

## 第 6 章

H P 『海軍砲術學校』公開資料

## 第6章 地表面及び地表面下爆発の衝撃効果

### 第1節 地表面及び地中（浅い）爆発の特性

#### 序　　言

**6.01** 地表面、又は地中（浅い）かは火の玉又は高温・高圧のガスの位置により決定される。また、この型の爆発は地表面における爆発作用あるいは破裂により引き起こされるものである。この型の爆発においては、放出エネルギーの一部は表面の噴火口を形成するために使用されるが、さらに深い位置での爆発の場合においてはエネルギーの一部は空気の振動に消費される。

噴火口の大きさは、当初爆発位置の深さが増すにつれて増大するがある深さに達すると最大となり、それを過ぎると次第に減少して最後にはゼロとなり噴火口を形成しなくなる。

#### 爆　　風

**6.02** 地表面爆発において、その爆風波と衝撃波は図-3.34に示したような半球状の衝撃波面をつくる。1 K Tで地表面爆発の場合の爆風波の特徴は第3章の終りで示した曲線により示される。そこに述べた立方根換算法則は、通常特殊のエネルギーを生じる地表面爆発の爆風波の性質を計算するのに利用できる。

爆発が地下で起こった場合、爆風は表面から空中に伝わる衝撃により起こり又、爆発によって生ずる高圧ガスにより生ずる。地下の浅い所の爆発では後者の効果が強く支配するが、これは爆発地点の深さが増すにつれて、爆風に対する影響は逆に小さくなる。さらに、爆発の深さが深くなるにつれて地表に近い部分の高い過圧は、離れている地点での低い過圧よりも急速に減少する。地下の深い爆発によって生じる爆風、及びその効果、並びに過圧の配分に関する爆発の深さについてさらに詳しい内容を § 6.80 に示した。

## 爆破口

**6.03** 爆破口形成のメカニズムは爆発高度、又は、深度によって変ってくる。地表から遠く離れていても、火の玉が大地と交わるように爆発している（§ 6.08）場合には、相当量の土壤物質の蒸発が起こる上昇気流のため上方へ吸い上げられるが、最終的にはフォールアウトとなって落下する（第9章）。地表面、又はその近傍（上方又は下方）における爆風の場合には、蒸発のほか、爆風が爆破口形成の成因になる。そのため、土壤表面物質は押し出され、吹き飛ばされるようにして除去される。この物質の一部は爆破口にもどされるが、他の大部分は爆破口周縁部に堆積して爆破口の外周部（lip）を形成するか、又は自由な噴出物として爆破口の外側に散乱する。

**6.04** 地表面における蒸発と、爆風をあまり考慮しなくともよい深さにおける爆発の場合には、他の異なった方法により突き出た爆破口（A “throwout” crater）が形成されることがある。その一つは膨張する圧力（衝撃）波によって生じる地面・物質の圧潰（crushing）や割れ目である。他の重要なメカニズムに破碎（Spalling）、すなわち地表面の地層（earth layers）の分離がある（§ 2.91）。破碎された層が吹上げられ、爆破口の外側又は爆破口の外周部に堆積するか、又は相当深部にある埋没層（burials）の場合には、爆破口の中にもどってくる。爆発によって生じた高温・高圧のガスが、圧潰や破碎の段階で排出されないならば、膨張ガスは閉じ込めようとする土地に対し上向に力を働かすかもしれない。そうすればガス圧による加速が§ 2.92に述べたように爆破口の形成に寄与することもある。

**6.05** 最後に、深部埋設爆発の場合には、陥没した爆破口になるか、爆発箇所の上部に盛り上がった小山ができるか、地表面において変化が全然起こらないかのいずれかになる。破壊、又は押しつぶされた物質を含むさけ目の崩壊が地表面に達するならば、陥没した爆破口が形成されることがある（§ 2.103）。硬い岩石のような強い土地・物質にあっては、さけ目の上部は地表に達することはないであろう。従って、地表面の変化は単に一時的なものにすぎないであろう。

破壊した岩石がふくれあがってきたならば、さけ目上方の地表面上に小山が形成されることがある（図-6.05）。



図-6.05 実験S U L K Yでの現象：0.087K Tの90フィート地下核爆発における岩盤が盛上った爆破口

**6.06** 爆発深度（DOB）の増加など、爆破口形成の主要なメカニズムの変化に基づく爆破口の種々の特性は、図-6.06 a～図-6.06 f に示してある。図-6.06 a のくぼんだ爆破口は、主として蒸発により形成されるから除去された物質の大部分はなくなってしまう。地表面（又は近地表面）、爆発の場合には、図-6.06 b に示すように、爆風の吹き飛ばし作用等は爆破口の形成に寄与し、除去された物質の一部は爆破口、又はその近くに堆積する。深度が大になると（図-6.06 c ）破碎とガス圧による加速が極めて重要になり、爆破口の規模が大きくなる。ガス圧による加速が主な形成メカニズムであるとき、爆破口の大きさは最大になり、そのときにも大量の物質の降着はある（図-6.06 d ）。図-6.06 e 及び図-6.06 f は、深度が大きくなった地下爆発の場合の陥没の例である。

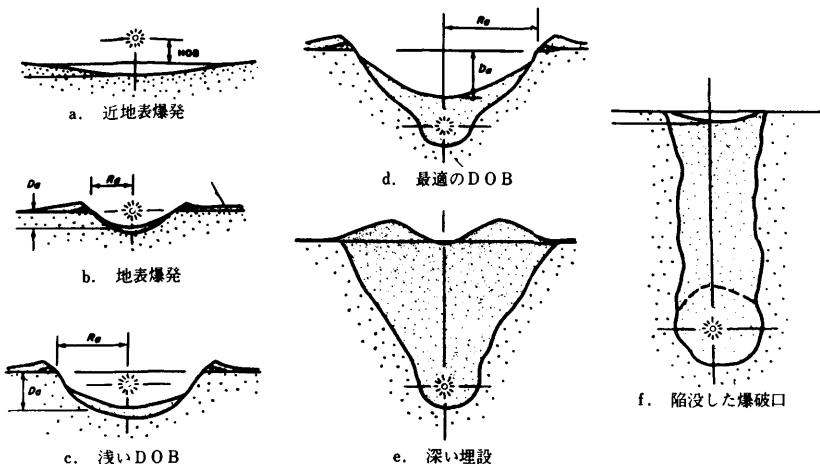


図-6.06 各種の爆発深度による爆破口の生成規模や形状の比較  
RaとDaは概略の半径と深さを表わす(図-6.70参照)

**6.07** 爆破口の周囲の土地は、多少特徴的な二つの圏に区分することができる(図-6.70)。第一の圏は、応力によって各種サイズの無数の放射状の亀裂が生じている“亀裂圏”である。亀裂圏の外側が“可塑圏”で、土壤は永久変形をし、高密度に圧縮されても目に見える亀裂が無い程度まで応力の大きさが下がった区域である。爆破口外縁部の土壤の可塑的な変形やひずみは、爆破口外周部の生成に寄与する。亀裂圏と可塑圏の厚さは爆発の出力と爆心の位置のほか、土壤の性格によって変る。爆心下部が岩石ならば亀裂圏のみで可塑圏はほとんどない。

### 爆破口の大きさ

**6.08** 地表面の上方での爆発の場合には、蒸発(くぼみ)爆破口の形成は爆発高度が火の玉の最大半径の約 $\frac{1}{3}$ 以下の場合に始まる(§ 2.127)。地表面からの距離が減少するにつれ爆破口の大きさは、特に地表面に近づくほど複雑に変化する。これは爆破口形成のメカニズムの変化によるものである。しかしながら、一般にはくぼみの深度は爆心高度が減少するにつれ急速に増加し、深度と半径の比も増加する。爆破口の大きさは、爆発出力に比例して増加するが、それ以上に土壤の性質

によって変化する。

**6.09** 地表面に接した爆発では、概略、爆破口の大きさを知ることができる。地表面での出力 1 KT の核爆発における乾燥土壌、又は乾燥した柔らかい岩石での見かけ上の爆破口半径は、約 60 フィート又はそれ以上である。見かけ上の爆破口の深さは約 30 フィートと見積られる。花こう岩や砂岩からなる堅い岩石では、その大きさはいくらか小さくなる。水がたくさん含まれた土では、半径はかなり大きくなり、また、爆発初期の深さ (Initial depth) も深くなりこれは建造物に与える被害と関係する。しかしながら最終的な深さ (Final depth) は、水力学の作用、すなわち湿った物質の爆破口への落込みや水の浸出による土砂の流入によって浅くなる。出力 WKT の地表面爆発により生成される全ての爆破口の大きさは、前に示した 1 KT の諸元  $\times W^{0.3}$  におおむね比例している。例えば、乾燥した土における 100 KT の地表面爆発では、爆破口半径はおおむね  $60 \times 100^{0.3} = 240$  フィート、深さは、 $30 \times 100^{0.3} = 120$  フィートと見積ることができる。爆破口に関するこれ以上の内容は、§ 6.72 に示してある。

**6.10** 地下爆発の深さが深くなると、爆破口半径の深さはその極大値に達するまでは増加し、それより更に深くなると爆破口は小さくなる。与えられた出力に対する半径や深さの最大値は、最適条件値 (Optimum) と言う言葉で表わされる (図-6.06 d)。そして、最適条件値の爆破口半径や深さと爆発深度とはおおむね等しい。最適爆発深度で形成された爆破口の写真が図-6.10 に示されている。1 KT の場合、最も深い爆破口の深さは 100 フィートで、その時の爆発深度は比例する。種々の条件下での爆発深度に対する爆破口の半径や深さの図は後の章に記述してある (§ 6.70)。

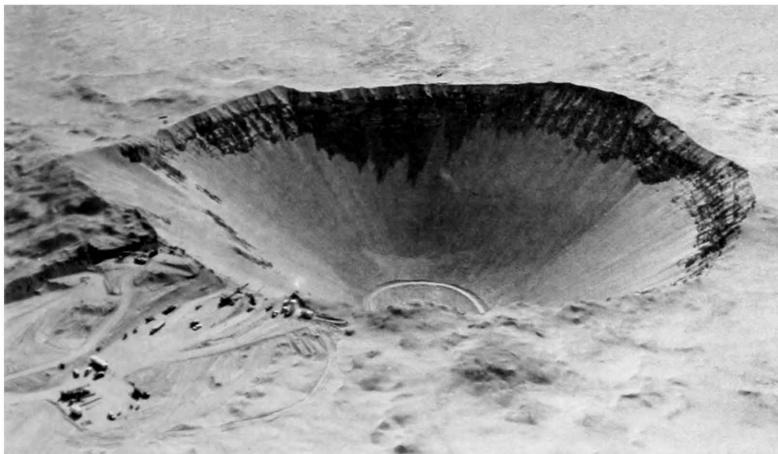


図-6.10 S E D A N事象：沖積土層に爆破口を掘るため鉛直に深さ635フィートの深さで100KTの爆発が行われた。生じた爆破口は半径611フィート、深さ323フィート、容積179百万立方フィートであった。

6.11 爆発の後、堆積した土壤が水を含んだり、爆破口に水がたまつたりすると爆破口の大きさは時間とともに変化する。この場合、安定な状態になるまで爆破口はくずれていく。非常に大きな爆破口の場合、そのくずれは傾斜角が10~15°になるまで続く。その結果、爆破口は浅く広くなる。水床が近くにあり、わずかに水分が含まれている土壤の場合、そのくずれは徐々におこる。もし、土壤が堅固で水床があまりなくくずれる場合で、砂質の場合は数時間、粘度質の場合は数カ月の時間的ずれがある。“Eniwetok Proving Grounds”におけるさんごしょうでの高出力の核実験結果では、水が爆破口に押しよせ通常形成される“リップ”は爆破口の底に押し流された。

### 大地衝撃波

6.12 地表面又は、地表面近くでの核爆発は、二つの主要な方法で衝撃波を生みだす。それらは、(1)爆破口の近くで大地に直接、爆発エネルギーを伝える方法と、(2)爆風波によるものである。また、これらの衝撃波によって生じる地震に、無作為なゆれが加わるが、この項目については衝撃波についてのみ考慮している。衝

撃波は、地球の下向及び外側に伝播する。また、衝撃波は爆破口、割れ目及びプラスチック層を作る原因となる。爆風波は、“airslap”と呼ばれ、爆発地点があまり深くない場合、爆破口地域に対するよりも地下構築物に対する圧力の原因となる。

**6.13** 地球に伝わる衝撃波は、非常に複雑で地質の不均質によってゆがめられるが、ときとして、規則性を見いだすことができる。たとえば、air slap は通常下向に單一の動きを起こさせ、次いで局部的なゆるみをもって上向に動きを起こさせる。すなわち、土壤中における air slap 後の永久的な圧迫を計測しうるほどけんちょである。地震の大きさは、爆風過圧・正の持続時間・土壤の性質によって左右される。地表面近くでは、air slap 地震は衝撃波における圧力の立上がりと同様に、初期では急激であるが深くなるにつれてゆるやかになる。

**6.14** 地表面にて、衝撃波の前面が地震波の前方である状態を “super seismic” と呼んでいる。すなわち、衝撃波が音（又は地震の速度）より速い速度で伝達するからである。地表面近くの地震は垂直に下向に起こるが、次第に外側へ、すなわち、放射状に伝わる。

**6.15** 一方、爆風面が、地面を直接伝達してくる衝撃面の後方にある場合には、その地震波は、“out run” と呼ばれる。その時、“air slap” はその前方にある地表面に特徴ある超過運動を起こさせる。それは、2～3周期の弱い振動からなっており、通常、上方への動きによってうねりを生じさせている。爆風過圧は、爆心地からの距離の増加とともに減少するので衝撃波に追越される。地表面の動きが遅れている場合に、もし、爆風波が観測点に到達したならば、“air slap”的動きがその振動に加えられるであろう。

**6.16** 爆発点に近いところでは、爆風は一般に直接地震より速く伝達する。その時 “super seismic” の条件が整う。そして、最初の地震が “air slap” によって根本的に限定される。離れた距離では、爆風は弱くその速度は減少する。しかし、地中衝撃波は地震速度とほぼ同等であるのでそれほど減少はしない。したがって、地中衝撃面は前方を動き、そして “out running” が地震の支配的要因となる。さ

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注:(1) 異常現象や深い(十分に奥に入れた)地中爆発は核の試験にとっては初步的な関心事である。非技術的な討議の細部については“公衆安全と地中核爆発”アメリカ合衆国エネルギー委員会編1971年6月TID-25708を参照のこと。

らに、爆心地から離れたところでは、“air slap”的効果が消滅し、そして、それが非常に弱いので“out running”な動きなしに直接地中衝撃と合併する。上記の現象は、かなりの深さの地中での地震速度によって強く影響される。

**6.17** 地中の衝撃波の強さは、爆発からの距離の増加につれて減少する。そしてかなり離れたところでは、地震波と同じになる。この地域では、核爆発によって作られる地中衝撃波の影響は、低強度の地震のそれと多少似ている。しかしながら、地下爆発が地震を起こさないということを示す証拠が、爆発地点の数マイル以内における低い後衝撃にでている(§6.20参照)。

**6.18** 地下構築物に対する地中衝撃圧の影響は、地上の構築物に対する爆風の影響と多少異なる。後者の場合、第4章で記述したように、構築物は、突風のようなものを受け、そして、爆風による力によって倒されてしまう。これは、地下衝撃波とは関係がない。地中の衝撃波が伝播する媒質の密度と地下構築物の密度が同様であるために、土地の構築物の“response”が緊密に関連している。いいかえれば、衝撃波による地下構築物の動きは、土地そのものの動きとそれにともなう活動によって決定される。このことは、地表面と地下爆発の両方に関連する構築物の損害に重要な影響をもっている。損害の基準は、§6.28に概略のべてある。また、§6.90に詳しく述べてある。

## 第2節 地中(深い)地下爆発<sup>(1)</sup>

### 地 震

**6.19** 十分に深い地下爆発では、爆風は、ほとんど発生せず、また発生しても小さいものである。大部分のエネルギーは、爆発地点の周囲に空どうを作ったり、岩を溶融するのに使われる。残りのエネルギーは、地震波の形で現われる。この衝撃波は、外方に向かって移動する際、先ず最初に岩を碎き、かつ圧縮された地帯を作り、そして爆破口形成とともに破壊地帯を作る。この地帯の外側に進むにつれて衝撃波はさらに弱まり、永久的にわい曲したプラスチック地帯を構成する。

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注：(2) 地質学上の“断層”は隣接の岩の表面が相關して移動した地表の裂け目をいう。断層の存在は、時々、地表面の断層線によって合るが隠された断層はこの方法では発見できない。

最初に、爆発地点からかなり離れたところに達する衝撃波は、（爆発エネルギーの5%以下）一連の地震波の先導波となる。地震波は、土地の一時的な変位、あるいは、動搖を生起させる。すなわち、変位に引き続く元の位置への回復は、一般に典型的な地震と同様で、上下前後への振動と波動をともなう一連の運動の後、達成される。

## 余震及び断層移動

6.20 深い地中爆発にともなって起こる余震の多くは、爆発後の空洞の陥没、裂け目の発達等の特異現象に直接関連して生じる（§ 2.103）。しかしながら、余震のあるものは裂け目でできた地域を越えて、数マイル離れたところにも生じる。これらの余震は、一般に存在する平面断層(2)に沿う小さな移動及び自然のひずみ・変形・エネルギーの解放に起因するものと考えられる。

高エネルギー出力の爆発による余震は、徐々に衰えるとしても続くであろうし、そのため相当の日を経て、裂け目が形成される。

6.21 第1回の1メガトンの“BENHAM試験”が1968年の12月19日ネバダの試験場において4,600フィートの深さの凝灰岩（§ 2.104）の中で行われた。爆発後6週間、この爆発地点の約8マイル以内において、10,000回に及ぶ弱い余震が感知された。この余震のうち640回の余震が詳細な研究のため選定され、そしてその位置は、図-6.21に小さな×印で示されている。薄い線は既知の場所を示し、そして太い線は、断層の移動が地表面で観察する概略の位置を示す。既知の断層の一般方向である南北の線に沿って、極めて多くの余震が発生したことがわかる。これ等余震の多くは、多分隠された断層に沿い、又は、断層に平行した他の地質上の不連続によって起こされたものである。

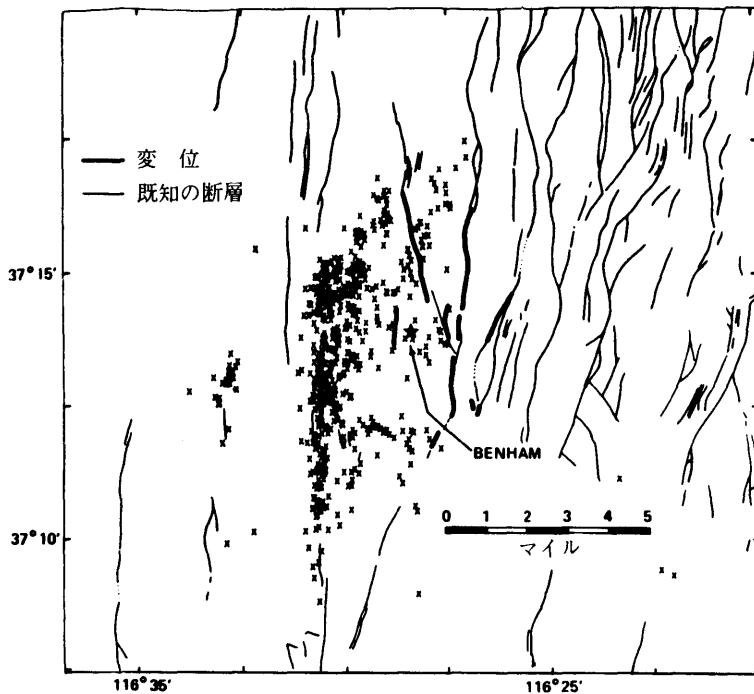


図-6.21 1.1M T出力のBENHAM実験のショック後に生じた  
640箇所の断層の変位

6.22 図-6.21に見られるように、BENHAM爆発の近傍における大地のずれの最大のものは、断層の線に沿ってか、又は、すでにある断層の近辺で起こっている。爆発地点から1.5マイル～2.5マイル北の位置における最大の垂直方向のずれは1.5フィートである。比較的大きなずれは、まま起こるけれど、しかし、断層線に沿い、あるいは断層線の近傍で起こる地表面の垂直のずれは、1フィート以下である。これらのずれは、不連続であるとしても数マイルにわたり広がっている。同一（あるいは類似の）条件において、ずれの直線的な広がりは、おおむね、爆発の出力に比例する。

6.23 ネバダ実験場における観察の結果から概略の指數法則が求められた。この法則によれば、断層線に沿ったずれの地表面ゼロからの距離（フィート）は、TNT換算のKTで表わされるエネルギーの3乗根の約1,000倍より少ない。従つ

て、1 M T (1,000 K T) の爆発において、それは断層線が概略 $1,000 \times (1,000)^{\frac{1}{3}} = 1,000 \times 10 = 1,000$  フィート (約 2 哩) 以内の場合のみ期待できる。1 M T の地中爆発地点から 2 哩以上に存在する断層線は、恐らく影響を与えないであろう。しかしながら、もし爆発点より 2 哩以内に断層線の一部が存在するならば、実際のそれは、より遠距離において断層線に沿って観察できるであろう。

## 地下爆発と地震

**6.24** 深いところでの高エネルギーの地下核爆発が自然界に起きる地震を刺激すると懸念されていたが、そのようなケースはなかった。余震もしくは地震のハイポセンター “hypocenter” あるいは震源 “focus” 運動すなわち、断層での地滑りの地表面下であり、これは、発生する揺れを観測するということによるものである。中心の深度、すなわち、ネバダで行われた深いところの地下爆発テストの中心の深度、つまり、地表面以下のハイポセンターの深度は大体ゼロ～4 マイルの距離で、その大半は 0.6～3 マイルの間である。しかし、同様の地域における自然に起きる地震はかなり大きな中心深度を有する。これにより、核爆発が自然の地震と同一であると規定できないであろう。

**6.25** ネバダ付近の周囲 535 マイルに起きる地震を統計的に研究するため地下爆発の可能効果を測定した。先の 1961 年 9 月 15 日では、104 時間に実施されたが、この時ネバダ地区で一連の地下爆発テストが行われ、そこで 620 回の地震が記録された。1968 年 11 月 19 日、つまり高出力の BENHAM シリーズの頃で、235 回の地下爆発テストが行われ、104 時間に 616 回の地震を観測した。ネバダ地区における地下爆発テストから地震の起こったときの様相を知るための資料は得られなかった。

**6.26** アリューシャン列島のアムチトカ島での二つの高出力の地下核爆発が非常に興味深いのは、島は、地球上で最も地震活動が盛んな地域の一つであるからである。1 メガトン TNT と同じ出力を出すミイルロウ装置 “The MIROW device” が 1969 年 10 月 2 日 4,000 フィートの深さで爆発された実験は、爆発空間の低下と明らかに関連がある。数百の小さな断続した余震をともなった。この余

震は、当初急激に減少し、しかし後急激に増加し、そして爆発後37時間も影響を与える大きな複雑な現象は数分以内で終った。地表面で地盤沈下が同時に起きるのは、この時期に生ずる空洞が完全にくずれるのが原因であると示唆している。その後、異なったタイプの12回の余震（そのうち10回これは爆発の41日間に検知された）が13カ月の期間に観測された。これらのうち2回は爆発地区にほとんど近く、他のほとんどは“Rifle Range Fault”でそのうち二つは3マイル離れていた。それらは爆発に引き続いた地下構造の修復運動に起因していた。

**6.27** 更に、厳重なテストが1971年12月6日 CANIKIN 実験で行われた。この時は、5 MTより低出力の核兵器を Amchitka 島表面下5,875フィートの深度で爆発させた。空洞の状態の悪化から生ずる当初の小規模な余震の数は、MILROW 試験後より多かった。しかし、別のやり方でも別の現象が起きた。空洞破裂、これは他の活動より先行するもので、爆発後38時間目に起きた。次の23日間に、21回の微震が検知され、また更に、2カ月間も続いた、しかし、次の年には何も起きなかった。これらの振動のうちの5回は、爆発空洞もしくは既知の断層との関連性が明らかにされてはいない。一連の MIL ROW の微震と同様のハイポセンタ－（the hypocenters）はこの地域の全地震と比し、4・5マイルも浅い。更に、MILROW や CANNIKIN 実験で過敏なアリュウシャン列島での地震がひんぱんに増加したという何らの証拠も見当たらなかった。

## 第3節 構造物に対する損害

### 地表及び深い地下における爆発

**6.28** 地上からやや高いところでの核爆発の場合、形成された爆発口及び陥没は大きな区域をおおうが余り深くない。G Z付近の深い地下及び半地下構造物は、この地面の陥没によって損害を受ける。深い地下の構造物については、大地からの衝撃が損害を起こす第一の要因であろう。しかし、その効果は、主として構造物の中の人員や器材に対し、大きな影響がある。地上構造物に関しては、被害の

範囲は空中爆発のときと同じように、空中の爆風波の状況によって決定される（第5章参照）。

爆風の影響を受ける地域は、直接又は誘発された衝撃波による損害を受ける地域よりもはるかに大きい。地表面又は地表面に近いところでの爆発の状況は、以下に述べる地下爆発の場合と同一である。

**6.29** 地下（及び地表面）爆発の場合の損害の基準、特に、埋没構造物に対するものについては、決定が難かしい。簡単で実際的な方法として、GZ付近の周囲に三つの地域を考えて判断するとよい。第一の地域は、すなわち、みかけ（あるいは観察できる）の爆発口より大きい真の爆発口地域であり（6.70参照）この地域は、事実上完全に破壊する。この深さでは、爆発口の真下の地下構造物は無傷で残るが、その深さを明確にできない。この深さは、圧力の減弱と物質中の大地の運動によって決まる。

**6.30** 龜裂範囲で塑性変形範囲を含む第二の領域は、大地の主要変位範囲にまでおよんでいる。ある種の物質では、この層の半径は、爆破口（見掛け上の）の半径の約1.5～2倍位になるであろう。地下構造物に対する損害は、爆風により地中に生じた衝撃と、直接の大地衝撃波の結合により引き起こされる。扉・通風孔そして他の露出した部分の被害は直接の爆風による。このような被害の実際の様相は、いくつかの要素、つまり構造物の形・大きさ・弾性・爆発に対する方向・位置、及び土の性質などによって決まる。これらの要素の中、あるものについては、この章の終りで考えることにする（§ 6.90参照）。

**6.31** 地下構造物とともに地中に埋められている公共施設（水道・電気など）の配管・トンネル・地下道についても一言しよう。

長い配管では主として接合部、建物に入る箇所などが、異った動きのために壊れ、特に公共施設の接合部は、それが壊れ易い物質で作られ、構造物にがっちりと取り付けられている場合は特に壊れ易い。トンネルや地下道では、爆破口領域内では破壊され、塑性層内で或る程度の損害を受けるけれども、これ等構造物は、特に固い岩をくり抜く構造とし、くずれを最少限にするように内張りをしておけ

ば、大地衝撃に対して抵抗力を持たせられるので堅固となる。

**6.32** 塑性層の外の第三の地域では、大地衝撃波の影響は余り重要視する必要はなく、爆風の荷重が構造上の損害に対して重要な基準となる。堅固な或いは地下深く埋設された構造物は、大きな影響を受けないが、比較的軽量な又は浅く埋設された構造物及び一部の公用配管類は、上部からの圧力、すなわち地表又は、地下爆発にともなう爆風の尖頭超過圧力の影響が特に大である。半地下式の構造物は、直接爆風による影響を受ける。

## 地下（深い）での爆発

**6.33** 地下（比較的深い場所）での核爆発による衝撃は、GZから相当距離の離れた場所においても地震のように感じられる。種々の型式の地上の構造物に対する影響はかなり正確に予報することができる。この予報をするための方法は、ここでは述べない（§ 6.90参照）が、一般的な事項について述べる。

**6.34** 特定の範囲内では、建物・橋、そしてその他の構造物が振動するのは自然である。地震や地下の爆発との相異は、これらの振動は強風や音速波による振動であり、小規模のものとしては車両や、地下鉄の近くで受ける振動である。すべての構造物や構造物の材料は、それぞれの固有の振動周期がある。普通の構造物の主な振動周期は通常長い周期を持っている。高層建築物（10～20階）では1～2秒の周期を持ち、低い建物では1秒以下の周期をもつ。もし建物が無傷であるということは、その建物の周期は、爆発による振動によりほとんど変化していないということである。

**6.35** 距離的に遠い地点での地下爆発（地震を含む）による土地の振動には、さまざまな振動を含みさまざまな振幅を含む。短い周期（振動数の多い）の波長は長い周期（振動数の少ない）より土地に吸収されやすい。そこで核爆発地点より遠く離れた所では大地を伝わってくる長周期の振動を受ける。

**6.36** “共振”と言う効果のために、構造物の振動周期（特に長い周期）と周期が近い場合に振動しやすくなる。地中爆発（地震を含む）からの振動はかなり複雑なため、構造物のもつ振動周期のあるものと、土地の振動周期が似ているもの

もある。すべての構造物は、遠くの地中で爆発に対しある程度振動する。もしもその振動による作用が構造物に対して大きいものであれば、ある程度の損害が起ころる。

**6.37** 核爆発地点より遠くなるにしたがい、振動エネルギーは小さくなる。しかし、長い周期を持つ振動の大部分のエネルギーは残存する。さらに、今まで述べてきたように、高層建築物は低層建築物に比して長い周期の振動周期を持つ。この結果として構造物の振動に対する反応は地下爆発で距離が離れるに従って小さくなる。しかしながら距離に従って影響が少なくなる割合は、長い周期を持つ高層建物の方が低層建物より小さい。

**6.38** 予想されるとおり、爆発地点からある一定距離における構造物の振動に対する反応は、その核爆発の出力により変化する。しかしながら、その影響は、高層建物の方が低層建物よりさらに大きく現われる。したがって出力が増大するに従って爆発よりある一定の距離を持つ地点では高層建物が低層建物より大きな影響を受ける。

**6.39** ネバダ実験のデータに基づく前述の一般論は高出力の地下爆発地点より（距離の）遠く離れた地点では大部分が長い周期を持つ地中の振動として表われることを示している。その結果高層建物の（9階以上の建物）振動に対する反応は、建物自体が長い周期を持っているので、高出力の地中核爆発により遠距離においても影響を受ける。

**6.40** ラスベガスやネバダにある高層ビルは、高出力の核爆発が行なわれた地点より100マイル以上離れているが、地中爆発により生じたエネルギーのためあたかも中程度の地震か強い風によりゆれるような状態になることが知られている。しかし損害は生じなかったが、確かに核爆発によるものと判断された。このことは以前述べた“HANDLEY event”と言われているもので、1970年3月26日1MTの核爆発の場合はさらにこのゆれは激しかった。しかしながらラスベガスにおいてはこの時も建物の砂壊は生じなかった。ただしビルの装飾用のブロックやガラスにひびが入ったがこれはは簡単に修理することができた。ネバダ実験場近辺

にはラスベガスより高層建物は少ないが実験場近くの低い建物は予想よりも被害は少なかった。

## 第4節 水中爆発の特性

### 水中の衝撃波

6.41 水中における核爆発により形成された熱い気泡の急速な膨張は、衝撃波を生じそれを水中のあらゆる方向に送り出す。くわしく見るとややちがうが衝撃波は一般的に空中における爆発波に形が似ている。ちょうど空中でおこるように、衝撃波前面では鋭い過圧が起こる。しかし、水中では過圧のピークは空中におけるように距離とともに急速に減少することはない。従って水中におけるピーク値は空中における同規模の爆発から同距離にある空中のピーク値より、もっと高い値になる。例えば、水中の深いところにおける100 K T の爆心から3,000 フィート離れたところにおける過圧ピークは、空中爆発における数 psi の値に比べ約 2,700 psi である。言いかえると、水中における衝撃波の継続期間は空中の場合よりもっと短かい。水中では空中における 1 秒あるいはその程度の値と比較して、数百分の 1 のオーダーである。

6.42 通常の条件下では水中の音の速度は約 1 マイル 1 秒であり空中の約 5 倍である。ピーク圧が高い時、衝撃波の速度は通常の音速より速くなる。衝撃波前面の速度はもっと低い過圧となり、まるで空気中における速度と同様に、音速に近くなる。

6.43 水中の衝撃波が船あるいは堅い海底表面のような水中の堅いものにぶつかる場合、空気中のように正しく圧縮反応が起こる (§ 3.78)。しかし水中の衝撃波が上(空気)の表面に到達すると違った反射現象が起こる。この面では衝撃波は軟らかい媒体すなわち、空気にぶつかる。結果として反射された波は水中にもどされる。しかし、この波は rarefaction あるいは tension すなわち負圧波である。表面以下のところでは直接の正波と負の反射波との組合せによって水中の衝撃压

力を作り出している。これは、“surface cut off”と呼んでいる。

**6.44** 海底の反射がない場合（§ 6.49）水中のある点での爆発後における特定の位置（あるいは目標）での時間と衝撃過圧との理想的な変化が図-6.44に示されており、最初の衝撃波と負の反射波が同速度で移動するという“音響近似” acoustic approximation と呼ばれているものについて説明が行われている。衝撃波は爆発点から与えられた目標へ移動するのに必要な短かい時間を経過した後、衝撃波前面が到達すると、急激に過圧が起こる。その後、ある時間が経過すると空気中のように徐々に減少する。その後すぐに、空気と水の接触面から負の反射波が到達し圧力は可能な限り通常の水圧（静的）に、速く降下する。

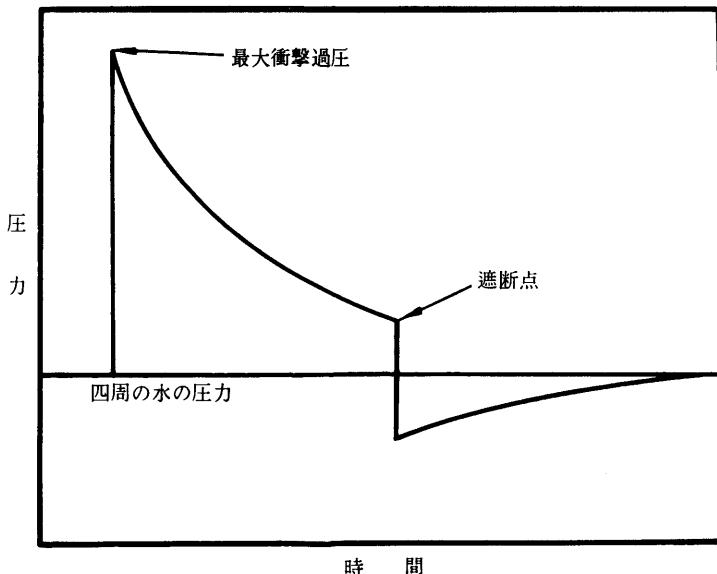


図-6.44 “つぼ反射体”的ない空気表面に近い水中爆発における水圧の時間経過にしたがう理想的(音響上の近似値)な変化

**6.45** 水中の点目標に対する直接の衝撃波の到達及び反射された負波の到着を知らせる“cutoff”的到達との間の時間間隔は衝撃速度・爆発深度・目標深度及び爆発から目標までの距離による。これら3つの距離は水中目標に達する直接(正)及び反射(負)波によって移動した行程の長さを決定する。もし反射波がある面、

例えば浅い船底にぶつかると、その時2つの衝撃波前面の到達する経過時間は短かくなり、“cutoff”は衝撃波前面の到着後間もなくおこる。従って爆発から同距離のところでは船の表面は船より深い水中に沈んでいる目標より被害は少ない。

**6.46** 図-6.44における理想的な波形は図-6.46に示されているように“音響近似”(acoustic approximation)によって実際には修正されるものである。衝撃強度が強い場合、反射波は衝撃波を追い越すようになる。それは、追いかけてくる反射(希薄な)波が移動する水中を衝撃波が移動するようになるからである。空気-水接触面に近い領域-変則領域-ではA点に示されているように、最初の衝撃波が希薄な反射波を追い越すことによって強く減衰するようになる。もっと深い位置(B・C・O点)では最初の波と反射波によって移動した距離の違いがありにも大きくて追い越しをさせないのである。それにもかかわらず妨害の原因となる水を通る反射波の移動は理想的な“音響近似”(acoustic approximation)よりももっと鈍いsurface cutoffをおこす。

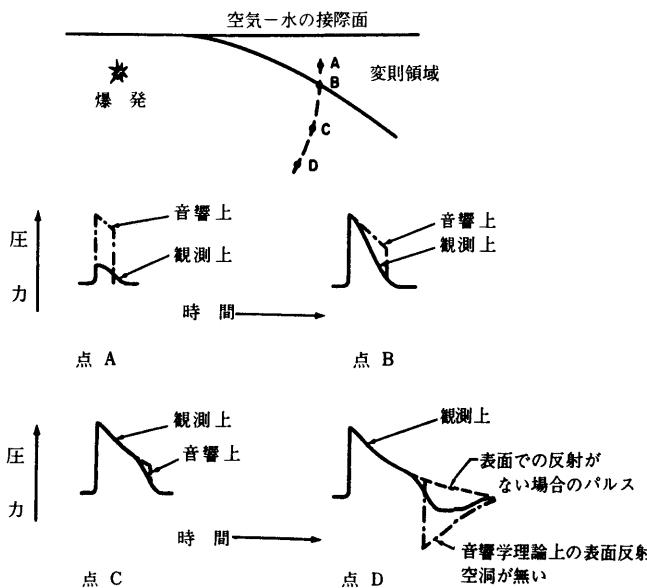


図-6.46 “つぼ反射”の無い空気-水接触面反射により生じる圧力パルスの典型

**6.47** 深海では底（及び他の正）反射は重要でなく最初の衝撃波と負の表面反射が一般的には水中爆発によって発生する最も重要な圧力妨害の特色をなしている。しかし 2・3 の状況下では重要であろうと思われるいくつかの他の影響がある。

**6.48** そのような影響の一つのグループは異種の密度・湿度及び塩分で構成されている。衝撃波の速度はこれら媒体の nonuniform 性質によるためにしばしば水中の衝撃波は屈折する。すなわち、反射されたのと同様に方向が変化する。このことは、ある場合には衝撃エネルギーがある地域から追い出されて、強く減衰して目標に到達するということを意味している。他の場合にはエネルギーは爆発から離隔しているある点で予想される衝撃波よりもっと強い波を作り出すために、媒体の一部に流れ込むかあるいは一様に集まってくる。そこで多くの地域では表面 cutoff による予想衝撃圧力の減少は集中による増強のためにもとに戻るのである。

**6.49** 海底に関連した影響というのは特に浅い水中では重要である。これら影響の 1 つは最初の衝撃波の底反射である。空気からの反射のように底反射は圧力波であり、それを横切る領域では圧力が増加する。目標上の圧力は最初の衝撃圧力と負の（空気面）反射圧力に加えて正の反射圧力をも包含している。全圧力パルスの特徴及び水中目標への影響は多種の圧力と 2 つの反射圧力の目標への到達時間の大きさ及び状態によっている。これらの量は § 6.45 に述べられている 3 つの距離と水深によって決定され、爆発生成物及び海底の性質によても同じように決定される。

**6.50** 海底が岩かあるいは他の硬い材であり、爆発点が海底から余り離れていない場合、海底は 2 つの圧力波を生じる。1 つは単なる最初の水衝撃の反射であり、2 つめは海底を通して遠方へ伝導されるエネルギーの再放射である。もし後者の波が最初の衝撃より前を走ることができ、しかも放射されたエネルギーが水中に戻されるなら、後者の波は顕著になる。この場合離隔した位置で観測される最初の動きはこの海底によって起こされた波によるものである。

**6.51** 深海中の核爆発においては連合したガスの泡は 2 ~ 3 回の膨張及び収縮の

サイクルをくりかえす。(§ 2.86 et seq) 各々のサイクルは爆心及び爆発のあと続いて起こる気泡から最初に水を通って外に動く泡パルスと呼ばれている別個の圧力波と希薄な“rarefaction wave”を生じる。

6.52 次の水中圧力パルスは空気一水面においての反射（負）波の動きが重要である。この下方へ移動する波は地下爆発で碎かれるのと類似した方法で水塊の一時的な上方への分離の原因となっている。これらの水塊が重力の働きによって再びもともどる場合、衝撃は一連の波を動き出させる。この方法での水塊の分離はもし分離された水がスプレードーム(§ 2.66)あるいは水中に空所（又は穴）が形成されるなら“cavitation”を作り出すように空気中に飛びあがるならば“spalling”と呼ばれる。

## 水中爆発からの爆風

6.53 その独特の機構は爆発の大きさ及び深さによるけれど、一般に1つあるいはそれ以上の水中爆発のあとに続いて起こる。第1に水中の最初の衝撃波のあるエネルギーは水と空気の間の層を通って伝導される。この残存している空気衝撃は爆心から広がっていく水中衝撃の原因となっている。第2にもし概算した爆発の深さ(WKTの核兵器の3乗根に反比例しフィートで表わされる爆発の深さ)が約35フィート / K<sup>1/3</sup>T以下であるなら気泡は最初の膨張相の中の空気中に直接発散し、空気衝撃の原因となっている。第3に深海爆発において気泡は周囲に発散しないけれど空気中に急速に押し上がる水塊や水煙が空気衝撃の原因となっている。しかし約150フィート / K<sup>1/3</sup>Tの深さ以上では火煙は余りにゆっくりすぎてかなりの空気衝撃を生じない。第2及び第3の機構は最初の水中衝撃よりかなり遅れる爆風波を作る。しかしそれらは地表面近くでの爆発のairslap効果に類似しているairslap圧力によって水中と同一であるとみなされている(§ 6.12)。そこで水中目標は、いつもairslapより前に最初の水中衝撃を受ける。しかし水面以下の爆発による爆風圧の減衰は急激でありかつ地下爆発に関する図-6.81に見られるのとよく似たパターンを示す。

### 水中爆発からの表面波

6.54 水中爆発は比較的ゆっくりであり、はっきりと認識できる特徴をもった外に向って移動する表面波を生じる。表面を破るような気泡の振動を起こすこれらの波はついにはゼロ表面のあたりで強度がどんどん減少する。広くなった円の中に一連に広がっていく。爆心近くで生ずる最初の表面波は一般にあまりにも急激に発生するため持続しない。その表面波は違ったやり方で表面波生成に利用できる最初のエネルギーの大部分を消耗してしまうほどの激しい運動を起こす。続いてその運動はほとんど大きなエネルギー損失なしに深海中を移動する。この表面の動きに消費されるエネルギーは兵器の出力の2～5%の間の量であると推定されている。

6.55 表面波のある特徴は、爆発が深海よりもむしろ浅海で起こる場合に著しくなる。ビキニ（§2.70）において行なわれた BAKER テスト（約20KT）で波を観測すると次のことがわかる。最初の波は気泡の膨張にともない水が外に向って高速に移動する際そのエネルギーを受ける波であり爆発によって直接生ずる明らかに長い単一の波である。また、それは続いて起こる波とは異った動きをする。続いて起こる波は多分気泡の発散及び水中で創造された空所に再び水が満されることによって形成される。ビキニ BAKER テストにおける海岸に到着する表面群の写真が図-6.55に示されている。後のテストは最初の単一の波が浅い海での爆発の特徴であるということを示している。深海での爆発は波の山と谷が爆心から外に向って進み、一連の波を生じる。

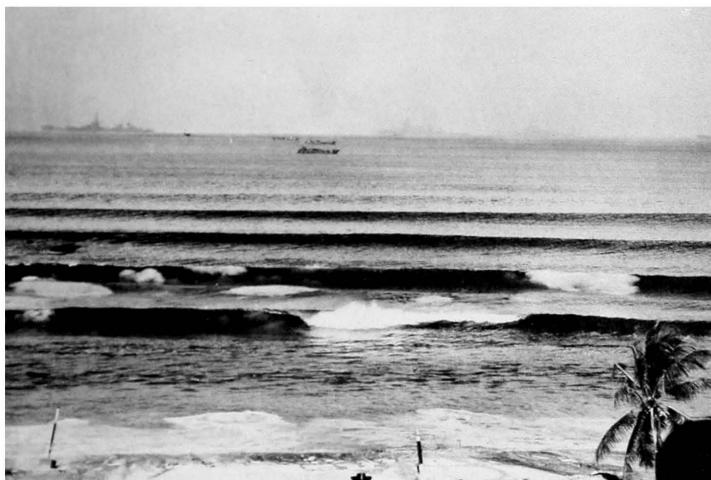


図-6.55 水中爆発 BAKER 実験で爆心表面 (S Z) から 11 マイル  
離れたビキニ島の海岸に押し寄せた波

6.56 BAKER 爆発付近では最初の波の山は、次にくる波よりも高かった。それらは平常な水面・及び続いてくる波の高さの合計よりもやや高かった。爆心からより遠距離のところでは、最も高い波は通常次に続く波群の中の一つであった。この波群中の最大の高さは中心からの距離が増加するので非常に遅い波が後方に移動するらしい。この最大波高の後退は深海爆発でも観測された。

6.57 表面ゼロからいろいろな距離のところでの 20 KT の浅い水中爆発にともなう波の最大高と到着時間（必ずしも最初の波とは限らない）が図-6.57 に記されている。これらの結果はビキニ BAKER テストで行なわれた観測に基づいている。いろいろなエネルギーの水中爆発にも適合することのできる波高の更に一般化された処理法が § 6.119 などに記されている。

表-6.57 ビキニ島における B A K E R 実験での水中波  
の最大高（波の峰から谷）と到達時間

距 離(ヤード)	330	660	1,330	2,000	2,700	3,300	4,000
波の高さ(フィート)	94	47	24	16	13	11	9
時 間(秒)	11	23	48	74	101	127	157

6.58 BAKEA テストで現われた状態では水波による損害がゼロ地点近くにいる船にかなり発生しそうである。その損害の模様は、ゼロ地点から船尾まで400ヤード離れ、かつ舷側を爆心地に向けてビキニ環礁に停泊していた空母 U S S サラトガにはっきり現われていた。司令塔の構造物は爆風によっては影響を受けなかったようであったが、後で構造物の中央部が空母のデッキ上で折り曲げられているのが観測された（図-6.58）。まもなく最初の波の山が到着し、船尾は以前の位置より43フィート以上もち上げられた後、サラトガは次の波の谷に落とされた。司令塔の構造物に損害を与える原因となった第2の波によって飛行機も破壊されるようである。



図-6.58 B A K E R 実験後の航空母艦 U. S. S Saratoga

**6.59** 水中爆発によって生じた波は波の力及び浸水の両方によって港や海岸線付近に損害を与える。波は浅い海の中を移動すると高さが増加し、そして潮波のときに観測されるのとよく似た浸水は海岸の傾斜・波の高さ・荒さ等の要因によつて変化する。

### 水中クレーター形成

**6.60** 水中（あるいは真上）における核爆発に際し、もし爆発によって生成した水中の気泡や穴が海底に接しているなら意義のある爆破口は深いというより巾広くかつ平面上にもち上った縁で回りをとり囲まれている皿のような型をした陥没で特徴づけられているので、地表面付近の爆発で形成された陸上の爆破口によく似ている（図-6.70を見よ）。しかし、大部分の水中爆破口ではその深さにより爆破口半径の方が大きく、縁の高さは陸上の爆発による爆破口よりも小さい。これらの違いは爆破口の上を洗い流す海水によって生ずるのである。この流れは10%程度、爆破口半径を増加し30%以上深さを減少させる。水深が浅く爆破口形成にともない生ずる“lip”が水面上に形成されるようなときには前記の例外である。このような爆破口「波に流れない爆破口」と呼ばれるものが出現して地表面における爆破口に似ている。この爆破口は「波に洗われた爆破口」より高い縁を持ち深さ対半径比はより小さい。

**6.61** ビキニ BAKEA 爆発は直径およそ2,000フィートにわたる環礁の深さを若干深くした。最も大きな深さのはっきりした変化は32フィートであった。しかしこれは以前の平面の陥没よりもむしろ地域が隆起したことを示している。テストの前に環礁の底から収集された沈殿物のサンプルは10%以下の砂や泥と混合した目のあらい海草のような岩屑（algal debris）からなっている。しかし、爆発後に得られたサンプルはまったく違っている。海草のような岩屑の代わりに10フィートを越える厚さの泥の層が爆心付近の底で発見されている。

### 水中衝撃による被害：

#### 一般的な特徴

**6.62** 船あるいは防波堤やダムのような建造物に与える衝撃波の衝撃は、不意に

これらに衝撃を与えるのに似ている。この種の衝撃は T N T や他の化学的爆薬の水中爆発で経験済みである。しかし、量が少ないためそのような爆発による衝撃の被害は局部的である。ところが核爆発のような大きな量による衝撃波は全部の船をのみ込み大きな地域に被害を与える。

**6.63** 船に対する水中核爆発の効果は 2 つの一般的なタイプがあると予想されている。その第 1 は船体に対する直接の衝撃効果、そしてその第 2 は、衝撃による動搖が船の構造物に与える間接効果がある。船の船体に働く水中衝撃は喫水線以下の船体の歪及び船体の板金の破裂を生じる傾向があり、船の骨組みに衝撃を与えるとともに水漏れを生じさせる。水中衝撃はまた、水平及び垂直方向に急速に移動する。この動きは船の構成要素や設備に被害を与える。

**6.64** 船の主供給線・主蒸気線・シャフト及びボイラーれんが積みが特に衝撃に敏感である。慣性の効果のため、支持体あるいはエンジンやボイラーのような重部品の基礎はつぶれるかあるいは歪むようになる。点灯器あるいは不充分に縛つてある物品は大きな力で投げとばされる。そしてそれら自身や隔壁や他の設備に被害を与える。電子装置・消防装置及び誘導ミサイル装置は衝撃効果によって少なくとも一時的に無効になるであろう。しかし耐衝撃用に設計されている設備は被害は少ない (§ 6.112 et seq を参照)。一般的に船の設備に与える被害は衝撃波によって個々の物品に伝達されたピーク速度によるとされている。

**6.65** 船体の被害は衝撃波の単位面積あたりのエネルギーに関係しており、特定の深さで衝撃波が表面を遮断する時間に関係しているといわれている。運河水門の門構造及びドックの浮きとびらに対する被害は主に水中衝撃波のピーク圧による。衝撃波前面における非常な高圧の範囲内ではそのような構造物はかなりの被害を受けるらしい。換言すれば港湾設備のような大きなどっしりとした地下構造に対する被害はほとんど衝撃波による。この衝撃はその圧力と同様に衝撃波の継続期間にも影響される。

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注：(3) 本章の以下の節は、連続性を失すことなく省略することができる。

## 水中衝撃：

### ビキニの実験

**6.66** 浅い水中の BAKEA テストではいろいろな型の70数隻の船が爆心の回りに停泊していた。爆発後行われた観測からある一般的な結論が引き出され、その概要についてここに述べてある。しかし水中衝撃によって表面の船が受けた損害の性質及び程度は爆発深度・量・水深・範囲・船の型・船が動いているか、停泊しているか及び爆発の方向によるということが記されている。

**6.67** 浅い水中爆発ではボイラーと主推進機が間近な地域における水中衝撃によって大きな損害を被る。衝撃の範囲が増加すると、船の補助推進機は大きな損害を受けないが軽い内部装置特に電子装置は船体の損害の限界を越えた相当の範囲に被害を受ける。航海中の船の機械は停泊中の船よりも多分やや大きな損害を被る。

**6.68** 浅い水中爆発からの衝撃エネルギーの大部分は水中に伝達されるけれど、相当の量が空気中に衝撃（あるいは爆風）波として表面に伝達される。ビキニ BAKEA テストでは爆風は確かに船の上部構造にある程度の損害を引き起こす。しかし、このことは水中衝撃で受けた損害に比較して重要ではない。爆風は船を転覆させて船にある損害を生じさせる。しかし、爆風波の主効果はもし爆発が海岸から余り遠くないところで起こったならば陸上の目標に対してであろう。損害の規準は特定の過圧及び動圧に関しては陸上における地表爆発と同様である。

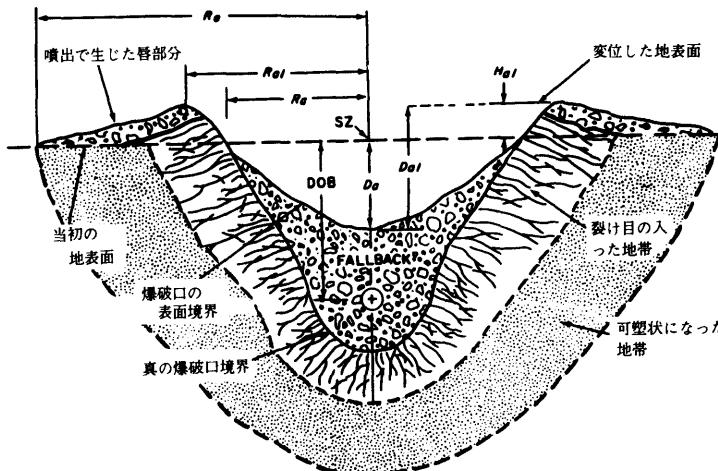
**6.69** 爆発深度が増加すると爆風中の爆発エネルギーの割合は地下爆発における場合とよく似た方法で減少する。密封された高圧が長い経路を経て急速に減少するように過圧は減少していく。

## 第5節 地上及び地表面下爆発の技術的考察<sup>(3)</sup>

### 爆破口の大きさ

**6.70** § 6.07 に示された破裂とプラスチックゾーンに加えて、爆破口には他の 2

つの形がある。これらは“見かけ上の爆破口”と“真の爆破口”である。図一6.70に示されているように半径Raと深さDaの見かけ上の爆破口は核爆発によって地上の残されたくぼみや穴である。これに反して真の爆破口とは見かけ上の爆破口より更に明確な土壤のはぎとりが生じている領域までを言う。おおざっぱに言うと放物面の様に見える。見かけ上の爆破口の体積は、爆破口の体積 =  $\frac{1}{2}\pi r a^2 Da$  で表わされる。



図一6.70 地中浅部での核爆発で生じた爆破口の断面

6.71 図一6.70に示されている他の爆破口パラメーターの値は次式によって推定できる。爆破口の端の盛り上った所までの半径 Ral は、 $Ral = 1.25 Ra$ 、盛り上った部分からの深さ Dal は、 $Dal = 1.25 Da$ 、元の地表面から盛り上った部分までの高さ Hal は、 $Hal = 0.25 Da$  である。このようにもし Ra と Da が解っていたら  $Ral \cdot Dal \cdot Hal$  等は推定できる。

6.72 爆破口の大きさは、核爆発の深さ・出力・そして土壤の特性によって決まる。爆発の深さの関数として示される見かけ上の爆破口半径及び深さは、図一6.72の a と b に、4つの土壤成分について示されている。ただし出力は 1 KT である。ちょうど地表面での爆発では爆発高度は負の深さとして処理される。又爆発深度が地表面ゼロレベルを通過する時爆破口直径の変化が最も大きいため、地

表面爆発での値は明確に図に表われている。最も経験的な爆破口データによるとその半径も深さも概ね出力Wの0.3乗に比例する。このことから爆発出力と爆発深度に応ずる見かけ上の爆破口の大きさを図-6.72 a から読み取ることができる。又、この曲線の最大値はいわゆる最適の爆発深度であることを示している。一方土や岩石の水分含有量の変化が、かなり爆破口の大きさに影響しているのは明白である。含水量が多い場合土は柔らかくなり爆破口は大きくなる。またこの場合、岩の成分も弱くなり爆発エネルギーが土と岩石成分に吸収され易くなる。図-6.72 a と b にそれぞれ湿った堅い岩石・乾いた堅い岩石・湿った土及び乾いた堅い岩石に応じる爆破口の半径と深さの関係が示されている。20フィート以上の爆発高度はここでは負の高度として処理されている。

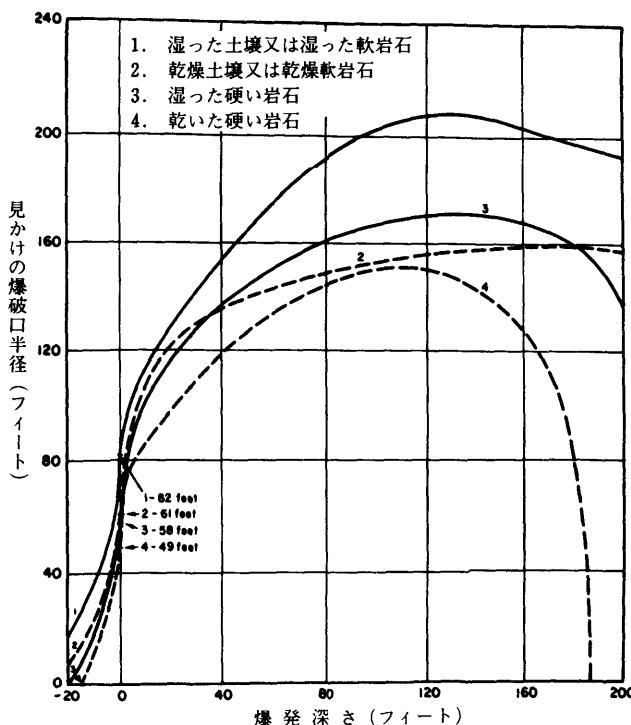


図-6.72 a 各種埋設深度における 1 K T 爆発の深さの関数とする  
見かけの爆破口半径

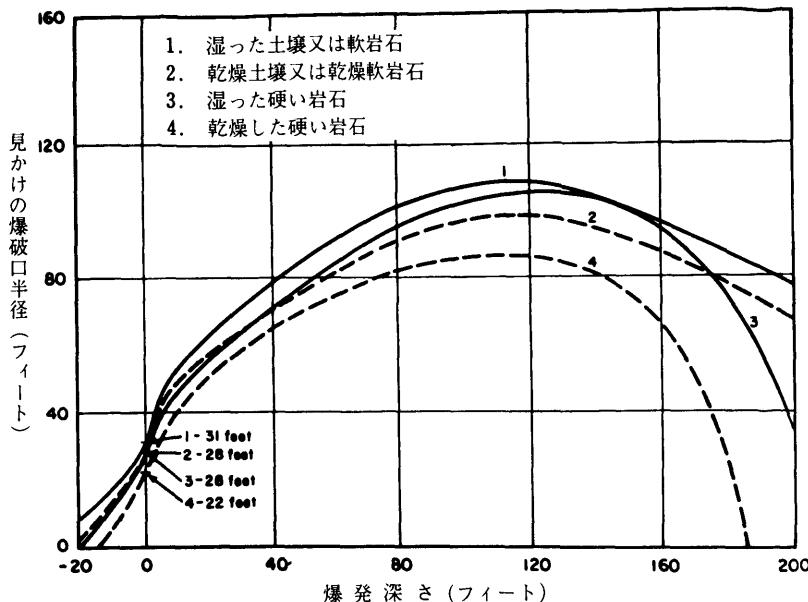


図-6.72 b 各種の埋設深度における1 KT爆発の深さの関数とする見かけの爆破口半径

### 測 定

出力WKTの見かけ上の爆破口半径と深さを決定するためには、まず実際深度から“測定深度”を得るために $W^{0.3}$ で割算する。この深さでの1 KTのクレータ半径と深さを図-6.72 aとbから読み取りこれに出力 $W^{0.3}$ を乗することによって、所望の状態での結果を得ることができる。

### 例 題

乾燥した堅い岩石中における出力20 KT、爆発深度270フィートで生じる見かけ上の爆破口半径と深さを求めよ。

### 解 答

測定深度 =  $270 / 20^{0.3} = 1,105$  フィート、図-6.72 a からこの土壤と深度における1 KTの見かけ上の爆破口半径は150フィート（曲線4）であり、図-6.72 b からこれに相当する爆破口の深さは87フィート（曲線4）であることが解る。この

ことから深さ270フィート、出力20KTでの見かけ上の爆破口は、爆破口半径  $R_a = 150 \times 20^{0.3} = 368$  フィート、爆発口深度  $D_a = 87 \times 20^{0.3} = 214$  フィートとなり、これが答である。[  $R_a$  と  $D_a$  が知られている時の他の爆破口諸元（渦まで）は、§ 6.71, 6.74, 6.75 の概算式から得ることができる]。

### 爆破口の噴出物

**6.73** 爆破口の噴出物は土又は岩石からなり、それらは見かけ上の爆破口の外側に噴出される。これらの噴出物は見かけ上の爆破口と真の爆破口との間に降下する。領域は2つの区域に区分される。一つは見かけ上の爆破口の回りに一面に噴出された噴出物を含んでいる。“クレータリップ”の領域（図-6.70参照）でありもう一つはクレータリップ領域から更に後方に不連続に降下した領域である。

**6.74** クレータリップ内の一面に広がった噴出物の量と広がりは環境の性状が影響を与えるが、出力と爆発点の状態からはほぼ決定される。リップの外側限界である一面に降下した噴出物の半径は見かけ上のクレータ半径の2～3倍である。多くの場合この半径  $R_e$ （図-6.70）は、 $R_e = 2.15 R_a$  である。

**6.75** 噴出物の深さは地表面ゼロ地点からの距離が長くなるにつれて指数函数的に減少する。一般に実際の噴出物体積の80～90%は一面に広がった噴出物領域内に落下する。土壤中での核爆発データによると噴出物の量は見かけ上の爆破口容積（落下して戻ってくる物や圧縮やはこりとして流された残り）の55%に相当する。

核爆発においては噴出物の量は、最適の深度に達するまで、爆発の深さに比例して著しく増加する。土の成分については、噴出物の厚さは見かけ上の爆破口半径と直徑の関数として見積ることができる。

$$t_e = 0.9 D_a (R_a/R)^{3/4} \quad \text{ここで、} R > 1.8 R_a \quad (6.75.1)$$

$t_e$  は噴出物の厚さ、 $R$  は地表面 0 から求めようとする地点までの距離である。

(6.75.1) 式において噴出物の比重は爆発環境の比重と概ね等しいと推定できる。この場合土の成分と考えて良い。しかしながら本来岩石成分が混った所では噴出物の厚さは、(6.75.1) 式で表わされた値より30%多くなると思われる。

## 地質学的な要因

**6.76** 土壤の含水量や性質に加えて、他の地質学的要因も確かに爆破口の大きさや深さに影響を与える。地域の傾斜が5°か、それ以上あると地表及び地下爆発で形成される爆破口諸元に影響する。そしてこの傾斜の影響は爆発速度が深くなればなる程明確なものとなる。傾斜している場合爆破口下り側により多く噴出物が落下する原因となる。そしてしばしば岩石が爆破口内にすべり落ちる原因となる。更に斜面上方の破裂地域は崩壊して爆破口中に落ちその結果非対象な爆破口を形成することとなる。

**6.77** 成層面のような岩の中ではエネルギー伝播に影響が生じ爆破口の最大深度は減少する原因となる。この場合爆破口半径への影響はほとんどないが、噴出物の観点からはリップの高さや噴出半径に影響する。

**6.78** 地下水層があり爆発が水面下で起こった場合、爆破口の大きさや形に影響を及ぼす。この場合爆破口は平で広くなる。地下の岩礁は地下水層と同じであるが、その影響度は少ない。ちょうど地表面又はその近くでの爆発の場合岩礁が、爆発口半径に及ぼす影響はほとんどないが、その深さはかなり浅くなる。

**6.79** ちょうど地表面又はその近くでの比較的低出力爆発の場合、岩石中の節理層の場合爆破口の形や噴出物の飛散距離に、かなり影響する。爆破口の形は節理層の厚さに影響するし、半径は節理層が平行方向の場合広がり垂直方向の場合減少する。

## 爆 壓

**6.80** 地下爆発で放出されたエネルギーは、幾つかの機構にそって空気中に伝播され、その結果爆風が生じる。火の玉が地表面をつき破らない深さでの爆発での有力な伝播機構を次に記述する。

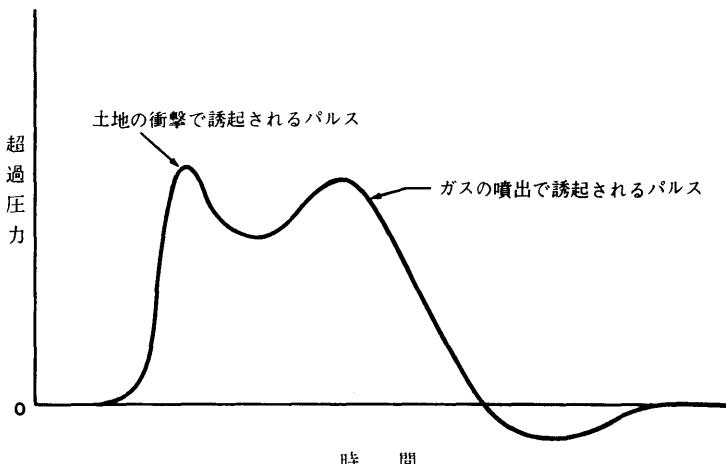


図-6.80 中程度深度の地下爆発で生じる空中の爆風超過圧力  
爆発の深さが増大するとガスの噴出の相対的な分布は減少する。

地面を通過して伝播する衝撃波は地表面に到達し空中と地面の中間に存在する空気（空気の粒子）に上方向への速度を伝え空気中のパルス波を生じる。同時に § 2.91で説明した様に地表面層を破壊したり上方に動かしたりする。その間地下ではガスが広がり地表を上方に押し上げる。そのため地表面の破壊岩石はドーム状を示すこととなる。破壊岩石及び盛り上ったドームのピストンのような動きは最初に示したパルス波を更に増大する。このような動きによって生じた爆風は“圧力”——“時間計”に单一パルスとして表われる。そしてこのパルスは、エアートランスマッティドパルスとかグランドショックインデューストパルスとよばれている。そのいく分か後に爆発により生じたガスがドームに穴を開けて逃げて行く。この時、“ガスが逃げる時に生じるパルス”とよばれる第2次パルスを作る（図-6.80）。

**6.81** 爆発深度が深くなるにしたがいガスの逃げは減少し、2つの上記パルス間の時間的間隔は長くなる。パルスを生じる機構は深さによって複雑に変化するが地表面近くの空気中で過圧波ピークができる過程についての1つの解析が示されている。これは適当な深さの範囲について地表面0からの距離の関数として示され、

その結果は、図-6.81に示されている。ここで $\bar{x}$ の値は次式から得られる。

$$\bar{x} = \lambda x e^{\rho} d / 126 \quad \lambda = x / W^{1/3} \quad \lambda d = d / W^{1/3}$$

ここで $x$ は距離（フィート）で $d$ は爆発深度（フィート）、 $W$ は核出力（KT）、 $\rho$ は土壤成分の比重である。ただし、図-6.81は爆発の測定深度 $\lambda d$ が252フィート/KT<sup>1/3</sup>以上の時にしか使用できない。

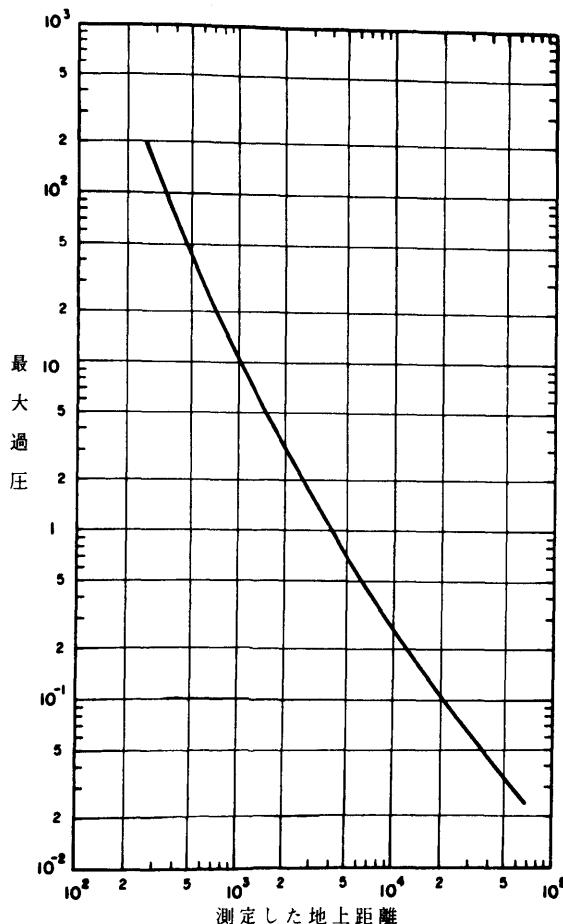


図-6.81 地下爆発における爆風の最大過圧と1 KT爆発の際の爆心地からの地上距離との関係

## 地面の動き

**6.82** 地表面近く又は浅いか適当な深さでの地下爆発における地面の動きは系統的なものと、ランダムなものとの効果からなっているように思われる。このうち系統的な効果は爆発によって地面を伝わってくる爆風波や衝撃波と関連している（§ 6.12）。ランダムな効果とは地面での高周波衝撃波・地表面波・反射・屈折等が含まれる。これらは出力、地表面 0 からの距離、観察地点の深さ、特にその地点の地質の特性などの要因に影響される。次は主として系統的効果について述べる。

**6.83** 超地震状態においては爆破風で生じた地面の下方向への加速は、地面が直接衝撃を受け上方向へもたらす加速より大きい。地面近くにおかれた計器によって得られた地面の加速度（又は速度）と時間の関係は空気の過圧現象である。タイムパルスの形と少なくとも初期段階では同じである。もし地面の直接衝撃波が爆風波を追越した場合加速度はゆるやかなものとなりその方向は下より上へ行くであろう。したがって“加速度”——“タイムパルス”は空気の過圧パルスより長時間残ることとなる。全体的な動きの記録は振動によって特徴づけられる。もし前兆があれば（§ 3.49, 3.79）その記録は高周波数成分はとらず、又ランダムな形の振動は取らない方が良い。

**6.84** 地表面や適当な深さの爆発では、種々の核実験結果からピークグランドアクセレーションとか速度とか置換（一時的なものと永久的なもの）などの言葉が生れたが、これらは超地震状態でも § 6.81 に示されているピークエアーオーバープレッシャーから推定される。又アウトランニングする地面の動きの効果を簡単に計算する方法はないが直接衝撃波の効果に関する限りは爆風波が無視できるような深い地下実験結果から推測することができる。爆心地から離れた地点の地震の構造については、§ 6.90 に示してある。

## 第6節 深い地表面下爆発

### 空洞やき裂の大きさ

**6.85** 深い地下爆発により生じたガス空洞や、き裂は核の出力や爆発点の環境に起因し、又深さに特に影響を受ける。その状態は種々様々であるため各要因間の関係を述べることは不可能である。次の記述は空洞と、き裂の大きさについてごくおおまかに示すものであり、確実な情報を示すものではない。

**6.86** おおまかに言うと与えられた状態でのある爆発深度での空洞の大きさは出力に比例する。従ってもし空洞が球形であったとしたら、その半径は  $W^{\frac{1}{3}}$  に比例する。ここで  $W$  は出力である。この関係はおおまかに成立っており、したがって  $RC/W^{\frac{1}{3}}$  (ここで  $RC$  は空洞の大きさ) は一定である。適当な深さにおいて以下の 2 つの状態での  $RC/W^{\frac{1}{3}}$  は次のように言われている。

密なシリカ系岩石 35 フィート /  $K T^{\frac{1}{3}}$  (例えば花崗岩)

密な炭酸系岩石 25 フィート /  $K T^{\frac{1}{3}}$  (例えば白雲石、石灰岩)

これらのことばは爆発深度 2,000 フィートにまで概ね適用できる。

**6.87** 更に深い爆発深度では、ガス空洞を作る過荷重が空洞の大きさに影響を与える。過荷重がかかった断熱加圧状態では空洞の半径は  $(\rho h)^{0.25}$  に反比例する。ここで  $\rho$  は密度で  $h$  は過荷重の高さである。しかしながら指数は 6.25 とかなり異なることもある。この系数値は良く解明されたものではなく、したがって空洞半径と過荷重压力との関係は 2,000 フィート以上の深さに適用されるようである。

**6.88** もしガス空洞の上面が冷却された場合は（通常そうであるが、常にそうとは限らない）、き裂の大きさは土壤の特性に強く依存する。一般的に言って、き裂の半径は空洞半径より 10~20% 大きくなる。更に、き裂の高さは空洞半径の 4~6 倍である。結晶化した花崗岩のような場合、その系数は大きく白雲岩や不結晶花崗岩の様な場合その系数は小さい。

**6.89** 先のラフなデータから見ると空洞の先端が地表面に達しない様な地下爆発

では測定深度  $d/W^{\frac{1}{2}}$  は、300フィート / KT $^{\frac{1}{2}}$  より大きいように見える。しかしながら、空洞の端がまさに地表面に接している時は核爆発で生じた幾つかの放射性ガスが地面から大気中に逃げるであろう。地下実験においてはこれらのガス漏れは防がれなければならない。つまり測定深度は、400フィート / KT $^{\frac{1}{2}}$  より小さくてはいけない、低出力の爆発で爆発の真の深さが比較的小さい場合又地下水を含んだ土壤の場合は放射性ガスをつつみ込むために測定深度を更に深くしなければならない。

## 地面の動きに対する建造物の応答

**6.90** 地下爆発の地震波によって生じる地面の動きに対応して建造物がどのように応答するかを研究（又は予測）する手法の一つに半経験的な方法があるが、これは、“応答スペクトル”を利用するものである。建造物を単純に理想化し、これを一つの振動型式で表わす一次振動体を考えてみる。ある場所に設置された地震計が実際をそのまま記録するように、これは地面の動きの全記録に依存するものと仮定される。機械的な法則を活用することにより地面の動きに対応する理想化された建造物の応答ピークはこれによって計算することができる。

弾性振動体の場合には、この応答は振動体の自然振動時間（又は周波数）と振動減少比のみに依存する。特定の振動減少比、例えば0.05を選べば今述べた手順により特定の振動時間をもつものに対して、建造物のピークの応答を計算できる。この計算を通常0.05～10秒までの振動時間について繰り返す。この結果を特殊な対数計算用紙にプロットし、特定の振動減少比と地面の動きの観察値から応答スペクトルを求めることができる。ピークの加速度、速度及び変位量は、数学的関係があるから一本の曲線から標準化された建造物の振動時間に対するこれらの数値の変化を求めることができる。

**6.91** 与えられた状態での応答形式から地面の動きのエネルギーの相対量を決定することが可能であり、又爆発出力によって異なった自然振動周期をもった振動形式を生ずる。地下爆発にともなって生じる振動の応答形式に関する一般的な結論（§ 6.37）はネバダ試験場に近くの種々の状態で得られた多くの地面の動きの記録から得られたものである。

**6.92** 応答スペクトルは本質的に核出力・爆発深度、そして爆発点からの距離に依存する実際の地面の動きから計算される。しかしながら、一度地震波が通った地質では增幅され、建造物が立っている地面ではかなりの影響を受ける。

ネバダ試験場での地下実験で積み重ねられた地面の動きに関するデータから、かなり妥当な法則がわかり、このことから、応答スペクトルもわかつてきた。他の地域での爆発に関してはネバダの結果を本質的に計算の基礎とすることができる、それに地質学的修正がなされる。

**6.93** もし、建造物の特性が解っていたら、その様な方法で経験した技術者なら応答スペクトルから地下実験で建造物が被害をうけるか、どうか予言することができる。これらの予言を作るには単一振動周期と振動減少比とともに応答スペクトルが一次的な地震計に適用されることを思い起さなければならぬ。そのような地震計は同じ震動周期と振動減少比をもつた、単純で理想化された構造であると概ね見なされる。実際の状態ではしかしながら建造物は単一の振動周期をもつた理想的な構造としてはふるまわず更に0.05という値は普通の平均値であるにもかかわらず振動減少比は変化する。結局、損害見積において構造の細部や、異なった振動周期やタイプ・年代・建造物の状態などを含んだ幾つかの変数についての誤差が見積られなければならない。

## 第7節 地下構造物への負荷

### 全般的な考察

**6.94** § 6.12に示された地表面又はその近くでの核爆発から生じる2つのタイプ（空気のたたきつけや空気が早く走り追越す）は、地表面の空気爆発波で追跡できる。ただし、クレータの近傍は直接地面の動きといっしょになってかなりの損傷機構を提するであろう。例えば、1 K T の地表面爆発は半径49~82フィートの爆破口を残す（Fig 6.72 a）。しかし、自由空間での空気爆発の過圧すなわち地表面から爆破口半径の2倍離れている爆発で建造物がない場所の過圧は、数千ポン

ド / in<sup>2</sup>になり（図—3.73 a）、爆破口半径の 5～6 倍の距離でも 100 ポンド / in<sup>2</sup>以上の圧が残る。地面の動きは地表面ゼロで生じそれは比較的に小さい。したがって建造物がそう地下深く作られていなかったら、すなわちその地面からの距離が地表面ゼロからの距離と同等だとしたらその建造物への影響は空気衝撃を考えれば良い。浅くうめられた建造物の場合空気爆発過圧はかなりの負荷を与えるであろう。一方深く埋められた建造物は衝撃が柔らげられることが考えられる。

**6.95** 埋められた建造物に対する負荷を推測するためには地質を土か岩石かに区分して考えなければならない。土の場合、多くの建造物は負荷に耐えて残るが岩石では媒体である岩石そのものがかなりの負荷を運んでくる。

### アーチング効果

**6.96** もし埋められた建造物が囲りの土と同じくらい壊れ易かったら核爆発で生ずる空気爆発での建造物への負荷は爆発波により土中に生じた自由圧力により決定される。もし建造物強度が土より大きかったり、小さかったりした場合建造物への圧力は土中に起こる圧力より大きくなったり、小さくなったりする。

**6.79** 土と埋められた建造物との間での反射による圧力の増加は実験の結果、ない事がわかった。したがって、建造物が少なくとも土と同じくらい壊れ易かった場合、その距離に関係なく自由空間圧は建造物へ働く上限圧であると思われる。もし建造物が周りの土より壊れ易かった場合、埋められた建造物への圧力は、与えられた深さでの自由空間圧よりかなり低くなる。この場合、自由空間圧が最初に働きかけた時点で建造物は土から離れて、アーチング効果が生じる。つまり爆発で生じた圧が建造物を通りぬけるより建造物の周りの圧が伝達するのを土の成分が助成をすることになる。いわゆる“アーチング”は負荷の過程に属するが、これは建造物の抵抗性を強めるファクターとして取扱われる。

**6.98** 土中での土媒体の負荷伝達のし易さがアーチングを形成する。アーチングの程度は建造物の形（1）と埋められた部分とそうでない部分の比率で決定される。アーチやドームの様なシェルは土中でのアーチ形成をかなり増幅し長方形はそれより小さくなる。

**6.99** 埋められた構造物にかかる過荷重の量が破壊力を代表するものである。したがって衝撃に耐えて残存しようとする建造物の強度は建造物の深さが深い程少なくてすむ。逆に建造物への過荷重を増加させる効果は、かなりの面においてアーチングと反対の効果を考えると良い。

#### 埋められた長方形建造物への負荷

**6.100** 地表面、又は浅い地下爆発によって生じる浅く埋められた長方形建造物又は箱形建造物への空気爆発による負荷の取扱いは、埋められた建造物への負荷と同様である。§ 5.156に記述された手順が適用できる。しかし、地表での過圧は除かれ、これは§ 6.81に記述された方法で得ることができ、建物の中の柱は、建造物の抵抗力を増加する。

#### 埋められたアーチやドームへの負荷

**6.101** 埋められたアーチやドームへの負荷はかなり複雑である。というのは地表面からの高さが連続的に変化するし、又非常に浅い時は当初負荷の不均一性が無視できないからである。爆発波が埋められたアーチやドームを通過する時は側面が閉鎖されている場合、爆発点から遠い方に早く負荷がかかり、その結果不対象なひずみ（又は曲り）の応答形式が生じる。更に爆発波に建造物が完全に巻込まれた後では放射状（内部方向）の負荷は非常に対象的であるが一様ではない。地表面に近い自由平面の垂直方向に対する圧力に相当する頂上の圧力は、その結果最大となる。頂上から先の放射状圧は最少となる。ここで、もしアーチやドームが中心角180°の場合圧力は自由平面での横方向の圧力に相当することとなる。このように対象的な不均一負荷が対象的なひずみの応答形式を高めることとなる。これら2つのひずみ形式に加えて建造物は直接の圧力も受ける。

**6.102** ひずみはかなり著しいためこれらのモードに相当する変形が生じる。このような変形が生じるために周囲の土壤の抵抗力が大きくて土壤のウェッジが建造物の破壊を防げなければならない。この様に土壤の抵抗力は変形を制限する傾向にありひずみをかなり防ぐ。浅く埋められた建造物ではひずみ形式は重要であるが、これらは深さによりかなり早く減衰する。というのは土壤の抵抗力が

同時に急速に増加するからである。

**6.103** 前にも記述したように建物の土台はそれに近接した土壤を動かさないようと思われる。もし土台が地下に横たわっている物質をつき通していた場合、アーチやドームへの放射状の圧力はわずかに減少するであろう。

## 第8節 地上衝撃による損害

### 地下構造物

**6.104** 地下構造物自身に対する損害は、§ 6.112の内容に記述されている地下衝撃の効果とは性質を異にするが、これは非弾力性変形もしくは崩壊という用語で容易に定義することができる。十分に埋設されたアーチやドームについての猛烈な損害は弾性によるかあるいはひんぱんに起こる非弾性的なゆがみのいづれかによる崩壊が原因である。地表面上に近ければ、その変形は主としてたわみによるものであろう。光線の損害は、人員装備の作戦能力の局部損傷に関連がなければ殆んど無意味なものである。コンクリート構造物に関する普通の構造物の損害はおびただしい割れをともなう変形であると規定される。そのような変形はコンクリートにおいて降伏点即ち、展性率 1 – 3 以上よりわずかの応断力の程度に一致する。これはその降伏が弾性的ねじれよりはむしろ非弾性変形によるものと推定される。これはおそらく適当に設計された耐爆性構造物における場合なのである、もし降伏が弾性ねじれによるものであれば、普通の損害は起きることはできない。

**6.105** そのような鋼鉄製構造物についての損害の成因は、はっきりとしたところは判らないが、鋼鉄製のアーチ及びドームに関して、普通の構造物の損害は減衰展性要因という用語でまた規定することができる。地下の耐爆つまり箱型構造物について、アーチやドームに対する、ある程度の損害も適用されるが、変形の機構は異なるものかもしれない。箱型の構造物において主な応答は、屋根、もしくは基礎厚板のたわみ・壁・柱の直接の応力或いは座屈である。しかし、重損

害はこれら機構のいずれかによる大きな変形又は崩壊によってまた特徴づけられる、中程度の損害はコンクリートの破壊や小さな永久的なたわみに関連ある構成物の変形を意味する。そして軽損害は、人員器材に対する衝撃効果を除いては事実上、意味がない。

**6.106** 非常に低出力の兵器について、爆破口（図-6.70）の周囲の塑性層の範囲内になければ、埋設された構造物に対するおびただしい損害を生じさせることは困難である。いくつかの特殊な構造物の型式、例えばパイプライン及び高度の抵抗性の鉄筋コンクリートで補強された築城物のいくつかを例外として、地表面での爆風圧によって生ずる土圧は埋設構造物に対して、損害の主たる原因となる。

**6.107** 衝撃破の1倍半に匹敵するスパンをもった地下構造物は衝撃で被害を受けるであろうと予測される。この予測は実際の経験により証明されている。構造物の運動は当初、衝撃波の通過の際の運動と密接な関連がある。言い換えれば、土壤粒子の加速度にある尖頭水平又は垂直成分があるならば、小型の地下構造物にも殆んど同じ尖頭加速成分があるものと予測される。

**6.108** 地下構造物に対する、衝撃損失はもっぱらコンピューターコードで計算される。手計算用の図と表が開発されてきたが、そのような計算は時間の消費であり、その結果はせいぜい近似的なものである。浅い場所の爆発の程度は明らかに爆破口半径と相関づけられるということが根拠となっている。この関係のいくつかの例は、中程度の深さの地下構造物について図-6.108に掲載されており、最低部をおおっている深さとスパンに対する比は単一のものより幾分大きい構造物として規定されている。爆破口径そしてここでの損失距離は（§ 6.72）に記述されている土壤のタイプにより変わる。スパンに対するおおいの深さの比が単一のものよりはるかに大きいものである。深く埋設された構造物は殆んど損失が軽くて済むであろう。

表-6.108 中程度の深さの地下構造物に関する損失の基準

構造形式	損傷程度	表面ゼロから の距離	損害の性質
比較的に小さく重い、よく設計された地下構造物	重損害	1 $\frac{1}{4}$ 明瞭な爆破口半径	崩壊
	軽微	2 $\frac{1}{2}$ 明瞭な爆破口半径	僅かにヒビ割れ、もろい端末の接ぎ手が重損害
比較的長く柔軟な構築物 例：埋設パイプライン タンク等	重損害	1 $\frac{1}{2}$ 明瞭な爆破口半径	変形と破裂
	中程度	2 明瞭な爆破口半径	僅かな変形と破裂
	軽微	2 $\frac{1}{2}$ から 3 明瞭な爆破口半径	接ぎ手の破損

6.109 トンネルと地下鉄は爆破口の範囲内で破壊され、この区域の外側で損害を受けるけれども、特に堅い岩盤に穴をあけ、たわみを最小限にするために表面を仕上げたところは、地上の衝撃に非常に抵抗性がある。岩盤は弾性媒体であるため圧力波を十分よく伝達し、この波がトンネルの壁に当たると、岩と空気の中間層<sup>(5)</sup>から張力波（負圧）が反射される。土が媒質の中でさえも、トンネルや地下鉄は無事である。柔軟性を有する構造物は大きな動きのない大地の圧力の利用によって損害に耐えるであろう。しかし土中における建造物はできれば水の表面によるべきである。

6.110 ある状態で反射された引張応力が岩の引張り強度を越えるとき、その結果、トンネル壁の岩の降伏により割れが起こる。割れの厚さは圧力波の強さ、持続時間・圧力波形・トンネルの大きさや形及び岩の物理的性質に依存する。

6.111 構造物は更に強く補強されるが、そのためには上部に補強したりその周りを盛り土にしなければならない。

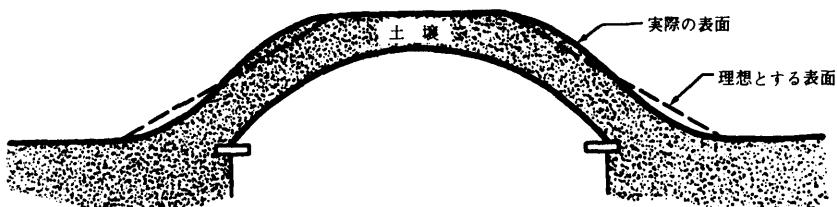


図-6.111 盛上ったアーチの形状

理想的な表面は実際の表面に等しい一定の傾斜の表面である。もし、理想表面の傾斜が14°以下なら、構造物は埋設するよう処理され、前述の埋設されたアーチやドームの議論が適用される。もし理想表面の傾斜が14°以上もしくは構造物がプラスチック帯の上に置かれたなら全体の損害は爆破により決定され、そしてこれは、4章・5章での議論に従うものである。

### 装置の脆弱性

**6.112** 構造物は地面の動きから何ら損害を被らないが、その中にある、例えば機械とか他の器材は衝撃で操作不能となる。そのような器材は適当な衝撃のマウントにより非脆弱となる。衝撃マウント（衝撃分離器）は通常ゴムのような弾性物質又はスプリングから成る。その材料は衝撃により急速に加えられたエネルギーの多くを吸収しそれを緩やかに放出し、すえつけられた器材を保護する。

**6.113** 震動・振動あるいは器具の破片の落下により、技術者は全ての運動の種類に対する器材の脆弱性を見積りできる。その結果は通常、器材が殆んど脆弱性である自然振動数及び猛烈な損害のうち50%の確率に関するその波数で耐えられ最大加速として表わされる。マウントをつけたりつけなかつたりして器材の4等級に関するこれらのパラメータの値のいくつかの例は図-6.113に引用されている。衝撃マウントは自然周波数の感度を増大させる機能を果たすことが判る。つまり期間を増大、その周波数で猛烈な損害の50%の確率の加速を増加する。

表-6.113 典型的な装備品目についての振動数と  
加速度に対する損害

級	品 目	衝撃に対する総評価	典型的評価	
			自然振動数 (サイクル/秒)	損害を受け易い 加速度 (g)
A	重機械類—自動車、 発電機、変圧器等 (>400 lb)	無	10	20
		有	3	20
B	中程度及び軽機械— ポンプ、コンデンサー、 空調機、ファン、小型 モータ (<1,000 lb)	無	20	40
		有	5	80
C	通信器材、リレー、 電子装置の回転式電 磁ドラムユニット等	無	25	7
	有	6	66	
	貯蔵用バッテリー、 配管とダクト作業用	無	20	70
	有	5	150	

6.114 特殊な器材の部品が、特別の地表面の運動により損害を受けるか否かは、その地表面の運動に関する応答スペクトルに関する図-6.113のデータから見積られる。もし器材の周波数に対応する応答スペクトルに尖頭加速度が脆弱加速度より小であるならばそのとき、器材は特定の地面の動きにより、おそらく損害をうけないであろう。これに反して、もし応答スペクトルが器材に損害を受けないような指示があるならば、衝撃マウントは加えられまたは改善されねばならない。

## 第9節 地下水破裂の技術的考察

### 衝撃の特性

6.115 理論的な処理と、水中での高爆発的荷重の爆破に関連する測定を結びつけると、核爆発による地下水の衝撃波のいくつかの特有な性質が計算される。水中で様々なエネルギーを生ずる衝撃波の尖頭圧は図-6.115に3,000 psi以下の圧力

に関する斜線距離Rの関数として、またさらに高圧に関する大規模な距離R/W%の関数として示される。データは等速性の水、つまり反射もしくは屈折がない水に適用されるものである。

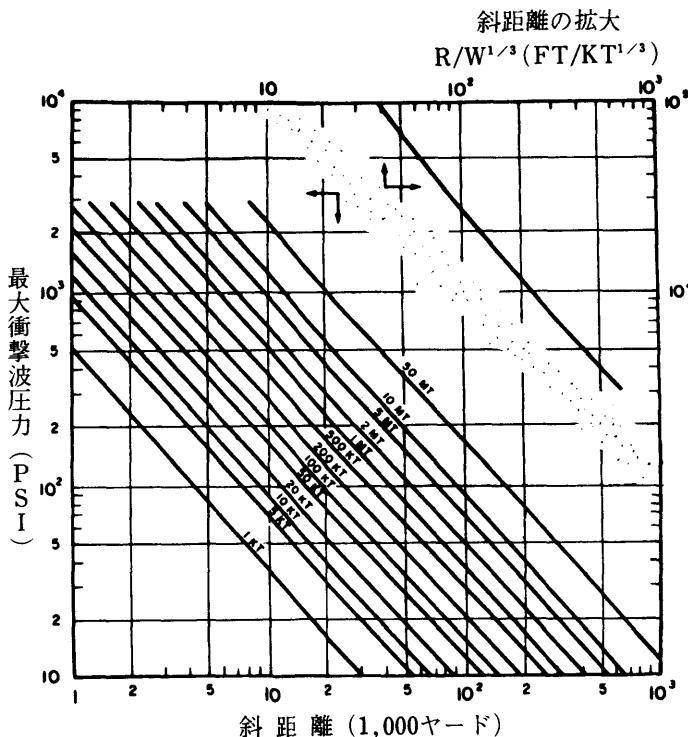


図-6.115 深い等速水流中における斜距離との関数としての衝撃波の最大圧力

**6.116** 時間に対する、水圧の減少は、図-6.116 a 及び b より得られる。前者は様々な出力についての斜距離により時間定数  $\Theta$  を与え、後者は換算時間  $t/\Theta$  で、 $P(t)/p$  の変化を示し、ここで云う  $P(t)$  は観測点から衝撃波前面の到達後の時間  $t$  における圧力であり、 $P$  はその地点における尖頭圧である。時間定数は衝撃圧が  $1/e$ 、つまり、ピーク値の 37% に減衰したときの時間である（こういう方法で定義される時間定数の利用は、圧力が指数関数的に減少するという意味にとってはならないし、また初期の時間以外であってはよくない）。時間定数が長く

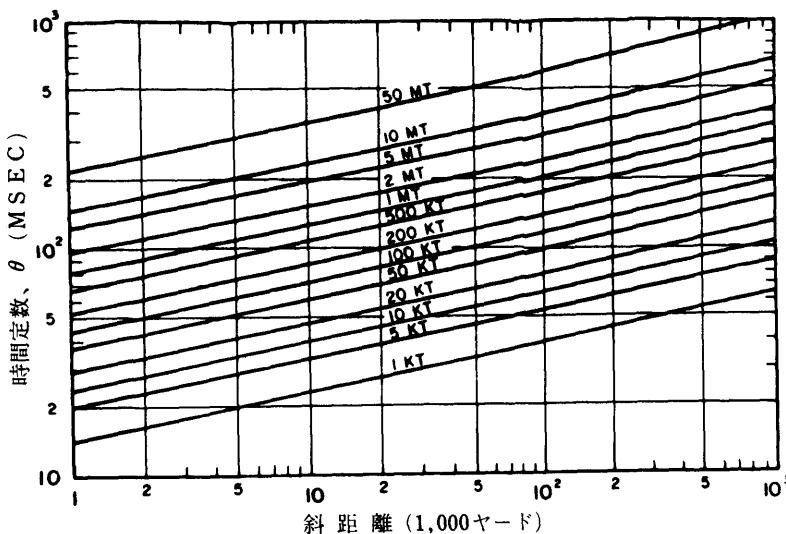


図-6.116 a 深い等速水中における斜距離の関数としての衝撃破時間定数

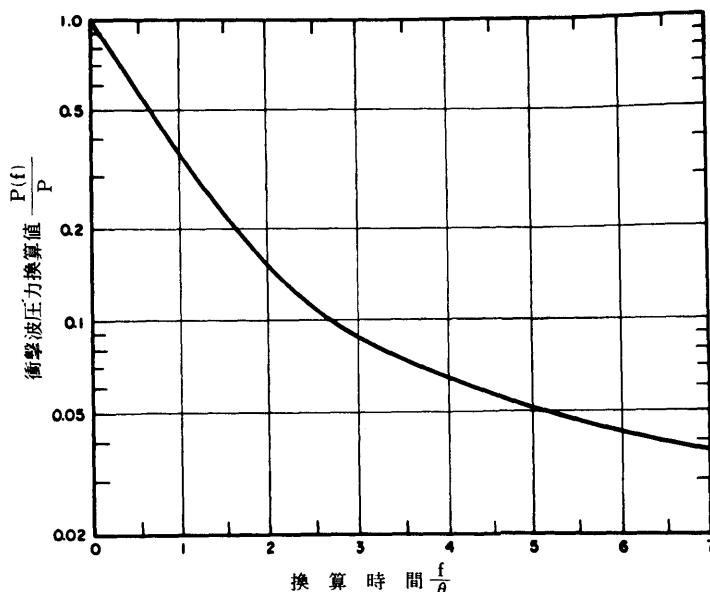


図-6.116 b 深い等速水中における核爆発で生じる水の衝撃波に関する圧力と時間の関係：Pは最大圧力  $P(t)$  は  $t$  時間後における衝撃波面の値である。

なればなるほど、水の衝撃圧はゆるやかに減衰し、衝撃波の耐久性はエネルギー出力と爆発点からの距離につれ増大する。図-6.116 a のデータは、与えられた出力の地下水の爆発から、特定の斜距離における圧力の時間とともに減少を示す曲線を組みいれるのに用いられる。曲線の下の部分は水の衝撃波の衝撃圧を示し、§ 3.59 に定義された空気の過圧の衝撃に類似している。

**6.117** 浅い水中や、深い水中における、ある環境下では、主な地下水の衝撃波は地表面や底面の効果により修正される（§ 6.41）。水は空気の爆発の反射より、しばしばよく音響を発する。通常、適当な条件下で、底面の影響は底面を同出力の想像上の爆発と置きかえることにより理想的に取り扱われるというのは、現実の同出力の爆発は表面で爆発するときの距離に等しい底面以下にあるからである。

**6.118** 実際に、底面の状態、例えば泥・ゆるんだか詰め込んだ砂・堅い岩のようなものは、反射圧の大きさに著しい効果をもたらす。主な衝撃による移動距離や目標に対する反射波もまた圧力に影響を与える。最初の衝撃の到達距離と目標に対する反射波は圧力に影響を与える。爆発と目標物がともに底面近くにあると、目標での反射波は当初の圧力より大きいか、等しいか小さいかのいづれかであろう。しかしそれぞれのケースにおいては、もちろん空中の境界面から反射される負圧は絶対に見過されてはならない。最初の衝撃後、反射波の到着時間は波が水中において音速で到達すると仮定すればそれぞれの到達距離から見積られるであろう。図-6.115と図-6.11 a 及び b の曲線は深い等速水での地下爆発から最初の衝撃波に関するパラメータを示したものである。図-6.115は種々の出力に関する斜線距離の関数  $R$  である尖頭圧力  $P$  を示しており、尖頭圧力は 3,000 psi 以下のものと 3,000 psi 以上の尖頭圧に関する斜線距離  $R/W^{1/2}$  の関類を示してある。種々の出力の斜線距離の関数とし、この時間定数  $O$  の値は、図-6.116 a に示されており、図-6.116 b は換算時間  $t/O$  の関数としての換算（もしくは標準化）圧力を  $P(t)/P$  で示している。ここで  $P(t)$  は、時刻  $t$  における衝撃波である。

図に示されるその他のものについて、近似曲線間の直線挿入を用いる。例えば深い水中で 50 K T の爆発から与えられると (a) ピークの衝撃圧力と (b) 爆発点から

4,000ヤード離れた距離における衝撃波の到達後0.1秒の圧力  $p(t)$  を求める。解は図-6.115から深い水中での50 K Tの爆発から4,000ヤードの斜線距離でのピーク衝撃波Pは、ほぼ470 psiだと解る。(b)図-6.116 a から時間定数は50ミリ秒(即ち0.050秒)である。ここで  $t/O = 0.1 / 0.050 = 2$ 、図-6.116 b から  $t/O = 2 p(t)/p$  の値は約0.15である。ここで  $P(t) = 470 \times 0.15 = 70 \text{ psi}$  が答えである。

## 表面波

6.119 表面ゼロから離れた点で観測するとき、§ 6.54で示される一連の波に関する。理想面への置き換えは、図-6.119に示される。

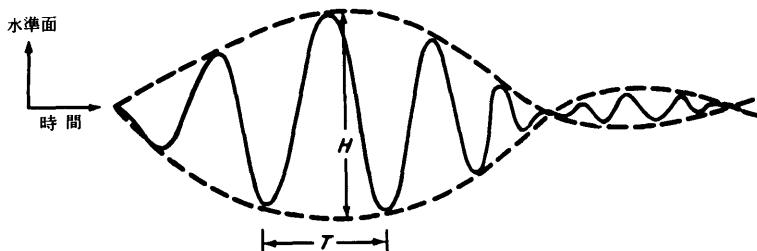


図-6.119 表面ゼロのある距離で観測された爆発により生じた連続波

深い水中で波の強度は包囲波のピーカーとピーカーの高さつまり  $H$  で示される。この高さが表面ゼロからの距離  $R$  とともに減少する場合では、次の関係式により約35%の精度まで表わされる。

$$H = 40,500 \frac{W^{0.54}}{R} \quad (6.119 \cdot 1)$$

ここで示される  $H$  と  $R$  はともにフィート、出力  $W$  は、TNTに当価な KT である。この式は、表面波が生ぜられる水の深さ  $d$  W フィートで範囲は、 $850W^{0.25} \leq d \leq 2,256W^{0.25}$  にあることを示し、ここでの低限は気泡(§ 2.86)の最大長径である。この関係は水の中での爆発では有効である。ピーク波の時間  $T$  は、表面を特微づけるパラメータである長さである。深度ある水中での化学的爆発の外挿法は大体これらの量・ $L = 101W^{0.288}$  フィート・ $T = 14.1W^{0.144}$  秒である。ここにおける  $W$  は、KT である。

**6.120** 長さは連続波が浅瀬の水に到達する場合に起きる変化を決定する際の要素である。もし水の深さがおよそ  $L/3$  より小であれば、波の速度が増加するにつれそれに引き続く連続波は一団となる。期間  $T$  は同じままである。当初、小さくなつた後、高さ  $H$  は波が走っている水が浅くなるにつれ増加するという事実が同じか、またはそれ以上に重要である。底斜面が浅いため底の摩擦が波の断絶前に波を消失させることができないならば、波の高さに関連ある波高は波が浅瀬に打ち寄せられ、不安定又は断絶するにつれ増加し続ける。

**6.121** BijhjBaker のように浅い水における爆発は、深い水における同出力の爆発より小さなエネルギーを水中に伝播する。その結果、浅い爆発 ( $dW \leq 100W^{0.25}$ ) の表面ゼロからの距離  $R$  との間の近似関係は、 $H = 150 d W \frac{W^{0.25}}{R}$  であり  $H$  と  $R$  の単位はフィートである。

### 水力構造物に対する損害

**6.122** 空中爆発のような場合は、水の衝撃の結果生ずる地下水の構造物に対する損害は、構造物の寸法と、ある特有の時間に依存する。重要なと思われる特定の時間は、一方では (§ 6.116) の衝撃波の時間定数であり他方では、正常（もしくは弾性）な応答時間及び構造物の回折時間である。すなわち構造物の寸法の大きい順に距離を伝播する衝撃波の必要とする時間である。地下水の構造物が表面近くでの出来事において (§ 6.43)、しゃ断時間は状況いかんでは重要なであろう。

**6.123** もし圧力波の時間定数が、構造物に特有なしゃ断時間に比し大きければ、すなわち水の衝撃波が相対的に長い耐久性をもつならば衝撃の効果は、突然加えられる定常（あるいは静的）圧力のものと同じである。これらの環境において、ピーク圧は損失の適当な基準である。そのようなものは小さく堅固な地下水の構造物のような例であろうというのは、それらは特有な短い時間を有するものと期待されるからである。

**6.124** 大きく堅固な地下水の構造物に関し、ここでの衝撃波の持久性は構造物の特有な時間に比し短く衝撃波の衝撃は損失を決定する際に重要となろう。これ

に関連し、もし、空中の界面からの負の反射波が目標物に到達し最初の衝撃波の到達後まもなくしゃ断を引き起こすならば、衝撃及び損害の大きさはさらに減じられるであろう。

**6.125** もし大きな地下水の構造物が、衝撃面での衝撃の結果生ずるような実際に相当の永久（塑性）変形を受け入れることができるならば、損害は本質的に衝撃波のエネルギーに依存していることが判る。もし、構造物が表面近くならば、しゃ断効果は損害を引き起こすに有効かつ相当な衝撃エネルギーを減じさせるであろう。

参 照 文 献

- BARASH, R. M., and J. A. GOERTNER,** "Refraction of Underwater Explosion Shock Waves: Pressure Histories Measured at Caustics in a Flooded Quarry," U.S. Naval Ordnance Laboratory, April 1967, NOLTR-67-9.
- CARLSON, R. H., and W. A. ROBERTS,** "Project SEDAN, Mass Distribution and Throwout Studies," The Boeing Company, Seattle, Washington, August 1963, PNE-217E.
- CIRCEO, L. J., and M. D. NORDYKE,** "Nuclear Cratering Experience at the Pacific Proving Grounds," University of California, Lawrence Radiation Laboratory, November 1964, UCRL-12172.
- COLE, R. H.,** "Underwater Explosions," Dover Publications, Inc., 1965. (Reprint of 1948 edition, Princeton University Press.)
- DAVIS, L. K.,** "MINE SHAFT Series, Events MINE UNDER and MINE ORE, Subtask, NI21, Crater Investigations," U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, March 1970, Technical Report N-70-8.
- ENGDAHL, E. R.,** "Seismic Effects of the MILROW and CANNIKIN Nuclear Explosions," *Bull. Seismol. Soc. America*, 62, 1411 (1972).
- FITCHETT, D. J.,** "MIDDLE COURSE I Cratering Series," U.S. Army Engineer Nuclear Cratering Group, June 1971, Technical Report 35.
- FRANDSEN, A. D.,** "Project CABRIOLET, Engineering Properties Investigations of the CABRIOLET Crater," U.S. Army Engineer Nuclear Cratering Group, March 1970, PNE-957.
- \***GLASSTONE, S.,** "Public Safety and Underground Nuclear Detonations," U.S. Atomic Energy Commission, June 1971, TID-25708.
- HEALY, J. H., and P. A. MARSHALL,** "Nuclear Explosions and Distant Earthquakes: A Search for Correlations," *Science*, 169, 176 (1970).
- KOT, C. A.,** "Hydra Program: Theoretical Study of Bubble Behavior in Underwater Explosions," U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, April 1964, USNRDL-TR-747.
- MALME, C. I., J. R. CARBONELL, and I. DYER,** "Mechanisms in the Generation of Airblast by Underwater Explosions," U.S. Naval Ordnance Laboratory, September 1966, Bolt, Beranek and Newman Report No. 1434, NOLTR-66-88.
- NEWMARK, N. M., and W. J. HALL,** "Preliminary Design Methods for Underground Protective Structures," University of Illinois, June 1962, AFSWC-TDR-62-6.
- NEWMARK, N. M.,** "Notes on Shock Isolation Concepts," Vibration and Civil Engineering Proceedings of Symposium of British National Section International Association for Earthquake Engineering, p. 71, Butterworths, London, 1966.
- PHILLIPS, D. E., and T. B. HEATHCOTE,** "Underwater Explosion Tests of Two Steam Producing Explosives, I. Small Charge Tests," U.S. Naval Ordnance Laboratory, May 1966, NOLTR-66-79.
- \***Proceedings of the Second Plowshare Symposium, Part I, Phenomenology of Underground Nuclear Explosions,** University of California, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, May 1959, UCRL-5677.
- \***Proceedings of the Third Plowshare Symposium, Engineering with Nuclear Explosives,** April 1964, University of California, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, TID-7695.
- \***Proceedings of the Symposium on Engineering with Nuclear Explosives,** Las Vegas, Nevada, January 1970, American Nuclear Society and U.S. Atomic Energy Commission, CONF-700101, Vols. 1 and 2.

次頁に続く

- \*RODEAN, H. C., "Nuclear Explosion Seismology," AEC Critical Review Series, U.S. Atomic Energy Commission, September 1971, TID-25572.
- ROOKE, A. D., JR., and L. K. DAVIS, "FERRIS WHEEL Series, FLAT TOP Event, Crater Measurements," U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, August 1966, POR-3008.
- SNAY, H. G., "Hydrodynamic Concepts, Selected Topics for Underwater Nuclear Explosions," U.S. Naval Ordnance Laboratory, September 1966, NOLTR-65-52.
- Special Papers on Underground Nuclear Explosions at the Nevada Test Site, *Bull. Seismol. Soc. America*, **59**, 2167 *et seq.* (1969).
- Special Papers on the CANNIKIN Nuclear Explosion, *Bull. Seismol. Soc. America*, **62**, 1365 *et seq.* (1972).
- VAN DORN, W. G., B. LE MÉAUTÉ, and L. HWANG, "Handbook of Explosion-Generated Water Waves Vol. I—State of the Art," Tetra Tech, Inc., Pasadena, California, October 1968, Report No. TC-130.
- VAN DORN, W. G., and W. S. MONTGOMERY, "Water Waves from 10,000-1b High-Explosive Charges," Final Report Operation HYDRA II-A, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, June 1963, SI063-20.
- VELETSOS, A. S., and N. M. NEWMARK, "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions," University of Illinois, 1960, III. U.S.R.S 219.
- VELETSOS, A. S., and N. M. NEWMARK, "Response Spectra Approach to Behavior of Shock Isolation Systems," Vol. 2, Newmark, Hansen and Associates, Urbana, Illinois, June 1963.
- VORTMAN, L. J., "Craters from Surface Explosions and Scaling Laws," *J. Geophys. Res.*, **73**, 4621 (1968).