

応力波の波形と岩盤の現位置強度との 関係に関するシミュレーション

京都大学大学院 (学生員) 川口尊三

京都大学工学部 (正 員) 佐々宏一

〃

伊藤一郎

1. 結 言

現在、岩盤の強度推定に用いられている方法¹⁾には、現位置試験と室内試験の2種があり、前者としては各種載荷試験と弾性波速度から推定する方法とが、後者としては、テストピースの圧縮、引張(圧裂)等の機械的試験と超音波伝播速度から推定する方法とがある。しかし、室内試験は採取したテストピースがほんとうに実際の岩盤を代表しているかどうかには問題があり、とくに風化した岩盤などではその傾向が著しい。平板載荷試験は有効な資料を与えてくれるが、試験に際し、大がかりな準備が必要であり、多数の試験を行うには時間と経費の面に難点がある。孔内載荷試験は簡単で多くの値を知ることは可能であるが、加圧能力に問題があり、最大強度 100 kg/cm^2 までしか測定できないようである。しかし、これらの直接的な調査法に対し弾性波による方法は以下列記する利点を有している。すなわち、①測定が簡単、②対象を mass としてとらえ局部的な不均質性にはあまり左右されない、③広範囲に調査できる、④硬岩から土砂まで適用できる、⑤安価である、等である。以上いろいろな要因を考慮すれば、弾性波による方法が最も手近な試験法としてあげられる。しかし、弾性波を用いて岩盤の現位置強度を推定するためには、岩盤内の弾性波の伝播特性、すなわち、伝播速度、減衰および波形と強度との関係が明らかでなければならない。弾性波速度と圧縮強度との関係に関してはすでにかなりの研究結果が報告されており、ある程度の相関が認められている。しかし、波形と強度との関係に関する研究は見当たらないようである。岩盤内で爆薬が爆発した場合に発生する波動の波形は、波動の持つ応力値に対して岩盤が非弾性的な挙動をする範囲の大きさと密接な関係にあるから、爆発衝撃によって発生した波動の波形から現位置強度を推定することは可能である。そこで、岩盤内で爆薬を爆発させた場合に発生する波動に関するシミュレーションを、材料の破壊を考慮した応力解析を行うことによって実施し、岩盤の強度と応力波の波形(粒子速度波形)との関係について検討したのでその結果について報告する。

2. 計算方法および計算条件

今回、シミュレーションに用いた手法は、ラグランジュ座標で示した運動方程式を差分近似を用いて解いて、変位加速度を求め、それを微小な時間増分で積分することによって時間を進めて、過渡現象解析するという手法であって、Tensor Code と呼ばれている方法と同じ手法である。^{2), 3), 4)} さて今回は、材料の破壊を考慮した計算を行ったが、破壊の計算への導入は下記のような方法で行った。すなわち、破壊に関しては、引張破壊とせん断破壊とを考え、引張破壊には最大主応力説をあてはめ、後者には Mohr の破壊説を適用した。すなわち、応力状態がどちらかの破壊条件に達したならば、破壊が起ったものとして、それぞれ次のような応力修正をほどこす。引張破壊状態では、最大主応力を 0 に修正し、残り 2 つの主応力は要素の変形状態がそのままであるように修正し、せん断破壊状態では、Mohr の応力円の中心すなわち圧力はそのままにしておき、応力円がつねに放絡線に接するように偏差応力を修正するという方法を用いた。ただし放絡線は一軸引張強度を示す点を通り、一軸圧縮強度のときの応力円に接する放物線で近似した。次に状態方程式に関してであるが、高圧の爆発生成ガスが充満している装薬室内では $PV^{\kappa} = \text{Const.}$ なる断熱変化の式を用い、爆発生成ガスの断熱膨張にともなう圧力変化を計算に組み入れた。なお、 κ の値としては 1.35 を用いた。岩盤の微小要素内では、等方均質とみなし、 $\tau_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}$ の応力-ひずみ関係を用いた。ここに λ 、 μ はラーメの定数であって $\lambda = f(C_L, \nu)$ 、 $\mu = g(C_L, \nu)$ で表わさ

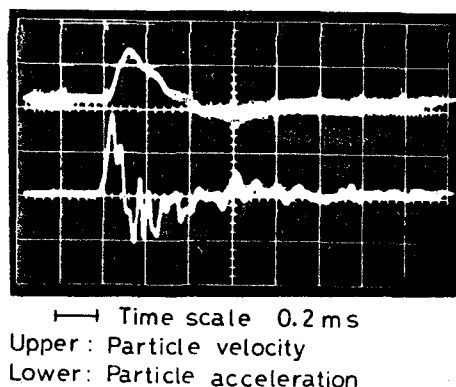
れる。 C_L は縦波伝播速度であるが、応力波の応力値が大きい場合には、 $C_L = C_{L0} + k_0 v$ (Expanding), $C_L = C_{L0}$ (Contracting) となる。一方、ポアソン比 ν は破壊前後で0.2から0.35に変化するものとした。つぎに粘性減衰係数であるが、これは岩石のような減衰の大きな材料では重要である。そこで今回は応力波の粒子の最大変位速度(V_p)と爆源からの距離(r)との間に、 $V_p = kr^{-1.4}$ の関係が存在するという実測結果に計算結果が一致するように材料の粘性減衰係数を選定した。

さてシミュレーションは、無限の拡がりを持つと考えられる岩盤内で球状の1 kgの新桐ダイナマイト(密度 $\Delta = 1.45 \text{ g/cm}^3$, 爆速 $D = 6000 \text{ m/sec}$)を爆轟させた場合について実施した。装薬室内に作用させる爆轟圧の値に、まず次式を用いて尖頭爆轟圧を求め、⁵⁾ $Pd = 0.415 \Delta (1 - 0.543 \Delta + 0.1925 \Delta^2) D^2 \dots\dots (C. G. S.)$

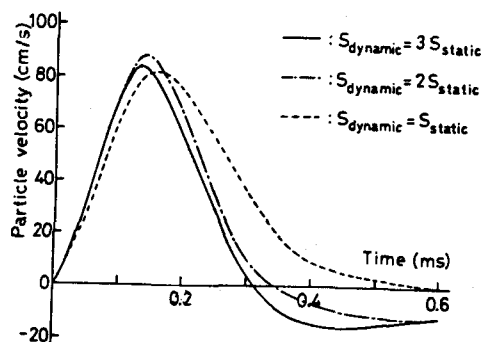
その値と爆轟理論から求められた尖頭爆轟圧と爆発ガスの圧力最高値との関係⁶⁾を用いてガス圧の最高値を求め、その値を採用した。新桐ダイナマイトの場合には、その値は 71500 kg/cm^2 となった。つぎに強度についてであるが、一般に岩石は爆破などの衝撃力が加わった時には、静的な破壊試験によって示される強度よりも大きな値を示すことが知られている。したがって、爆発衝撃にともなう現象のシミュレーションを実施する場合には静的な破壊試験で得られた強度をそのまま用いることはできない。そこで、実測結果と計算結果とを対比することによって爆轟衝撃に対する岩盤の強度と材料試験で求めた強度との関係を求めた。すなわち第1図は、自由面の影響を全くうけない状態の岩盤内で、3400 gのダイナマイトを起爆した時に爆源から3.5 m離れた地点で測定した粒子の振動波形を示したものであり、第2図はその実験と全く同一の条件で、岩盤の強度だけを材料試験により求めた強度の1, 2, 3倍として、シミュレーションを実施した結果を示したものである。これら2つの図の粒子速度波形より、爆轟衝撃に対する岩盤の動的な強度($S_{dynamic}$)は静的な強度(S_{static})の2~3倍とみなすのが適当と思われる。⁷⁾そこで、この研究では、以後 $S_{dynamic} = 3S_{static}$ なる関係を用いることにした。

さて、シミュレーションに用いる岩盤の種類であるが、これは実在するものを前提に考えることにした。そこで、井上、大見らによって求められている⁸⁾密度および圧縮強度と縦波伝播速度との関係、すなわち、静的圧縮強度 $S_c = 43 C_{L0}^{2.23}$ 密度 $\rho = 19.6 C_{L0}^{0.21}$ の実験式を用いて種々の特性の岩盤を想定した。なお上式の単位は、 S_c (kg/cm^2); C_{L0} (km/sec); ρ (g/cm^3)である。

今回は、縦波伝播速度が、2, 3, 4, 5, 6 km/sec の5種の場合のそれぞれについて、引張強度を変化させ、すなわち、ぜい性度が10, 15, 20, 30の4つの場合を考え、合計20種の平均的な岩盤モデルを作成し、それぞれについてシミュレーションを行った。なお、モデルの形状は自由面等の影響のない等方、均質の無限媒体である。



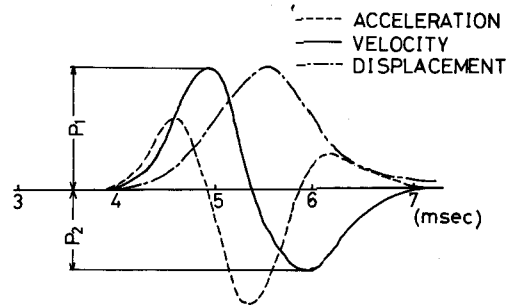
第1図 爆源より3.5 m離れた地点で実測した粒子速度と粒子加速度波形



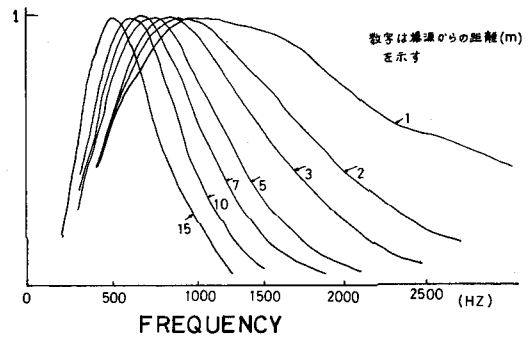
第2図 計算より求めた爆源より3.5 m離れた地点での粒子速度波形と強度との関係

3. 結果および考察

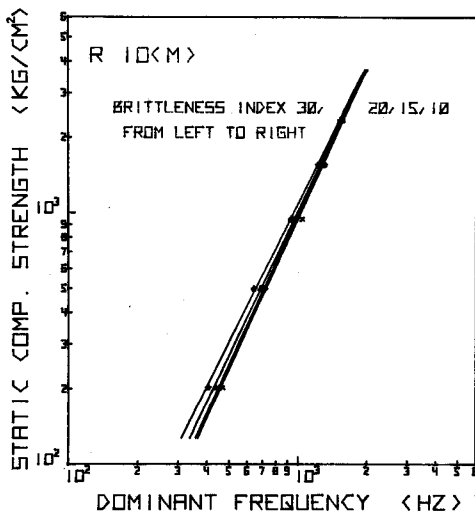
第3図は縦波伝播速度 $C_{L0} = 2 \text{ km/sec}$ 、ぜい性度10のモデルを用いた場合に、爆源から10 mの地点の振動の波形を示したものである。これらの波形はあきらかに実測波形ならびに、理論波形と類似している。また第4図は第3図の場合と同一モデルの各地点での加速度波形を周波数分析し、それぞれのスペクトルの最大値が一致するように図示したものである。これを見ると、距離が爆源より遠ざかるにつれて、高周波成分の伝播による減衰、すなわち、卓越周波数の低下がみられ、実際の岩盤内の伝播状態と合致している。第5図は爆源から10 m離れた地点における粒子速度波形を周波数分析し、その卓越周波数と圧縮強度との関係を両対数紙上にプロットしたものである。この図より、卓越周波数は岩盤の圧縮強度が大きくなるにつれて高くなるという密接な関係にあるが、ぜい性度、すなわち、引張強度にはほとんど影響されていないことがわかる。この関係はどの位置においてもその値は違うが成立している。さらに、波形の幅等の時間に依存するものは圧縮強度に関係しているという結果を得た。一方、第6図は縦軸に第3図で示されている粒子速度波形のピーク比 P_2/P_1 (%) をとり、横軸には引張強度を対数でとって両者の関係を示したものであるが、図よりピーク比と引張強度との間に、はっきりと関係がみつめられる。しかしながら、ピーク比と圧縮強度との間には強い相関はみられなかった。



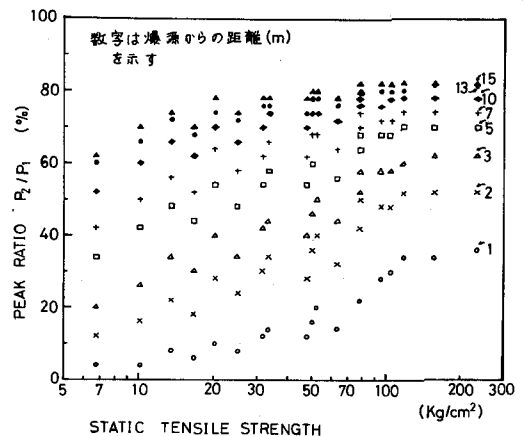
第3図 $C_{L0} = 2 \text{ km/sec}$ 、ぜい性度10のモデルで爆源より10 m離れた地点における各種波形



第4図 $C_{L0} = 2 \text{ km/sec}$ 、ぜい性度10のモデルについて求めた波動の伝播にともなうスペクトルの変化



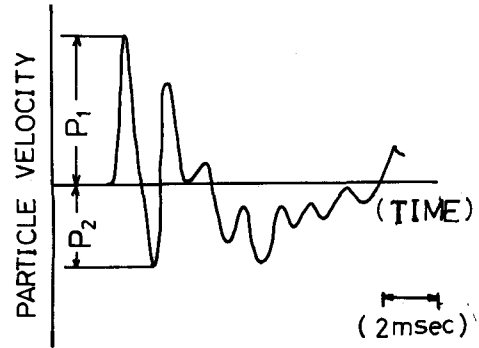
第5図 爆源より10 m離れた地点における粒子速度波形の卓越周波数と静的圧縮強度との関係



第6図 波形のピーク比 (P_2/P_1) と静的引張強度との関係

4. 波形からの強度推定と岩石試料試験結果との対比

第7図は、坂出市番の洲において、地下30mの位置で、100gのペントライトを爆発させ、それに起因する粒子の振動を地下30m、爆源より10mの位置に埋め込んだムービングコイル型速度計を用いて測定した波形である。なお、地下30mの位置の地質は風化花崗岩であった。このような実験条件では、波形は自由面の影響をうけないものと考えられる。そこで、この波形から卓越周波数を求めると516 (H_z)、ピーク比は61.5 (%)という値が得られた。そこでこの値から、その位置の岩盤の強度を下記のような方法で推定してみた。第5図および第6図に示した曲線は今回の実験の場合と薬量が異なるので、薬量の差による補正をほどこさなければならない。そこで、薬量の効果に関する計算を実施した。その一例を示したものが第1表である。この表には、 $C_{L0} = 3 \text{ km/sec}$ 、ぜい性度10のモデルを用いて薬量が100gの場合と1kgの場合とについて波形解析を実施した結果が示してある。この関係を用いて、上記の100gの場合の実測結果から、1kgを爆発させた場合に発生すると推定される振動の卓越周波数とピーク比を求めると、412 (H_z)と59.8 (%)となった。したがって、この値と第5図および第6図より、その位置の岩盤強度は、圧縮強度 180 kg/cm^2 、引張強度 10 kg/cm^2 と推定しうる。一方、その現場近傍の風化花崗岩の岩石試料試験結果は、一軸圧縮強度が 199 kg/cm^2 、一軸引張強度が 14.5 kg/cm^2 であった。この結果には、ポアソン比の差異は考慮されていないが、かなり妥当な結果と考えられる。



第7図 ペントライト100gを起爆した場合に、爆源より10m離れた地点で実測した粒子速度波形

第1表 $C_{L0} = 3 \text{ km/sec}$ 、ぜい性度10のモデルで実施した薬量1kgの場合と100gの場合との波形解析結果の対比

薬 量	卓越周波数	ピーク比
1 kg	687 (H_z)	72 (%)
100g	860 (H_z)	74 (%)

5. 結 言

今回行ったシミュレーションで得られた強度と速度波形との関係から、粒子速度波形を周波数分析し、卓越周波数を調べることによって圧縮強度を、またピーク比 P_2/P_1 を調べることによって引張強度を求められることが明らかとなった。したがって、この種の方法は現位置強度を推定する1方法になるであろうと思われる。

参 考 文 献

- (1) 宮原健二、西尾喬天；風化帯地盤の強度についての一考察；物理探鉱第25巻3号（昭和47年）
- (2) G. Maenchen and S. Sack；The Tensor Code；Methods in Computational Physics, Vol.3, Academic Press, (1964)
- (3) 佐々宏一；電子計算機を用いる動的応力の解析方法(Tensor Code)について；水曜会誌17巻7号(昭和47年)
- (4) 佐々宏一、伊藤一郎；爆轟衝撃による材料の破壊と波動について；材料21巻221号（昭和47年2月）
- (5) 佐々宏一、伊藤一郎；爆轟圧に関する研究；工業火薬協会誌32巻6号（1971）
- (6) 例えば、J. Taylor；Detonation in Condensed Explosives. Oxford Press（1952）
- (7) K. SASSA, I. ITO；On the relation between the strength of a rock and the pattern of breakage by blasting；Advances in Rock Mechanics Vol. II B.（1974）
- (8) 井上正康、大見美智人；岩石供試体の縦波伝播速度と一軸圧縮強さとの関係；応用地質、12巻3号（1971）

Numerical simulations on the relation between the strengths
of in situ rock and the characteristics of
the particle motion caused by an explosion.

Takazo KAWAGUCHI

Koichi SASSA

Ichiro ITO

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Various methods have been utilized to estimate the strengths of in situ rock. Among them, a seismic method seems to be the most effective one, for the case that the relation between the strengths of a rock and the characteristics of the stress wave in rock is clarified. Therefore, in this study, in order to discuss the relation between the strengths of a rock in-situ and the change in particle motion with time, the numerical simulation of the particle motion caused by an explosion were performed for 20 types of rocks by using a DAYS-2 code which involves the finite difference approximation to the momentum equations.

The main results obtained in this study can be summarized as follows. The dominant frequency and the length of the wave for the particle velocity are greatly regulated by the compressive strength of the rock, while the ratio of the negative peak of the particle velocity against the positive one is mostly affected by the tensile strength of the rock. The strengths of the rock which are estimated by applying the results of this numerical simulation to the shape of the measured particle velocity in the field agree well with the ones obtained by the laboratory core tests.