

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.558 Sept. 1986

電磁波照射による花崗岩内部の温度分布と破碎効果予測法の開発

高	橋	英	俊
石	原	弘	一
梅	谷	登	志文
篠	原	丈	人

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	4
2. 花崗岩の諸特性の測定	4
2.1 電磁気特性	4
2.2 熱的 特 性	6
2.3 機械的特性	7
3. 電磁波による加熱原理	7
4. 電磁波による加熱温度分布測定実験	8
4.1 実 験 概 要	8
4.2 実 験 結 果	8
5. 電磁波による破砕原理	10
6. 電磁波による破砕状況	10
6.1 実 験 概 要	10
6.2 実 験 結 果	10
7. 温度分布シミュレーション	11
8. 熱応力シミュレーション	14
9. 加熱による強度低下	18
9.1 実 験 概 要	18
9.2 実 験 結 果	18
10. 強度低下による破砕効果シミュレーション	19
11. ま と め	19
12. あ と が き	20
参 考 文 献	20

Development of Prediction Methods for Temperature Distribution and Fractured Volume in Granite Under Microwave Radiation

Hidetoshi TAKAHASHI*

Hirokazu ISHIHARA**

Toshifumi UMETANI***

Taketo SHINOHARA***

Synopsis

Before putting the microwave rock excavation method to practical use, amount of rock to be fractured by this method and the cost must be estimated. For the cost estimation a study was necessary to estimate the amount of rock to be fractured by a larger magnetron. However, the 350 kW magnetron is the largest one available at this moment, and computer simulation seemed to be only the possible way to estimate them. Mechanism of rock fracture by microwave radiation is considered that thermal stress caused by microwave heating leads thermal fracture of rock. But, it is very difficult to simulate the mechanism of fracture in a computer. Therefore, a new approach was developed in this study. It consists of two steps; the first step simulates the temperature rise in rock under the microwave radiation and the second step calculates volume of rock fractured by the microwave radiation.

(1) Simulation of temperature rise

The heat generation by the microwave radiation is determined based on the experimental data on the assumption that the heat generation is proportional to the power of magnetron. The temperature rise in rock is simulated in a computer with F.E.M. With this simulation program, the temperature distribution in rock can be obtained. The applicability of this simulation was confirmed with the experimental data with 50 kW power. Then, the simulation was carried out for conditions up to 2000 kW power and 60 minute duration. According to the simulation, heating efficiency (ratio absorbed by granite to radiating energy) increases with increase of radiating power.

(2) Prediction of amount of fractured granite

From the experimental data, a relationship between the temperature and the strength of granite had been established. On the other hand, it is known that granite of which strength is less than 1000 kgf/cm² can be dredged with a large pump dredger. Therefore, such granite of which compressive strength has decreased below that level is considered to have been fractured. Using the temperature rise simulated by the previous program and the above mentioned relationship, the volume of fractured granite can be estimated. The simulation was conducted in case of granite (10 m in diameter and 10 m in depth). The results are as follows: The volume of fractured granite increases with increase of the radiation power and the duration time. When the total radiating energy is kept constant, the fracture efficiency is better in the case of higher power than the case of longer duration time.

* Chief of Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

** Ex-member of Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

*** Member of Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

電磁波照射による花崗岩内部の温度分布と 破碎効果予測法の開発

高橋 英俊*

石原 弘一**

梅谷 登志文***

篠原 丈人***

要 旨

電磁波砕岩における岩石の加熱特性、破碎特性及び強度低下について、照射電力50kW～350kWまでの砕岩実験によってデータが蓄積されている。しかし、電磁波砕岩の実用化には、さらに高出力の電磁波破碎機が必要と考えられており、そのときの砕岩能力及び砕岩単価の予測と経済性の評価が必要である。これには、電磁波破碎機の最大照射電力が今のところ400kWと限られているため、シミュレーションによって予測する方法を採らざるをえない。電磁波砕岩における破碎原理は、電磁波の加熱作用によって生じる温度上昇に起因する熱ひずみから発生する熱応力によるものと考えられている。しかし、熱応力による破碎過程のシミュレーションは、岩盤が非均質なものであり、またその物性値（電磁氣的、熱的、機械的特性値）が、電磁波の照射電力及び周波数、岩盤の場所、温度及び含水率等で変化することから、実際の破碎過程を再現することが非常に困難であることが明らかになった。そこで電磁波砕岩における破碎効果予測法として、電磁波照射による温度上昇のシミュレーションプログラムを開発し、これによって温度分布を予測し、実測した電磁波照射後の岩盤強度の低下と温度上昇との関係から一定の強度以下になる体積を求めて破碎量として評価する方法を開発した。

1) 温度分布シミュレーション

加熱実験で得られた温度分布測定データから岩盤内の各点における発熱量を逆算し、この発熱量から任意の照射電力及び任意の照射時間における温度分布を非定常熱伝導解析によって推定する。これは発熱のある場合の非定常熱伝導問題として取り扱い、軸対称要素を用いた有限要素法による。シミュレーションは、実験を行った照射電力、照射時間毎に実測値と比較を行い、良く一致することを確認した後、直径10m、深さ10mの花崗岩岩盤を想定し、照射電力を1000kW、1500kW、2000kWとし、照射時間を10分おきに60分まで行った。この結果、照射電力の増加によって単位時間当りの岩盤内の総発熱量はほぼ二次関数的に増加する。このときの照射電力に対する加熱効率（総発熱量/照射電力）は、ほぼ直線的に増加する。

2) 破碎量の推定

電磁波照射後の岩盤（花崗岩）の強度低下を測定し、電磁波による加熱温度との関係から、大型のポンプ船（カッター馬力1200PS）による浚渫実績のある圧縮強度1000kgf/cm²以下になる温度（約50℃）を求め、1)の温度分布のシミュレーションにより、その温度以上になる体積を破碎量として評価した。これらのプログラムを用いて直径10m、深さ10mの花崗岩岩盤の任意の照射電力及び任意の照射時間における破碎能力を推定した結果、破碎量は照射電力及び照射時間の増加によってほぼ直線的に増加し、また照射エネルギー（照射電力×照射時間）の増加によってほぼ直線的に増加するが、同じ照射エネルギーならば照射電力が大きいほど大きくなるという結果を得た。

* 機材部 特殊作業船開発室長

** 前機材部 特殊作業船開発室

*** 機材部 特殊作業船開発室

1. まえがき

岩盤浚渫において、発破工法が爆発に伴う衝撃、振動、騒音によって魚介類、港湾構造物、航行船舶に対して悪影響を及ぼす危険があるため使用されない場合が多く、砕岩船等の機械類が用いられている。しかし、特に圧縮強度が 2000kgf/cm^2 を越える硬質岩盤に対しては砕岩効率が悪く、全く歯が立たない場合もあり、しかも衝撃、振動、騒音も少なくはない。したがって、硬質岩盤地域における岩盤浚渫を安全にしかも効率よく行うためには、上述の悪影響がなく、しかも硬質岩盤に対しても効率の良い新しい砕岩工法を開発する必要がある。電磁波砕岩工法もこれらの要請に応える砕岩工法の一つとして開発が進められてきた。現在、日本国内で電磁波砕岩工法に用いることができる電磁波砕岩装置の最大照射電力が 400kW （実効照射電力 350kW ）と大型ポンプ船といった他の作業船に比べてかなり小さく、実用化のためにはさらに高出力の砕岩装置を開発する必要があると考えられる。しかし、実用化するためには、実用化のために必要な照射電力と、そのときの砕岩効果及び砕岩単価を予測し、この工法の経済性を明らかにしておくことと、実際の海底岩盤に電磁波を照射するための水中照射器等の周辺機器を開発する必要がある。周辺機器では、環状水ジェット式と多孔質弾性体スカート式の2種の水中照射器が開発され、また水中照射器海底保持装置及び姿勢表示装置などが開発がされており、これらを用いた水中での花崗岩の破碎実験で、ほぼ空中時と同じ砕岩効果が得られることが確認されている。一方、砕岩効果の予測手法についても、熱応力解析による方法が研究されてきているが、花崗岩の実際の破碎を再現できるシミュレーション法は開発されていない。これは、岩盤が元来不均質な上に電磁気特性、熱的特性、機械的特性が電磁波の照射電力及び周波数、岩盤の温度及び含水率等により変化し、これらをおのおのの条件の下に実測することが困難であることに起因していると考えられる。そこで、熱応力状態が破壊条件を満足したかどうかを判定して、破碎過程をシミュレートして、破碎効果を予測する方法を採らず、電磁波照射による温度上昇のシミュレーションプログラムを開発し、これによって温度分布を予測し、実測した電磁波照射後の岩盤強度の低下と温度上昇との関係から一定の強度以下になる体積を求めて破碎量として評価する方法を開発した。この方法で任意の照射電力及び照射時間における破碎量の予測を行った。本資料は、この予測手法の概要と予測結果を報告するものである。

2. 花崗岩の諸特性の測定

電磁波砕岩において、岩盤の電磁気特性、熱的特性、機械的特性がその破碎特性に関係する。電磁波の照射による加熱温度は、岩石の電磁気特性と熱的特性に関係し、熱膨張による熱応力の発生には熱的特性及び機械的特性が、また熱応力による破碎には機械的特性が関係している。そこで、電磁波砕岩における破碎効果の予測に用いるシミュレーションプログラムの諸定数として入力するため、これら花崗岩の諸特性を測定した。

2.1 電磁気特性

後述の加熱原理で詳説するが、岩盤の電磁波エネルギーの吸収率は比誘電率と誘電体力率の積に比例するとされている。そこで、 80°C で24時間乾燥した後、デシケータで自然冷却した花崗岩供試体（ $50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 1\text{mm}$ ）の比誘電率と誘電体力率をQメータを用いて周波数別に測定した。測定した周波数範囲は、測定器の制約から、 $22\text{kHz}\sim 70\text{MHz}$ である。比誘電率及び誘電体力率と周波数との関係は図-1～図-2に示すように周波数によって変化することがわかる。したがって、今回の測定範

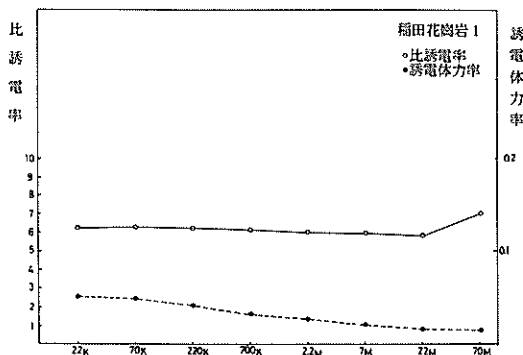


図-1 比誘電率及び誘電体力率（稲田花崗岩1）

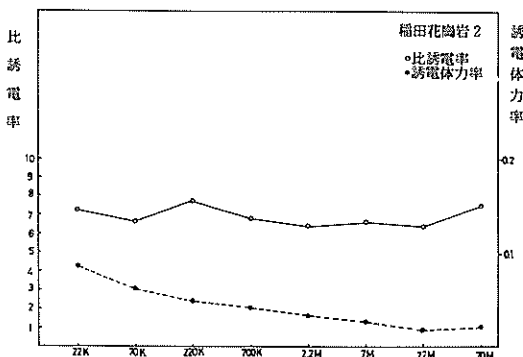


図-2 比誘電率及び誘電体力率（稲田花崗岩2）

冊での測定値は電磁波破碎機の周波数 915 MHz での値とは異なっていると考えられる。また、これらの値は温度、含水率によっても変化することが確かめられている。これらの電磁気特性は、純理論的に発熱量を計算する場合に必要なが、実際の電磁波碎岩時においては加熱により温度が上昇し、水分の蒸発によって含水率が減少するため正確な値が不明確であることと、電界強度が測定不可能なこともあり、後述の温度分布シミュレーション

に必要な発熱量の計算には使用できないことがわかった。ちなみに、水の比誘電率は 80、花崗岩の絶乾状態での比誘電率は 6~8 であり、含水率の変化によって花崗岩の比誘電率が変化すると考えられている。一方、誘電体力率は含水率の増加によって、数桁大きくなることが知られている。

また、厚さ (4 mm~55 mm) の異なる花崗岩の板 (250 mm×125 mm) を導波管 (250 mm×125 mm) の中

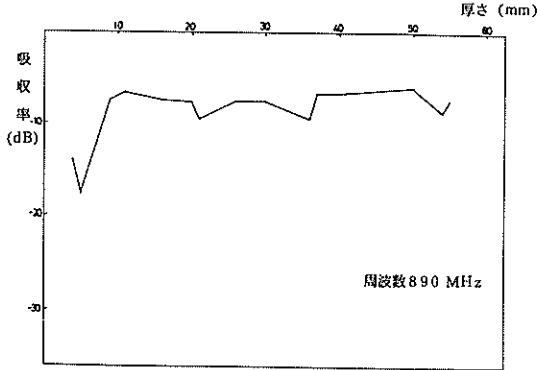


図-3 電磁波吸収率と厚さ

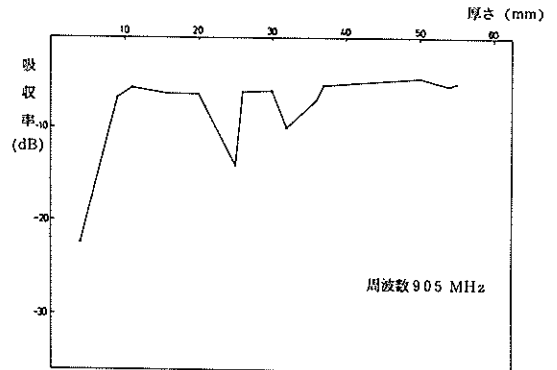


図-6 電磁波吸収率と厚さ

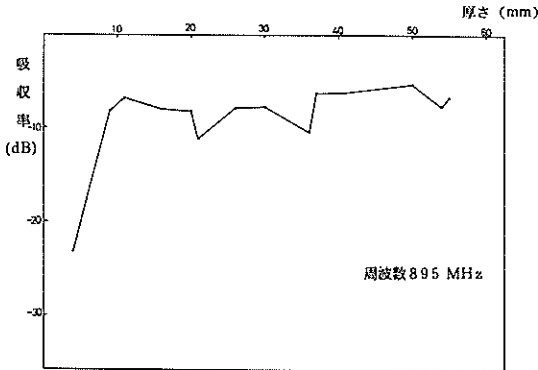


図-4 電磁波吸収率と厚さ

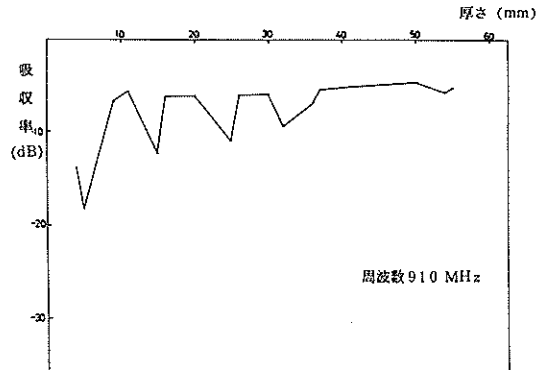


図-7 電磁波吸収率と厚さ

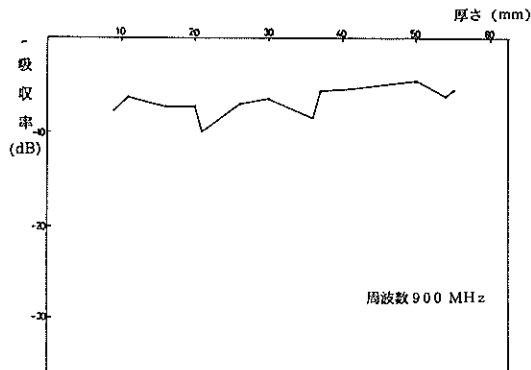


図-5 電磁波吸収率と厚さ

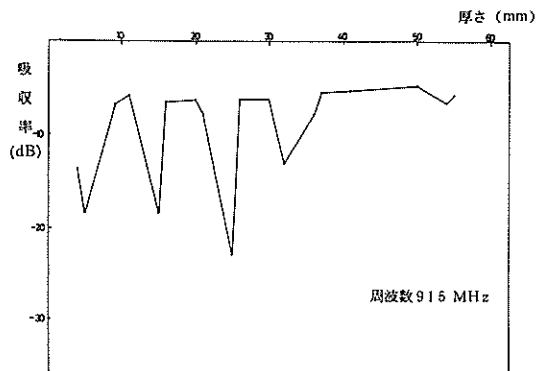


図-8 電磁波吸収率と厚さ

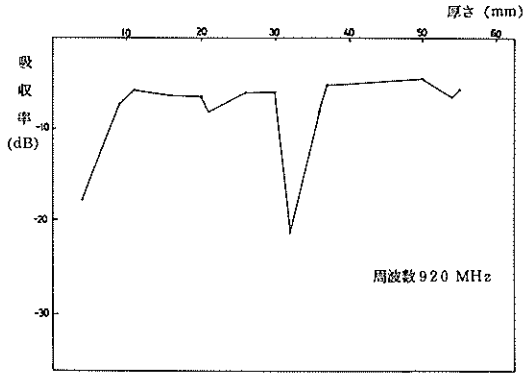


図-9 電磁波吸収率と厚さ

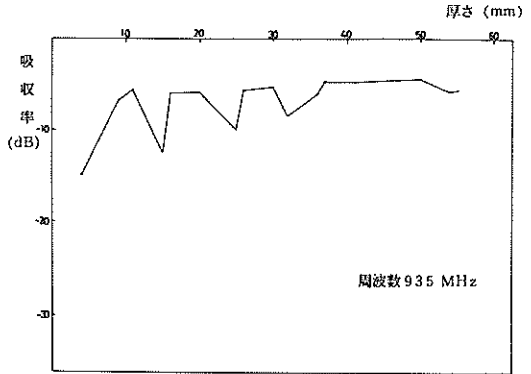


図-12 電磁波吸収率と厚さ

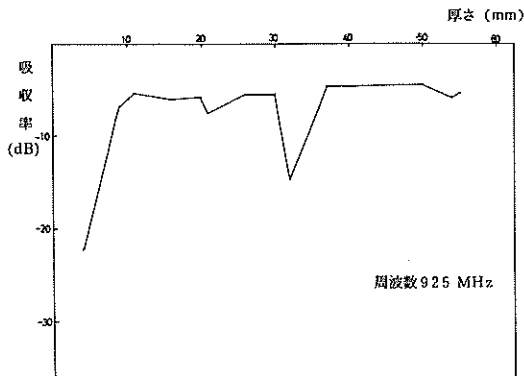


図-10 電磁波吸収率と厚さ

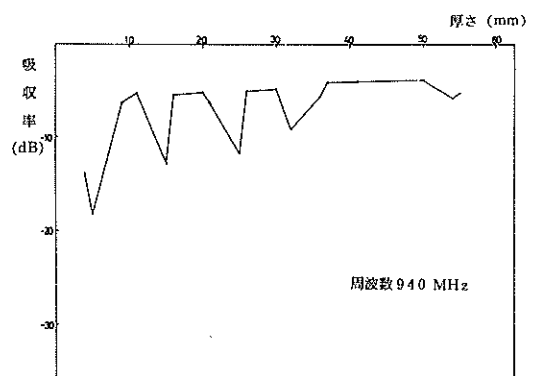


図-13 電磁波吸収率と厚さ

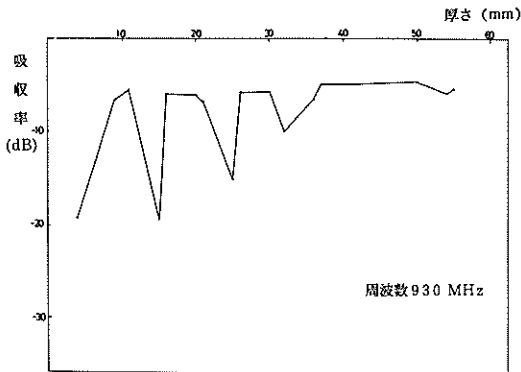


図-11 電磁波吸収率と厚さ

に置き、微弱電磁波を照射し、照射電力、花崗岩表面からの反射電力及び透過電力をそれぞれ別個に測定し、花崗岩に吸収された電力を計算した。この結果は図-3～図-13に示すように、板厚が増加するにしたがって大きくなり、周波数によって多少変化する。ここで、厚さ10 mの花崗岩のときの電磁波吸収率を入射電力(0dB)と反射電力(-9.02dB)との差として求めると(すなわ

ち透過電力を0と考える)、 $-3.8\text{dB} [20\log_{10} (P_{\text{abs}} / P_{\text{in}})]$ となる。例えば、照射電力を500kWとすると、単位時間当たり花崗岩に吸収される電力は、

$$W = 500\text{kW} \times 10^{\frac{-3.8}{20}} [\text{kW}] = 322.83 [\text{kW}]$$

となる。この値も実際の電磁波砕岩時には、温度、含水率が変化するため、当然照射電力及び照射時間によって変化すると考えられる。

2.2 熱的特性

岩盤内に吸収された電磁エネルギーが熱エネルギーへ変換され、岩盤の温度を上昇させるが、このときの上昇温度は比熱、熱伝導率に関係する。また、温度上昇による熱ひずみの発生には熱膨張率が関係している。そこで、温度分布シミュレーションプログラムの諸定数を定めるため、比熱及び熱伝導率の測定を行った。また、熱膨張率は、測定が困難であるため、文献の値^①を採用した。測定結果及び文献調査結果は表-1に示してある。これらの値は、温度によって変化することが知られている^②。

表-1 花崗岩の熱的特性

比熱 (cal/g·deg)	熱伝導率 (cal/cm·s·deg)	熱膨張率 (cm/deg)
0.17	7.0×10^{-3}	8×10^{-6}

2.3 機械的特性

熱ひずみによる熱応力の発生には弾性係数、ポアソン比が関係している。また、この熱応力で破壊されるかどうかは、強度に関係している。そこで、弾性係数、ポアソン比、圧縮強度、引張強度、弾性波伝搬速度を測定した。測定結果を表-2に示してある。これらの値も、温度、含水率によって変化することが知られている³⁾。

3. 電磁波による加熱原理

電磁波による加熱は誘電加熱と呼ばれ、岩石のように誘電体とみなせる物質に作用する。例えば、図-14に示すような誘電体に単位長さ当たり \dot{V} (v/m)の電界が作用すると、誘電体を流れる電流 \dot{I}_p は、この誘電体が理想的コンデンサである時に流れる変位電流 \dot{I}_1 と、実際の誘電体が理想的なコンデンサではなく損失を有するために流れる損失電流 \dot{I}_2 のベクトル和で表される。ここで、 C をこの誘電体を理想的なコンデンサとみなした時の等価容量、 R を等価抵抗とし、印加されている電界の角周波数を ω ($= 2\pi f$)、(ただし f は周波数、 π は円周率である)で表せば、

$$\dot{I}_1 = j\omega C\dot{V} \quad (1)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{R}\dot{V} \quad (2)$$

となるので全電流 \dot{I}_0 は、

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \left(\frac{1}{R} + j\omega C\right)\dot{V} \quad (3)$$

と表せる。

ここで、この誘電体の比誘電率を ϵ_r とし、真空中の容量を C_0 とすると、

$$\dot{I}_0 = j\omega C_0 \left(\epsilon_r - j\frac{1}{\omega C_0 R}\right)\dot{V} \quad (4)$$

となる。

印加電界 \dot{V} 、流れる電流 \dot{I}_0 によって誘電体中に発生する単位時間当たりの熱量、すなわち誘電体損は、 \dot{V} と \dot{I}_0 の間の位相角を δ とすれば、

$$W = V I_0 \cos\theta = \omega \epsilon_r C_0 V^2 \cos\theta \quad (5)$$

となる。

また、図-15に示すように、変位電流 \dot{I}_1 と全電流 \dot{I}_0 の間の位相角を δ とすると明らかに、

$$\theta + \delta = \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

であり、誘電体損失角と呼ばれる δ は一般の誘電体では

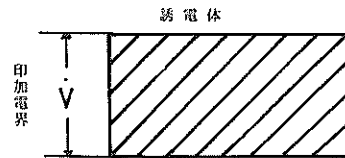


図-14 誘電体に印加された電界

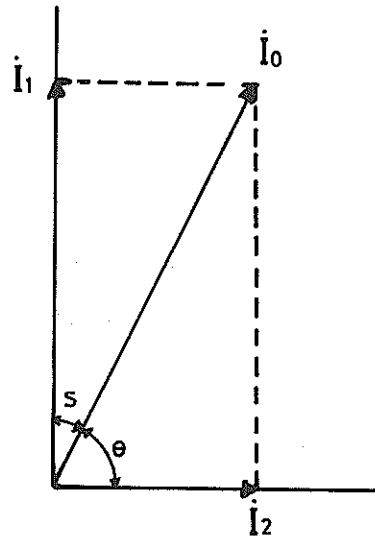


図-15 変位電流と全電流との関係

表-2 花崗岩の機械的特性

弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (kgf/cm ²)	圧裂引張り強度 (kgf/cm ²)	弾性波伝搬速度 (m/s)
5.6×10^5	0.20	1,700	70	2,000

小さな値をとることから、

$$\cos \theta = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \approx \sin \delta \approx \tan \delta \quad (7)$$

となり、したがって(5)式は、

$$W \approx \omega \epsilon_r C_0 V^2 \tan \delta \quad (8)$$

と表せる。ここで $\tan \delta$ は誘電体力率と呼ばれている。このように、ある材質の電磁波による発熱量は、材質の諸定数（比誘電率、誘電体力率）と電磁波の周波数（ $\omega = 2\pi f$ ）、電磁波の電界強度の自乗と照射時間に比例することがわかる。

4. 電磁波による加熱温度分布測定実験

4.1 実験概要

電磁波破砕機（100kW及び350kW）を用いて花崗岩の加熱実験を行った。図-16に示すように供試体である花崗岩は、中心から二つに分割したものをワイヤーで一つに縛り合わせて使用した。電磁波は、この合わせ面に直角に照射した。照射電力は50kW～350kWの範囲であり、照射時間は50kWではクラックが発生し始める10分、350kWでは5分を目安として、その前後の時間とした。電磁波照射後、二つに再分割して、その合わせ面の温度分布を内部温度分布として測定した。温度測定には赤外線温度計を用いた。

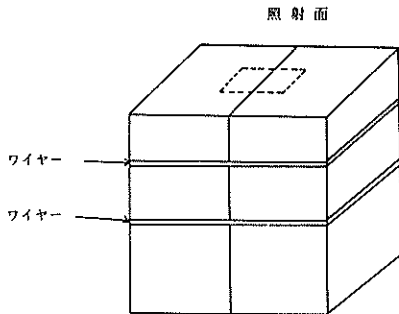


図-16 温度分布測定用供試体
(花崗岩)

4.2 実験結果

電磁波照射後の照射面の温度分布は図-17に示すように、中心が高温である楕円状となる。また、内部温度分布は、図-18～図-21に示すように中心上部が高温となる放物線状となる。このときの最高温度は図-22に示すように、照射電力及び照射時間の増加によって増加する。供試体表面の温度分布と供試体表面における電磁波の電力密度（電界強度の自乗）分布を一併に表示すると

図-23に示すようになり、温度分布は電力密度分布と非常に似た形状を示し、上記の加熱原理が、実際の加熱現象を表していると考えられる。したがって、破砕効果の予測に必要な温度分布のシミュレーションには、実際の測定が不可能な供試体内部の電力密度の代わりに実際に測定した温度分布から電力密度を逆算する方法を採用することが妥当であると考えられる。しかし、岩盤の温度、含水率によって電磁気特性が変化することから、温度の絶対値はかなりのばらつきを示すものと考えられる。

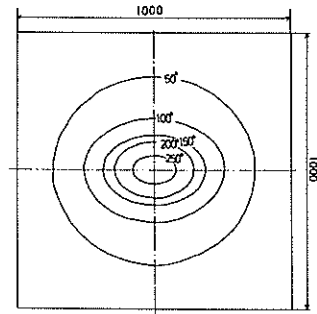


図-17 照射面の温度分布
(花崗岩 350kW, 2分30秒)

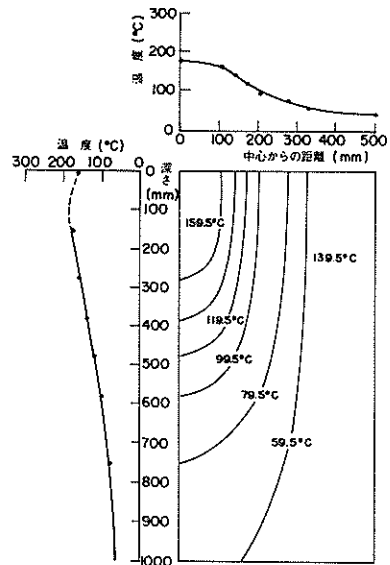


図-18 温度分布実測値
(花崗岩 350kW, 2分30秒)

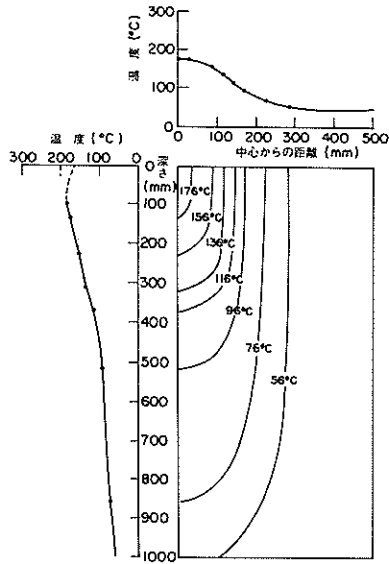


図-19 温度分布実測値
(花崗岩 350kW, 2分30秒)

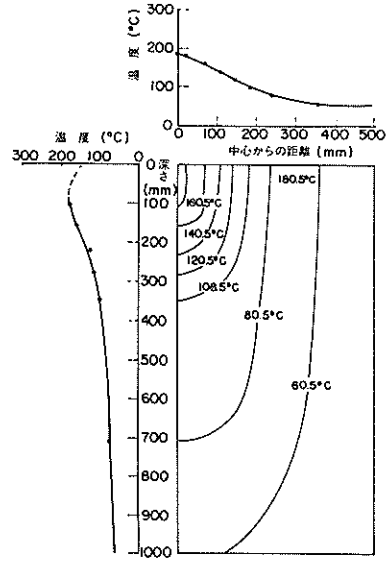


図-21 温度分布実測値
(花崗岩 350kW, 3分27秒)

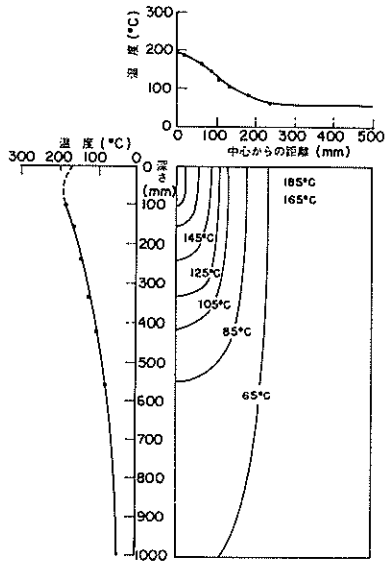


図-20 温度分布実測値
(花崗岩 350kW, 3分27秒)

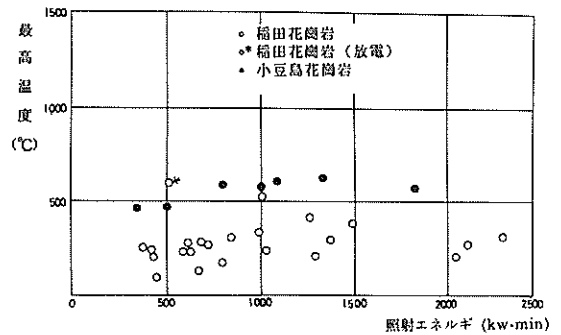


図-22 最高温度と照射エネルギー (花崗岩)

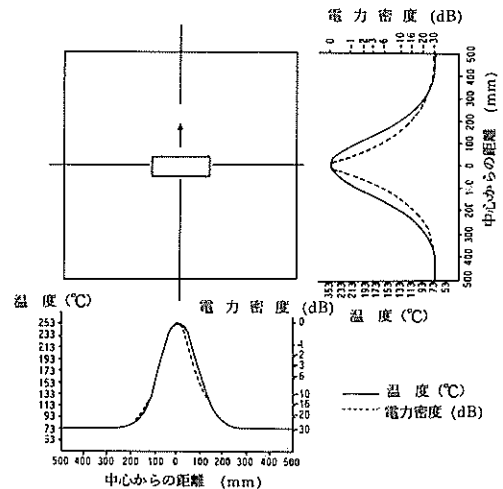


図-23 電力密度と温度分布実測値
(花崗岩 50kW, 20分)

5. 電磁波による破碎原理

電磁波によって加熱された岩盤が破碎することには次の三つの要因が考えられる。

- (1) 加熱による岩盤自体の組成成分の組織的、化学的变化。
- (2) 加熱により岩盤内部に発生する熱応力。
- (3) 岩盤内部に発生した加熱蒸気圧。

加熱による岩盤の組成成分の組織的变化は、水分の蒸発による含水率の低下、石英結晶の変態（ α 石英から β 石英）が考えられる。しかしながら、岩盤を急加熱すると比較的低温で破碎するのに対して、同じ岩盤を徐々に加熱するとかなり高温になっても破碎しないことから、(2)の熱応力による破碎が最も大きな要因と考えられる。電磁波によって加熱された岩盤内部の温度は、前項で述べたように岩盤内部の電界強度の自乗に比例する。したがって、岩盤内部の電界強度の分布が一様でなくある分布を持つことから、これにしたがった温度分布となる。岩盤内では、加熱温度に比例した熱膨張が起こるが周囲の部分との温度差に伴う熱膨張の差から自由な熱膨張が妨げられることにより、熱応力が発生する。このときの熱応力は、周囲との温度差が大きいほど、すなわち温度勾配が大きいほど大きくなる。(3)の加熱蒸気圧は、岩盤中の加熱水蒸気が等容積変化したとして、 1000°C になったとき、約 4.4kgf/cm^2 であることから、破碎にはあまり関係しないと考えられる。

6. 電磁波による破碎状況

6.1 実験概要

100kW及び350kW電磁波破碎機を用いて破碎実験を行った。供試体として $1\text{m}\times 1\text{m}\times 1\text{m}$ の切り出し岩を用いた。これは、実際の自然岩盤とみなせる大きさの供試体を得ることが困難であることと、自然岩盤にはクラックが無いことは極めてまれであり、切り出し岩を用いても自然岩盤と大差ないと考えたからである。

6.2 実験結果

花崗岩は100kW電磁波破碎機を用いた場合には、電磁波照射開始後、約10分で、また350kW電磁波破碎機を用いた場合には、1分前後で照射面中央付近からクラックが発生し、周囲に向かって発達していく。この破碎の進行過程を図-24に示す。このときの破碎量をクラックの全長の総和で評価した。図-25に照射エネルギー（照射電力×照射時間）と破碎量（クラック長さ）の関係を示す。これは、照射エネルギーの増加によって、破碎量も増加する傾向を示している。また、図-26に照射電力と

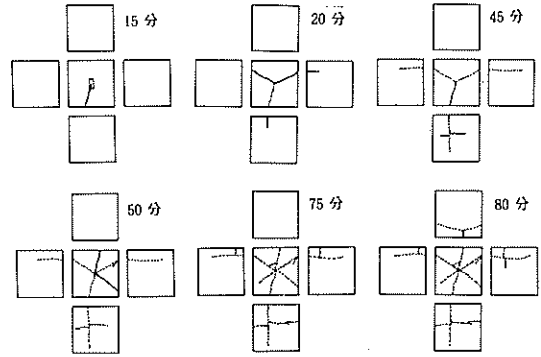


図-24 花崗岩の破碎進行過程 (50kW)

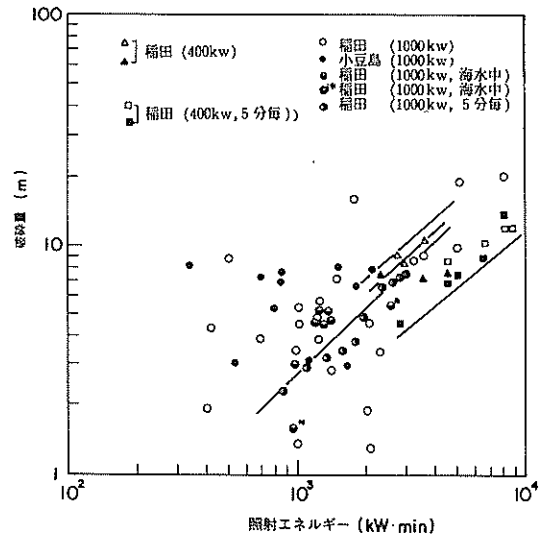


図-25 破碎量(クラック長さ)と照射エネルギー(花崗岩)

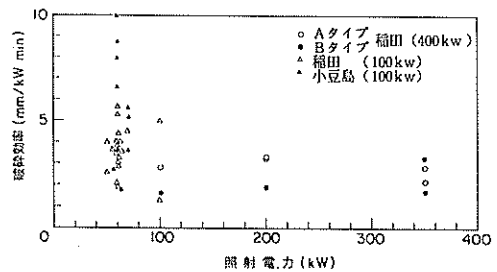


図-26 破碎効率と照射電力(花崗岩)

破碎効率（単位照射エネルギー当たりの破碎量）の関係を示す。これは、照射電力の上昇によって破碎効率も上昇することを示している。

7. 温度分布シミュレーション

電磁波が岩盤中に伝搬すると、(8)式に示すように、電磁波の周波数、電界強度の自乗、岩盤の誘電率、誘電体力率に比例した電力が吸収される。

$$W = \frac{5}{9} f \epsilon_r \tan \delta E^2 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^3 \cdot \text{s)} \quad (9)$$

これを熱量に換算すると、

$$Q = 1.33 f \epsilon_r \tan \delta E^2 \times 10^{-9} \text{ (cal/m}^3 \cdot \text{s)} \quad (10)$$

したがって、熱伝導及び熱放射がないと仮定し、岩盤の単位体積重量を γ 、比熱を c とすれば、単位時間当たりの温度上昇 ΔT は(11)式で与えられる。

$$\Delta T = \frac{1.33 f \epsilon_r \tan \delta E^2}{\gamma c} \times 10^{-9} \text{ (deg/s)} \quad (11)$$

電磁波の照射時間を t とすれば、岩盤の温度上昇 ΔT_t は(12)式であたえられる。

ただし、岩盤の諸定数は温度に依存することがわかっているが、ここでは温度に依存せず一定と考える。

$$\Delta T_t = \frac{1.33 f \epsilon_r \tan \delta t E^2}{\gamma c} \times 10^{-9} \text{ (deg)} \quad (12)$$

したがって、岩盤の温度上昇は電磁波の周波数を一定とすると、電界強度の自乗と照射時間に比例すると考えられる。

ここで電界強度は岩盤中では測定することが不可能であるため、実験によって測定した温度分布からその時の電界強度を推定する。(12)式から電界強度について解けば(13)式となる。

$$E^2 = \frac{\Delta T_t \gamma c}{1.33 f \epsilon_r \tan \delta t} \times 10^9 \text{ (V/m)} \quad (13)$$

このように、実験で測定した温度分布から電界強度を計算し、岩盤内の発熱量を推定し、有限要素法により非定常熱伝導解析を行って、温度分布を推定した。この結果、図-27～図-30（照射電力350kW）に示すように、照射電力及び照射時間に伴った温度上昇を示す温度分布が得られた。また、これらのシミュレーションで得られた温度分布は、上述の温度分布の測定値（図-18～図-21）と良く一致している。そこで、このシミュレーションによって照射電力1000kW、1500kW及び2000kWでの温度分布を10分おきに計算した結果を図-31～図-48に示す。

また、単位時間当たりに供試体に吸収される総熱量の計算値及び吸収された総熱量と照射電力との比（%表示）を図-49に示す。例えば、照射電力500kW（ ≈ 119.33 kcal）では発熱量は0.54kcalとなり、電磁気エネルギー

から熱エネルギーへの変換効率は約3.25%となっている。この変換効率を照射電力から反射電力（約70kW）を差し引いたエネルギーで計算すると、約3.78%となる。一方、測定された電磁波の吸収率から、供試体に吸収されると考えられる熱量（電磁気エネルギー）は322.83kW ≈ 77.05 kcalとなり、また温度分布から計算された実際の発熱量は0.54kcalであり、電磁気エネルギーから熱エネルギーへの変換効率は0.54/77.05=0.007となり、約0.7%程度となる。すなわち、電磁波の吸収率の測定値から推定さ

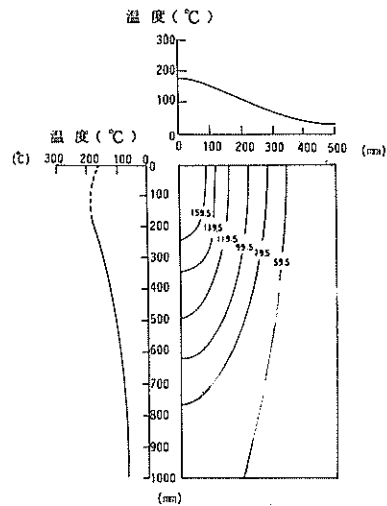


図-27 温度分布計算値
（花崗岩350kW, 2分30秒）

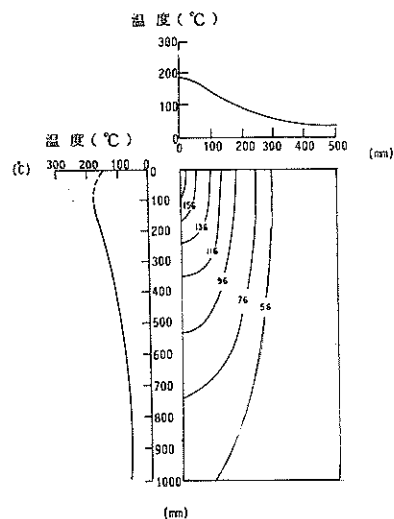


図-28 温度分布計算値
（花崗岩350kW, 2分30秒）

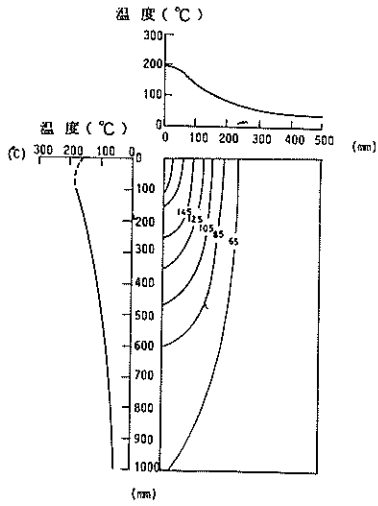


图-29 温度分布计算值
(花岗岩 350kW, 3分27秒)

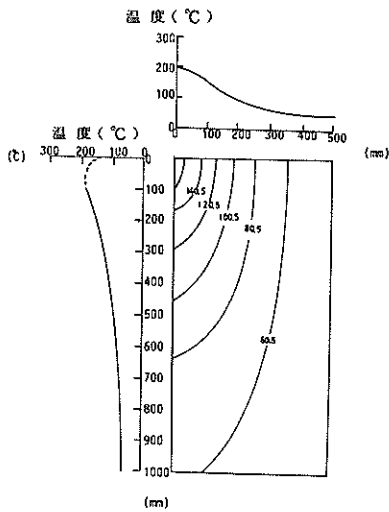


图-30 温度分布计算值
(花岗岩 350kW, 3分27秒)

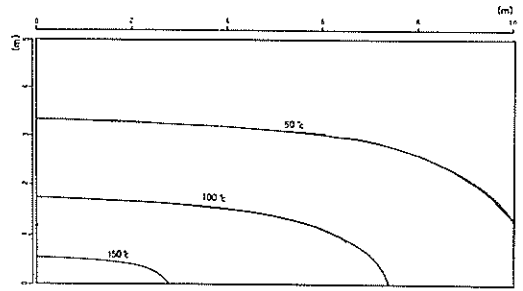


图-32 温度分布计算值 (1000kW, 20分)

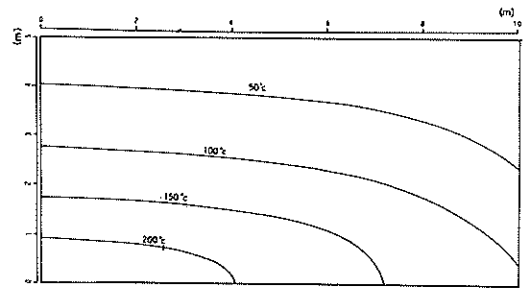


图-33 温度分布计算值 (1000kW, 30分)

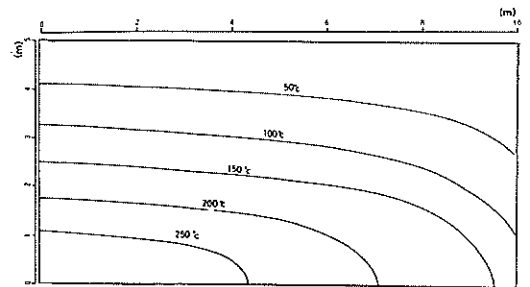


图-34 温度分布计算值 (1000kW, 40分)

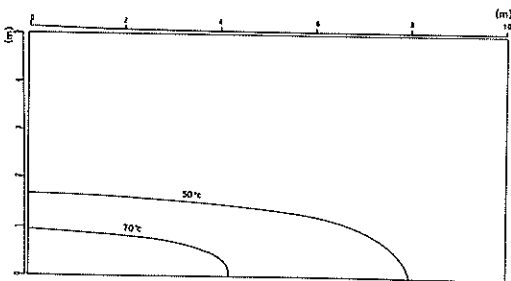


图-31 温度分布计算值 (1000kW, 10分)

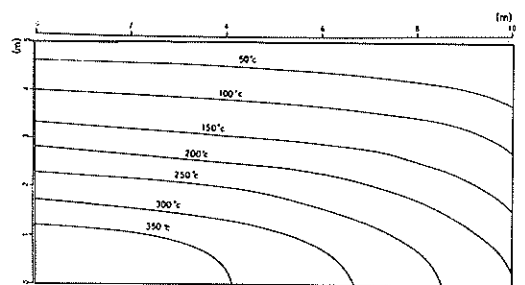


图-35 温度分布计算值 (1000kW, 50分)

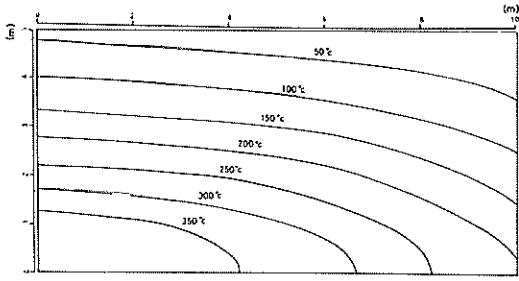


図-36 温度分布計算値 (1000kW, 60分)

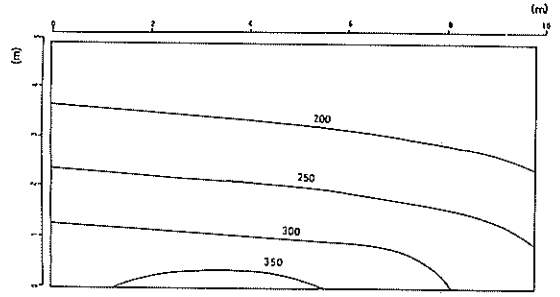


図-40 温度分布計算値 (1500kW, 40分)

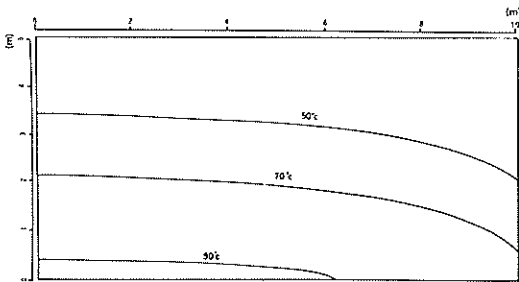


図-37 温度分布計算値 (1500kW, 10分)

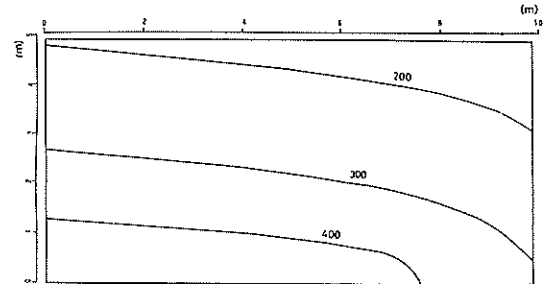


図-41 温度分布計算値 (1500kW, 50分)

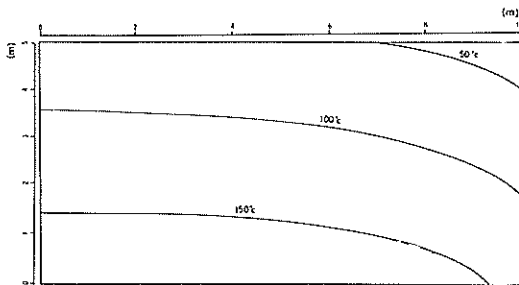


図-38 温度分布計算値 (1500kW, 20分)

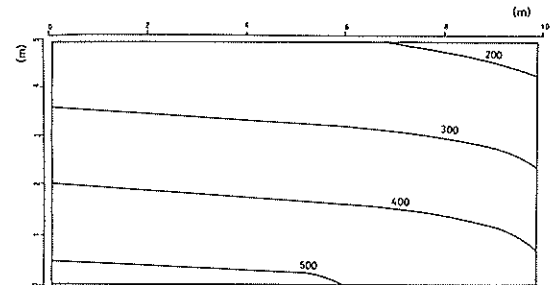


図-42 温度分布計算値 (1500kW, 60分)

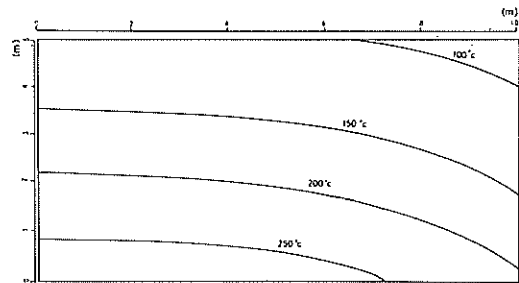


図-39 温度分布計算値 (1500kW, 30分)

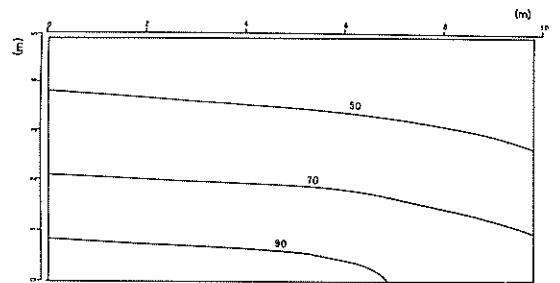


図-43 温度分布計算値 (2000kW, 10分)

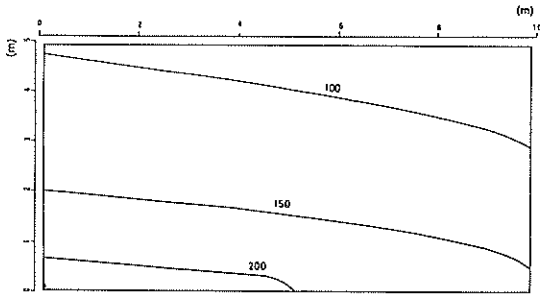


図-44 温度分布計算値 (2000kW, 20分)

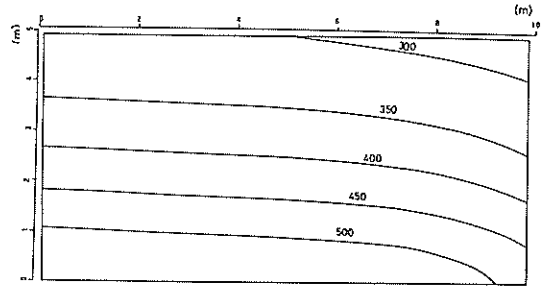


図-48 温度分布計算値 (2000kW, 60分)

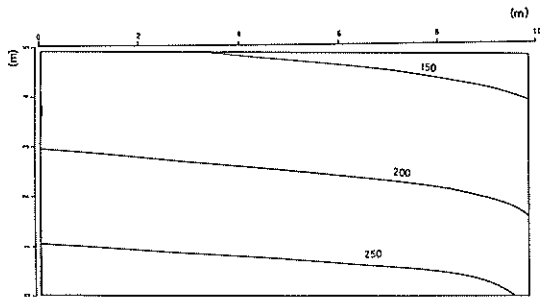


図-45 温度分布計算値 (2000kW, 30分)

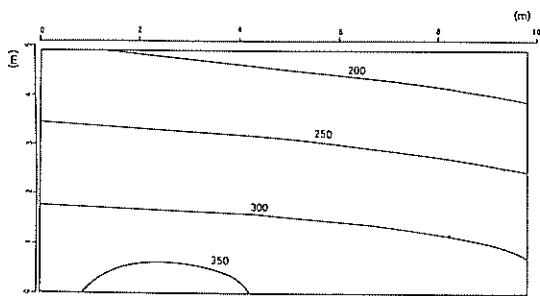


図-46 温度分布計算値 (2000kW, 40分)

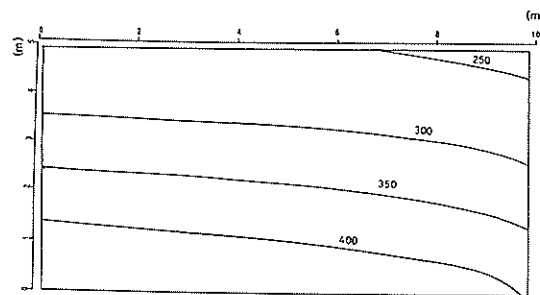


図-47 温度分布計算値 (2000kW, 50分)

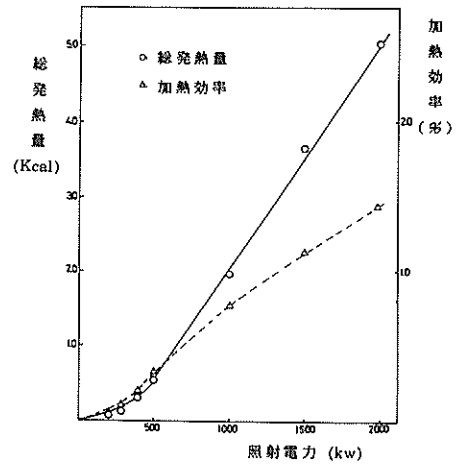


図-49 総発熱量及び加熱効率

れる吸収エネルギーの約5倍のエネルギーが吸収されることが温度分布の測定値からわかる。このことは、温度分布測定では花崗岩を自然状態のまま使い、電磁波吸収率測定では室内での乾燥状態で用いたことによると考えられる。ちなみに、花崗岩の電磁気特性の中でも誘電体率が温度、湿度によって数値変化することが知られている。

8. 熱応力シミュレーション

電磁波砕岩において、熱応力が最も破砕現象に関係していると考えられており、上記の温度分布シミュレーションで得られた温度分布を入力として、供試体を軸対称として有限要素法を用いて熱応力解析を行った。熱応力は平均応力と相当応力で評価し、図-50～図-52にその等応力線を示す。ここで、平均応力は最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_3 及び中間主応力 σ_2 の平均値である。また、相当応力は(4)式で表される。平均応力は温度分布と似た分布を示し、温度上昇に比例している。一方、相当応力は中心及び側面付近で大きく、その間が小さくなっ

ている。

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2} [(\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2)]} \quad (14)$$

加熱によって岩盤内に生ずる熱応力状態がその岩盤の破碎基準に達したかを判定し、破碎効果をシミュレートしてみた。破碎基準としては Mohr, Griffith, von Mises らがそれぞれの説を發表しているが、ここでは、 von Mises の説を採用した。上記の熱応力解析において、応力状態がこれらの破壊条件を満足している要素の弾性

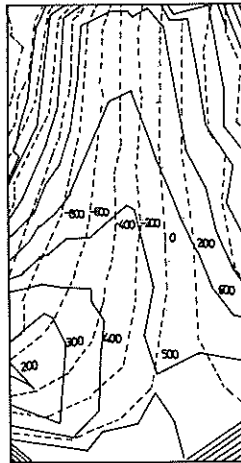


図-50 平均応力と相当応力計算値
(花崗岩 350kW, 7分0秒)

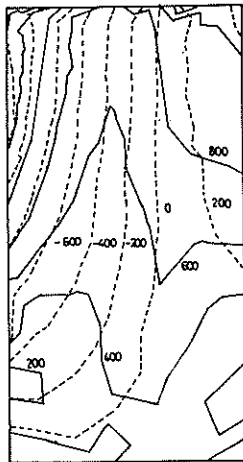


図-51 平均応力と相当応力計算値
(花崗岩 350kW, 5分2秒)

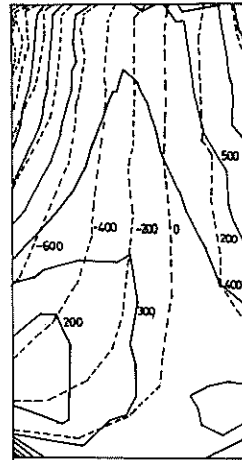


図-52 平均応力と相当応力計算値
(花崗岩 340kW, 4分39秒)

係数を 1/10 とし、ポアソン比を 0.45 として再度熱応力を計算し、新たに破壊条件を満足している要素の弾性係数及びポアソン比を上記のように変えて、新たに破壊条件を満足する要素がなくなるまで再計算を繰り返す。破碎条件を満足する要素の体積を破碎量として評価した。図-53～図-70 に照射電力 1000 kW, 1500 kW 及び 2000 kW における照射時間 10 分～60 分での破碎基準に達した要素を示してある。これによると、破壊は照射面中心及び中心軸上の一定の深さの場所から始まり、この二つの間が徐々に破壊される結果となる。また、破壊条件を満足した要素を含みその内側にある要素の体積の総和を破碎量として評価した場合の破碎量は、図-71～図-73 に示すように、照射電力及び照射時間の増加によって対数関数的に増加し、照射エネルギーの増加によって、対数関数的に増加しているが、同じ照射エネルギーならば照射電力が大きいくほど大きくなる。破壊は供試体中心付近から起こり、実際の現象と類似しているが、実際の現象が中心付近から周囲に向かってクラックが伸展するが、シミュレーションでは破壊が円錐状に起こり、中心に向かって伸展する。これは、シミュレーションでは、岩盤の非均質さと条件による変化を考慮せず物性値を一定とし、軸対称要素を用いたことによると考えられる。また、破壊した要素の弾性係数を 1/10、ポアソン比を 0.45 としただけで実際に破碎された要素の物性値の変化を表せないことによると考えられる。また、実際の破碎現象では応力状態が破壊条件を満足する要素から始まるとは限らず、潜在的なクラック等の欠陥から始まる場合もあり、この確率的要素をプログラムすることが困難であるため、考慮しなかったことによると考えられる。

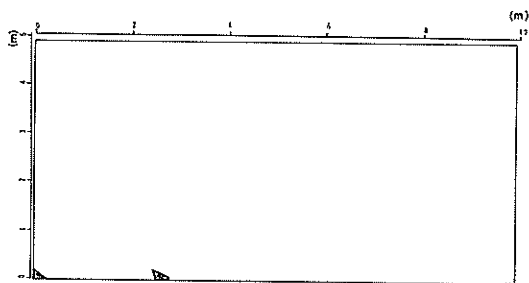


図-53 破壊条件を満足した要素
(1000kW, 10分)

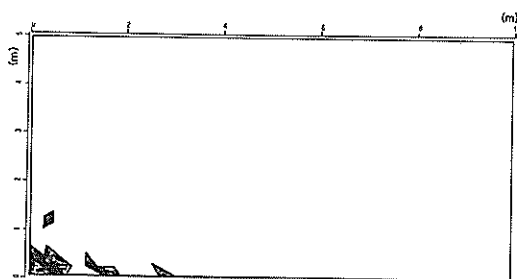


図-57 破壊条件を満足した要素
(1000kW, 50分)

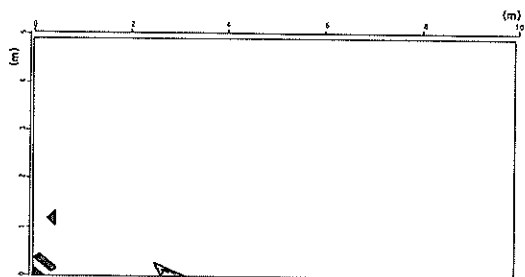


図-54 破壊条件を満足した要素
(1000kW, 20分)

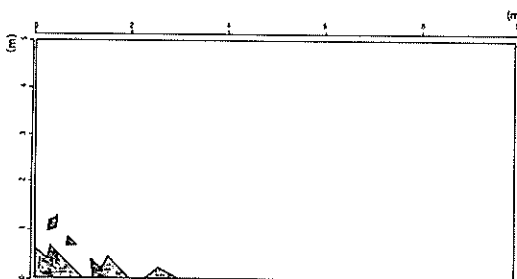


図-58 破壊条件を満足した要素
(1000kW, 60分)

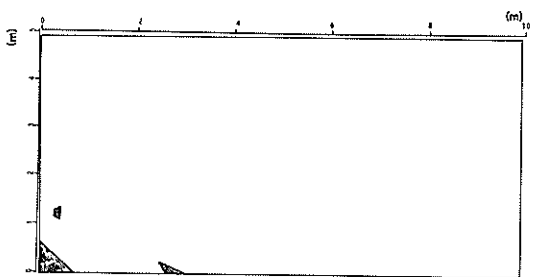


図-55 破壊条件を満足した要素
(1000kW, 30分)

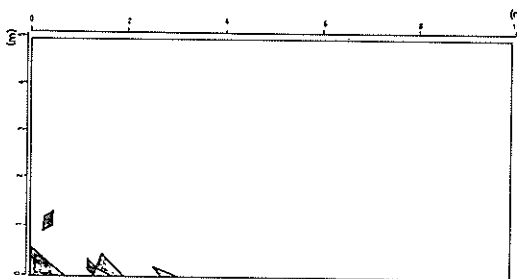


図-59 破壊条件を満足した要素
(1500kW, 10分)

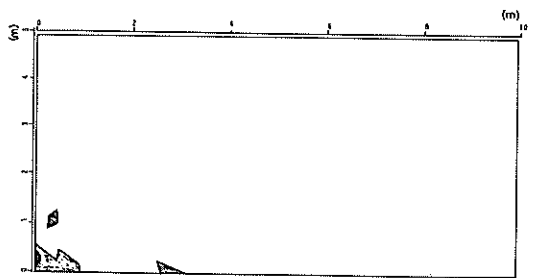


図-56 破壊条件を満足した要素
(1000kW, 40分)

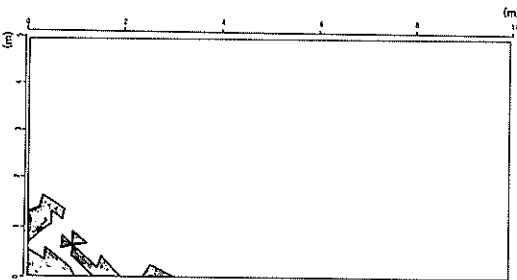


図-60 破壊条件を満足した要素
(1500kW, 20分)

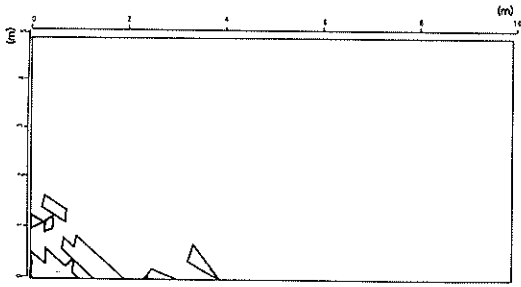


図-61 破壊条件を満足した要素
(1500kW, 30分)

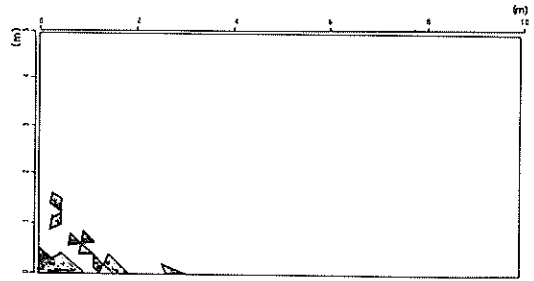


図-65 破壊条件を満足した要素
(2000kW, 10分)

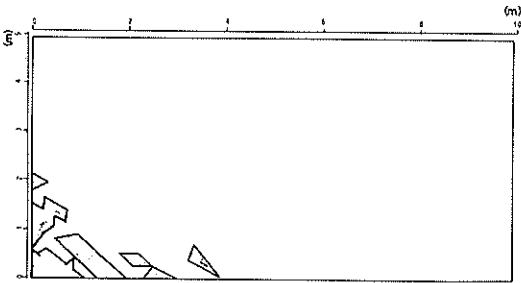


図-62 破壊条件を満足した要素
(1500kW, 40分)

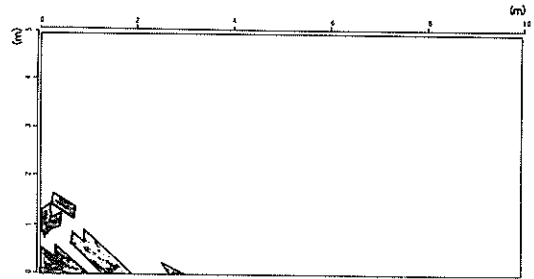


図-66 破壊条件を満足した要素
(2000kW, 20分)

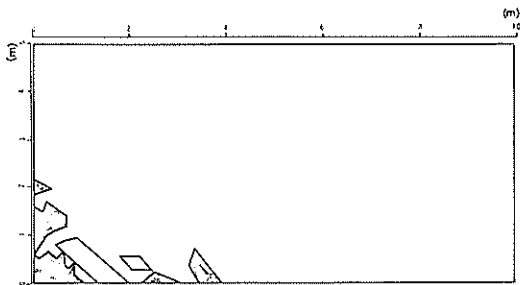


図-63 破壊条件を満足した要素
(1500kW, 50分)

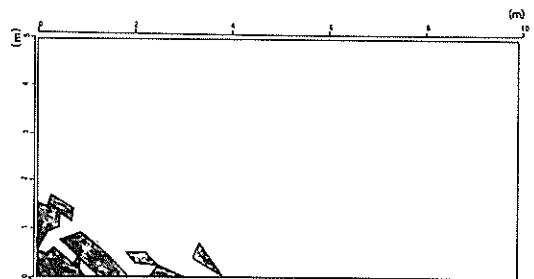


図-67 破壊条件を満足した要素
(2000kW, 30分)

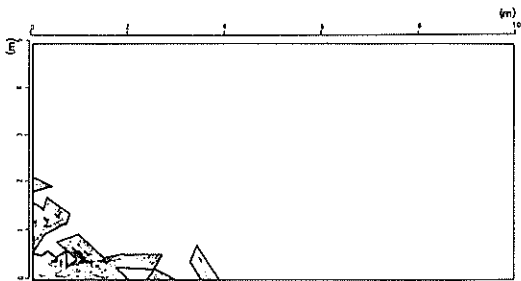


図-64 破壊条件を満足した要素
(1500kW, 60分)

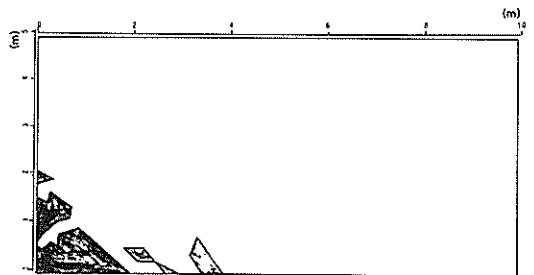


図-68 破壊条件を満足した要素
(2000kW, 40分)

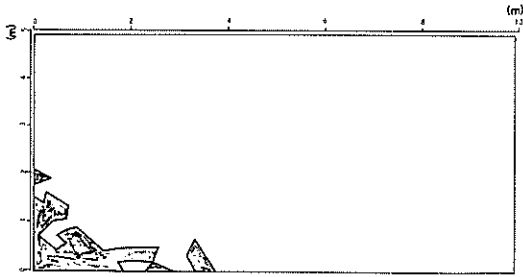


図-69 破壊条件を満足した要素
(2000kW, 50分)

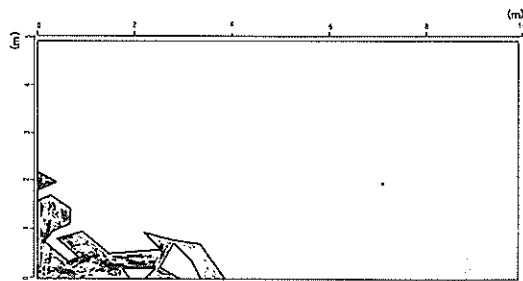


図-70 破壊条件を満足した要素
(2000kW, 60分)

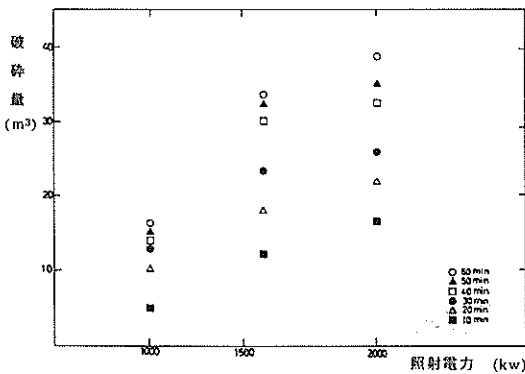


図-71 破砕量と照射電力 (計算値)

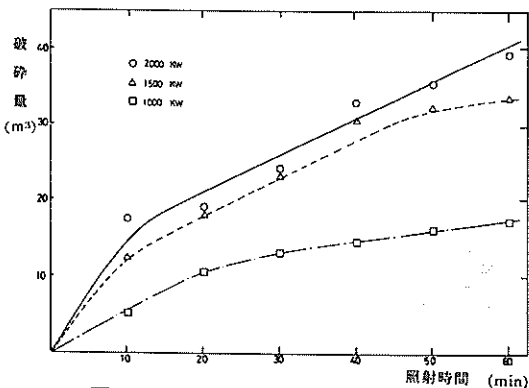


図-72 破砕量と照射時間 (計算値)

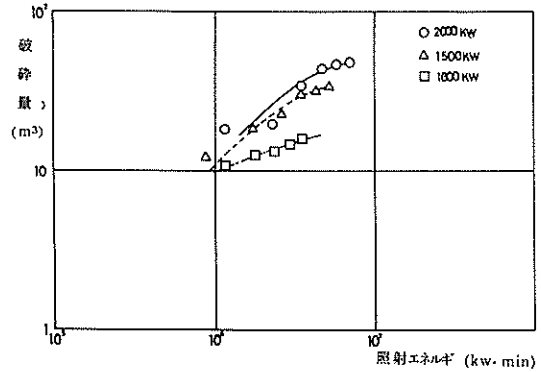


図-73 破砕量と照射エネルギー (計算値)

9. 加熱による強度低下

9.1 実験概要

加熱された岩盤は、造岩鉱物の組織的、化学的变化や熱応力による微細亀裂の発達によって、その強度が変化する。このため、電磁波照射前後の供試体から5本のボーリングコアを採取し、おのおののボーリングコアから $\phi 36\text{mm}$, $L 72\text{mm}$ と $\phi 36\text{mm}$, $L 36\text{mm}$ の試験片を製作し、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、弾性波伝搬速度を測定した。各試験片の整形は JIS に準じて行った。

9.2 実験結果

図-74 に圧縮強度及び弾性波伝搬速度と温度上昇の関係、図-75 に圧裂引張強度と温度上昇の関係を示す。これから、強度は温度の上昇によって低下する傾向を示すことができる。

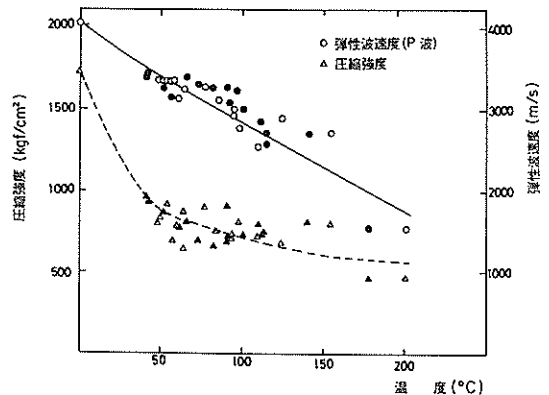


図-74 圧縮強度及び弾性波伝搬速度と温度上昇

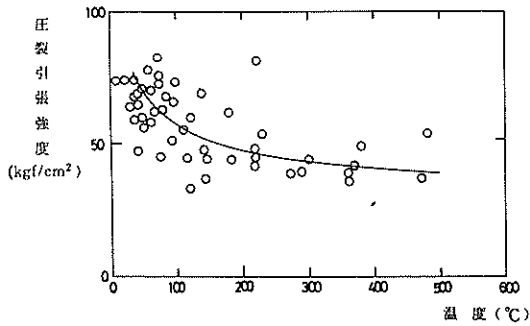


図-75 圧裂引張強度と温度上昇

10. 強度低下による破砕効果シミュレーション

浚渫工事例では、圧縮強度 1013kgf/cm² ~ 1509kgf/cm² の花崗岩をポンプ船(ポンプ馬力 8000PS, カッター馬力 1200PS)を用いて浚渫した例が報告されている。したがって、電磁波照射による砕岩量として、圧縮強度が 1000kgf/cm² 以下となる体積を求めることとした。上

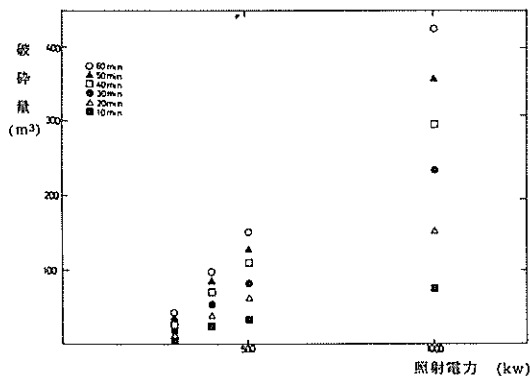


図-76 破砕量と照射電力

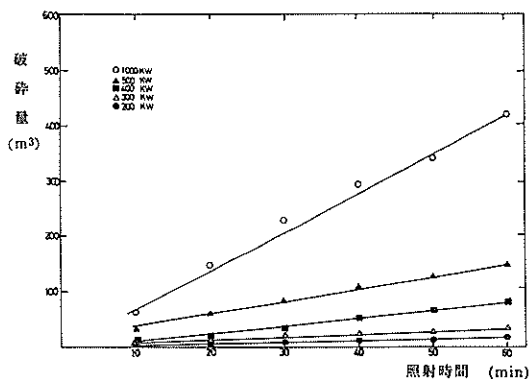


図-77 破砕量と照射時間

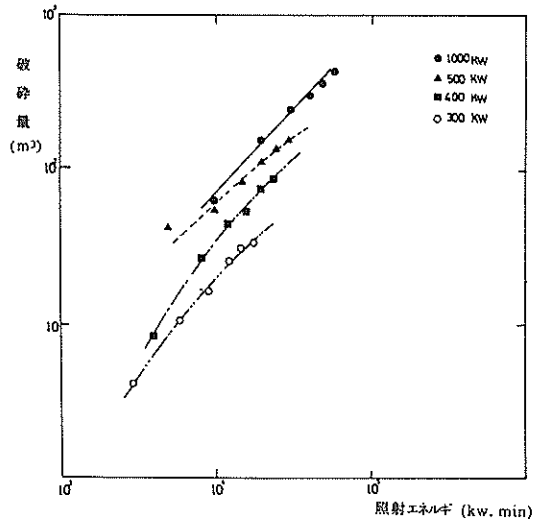


図-78 破砕量と照射エネルギー

述の圧縮強度と温度上昇との関係から、圧縮強度が 1000kgf/cm² となる温度は約 50°C となることがわかる。ここでは温度分布をシミュレーションによって求め、この温度分布から 50°C 以上となる体積を計算し、これを破砕量として評価することとした。この結果、図-76 ~ 図-78 に示すように破砕量(圧縮強度が 1000 kgf/cm² 以下となる体積)は照射電力、照射時間にはほぼ比例して増加することが予測される。

11. まとめ

電磁波砕岩における砕岩効果の予測では、岩盤が非均質であり、岩盤の諸特性が電磁波の照射電力及び周波数、岩盤の温度及び含水率によって変化し、その値を測定することが難しいことと、発熱量の計算に必要な電界強度を測定することが不可能であるため、純理論的に温度分布を計算することは不可能である。したがって、温度分布の測定値から逆算して発熱量を求め、温度分布を非定常熱伝導解析によりシミュレーションで求める方法を採用したが、実測値と良く一致した。熱応力状態を上述の温度分布から計算し、破壊条件を満足する要素の体積を破砕量として評価する方法は、解析の容易さから軸対称問題として解析したこともあり、岩盤という非均質な物体をうまく表現することが難しく、実際の現象を再現できなかった。岩盤の強度低下から、一定の強度以下となる体積を破砕量として評価する方法は、砕岩後の浚渫能力によって変わるが、現実的な方法であると考えられる。

12. あとがき

電磁波砕岩における砕岩量の予測には、温度分布から発生する熱応力を計算して、その応力状態が破壊条件を満足する部分の体積を求める方法は、岩盤が非均質なものであり、またその諸特性が電磁波の照射電力及び周波数、温度及び含水率等によって変化することから実際の破碎過程を再現することが難しく、使用できないことがわかった。一方、今回提案した温度上昇による岩盤強度の低下から一定の圧縮強度以下になる体積を求める方法では、温度分布を実測できれば、そのときの発熱量を計算し、非定常熱伝導解析を行うことによってかなり正確な温度分布シミュレーションが可能であり、岩盤強度と温度上昇との関係から容易に破碎量を予測できる。

電磁波砕岩工法の実用化には、他の大型作業船と同程度の照射電力を持つ砕岩装置の開発が必要であると考えられていたが、350kW 破碎機での実験では、破碎機に放電等の突発的な反射波に対して十分な対策が採られていなかったため、照射電力の増加による破碎効率の飛躍的な上昇は認められなかった。しかし、今回の破碎効果の予測によって、照射電力が大きいほど砕岩終了までの時間が短く、また破碎効率が高くなることが予想される。したがって、実用化には、岩盤の熔融や放電現象の発生を防ぐために電力密度を下げる（照射器の開口面積を大きくする）等の対策を施し、なるべく大電力の電磁波破碎機を開発する必要があると考えられる。

(1986年4月28日受付)

参考文献

- 1) 高橋英俊他：高出力マイクロ波破碎機による岩石破碎，港湾技研資料，No.313, 1979年3月
- 2) 高橋英俊他：高出力マイクロ波破碎機による岩石破碎（その2）—特に自然岩盤（花崗岩）の破碎について—，港湾技研資料，No.330, 1980年3月
- 3) 高橋英俊他：電磁波砕岩における水中照射器の性能について，港湾技研資料，No.391, 1981年9月
- 4) 高橋英俊他：電磁波砕岩における水中照射器について—その2—，港湾技研資料，No.535, 1985年9月
- 5) 山口梅太郎他：熱による岩石の強度変化あるいは破碎について，日本鉱業会誌 Vol.84, No.986, 1970年6月
- 6) 外尾善次郎他：岩石の線膨張係数について，日本鉱業会誌 Vol.84, No.959, 1968年3月
- 7) 土木学会編：土木技術者のための岩盤力学，昭和50年改訂版
- 8) 山田嘉昭：塑性・粘弾性，培風館，昭和47年5月20日

港 湾 技 研 資 料 No.558

1 9 8 6 ・ 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 有限会社 つばき印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.