

爆薬の殉爆についての一考察

田中 克己*・疋田 強*

本論文では C. L. Mader の SIN コードにより GX-1 による花崗岩中の穿孔発破において隣接孔の GX-1 にどのような衝撃圧が加わるかという事を解析した。その結果、衝撃波が高压のままかなり長い間持続するため GX-1 は衝撃波が入射した時、LVD による殉爆を起こすか、又は LVD を起こさない場合、GX-1 が鈍感化して起爆を行うとき、不発となる可能性がある。又起爆索子、留管等の保護具についても場合によっては効果がない事もありうる。

1. 緒 言

爆薬の起爆機構については色々の説がある。しかし一部の均一系爆薬を除いて、ほとんどの爆薬には確固とした理論がない。特にここで考察する GX-1 の類は LVD (低速爆轟) という現在でもよくわかっていない現象を生ずる。したがって特に爆薬の安全性という問題では研究の価値は充分あるが、実際の発破でどうなるかと言ふ事を予想することは現状では不可能に近い。本報告はこの事を念頭に置いた上で、花崗岩中を伝播する衝撃波により与えられる GX-1 (未反応) 中の衝撃圧を解析し、今までの実験的事実から殉爆の問題について考察したものである。

2. 解析に使用したモデル

穿孔発破を厳密に解析するには、3次元ないし2次元計算を行う必要があるが、計算量或いは、岩石のような塑性波の他に弾性波を生じる物質における衝撃波の解析の問題から非常に難しい。そのため次のような一次元モデルをとる。

図1において右側に示したものは G. I. Taylor¹⁾ に

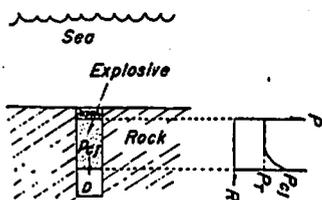


図1 穿孔発破の一次元解析モデル右図に Taylor or Wave の波形を示す。P_{CJ} は爆轟圧、P_T は静止した爆轟ガスの圧力

よる爆轟波の自己相似解である。穿孔発破のような起爆では C-J 爆轟圧をとるより、Taylor 波圧力、P_T のような静止した爆轟ガスの圧力をとる。実際には P_T より少し高い圧力にした方がよい結果を与える。この P_T を図2の HE (爆薬) の初期圧として球面波モデルにより解析する。

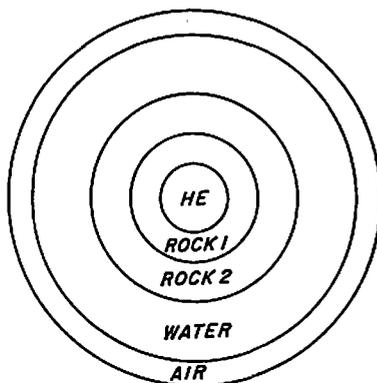


図2 球面波又は柱面波モデルの概略図、HE (爆薬) には図1における P_T の圧力を持つ爆轟ガスをおく

GX-1 号では初期密度を 1.50 g/cm³、爆轟速度を 6.50 km/sec とすると P_T は 90.8 kbar* になる。

3. GX-1 の感度

種々の物質から GX-1 へ伝えられる衝撃波の圧力はインピーダンスマッチ法により求められる。図3に示した圧力-粒子速度の Hugoniot 図で、物質A中の圧力、粒子速度をA点で表わすと物質B中へ入射する衝撃圧はA点から傾きが $\rho_{0A} D_A$ の直線をひいて物質Bの Hugoniot との交点を求めることにより決まる。

昭和48年6月10日受理

* 東京大学工学部反応化学科、文京区本郷 7-3-1

* 注、1 kbar ≡ 1000 気圧。

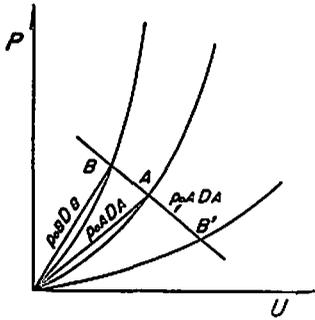


図3 インピーダンスマッチ法。(圧力-粒子速度図) 衝撃波の入射側を B 又は B' とする。A の状態から物質 B 又は B' へは A 点を通り $\rho_{0A}D_A$ の傾きを持つ直線と $\rho_{0B}D_B$ 又は $\rho_{0B'}D_{B'}$ の傾きを持つ直線の交点で表わされる衝撃波が与えられる。

ρ_0 は初期密度, D は衝撃波速度を表わし, $\rho_0 D$ を衝撃インピーダンスという。GX-1, 花崗岩, PMMA, 水の圧力-粒子速度 Hugoniot を図4に示す。花崗岩は, McQueen²⁾, PMMA は Liddiard³⁾, 水は Walsh⁴⁾ が測定したものである。図4において, A点は, 図1の GX-1 の爆轟状態, つまり圧力が P_T

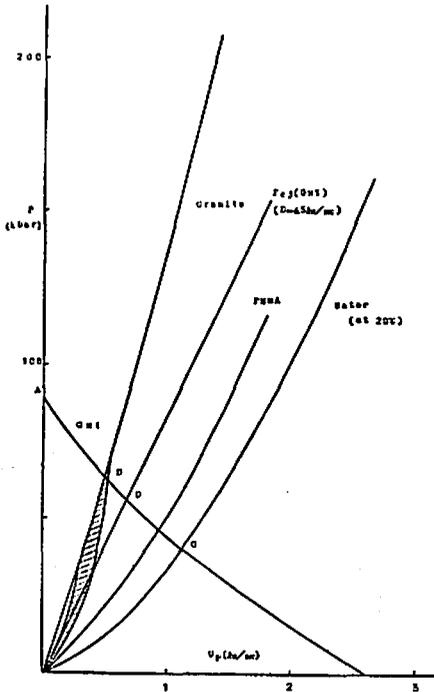


図4 花崗岩²⁾, 未反応 GX-1, PMMA³⁾, 水⁴⁾ の圧力-粒子速度 Hugoniot, A点は図1における P_T の状態を示し, 各物質へは B, C, D の衝撃波が GX-1 の爆轟により与えられる。花崗岩 (Granite) において斜線部では相転移がおこる。

(= 90.8 kbar), 粒子速度 0 の状態を示す。B, C, D 点は各, GX-1 の爆轟により花崗岩, 水, 及び GX-1 に入射する初期の圧力, 粒子速度である。なお, GX-1 の Hugoniot は測定がないため爆轟速度と初期密度の積の傾きをもつ直線で近似してあるが, この GX-1 の Hugoniot が正しくないとしても後述するように GX-1 に伝えられる衝撃圧は正しく評価できる。

東京工業試験所において実施された GX-1 のギャップテストによれば GX-1 の起爆は圧力 2.5kbar 以下の衝撃波が PMMA から伝えられる時に LVD をおこす⁵⁾。しかしギャップテストでは低圧の値, つまりギャップ長が長い時の限界起爆圧値はあまり正確ではない。又, 産業火薬会の実験によると水圧が 3 から 5 気圧のとき GX-1 は, 圧力 2kbar の水中衝撃波により起爆され, GX-1 のようなゼラチン爆薬の感度は水圧が大きくなると鈍感になっている。本報告は, 水深 30~50m での発破による殉爆を考察するため, GX-1 の限界起爆圧を 4kbar とする。しかしはじめに述べたように, GX-1 は LVD をおこすので 4kbar 以下では殉爆をしないと断言する事はできない。これは入射衝撃圧だけでなく, 衝撃圧の持続時間が爆薬の起爆に大きな影響を興えるからである。従って実際は 2 から 4kbar で LVD がおこると考えられる。

3. 解析結果

図5に C. L. Mader の SIN コード⁶⁾ を用いて, 花崗岩中を伝播する衝撃波形を示す。図において鎖線は解が不安定になった事による偽の振動があらわれた

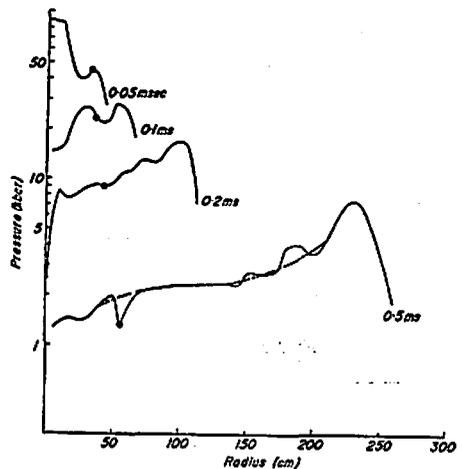


図5 岩石中を伝播する衝撃波。(SIN コードによる解析結果) 鎖線は解が不安定になったため補正したもの。

* 注, 一次元ラグランジュアン流体力学計算を差分法により行うもの。

ため、実際に近い滑らかな波形に修正したものである。解析は岩石を水などと同じ塑性モデルによって行ったもので、実際は弾性波を含む。弾性波を含めた計算は現在検討中であるが、傾向としては図5よりピーク圧が低く、パルス間隔は長いものになっている。図6に換算距離とピーク圧の関係を示す。図6には弾性波による球面波と柱面波の圧力と距離の関係もあわせて示す。弾性塑性モデルによる岩石中の衝撃波についてはここでは省略するが、Persson ら⁷⁾の花崗岩中の柱面波に対する解析とほぼ一致している。

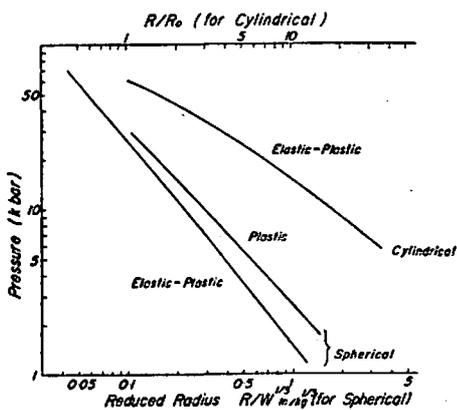


図6 岩石中の衝撃波におけるピーク圧と換算距離の関係、柱面波は上方の横軸 R/R_0 (R_0 は薬径) で表わし、球面波に対しては $R/W^{1/3}$ ($m/kg^{1/3}$) で表わす。

図5の塑性モデルによる解析結果を用いて図4の花崗岩と、GX-1の Hugoniot より GX-1 中の衝撃圧を求めると、GX-1の限界起爆圧を 4kbar とすれば、殉爆をおこさないためには、換算距離 $R/W^{1/3}$ ($m/kg^{1/3}$) を 0.8 以上にとる必要がある。

次に弾性-塑性波により GX-1 に与えられる衝撃圧を SIN コードにより計算した結果を図7に示す。図7は GX-1 26.7kgの爆薬による花崗岩中の球面波について解析したもので、GX-1は爆源から2m離れたときのものである。最初約 1kbar の衝撃波が GX-1 に誘起されるが、この衝撃波が次の花崗岩へ入射していく時、1.6kbar の反射衝撃波が誘起されこれが約 100 μ sec の間続き、結局岩石中の衝撃圧と同じになる。弾性波の場合パルス間隔が長いので静圧的な効果を受けたものである。

4. 一孔当りの薬量と孔間距離

図6に示したように花崗岩中に 4kbar の衝撃波が発生するのは塑性波モデルで $R/W^{1/3}$ が 0.8 のときである。これは薬量 20kg で安全距離が 2.2m となる。又、弾性塑性モデルの柱面波では R/R_0 が 35 の所で

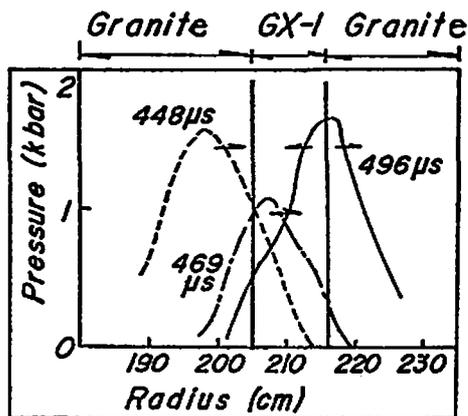


図7 花崗岩から GX-1 へ入射する衝撃波 (SIN コードによる解析) 448 μ sec で GX-1 へ衝撃波が入射し、469 μ sec のところでは、図3で示したA点から B' 点へのように入射圧が減少し、496 μ sec のところではA点からB点へのように再び、圧力が増加し、GX-1 中には反射衝撃波がもどっていく。448 μ sec の時と 496 μ sec の時のピーク圧がほぼ同じになる事に注意。したがって反射衝撃波が 1kbar 以下になるのに約 100 μ sec 要する。

花崗岩中のピーク圧が約 4kbar となる。この場合穿孔発破の薬径 70mm に対して安全距離は 2.4m となる。柱面モデルでは薬量と距離の関係はだせないが、穿孔発破では薬長が 5m で衝撃波の伝播距離に比較して長いので、2.4m の安全距離も妥当なものと考えられる。

又、爆薬と岩石の間に水が存在する場合は岩石からの衝撃波は水の衝撃インピーダンスが低いため GX-1 への入射衝撃波は緩和される。この場合 GX-1 中の衝撃圧が 4kbar 以下になるのは $R/W^{1/3}$ が 0.4 以上のときである。これらを距離 $R(m)$ と薬量 (kg) の関係で表わしたものが図8である。図8でA線は GX-1 が岩石と接している時を示し、B線は GX-1 と岩石の間に水があるとした場合を示す。安全距離は図8でA線又はB線より上のはんじとなる。

日本産業火薬会の行った GX-1 の殉爆試験では水深 2m 下のコンクリートブロック中で 6kg の GX-1 を爆発させた時、1m 離れた4本の GX-1 のうち2本が殉爆をおこした。これは図8において、丸印で示したが GX-1 のまわりに水がある時とない時の中間に位置する。

4. 考 察

図7に示したように、GX-1 は 100 から 200 μ sec の長期間高圧下におかれる。この事は GX-1 に衝撃波が入射した時に LVD の発生する可能性が大きく、

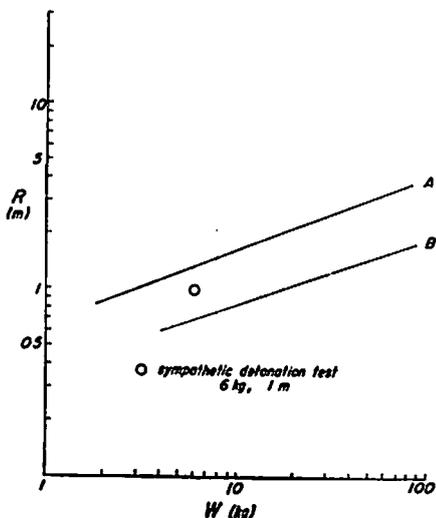


図8 殉爆をおこさないための距離 $R(m)$ と薬量 $W(kg)$ の関係。A線は、爆薬と岩石の間に水が存在しない場合。B線は爆薬と岩石の間に水がある場合を示し、これらの線より上が安全な状態となる。○印はコンクリート中で $6kg$ のGX-1を爆発させた時 $1m$ 離れたGX-1 4本のうち2本が殉爆した。

又LVDが示こらない場合は高圧下におかれる事により鈍感化して不爆のおこる可能性を意味する。又、GX-1のみならず、他の起爆施設の安全性についても言える事で、衝撃波の持続時間が長い事は、防護膜による保護の効果が少ないと考えられる。これは図8でGX-1のまわりに水が存在するとした場合の計算値が、実際に殉爆をおこした点の下にあることから明らかである。東京工業試験所のギャップテストでは圧力の持続時間は $1\mu sec$ 以下であり、 $100\mu sec$ 以上の間、高圧下におかれた場合と比してどうなるかはギャップテストからはわからない。

したがって図8において、GX-1のまわりに水がないとした場合をとるのが妥当であると考えられる。

5. 結 論

はじめに述べたようにLVDを有する爆薬の殉爆問題については断言できないが、球面波の塑性波モデル、弾性塑性波モデル及び柱面波による弾性塑性モデルから図8に示したように $R/W^{1/3}$ が0.8以上にとった方がよい。又 $100\mu sec$ 程度の持続時間をもつ高圧の衝撃波が誘起されるためGX-1が殉爆をおこさなかった場合、GX-1は鈍感化しているので段発をかけても不爆になる可能性がある。逆に衝撃波の持続時間が長いと不均一系爆薬は低圧でも起爆されるという報告があるがGX-1も同様の効果を受けることもありうる。いずれにしてもGX-1はかなり危険な状態におかれる。又、段発用の雷管や起爆起爆索子等の防護膜の効果も少ないと考えられる。

なお、解析は東京大学大型計算機センター HITAC 8700/8800 により行った。

この研究は本四橋公団から産業火薬会に委託したものの一部であり、公団の了解を得てここに掲載する。

6. 謝 辞

解析にあたり、助言、指導をされた C. L. Mader 氏 (USA, Los Alamos, Sci. Labo) に深く感謝する。

文 献

- 1) G. I. Taylor Proc. Roy. Soc (London) 200A, 235 (1950)
- 2) R. G. McQueen S. P. Marsh, Fritz J. Geophys. Res., 72, 4999 (1967)
- 3) T. P. Liddiard, 4th Symposium on Detonation 214 (1965)
- 4) J. M. Walsh, M. H. Rice, I. Chem., Phys 26, 824 (1957)
- 5) S. Fujiwara, M. Kusabe (1973)
- 6) C. L. Mader, Los Alamos Sci. Rep. LA 3720 (1967)
- 7) Johansson, Persson, Detonics of High Explosives, Academic Press (1970)

**A Consideration on Sympathetic Detonation of
a Gelatine Dynamite by Shock Waves through Granite**

by Katsumi Tanaka and Tsutomu Hikita

The gap transmission of detonation of a special type of dynamites (GX-1) through granite was considered on the basis of both the computation results obtained by use of SIN-code (C. L. Mader), and the experimental data by HONSHI research group.

The experimental data give 4kb shock peak pressure as the threshold value to initiate LVD in GX-1, and this corresponds to $0.8\text{m.kg}^{-1/2}$, the reduced distance, according to the computation: this suggests that it may be possible for gap transmission to occur at the distance less than 2m from the adjacent bore hole where 20kg GX-1 is detonated.

When the elastic-plastic model of granite is used and the impedance mis-matching between granite and GX-1 is applied, the duration of high shock pressure in GX-1 reaches as long as $100\mu\text{s}$ and this long Tailored shock may cause LVD in GX-1 or otherwise desensitize it to bring the detonation failure.

(University of Tokyo, Faculty of Engineering, Tokyo, Japan)

正 誤 表

34巻3冊(150号)口絵写真中

わが国最大の打揚げ花火・30号玉の項

打揚日：毎年8月1日・2日は誤り

毎年8月2日・3日と訂正します。