

1. 緒 言

トンネル掘削やベンチカット発破や坑道発破にともなう爆破振動の基礎岩盤におよぼす爆破効果の解析は興味ある問題であるが、一般に困難である。その理由は地下構造が均質でないために、爆破現象が非常に複雑になるためである。この問題について筆者らは昭和37年7月に岡山県牛窓町前島の採石工事現場において、坑道発破にともなう爆破振動を電氣的に測定する新しい方法を考案し、試験的に採用した。これらの結果によつて、測定方法を改善し、昭和40年には関西電力木曾発電所新設工事5号導水路トンネルおよび国鉄中央本線線増工事単線形トンネルにおいて、トンネル掘削における爆破振動の測定を行ない、昭和41年には電源開発株式会社長野ダムにおいて、197トンの大発破における爆破振動の測定を行なつた。この報告ではこれらの測定結果の一部を紹介する。

2. 爆破にともなう電氣的現象

地下構造内において爆破を行なう場合に、今までの実験結果によれば、

- (1) 爆破振動によつて地下構造内の電気定数が変化すること、および
- (2) 爆破によつて電磁波や電位が発生すること、

が明らかになつた。

これらの電氣的現象を利用すれば、たとえば(1)の地下構造内の電気定数の変化を利用して、爆破によつて影響を受けた地下構造の立体的な変動を測定することができ、また(2)の電磁波を利用して、発破が完爆しているかどうかを確認することができ、さらに電磁波と爆破振動波との相対的な速度差より地下構造の変動を解析することができる。

3. 比抵抗と間隙率との関係

地下構造内の電気定数としては一般に比抵抗（導電率）、誘電率および透磁率が考えられるが、この報告では比抵抗のみについて考える。一般に地下構造内の物理的性質を数式的に表現することそれ自体が簡単ではなく、岩盤の硬さなどの表現も複雑である。たとえば、弾性波探査における結果解釈において、地下構造内を伝播する弾性波速度から、密度を仮定してヤング率やポアソン比を求めることはできるが、地下構造の性質をあらわすのにこれらの定数はあまり用いられず、弾性波速度による表現が主に用いられている。ヤング率およびポアソン比によつて表現すればむしろ煩雑になるようである。比抵抗によつて地下構造の性質を表現する試みはほとんど行なわれていない。しかし、比抵抗によつて間隙率を計算することはある程度可能で、たとえば等大球がもつとも疎に並んだ場合の間隙率は47.6%であり、この間隙が比抵抗 ρ_w の水で満たされていれば、このときの全体の比抵抗は2.64 ρ_w である。さらに、等大球がもつとも密に並んだ場合の間隙率は25.9%であり、比抵抗は5.81 ρ_w となる。次に、もつとも簡単な関係式として、Sundberg の式

$$n = 3 \rho_w / \rho \quad \dots\dots\dots (1)$$

がある。ただし、 n は間隙率、 ρ_w は現地の水の比抵抗、 ρ は現地での比抵抗の測定値である。間隙

率は比抵抗の測定値に反比例する。このような地下構造の比抵抗分布において、爆破によつて地下構造内に変動がおこつた場合、簡単な表現を用いれば、

$$n_r = \frac{\rho_w}{\rho} \left(\frac{2 \rho_r}{\rho} + 1 \right) \dots\dots(2), \quad \frac{n_r - n}{n} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_r - \rho}{\rho} \dots\dots(3)$$

なる式が考えられる。ただし、 n_r は変動後の間隙率、 ρ_r は変動後の比抵抗の測定値である。(3)式は、爆破によつて変動後の比抵抗 ρ_r が小になつた場合には、圧縮されて間隙率 n_r が小になつたことを意味し、また変動後の比抵抗が大になつた場合には、引張られて間隙率が大になつたことを意味する。岩盤の硬さなどの性質の表現の1つとして間隙率をとり、比抵抗との関係を説明した。弾性波探査法においても、間隙率と速度についての簡単な Wyllie の関係式がある。すなわち、

$$1/v = n/v_w + (1 - n)/v_m \dots\dots\dots(4)$$

である。ただし、 v_w は間隙を満たしている水の速度、 v_m は岩石のみの速度、 v は現地で測定された速度である。

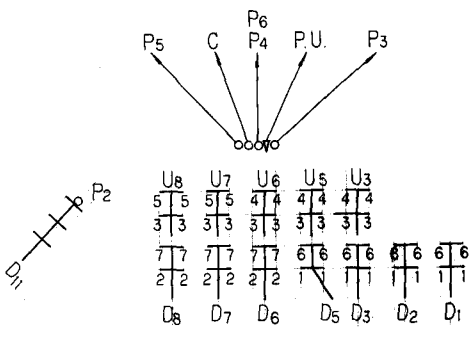
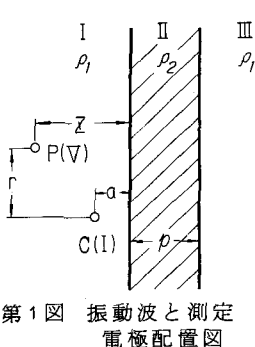
4. 爆破による地下構造の変動

爆破によつて地下構造内に変動が発生する場合には、

- (1) 爆破振動が存在している間だけ変動が発生し、爆破振動がなくなれば、変動は爆破前の状態に復元する場合、と
- (2) 爆破振動によつて発生した変動が、爆破振動がなくなつても爆破前の状態に復元しない場合、とがある。

(1)の復元する場合は一時的な過渡現象で、爆破の前後の定常状態においては比抵抗の変化はなく、地下構造には爆破の前後において変動があらわれない。これに対し(2)の復元しない場合には、爆破の前後の定常状態において比抵抗の変化が認められ、たとえば引張られて亀裂を生じた場合には比抵抗が大になり、当然間隙率也大になり、また圧縮された場合には比抵抗が小になり、当然間隙率も小になる。これら2種類の場合について、理論的には同一の式を用いて説明することができる。(1)の復元する場合においては、爆破振動が存在する間だけ媒質の比抵抗が階段的に変化するものと考えればよく、その媒質が爆破速度で移動する場合の連続した比抵抗の変化を解析すればよい。第1図はある瞬間における測定電極CおよびPと移動すると考えた媒質IIとの関係を示している。また(2)の復元しない場合においては、たとえば第1図において、媒質IIの位置に亀裂が発生したと考えればよい。

第1図に
おいて、点
Cに電流源
Iがある場
合の点Pの
電位Vから
比抵抗を計
算すれば、



第2図 電極配置見取図

$$\rho = \rho_1 \left[\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{z}{a}\right)^2 + \left(\frac{r}{a}\right)^2}} + \frac{k_1}{\sqrt{\left(1 + \frac{z}{a}\right)^2 + \left(\frac{r}{a}\right)^2}} + k_1 k_2 k_3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_1 2^{(n-1)}}{\sqrt{\left(1 + \frac{z+n 2 P}{a}\right)^2 + \left(\frac{r}{a}\right)^2}} \right] \dots\dots\dots(6)$$

となる。ただし、 $k_1 = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ 、 $k_2 = 2\rho_1 / (\rho_2 + \rho_1)$ 、 $k_3 = 2\rho_2 / (\rho_2 + \rho_1)$ である。

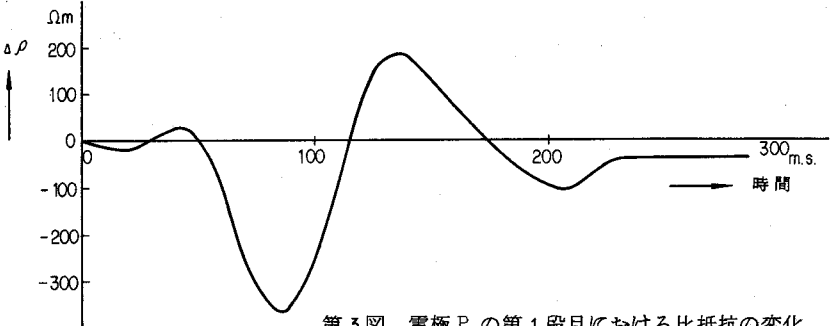
5. 長野ダムの測定結果

電源開発株式会社長野ダムで行なつた第1回目の197トン大発破の測定結果の一部について説明する。第2図は爆破地区の発破坑道と測定電極配置の見取図である。 $D_1 \sim D_8$ および $U_3 \sim U_8$ は第1回目の発破の発破坑道を示し、 $P_2 \sim P_6$ および ϕ は比抵抗測定用電極の位置で、P.U.は爆破振動を記録する受振器の位置である。なお D_{11} は第2回目の発破坑道の1つである。発破の段数は7段で、第2図の発破坑道に記入されている数字が各薬室の発破段数を示す。

第3図は電極 P_3 で測定した第1段目の発破の比抵抗の変化である。発破前の比抵抗を基準にしてあるが、230 m.s.付近までが爆破振動の過渡的な変化の現象であり、第1段目の発破後の比抵抗の定常値は、発破前の比抵抗に比して-45 $\Omega \cdot m$ 程度の変化を示している。簡単に特長を説明する。(1)爆破振動の立上りは岩盤が硬い場合には急峻で、岩盤が軟い場合には緩慢である。

(2)各薬室の電気雷管にバラツキがある場合には爆破振動の過渡的な変化は複雑になる。(3)爆破効果の点からいえば、比抵抗が定常値のまゝで長く持続することは望ましくない。

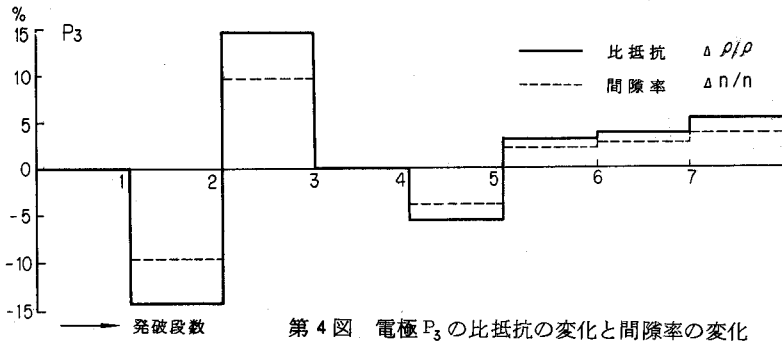
第4図では電極 P_3 で測定した発破の各段ごとの比抵抗の定常値の変化の割合を実線で示している。横軸は発破段数であり、



第3図 電極 P_3 の第1段目における比抵抗の変化

たとえば横軸1と2の間に-14.4%で示されているが、この値は第1段目の発破が完了したあとの定常値の変化の発破前の比抵抗に対する割合をあらわしており、横軸2と3の間の値は第2段目の発破が完了したあとの定常値の変化の割合を示している。点線は(3)式から求めた間隙率の変化の割合である。

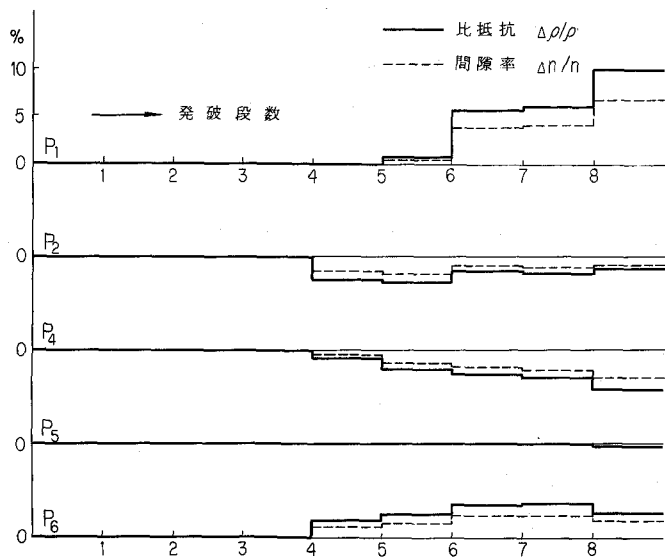
簡単に特長を説明する。(1)地下構造内の煤質に作用する圧縮および引張りの現象が測定された。(2)第1段目の発破によつて圧縮され、第2段目の発破で引張られ、第4段目の発破で再び圧縮され、第5段目で引張られ、結局亀裂が発生している。(3)第3図の各段の発破のそれぞれの爆破振動の過渡的な現象のほかに、各段ごとの定常値も周期的な変化を示している。



第4図 電極 P_3 の比抵抗の変化と間隙率の変化

たとえば横軸1と2の間に-14.4%で示されているが、この値は第1段目の発破が完了したあとの定常値の変化の発破前の比抵抗に対する割合をあらわしており、横軸2と3の間の値は第2段目の発破が完了したあとの定常値の変化の割合を示している。点線は(3)式から求めた間隙率の変化の割合である。簡単に特長を説明する。(1)地下構造内の煤質に作用する圧縮および引張りの現象が測定された。(2)第1段目の発破によつて圧縮され、第2段目の発破で引張られ、第4段目の発破で再び圧縮され、第5段目で引張られ、結局亀裂が発生している。(3)第3図の各段の発破のそれぞれの爆破振動の過渡的な現象のほかに、各段ごとの定常値も周期的な変化を示している。

6. 木曾導水路トンネルの測定結果



第5図 比抵抗の変化と間隙率の変化

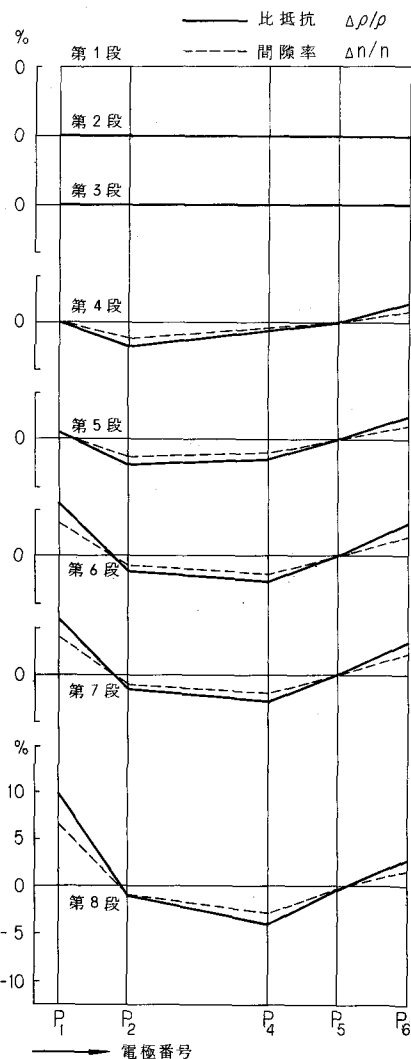
関西電力木曾発電所新設工事5号導水路トンネルで行なつた測定結果の一部について説明する。測定電極はトンネル掘削現場の側壁に高さ2.9 mの位置に、掘進方向に45°の水平孔を穿孔し、側壁より奥に比抵抗測定用電極 P_1 P_2 P_4 P_5 P_6 を設置し、受振器は坑口の方へ約50 mのところに設置した。

第5図は各電極で測定した発破の各段ごとの比抵抗と間隙率の定常値の変化の割合で、発破の段数は8段である。簡単に特長を説明する。(1)第3段目の発破までは変化はない。(2)側壁に近い P_1 では第5段目の発破より引張られて段数が進むにつれて亀裂が発生している。(3) P_2 および P_4 では第4段目の発破より圧縮されて、とくに P_4 では段数が進むにつれて大きくなっている。(4) P_5 では全体をとおしてほとんど変化はない。(5) P_6 では第4段目の発破より引張られて亀裂が発生している。

第6図は第5図と測定値は全く同じであるが電極位置を横軸にとつて表現した図である。簡単に特長を説明する。(1)第4段目の発破では P_1 では変化はなく、 P_2 では圧縮され、 P_5 では変化はなく、 P_6 では逆に引張られている。(2)第5段目以降の発破においても傾向は(1)と同様であるが、変化量が大きくなっている。(3)発破段数が進むにつれて最も強く圧縮されている位置が側壁より奥へ移動している。

7. 結 言

以上は爆破効果を解析する目的で昭和37年頃より検討していた爆破振動を電氣的に測定する新しい方法によつて得られた測定結果の一部で、他の測定結果および第2節(2)の爆破によつて発生した電磁波を利用して地下構造の変動を解析する方法については別の機会に発表する。この研究は京都大学谷口敬一郎助教授、入江恒爾講師、鹿島建設株式会社土木工務部・技術研究所の担当者および牛窓・木曾・新深沢・九頭龍川各出張所の担当者の絶大な援助を得た。ここに謝意を表します。



第6図 比抵抗の変化と間隙率の変化

Electrical Measurement for Rock Deformation and Rock Fracture by Blasting

Eizaburo YOSHIKUMI, Kyoto University

Chugoro SATO, Kajima Construction Co., Ltd.

In civil engineering, electrical prospecting methods are used in following problems: location of dam and reservoir sites, location of ground water, thickness of weathering layers, location of fault zones, tunnel construction and well logs.

In the present paper, a new electrical method to measure the deformation and the fracture of rocks produced by the blasting is proposed and explained in the cases of the Nagano Dam, Electric Power Development Co., Ltd. and the Kiso Tunnel, Kansai Electric Power Co., Ltd.

By a blasting, a high pressure compressive wave is produced and propagates through the earth structure surrounding the blasting point. By this wave the deformation and the fracture of the earth structure are generated and then the variation of the earth resistivity takes place. There are two kinds of the variation of the resistivity. One of these, known as the seismic electric effect, is the variation generated by the deformation only during the presence of the wave. The other one is the variation generated by the fracture which does not return to the initial earth structural condition.

The variation of the resistivity of the first kind is shown in Fig. 3. The variation of the resistivity of the second kind is shown in Figs. 4, 5 and 6.

The relations between the resistivity and porosity are shown in Eqs. (3) and (4).

This electrical method is very useful to investigate the blasting effects in civil engineering.