

1. 緒言

近年、建造物の多様化にともなう水中構造物の建設も盛んに行なわれるようになり、海底面の整形を合理的に行なう必要性が生じてきている。このような場合の一つの方法として火薬を使用する方法があるが、合理的にかつ安全に行なえるよう考慮しなければならない。とくに、作業現場の近くに既設の構造物がある場合には発破による影響で損傷を受けることがあるので特別な配慮が必要である。すなわち、火薬類の爆発にともなう水中衝撃波や爆発生成ガスの膨縮による水流などにより、構造物が直接に圧力荷重を受ける場合や、地盤を伝わる振動により構造物が悪影響を受ける場合もあり、また両者の影響を同時に受ける場合もある。したがって、これらの影響がどの程度のものであるかをあらかじめ把握しておき、それぞれの現場に適した火薬類の量や発破方法を決定し、安全な施工計画を立てなければならない。そのためには、発破現場の近傍にある単純な構造物が水中発破により、どのような挙動を示すかという基礎的な研究も重要な意味をもつものと思われる。

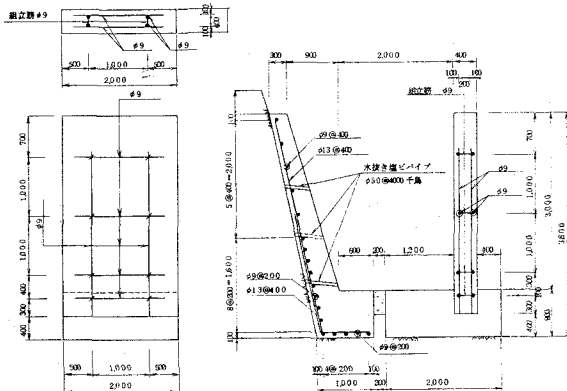
そこで、1972年に本州四国連絡橋公団の委託で社団法人土木工業協会が愛媛県大三島で行なった水中発破の影響調査実験の結果に関し、水中発破にともなう水中構造物の挙動について二、三の考察を述べる。

一方、最近著しい発展をとげている電子計算機を利用したシミュレーションにより、これらの構造物が受ける影響やその挙動について、あらかじめ知ることができれば非常に有効であると思われるので、差分表示の波動方程式を逐次計算法により解くシミュレーションプログラムを試作し、上記の実験をモデルとしたシミュレーションの結果と、実験結果とを対比した。

2. 実験概要とその結果(無筋コンクリートウォールに対する影響調査実験)

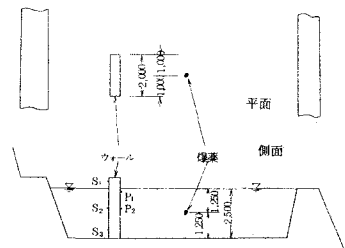
2.1 実験条件

実験に供したコンクリートウォールはオ1図に示す形状のものであり、底部を固定端とする片持ばりとみなすことができる。この供試体をオ2図に示すように、水深2.5m、長さ約50m、巾約70mの水槽の中に設置し、その前面2~5mのところに爆薬を水中に吊し爆発させた。爆薬には海底発破用に開発されたGX-1ダイナマイトを使用し、ウォール前面に入射する衝撃圧を調整するため薬量を25~500gとした。オ1表にこれらの実験条件とともに、ウォールに入射する衝撃圧のピーク値をKirkwood-Brinkleyの実験式を用いて求めた値が示されている(KB圧)。すなわち、爆薬量 W kgと爆薬からの距離 r mと衝撃圧のピーク圧 p kg/cm²との関係は一般につきの式



オ1図 供試体の概要

た値が示されている(KB圧)。すなわち、爆薬量 W kgと爆薬からの距離 r mと衝撃圧のピーク圧 p kg/cm²との関係は一般につきの式



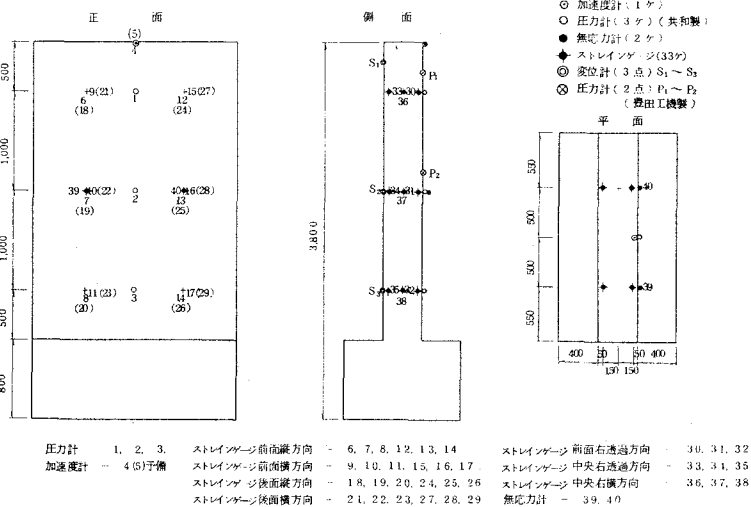
オ2図 実験現場の概要

で表わすことができる。

$$p = K \left(\frac{W}{r} \right)^n \dots (1)$$

ただし、 K および n は爆薬の種類によって異なる定数であり、 $GX-1$ の場合は $K=537$ 、 $n=1.13$ である。

ウォールの影響の計測量は、ウォール前面での圧力、ウォールに垂直な方向の変位(たわみ)およびコンクリート内部のひずみであり、それぞれの測点はオ3図に示されている。



オ3図 各種計測点の配置図

2.2 実験結果

a) ウォール前面の圧力

ウォールに加わる衝撃圧の測定には、小型圧力変換器(豊田工機製)および圧力変換器(共和電業製)を用いた。前者の圧力計によって得られたピーク値がオ1表の“実測圧力最高値”の欄に示されている。この値と前述の KB 圧の値との比は約1.2~1.8という結果になっている。これは、異なる媒質の境界面を通過する応力波の挙動が如実に現われているものと思われる。すなわち、媒質1から媒質2へ応力波が入射する場合、 p_i を入射波の圧力、 p_r を透過波の圧力、 p_A を境界面での圧力とし、 R_1 、 R_2 をそれぞれ媒質1、媒質2の音響インピーダンスとすればつぎの関係式が成立する。

$$p_A = p_i + p_r = \{2R_2 / (R_1 + R_2)\} p_i \dots (2)$$

ここで、媒質1を水とすれば R_1 は約1,500、媒質2をコンクリートとすれば R_2 は約10,000となり(2)式より、 $p_A = 1.74 p_i$ となる。したがって、水中衝撃波の場合も(2)式がほぼ満足されるものと考えてよいものと思われる。

オ1表 実験条件および測定結果一覧表

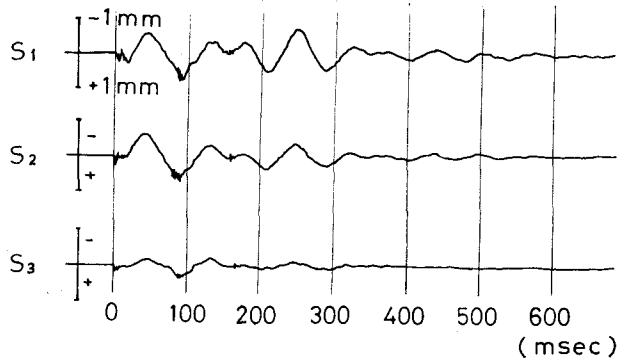
実験条件				実測圧力最高値		KB 圧との比	変位測点	衝撃波による変位 δ (mm)	水流による変位 σ	
番 号	薬 量(g)	距 離(m)	KB 圧(kg/cm ²)		(kg/cm ²)				+(mm)	-(mm)
7-17-1	25	5	2.2	P_1	3.6.1	1.6.4	S_1	0.08	0.20	0.24
				P_2	—		S_2	0.06	0.08	0.12
				S_3	—		S_3	—	—	—
7-17-2	50	4	3.6	P_1	—	—	S_1	0.25	0.40	0.63
				P_2	—		S_2	0.16	0.22	0.35
				S_3	—		S_3	0.10	0.10	0.15
7-18-1	25	5	2.2	P_1	3.6.2	1.6.5	S_1	0.15	0.20	0.28
				P_2	3.8.8		S_2	0.12	0.17	0.20
				S_3	—		S_3	0.07	0.05	0.06
7-18-2	25	3	3.7.7	P_1	—	—	S_1	0.25	0.65	0.70
				P_2	—		S_2	0.15	0.60	0.60
				S_3	—		S_3	0.10	0.25	0.21
7-18-3	50	2	7.9.4	P_1	1.0.2	1.2.8	S_1	0.75	1.28	1.44
				P_2	1.0.8		S_2	0.50	1.28	0.96
				S_3	—		S_3	0.32	0.96	0.48
7-18-4	500	2	18.9	P_1	3.0.1	1.5.9	S_1	1.0.0	>2	>2
				P_2	—		S_2	—	>2	>2
				S_3	—		S_3	—	>2	>2

b) ウォールのたわみ

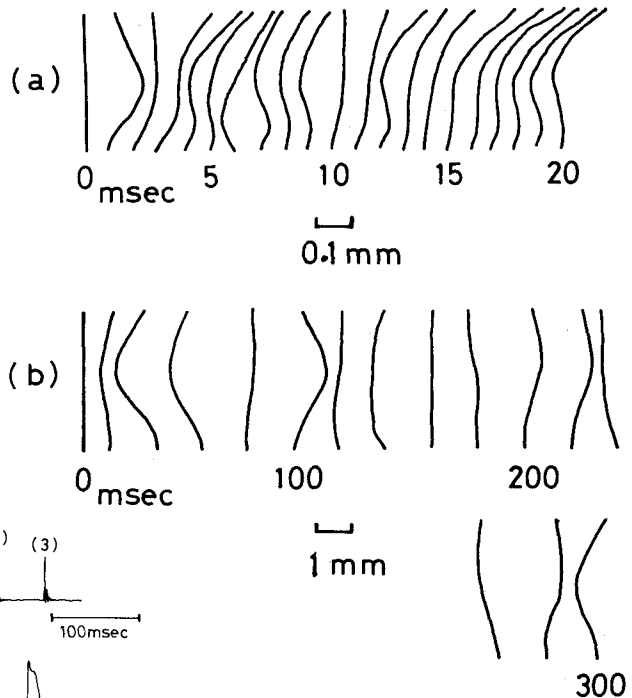
ウォールのたわみの時間的な変化状態を知るために、可動コイル型変位速度計 (Geospace 製…共振周波数・10 Hz) をオ2図に示した S_1, S_2, S_3 の位置に設置し、出力を積分回路に通して変位波形を得られるようになっている。この変位波形の一例をオ4図に示し、この図からウォールのたわみの時間的な変化を推測した結果がオ5図に示されている。

さて、オ4図から変位波形は15 Hz 前後の低周波の振動に高周波の振動が60～80 msecの interval で断続的に重なっていることがわかる。これは、爆発にともなう衝撃波の入射により最初の高周波振動が発生し、同時に水流による影響でウォールの固有振動と思われる振動が誘起され、その後、以下に述べる考察から、爆発生成ガスの膨張現象により発生する衝撃波により高周波が重畳したものと推定される。

すなわち、爆発の爆発によって生じる水流の挙動を把握する試みで、オ6図に示すような加速度計 (共和電業製) を利用した水流計を試作して、爆発源と同じ水深の爆発源から1～5 m はなれたところに糸で吊し水流の加速度波形を求めようとした。オ7図にその結果の一例を示すが、この加速度波形が水流の加速度のみを表わしているかどうかの疑わしく、衝撃波の影響が卓越しているものと思われる。この図の最上段の波形が爆発後のすべての波形であり、3つのピークをそれぞれ時間軸を拡大して記録した波形が下段の3つの波形である。

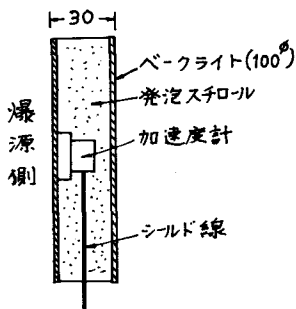


オ4図 変位波形 (7-18-2 の実験)

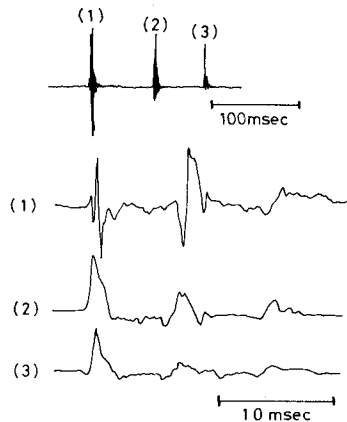


オ5図 ウォールのたわみ

- (a) 衝撃波がウォールに入射してから 20 msec まで
- (b) 衝撃波がウォールに入射してから 300 msec まで

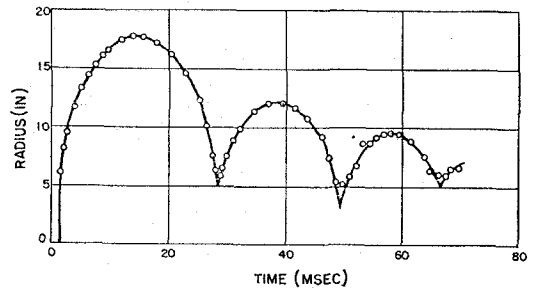


オ6図 試作した水流計
の断面図



オ7図 水流計の記録の一例

オク図において(1)の波形は(2),(3)の波形に比べて急峻なピークが現われており爆発の衝撃波によるものと考えられ、(2),(3)のピークはオク図に示すように爆発生成ガスの膨張により発生する衝撃波によるものと考えられる。なお、(1),(2),(3)の波形ともに、左端のピークから約10 msec後毎に現われているピークは水槽の壁面などでの反射波によるものである。オク図は爆発生成ガスの半径の時間的变化を示したものであるが、ガス球が一度膨張し再び収縮して、更に再膨張を開始する時(たとえばオク図において約28 msec, 50 msec, 66 msecなど)に水中に衝撃波が投射されるものと考えられている。この周期は爆薬の薬量、薬種や水深によって変化するものであり、オク図に示す波形など明らかに薬量と周期の関係を表わす関係式を導き出していることが確かめられている。以上の考察によってオク図に表われている高周波波形の説明がつく。

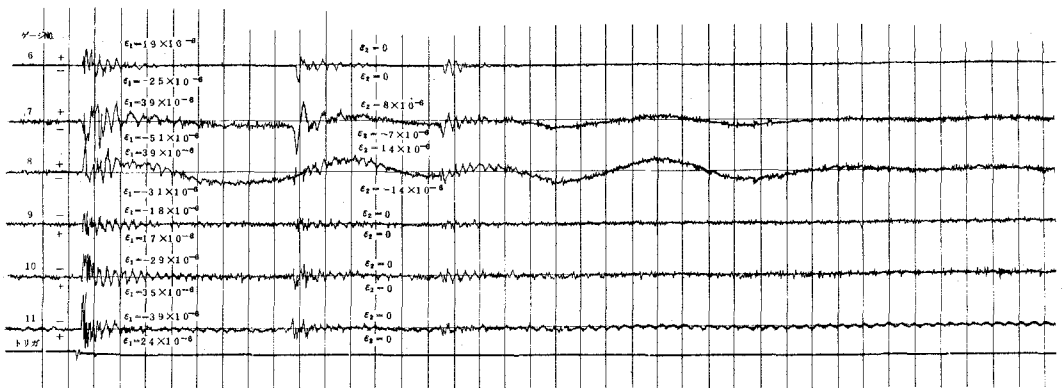


オク図 爆発生成ガスの半径の変化 (Cole によ)

各実験についてウォールの最頂部のたわみの最大値がオク表に示されている。同表において衝撃波による変位 δ_1 はオク図の例に示すように高周波の振動の最大値を、また、水流による変位 δ_2 は低周波の振動の最大値を示している。なお、変位(たわみ)は爆源から遠ざかる方向への変位を正の値とし、爆源に近づく方向の変位を負の値としている。この表によれば、爆源に近づく方向への変位の方が、遠ざかる方向への変位よりわずかながら大きいことがわかる。このことは、実験番号7-18-4の実験でウォールが爆源側に倒れて破壊した現象の裏づけとなるものと思われるが、この原因が空中の場合のように衝撃波の直後に追従する負圧の波動によるものであるかどうかは現状でははっきりしない。

シ) ウォール内部のひずみ

オク図に示すように直径9mmの鉄棒にストレインゲージ(共和電業製)を貼りつけ、コンクリート中に埋め込みウォール内部のひずみの時間的变化状態を測定した。なお、測点はオク図に示すとおりである。オク図は、これらの記録の一例であるが、これらのひずみ波形についても前項b)で述べた事象を裏付けているものと考えられる。すなわち、ゲージNO. 6, 7, 8 はウォールを片持ばりとしみなした時の軸方向のひずみの記録であり、固定端付近、中央部、自由端付近のひずみとそれぞれ表わしている。したがってウォールの固有振動に衝撃波による高周波振動が加わっていることは、きり判かる。



オク図 ひずみ計の記録の一例 (7-18-2の実験): タイムマーは 10 msec

3. 実験結果のまとめ

前節では、無筋コンクリートウォールの実験について述べたが、この他に鉄筋コンクリートウォールや鋼管ウォールの実験、またコンクリートケーソンや鋼管ケーソン内での水中発破による影響調査において同様の計測が行われた。これらの実験結果も加味してまとめると以下のようになる。

i) 水中衝撃波のコンクリートウォールに作用する圧力の最高値は入射する衝撃波の最高圧力値のほぼ1.7倍となる。

ii) 水中発破によって水中へ投射される波動は爆発衝撃に起因する水中衝撃波と爆発生成ガスの膨縮に起因する波動にわけられる。

iii) 水面下 1.25m の位置で GX-1 ダイナマイトを起爆した場合に生成する爆発生成ガスの膨縮周期は薬量が 25g の場合ほぼ 0.08 秒、50g の場合ほぼ 0.1 秒、100g の場合ほぼ 0.13 秒、500g の場合ほぼ 0.21 秒であって、薬量の3乗根に比例している。

iv) 水中爆発に起因するウォールの変位は水中衝撃波による周波数の高い急峻な変位と、水流の衝突および地盤振動に起因すると考えられる 10~30 Hz のゆるやかな変位とにより合成されたものであり、ゆるやかな周期の振動はウォールの頂部、中央部、底部の位置での波形の位相がほぼ一致していることからモードの低い固有振動であると思われる。

v) 水中衝撃波による周波数の高い急峻な変位波形は、ウォールの頂部、中央部、底部の位置で位相がずれている場合が多い。したがって、この時にはウォール内部に大きな応力が発生しているものと考えられる。

vi) ウォールが破壊する場合には、いずれの場合にも爆源側に傾斜していたが、これは変位記録波形にも現れている爆源側への大きな変位を生じさせている外力に起因しているものと考えられる。

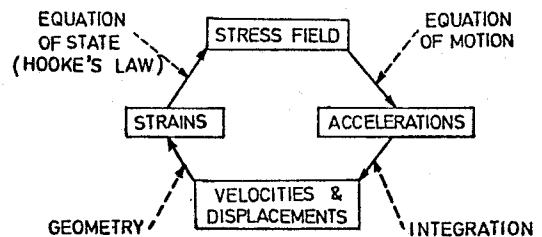
以上に一連の実験結果を要約して示したが、水中衝撃波によってウォール内に発生する応力は作用する圧力の最高値のみならず爆源からの距離の大小によっても異なる。すなわち、たとえ作用する圧力最高値が同じであっても、爆源からの距離が近い場合には遠い場合より大きな引張応力が発生する。さらに爆発生成ガスの膨縮に起因する衝撃波は爆発に起因する衝撃波の減衰状態と異なっている事などを考えれば、水中構造物に及ぼす影響を調べる場合には、構造物へ入射する水中衝撃波の圧力最高値のみならず、爆源からの距離についても充分検討しなければならない。

4. 電算機によるシミュレーション

4.1 計算方法の概観

一般に、動的荷重を受ける物体の挙動は波動方程式で表わされるが、これは主に運動方程式と状態方程式から導かれる。このことを利用して以下に述べる方法で物体の挙動を計算することができる。すなわち、 σ 10 図に示すように物体のある時刻の応力状態から運動方程式を用いて粒子の変位加速度が求められる。さらに加速度を時間積分することによって新しい時刻の変位が求まり、この変位から幾何学的にひずみが得られる。さらに、このひずみから状態方程式を用いて応力状態が求まる。この応力状態は前の応力状態の時刻より積分時間だけ進んだ時刻のものである。

したがって、このサイクルを繰り返して計算することにより経過時間のそれぞれの時刻における物体の挙動を把握することができる。なお、くわしい数式については省略するが、格子状に分割して、ラグランジュ座標を用いたモデルを設定



σ 10 図 計算手順の概念図

し、この格子に因する差分表示式を用いて計算するものである。

4.2 計算例

オ11図は無筋コンクリートウォールの場合のモデルを示したものであり、斜線を施した部分がウォールである。

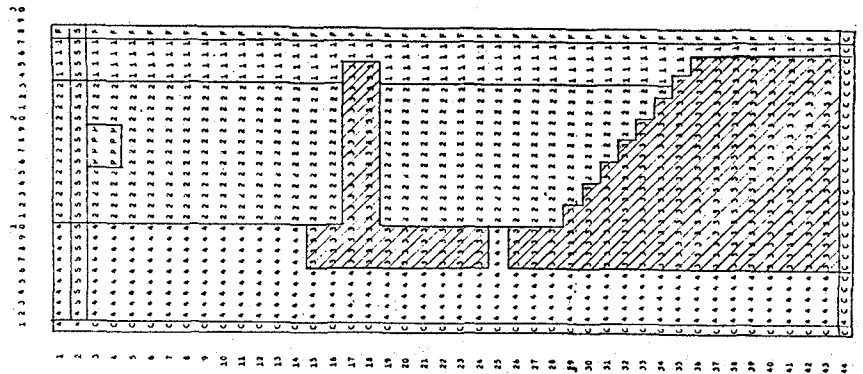
このモデルについて行なったシミュレーションの結果の一例をオ12図に示す。この図

は各時刻におけるウォール付近の地盤とウォールの変位を拡大して表示したものであり、地盤の振動もウォールにかなりの影響を与えていることがわかる。なお、図に記入してある時刻は爆薬が爆発してから時刻であり、ウォールと爆薬の距離が約3mで衝撃波の水中の伝ばり時間を2msecであることを考慮してオ5図(数字は衝撃波がウォールに到達してから時間)と比較すればよく似た傾向を示していることがわかる。

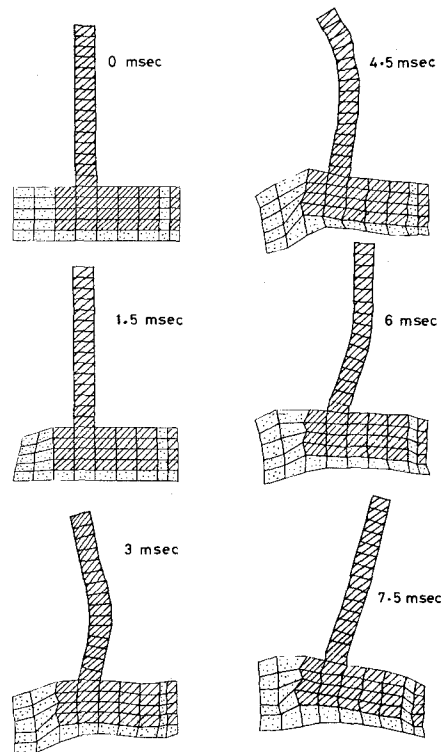
5. 結 言

実際の工事で用いられる発破は穿孔発破やはりつけ発破などが普通で、ここで述べたように水中で爆発させることはまれであるが、水中発破による影響の把握に関する基礎的な研究としては有意義であったと思われる。また、爆発に起因する衝撃波に

よって構造物に与えられる影響(ひすみづたみなど)と同じ影響を与えうる等価な静的荷重を見いだすべく努めたが、衝撃圧そのものと厳密にとらえることが困難であること、対象となる構造物の種類(形状、寸法、材質など)の違いにより荷重状態が異なることなどの理由により、衝撃圧の静的荷重の一般的な等値法則を明確にすることは现阶段では不適当であると考えた。したがって、今後衝撃圧の厳密な計画あるいは計算および4節で述べたような構造物の動的挙動のシミュレーションがもっと厳密に行なうことが可能となれば、これらの関係も体系づけられ、安全でかつ合理的な爆破作業の施工計画を立てることができるものと思われる。最近の計測技術や電算機技術の目ざましい発展の速度をみれば、その実現もよほどに遠い将来のことではないものと考えている。



オ11図 無筋コンクリートウォール実験のシミュレーションモデル



オ12図 シミュレーション結果の一例(時刻は爆発後の時刻を表す)