

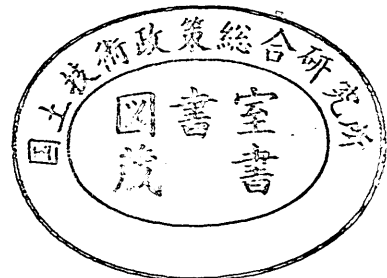
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 14 NO. 3 SEPT. 1975

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第14巻 第3号 (Vol. 14, No. 3), 1975年9月 (Sept. 1975)

目 次 (CONTENTS)

1. Influence of the clearance between bed and mouth sucking a solid body
...Yoshikuni OKAYAMA, Tokuji YAGI, Yoshihiro SATO and Masaru SAITO..... 3
(吸込間隙の影響を受ける固体の吸込力について
.....八木得次・岡山義邦・佐藤義博・斎藤 勝)
2. 数値波動解析法による港内波高分布の計算...谷本勝利・小舟浩治・小松和彦.....35
(Numerical analysis of wave propagation in harbours of arbitrary shape
.....Katsutoshi TANIMOTO, Koji KOBUNE and Kazuhiko KOMATSU)
3. 浅海域における波浪の破碎変形.....合田 良実.....59
(Deformation of irregular waves due to depth-controlled wave breaking
.....Yoshimi GODA)
4. 港湾環境における耐食鋼の耐食性調査.....善 一章・阿部正美... 107
(Survey of corrosion resistance of corrosion-resistant steel under marine
environments.....Kazuaki ZEN and Masami ABE)
5. 電磁波による岩盤の破碎——局部加熱効果と熱破碎——
.....小岩苔生・白鳥保夫・高橋英俊・松本 茂... 181
(Rock breaking by microwave radiation——effects of local heating and thermal
fracture.....Taisei KOIWA, Yasuo SHIRATORI, Hidetoshi TAKAHASHI
and Shigeru MATSUMOTO)

5. 電磁波による岩盤の破碎

— 局部加熱の効果と熱破碎 —

小 岩 苔 生*

白 鳥 保 夫**

高 橋 英 俊***

松 本 茂***

要 旨

電磁波を岩盤に照射して破碎を行う場合、局部的な加熱による熱応力の影響が大きい。本報告では5種類の電磁ホーンから照射される電力密度の比較を行い、その内の2種類については水飽和砂の加熱効果を測定している。両者とも加熱効果は電力密度の分布ほどの大きな差異は示さなかったが、導波管内に再入して来る反射電力の大きさには特徴のある差が見られた。

破碎効果に対する加熱領域の形状と大きさの影響は興味のある問題であるが、ここでは加熱領域の形状を円筒形で温度上昇は一樣とし、その半径を6~20cm、深さを2~10cmの範囲で加熱領域の大きさの影響を調べた。岩盤の特性はモルタルの例をとり加熱の進行中は不変とし、軸対称として有限要素法により破碎量を求めた。

要素数 332, 節点数 193, 拘束体の半径 100cm, 深さ 50cm, $E=1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$, $\nu=0.2$, $\alpha=10 \times 10^{-6}$, 圧縮強度 300kg/cm^2 , 引張強度 30kg/cm^2

計算結果によると、ある加熱領域の大きさに対してはある熱量が必要で、その量は加熱温度で 100°C 程度であり、これ以上の温度上昇があれば破碎量に対する加熱領域の大きさによる差異はあまりない。

次にモルタルブロックと花崗岩について915MHz, 最大出力30kWの装置を用いて実験を行い、比較的低い加熱温度における温度分布を求め、これを基に近似式により温度分布を与え、応力状態が破碎に達している要素では $E=0$ としモデル化して破碎量を求め、実験値と比較した。この結果、モルタルブロックでは照射エネルギーと破碎量が比例するが、花崗岩の小形の試料の場合にはクラックの発生のみで、円錐状の破碎が生じない事などが確認された。

* 機材部 特殊作業船開発室長

** 機材部 水中施工主任研究官

*** 機材部 特殊作業船開発室

5. Rock Breaking by Microwave Radiation

—effects of local heating and thermal fracture—

Taisei KOIWA*

Yasuo SHIRATORI**

Hidetoshi TAKAHASHI***

Shigeru MATSUMOTO***

Synopsis

In case of rock breaking by microwave radiation, thermal stress caused by local heating has a great affection. In this report, authors tried to compare microwave power density distribution of five types of metal horns. Besides, two of them picked out to compare their heating characteristics when microwave radiated to wet sands saturated with water. They did not show such remarkable differences in heating effects as they showed in microwave power density distributions, on the other hand they presented distinctive features concerning with power reflection coming back into the wave guide.

As effects of shape and volume of the heated domain in a mass become one of the interesting problems, authors made some calculations using the finite element method;

number of elements 332 number of nodal points 193 radius of the mass 100cm
radius of the heated domain 6~20cm depth of the mass 50cm
depth of the heated domain 2~10cm $E=1 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ $\nu=0.2$ $\alpha=10 \times 10^{-6}$
compressive strength of the mass 300 kg/cm^2 tensile strength of the mass 30 kg/cm^2

In the calculations, assumed that the whole system was axially symmetric and characteristics of the mass were not variable while heating process. The results show that certain amount of thermal energy is determined for the heated domain in order to obtain effective fracture in the mass, and the amount of energy is equivalent to the temperature rise as much as about 100°C in any heated domains. Beyond this value of temperature rise, the volume of the heated domain has not essential meaning for realizing effective fracture in the mass.

Then authors made simulation models of rock fracture in case of mortar and granite blocks. In these simulations, using the finite element method, assumed that $E=0$ in the elements of fracture determined by stress conditions.

Distribution of temperature rise in the elements was inputted by approximating formulas based on the data obtained at comparatively low temperature rise, driving the microwave oscillator of 915 MHz frequency and 30 kW maximum power output. Through these simulations and experiments authors confirmed that there was a linearly increasing relation between the amount of fracture in mortar blocks and radiated microwave energy, and in case of a granite block, appearance of cracks.

* Chief of the Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

** Senior Research Engineer, Machinery Division

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

目 次

要 旨	181
1. ま え が き	185
2. 電磁ホーンの形状と放射電力密度	185
2-1 概 説	185
2-2 電力密度の測定	185
2-3 加熱温度の測定	186
2-4 実験結果	189
3. 局部加熱による破碎効果	189
3-1 熱応力の計算	189
3-2 加熱量による破碎効果	192
3-3 加熱領域の形状による破碎効果	193
4. 熱応力破碎モデルによる岩盤の破碎	198
4-1 概 説	198
4-2 モルタルブロックのモデルと破碎	199
4-3 花崗岩のモデルと破碎	205
5. モルタル試料の電磁波による破碎	205
5-1 概 説	205
5-2 実験結果	205
6. 花崗岩の電磁波による破碎	208
7. あとがき	208
謝 辞	209
参考文献	209
記 号 表	209

1. まえがき

電磁波による岩盤破碎に関する研究は、当研究所においては昭和45年度から基礎研究が始められ、予備実験については既に報告もされている。また実験装置については港湾技研資料 No. 196 にて報告されている。本報告ではモルタルブロックと花崗岩の電磁波照射による破碎について、予備実験での疑問点に対してモデル計算等を加えて解析した。

2. 電磁ホーン の形状と放射電力密度

2-1 概 説

電磁波は本来通信手段として発達したもので、本実験に用いた、いわゆるマイクロ波帯の周波数のものも例外ではなく、加熱効果などが発見されたために工業的にも利用されるようになり、通信用の周波数帯とは別に I. S. M. 帯が特に定められている。電磁ホーンも元来通信用として発達したものであり、発振器から同軸ケーブルや導波管により導かれた電磁波を通信用として効果的に空中に放出するためのものであった。従って電磁ホーンから遠隔の地へ効果的に電磁波を到達させる事を目的に研究されていた。一方電磁波による岩盤破碎の場合は局

部加熱状態を得るため、比較的狭い領域に電磁波を集中する事が必要である。このため電磁ホーンと岩盤との距離は一般に小さくとられる。この様な場合には電磁波の状態を理論的に解析する事は非常に困難であるとされている。ここでは5種類の電磁ホーンの電力密度の分布について簡単な比較実験および2種類の電磁ホーンの加熱効果について比較を行った。

2-2 電力密度の測定

マイクロ波帯の電磁波の場合、その電力密度の測定方法とくに大電力密度の場合の測定には困難をとまなうが、本実験では915MHz用の電力密度測定器を用いて、ホーンの形状による電力分布特性を比較した。電磁波発生装置は915MHz、0~30kW、電磁遮蔽室は幅4m×奥行10m、高さ3mの鉄板張り半地下水槽を用いた。電磁ホーンの開口部と電力密度測定器のアンテナとの距離は50cmとし、木製の支持棒により台車に固定した。図1に概略を示す。

遮蔽室の底部には水を20cm程張った。図2-1~2-5に使用した電磁ホーンを示す。電力密度の測定方法は、計器の測定範囲が200mW/cm²であり、600mW/cm²以上では焼損する恐れがあるので、マグネトロンのアノード電流が0.1A以下で500mW/cm²を示す場合には500

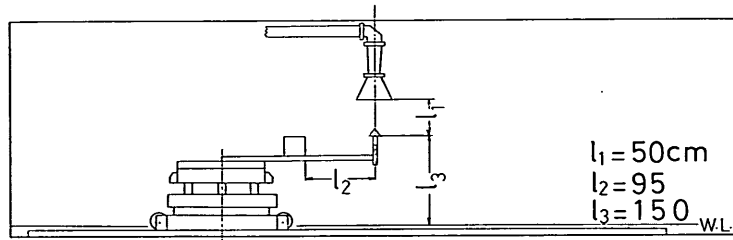


図 1 電力密度の測定

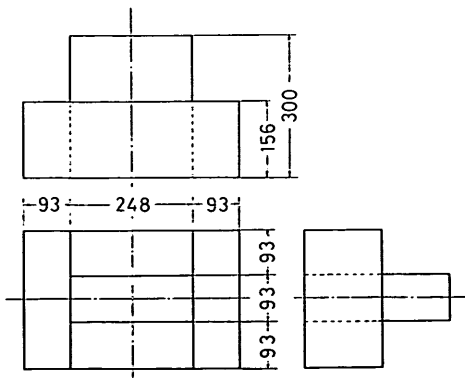


図 2-1 H-1形電磁ホーン

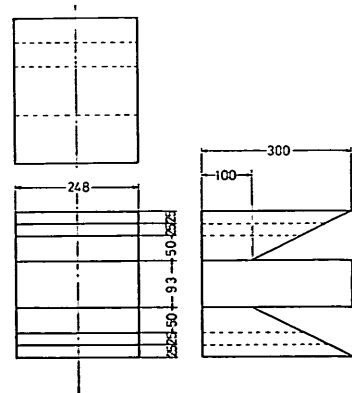


図 2-2 H-2形電磁ホーン

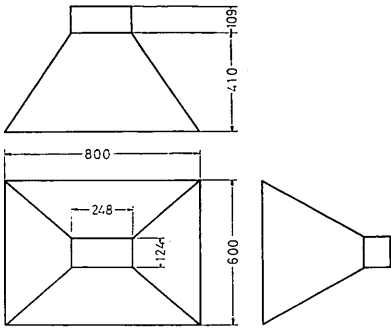


図 2-3 H-3 形電磁ホーン

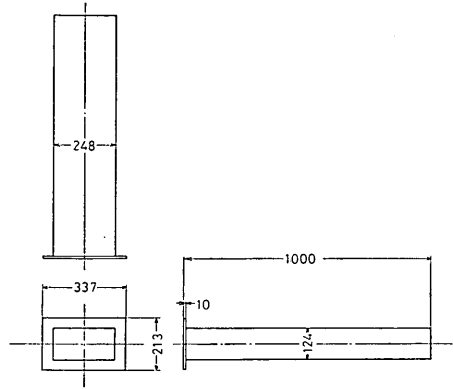


図 2-5 H-5 形電磁ホーン

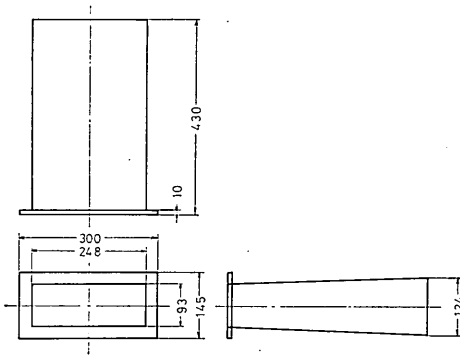


図 2-4 H-4 形電磁ホーン

mW/cm² 以上としたが、0.1A で 500mW/cm² 以下を示す場合はその数値を採った。図 3-1~3-5 に測定結果を示す。図中の数字は電力密度を示し、単位は mW/cm² である。また+印は 500mW/cm² 以上となる所である。点線は電磁ホーンの開口部を示す。

2-3 加熱温度の測定

電磁波による岩盤破碎には、局部加熱により生ずる熱応力の影響が大きいため、ホーン形状による局部加熱の状態を測定した。電磁ホーンは、電力密度の測定結果から、ホーン開口部の中央で比較的小さな電力密度値を

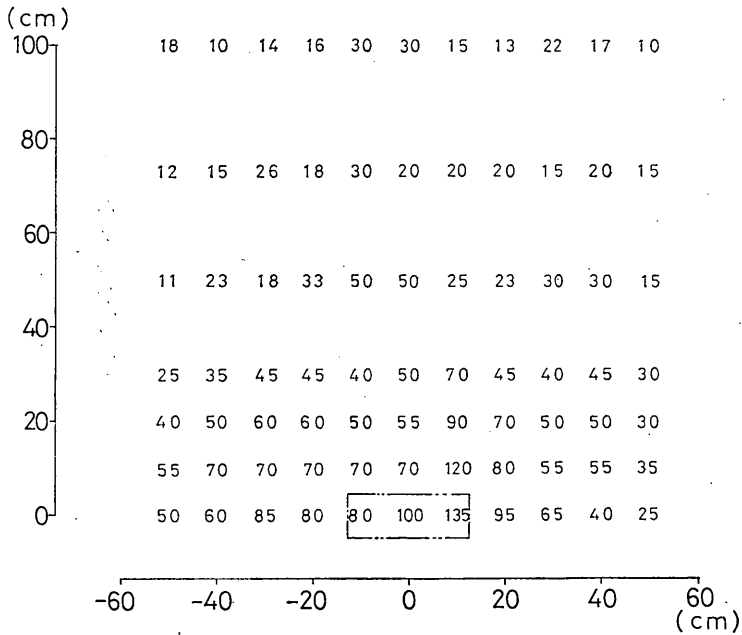


図 3-1 電力密度の分布 (mW/cm²) H-1 形

電磁波による岩盤の破碎

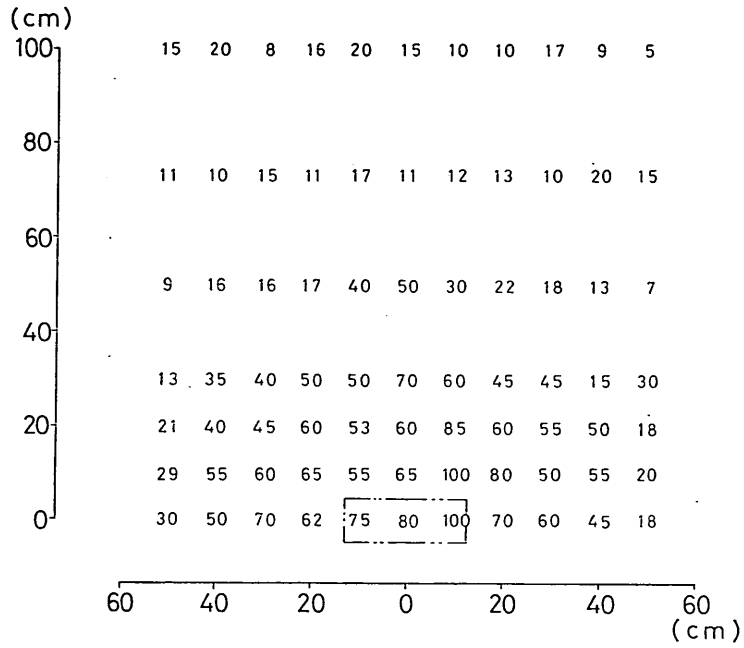


図 3-2 電力密度の分布 (mW/cm²) H-2 形

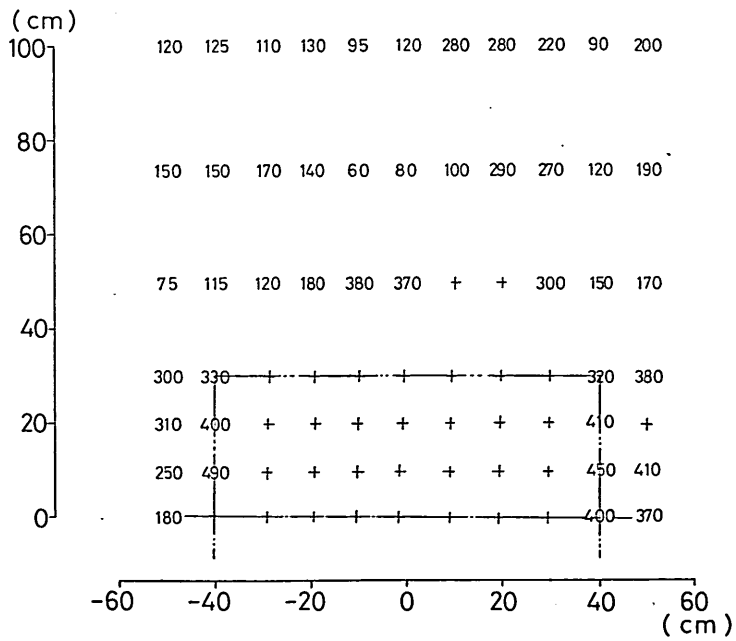


図 3-3 電力密度の分布 (mW/cm²) H-3 形

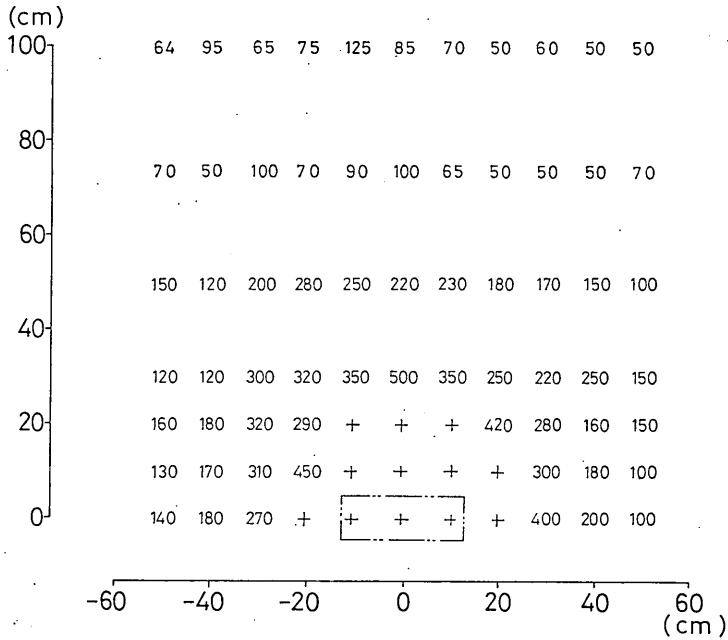


図 3-4 電力密度の分布 (mW/cm²) H-4 形

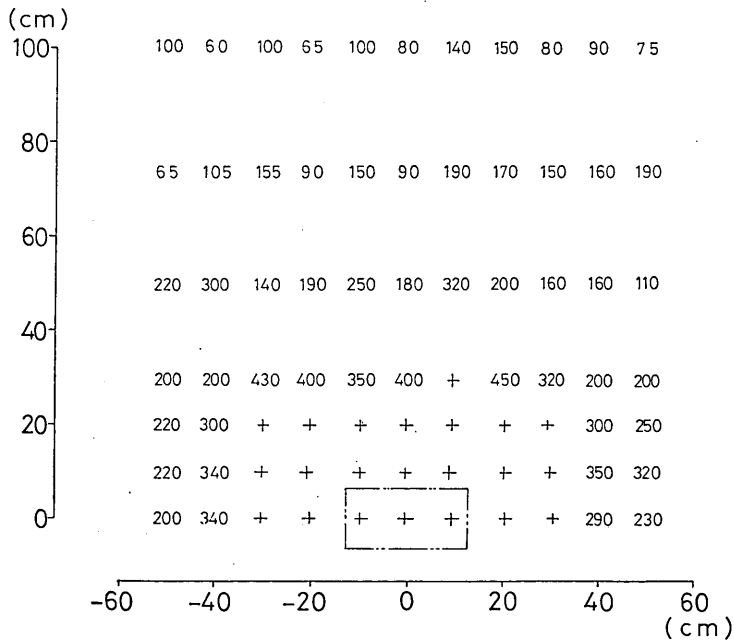


図 3-5 電力密度の分布 (mW/cm²) H-5 形

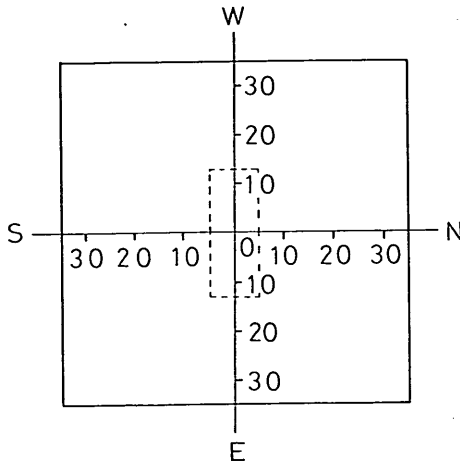


図4 上昇温度の測定位置

示すものとしてH-1形ホーン、同じく比較的大きな値を示すものとしてH-4形ホーンの2つについて比較した。電磁波の吸収体としては水飽和砂を用いた。砂槽の大きさは70cm×70cm×45cmである。電磁波出力は約10kWで、照射時間は10分である。照射距離*l*は0, 5, 10cmの3段階とした。加熱温度の測定は熱電対により行い、表面温度の上昇の測定は図4に示すようにN, E, S, Wの各向きに5cmごとに行った。内部温度の測定は中心N00, および、中心から10cmの所のN10, E10, S10, W10の所および中心からNの向きに5, 15, 20, 25, 30cmの所のN5, N15, N20, N25, N30の所で求めた。実験結果を図5~10に示す。図中aは表面温度、bは中心部および中心から10cmの所の深さ方向の温度分布、cはN側の各点の深さ方向の温度分布を示す。

2-4 実験結果

電磁波の吸収体に水飽和砂を用いたが、砂槽底部では過飽和状態などがあつたと見られ、試料の均一性は多少損なわれていたが次の事が言える。

比較した電磁ホーン2種はH-1が岩盤破碎用に設計されたものであり、H-4は単純なテーパ管であるが、開口部はともに248×93mmである。このためか、照射距離*l*=0cmでは試料の温度上昇度から見て双方の差異はあまりなく、H-1の調整箱の効果は現われていない。また、*l*=5cmではH-1の方が内部温度上昇度は若干大きい。しかし、*l*=10cmではH-4の方が表面温度および内部温度の上昇の点では効果が大きい。ただしいずれの場合でも温度上昇の点ではH-1とH-4との間に顕著な

差異は今回は見られなかったが、再入反射波特性では大きな相違点が見られる。一般に、電磁ホーンから放射された電磁波は一部が吸収体に吸収され、一部は反射するが、この反射波の一部は電磁ホーンの中に再入する。この再入電磁波が過大であるとマグネトロンに悪影響があるので、途中にサーキュレータを設け、反射波を吸収するようであるが、サーキュレータの容量の点からも再入反射波は少い方が好ましい。この点ではH-4の方が良好であった。図11に照射距離*l*と反射電力*R_c*の関係を示す。

3. 局部加熱による破碎効果

3-1 熱応力の計算

電磁波の照射によって岩盤破碎を行う場合、その効果的でしかも目的に合った照射方法を検討する事は重要な事である。一般に岩盤の深さ方向に対する電磁波の吸収率は岩盤の誘電率や誘電損率などの特性により一義的に定まってしまうが、照射面積はある程度任意に定める事ができる。すなわち、電磁波の照射による岩盤の加熱では、深さ方向では岩盤の電磁気的特性により加熱の状態が定められてしまうのに対し、加熱面積の大きさでは選択の自由度が大きい。

ここでは破碎効果に対する加熱領域の影響を調べるために、加熱領域を単純化して円筒形とし、しかも加熱領域内の温度上昇も同様とした場合の、加熱面積と加熱深さの効果の比較を行う。

まず図12のように、加熱半径*r₀*で下部に拘束体が無い場合の応力分布を比較のために用いるとすると、半径方向の応力*σ_r*、接線方向の応力*σ_t*はそれぞれ次のようになる。加熱領域内の応力はそれぞれ*σ'_r*、*σ'_t*で表わす。ここでは軸方向の拘束は無いとする、すなわち軸方向の応力*σ_z*=*σ'_z*=0とする。加熱領域の温度上昇を*ΔT*とすると、応力*σ'_r*と*σ'_t*は次の式で与えられる。

$$\sigma'_r = -\frac{E(R^2 - r_i^2)}{4 \cdot r_0 \cdot R^2} \cdot 2 \cdot r_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \tag{1}$$

$$\sigma'_t = \sigma'_r \tag{2}$$

$R \gg r_0$ とすれば(1), (2)式より

$$\sigma'_r = \sigma'_t \doteq -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2} \equiv \sigma_0 \tag{3}$$

また、拘束領域の応力*σ_r*、*σ_t*は次式で与えられる。

$$\sigma_r = \sigma_0 \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \tag{4}$$

$$\sigma_t = -\sigma_0 \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \left(\frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \tag{5}$$

よって、 $r = r_0$ では $R \gg r_0$ とすれば

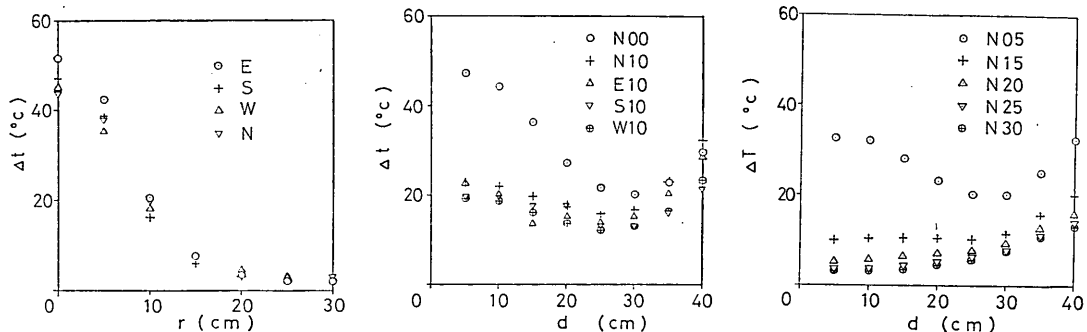


図 5 H-1 形ホーン, $l=0\text{cm}$

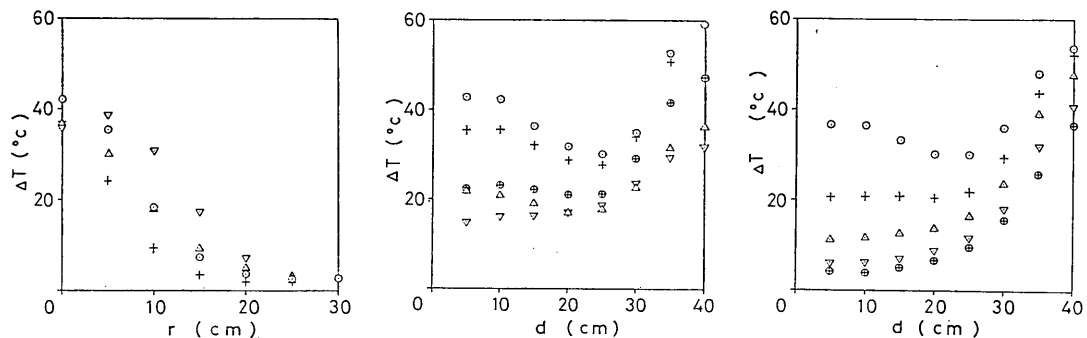


図 6 H-1 形ホーン, $l=5\text{cm}$

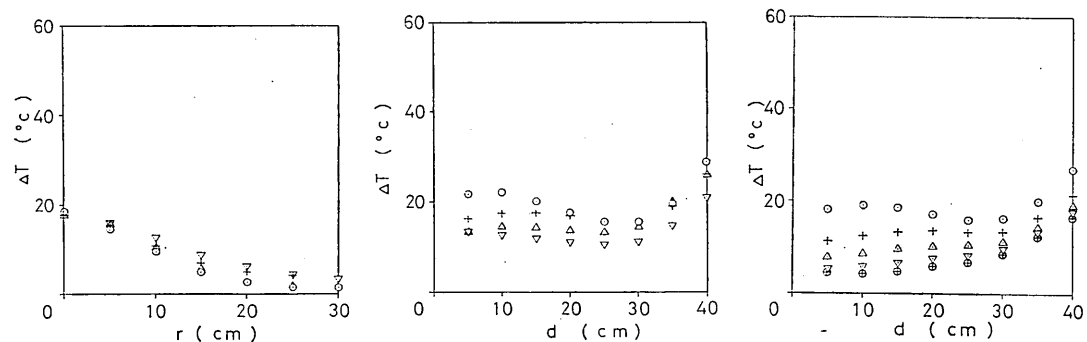


図 7 H-1 形ホーン, $l=10\text{cm}$

電磁波による岩盤の破碎

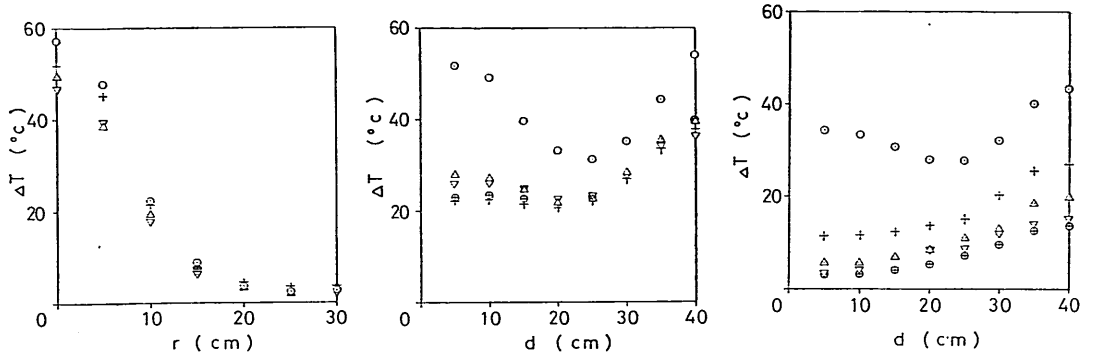


図 8 H-4形ホーン, $l=0\text{cm}$

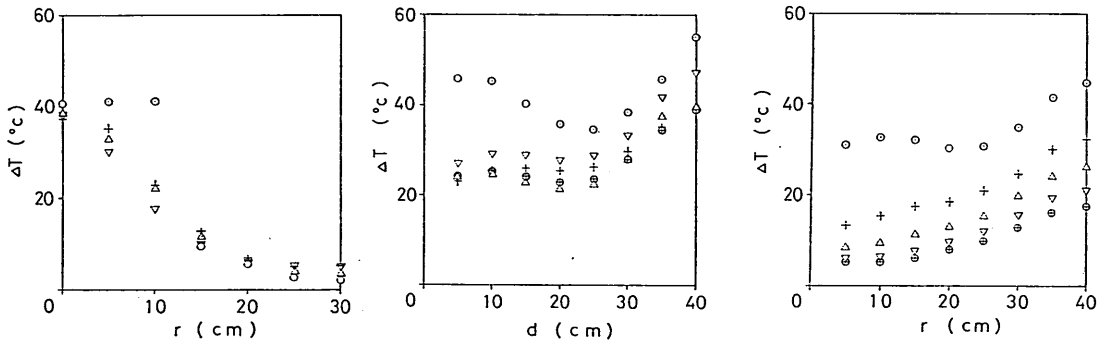


図 9 H-4形ホーン, $l=5\text{cm}$

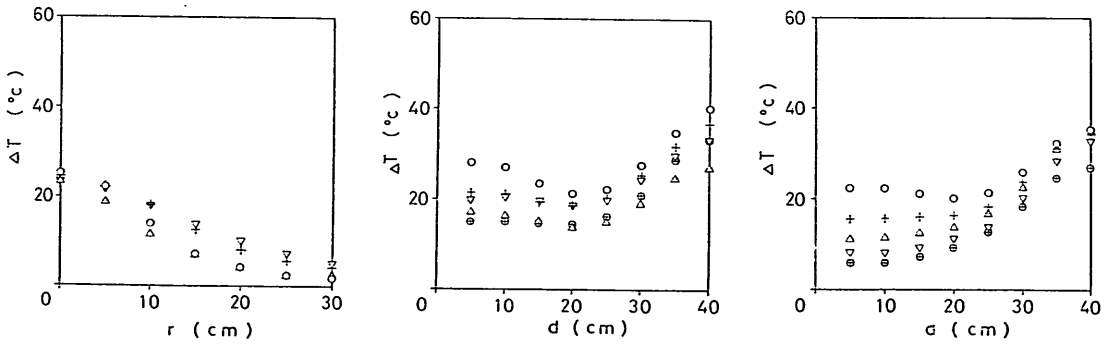


図 10 H-4形ホーン, $l=10\text{cm}$

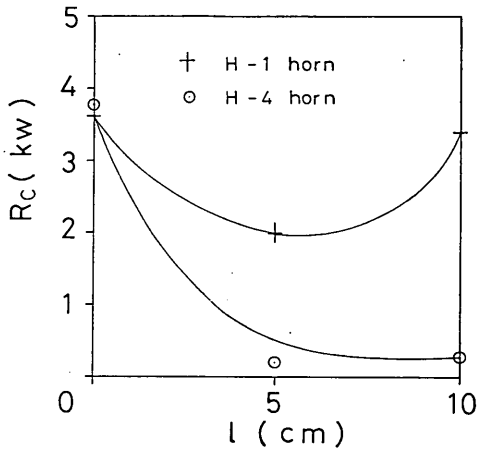


図 11 照射距離と反射電力

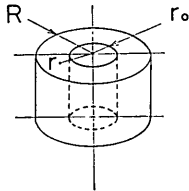


図 12 加熱モデル

$$\sigma_r \doteq \sigma_0, \quad \sigma_t \doteq -\sigma_0$$

したがって(3), (6)式から ΔT を求めると,

$$\Delta T = \frac{2\sigma_t}{E \cdot \alpha} \tag{7}$$

$\sigma_t = S_t$ で破砕が生ずるとすれば, $S_t = 30 \text{ kg/cm}^2$

$E = 1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ の場合,

$\Delta T = 60 (\text{°C})$ となる

これらの値はモルタルのものを参考とした。

以上で求めた σ_0 の値をもとにして, 次に有限要素法による応力分布について見る。拘束体は半径 $R=100 \text{ cm}$, 深さ $D=50 \text{ cm}$ の円筒形とし, 加熱領域は半径 $r_0 < 20 \text{ cm}$, 深さ $d_0 < 10 \text{ cm}$ の範囲で比較を行った。要素分割図を図13に示す。今回の計算では軸対称とし, 分割要素数は 332, 節点数は 193 である。ポアソン比 $\nu=0.2$ とし, その他は前記の値を用いた。

計算結果によると, 加熱半径および加熱深度の大きさにより熱応力の状態は変化するが, 一般的に次の傾向が見られる。加熱領域内の σ_r は圧縮応力となり $\sigma_r = (0.5 \sim 2) \times \sigma_0$ の範囲であるが, 深度が大きくなる程 σ_r は大きくなる傾向がある。 σ_t については $\sigma_t \doteq \sigma_r$ の関係が見られる。軸方向の応力 σ_y は, 中心軸の近くでは $\sigma_y = 0$ であるが, 加熱境界の側面部では $\sigma_y = \sigma_0$ なる。最大剪断応力 τ は $\tau = (0.5 \sim 1) \cdot \sigma_0$ の範囲にあり, 軸を含む面上で中心軸と約 $\pi/4$ ラジアン傾きとなる。

拘束領域の応力で, 加熱領域の下面側について見れば, $\sigma_r \doteq \sigma_t$ であり, 境界の近くでは $\sigma_r \doteq -0.5\sigma_0$ であるが, 深度が大きくなるに従い減少する。 σ_y の値は一般に小さく, 最大の場合でも $\sigma_y < -0.5\sigma_0$ である。加熱領域の側面にある拘束領域では, 境界近くでは $\sigma_r \doteq \sigma_0$ であるが, 中心からの距離が大きくなるに従い減少する。 σ_t も同様に加熱境界で大きく, $\sigma_t = -(0.6 \sim 1) \cdot \sigma_0$ であり, 中心軸から離れるに従い減少する。 σ_y も σ_t と同様であり, 境界の近くでは $\sigma_y = -(0.7 \sim 1)\sigma_0$ となる。最大剪断応力 τ は, 中心軸を含む面上の加熱境界近くで大きく, $\tau \doteq -\sigma_0$ であり, 中心軸と約 $\pi/4$ ラジアン傾きを有する。

3-2 加熱量による破砕効果

前記の有限要素法による計算から, 加熱量と破砕量の

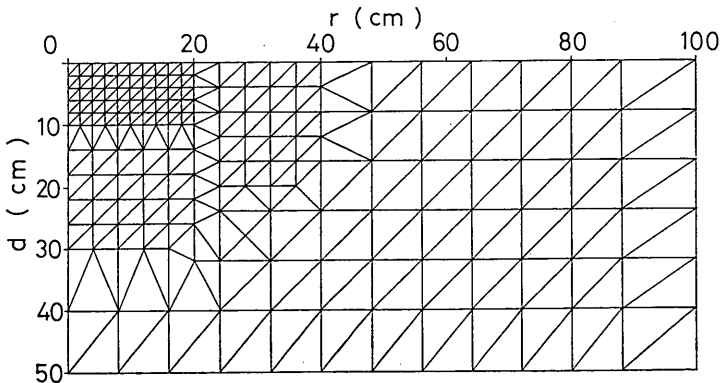


図 13 要素分割図 $R=100, D=50$

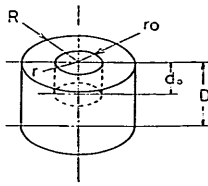


図 14 加熱モデル

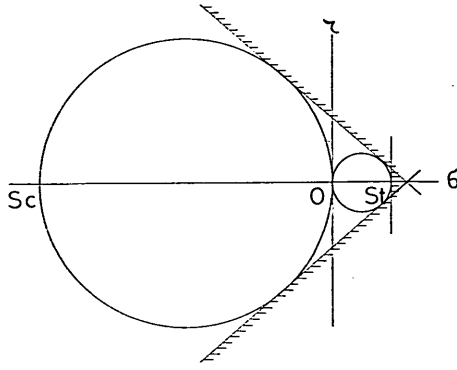


図 15 破碎条件の判定

関係を求めた。岩盤としてはモルタルブロックの例を参考として、引張り強度 S_t 、圧縮強度 S_c などを次のものを用いた。

$$S_t = 30 \text{ kg/cm}^2, \quad S_c = -300 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2, \quad \nu = 0.2, \quad \alpha = 10 \times 10^{-6}$$

加熱領域は図14に示すように、半径 r_0 、加熱深度は表面から d とし、一様に ΔT °C だけ温度上昇したものとして応力計算を行う。各要素が破碎状態に達しているかどうかの判定は、モールの説を単純化した図15の斜線部に各要素の応力状態があれば破碎条件を満足しているとした。破碎量の計算はこれら破碎条件を満している要素および、破碎要素に囲まれているため、破碎量に加えるのが適当である要素から求めたものである。

加熱領域に加えられた熱量 Q は(8)式で与えられるが、比較を簡単にするために(9)式を用いる。

$$Q = V_h \cdot \gamma \cdot c \cdot \Delta T \quad (8)$$

$$\equiv k \cdot V_0 \cdot \gamma \cdot c \cdot 50$$

$$\equiv kQ_0 \quad (9)$$

ここで V_h : 加熱領域の体積

$$V_0 = \pi \cdot r_0^2 \cdot d_0 = \pi \cdot 10^2 \cdot 4 = 400\pi :$$

単位加熱領域体積 cm^3

γ : 比重量 g/cm^3

c : 比熱 cal/g

ΔT : 加熱温度 $^{\circ}\text{C}$

Q_0 : 単体加熱量

cal

k : 加熱量係数

上記のように定義すれば、加えられる熱量 Q は、加熱領域の体積が V_0 の場合の 50°C 温度上昇するものに必要な熱量 Q_0 を単位とし、その k 倍である事を示す。

破碎量の計算結果を表1に示す。また、破碎条件に達している要素の分布を図16~21に示す。斜線部は加熱領域、暗色部は破碎条件に達している要素を示す。

本計算に用いたように、円筒形の加熱領域を有する場合には、破碎条件に達する要素は、加熱領域の周側部から始まり、次に底辺部へと進行し、加熱温度の設定値を高めるにつれ円錐状に発達する事が見られる。図22に加熱量と破碎量 V_f の関係、図23に加熱量と単位加熱量当りの破碎量 $V_f \equiv V_f/k$ との関係、図24に加熱温度と V_f の関係を示す。図22からは破碎量 V_f と加熱量 $Q = kQ_0$ は Q が比較的小さい範囲以外ではほぼ比例する事がうかがえる。これを図23のように V_f と k の関係で表わすと各プロットは2つのグループに明確に分れる。すなわち、 V_f の値が比較的小さく一定な値をとるものと、 V_f が大きくて一定値をとるグループになる。これは図24のように加熱温度 ΔT と V_f の関係で見るとより明瞭になる。すなわち加熱温度が 100°C 前後で V_f の値が大ききものと小さなものに分れる。これは図16~21からも判るように、 ΔT が 100°C 前後で、加熱領域の周囲にある各要素が全て破碎条件を満すようになるためである。

3-3 加熱領域の形状による破碎効果

前節からも加熱領域の形状、すなわち加熱半径 r_0 と加熱深さ d_0 の大きさによる破碎効果も比較できるが、ここでは加熱量係数 k を一定とした場合の比較を行う。図25は加熱領域の半径 $r_0 = 10\text{cm}$ 、加熱量係数 $k = 4$ とし、加熱深さ $d_0 = 2 \sim 10\text{cm}$ まで変化させた場合の破碎量を比較したものである。この図から $d_0 = 2 \sim 6$ までは V_f の値の減少は小さいが、 $d_0 = 8$ では急減する。この場合 ΔT は 100°C であり、加熱領域の周囲の要素の破碎状態が未発達となるためである。図26は $d_0 = 4\text{cm}$ 、 $k = 4$ と一定にし、 $r_0 = 6 \sim 20\text{cm}$ と変化させた場合の V_f を比較したものである。 $r_0 \leq 10$ までは比較的大きな V_f 値となるが、 r_0 が 14cm では急減し、 $r_0 = 20$ では破碎条件に達する要素は出現しない。

以上今回の計算結果から次の事が言える。破碎効果は単に加熱領域の形状によってのみ影響されるのではなく加熱量とにより影響される。したがって、加熱領域が小さければ、加熱量が少くても破碎条件を満す要素が出現するが、加熱領域が大きければ、相当の熱量を加えない

表 1 モルタルの加熱量と破砕量

k		k											
		1	2	3	4	5	6	7	8	12	16	20	
$r_0=10$	ΔT	50	100	150	200								
$d_0=4$	V_f	270	1,820	2,600	3,550								
$V_h=1,260$	V_f	270	910	870	890								
$r_0=10$	ΔT	100	200	300	400								
$d_0=2$	V_f	240	1,430	2,680	3,920								
$V_h=630$	V_f	240	720	890	980								
$r_0=10$	ΔT		40		80		120		160				
$d_0=10$	V_f		0		1,360		5,950		7,460				
$V_h=3,140$	V_f		0		340		990		930				
$r_0=6$	ΔT	139	278	417	556								
$d_0=4$	V_f	880	1,740	2,970	3,950								
$V_h=450$	V_f	880	870	990	990								
$r_0=20$	ΔT				50	62.5	75	87.5	100	150	200	250	
$d_0=4$	V_f				0	1,500	1,730	2,080	2,500	10,720	14,460	20,570	
$V_h=5,030$	V_f				0	300	290	300	310	890	900	1,030	
$r_0=14$	ΔT				102								
$d_0=4$	V_f				800								
$V_h=2,460$	V_f				200								
$r_0=40$	ΔT				12.5								
$d_0=4$	V_f				0								
$V_h=20,100$	V_f				0								
$r_0=10$	ΔT				133								
$d_0=6$	V_f				3,330								
$V_h=1,880$	V_f				830								
$r_0=10$	ΔT				100								
$d_0=8$	V_f				1,450								
$V_h=2,510$	V_f				360								

r_0 : 加熱半径 cm k : 加熱量係数
 d_0 : 加熱深度 cm ΔT : 加熱温度 °C
 V_h : 加熱体積 cm³
 V_f : 破砕量 cm³
 V_f' : V_f/k

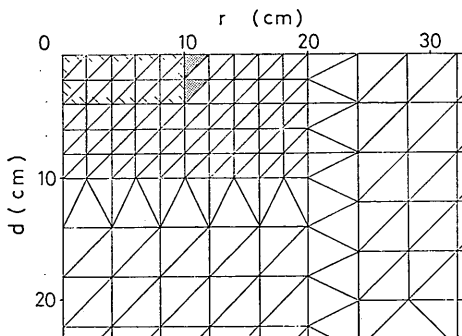


図 16-1 $r_0=10, d_0=4, \Delta T=50$

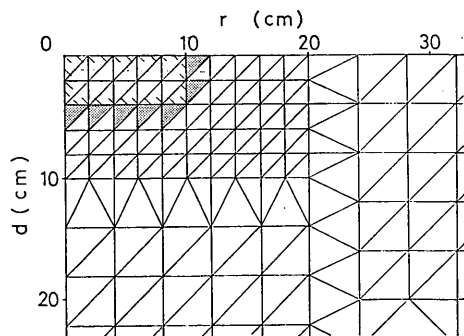


図 16-2 $r_0=10, d_0=4, \Delta T=100$

電磁波による岩盤の破碎

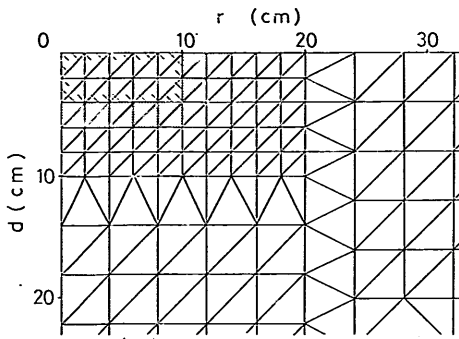


図 16-3 $r_0=10, d_0=4, \Delta T=150$

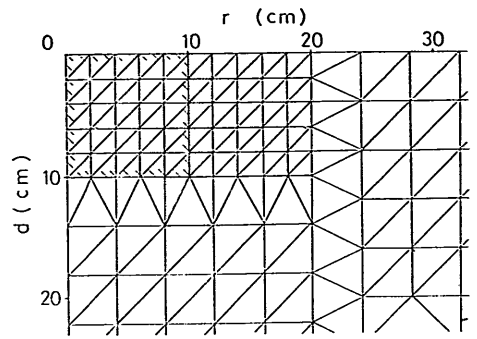


図 18-1 $r_0=10, d_0=10, \Delta T=80$

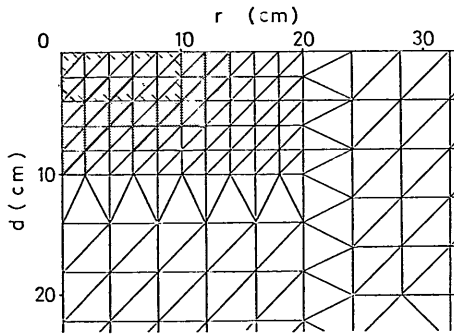


図 16-4 $r_0=10, d_0=4, \Delta T=200$

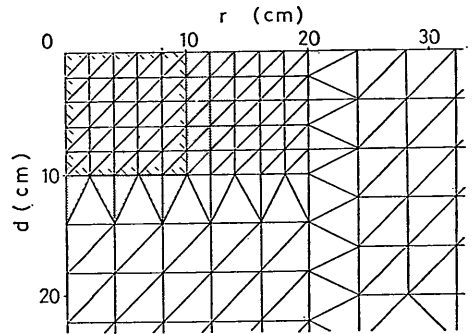


図 18-2 $r_0=10, d_0=10, \Delta T=120$

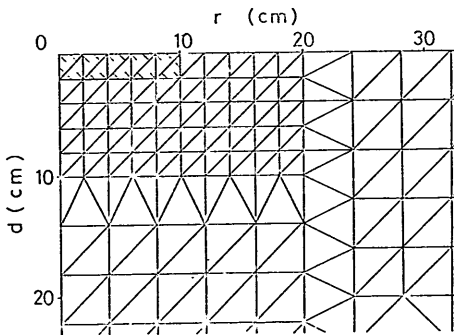


図 17-1 $r_0=10, d_0=2, \Delta T=100$

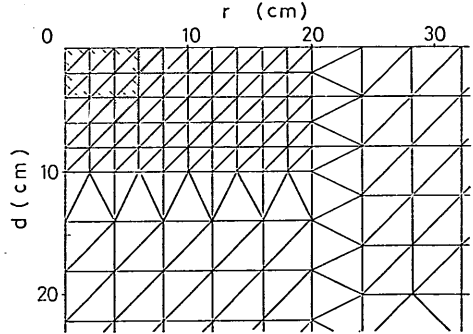


図 19-1 $r_0=6, d_0=4, \Delta T=139$

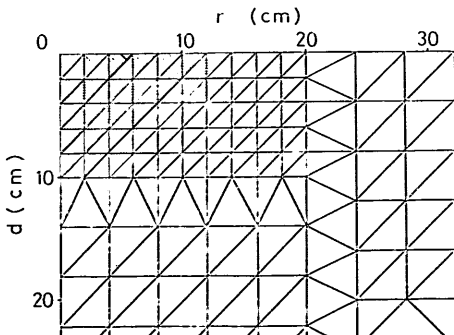


図 17-2 $r_0=10, d_0=2, \Delta T=300$

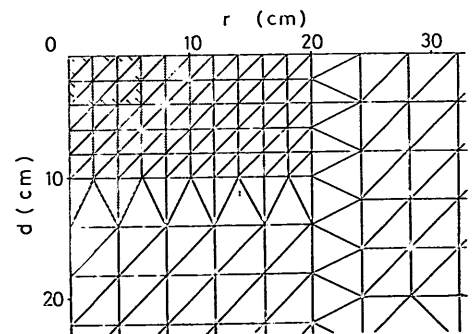


図 19-2 $r_0=6, d_0=4, \Delta T=556$

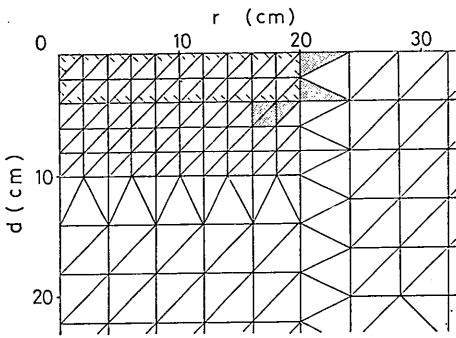


図 20-1 $r_0=20, d_0=4, \Delta T=75$

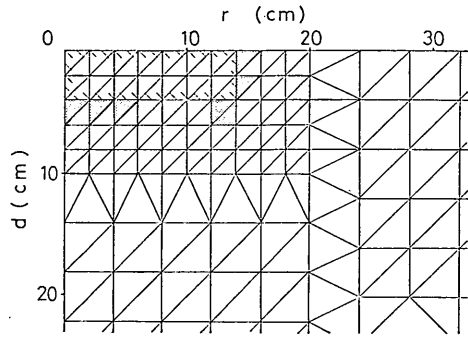


図 21-1 $r_0=14, d_0=4, \Delta T=102$

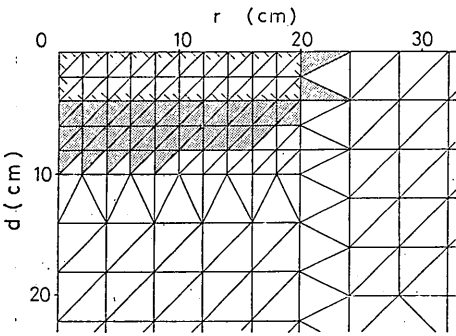


図 20-2 $r_0=20, d_0=4, \Delta T=150$

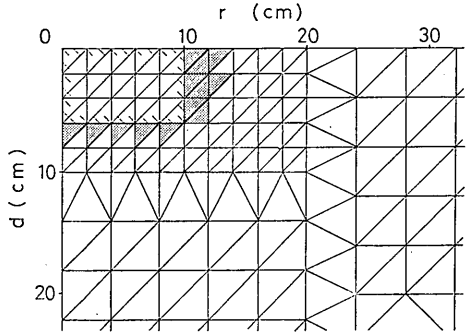


図 21-2 $r_0=10, d_0=6, \Delta T=133$

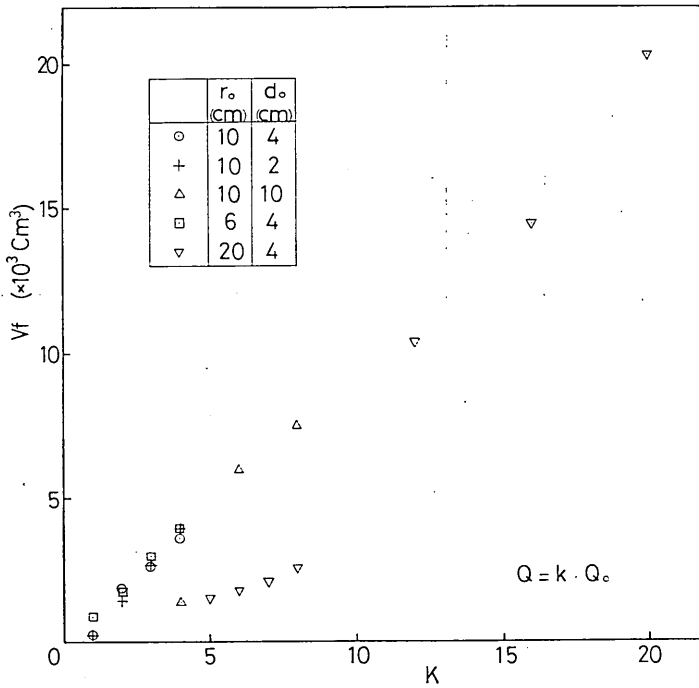


図 22 破碎量と加熱量

電磁波による岩盤の破碎

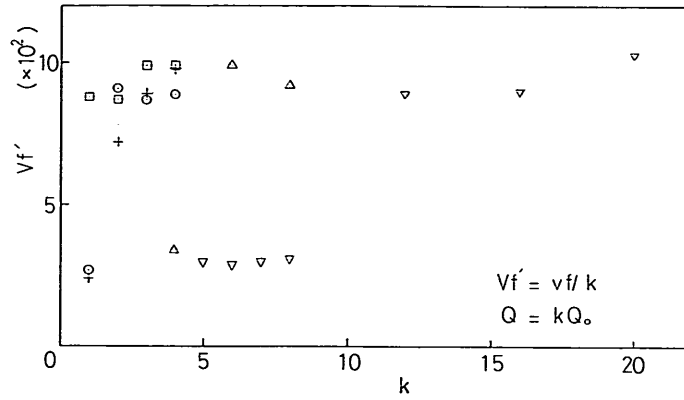


図 23 単位加熱量と破碎量

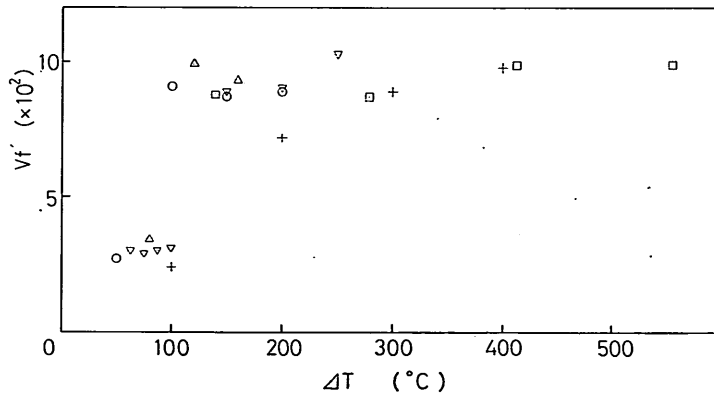


図 24 加熱温度と破碎量

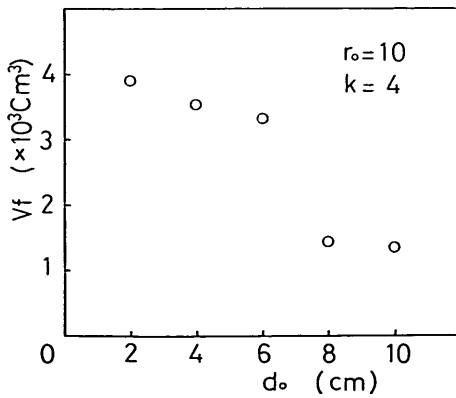


図 25 加熱深さと破碎量

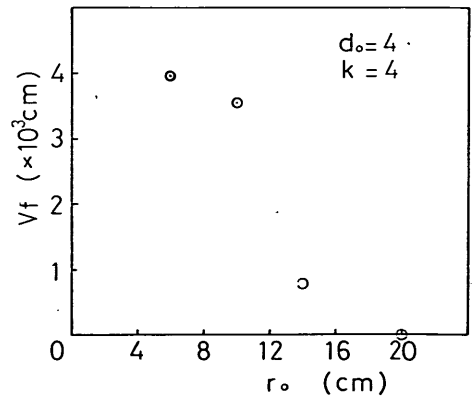


図 26 加熱半径と破碎量

と破砕要素は出現しない。破砕要素が出現する際の加熱温度は加熱領域の形状にあまり関係なく 50°C 前後であり、比較のために行った円筒の軸加熱の場合の破砕推定温度である 60°C とほぼ一致する。加熱量と破砕量はほぼ比例するが、加熱量が比較的大きい場合と小さい場合で2つの比例係数をとる。この場合の加熱量は $\Delta T \approx 100^{\circ}\text{C}$ となる量が境界となり、これより大きければ V_f 、すなわち破砕効果を示す単位熱量当りの破砕量の値が大きくなる。

4. 熱応力破砕モデルによる岩盤の破砕

4-1 概 説

電磁波を照射され、加熱された岩盤は、岩盤の電磁気的特性や照射方法などにより、ある分布をもった温度上昇を示す。ここでは熱応力による岩盤の破砕をモデル化する。各要素の上昇温度の分布は実験値をもとに近似式により与える事とし、その重心の座標により定めた。ここでの計算は実際の状態に近づけるために、ある温度分布を与えて応力計算をし、各要素が破砕条件を満足して

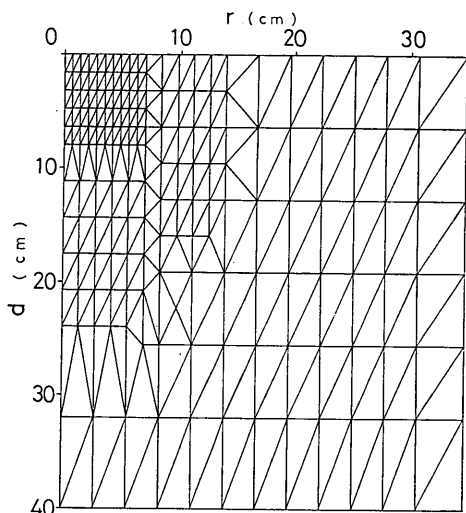


図 27 要素分割図 $R=35, D=40$

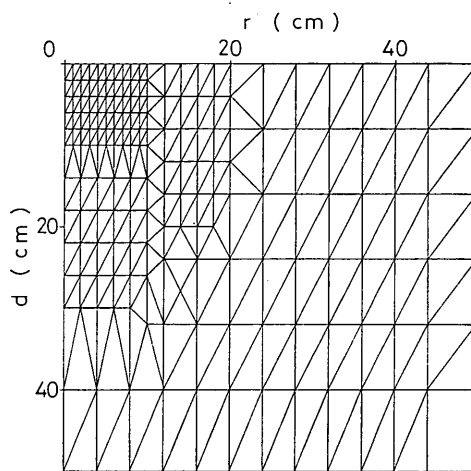


図 28 要素分割図 $R=50, D=50$

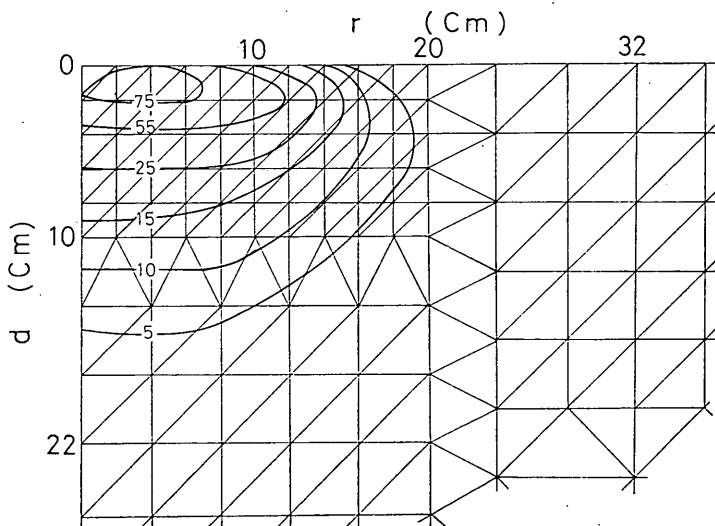


図 29 モルタルの温度分布

電磁波による岩盤の破碎

いるかどうかを先と同様に判定し、ある要素の応力状態が破碎条件を満している場合には、それらの要素のヤング率を $E=0$ とし、同一の温度分布で破碎する要素が出現しなくなるまで計算を繰返す。次に温度分布関数の代表となる最高値をステップ状に上昇させ、各要素の温度もこれに比例させた新しい温度分布により計算を同様に行う。この場合前回までに破碎した要素のヤング率は全て $E=0$ とした。岩盤の形状は半径 R 、深さ D の円筒状とし、要素分割の方法は前記のものと同様であるが、実験試料の大きさなどを考慮して、適宜伸縮したものをを用いた。岩盤の引張強度、圧縮強度、ヤング率、ポアソン

比、線膨張率などは加熱温度などにより変化するものであるが、今回の計算では一定とし、常温時の値を用いた。

4-2 モルタルブロックのモデルと破碎

モルタルブロックの大きさは次の3つとした。

$R=35, D=40, R=50, D=50, R=100, D=50$ cm

モルタルブロックの特性は次のものとした。

$S_t=30\text{kg/cm}^2, S_c=-300\text{kg/cm}^2$

$E=1 \times 10^5 \text{kg/cm}^2, \nu=0.2, \alpha=10 \times 10^{-6}$

要素の分割図を図27, 28および13に示す。

温度分布は図29の実験例をもとに次の近似式によった。

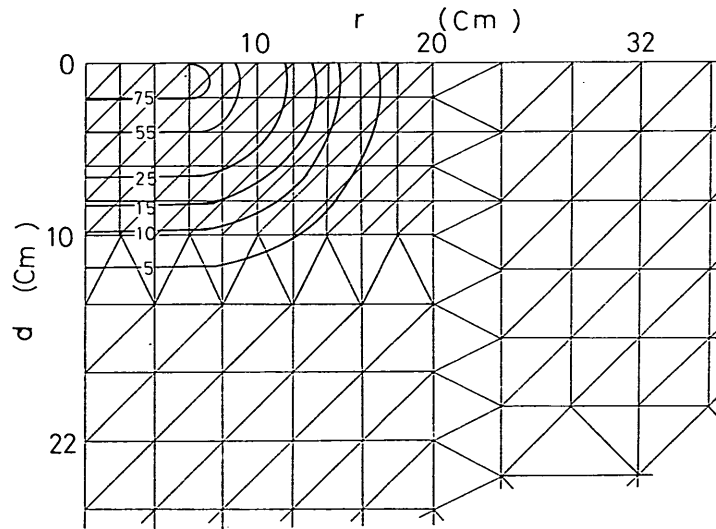


図 30 近似式によるモルタルの温度分布

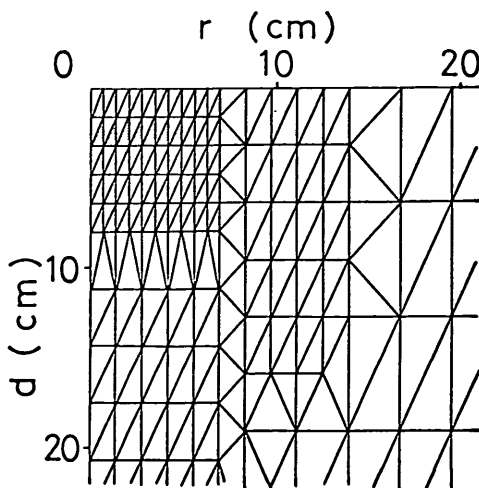


図 31-1 $R_0=35, D=40, T_0=150$

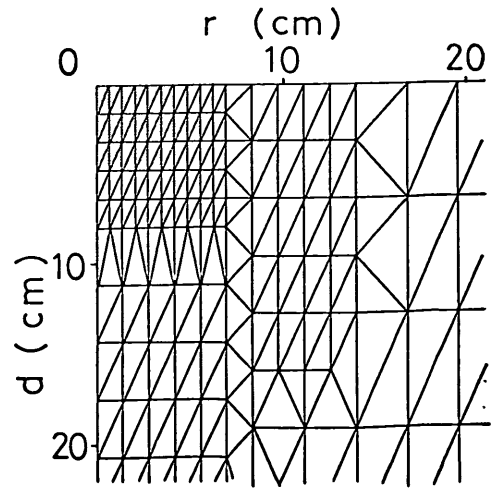


図 31-2 $T_0=200$

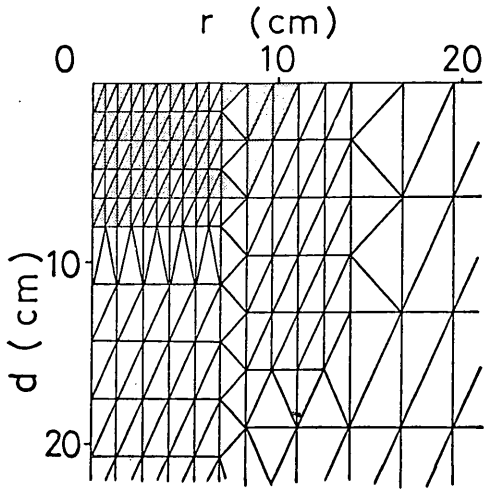


図 31-3 $T_0=300$

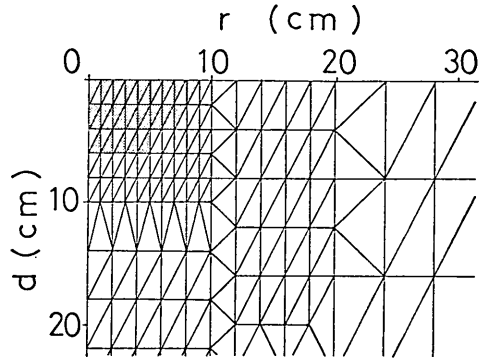


図 32-2 $T_0=200$

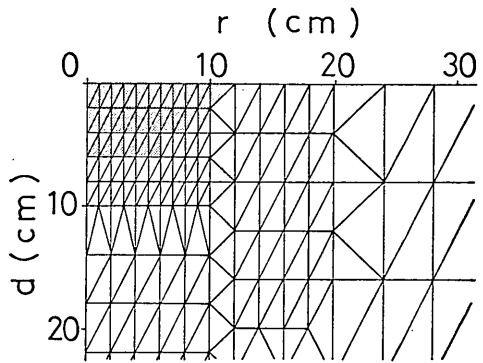


図 32-3 $T_0=400$

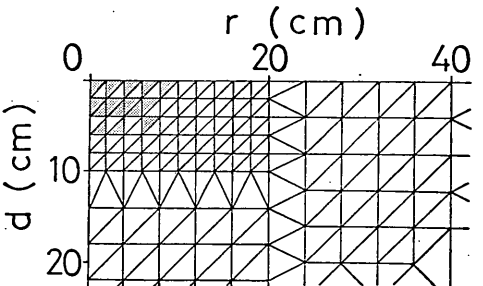


図 33-1 $R_0=100, D=50, T_0=150$

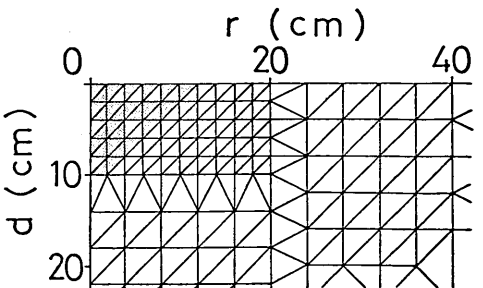


図 33-2 $T_0=300$

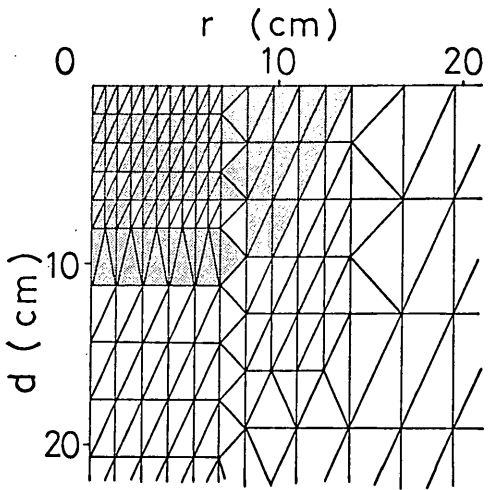


図 31-4 $T_0=650$

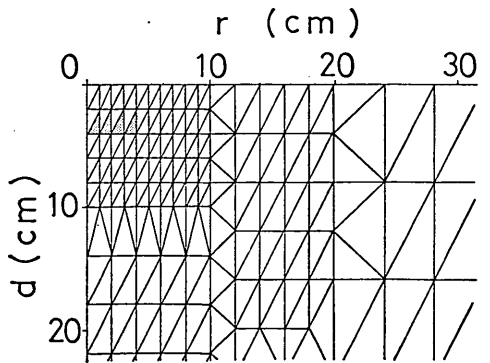


図 32-1 $R_0=50, D=50, T_0=150$

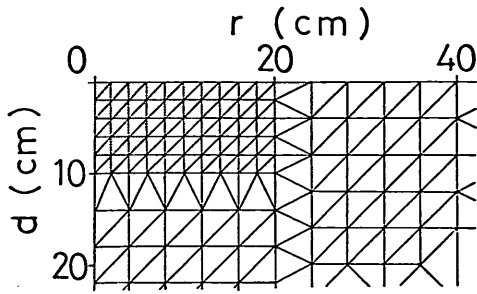


図 33-3 $T_0=550$

$$T(r, d) = T_0 \cdot c(r, d)$$

ここで $c(r, d) = 1, 0 \leq r \leq 6, 0 \leq d \leq 2$
 $c(r, d) = e^{a(d-2)}, 0 \leq r \leq 6, d > 2$
 $c(r, d) = 1, r > 6, S \leq 1$
 $c(r, d) = e^{a(S-1)}, r > 6, S > 1$
 $S = [(r-6)^2 + (d-1)^2]^{0.5}$

$T_0=75, a=-0.3$ とした場合の温度分布を図30に示す。

T_0 を 50°C ステップにした場合の計算結果の例を図31~33に示す、図31は $R=35, D=40\text{cm}$ 、図32は $R=50, D=50$ 図33は $R=100, D=50$ の場合である。破碎条件に達した要素は暗色で示している。

図34に破碎量 V_f と加熱温度 T_0 の関係を示す。ブロックの大きさにより差異が見られるが、破碎量は階段状

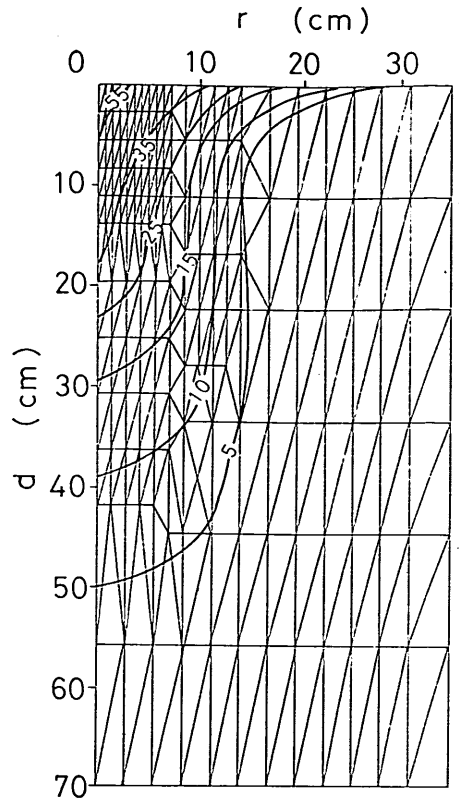


図 35 花崗岩の温度分布

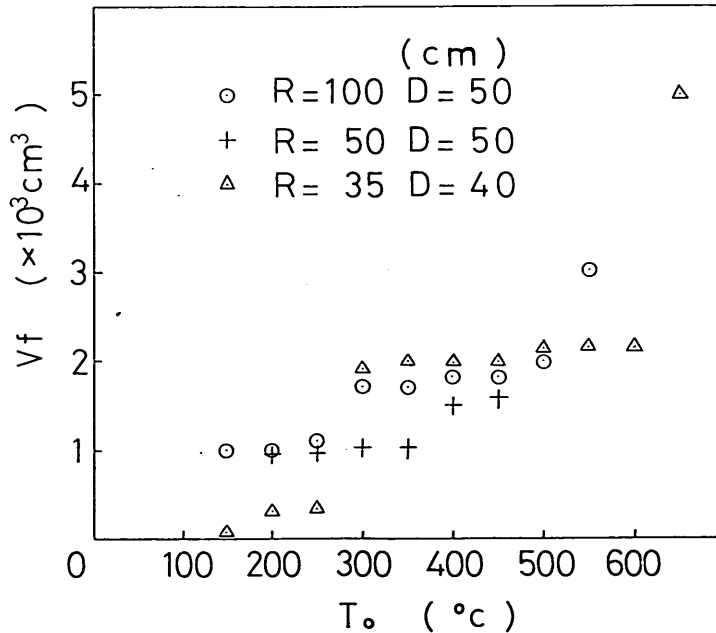


図 34 破碎量と加熱温度

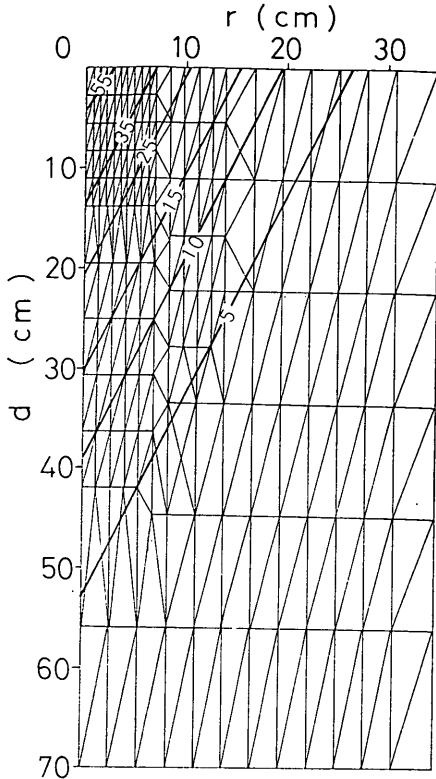


図 36 近似式による花崗岩の温度分布

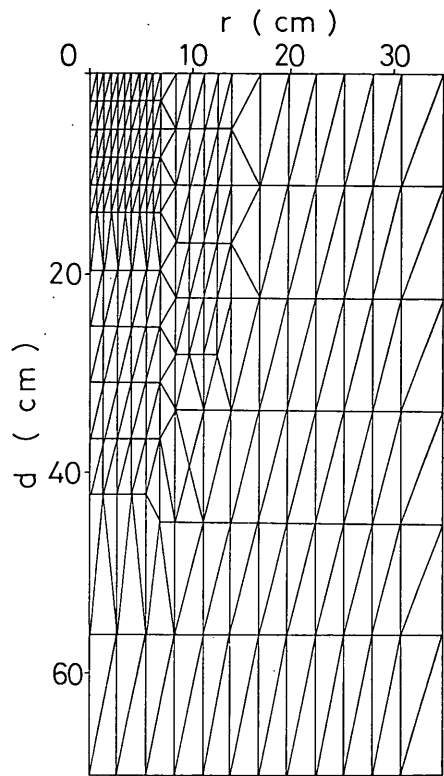


図 37 要素分割図 $R=35, D=70$

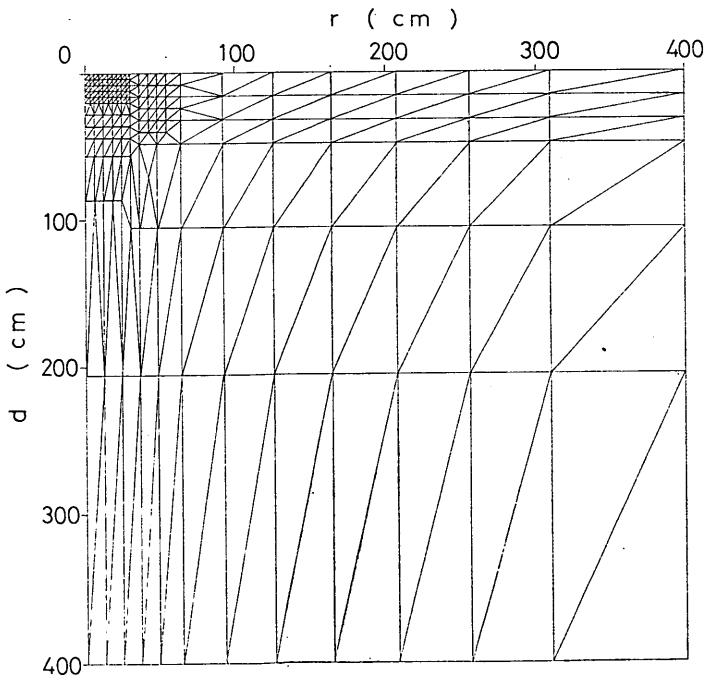


図 38 要素分割図 $R=400, D=400$

電磁波による岩盤の破碎

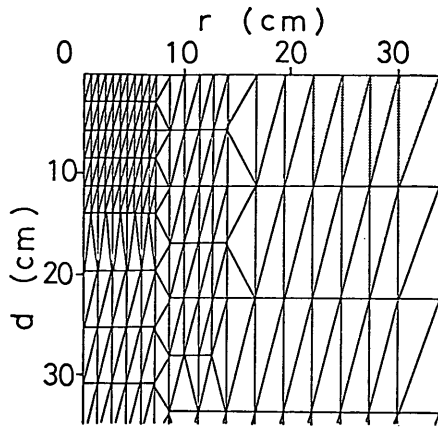


図 39-1 $R=35, D=70$
 $T_0=200$, 第1ステップ

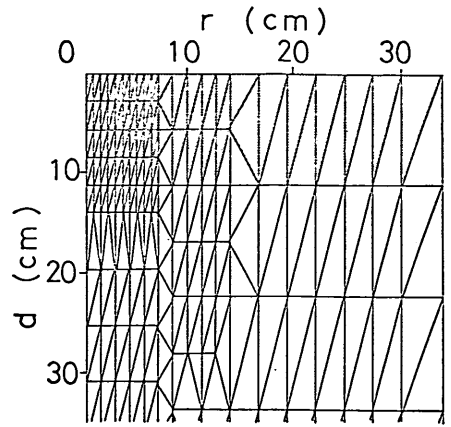


図 39-4 $T_0=200$, 最終ステップ

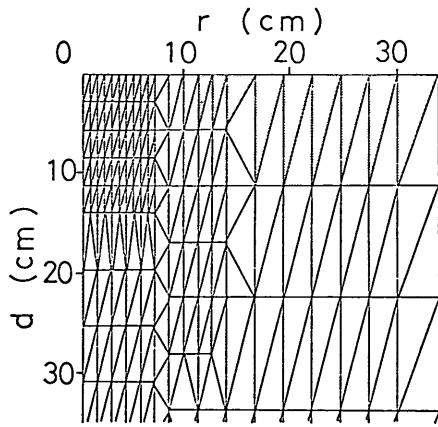


図 39-2 $T_0=200$, 第2ステップ

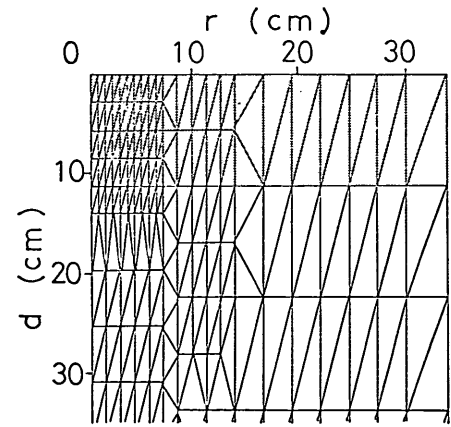


図 39-5 $T_0=300$

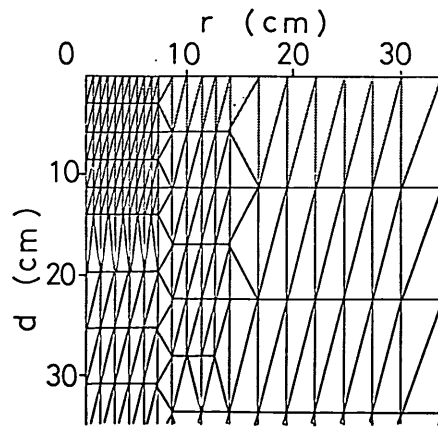


図 39-3 $T_0=200$, 第3ステップ

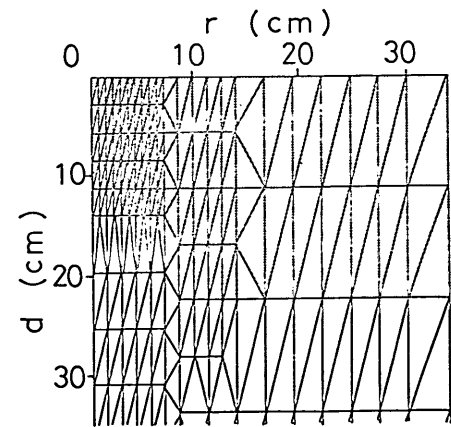


図 39-6 $T_0=400$

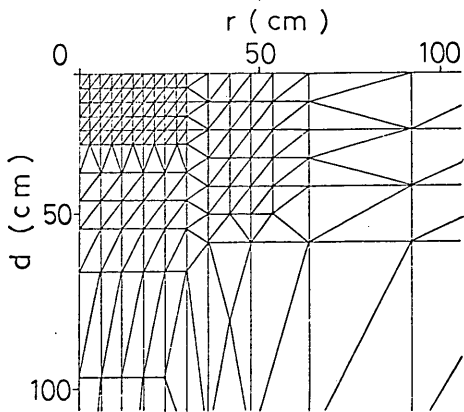


図 40-1 $R=400, D=400$
 $T_0=300$, 第1ステップ

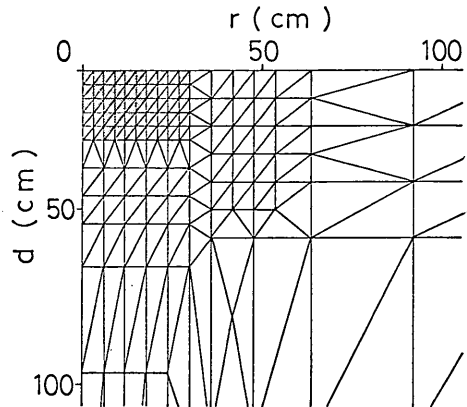


図 40-4 $T_0=500$, 第3ステップ

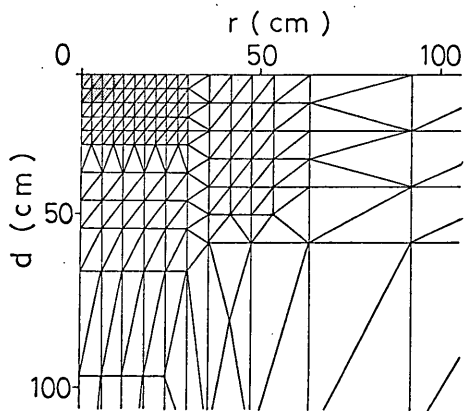


図 40-2 $T_0=300$, 最終ステップ

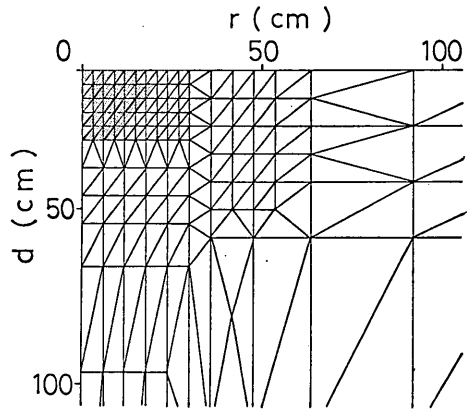


図 40-5 $T_0=500$, 最終ステップ

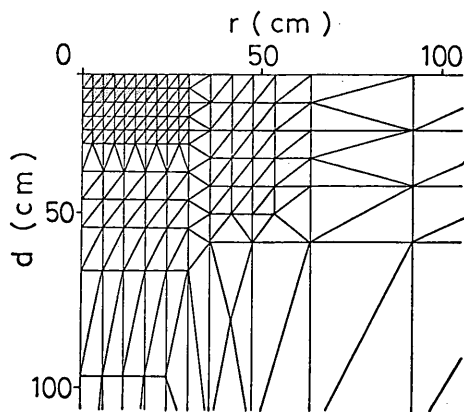


図 40-3 $T_0=400$, 第1ステップ

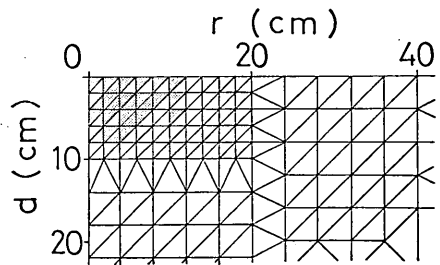


図 41 $R=100, D=500, T_0=300$

に増加する傾向があるが、大局的に見れば両者はほぼ比例関係が見られる。

4-3 花崗岩のモデルと破碎

電磁波の照射を受けた花崗岩の上昇温度分布は、モルタルブロックの場合と異ったパターンとなる。実験例を図35に示す。これをもとに上昇温度の分布を次式で近似した。

$$T(r, d) = T_0 \cdot e^{a_1 r + a_2 d}$$

ここで $T_0 = 70^\circ\text{C}$, $a_1 = -0.1$, $a_2 = -0.05$ とすると図36のような分布が得られる。

花崗岩の特性には次のものを用い、温度等によりそれらの値は変化せず一定とした。

$$E = 7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2, \quad \nu = 0.2 \quad \alpha = 8 \times 10^{-6},$$

$$S_c = 100 \text{ kg/cm}^2, \quad S_t = -1,000 \text{ kg/cm}^2$$

試料の大きさは $R=35\text{cm}$, $D=70$, $R=100$, $D=50$ および $R=400$, $D=400$ の3種類とした。要素分割図をそれぞれ図37, 13, 38に示す。

応力計算では $T_0 = 100^\circ\text{C}$ から始め温度上昇ステップは 100°C とした。要素の応力状態による破碎の判定は前記のものと同じとした。 $R=35$, $D=70\text{cm}$ の場合では $T_0 = 200^\circ\text{C}$ から上面周辺部から破碎が始まり、同一温度で、破碎が進行する。 $T_0 = 300, 400^\circ\text{C}$ の場合も同一温度での破碎の進行が大きい。これらの計算結果による破碎要素の分布を図39に示す。破碎に際する要素の応力状態は接線方向の応力 σ_t が最大となる場合が多いが、 T_0 が高くなるに従い、中心軸の近い所では軸方向の応力 σ_a が大きくなるものが現われる。

$R=400$, $D=400\text{cm}$ とした場合の破碎要素の分布を

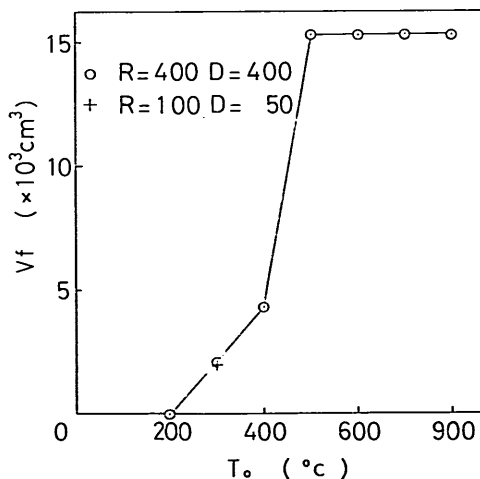


図42 加熱温度と破碎量

図40に示す。破碎要素の分布はモルタルブロックの場合と同様に円錐状の分布となる。 $R=100$, $D=50$ とした場合にも $T_0 = 300^\circ\text{C}$ では図41のように同様な分布となる。破碎量 V_f と T_0 の関係を図42に示す。ともに、 $T_0 = 200^\circ\text{C}$ では $V_f = 0$ であり、 $T_0 = 300^\circ\text{C}$ で $V_f = 2,000 \text{ cm}^2$ と同じ値をとる。 $T_0 = 500^\circ\text{C}$ で急増するが、 $T_0 = 900^\circ\text{C}$ までは V_f は増加しない。

5. モルタル試料の電磁波による破碎

5-1 概 説

モルタルブロックの電磁波による破碎性を調べるために、次の実験を行った。電磁ホーンは先の電力密度の測定に用いた H-2 形のものである。まず照射距離 l による反射電力および加熱による温度上昇などから、適当な照射距離 l を定める。次に照射時間と照射電力の大きさの影響を調べるために、マグネトロン陽極電流が 1.0, 2.0, 2.8 アンペアの3通りについて、照射時間を変化させて破碎量 V_f を測定する。この場合に、照射電力を正確に求める事は困難なので、マグネトロンの出力 P_m をもとにすると、それぞれ 10, 19, 27kW に相当する。モルタルブロックの内部で熱に変換される量は伝搬損、反射などのためにマグネトロンの出力よりも減少する。またモルタルブロックにより反射され、導波管中に再入する反射電力だけでも、破碎の進行とともに変化するもので、ここでは前述のマグネロン出力をもとに実験データを整理する。

モルタルブロックの大きさは2種類あり、 $70 \times 70 \times 40$ と $100 \times 100 \times 50\text{cm}$ である。セメントと砂の配合比は 1:2 で、打込みから4ヶ月以上経過しており、圧縮強度は $200 \sim 300 \text{ kg/cm}^2$ (直径 10cm, 高さ約 20cm の試料)、引張り強度は $15 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ (直径 10cm, 厚さ約 10cm 圧裂試験による) である。電磁波の照射方法は電力密度の測定の場合とほぼ同じである。

5-2 実験結果

まず照射距離 l と、導波管に再入して来る反射波の電力 R_c との関係を図43に示す。マグネロン出力 P_m は 10kW である。図から分るように採用した H-2 形ホーンには R_c が最小になる照射距離 l が存在し、これよりも大きくても小さくても R_c の値は大きい。図44は l と照射表面の中心部の温度上昇 ΔT_c の関係を示すが、これによると照射距離 l が小さい程温度上昇は大きい。 $l = 2\text{cm}$ では破碎が発生したために比較的小きな値となった。照射時間は全て2分とした。

以上の実験で照射距離 l は 2 cm 以内とした方が効果

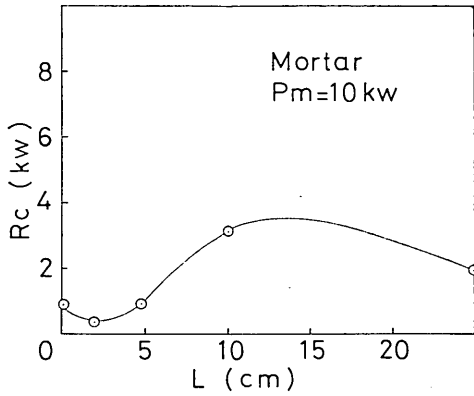


図 43 照射距離と反射電力

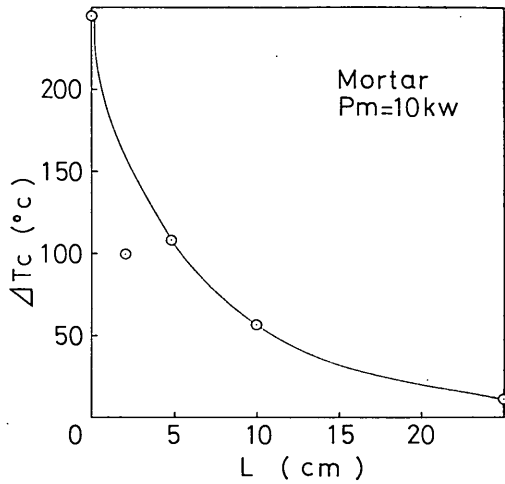


図 44 照射距離と表面温度の上昇

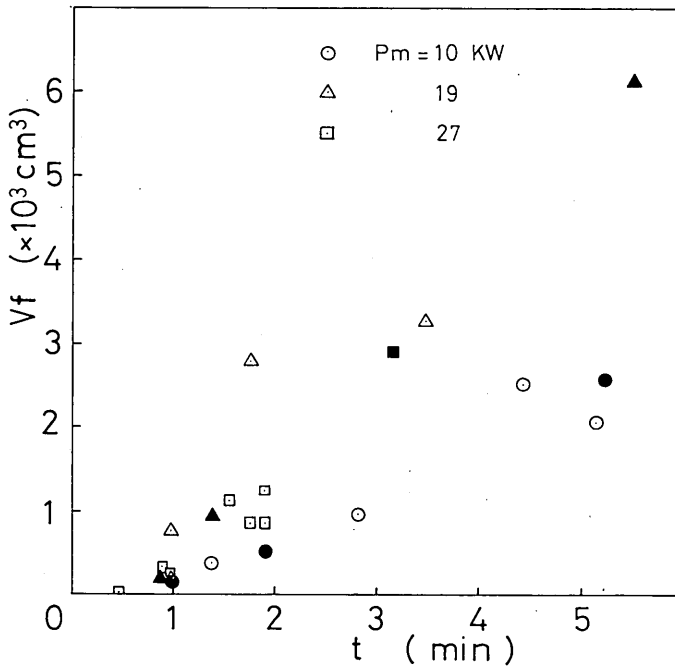


図 45 照射時間と破砕量

的と思われたので、10kW の全ケースと、19kW の 3 ケースまでは $l=2$ としたが、19kW の 4 ケースと 27kW の全ケースは $l=4$ とした。これは破砕片による電磁ホーンの損傷を少なくするための処置であるが、破砕の進行とともに反射電力 R_c 値を増大させやすい結果となった。

図45に破砕量 V_f と照射時間 t の関係を示す。各記号

とも白ぬきのものはモルタルブロックの大きさが $70 \times 70 \times 40$ cm のもの、黒ぬりのものは $100 \times 100 \times 50$ のものを示す。

マグネトロン出力 P_m が 10, 19, 27kW とそれぞれについて見ても照射時間の増大とともに破砕量も増加する事が分かるが、 $P_m=19$ kW の場合の破砕量が $P_m=10$ kW の場合の約 2 倍を示すのに対し、 $P_m=27$ kW の場合は

電磁波による岩盤の破碎

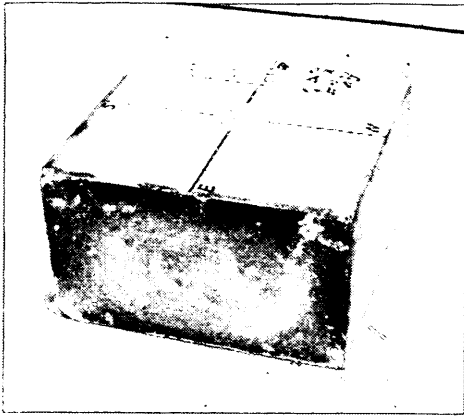


図 46-1 $P_m=27\text{kW}$, $t=28\text{秒}$, $V_f=40\text{cm}^3$

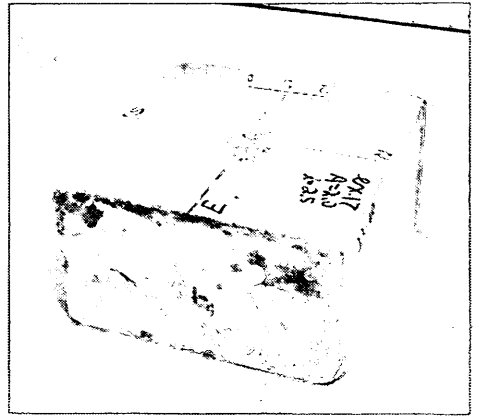


図 46-3 $P_m=19\text{kW}$, $t=59\text{秒}$, $V_f=770\text{cm}^3$

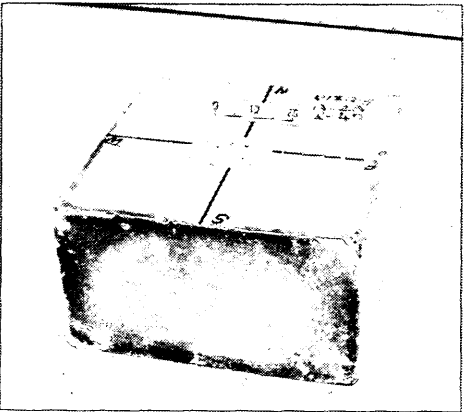


図 46-2 $P_m=27\text{kW}$, $t=50\text{秒}$, $V_f=240\text{cm}^3$

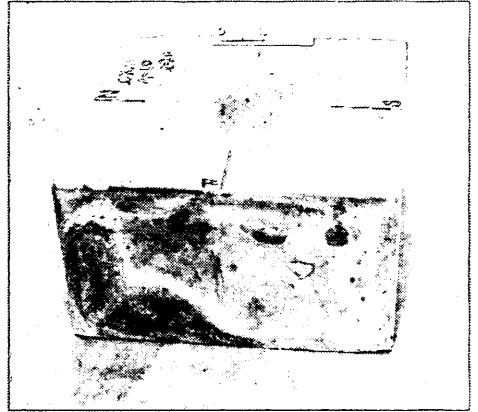


図 46-4 $P_m=10\text{kW}$, $t=4\text{分}26\text{秒}$, $V_f=2,530\text{cm}^3$

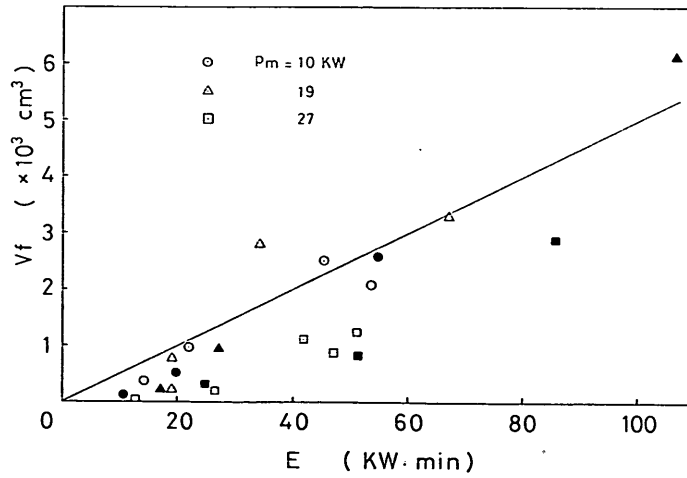


図 47 照射エネルギーと破碎量

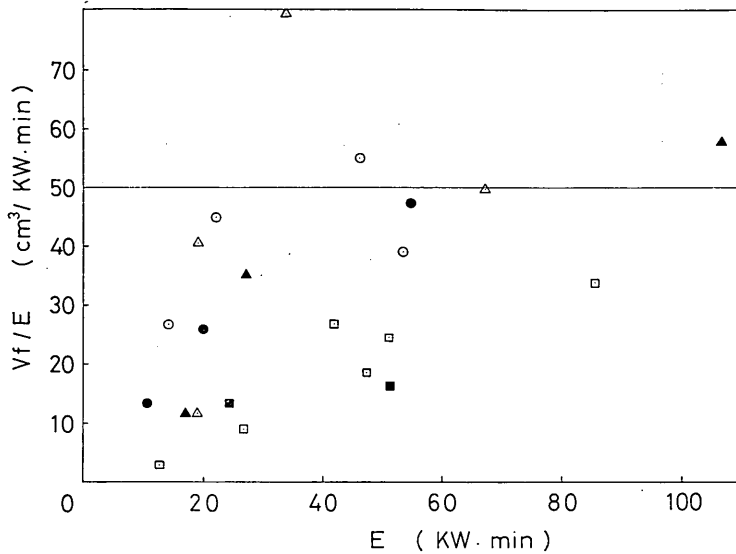


図 48 単位照射エネルギーと破砕量

もので、 $E > 20$ では V_f/E の値は50程度が期待できる。

6. 花崗岩の電磁波による破砕

花崗岩はモルタルに較べると誘電損率が小さいために電磁波の吸収が少い。従って電磁波の照射による温度上昇もモルタルほど顕著には現われず、また加熱領域も比較的広くなる。このため小形の試料を電磁波により加熱したのでは周囲の拘束力が十分でないために、接線応力によるクラックが円周部から発生してしまい、中心部にはモルタルブロックの場合に発生したような円錐状の破砕は見られない事が計算からも示されている。

ここでは約 $80 \times 80 \times 80 \text{cm}$ の花崗岩に $P_m = 27 \text{kW}$ で4分間、 19kW で10分間ずつ3回照射した例を示す。各回とも終了時にクラックの発生の有無を点検したのち、続けて加熱したものである。最終回でクラックの発生が見られたため、これ以上の加熱は行わなかった。クラックは図49に示されるように2本発生し、側面部では深さ約20cmに達した。加熱面の中心での温度上昇は約 160°C であったが、加熱直後では 200°C 前後に達していたと思われる。

7. あとがき

本報告ではモルタル試料の破砕について、1種類の電磁ホーンでしかも実験方法も固定照射法の1通りだけとなったが、今後電磁ホーンや破砕方法の比較などを行いたい。マグネトロン出力 $P_m = 27 \text{kW}$ の実験については

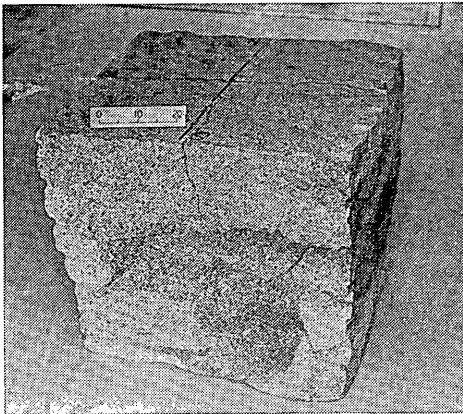


図 49 花崗岩に発生したクラック

$P_m = 19 \text{kW}$ の場合とあまり変化が見られない。

破砕形状は図46に示すように若干楕円状の底面を有する円錐形となり、円錐の高さは、底面の平均径の約6分の1程度である。

次に図47に示すように、破砕量 V_f と照射エネルギー E の関係を求めると双方の関係がより明らかになる。すなわちはほぼ比例に近い関係が見られ、照射電力 $P_m = 10 \text{kW}$ と 19kW との間には明確な差異は見られない。ここで照射エネルギーの単位は $\text{kW} \cdot \text{min}$ 、すなわち $1 \text{kW} \cdot 1$ 分間の電力量とした。図中の直線は破砕が段階的に進行するのでその傾きを示したものである。

図48は単位照射エネルギー当りの破砕量の関係を示す

電磁波による岩盤の破碎

19kW 出力の場合とあまり変わらないデータが得られ、結果的には 27kW 出力の場合には効率の悪いものとなってしまったが、この原因には照射距離を大きくしたための反射の増大、電磁ホーンの破碎片の付着などによる損失などによる損失の増大および反射電力が大きくなったためのマグネトロン出力の減少などが考えられる。

$P_m=19kW$ と $27kW$ では $27kW$ の場合には約 4 割程出力が大きくなるが、 $P_m=19kW$ の場合の反射を 5% とし、 $27kW$ の場合の反射を 10%、電磁ホーン部の損失を 5%、マグネトロン出力の減少を 5% と仮定すれば、照射電力の比は $P_m=27kW$ の方は $19kW$ の場合に比べて約 2 割程度しか増大していない事になり明確な差異が現われなかったものと思われる。しかし実験中の破碎の進行状況には、 $P_m=27kW$ とした場合には $19kW$ の場合に比べて破碎音が小さく、回数が多い事が観察された。

破碎モデルによる計算では破碎した要素は飛散せずに原位置にとどまると仮定し、照射の進行とともに温度も上昇するとしたが、垂直上方から照射した今回の実験でも大半は飛散してしまい、計算で用いた $200^{\circ}C$ 以上の温度上昇を示す破碎片は観察できなかった。計算では温度上昇 ΔT と破碎量、実験ではマグネトロン出力 P_m と破碎量でまとめてあるが、この両者をあえて対応させれば、温度上昇が $100^{\circ}C$ はエネルギー量では約 $5kW \cdot \text{min}$ となる。従って図 34 と図 48 を比較すれば、マグネトロン出力の約半分程度が熱エネルギーに変換されていると言える。

花崗岩の破碎については大きな試料を得る事が困難なため、試料の周辺を機械的に加圧して半無限岩盤に近い状態をつくり実験する事を計画している。

(1975年6月3日受付)

謝 辞

本報告における有限要素法の計算においては岩崎技官からプログラムの使用などで、また材料試験では関係各位のご協力を頂いた事に感謝いたします。

参 考 文 献

小岩 苔生：電磁波による岩盤破碎について
第 23 回直技研報資，運輸省港湾技術研究所，
1972 年 11 月

M. KONDO, T. KOIWA: Rock Breaking by Microwave
WODCON V, 1974 年, pp. 251~285

岩崎 峯夫：剛性マトリックス組立の有効な一方法，
港研報告 Vol. 11, No. 1, pp. 151~162

鈴木 光：岩盤力学と計測，内田老鶴圃新社，1973 年 3 月

小岩 苔生・他：電磁波による岩石破碎実験装置の試作
技研資料 No. 196, 1974 年 12 月

記 号 表

R	: 拘束体の半径
r_0	: 加熱領域の半径
D	: 拘束体の高さ
d_0	: 加熱領域の深さ
σ_r	: 拘束領域の半径方向の応力
σ_r'	: 加熱領域の半径方向の応力
σ_t	: 拘束領域接線方向の応力
σ_t'	: 加熱領域接線方向の応力
E	: ヤング率
α	: 線膨張率
$\sigma_0 = -0.5 \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T$	
ΔT	: 温度上昇
τ'	: 加熱領域内剪断応力
τ	: 拘束領域内剪断応力
S_t	: 引張強度
S_c	: 圧縮強度
ν	: ポアソン比
Q	: 加熱量
V_h	: 加熱領域の体積
V_0	: 単位加熱領域体積
γ	: 比重量
c	: 比熱
Q_0	: 単位加熱量
k	: 加熱量係数
V_f	: 破碎量
$V_f' = V_f/k$	
T	: 温度上昇の分布関数
T_0	: 最高温度上昇
c	: 分布関数
r	: 半径
d	: 深さ
a	: 減衰係数
e	: 自然対数の底
l	: 照射距離
P_m	: マグネトロン出力
R_c	: 再入反射電力
ΔT_c	: 照射表面の中心部の温度上昇
E	: 照射エネルギー