

Phot.1 Examples of fracture mode of concrete and mortar slabs in surface blasting experiments.

衝撃実験の破損形と爆発による破損形が極めて似ているのを知ったことである。今考えれば当然のことであるが、アプリアーにこれを認めることは出来なかった。そしてこのヒントは従来の研究結果を爆発においても準用できることを示した。

この研究は、前述のように耐爆設計を目的としているので、研究の重点を「破損の定量化」つまり、「与えられた薬種、薬量に対して予測できる破損量を決定することに置いた。もし破損量が予測できるならば、それを差し引いた残りの構造体で使用目的が達せられるように設計すればよいからである。そのために、数多くの実験から破損の大きさのデータを蒐集した。ただ、これらの実験は、版面上で爆発させたものであり、

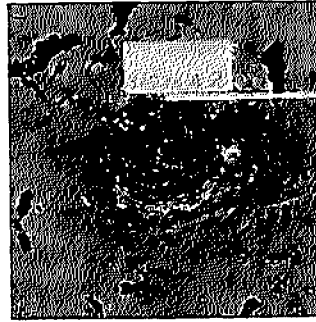
版面から離れた爆薬の爆発の研究は今後に残されており、現在も続行中である。ここでは既に解析を完了した範囲について、実験事実の記述に重点を置いて報告する。

## 2. 実験と破損状況

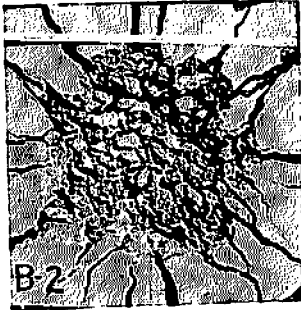
この実験は三つのシリーズからなり、第一のシリーズは、昭和50年比較的大きな鉄筋コンクリート平版上で3種の爆薬（3号桐ダイナマイト、アンホ、およびシゼット）630g~12kgを爆発させた実験である。試験体は三種あり、1.8m×1.8m×30cm、1.8m×1.8m×45cm、2.0m×2.0m×58cm（枕梁造り付け）で、前二者は下に2本の枕木を入れて地面から浮かし、実験を行なった。使用したコンクリートの実験時の圧縮強



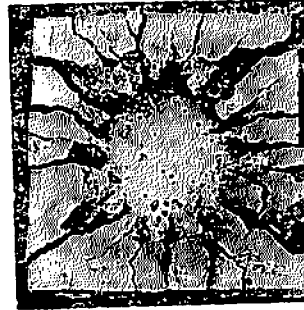
( j )



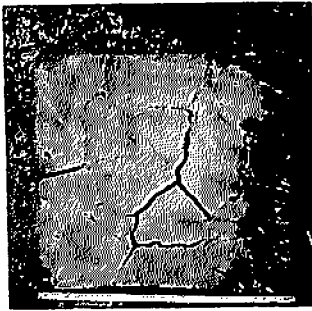
( k )



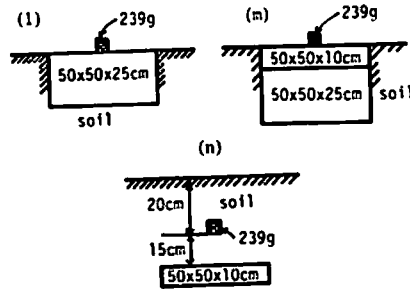
( l )



( m )



( n )



- (j): Thickness of 28cm, concrete wide slab, C-4, 855g  
 (k): Thickness of 28cm, concrete wide slab, C-4, 855g, covered with sand  
 (l): Concrete slab, 50x50x25cm, C-4, 239g  
 (m): Concrete slabs, 50x50x10cm, 50x50x25cm, C-4, 239g  
 (n): Concrete slab, 50x50x10cm, C-4, 239g, underground explosion

Phot. 1 (Continued).

度は  $250\text{kg}/\text{cm}^3 \sim 300\text{kg}/\text{cm}^3$ 、材令は11日～25日であった。鉄筋は丸鋼を使用し、鉄筋比は0.3%以下であった。

第二のシリーズは昭和52年～53年にかけて行なわれたもので、爆薬はコンポジションC-4一種とし、密度を一定 ( $1.50\text{g}/\text{cc}$ ) とした。試験体はモルタル版 ( $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 3\text{cm}$ ,  $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 5\text{cm}$ ) モルタルブロック ( $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 20\text{cm}$ ) およびコンクリート

ブロック ( $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 20\text{cm}$ ) の三種で、水セメント比0.5、平均圧縮強度はモルタル  $489\text{kg}/\text{cm}^2$ 、コンクリート  $346\text{kg}/\text{cm}^2$  であった。モルタルはコンクリート中のモルタル分と同一の配合である。実験時の材令は150～180日であった。試験体は標準砂の水平な層をつくり、その上に置いて爆発させたが、一部、コンクリート床面上または鉄板上に置いて実験を行なったものもある。また試験体に爆薬を置いた後、それら

を標準砂で覆って爆発させたものもある。

第三のシリーズは昭和53年～54年にかけて行なったもので、更に三つに分かれ、「シリーズ3-1」は広いコンクリート平板（厚さ28cm）上でコンポジションC-4、203g～855g（密度1.46～1.50g/cc）を爆発させたものである。この場合、爆発をポリスチレン製の容器に入れ（シリーズ2以降の実験は全部同様である）、その薬径dと薬高hとの比を0.62～2.52の間で変化させた。試験体のコンクリートは水セメント比0.50であり、材令47日で、版は地面上に割栗石を入れて直接設置されていた。この実験の結果、破壊の大きさと薬形(d/h比)とが顕著な関係をもつことが知られたので以降のシリーズでは薬形d/h比を1.33、密度を1.44g/ccと一定とした。

「シリーズ3-2」はコンクリート版50cm×50cm、厚さ10cmおよび25cmの二種を使い、薬量を54.3g～364gの間に变化させて実験を行なった。コンクリートの配合はシリーズ2と同一であり、圧縮強度は457kg/cm<sup>2</sup>、実験時の材令は46日～49日であった。試験体は水平に上面まで土中に埋めたもの、二枚重ねのもの、空気層を設けたもの等がある。

「シリーズ3-3」はモルタル版50cm×50cm、厚さ10cm、15cm、20cmおよびコンクリート版50cm×50cm、厚さ10cmを標準砂の砂層上において爆発させたもので、薬量は12.0～54.3gまで変化させた。モルタルおよびコンクリートの配合はシリーズ2と同一で、圧縮強度はモルタル517kg/cm<sup>2</sup>、コンクリート410kg/cm<sup>2</sup>であった。実験時の材令は4.5～6.5ヶ月であった。一部重ね版の実験も行なった。

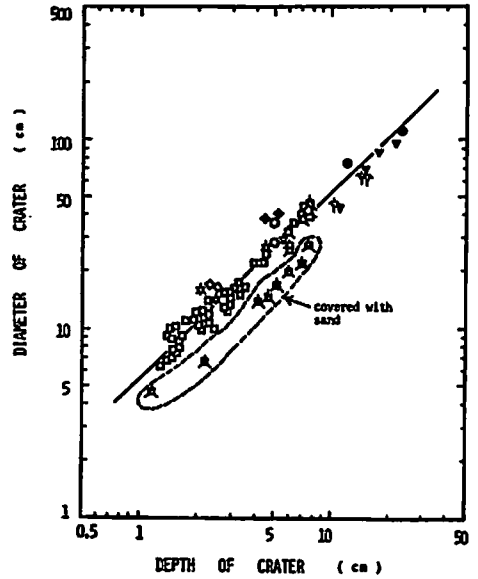
これらの実験の代表的な破壊例をPhot.1に掲げた。以下、破壊の大きさに関する検討結果を報告する。

### 3. 表面破壊（クレーター）

爆発による表面破壊（クレーター）の大きさを表現するには平均直径、深さ、または容積を用いることができるが、ここでは設計上の便利さから深さをとることとした。しかし、クレーターの平均直径と深さとの間にはFig.1の関係が認められたので、この図からその深さに対するおおよその直径を知ることができる。全部の実験のクレーター深さと薬量の関係をFig.2に示した。薬種、薬形(d/h比)、砂で覆ったかどうかなどの違いにより、異なる記号を使った一図示が、これは以降の図にも共通である。クレーターの深さについて、実験順序とは逆にシリーズ3-3から考察する。

#### 3.1 薬種、薬形および装薬密度を一定とした実験

シリーズ3-3は54.3グラム以下のコンポジションC-4を装薬密度1.44g/cc、薬径d/薬高hを1.33と一定とし、モルタルおよびコンクリート平板上で爆発さ



Legend:

EXPLOSIVES	uncovered				covered with sand	
	0.3, 0.5	1.33	1.0, 2.4	2.5, 3.0	0.62	1.33
Dynamite	△	○	◇	●		
A H F O	△	○	◇	●		
Comp. C-4	△	○	◇	●	△	■
Chiodite	△	○	◇	●		

d: diameter of explosive, h: height of explosive

Fig. 1 Relation between the diameter and the depth of crater in surface blasting experiments of concrete slabs.

せた実験である。この結果はFig.2上に(□)印で示した。図からクレーター深さD<sub>c</sub>と薬量Lの関係がかなり明瞭に知られ、しかも関係直線を作るとその勾配は約1/2となるので次の実験式が得られる。

$$D_c = \alpha L^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

αは常数であるが、コンクリートとモルタルの間では僅かに差があり、コンクリートのクレーター深さはモルタルの場合より10～13%深い。これはコンクリートの方がより非均質であるからであろうと考えられる。

クレーター部分の飛散したコンクリートおよび孔の壁面のコンクリートは、前述のように白色に変色し、指で軽く砕くことができる程弱くなっている。これは加熱されたコンクリートの特徴で、脱水による劣化である。コンクリートは砂および砂利をセメントペーストで結合した多孔質の複合材料であり、その強度は殆どセメントペーストの強度で左右される。硬化したコンクリートのセメントペーストの部分は、水和したセメント粒子から生長したケイ酸カルシウム、アルミン酸カルシウム等のゲル状の繊維が複雑にからみ合い、それらが、未水和セメント粒子、水酸化カルシ

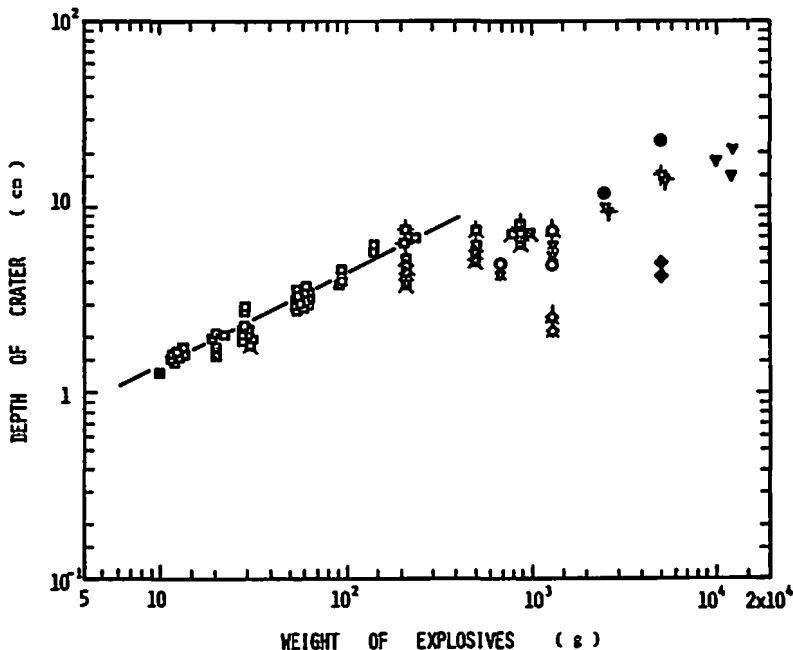


Fig.2 Variation of the depth of crater with the weight of explosives in surface blasting experiments of concrete and mortar slabs.

ュームの結晶等と結びつけている微細構造が既に明らかにされている<sup>6)</sup>。固合の際加えられた水分のうち、セメント重量の約25%はセメントと化学的に結合してゲルを形成し、その一部(約0.5%)だけが化合水となっている<sup>6)</sup>。ゲルの周囲、ゲルの隙間等に吸着されている水分(吸着水)はセメント重量の約15%で、残りの水分はセメントペーストと骨材界面の隙間、ペースト中の毛細管等に入っている。この水分を毛管水といっている。毛細管には空気も入っている。これらの水分のうち、吸着水と毛管水は蒸発水(evaporable water)ともいわれ、105℃以下の加熱で蒸発する。化学的結合水(nonevaporable water)は化合水も含めて1000℃程度の加熱で殆ど失われる。水分を喪失するとセメントペースト中の空隙が増大し、結合力が弱化する。しかし、コンクリートの加熱による劣化はかなり低い温度から始まる。その機構は次のように説明されている<sup>7)</sup>。セメントペーストの熱膨張係数は低温では正であり、加熱とともに膨張するが、約110~140℃以上では膨張係数は逆に負に転じ、加熱とともに収縮する<sup>7)</sup>。一方、砂利、砂は終始膨張するので、約110℃以上の高温になるとセメントペーストと骨材間の界面の破壊が始まる。更に石英質の骨材が使用されていると温度の上昇とともに数回の転移が生じ、この際体積の膨張がおこり、結合を破壊する。セメントの水和生成物の中にも転移を生ずるものがあると

いわれている。

爆発によるモルタルおよびコンクリート平版のクレーターの発生には衝撃波による破壊と上述の加熱による強度劣化が考えられる。しかし、クレーターの形成が不完全で一部分破壊されずに残っている場合も、その部分がクレーターの形に白色化しており、また、クレーターの底の部分も必ず脱水していることを考えると少くとも、クレーターの最深部の形成には衝撃波よりも加熱による劣化が強く影響すると考えられる。

今、試みに一様な媒体の表面上の一点(Fig.3の原点)に一定熱量 $Q$ がそそぎこまれた場合、(はじめ媒体は0℃として)内部の $x$ 軸上の一点( $x$ )の温度 $\theta$ は

$$\theta = (x, t) = \frac{Q}{8\rho c(\pi x)^{\frac{1}{2}}} \int_0^t \frac{e^{-x^2/4s(t-s)}}{(t-s)^{\frac{1}{2}}} ds$$

で与えられる<sup>8)</sup>。ここで： $\rho$ 密度、 $c$ ：比熱、 $\kappa = \frac{k}{\rho c}$ ：熱拡散率  $\alpha$ ：熱伝導率、である。この $\theta$ は Galton 曲線<sup>9)</sup>を使って積分を書き換えると、

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^X e^{-\frac{\mu^2}{2}} d\mu, \quad X = \frac{x}{\sqrt{2\kappa t}}$$

Galton 曲線の $X$ の大きい範囲の近似式

$$Y = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{2X^2}{\pi}} \right)$$

を使うと次の式が得られる。

$$\theta(x, t) = \frac{t^{\frac{1}{2}}}{8\pi^{\frac{1}{2}} \rho c \kappa^{\frac{1}{2}}} \frac{Q}{x^2} e^{-\frac{x^2}{4\kappa t}}$$

いま、時刻  $t_0$  までそそぎこまれた熱量を  $\bar{Q}$  とすると  $\bar{Q} = Q t_0$ 。

この熱量によって深さ  $x$  の点における温度  $\theta$  が、丁度劣化をおこす温度  $\theta$  になったとし、 $x$  を  $D_c$  とおくと  $e^{-\frac{x^2}{4\kappa t}} \doteq 1$  として

$$\theta = K \frac{\bar{Q}}{D_c^2}, \quad K = \frac{1}{8\pi^{\frac{1}{2}} \rho c \kappa^{\frac{1}{2}} t_0^{\frac{1}{2}}}$$

$$\therefore D_c = \sqrt{K/\theta} \bar{Q}^{\frac{1}{2}}$$

を得る。 $t_0$  を生成ガスが版面に接触している時間とすると版面にそそぎこまれた全熱量  $Q = Q t_0$  は、爆薬の全爆発熱  $L Q_1$  ( $L$ : 薬量,  $Q_1$ : 爆発熱) に比例すると考えられるから、比例常数を  $v$  として

$$\bar{Q} = v L Q_1$$

$$\therefore D_c = \sqrt{\frac{v K Q_1}{\theta}} \cdot L^{\frac{1}{2}}$$

となり(1)式と一致する。この議論には仮定が多く、コンクリートの熱常数を用いて更に詳細に検討しなければならないが、現在のところ、まだ高温時のコンクリートの熱常数は求められていない。正否の検討は将来に残すとしても、上述の結果は、コンクリート版またはモルタル版の爆発によるクレーターの発生にとって生成ガスの熱的作用の影響が無視できないことを示すと考えられる。

### 3.2 種々の爆薬を用いた実験

クレーターの深さについて、前項のコンポジション C-4 で見られた関係が、何か係数を乗ずることによって他の爆薬にも使用できるならば、実用上極めて有益である。そこで Fig. 2 の C-4 以外の爆薬のクレーター深さのデータを C-4 の関係直線上に持って来ることができるような共通なパラメーターを爆薬の特数(密度  $\rho$ , ガス比容  $V_0$ , 爆発温度  $T_1$ , 比エネルギー  $f$ , 爆発圧力  $p_1$ , 爆ごう速度  $D$ ) を種々組み合わせで検討した。特数の値は工業火薬ハンドブックによったが記載のないシゼットは文献<sup>10)</sup>から、C-4 については爆速は実験値、爆発圧力は  $p_1 = (\rho D^2)/8$  による計算値、その他は RDX の値を用いた。このような検討のすえ、最もよい結果を得たのは  $(V_0 T_1 D) \times L$  というパラメーターであった。このパラメーターによって、C-4 以外のパラメーターの値を C-4 の値に換算し、クレーター深さとの関係を画いたのが Fig. 4 である。

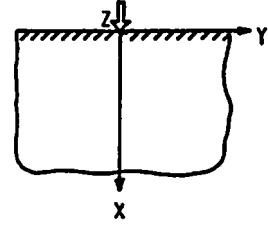


Fig. 3 Diffusion of heat at the point of surface of half-space.

この図でシゼットのデータがやや他から離れているが、これは特殊な爆薬であり、実験でも他と違つたいくつかの性質が見られたので、離れるのは止むを得ないと考えられる。ところで、パラメーター  $(V_0 T_1 D) \times L$  中の  $V_0 T_1$  は比エネルギー ( $f$ ) に比例する値であり、また、 $D \doteq 4W$  ( $W$  は爆ごう粒子速度) であるから  $(V_0 T_1 D) \times L$  は版に向かって流れるエネルギー束である。もし、このパラメーターが実験に使用した以外の爆薬についても有効であるかどうかは今後の研究に待たなければならない。しかし使用出来るとしても、コンクリートのように多孔質、非均質であり、また引張り強度が圧縮強度より極端に小さい材料に限られると予想される。

なお、クレーターの深さは版の大きさ(面積)にはあまり関係はないが、薬形の影響はかなり見られた。このことについては既に須藤および福山の研究<sup>11)</sup>がある。

またクレーターの深さとコンクリートまたはモルタルの強度との関係は、この実験ではまだ、わからない。当然予想される含水率、材令などの影響とともに今後の問題である。

### 3.3 砂で覆った実験および土中の実験

Phot. 1 (k) は広いコンクリート版の面上にコンポジション C-4 を置き、そのまわりを Fig. 5 (b) のように砂で覆って爆発させたときのクレーターである。Phot. 1 (j) は同じ薬量を砂で覆わないで爆発させた実験であるが、両者には明らかに違いが認められる。前者でクレーターが小さい (Fig. 5) ののは爆発の際、砂を飛散させるのにエネルギーの一部が使われるからであろう。同様のことは土中で爆発させた実験でも認められた。しかし、説明にとまどうのは、砂で覆った実験のクレーターの周囲に出来る外輪状のきずである。これは同種のすべての実験で認められ、薬量の大きい場合ほど遠くに発生した。もし、最初の衝撃波によって砂が高速に吹きつけられたとすると爆薬の周囲のもっと広い範囲にきずが出来た筈である。

この現況は実験室でもっと狭いモルタル版で行なっ

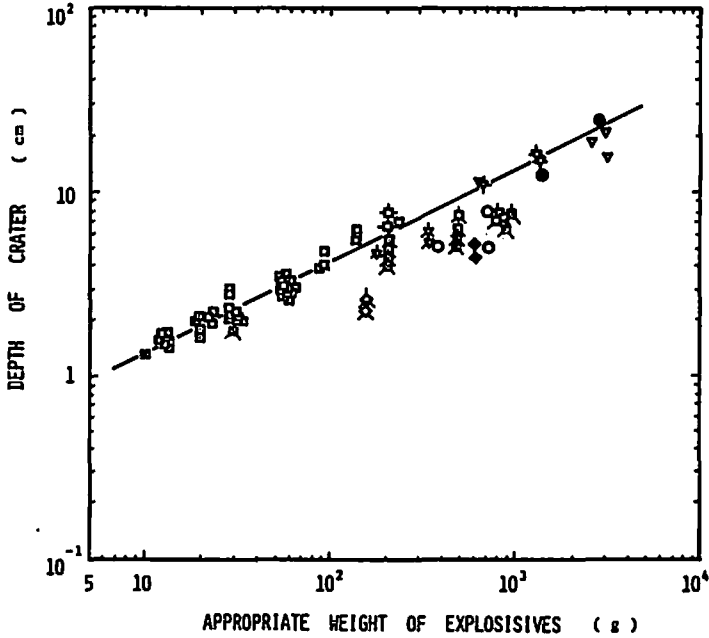


Fig. 4 Relation between the depth of crater and the appropriate weight of respective explosives, which stands at parity of parameter  $(V_0 T_1 D) \times L$ , in the surface blasting experiment of concrete and mortar slabs.

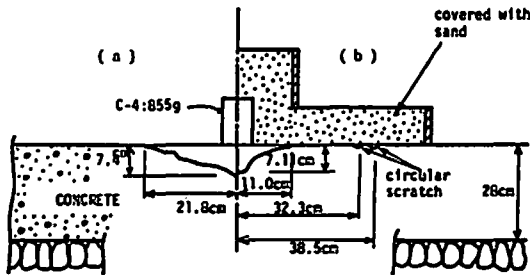


Fig. 5 Comparison of craters of concrete slab in case (b) covered with sand and case (a) uncovered respectively, in surface blasting experiments.

た同種の実験（シリーズ2に含まれている。Phot. 1-(h) (i)）の破壊と原因は同じであると考えられる。この場合、砂で覆わない同種の実験（Phot. 1 (f), (g)）にくらべ、版は著しく多数の細片に分かれており、圧縮応力波の継続時間が比較的長い場合<sup>24)</sup>、または圧縮応力波が繰り返して作用する場合等によく見られる破壊状態を示している。このことから原因を次のように考えることが出来る。最初の衝撃波によって版は砂を含んだ空気によって覆われる。この空気と砂は一種の suspension の状態になっており、取り巻く空気より比重がかなり大きい（註）ので、版面で反射して来た

衝撃波を再反射させることができる。このように考えると大よその説明はできるが、外輪発生の説明には、まだ不十分である。

Phot. 1 (n) は爆薬も版も土中に埋めた場合で、50 cm×50 cm×10 cm のモルタル版の中央上方15 cm の位置に爆薬（C-4、239g）の底が来るように設置し、その底から上に20 cm の高さまで土で覆った。この破壊形にはクレーターもスキッピングも見られず、小薬量または低速の衝撃実験で発生する、いわゆる「準静的破壊<sup>25)</sup>」である。このことは土が爆発威力を減衰させるのに極めて有効であることを示している。

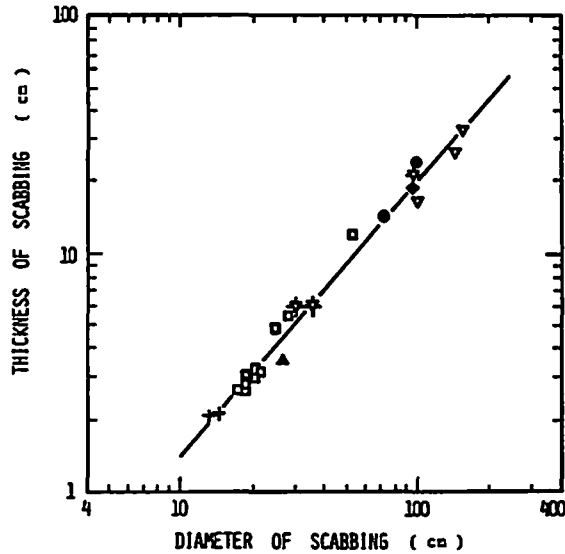


Fig. 6 Relation between the thickness and the diameter of scabbings caused by surface blasting experiments of concrete and motar slabs.

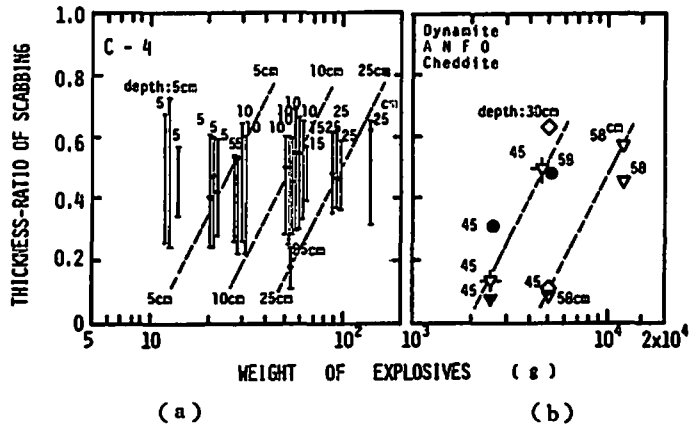


Fig. 7 Variation of the thickness-ratio of scabbings with the weight of explosives in surface blasting experiments of concrete and moter slabs.

#### 4. 裏面剝離 (スキッピング)

##### 4.1 スキッピングの大きさ

実験ではクレーターとスキッピングがつながり吹抜けたもののがかなりあったが、明らかにスキッピングを測定できるものの平均直径 厚さの関係を描くと Fig. 6 のように比較的まとまった関係が見られる。従って、スキッピングの大きさを表すのに、平均直径と厚さのどちらをとってもよいことになるが、ここでは設計に使用するときの便利さから、厚さをとることとした。

スキッピングを予測する試みとして、実験で得られたスキッピング厚さと薬種、薬量の関係を種々の表現を使って検討した。その結果、比較的まとまった表現ができるのは、裏面剝離の厚さともとの厚さとの比（これを剝離率と呼ぶこととする）を使用する方法である。Fig. 7 の縦軸は剝離率、横軸は薬量で、薬種等の表し方は前と同じであるが、薬種と版厚を一定とした場合の剝離率は薬量の増加とともに増大する傾向が明瞭に見られる。Fig. 7 (a) の中の縦の線分は版の内部に版面と平行なクラックが分布している範囲を



示しており、その線分の上の(●)印は実際にスキッピングの発生した位置を描いている(bは従前の記号を使っている)。この印のないものはスキッピングの発生しなかったものであるが、この場合にも内部には既に多くのクラックが入っていることが知られる。

#### 4.2 スキッピングの発生機構

スキッピングの発生機構については既に多くの説明がなされている<sup>12) 13) 14)</sup>が、解析的な説明は殆ど一次元応力波理論によっている。しかし、平面版では、一次元の棒と異なり、版中を伝播する応力波は縦波(P波)と横波(SH波およびSV波)があり、表面には表面波、ラム波がある<sup>15)</sup>。

ところでスキッピングが引張り応力波によって発生するという従来の説明については殆ど疑問の余地はない。衝撃実験で、丁度スキッピングの線にあったストレングージの出力を見ると、その位置で急激な引張り歪の生長が見られる<sup>16)</sup>。コンクリートまたはモルタルの破壊は殆ど引張り破壊であり<sup>17)</sup>、スキッピングの線などで一見剪断破壊のように見える場合でも、よく検討すると引張り破壊である場合が多い。このことはコンクリートの剪断強度も、圧縮強度と同様、高速変形時には大きくなるという高速破壊実験の結果によっても支持される<sup>18) 19)</sup>。従って、コンクリートまたはモルタル版の爆発による破壊は、前述のクレーター

部分および薬量の小さい場合を除いて、すべて応力波による破壊であり、圧縮では破壊し難いので、その多くは引張りによる破壊、スキッピングであると考えることができる。Phot. 1-(h)(i)のように表面に見られる細かいクラックも初め版縁端における表面波の反射によって表面部分にクラックが発生し、それが生長して行ったと考えられる。これらのことは理論的に説明されなければならないが、一般的には困難である。ただ、無限に広い平面版に垂直に衝撃が作用する場合は、比較的簡単に説明できる。

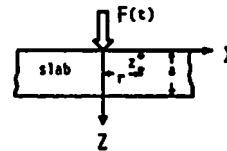


Fig. 8 Point impact on infinite slabs.

Fig. 8のように無限に広い平面版(厚さa)に衝撃集中荷重  $F(t, r) = F(t) \delta(r)$  ( $t$ : 時間,  $r$ : 円筒座標で表わした距離,  $\delta(r)$  はDiracの $\delta$ 関数)が作用したとき、作用軸( $z$ 軸)上の版中の任意の点における応力波の時間的変化は<sup>20) 21)</sup>次のように与えられる(ただし、この計算は弾性版として行なっている)。

$$\sigma_{zz} = \frac{1}{2\pi} \sum_{m,n=0}^{\infty} \sum_{i=1}^4 \left\{ \frac{d}{dt} \int_{\tau_i(0)}^t F(t-\tau_i) \frac{d}{d\tau_i} f_{mn}^i(\tau_i) d\tau_i + f_{mn}^i(\tau_i(0)) F'(t-\tau_i(0)) \right\}$$

$$f_{mn}^1 = \frac{1+(-1)^{m+n}}{2} \phi_{mn}(\bar{r}) \bar{r} \frac{d\bar{r}}{d\tau_1} H(\tau_1 - \tau_1(0)), \quad \tau_1 = \bar{h}z + m\bar{h}a + n\bar{k}d$$

$$f_{mn}^2 = \frac{1-(-1)^{m+n}}{2} \phi_{mn}(\bar{r}) \bar{r} \frac{d\bar{r}}{d\tau_2} H(\tau_2 - \tau_2(0)), \quad \tau_2 = \bar{h}(a-z) + m\bar{h}a + n\bar{k}a$$

$$f_{mn}^3 = \frac{1+(-1)^{m+n}}{2} \psi_{mn}(\bar{r}) \bar{r} \frac{d\bar{r}}{d\tau_3} H(\tau_3 - \tau_3(0)), \quad \tau_3 = \bar{k}z + m\bar{h}a + n\bar{k}a$$

$$f_{mn}^4 = \frac{1-(-1)^{m+n}}{2} \psi_{mn}(\bar{r}) \bar{r} \frac{d\bar{r}}{d\tau_4} H(\tau_4 - \tau_4(0)), \quad \tau_4 = \bar{k}(a-z) + m\bar{h}a + n\bar{k}a$$

ここに  $\sigma_{zz}$ :  $z$ 軸上の $z$ 方向応力

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{1}{C_L^2} + \bar{r}^2}, \quad \bar{k} = \sqrt{\frac{1}{C_T^2} + \bar{r}^2}, \quad \bar{r} = r/\rho$$

$$C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} : \text{容積波動(縦波)の伝播速度}$$

$$C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} : \text{廻転波動(横波)の伝播速度}$$

$r$ : 波数パラメーター,  $p$ : 振動数パラメーター

$\lambda, \mu$ : ラーメの常数,  $H$ : 単位階段関数

である。式中の  $f_{mn}^1, f_{mn}^2$  はそれぞれ衝撃点から伝播する縦波および横波を表わし、 $f_{mn}^3, f_{mn}^4$  はそれぞれ裏面から反射される縦波および横波を表わしている。モルタルの場合、実験から求めたラーメの常数等は次の通りであった。

$$\lambda = 0.778 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mu = 1.167 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho = 2.35 \times 10^6 \text{ kgs}^2/\text{cm}^4$$

$$C_L = 3640 \text{ m/s}, \quad G = 2230 \text{ m/s}$$

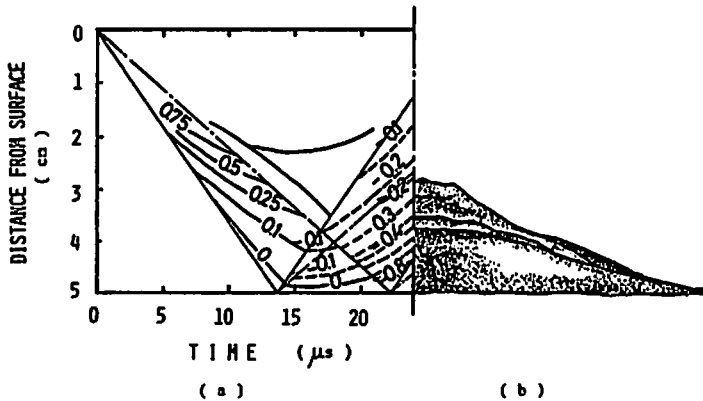


Fig. 9 Diagram of stress wave propagation on the central axis of the slab subjected to concentrated impact load at the center of its surface, and a sketch of the scabbing in surface blasting experiments of mortar slabs.

この値を使用し、衝撃荷重が

$$F(t) = F_1 e^{-bt}$$

で表わされる場合の計算例を Fig. 9 に示した。図の (a) は厚さ 5 cm の版で  $b = 2.75 \mu s$  の場合の応力波の伝播を示しており、比較的大きな引張応力が最初に現われるのは衝撃後約 17  $\mu s$  裏面から約 1.2 cm の位置であることが知られる。実際にクラッグが発生するには、Broberg<sup>13)</sup>の述べるように引張応力が或時間継続していなければならない。厚さ 5 cm 版の実験の中央部断面のスケッチ例を図の (b) に示したが、実際に裏面から 1 ~ 1.3 cm の位置にクラックが見られる。しかし、クラックはこれだけではなく、更に深部にいくつか現われるが、これは応力波が継続している間に第二、第三のスキヤッピングが発生するためと考えられる。また、平面波ラム波によるスキヤッピングが拡大して出来る場合もあると考えられる。

#### 4.3 重ね版の破壊と応力波遮断

Phot. 1 (m) は説明図のように二枚重ね版の実験である。これらの版は厚さ 20 mm のベニヤ板を底板とした仮枠を使用して製作したが、重ねる際、特に手を加えたわけではないので、接触点以外では薄い空気層があるだけと考えられる。この状態でも、下層版には殆ど被害がない。同じ薬量で下層版と同じ厚さの版を使って実験すると Phot. 1 (l) のように殆ど破碎してしまう。(m) では厚さが前の約 40% に過ぎない薄い板を破壊しただけで終わっている。これは上述の薄い空気層による応力波の反射によるものと考えられる。この種の応力波遮断の問題は耐爆設計方法を完成する上で極めて重要であると考えられる。

#### 5. 結論

(1) 表面爆破によるコンクリート版の表面破壊 (ク

レーター) の発生には爆薬の熱的作用が大きな影響をもっている。

- (2) 爆薬のガス比容  $V_0$ 、爆発温度  $T_1$ 、爆速  $D$ 、薬量  $L$  とするとき、パラメーター  $(V_0 T_1 D) \times L$  の値によってクレーター深さを整理すると、この実験の範囲では、爆薬の種類にかかわらず両者の関係 (Fig. 4) が得られた。
- (3) 裏面剝離 (スキヤッピング) の厚さと版厚との比を剝離率と名付けると、薬種および版厚が一定の場合、剝離率は薬量の増加につれて増大する。その例を示した。
- (4) スキヤッピングの発生機構を平面版の応力波伝播理論によって説明した。計算結果は実験とよく一致するが、内部には更に多くの、版面に平行なクラックがある。
- (5) 薄い空気層でも応力波遮断にはかなり効果が見られた。

〔注〕 砂粒の真比重を  $G$ 、砂の間隙率を  $n$  とすると、Suspension の平均密度  $\bar{\rho}$  は  $(1 - \frac{n}{100}) G$  となる<sup>22)</sup>。例えば  $G = 2.65$  とすると砂が比較的少く、 $n = 90\%$  の場合でも  $\rho = 2.265 \text{ g/cc}$  となる。これは空気密度の約 200 倍である。

#### 〔謝 辞〕

第一シリーズの実験では防衛大学校元教授浄法寺朝美先生の懇篤なご教示をいただいた。本論文の発表について種々御好意をいただいた警視庁科学検査研究所元所長萩原嘉光氏とともに筆者等の心からの感謝を申し上げる。第二、第三シリーズの実験では、防衛庁第 4 研究所築城研究室の諸官および田中秀明 2 空尉、菊川俊広 2 陸尉の絶大な協力があつた。あわせて厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) C. S. Whitney, B. G. Anderson and E. Cohen ; Design of Blast Resistant Construction for Atomic Explosions, J. ACI. March, 1955
- 2) N. M. Newmark; An Engineering Approach to Blast Resistant Design, Trans. ASCE, vol. 121, 1956
- 3) Sandia Laboratories; Full-Scale Tornado-Missile Impact Test, Electric Power Research Institute, July 1977
- 4) F. Sage, A. Pfeiffer; Response of Reinforced Concrete Targets to Impacting Soft Missiles, 5th SMIRT, J8/4, Belrin, 1979
- 5) S. Brunauer; Some Aspects of the Physics and Chemistry of Cement, in "The Science of Engineering Materials edited by J. E. Goldman", John Wiley & Sons, 1956, P. P. 428
- 6) W. チェルニン (徳根吉郎訳) セメント・コンクリート化学, 技報堂, 1969, P. P. 59
- 7) 原田有; 建築耐火構法, 工業調査会, 昭48, P. P. 23
- 8) I. N. Sheddon; Fourie Transforms, McGraw-Hill, P. P. 201
- 9) マルセル・ボル (弥永, 矢野訳); 万能数値表, 白水社, 1957, P. P. 578
- 10) 須藤秀治, 大久保正八郎, 田中一三; 火薬と発破, オーム社, 1971, P. P. 68
- 11) 須藤秀治, 福山郁生; 殉爆に関する研究(第3報), 工業火薬協会誌, 第13巻, 第4冊, P. P. 49, 1952
- 12) S. Kumar and N. Davis; Elastic-Plastic Analysis of scabbing in Materials, Jour. Franklin Inst., May 1958, P. P. 371
- 13) K. B. Broberg; Some Aspects of the Mechanism of Scabbing, Int. Sympo. on Stress wave Propagation in Materials, 1960, P. P. 229
- 14) J. S. Rinehart; The Role of Stress Wave in the Comminution of Brittle, Rocklike Materials, Do. of (3), P. P. 247
- 15) A. A. Oliner; Acoustic Surface Waves, Springer-Verlag, 1978
- 16) 竹田仁一, 田中秀明, 佐山光紀, 下田義文; コンクリートの衝撃破壊における衝撃速度の影響, セメント技術年報 34, 昭55, P. P. 261
- 17) 岡島遠雄; 2軸応力をうけるコンクリートの破壊ひずみ, 材料, 第22巻, 第232号, 昭48-1, P. P. 33
- 18) J. Takeda, H. Tachikawa; Deformation and Fracture of Concrete Subjected to Dynamic Load, Proc. of ICM-1, Kyoto, 1972, Vol. IV, P. P. 267
- 19) J. Takeda, H. Tachikawa, K. Fujimoto; Effect of Straining Rate on Deformation and Fracture of Reinforced Concrete Members, 6th World Conf. on Earthquake Engineering, India 1977-1
- 20) Norman Davids; Transient Analysis of Stress-Wave Penetration in Plates, Jour. of Applied Mechanics, December 1959, P. P. 651
- 21) 山上明; 爆発, 衝撃をうけるコンクリートの変形と破壊の研究, 防衛大学校理工学部卒業論文, 昭53-3
- 22) R. F. Scott; Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley Publ. Co. 1963
- 23) 竹田仁一; 防衛施設とコンクリート-コンクリートの耐爆, 耐衝撃性を中心として一, セメントコンクリート No. 406, Dec. 1980, P. P. 24
- 24) J. Takeda and H. Tachikawa; Deformation and Fracture of Concrete Subjected to Impact Load or Blast Shock, Third International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Vol. 3, of Proc. of ICM-3, Cambridge, 1979, P. P. 77

## Dimension of Fractures of Concrete Slabs Caused by Surface Blasting

by Kazumasa OKAZAKI\*, Jin-ichi TAKEDA\*, Kazuo FUJIMOTO\*\*,  
Akira YAMAGAMI\*\*\* and Ken TAKESHITA\*\*\*\*

It is fundamentally necessary to estimate the actual dimension of fractures of structures and structural members by explosion for blast-resisting design of structures, with which this study is concerned.

The explosion tests, consisted of three series, of concrete slabs and reinforced concrete slabs have been carried out for six years with four kinds of explosive, and obtained the data as presented here on the fracture dimensions, mainly on craters and scabbings, of the slabs.

The relation obtained from the tests between the depth of the crater and the weight of explosive exactly coincides with the result deduced from heat conduction theory of generated gas of explosives. The idea was procured by the observation of fragments scattered from or left at the crater of slabs in the tests, which were indicated that they had been almost dehydrated. The relation of dimension of craters generated by various kinds of explosive was also studied.

The ratio of the thickness of scabbing to the total thickness of slab (the thickness ratio of scabbing) was taken as a dimension parameter of scabbings in the explosion tests. The tests proved that the thickness ratio increased with the increment of the weight of a explosive in the tests conducted with a certain kind of explosive. The mechanism of scabbing occurrence was explained by the propagation of waves generated by an impact in the slab.

(\*National Defence Academy, 1-10 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa-ken, 239, Japan.

\*\*First Div., Fourth Research Center, T. R. D. I., Defence Agency.

\*\*\*M. R. D. D., Logistics Department, G. S. O., Defence Agency.

\*\*\*\*Second Div., First Research Center, T. R. D. I., Defence Agency.)

### ニュース

#### 事故情報—爆薬工場の爆発事故(概要報告)

1981年7月30日午前4時12分アメリカ・Utah州 GrantsvilleのMining Services International社の爆薬工場の混和・包装工室で平常作業中爆発が起り完成品8000lb(3630kg), 半製品20,000lb(9070kg)が爆発し, 鉄筋コンクリート造の工場が全壊した。

死者5名であった。

出典: 国際火薬類事故情報交換会  
IME No.789

(注: この報告は概要報告のため詳しくはなく, この他新聞情報は2~3あるが, 相互に内容が相違しているところがあるので引用しない)(衣山太郎)