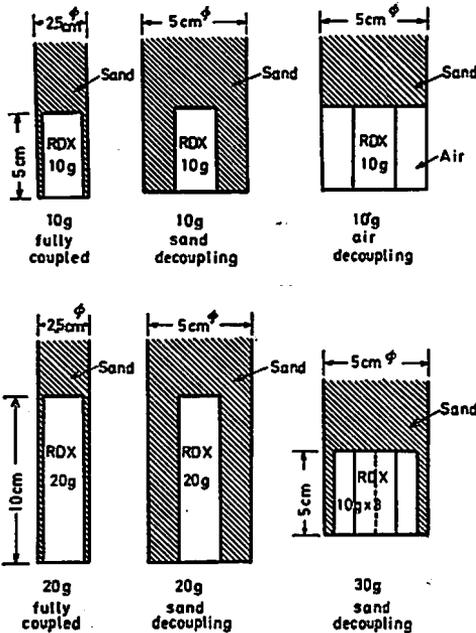


Fig. 3 Loading conditions

験は、すべて図 2 に示すように引張鉄筋の入っている面から 25 cm の位置に、孔の軸が引張鉄筋の入っている面と並行となるように装薬孔を穿孔し、引張鉄筋の入っている面が主な自由面となり、この面にクレータができるような条件で実施した。装薬孔の穿孔は、孔径が正確になるようにダイヤモンドボーリングビットを用いて行なった。穿孔径は、薬量およびデカップリング効果と破壊状況との関係を検討するために、25 mm および 50 mm の 2 種類を採用した。なお、孔長は約 30 cm である。実験を行なった装薬条件およびこの報告で用いた各条件に対する名称は、図 3 に示すとおりである。なお、30 g 砂デカップリングの場合には、10 g 薬包 3 本をたばねて使用したので、薬包の形状は円柱形ではない。薬包の上部のタンピングは、いずれの場合も砂を用いて孔口まで十分に行なった。したがってタンピング長さは 20~25 cm である。

破壊実験に際しては、図 2 に示したように、爆轟衝撃によって梁から剝離して飛び出す引張鉄筋側の破片の飛行速度と、破壊しない圧縮鉄筋側の側面の変位速度および梁の端面の変位速度とを、爆源からそれぞれの面へ下した垂線と各面との交点の位置で測定した。

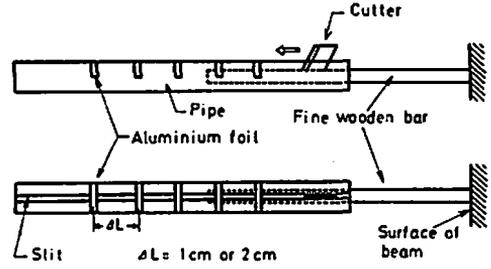


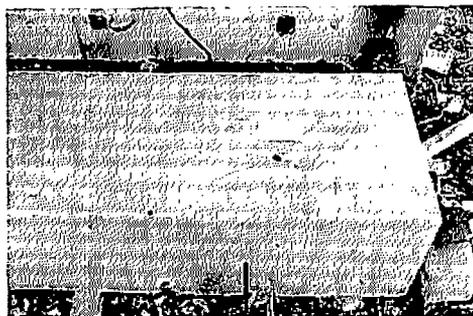
Fig. 4 Slab velocity pick-up

剝離片の飛行速度の測定は、図 4 に示すように、 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 30 \text{ cm}$  程度の細い木の棒に刃を付けたものを、梁の側面に対して直角に設置しておき、この面が剝離片となつて飛び出すとそれにもなつて棒が移動し、1~2 cm 間隔で配置されている細いアルミニウム箔を刃が切断するという方法を用いて行ない、圧縮鉄筋側の側面および端面の変位速度の測定は、岩崎通信機製の非接触型容量変位計を用いて行なった。なお、変位計の出力信号の記録には、記録可能周波数帯が DC~20 KHz のデータレコーダを使用した。

## 2-2 実験結果および考察

実験条件と梁の破壊状況との関係を示すとつぎのとおりである。

10 g 空気デカップリングの場合には、梁の表面にはき裂は発生しなかった。したがって、爆源近傍に生成したき裂は梁の表面まで達し得なかったものと推定す



(a)



(b)

Fig. 5 Outlook of breakage for the fully coupled charge of 10 g RDX.

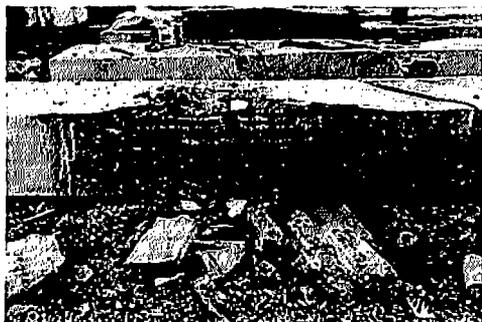
ることができる。

10 g 砂デカップリングの場合には、空気デカップリングの場合と同様に、き裂がまったく認められない場合と、爆源から最小抵抗線にそき裂が梁の表面まで達している場合とがあった。

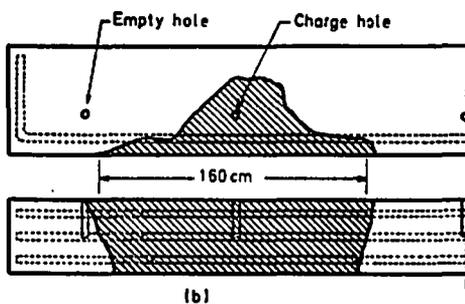
10 g 密装填の場合の破壊状況の一例を示したのが図 5 (a), (b)であって、この場合には、(a)図に示すように、最小抵抗線にそき裂とクレータの縁となるき裂とが明瞭に認められるが、剝離が生じない場合と、(b)図に示すように、かぶりの部分のコンクリートの一部が剝離し鉄筋が露出する場合とがあった。

20 g 砂デカップリング、20 g 密装填、30 g 砂デカップリングの場合には、いずれもかぶりコンクリートが剝離して鉄筋がかなりの長さにとわって露出し、20 g 密装填の場合および30 g 砂デカップリングの場合には、鉄筋内部のコンクリートは鉄筋に押えられて飛散はしないが、かなり細かく破壊されていた。破壊状況の一例として、図 6 (a), (b)に20 g 密装填の場合の破壊状況を示しておいた。

図 7 は、アルミニウム箔を切断する方式で測定した剝離片の初期の飛行速度と装薬条件との関係を示したものである。なお、10 g 密装填の場合には、上記のよ



(a)



(b)

Fig. 6 Outlook of breakage for the fully coupled charge of 20 g RDX.

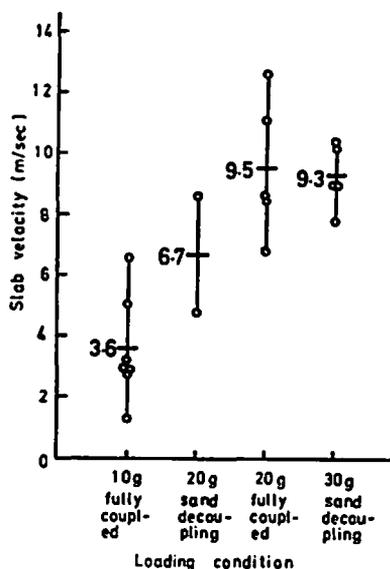
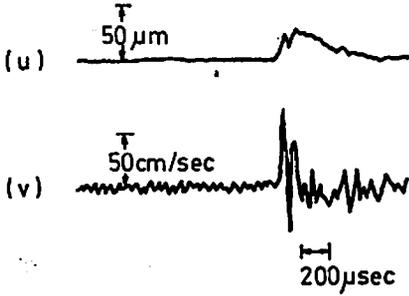


Fig. 7 Relation between slab velocity and loading condition

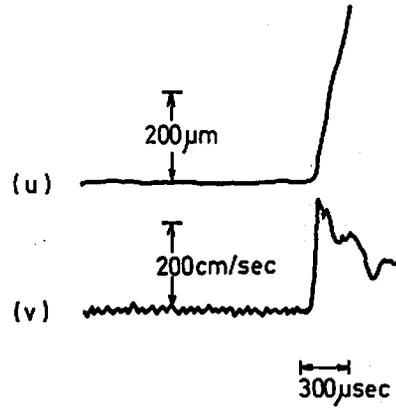
うに剝離を生じない場合もあったが、き裂が発生するために表面がかなり変位し、それによって棒が押し出されるように飛び出してアルミニウム箔を切断した。したがって、剝離を生じなかった場合の移動速度は当然実際の表面の移動速度よりやや低く出ているものと

(u) : Surface displacement

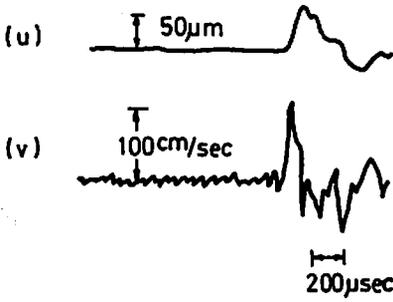
(v) : Velocity of surface displacement



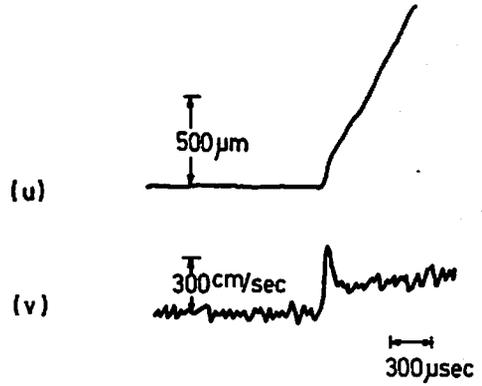
(a) 10g air decoupling



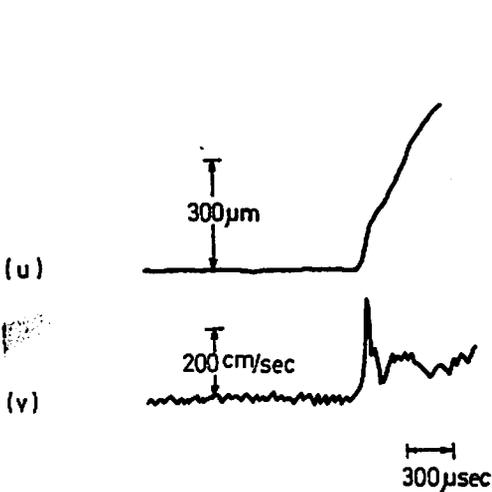
(d) 20g sand decoupling



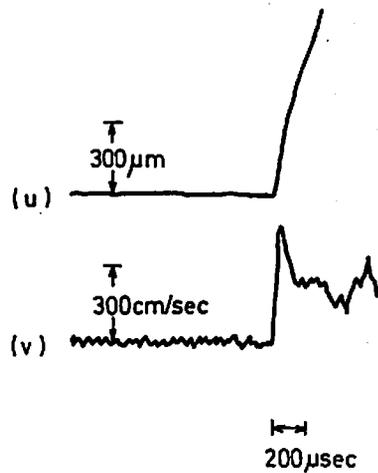
(b) 10g sand decoupling



(e) 20g fully coupled



(c) 10g fully coupled



(f) 30g sand decoupling

Fig. 8 Examples of oscillograms

考えられる。しかし、図7ではとくに区別せずに示しておいた。図7に示した結果と上記の破壊状況とを対比することによって、自由面の初期の変位速度がほぼ5 m/secより低い場合には剝離は生成しないが、それ以上の変位速度になると、かぶりコンクリートが剝離し鉄筋が露出することがわかる。そこで、 $\sigma = \rho \cdot c \cdot v$  の関係を用いて、剝離を発生させるためにはどれだけ以上の応力値を持った波動が自由面へ入射すればよいかを求めてみたところ、ほぼ260 kg/cm<sup>2</sup> という値が得られた。ここに、 $\sigma$  は波動の伝播方向の応力 (dyne/cm<sup>2</sup>)、 $\rho$  は密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $c$  は縦波の伝播速度 (cm/sec)、 $v$  は波内粒子速度 (cm/sec) である。さらに、図7に示した結果より、かぶりコンクリートが破壊して飛び出す場合には、その飛行速度は5 m/sec以上であること、および、装薬条件を適当に選ぶことによって、剝離して飛び出すかぶりの部分のコンクリート片の飛行速度を5~10 m/sec程度にしうるので、プラスチックなどによって破片の飛散を防止しうる爆破が可能であることがわかる。

つぎに、容量型変位計を用いて測定した圧縮鉄筋側の側面の変位状態をみてみることにする。図8(a), (b), (c), (d), (e), (f)は、変位および変位速度オシログラムの一例を各条件ごとに示したものである。ただし、変位速度記録は、データレコーダに記録されている変位信号を微分回路を用いて微分し、電磁オシログラフを用いて描かせたものである。これらの記録より、主鉄筋側にき裂や剝離が生じなかった場合の記録と、これらが生成した場合のそれとの間には大きな差があることがわかる。すなわち、破壊が発生しなかった場合の記録 (a)および(b)の変位は、400~500  $\mu$ sec後には基線にもどり、波動による側面の永久変位はないことを示しているが、破壊が発生した場合 (c), (d), (e), (f)には変位の記録が基線にもどらず、側面はある速度で移動していることを示している。このことは変位速度記録にも現われており、入射波の波内粒子速度の最高値の2倍の値に相当する変位速度最高値に達したのち、それよりも低い速度をかなりの時間維持している。このことは、この面の移動速度が波動の持っている運動量の大きさと規定されていることを示している。

図9は、オシログラムより求めた圧縮鉄筋側の側面 (爆源から45 cmの位置にある自由面)の変位速度最高値と装薬条件との関係を示したものであり、表1はデカップリング装薬とすることによってコンクリート内へ投射される波動の大きさがどのように変化するかを示したものである。表1より、デカップリング係数が2.5の砂デカップリング装薬が爆発した場合に発生

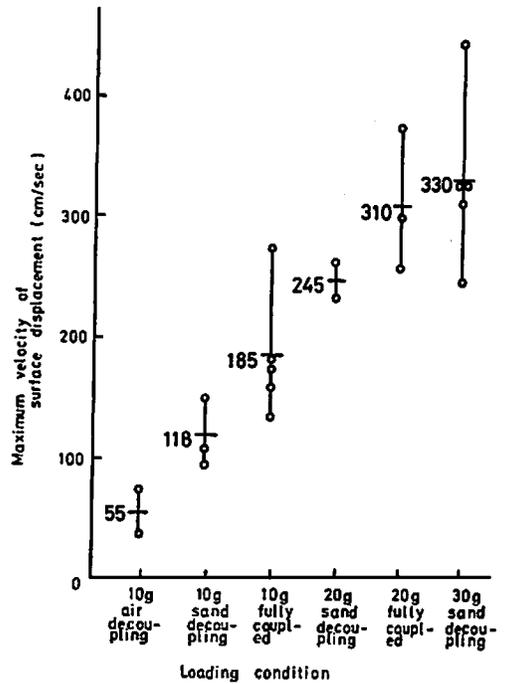


Fig. 9 Relation between loading condition and maximum velocity of surface displacement at 45 cm from the centre of explosion.

Table 1 Effect of decoupling

Loading condition	Hole diameter	Ratio of Peak Particle velocity
	Charge diameter	
10 g fully coupled	1.25	1
10 g sand decoupling	2.5	0.64
10 g air decoupling	2.5	0.30
20 g fully coupled	1.25	1
20 g sand decoupling	2.5	0.79

する波動の大きさは、デカップリング係数がほぼ1 (正確には1.25の砂デカップリング)の密装装薬が爆発した場合に生成する波動のそののほぼ70%となり、デカップリング係数が2.5の空気デカップリングとなれば密装装薬の場合の波動の大きさのほぼ30%となることわかる。

つぎに、図7および図9に示した結果を用いて、コンクリート内での波動の伝播にともなう減衰指数を求めたところほぼ1.8という値が得られた。そこで、この結果を用いて、それぞれの装薬条件での爆破を行なった場合について、最小抵抗線の長さと同側面の変位速度最高値 (剝離して飛び出す破片の飛行速度にほぼ等しい)との関係を求めて図示したのが図10である。図

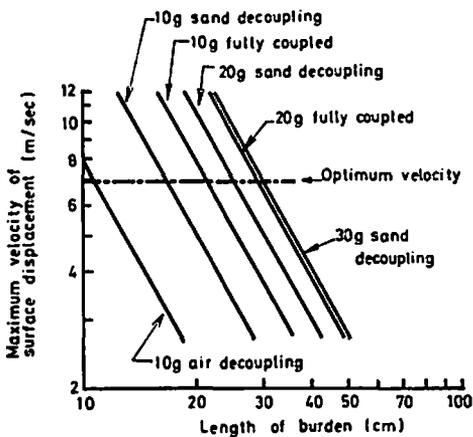


Fig. 10 Velocity of surface displacement vs. length of burden for various loading conditions

Table 2 Optimum length of burden for various Loading conditions

Loading condition	Length of burden
10 g air decoupling	11 cm
10 g sand decoupling	17 cm
10 g fully coupled	21 cm
20 g sand decoupling	25 cm
20 g fully coupled	29 cm
30 g sand decoupling	30 cm

7に示した結果より、確実にかぶりコンクリートを剝離させるために必要な側面の変位速度の最低値はほぼ 7 m/sec であることがわかっているから、その値を用いて、各装薬条件のもとでの最適な最小抵抗線の長さ（かぶりコンクリートを剝離し、かつ、破片の飛行速度が 7 m/sec となりうる爆破条件）を求めてみた。その結果を示したのが表 2 である。

### 3. 梁の破壊に関する数値解析による検討

強力な応力波の伝播にともなうぜい性材料の破壊現象の解析は、条件が非常に複雑となるために不可能と考えられていたが、近年、電子計算機の発達によってそれが可能となってきた<sup>97)</sup>。そこで今回は、G. Maenchen と S. Sack によって示された Tensor Code と呼ばれている手法<sup>98)</sup>、すなわち、運動方程式を差分近似を用いて解く方法を用いて、RDX の爆轟衝撃を受けた鉄筋コンクリート梁の破壊について検討した。実験に使用した鉄筋コンクリート梁は図 1 に示したように角柱状であるが、Tensor Code を用いる解析は、電子計算機の記憶容量から考えて軸対称 3 次元問題としての解析しかできないため、やむを得ず円

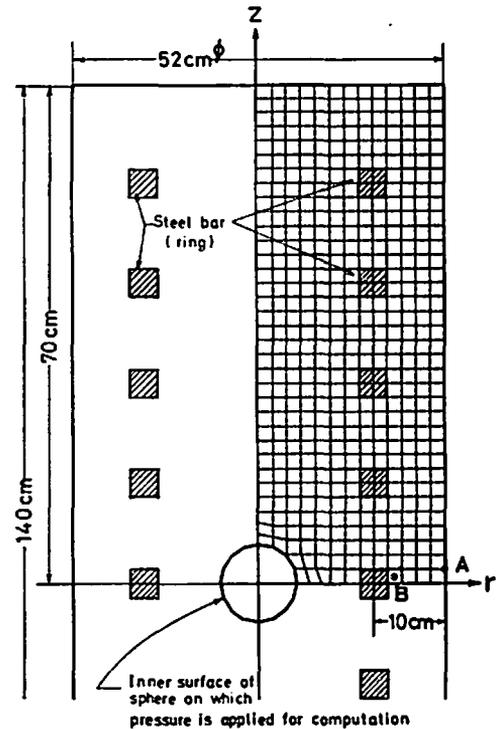


Fig. 11 Model of reinforced concrete beam used for the computation by the Tensor Code.

柱形の梁の場合について解析を実施した。また、上記の破壊実験では、最小抵抗線の長さを 25 cm としているので、このことを考慮し、解析は図 11 に示すように直径 52 cm、長さ 140 cm の円柱形鉄筋コンクリート梁の中央で爆薬が爆発した場合について実施した。したがって、この場合の最小抵抗線の長さは 26 cm となる。この梁について解析するために行なった要素分割は、図 11 に示すように、4 角形断面の要素を用いて行なった。鉄筋は z 軸に平行に入れられれば実際と一致するが、z 軸を回転軸とする軸対称問題としているため、やむを得ず図 11 に示すように一辺が 4 cm の正方形断面を有する鉄筋が円環状に入っているモデルを考えて解析を実施した。鉄筋の中心間隔は 14 cm、梁の表面から鉄筋の中心までの長さは 10 cm である。装薬室としては、z 軸を軸とする円筒形装薬室も考えうるが、今回は簡単にするために球状装薬室を考えることにした。さきに、図 3 に示した装薬条件のうち、20 g 薬包の場合には薬長が薬径の 5 倍となり、球状とみなすには無理がある。したがって今回は薬長が薬径の 2.5 倍である 10 g 密装薬の場合を例にとりて解析を行なった。そこでこの場合の装薬室の体積と等しい体積の球の半径を求めたところ 1.9 cm という値が得られ

た。Tensor Code を用いれば、装薬室壁面からの破壊状況の解析が可能であるが、その場合には、装薬室の大きさよりもかなり小さい要素に梁を分割して解析しなければならない。しかし、図11に示したような大きさの梁であれば、計算時間や記憶容量から考えて、 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$  程度の大きさの要素が最小であるので、この大きさの要素では半径  $1.9\text{cm}$  の装薬室近傍の破壊状況の解析は不正確となる。そこでまず、小さい要素分割を用いて点対称問題として半径  $1.9\text{cm}$  の装薬室内に圧力の立ち上り時間が  $20\ \mu\text{sec}$ 、圧力が最高値の  $1/2$  の値にまで減少する時間がほぼ  $150\ \mu\text{sec}$  であるような圧力を作用させて装薬室近傍の応力状態を解析し、その結果より、装薬室中心より  $5\text{cm}$  の球面に作用する応力状態を求め、その応力状態を図11に示した半径  $5\text{cm}$  の球面に作用させて梁内の応力状態や破壊の様相を解析することとした。Tensor Code を用いて破壊を考慮した応力解析を行なうためには、材料の強度および破壊条件を適当に選ばなければならない。材料試験を行なって求めた梁のコンクリートの強度は、2-1に示したように一軸圧縮強度が  $400\text{kg}/\text{cm}^2$ 、圧裂試験より求めた引張強度は  $43\text{kg}/\text{cm}^2$  である。しかし、波動による破壊の場合には材料試験の場合よりはるかに荷重速度（応力速度）が大きいため、波動に対してはコンクリートは上記の強度よりも強くなるものと考えられる<sup>10)</sup>。一方、すでに実施したダイナマイト  $3.4\text{kg}$  が硬い鉄筋石内で爆発した場合の破壊状況を Tensor Code を用いて解析した結果によれば、材料試験より求めた強度の  $3 \sim 4$  倍の値を波動に対する強度と考えた場合に実際の破壊状況とよく一致するという結果が得られているので<sup>11)</sup>、この解析では、波動によるコンクリートの強度は材料試験結果より得られた強度の  $4$  倍とした。また、破壊条件としては、放物線で近似したモールの破壊限界線に応力円が接した場合に破壊するという条件を採用した。密装填した  $10\text{g}$  の RDX が爆轟した場合に生成する梁内の応力状態や梁内部の破壊の様相を明らかにするためには、Tensor Code を用いて行なった数値解析によって得られた計算値と実測値とが一致している必要がある。2で示した実験において、密装填の RDX  $10\text{g}$  を梁内で爆発させた場合に発生する爆源から  $25\text{cm}$  の位置にある自由面での変位速度最高値の平均値は  $360\text{cm}/\text{sec}$  であり、爆源から  $45\text{cm}$  の位置で測定した変位速度の立ち上り時間、すなわち、変位が発生しはじめてから変位速度が最高値に達するまでの時間は  $50 \sim 60\ \mu\text{sec}$ 、波動の伝播にともなう減衰指数は  $1.8$  という結果が得られているので、図11に示したA点の変位速度が上記の実測結果とほぼ一致し、さらに減衰指数もできるだけ一

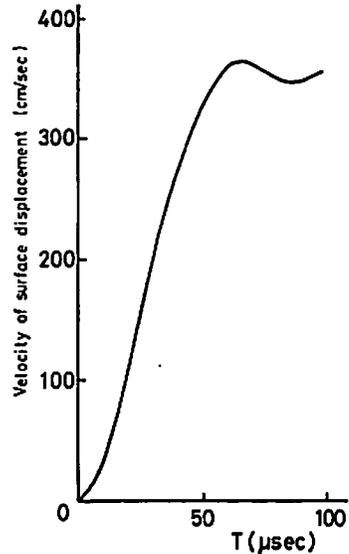


Fig. 12 Velocity of surface displacement at point A shown in Fig. 11 computed by the Tensor Code.

致するように計算プログラムの入力データを選定した。その結果、図11に示した球面に最高値が  $4,000\text{kg}/\text{cm}^2$ 、立ち上り時間がほぼ  $80\ \mu\text{sec}$  の圧力を作用させた場合に、図11に示したA点での変位速度として図12に示す結果が得られた。なお、図に示す  $T$  は波動がA点に到達してからの時間である。図12に示した計算結果は実測結果とかなりよく一致しているので、解析によって得られた梁内の応力状態および破壊の様相は、実際に梁内に発生しているそれらとほぼ対応しているものと考えられる。解析は、鉄筋の存在によって応力状態や破壊の様相がどのように変化するかについて検討するために、図11に示した鉄筋の部分も周囲と同一のコンクリートと考えて無筋コンクリート梁としたモデルと、図11に示した鉄筋コンクリート梁のモデルとについて実施した。計算結果の一例として、図11に示したB点の応力状態を、鉄筋コンクリート梁モデルについて求めた結果が図13であり、無筋コンクリート梁モデルについて求めたそれが図14である。なお、図13、14に示す  $T$  は、波動がB点に到達してからの時間である。これらの図において、まず鎖線で示した  $\theta$  方向に作用する主応力をみると、その値は鉄筋の存在に関係なく  $T \approx 60\ \mu\text{sec}$  で急激に零となっている。これは、この時間に  $\theta$  方向に作用する主応力の大きさがコンクリートの動的強度に達し、B点に  $r\theta$  面内のき裂、したがって梁を縦に割るような方向のき裂が発生し、 $\theta$  方向の応力が解放されたことを示している。つぎに、点線で示した  $z$  方向に作用する主応力の変化状態から、鉄筋がない場合には  $T \approx 75\ \mu\text{sec}$  で、

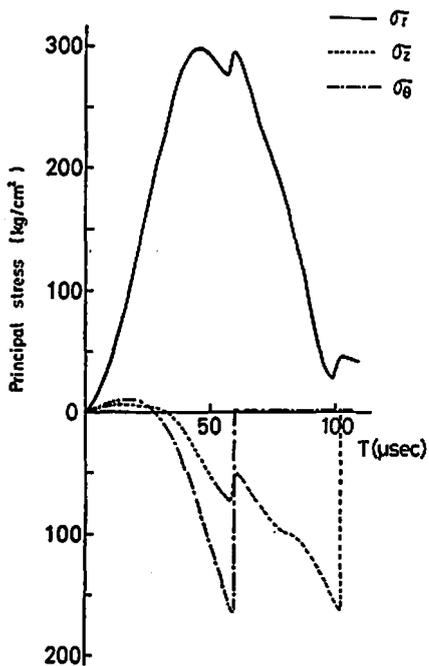


Fig. 13 Computed stresses at point B for reinforced concrete beam.

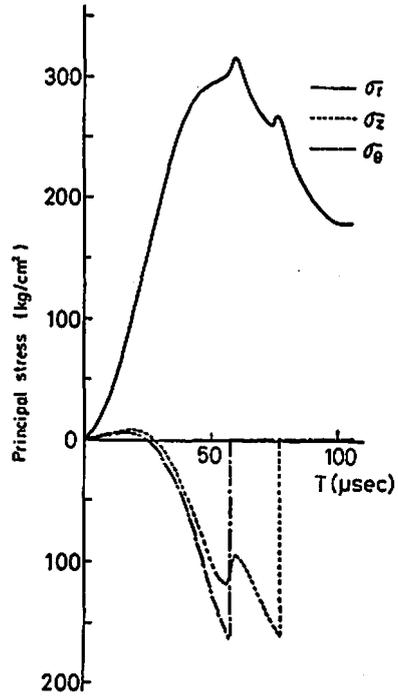
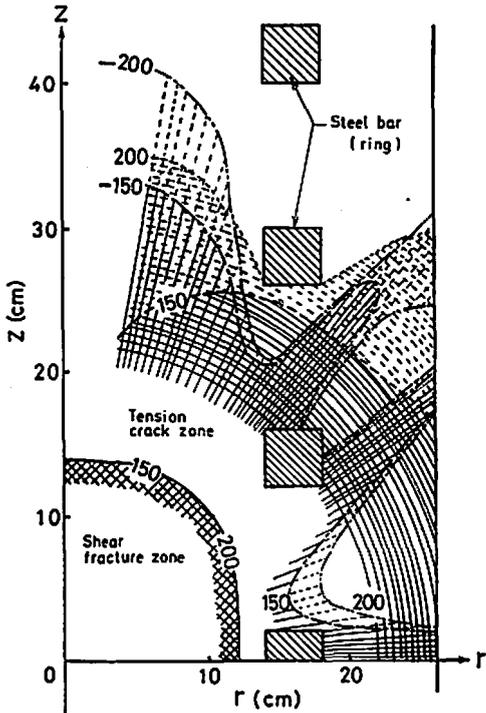
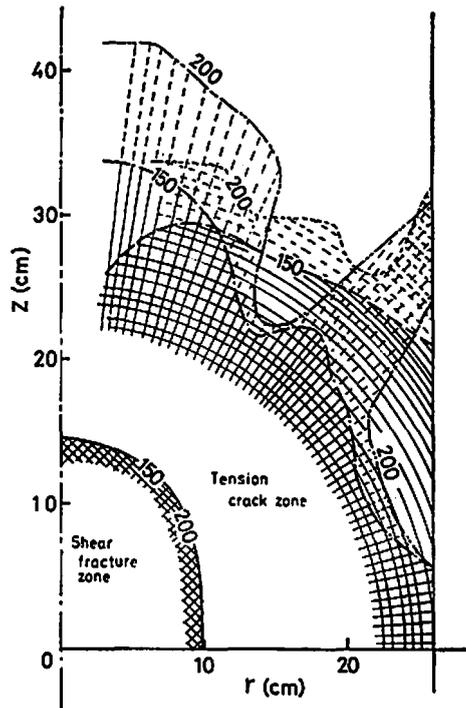


Fig. 14 Computed stresses at point B for plain concrete beam



(a) Reinforced concrete beam



(b) Plain concrete beam

Fig. 15 Pattern of breakage computed by the Tensor Code. (Numbers attached on the curves are the time from detonation)

鉄筋がある場合にはやや遅れて  $T \cong 100 \mu\text{sec}$  で、 $r0$  面内のき裂<sup>7</sup>したがって、梁を切断するようなき裂が B 点に発生したことがわかる。さらに、実線で示した  $r$  方向に作用する主応力についてみると、いずれの場合も圧縮応力であって、引張応力にはなっていない。したがって、この場合には、この応力による剝離は発生しないことになる。しかし、鉄筋が存在する場合には、梁の側面からの反射引張応力波が鉄筋面で再び反射するために、B 点近傍に応力集中が発生し、鉄筋が存在しない場合に比して  $T \cong 100 \mu\text{sec}$  において圧縮応力がかなり小さくなっている。このことは鉄筋が存在する方が剝離が発生しやすいことを示しているとともに、剝離が発生する場合には鉄筋の入っている面で剝離するという破壊実験の結果を裏づけていることになる。

最後に、梁内でのき裂の進展状況について考察した結果を示すことにする。図15(a), (b)は Tensor Code を用いた計算により求めた爆轟後  $150 \mu\text{sec}$  および  $200 \mu\text{sec}$  における梁内のき裂の進展状況を示したものであって、曲線に付した数字は爆轟後の時間を示している。図に示す実線は、爆源近傍に生成するせん断破壊領域とその周囲に生成する引張き裂領域との境界<sup>7)</sup>を示したものであり、破線および点線は、 $r_0$  面に生ずる引張き裂、したがって梁を縦に割るような方向に生ずるき裂の先端をつらねた線を示したものであり、1 点鎖線および 2 点鎖線は、梁を切断する方向またはクレータの縁となる方向に生ずるき裂の先端をつらねた線を示したものである。図15より、爆源を中心とする半径  $10 \sim 15 \text{ cm}$  の範囲のコンクリートはせん断破壊していることがわかる。このことは、この範囲内のコンクリートがかなり細かく砕かれていることを意味している。また、(a)図より、RDX  $10 \text{ g}$  密装填の場合には、せん断破壊圏は鉄筋の位置まで達していないことがわかる。鉄筋コンクリート梁を破壊する場合には、鉄筋外のかぶりコンクリートは剝離して分離させるが、鉄筋内のコンクリートはかなり細かく破砕する必要がある。したがって、良好な爆破を行なうためには、せん断破壊圏が鉄筋の外周の位置まで広がるような爆破条件を選ばねばならないであろう。つぎに、破線および点線で示した梁を割るような方向に発達するき裂の生成状況をみると、円環状に入っている鉄筋がこの方向のき裂に対しては有効に働らくため、鉄筋の存在によってき裂の進展が妨げられている様相がみとめられる。しかし、いずれの場合も、 $150 \mu\text{sec}$  後には梁の軸にそうき裂が梁の表面に長さほぼ  $40 \text{ cm}$  にわたって現われ、 $200 \mu\text{sec}$  後にはその長さがほぼ  $60 \text{ cm}$  となるという結果が得られている。つぎに、鎖線で示し

た梁を切断する方向に発達するき裂に関しては、図13 および図14からも明らかのように、 $150 \mu\text{sec}$  後にはすでに梁の表面まで達している。そこで、クレータの縁となる方向のき裂をみると、鉄筋が存在する場合には鉄筋面に応力集中が発生するので、鉄筋を挟むような形でき裂が発達し、 $150 \mu\text{sec}$  後にはすでに  $z \cong 20 \text{ cm}$  の位置で表面にき裂が現われている。なお、これに対応するき裂は、無筋コンクリート梁の場合には現われていない。 $200 \mu\text{sec}$  後になると、無筋の場合も  $z \cong 30 \text{ cm}$  の位置で表面に現われクレータを生成させるき裂が完成している。鉄筋が存在する場合も、同様に  $z \cong 30 \text{ cm}$  の位置で表面に現われるき裂が発生している。なお、いずれの場合もとくに注目すべきことは、最小抵抗線にそうき裂が入ったあとは、 $z < 20 \text{ cm}$  の範囲内で表面に現われるき裂は生成していないことである。

以上に、 $10 \text{ g}$  密装填の場合を例にとり、梁内に発生する応力状態や破壊の様相を示し、さらにこれらが鉄筋の存在によってどのように変化するかについても言及した。なお、今回の計算結果と実験結果とを対比することによって、Tensor Code を用いることによって、種々の爆破条件の場合の破壊状況を推定しうる可能性があることが明らかとなった。

#### 4. 結 言

この研究では、まず  $50 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 600 \text{ cm}$  の鉄筋コンクリート梁を RDX を用いて爆破する実験を、最小抵抗線の長さが  $25 \text{ cm}$  の場合について種々の装薬条件で実施し、剝離して飛び出すかぶりコンクリートの破片の飛行速度および剝離しない自由面の変位速度の時間的変化状態の測定を行ない、これらの結果にもとづいて、自由面の変位速度の値がほぼ  $5 \text{ m/sec}$  より速くなれば剝離が発生することを明らかにした。さらに、この結果を用いて、種々の装薬条件の場合の最適な最小抵抗線の長さを示した。ついで、Tensor Code を用いて梁の破壊に関するシミュレーションを行ない、鉄筋が存在する場合には、鉄筋とコンクリートとの接触面に応力集中が発生するために無筋の場合よりも剝離が発生しやすくなること、および剝離が発生するならば鉄筋の入っている面で分離することなどを明らかにした。最後に、Tensor Code を用いることによって種々の装薬条件のもとで生ずる破壊の様相を推定しうる可能性があることを示した。

今回の鉄筋コンクリート梁の破壊実験は、前田建設工業株式会社と共同してフジミ工研株式会社取手工場で実施したものである。とくに直接実験を援助していただいた前田建設工業株式会社 桑原 力、小嶋孝雄の両氏および取手工場 谷口工場長に対し厚く御礼申

し上げる次第である。なお、実験に際しては日本油脂株式会社および日本化薬株式会社の援助を受けた。また、この研究は、火薬工業技術奨励会研究助成金（昭和46年度）の補助を受けて行なったものであることを記して感謝の意を表する次第である。

最後にこの報告に示した Tensor Code による解析は、京都大学大型計算機センターの電子計算機 FACOM-230-60 を使用して行なったことを付記しておく。

#### 参考文献

- 1) 伊藤, 佐々, 谷本: 材料, 20巻, 209号, 203~208頁, 1971
- 2) 伊藤, 佐々, 谷本: 工業火薬協会誌, 32巻, 1冊 13~17頁, 1971
- 3) 伊藤, 佐々, 勝山, 浜崎, 中島: 日本鉱業会誌, 87巻, 1006号, 1971
- 4) 伊藤, 佐々, 谷本: 土木学会論文報告集, 199号, 109~116頁, 1972
- 5) 佐々, 伊藤, 花崎: 工業火薬協会誌, 33巻, 1冊 9~16頁, 1972
- 6) J. T. Cherry: Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 4, No. 1, p. 1~22, January, 1967
- 7) 佐々, 伊藤: 材料, 12巻, 221号, 123~129頁, 1972
- 8) G. Maenchen and S. Sack: Methods in Computational Physics, Vol. 3, p. 181~210, 1964, Academic Press.
- 9) 佐々: 水曜会誌, 17巻, 7号, 312~318頁, 1972.
- 10) 例えば, 材料学会編: 岩石力学とその応用, 29頁, 丸善, 1966.
- 11) 佐々, 伊藤: 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集, 第3巻, 241~244頁, 1972.

---

## Breakage of Reinforced Concrete Beam by High Explosives

by K. Sassa\*, K. Ito\*\* and I. Ito\*

The reinforced concrete beams of 50 cm×70 cm×600 cm are blasted with the 10 g or 20 g cartridge of RDX of 2 cm<sup>φ</sup> under the following conditions. The length of the burden is kept always for 25 cm and the following six loading conditions are tested, that is, the air decoupling 10 g charge of decoupling coefficient of 2.5, the sand decoupling 10 g charge of decoupling coefficient of 2.5, the fully coupled 10 g charge, the sand decoupling 20 g charge of decoupling coefficient of 2.5, the fully coupled 20 g charge and the sand decoupling 30 g charge (10 g cartridge×3) of decoupling coefficient of 1.44. The measurements of the slab velocity and the surface displacement of the unslabbed surface are made. By comparing the pattern of breakage and the result of the slab velocity measurement, 5 m/sec is obtained as the minimum slab velocity. Therefore, in order to separate the concrete slab as a slabbing, the peak particle velocity of the incident stress wave to the surface must be faster than 2.5 m/sec, this means that the peak stress of the incident stress wave must be larger than about 260 kg/cm<sup>2</sup>. The optimum breakage is obtained in the case that the slab velocity is about 7 m/sec. By using the above value, the measured decay exponent of the stress wave in the concrete beam and the measured maximum particle velocity of the unslabbed surface, the optimum blasting condition of the reinforced concrete beam is proposed for the several loading conditions shown above.

Finally, the numerical computation of the patterns of the stress distribution and the breakage of a concrete beam was made by using the Tensor Code for the blasting

of both a reinforced concrete beam and a plain concrete beam of 52 cm × 140 cm with a 10 g of the fully coupled RDX charge loaded at the centre of the beam. The main result of the numerical computation shows that the existence of the steel bar acts to support the cracking along the plane including steel bar because of the stress concentration at the contact plane between steel and concrete, therefore, the slabbing to expose the steel bar is easily produced by the reinforced concrete blasting.

(\*Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan. \*\*Fudo Construction Co. Ltd., Central Research Lab., Ibaragi, Osaka, Japan.)

---